

ヘテロ複雑システムによる コミュニケーション理解のための 神経機構の解明

領域番号 4103

平成21年度～平成25年度科学研究費助成事業（科学研究費補助金）（新学術領域研究（研究領域提案型））研究成果報告書



平成27年3月

領域代表者 津田一郎
北海道大学電子科学研究所教授

新学術領域研究
4103

ヘテロ複雑システムによるコミュニケーション理解のための神経機構の解明

北海道大学電子科学研究所
教授 津田一郎

平成二十七年三月

目次

はしがき	1
研究組織	2
交付決定額.....	6
研究発表	
(1) 雑誌論文.....	7
(2) 学会発表.....	27
(3) 図書.....	69
研究成果による産業財産権の出願・取得状況.....	70
研究成果	
総括班	71
計画班	81
平成 22-23 年度公募班.....	171
平成 24-25 年度公募班.....	265

はしがき

本成果報告書は平成 21 年度から平成 25 年度の 5 年間に行われた文部科学省科学研究費補助金新学術領域研究（研究領域提案型）「ヘテロ複雑システムによるコミュニケーション理解のための神経機構の解明」に関するものであります。脳科学研究はここ 10 年で爆発的に進展してきておりますが、本質的な問題で解決されていないことも未だ多くあります。特に脳のダイナミックな活動の機能、意味に関する研究は極めて重要なものの一つです。研究の方法論としては複雑系数理学が注目されてきました。また、従来は一個の脳の研究が主流でしたが、社会の中での人の創造的活動の創出の必要性から、コミュニケーション障害、認知症などの脳研究が注目を集めるようになり、複数の脳活動の測定と理解への問題意識が高まってきました。

このような状況の中で本領域研究が開始されたわけですが、本領域研究の特徴は、数理科学者と実験神経科学者の協働による脳研究であること、コミュニケーション課題を実施することで二つの脳の相互作用を調べる脳研究のさきがけであること、脳のダイナミクス研究を複雑系数理学の立場から行ったこと、総括班主導による理論と実験、計画班と公募班の間の共同研究を推進したことです。5 年間で大変多くの独創的で先駆的な成果が理論、実験両面で得られました。その成果を本成果報告書にまとめましたので、ご一読いただければ幸いです。

本領域では領域ホームページを作成し、さまざまな研究活動の具体を常に公表してきました。これによって領域の幅広い活動を公開してきました。さらに、本領域ではアウトリーチ活動にも力を注ぎました。これには理化学研究所、玉川大学のご協力を得ることができました。また、理化学研究所内にあるダイナミックな脳活動に関する研究者コミュニティのデータベース（ダイナミックブレインプラットフォーム、DBPF）とリンクして、研究成果の情報共有に努めました。本領域のホームページも本年 4 月以降は DBPF に移管することになっています。<https://dynamicbrain.neuroinf.jp/>

また、私たちは国際ワークショップである Dynamic Brain Forum (DBF) を主催し、国際研究集会である International Conference on Cognitive Neurodynamics (ICCN) を共催することで、領域の研究成果を国際的な議論の対象にしてきました。これにより、本領域研究の国際的認知度が高まり、若手研究者の活動の場を世界に広げることができ若手人材育成に貢献できたと思っております。

最後になりましたが、本領域研究を支え続けてくださった方々に心より感謝申し上げます。特に、領域アドバイザーの先生方、内部審査委員の先生方、担当くださった文科省学術調査官の先生方、研究室の秘書の方たちに重ねてお礼申し上げます。これらの方々のご支援がなければ、本領域研究はこれほどの成果を上げることができなかつたに違いありません。

領域代表 津田一郎

平成 27 年 1 月 23 日

研究組織

【計画研究】

総括班

研究代表者：	津田一郎	(北海道大学電子科学研究所教授)
研究分担者：	西浦廉政	(東北大学原子分子材料科学高等研究機構教授)
研究分担者：	大森隆司	(玉川大学工学部教授)
研究分担者：	水原啓暁	(京都大学情報学研究科講師)
連携研究者：	相原威	(玉川大学工学部教授)
連携研究者：	乾敏郎	(京都大学情報学研究科教授)
連携研究者：	金子邦彦	(東京大学大学院総合文化研究科教授)
連携研究者：	山口陽子	(理化学研究所創発知的ダイナミクス研究チームチームリーダー)
連携研究者：	奥田次郎	(京都産業大学コンピュータ理工学部准教授)
連携研究者：	中村克樹	(京都大学霊長類研究所教授)
連携研究者：	橋本敬	(北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科教授)
連携研究者：	阪口豊	(電気通信大学大学院情報システム学研究科教授)

A01G1

研究代表者：	津田一郎	(北海道大学電子科学研究所教授)
研究分担者：	藤井宏	(京都産業大学コンピュータ理工学部名誉教授)
研究分担者：	高橋陽一郎	(東京大学生産技術研究所名誉教授)
連携研究者：	青柳富誌生	(京都大学情報学研究科准教授)
連携研究者：	山口裕	(北海道大学電子科学研究所助教)

A01G2

研究代表者：	西浦廉政	(東北大学原子分子材料科学高等研究機構教授)
研究分担者：	國府寛司	(京都大学大学院理学研究科教授)
研究分担者：	上田肇一	(富山大学大学院理工学研究部准教授)
連携研究者：	荒井迅	(北海道大学大学院理学研究院准教授)

A01G3

研究代表者：	金子邦彦	(東京大学大学院総合文化研究科教授)
--------	------	--------------------

B01G1

研究代表者：	山口陽子	(理化学研究所神経情報基盤センター長)
研究分担者：	北城圭一	(理化学研究所脳科学総合研究センター副チームリーダー)
研究分担者：	川崎真弘	(筑波大学システム情報系助教)

B01G2

研究代表者：	相原威	(玉川大学工学部教授)
研究分担者：	酒井裕	(玉川大学脳科学研究所教授)
研究分担者：	藤井聡	(山形大学医学部教授)
連携研究者：	塚田稔	(玉川大学脳科学研究所特別研究員)
連携研究者：	関野祐子	(国立医薬品食品衛生研究所薬理部部長)

B01G3

研究代表者：	奥田次郎	(京都産業大学コンピュータ理工学部准教授)
研究分担者：	藤井俊勝	(東北福祉大学健康科学部教授)

B01G4

研究代表者： 水原啓暁 (京都大学大学院情報学研究科講師)
研究分担者： 乾敏郎 (京都大学大学院情報学研究科教授)
研究分担者： 笹岡貴史 (京都大学大学院情報学研究科助教)
連携研究者： 鹿内学 (国際電気通信基礎技術研究所研究員)

C01G1

研究代表者： 中村克樹 (京都大学霊長類研究所教授)
研究分担者： 中村徳子 (昭和女子大学人間社会学部講師)
連携研究者： 倉岡康治 (京都大学霊長類研究所特定助教)
連携研究者： 鴻池菜保 (日本学術振興会特別研究員)
連携研究者： 竹本篤史 (京都大学霊長類研究所研究員)
連携研究者： 三輪美樹 (京都大学霊長類研究所研究員)
連携研究者： 佐々木丈夫 (日本公文教育研究会)

C01G2

研究代表者： 大森隆司 (玉川大学工学部教授)
研究分担者： 長井隆行 (電気通信大学大学院情報理工学研究科准教授)
研究分担者： 有田隆也 (名古屋大学大学院情報科学研究科教授)
(平成 22-24 年度のみ参画)

C01G3

研究代表者： 橋本敬 (北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科教授)
研究分担者： 森田純哉 (北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科助教)
研究分担者： 金野武司 (北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科特任助教)

C01G4

研究代表者： 阪口豊 (電気通信大学大学院情報システム学研究科教授)
研究分担者： 宮下英三 (東京工業大学大学院総合理工学研究科准教授)
研究分担者： 石田文彦 (富山高等専門学校専攻科准教授) (平成 22-24 年度のみ参画)
研究分担者： 成瀬康 (情報通信研究機構脳情報通信融合研究センター副室長)
連携研究者： 村田哲 (近畿大学医学部准教授)

【公募研究・平成 22～23 年度】

A01K1

研究代表者： 柳田達雄 (大阪電気通信大学工学部教授)

A01K2

研究代表者： 舘野高 (北海道大学大学院情報科学研究科生命人間情報科学専攻教授)

A01K3

研究代表者： 古川徹生 (九州工業大学生命体工学研究科(研究院) 教授)
連携研究者： 徳永憲洋 (一般財団法人ファジィシステム研究所研究部主任研究員)

A01K4

研究代表者： 佐藤直行 (公立はこだて未来大学システム情報科学部准教授)

B01K1

研究代表者： 嶋啓節 (東北大学大学院医学系研究科助教)
連携研究者： 中島敏 (東北大学大学院医学系研究科助手)

B01K2

研究代表者： 坂本一寛 (東北大学電気通信研究所助教)
連携研究者： 虫明元 (東北大学大学院医学系研究科教授)

B01K3

研究代表者： 久恒辰博 (東京大学大学院新領域創成科学研究科准教授)
連携研究者： 井ノ口馨 (富山大学大学院医学薬学研究部(医学)教授)

B01K4

研究代表者： 大森敏明 (東京大学大学院新領域創成科学研究科助教)
連携研究者： 岡田真人 (東京大学大学院新領域創成科学研究科教授)

B01K5

研究代表者： 奈良重俊 (岡山大学大学院自然科学研究科教授)

B01K6

研究代表者： 岡浩太郎 (慶應義塾大学理工学部教授)

B01K7

研究代表者： 鮫島和行 (玉川大学脳科学研究所准教授)

B01K8

研究代表者： 窪田芳之 (生理学研究所准教授)

B01K9

研究代表者： 礪村宜和 (玉川大学脳科学研究所教授)
連携研究者： 福島康弘 (川崎医療福祉大学医療福祉学部講師)

B01K10

研究代表者： 西川淳 (北海道大学大学院情報科学研究科特任講師)

C01K1

研究代表者： 松島俊也 (北海道大学大学院理学研究院教授)
連携研究者： 本間光一 (帝京大学薬学部教授)
連携研究者： Giorgio Vallortigara (University of Trento, Professor)

C01K2

研究代表者： 小川正 (京都大学医学(系)研究科(研究院)准教授)
連携研究者： 熊田孝恒 (産業技術総合研究所ヒューマンライフテクノロジー研究部門
研究グループ長)

C01K3

研究代表者： 尾仲達史 (自治医科大学医学部教授)
連携研究者： 高柳友紀 (自治医科大学 医学部講師)

C01K4

研究代表者： 松元健二 (玉川大学脳科学研究所教授)
連携研究者： 難波克己 (玉川大学学術研究所准教授)

C01K5

研究代表者： 奥村哲 (静岡理工科大学総合情報学部准教授)

C01K6

研究代表者： 稲邑哲也 (国立情報学研究所准教授)

C01K7

研究代表者： 吉田正俊 (生理学研究所助教)

C01K8

研究代表者： 長坂泰勇 (理化学研究所研究員)

C01K9

研究代表者： 谷淳 (理化学研究所動的認知行動研究チームチームリーダー)

連携研究者： 西本隆之介 (理化学研究所)

連携研究者： 並川淳 (理化学研究所)

連携研究者： 有江浩明 (理化学研究所)

C01K10

研究代表者： 渡辺正孝 (東京都医学総合研究所特任研究員)

連携研究者： 児玉亨 (東京都医学総合研究所副参事研究員)

【公募研究・平成24～25年度】

A01P1

研究代表者： 三浦佳二 (東北大学大学院情報科学研究科助教)

A01P2

研究代表者： 池上高志 (東京大学大学院総合文化研究科教授)

連携研究者： 岡瑞起 (筑波大学大学院システム情報系助教)

連携研究者： Tom Froese (日本学術振興会特別研究員)

連携研究者： 松田英子 (東京大学大学院総合文化研究科博士課程)

A01P3

研究代表者： 郡宏 (お茶の水女子大学大学院人間文化創成科学研究科准教授)

連携研究者： Ralf Toenjes (Potsdam University, Postdoctoral Research Assistant)

連携研究者： 小林康明 (北海道大学電子科学研究科博士研究員)

連携研究者： 泉田勇輝 (日本学術振興会特別研究員)

A01P4

研究代表者： 青木高明 (香川大学教育学部准教授)

A01P5

研究代表者： 手老篤史 (九州大学マス・フォア・インダストリ研究所准教授)

連携研究者： 秋山正和 (北海道大学電子科学研究科助教)

A01P6

研究代表者： 古川徹生 (九州工業大学大学院生命体工学研究科教授)

A01P7

研究代表者： 末谷大道 (鹿児島大学理工学研究科准教授)

連携研究者： 赤穂昭太郎 (産業技術総合研究所)

連携研究者： Ulrich Parlitz (マックス・プランク研究所)

A01P8

研究代表者： 佐藤直行 (公立はこだて未来大学准教授)

B01P1

研究代表者： 嶋啓節 (東北大学大学院医学系研究科非常勤講師)

連携研究者： 中島敏 (東北大学大学院医学系研究科助手)

連携研究者： 保坂亮介 (福岡大学理学部応用数学科助教)

連携研究者： 虫明元 (東北大学大学院医学系研究科教授)

B01P2

研究代表者： 坂本一寛 (東北大学電気通信研究所助教)
 連携研究者： 虫明元 (東北大学大学院医学系研究科教授)

B01P3

研究代表者： 奈良重俊 (岡山大学特命教授)

B01P4

研究代表者： Johan Lauwereyns (九州大学基幹教育院教授)
 連携研究者： 高橋宗良 (玉川大学脳科学研究所助教)

B01P5

研究代表者： 夏目季代久 (九州工業大学大学院生命体工学研究科教授)

B01P6

研究代表者： 礪村宜和 (玉川大学脳科学研究所教授)
 連携研究者： 福島康弘 (川崎医療福祉大学医療福祉学部 医療福祉学科 講師)

B01P7

研究代表者： 鮫島和行 (玉川大学脳科学研究所准教授)
 連携研究者： 植田一博 (東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻
 広域システム科学系情報学環教授)

B01P8

研究代表者： 窪田芳之 (生理学研究所准教授)

C01P1

研究代表者： 船曳康子 (京都大学医学部附属病院精神科経科助教)
 連携研究者： 村井俊哉 (京都大学医学部附属病院精神科経科教授)
 連携研究者： 高橋英彦 (京都大学医学部附属病院精神科経科准教授)

C01P2

研究代表者： 松元健二 (玉川大学脳科学研究所教授)

C01P3

研究代表者： 長坂泰勇 (理化学研究所脳科学総合研究センター研究員)

C01P4

研究代表者： 谷淳 (理化学研究所研究員) (※採択後異動のため辞退)

C01P5

研究代表者： 服部憲明 (大道会森之宮病院神経リハビリテーション研究部部長)
 連携研究者： 小久保香江 (神戸学院大学人文学部准教授)

交付決定額 (配分額)

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成21年度	101,100,000	30,330,000	131,430,000
平成22年度	225,300,000	67,590,000	292,890,000
平成23年度	212,100,000	63,630,000	275,730,000
平成24年度	210,200,000	63,060,000	273,260,000
平成25年度	194,100,000	58,230,000	252,330,000
総計	942,800,000	282,840,000	1,225,640,000

研究発表

(1) 雑誌論文

A01G1

1. Yutaka Yamaguti, Ichiro Tsuda, Yoichiro Takahashi, Information flow in heterogeneously interacting systems, *Cognitive Neurodynamics*, Vol. 8(1), 17-26 (2014), 査読有
2. Yasuhiro Fukushima, Yoshikazu Isomura, Yutaka Yamaguti, Shigeru Kuroda, Ichiro Tsuda, Inhibitory Network Dependency in Cantor Coding, *Advances in Cognitive Neurodynamics (III), Proceedings of the Third International Conference on Cognitive Neurodynamics - 2011*, ed. Yamaguchi, Yoko, Springer (2013), 635-640 (2013), 査読有
3. Hiromichi Tsukada, Yutaka Yamaguti, Ichiro Tsuda, Transitory memory retrieval in a biologically plausible neural network model, *Cognitive Neurodynamics*, Vol. 7(5), 409-416 (2013), 査読有
4. Yongtao Li, Ichiro Tsuda, Novelty-induced memory transmission between two nonequilibrium neural networks, *Cogn Neurodyn* (2013), Vol. 7(3), 225-236 (2013), 査読有
5. Ichiro Tsuda, Towards Understanding of Neural Dynamics in Communicating Brains, *Advances in Cognitive Neurodynamics (III), Proceedings of the Third International Conference on Cognitive Neurodynamics - 2011*, 415-420 (2013), 査読有
6. Yongtao Li, Ichiro Tsuda, A Communicative Model: Can We Interpret Neural Dynamics of Understanding?, *Advances in Cognitive Neurodynamics (III), Proceedings of the Third International Conference on Cognitive Neurodynamics - 2011*, 551-558 (2013), 査読有
7. Hiromichi Tsukada, Yutaka Yamaguti, Hiroshi Fujii, Ichiro Tsuda, Transitory Memory Retrieval in the Neural Networks Composed of Pinsky-Rinzel Model Neurons, *Advances in Cognitive Neurodynamics (III), Proceedings of the Third International Conference on Cognitive Neurodynamics - 2011*, 683-689 (2013), 査読有
8. Ichiro Tsuda, Chaotic itinerancy, *Scholarpedia*, Vol. 8(1), 4459 (2013), 査読有
9. H. Kang, I. Tsuda, Dynamical analysis on duplicating-and-assimilating process: Toward the understanding of mirror-neuron systems, *J. of Integrative Neuroscience*, Vol. 11(4), 363-384 (2012), 査読有
10. Hiroshi Fujii, Takashi Kanamaru, Kazuyuki Aihara, Ichiro Tsuda, Attentional Cholinergic Projections May Induce Transitions of Attractor Landscape via Presynaptic Modulations of Connectivity, *Advances in Cognitive Neurodynamics III*, 97-103 (2012), 査読有
11. 津田一郎, 「コミュニケーション神経情報学」からの眺め, *日本神経回路学会*, Vol. 18(3), 117-118 (2011), 査読有
12. Aoki Takaaki, Aoyagi Toshio, Self-organized network of phase oscillators coupled by activity-dependent interactions, *Physical review. E, Statistical, nonlinear, and soft matter physics*, Vol. 84, 066109 (2011), 査読有
13. Hiroshi Fujii, Takashi Kanamaru, Kazuyuki Aihara, Ichiro Tsuda, A New Role for Attentional Corticopetal Acetylcholine in Cortical Memory Dynamics, *AIP Conference Proceedings Vol. 1389 "International Conference on Numerical Analysis and Applied Mathematics 2011"*, eds T. E. Simos et al., American Institute of Physics, 1340-1343 (2011), 査読有
14. Y. Yamaguti, S. Kuroda, I. Tsuda, Representation of Time-series by a Self-similar Set in a Model of Hippocampal CA1, *Advances in Cognitive Neurodynamics(II): Proceedings of the Second International Conference on Cognitive Neurodynamics - 2009*, eds. R. Wang and F. Gu, Springer, 97-101 (2011), 査読有
15. I. Tsuda, Chaotic Dynamics, Episodic Memory, and Self-identity, *Advances in Cognitive Neurodynamics(II): Proceedings of the Second International Conference on Cognitive Neurodynamics - 2009*, eds. R. Wang and F. Gu, Springer, 11-18 (2011), 査読有
16. Yutaka Yamaguti, Ichiro Tsuda, Yoichiro Takahashi, Information Theoretic Approach to Dynamical Systems of Heterogeneously Interacting Chaotic Oscillators, *AIP Conference Proceedings Vol. 1389 "International Conference on Numerical Analysis and Applied Mathematics 2011"*, eds T. E. Simos et al., American Institute of Physics, 1361-1364 (2011), 査読有
17. S. Kuroda, Y. Fukushima, Y. Yamaguti, M. Tsukada, I. Tsuda, Emergence of Iterated Function Systems in the Hippocampal CA1, *Advances in Cognitive Neurodynamics(II): Proceedings of the Second International Conference on Cognitive Neurodynamics - 2009*, eds. R. Wang and F. Gu, Springer, 103-106 (2011), 査読有

18. Takuma Tanaka, Toshio Aoyagi, Multi-stable attractors in a network of phase oscillators with three-body interactions, *Physical Review Letters*, Vol. 106(22), 224101 (2011), 査読有
19. Ota Kaiichiro, Aoki Takaaki, Kurata Kouji, Aoyagi Toshio, Asymmetric neighborhood functions accelerate ordering process of self-organizing maps, *Physical review. E, Statistical, nonlinear, and soft matter physics*, Vol. 83(2), 021903 (2011), 査読有
20. S. Tadokoro, Y. Yamaguti, H. Fujii, I. Tsuda, Transitory Behaviors in Diffusively Coupled Nonlinear Oscillators, *Cognitive Neurodynamics*, Vol. 5, 1-12 (2011), 査読有
21. Y. Yamaguti, S. Kuroda, Y. Fukushima, M. Tsukada, I. Tsuda, A Mathematical Model for Cantor Coding in the Hippocampus, *Neural Networks*, Vol. 24, 43-53 (2011), 査読有
22. Hiroshi Fujii, Kazuyuki Aihara, Ichiro Tsuda, Top-down Mechanism of Perception: A Scenario on the Role for Layer 1 and 2/3 Projections Viewed from Dynamical Systems Theory, *Advances in Cognitive Neurodynamics(II): Proceedings of the Second International Conference on Cognitive Neurodynamics – 2009*, eds. R. Wang and F. Gu, Springer, 79-84 (2010), 査読有
23. Nakae K, Iba Y, Tsubo Y, Fukai T, Aoyagi T, Bayesian estimation of phase response curves, *Neural networks : the official journal of the International Neural Network Society*, Vol. 23(6), 752-63 (2010), 査読有
24. Hunseok Kang, Ichiro Tsuda, On embedded bifurcation structure in some discretized vector fields, *CHAOS*, Vol. 19(3), 033132-1 - 033132-12 (2009), 査読有
25. Shigeru Kuroda, Yashiro Fukushima, Yutaka Yamaguti, Minoru Tsukada, Ichiro Tsuda, Iterated function systems in the hippocampal CA1, *Cognitive Neurodynamics*, Vol. 3(3), 205-222 (2009), 査読有
26. Ota K, Nomura M, Aoyagi T, Weighted spike-triggered average of a fluctuating stimulus yielding the phase response curve, *Physical review letters*, Vol. 103(2), 024101 (2009), 査読有
27. Tanaka T, Kaneko T, Aoyagi T, Recurrent infomax generates cell assemblies, neuronal avalanches, and simple cell-like selectivity, *Neural computation*, Vol. 21(4), 1038-67 (2009), 査読有
28. Aoki T, Ota K, Kurata K, Aoyagi T, Ordering process of self-organizing maps improved by asymmetric neighborhood function, *Cognitive neurodynamics*, Vol. 3(1), 9-15 (2009), 査読有
29. Tsuda I, Hypotheses on the functional roles of chaotic transitory dynamics, *Chaos (Woodbury, N.Y.)*, Vol. 19(1), 015113 (2009), 査読有
30. Aoki T, Aoyagi T, Co-evolution of phases and connection strengths in a network of phase oscillators, *Physical review letters*, Vol. 102(3), 034101 (2009) 査読有
31. Nomura M, Ito D, Tamate H, Gohara K, Aoyagi T, Estimation of functional connectivity that causes burst-like population activities, *FORMA*, Vol. 24(1), 11-16 (2009), 査読有
32. Tanaka T, Aoki T, Aoyagi T, Dynamics in Co-evolving Networks of Active Elements, *FORMA*, Vol. 24(1), 17-22 (2009), 査読有

A01G2

1. Kei-Ichi Ueda, Three-state network design for robust loop-searching systems, *Physical Review E*, Vol. 87, 052920 (2013), 査読有
2. Yasumasa Nishiura, Takashi Teramoto, Masaaki Yadome, Heterogeneity-induced pulse generators, *Lecture Note Series in Mathematical Sciences Based on Modeling and Analysis*, 147-152 (2013), 査読有
3. Yasumasa Nishiura, Takashi Teramoto, Masaaki Yadome, Heterogeneity-induced pulse generators, *Advances in Cognitive Neurodynamics (III): Proceedings of the Third International Conference on Cognitive Neurodynamics - 2011*, 371-377 (2013), 査読有
4. Kei-Ichi Ueda, Seiji Takagi, Toshiyuki Nakagaki, Tactic direction determined by the interaction between oscillatory chemical waves and rheological deformation in an amoeba, *Physical Review E*, Vol. 86, 011927 (2012), 査読有
5. Yasumasa Nishiura, Masaaki Yadome, Takashi Teramoto, Heterogeneity-induced pulse generators, *Mathematisches Forschungsinstitut Oberwolfach workshop report*, 68-71 (2012), 査読有
6. Kei-Ichi Ueda, Yasumasa Nishiura, A mathematical mechanism for instabilities in stripe formation on growing domains, *Physica D: Nonlinear Phenomena*, Vol. 241, 37-59 (2012), 査読有
7. Yasumasa Nishiura, Takashi Teramoto, Xiaohui Yuan, Heterogeneity-induced spot dynamics for a three-component reaction-diffusion system, *Communications on Pure and Applied Analysis*, Vol. 11(1), 307-338 (2011), 査読有
8. Yasumasa Nishiura, Takashi Teramoto, Collision dynamics in Dissipative Systems, *Theoretical and Applied Mechanics Japan*, Vol. 59, 13-25 (2011), 査読有

9. Kei-Ichi Ueda, Seiji Takagi, Yasumasa Nishiura, Toshiyuki Nakagaki, Mathematical model for contemplative amoeboid locomotion, *Physical Review E*, Vol. 83(2), 021916 (9pages) (2011), 査読有
10. Peter van Heijster, Arjen Doelman, Tasso J Kaper, Yasumasa Nishiura, Kei-Ichi Ueda, Pinned fronts in heterogeneous media of jump type, *Nonlinearity*, Vol. 24(1), 127-157 (2010), 査読有
11. Takashi Teramoto, Yasumasa Nishiura, Morphological characterization of the diblock copolymer problem with topological computation, *Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics*, Vol. 27(2), 175-190 (2010), 査読有
12. Takashi Teramoto, Katsuya Suzuki, Yasumasa Nishiura, Rotational motion of traveling spots in dissipative systems, *Phys. Rev. E*, Vol. 80(4), 046208 (2009), 査読有
13. Shin-Ichiro Ei, Yasumasa Nishiura, Kei-Ichi Ueda, Pulse dynamics for reaction-diffusion systems in the neighborhood of codimension two singularity, *Journal of Math-for-industry*, Vol. 1, 91-95 (2009), 査読有

A01G3

1. Kunihiko Kaneko, Balancing Robustness with Plasticity Through Evolution and Learning , *Advances in Cognitive Neurodynamics (III)*, 379-385 (2013), 査読有
2. Tomoki Kurikawa, Kunihiko Kaneko, “Memories as Bifurcations”: A Simple Model, *Advances in Cognitive Neurodynamics (III)*, 537-542 (2013), 査読有
3. Daisuke Shimaoka, Keiichi Kitajo, Kunihiko Kaneko, Yoko Yamaguchi, Ongoing Global Phase Pattern and Visual Signal Detection, *Advances in Cognitive Neurodynamics (III)*, 509-514 (2013) 査読有
4. Hidetoshi Aoki, Kunihiko Kaneko, Slow Stochastic Switching by Collective Chaos of Fast Elements, *Physical Review Letters*, Vol. 111, 144102 (2013), 査読有
5. Yusuke Goto, Kunihiko Kaneko, Minimal Model for Stem-Cell Differentiation, *Physical Review E*, Vol. 88, 032718 (2013), 査読有
6. Shuji Ishihara, Kunihiko Kaneko, The Baldwin effect under multi-peaked fitness landscapes: Phenotypic fluctuation accelerates evolutionary rate, *Physical Review E*, Vol. 87, 052701 (2013), 査読有
7. Kunihiko Kaneko, Epigenetic feedback regulation accelerates adaptation and evolution, *PLoS ONE*, Vol. 8, e61251 (2013), 査読有
8. Masayo Inoue, Kunihiko Kaneko, Cooperative Adaptive Response in Gene Regulatory Networks with Many Degrees of Freedom, *PLoS Computational Biology*, Vol. 9(4), e1003001 (2013), 査読有
9. Tomoki Kurikawa, Kunihiko Kaneko, Embedding Responses in Spontaneous Neural Activity Shaped through Sequential Learning, *PLoS Computational Biology*, Vol. 9, e1002943 (2013), 査読有
10. Ayaka Sakata, Koji Hukushima, Kunihiko Kaneko, Replica symmetry breaking in an adiabatic spin-glass model of adaptive evolution, *Europhysics Letters*, Vol. 99, 68004 (2012), 査読有
11. Chikara Furusawa, Kunihiko Kaneko, A Dynamical-Systems View of Stem Cell Biology, *Science*, Vol. 338, 215-217 (2012), 査読有
12. Kunihiko Kaneko, Evolution of Robustness and Plasticity under Environmental Fluctuation: Formulation in terms of Phenotypic Variances, *Journal of Statistical Physics*, Vol. 148(4), 686-704 (2012), 査読有
13. Tomoki Kurikawa, Kunihiko Kaneko, Associative Memory Model with the Spontaneous neural Activity, *Europhysics Letters*, Vol. 98, 48002 (2012), 査読有
14. Chikara Furusawa, Kunihiko Kaneko, Adaptation to optimal cell growth through self-organized criticality, *Physical Review Letters*, Vol. 108, 208103 (2012), 査読有
15. Chikara Furusawa, Kunihiko Kaneko, Oscillatory Protein Expression Dynamics Endows Stem Cells with Robust Differentiation Potential, *PLoS one*, Vol. 6, e27232 (2011), 査読有
16. Kunihiko Kaneko, Weber’s Law for Biological Responses in Autocatalytic Networks of Chemical Reactions, *Physical Review Letters*, Vol. 107, 048301 (2011), 査読有
17. Tomoki Kurikawa, Kunihiko Kaneko, Learning to memorize input-output mapping as bifurcation in neural dynamics: relevance of multiple timescales for synapse changes, *Neural Computing and Applications*, PP. 1-10 (2011), 査読有
18. Kunihiko Kaneko, Characterization of stem cells and cancer cells on the basis of gene expression profile stability, plasticity, and robustness, *Bioessays*, Vol. 33, 403-413 (2011), 査読有
19. Daisuke Shimaoka, Kunihiko Kaneko, Dynamical systems modeling of continuous flash suppression, *Vision Research*, Vol. 51, 521-528 (2011), 査読有

20. Ben Lehner, Kunihiko Kaneko, A macroscopic relationship between fluctuation and response in biology, *Cellular and Molecular Life Sciences*, Vol. 68, 1005-1010 (2011), 査読有
21. Kunihiko Kaneko, Proportionality between Variances in Gene Expression Induced by Noise and Mutation: Consequence of Evolutionary Robustness, *BMC Evolutionary Biology*, Vol. 11, 27 (2011), 査読有
22. Tomoki Kurikawa, Kunihiko Kaneko, Learning Shapes Spontaneous Activity Itinerating over Memorized States, *PLoS One*, Vol. 6, e17432 (2011), 査読有
23. Tomoki Kurikawa, Kunihiko Kaneko, Learning Shapes Bifurcations of Neural Dynamics upon External Stimuli, *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 6443, 153-160 (2010), 査読有
24. Daisuke Shimaoka, Keiichi Kitajo, Kunihiko Kaneko, Yoko Yamaguchi, Transient process of cortical activity during Necker cube perception: from local clusters to global synchrony, *Nonlinear Biomedical Physics*, Vol. 4, S7 (2010), 査読有

B01G1

1. Kei-Ichi Ueda, Yasumasa Nishiura, Yoko Yamaguchi, Keiichi Kitajo, Bidirectional wave propagations can improve loop finding time, *Advances in Cognitive Neurodynamics IV* in press, 査読有
2. Masahiro Kawasaki, Yutaka Uno, Jumpei Mori, Kenji Kobata, Keiichi Kitajo, Transcranial magnetic stimulation-induced global propagation of transient phase resetting associated with directional information flow, *Frontiers in Human Neuroscience*, doi: 10.3389/fnhum.2014.00173 (2014), 査読有
3. Florence I. Kleberg, Keiichi Kitajo, Masahiro Kawasaki, Yoko Yamaguchi, Ongoing theta oscillations predict encoding of subjective memory type, *Neuroscience Research*, Vol. 83, 69-80 (2014), 査読有
4. Kazuko Hiyoshi, Masahiro Kawasaki, Tatsuya Yokota, Hova Bakarjian, Hidenao Fukuyama, Vialatte Francois, Andrzej Cickocki, EEG correlates of voice and face emotional judgments in the human brain, *Cognitive Computation*, in press (2013), 査読有
5. Masahiro Kawasaki, Yoko Yamaguchi, Frontal theta and beta synchronizations for monetary reward increase visual working memory capacity, *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, Vol. 8, 523-530 (2013), 査読有
6. Masahiro Kawasaki, Yuji Mizuno, Keiichi Kitajo, Manipulative Evaluation of Alpha Bottom-up Networks in the Resting-state by Combined TMS-EEG, *Converging Clinical and Engineering Research on Neurorehabilitation, Biosystems & Biorobotics* Vol. 1, 589-592, (2013), 査読有
7. Masahiro Kawasaki, Yohei Yamada, Yosuke Ushiku, Eri Miyauchi, Yoko Yamaguchi, Inter-brain synchronization during coordination of speech rhythm in human-to-human social interaction, *Scientific Reports*, 3: 1692 (2013), 査読有
8. Yuji Mizuno, Masahiro Kawasaki, Keiichi Kitajo, Individual evaluation of interhemispheric neural synchrony mediating perceptual bias in apparent motion perception - A TMS-EEG study and applications in rehabilitation, *Converging Clinical and Engineering Research on Neurorehabilitation, Biosystems & Biorobotics*, Vol. 1, 635-639 (2013), 査読有
9. Daisuke Shimaoka, Keiichi Kitajo, Kunihiko Kaneko, Yoko Yamaguchi, Ongoing global phase pattern and visual signal detection, *Advances in Cognitive Neurodynamics III*, 509-514 (2013), 査読有
10. 川崎 真弘, 北城 圭一, TMSによる脳波位相同期が示す視覚・聴覚ワーキングメモリの脳リズムネットワーク, *信学技報*, Vol. 113(128), 67-72 (2013), 査読有
11. 川崎 真弘, 北城 圭一, 深尾 憲二郎, 村井 俊哉, 山口 陽子, 船曳 康子, 発達障害者のコミュニケーションにおけるリズム調整, *信学技報*, Vol. 113(73), 201-205 (2013), 査読有
12. 佐瀬 巧, 北城 圭一, 合原 一幸, 脳波のフラクタル構造に対するガンマ波の影響, *生産研究*, Vol. 65(3), 325-328 (2013), 査読有
13. Keiichi Kitajo, Yumi Nakagawa, Yutaka Uno, Ryohei Miyota, Masanori Shimono, Kentaro Yamanaka, Yoko Yamaguchi, A manipulative approach to neural dynamics by combined TMS-EEG, *Advances in Cognitive Neurodynamics*, Vol. 3, 155-160 (2013), 査読有
14. Florence Kleberg, Keiichi Kitajo, Masahiro Kawasaki, Yoko Yamaguchi, Prestimulus neural oscillations contribute to recollection and familiarity, *Advances in Cognitive Neurodynamics*, Vol. 3, 717-725 (2013), 査読有
15. Masahiro Kawasaki, Yoko Yamaguchi, Visual working memory capacity and related brain oscillatory activities are modulated by color preferences, *Frontiers in Human Neuroscience*, 6:318, DOI: 10.3389/fnhum.2012.00318 (2012), 査読有

16. Masahiro Kawasaki, Yoko Yamaguchi, Effects of subjective preference for colors on attention-related occipital theta oscillations, *NeuroImage*, Vol. 59(1), 808-814 (2012), 査読有
17. 川崎 真弘, 北城 圭一, 山口 陽子, 人と人のタッピング同期に関連した2者間の脳波リズム同期, *信学技報*, Vol. 112(176), 73-78 (2012), 査読有
18. 程 殷杰, 川崎 真弘, 北城 圭一, 山口 陽子, 二者交互タッピングにおける協調リズムの生成: 位相応答曲線モデルを用いた解析, *信学技報*, Vol. 111(483), 111-116 (2012), 査読有
19. Takashi J. Ozaki, Naoyuki Sato, Keiichi Kitajo, Yoshiaki Someya, Kimitaka Anami, Hiroaki Mizuhara, Seiji Ogawa, Yoko Yamaguchi, Traveling EEG slow oscillation along the dorsal attention network initiates spontaneous perceptual switching, *Cognitive Neurodynamics*, Vol. 6, 185-198 (2012), 査読有
20. Daisuke Shimaoka, Keiichi Kitajo, Kunihiko Kaneko, Yoko Yamaguchi, Transient process of cortical activity during Necker cube perception: from local clusters to global synchrony, *Nonlinear Biomedical Physics*, 4, S7, doi:10.1186/1753-4631-4-S1-S7, (2010), 査読有
21. Keiichi Kitajo, Ryohei Miyota, Masanori Shimono, Kentaro Yamanaka, Yoko Yamaguchi, State-dependent cortical synchronization networks revealed by TMS-EEG Recordings, *Advances in Cognitive Neurodynamics*, Vol. 2, 145-148 (2010), 査読有
22. Kawasaki M, Kitajo K, Yamaguchi Y, Dynamic links between theta executive functions and alpha storage buffers in auditory and visual working memory, *The European journal of neuroscience*, Vol. 31(9), 1683-9 (2010), 査読有
23. 山口 陽子, 脳はリズムで経験を記憶する, *自然と科学の情報誌 ミルシル*, Vol. 6(3), 11-13 (2009), 査読有
24. Naoyuki Sato, Yoko Yamaguchi, A Computational Predictor of Human Episodic Memory Based on a Theta Phase Precession Network, *PLoS one*, Vol. 4(10), e7536-1 - e7536-9 (2009), 査読有
25. David Colliaux, Colin Molter, Yoko Yamaguchi, Working memory dynamics and spontaneous activity in a flip-flop oscillations network model with the Milnor attractor, *Cognitive Neurodynamics*, Vol. 3(2), 141-151 (2009), 査読有

B01G2

1. Tadanobu Chuyo Kamijo, Hirofumi Hayakawa, Yasuhiro Fukushima, Yoshiyuki Kubota, Yoshikazu Isomura, Minoru Tsukada, Takeshi Aihara, Input integration around the dendritic branches in hippocampal dentate granule cells, *Cognitive Neurodynamics*, vol 8, No.4, 267-726 (2014), 査読有
2. Masashi Kondo, Tatsuo Kitajima, Satoshi Fujii, Minoru Tsukada, Takeshi Aihara, Modulation of synaptic plasticity by the coactivation of spatially distinct synaptic inputs in rat hippocampal CA1 apical dendrites, *Brain research*, Vol. 1526, 1-14 (2013), 査読有
3. Yoshinori Ide, Muneyoshi Takahashi, Johan Lauwereyns, Minoru Tsukada, Takeshi Aihara, Integration of Hetero Inputs to Guinea Pig Auditory Cortex Established by Fear Conditioning, *Advances in Cognitive Neurodynamics (III)*, 765-771 (2013), 査読有
4. Yoshinori Ide, Muneyoshi Takahash, Johan Lauwereyns, Guy Sandner, Minoru Tsukada, Takeshi Aihara, Fear conditioning induces guinea pig auditory cortex activation, by foot shock alone, *Cognitive Neurodynamics*, Vol. 7, 67-77 (2013), 査読有
5. Hiroki Fujiwara, Kousuke Sawa, Muneyoshi Takahashi, Johan Lauwereyns, Minoru Tsukada, Takeshi Aihara, Context and the renewal of conditioned taste aversion: The role of rat dorsal hippocampus examined by electrolytic lesion, *Cognitive Neurodynamics*, Vol. 6, 399-407 (2012), 査読有
6. Yoshihiko Yamazaki, Satoshi Fujii, Takeshi Aihara, Katsuhiko Mikoshiba, Activation of Inositol 1, 4, 5-trisphosphate receptors during preconditioning low-frequency stimulation leads to reversal of long-term potentiation in hippocampal CA1 neurons, *Neuroscience*, Vol. 207, 1-11 (2012), 査読有
7. Yoshinori Ide, Takashi Miyazaki, Johan Lauwereyns, Guy Sandner, Minoru Tsukada, Takeshi Aihara, Optical imaging of plastic changes induced by fear conditioning in the auditory cortex, *Cognitive neurodynamics*, Vol. 6(1), 1-10 (2012), 査読有
8. Yoshinori Ide, Takashi Miyazaki, Johan Lauwereyns, Guy Sandner, Minoru Tsukada, Takeshi Aihara, Optical imaging of plastic changes induced by fear conditioning in the auditory cortex, *Cognitive Neurodynamics*, Vol. 6(1), 1-10 (2012), 査読有
9. Yoshinori Ide, Muneyoshi Takahashi, Johan Lauwereyns, Minoru Tsukada, Takeshi Aihara, Integration of Hetero Inputs to Guinea Pig Auditory Cortex Established by Fear Conditioning, *Advances in Cognitive Neurodynamics III*, (2012), 査読有

10. Yoshihiko Yamazaki, Satoshi Fujii, Jun-ichi Goto, Toshimichi Sugihara, Makoto Sugita, Hiroki Fujiwara, Kenya Kaneko, Takeshi Aihara, Katsuhiko Mikoshiba, Suppressive effect of preconditioning low-frequency stimulation on subsequent induction of long-term potentiation by high frequency stimulation in hippocampal CA3 neurons, *Brain research*, Vol. 1449, 15-23 (2012), 査読有
11. Yoshihiko Yamazaki, Satoshi Fujii, Takeshi Aihara, Katsuhiko Mikoshiba, Activation of inositol 1, 4, 5-trisphosphate receptors during preconditioning low-frequency stimulation leads to reversal of long-term potentiation in hippocampal CA1 neurons, *Neuroscience*, Vol. 207, 1-11 (2012), 査読有
12. Yoshinori Ide, Takashi Miyazaki, Johan Lauwereyns, Minoru Tsukada, Takeshi Aihara, Optical imaging of plastic changes induced by fear conditioning in the, auditory cortex, *Cognitive Neurodynamics*, Vol. 6(1), 1-10 (2012), 査読有
13. Sugisaki Eriko, Fukushima Yasuhiro, Tsukada Minoru, Aihara Takeshi, Cholinergic modulation on spike timing-dependent plasticity in hippocampal CA1 network, *Neuroscience*, Vol. 192, 91-101 (2011), 査読有
14. Makoto Yoneyama, Yasuhiro Fukushima, Minoru Tsukada, Takeshi Aihara, Spatiotemporal characteristics of synaptic EPSP summation on the dendritic trees of hippocampal CA1 pyramidal neurons as revealed by laser uncaging stimulation, *Cognitive Neurodynamics*, Vol. 5(4), 333-342 (2011), 査読有
15. Satoshi Fujii, Yoshihiko Yamazaki, Yoichiro Kuroda , Katsuhiko Mikoshiba, Involvement of inositol-1,4,5-trisphosphate receptors in the bidirectional synaptic plasticity induced in hippocampal CA1 neurons by 1–10 Hz low-frequency stimulation, *Neuroscience*, Vol. 168(2), 346-358 (2010), 査読有
16. Yoshioka, M., Yamazaki, Y., Fujii, S., Kaneko, K., Kato, H., Mikoshiba, K, Intracellular calcium ion dynamics involved in long-term potentiation in hippocampal CA1 neurons in mice lacking the IP3 type 1 receptor, *Nueroscience Research*, Vol. 67(2), 149-155 (2010), 査読有
17. Yamazaki Y, Hozumi Y, Kaneko K, Fujiwara H, Kato H, Fujii S, Modulation of neuronal activities by interactions between neurons and glial cells, *Hirosaki Med. J.* , Vol. 60, S174-S180 (2010), 査読有
18. Minoru Tsukada, Yasuhiro Fukushima, Context Sensitive Mechanism in Hippocampal CA1 Networks, *Bulletin Mathematical Biology*, (2010), 査読有
19. Yutaka Yamaguti, Shigeru Kuroda, Yasuhiro Fukushima, Minoru Tsukada, Ichiro Tsuda, A mathematical model for Cantor coding in the hippocampus, *Neural networks : the official journal of the International Neural Network Society*, (2010), 査読有
20. 米山 誠, 福島 康弘, 小島 比呂志, 塚田 稔, レーザーアンケーシング刺激による海馬 CA1 錐体細胞の樹状突起上の EPSP の時間・空間加重特性の解析 Analysis of the spatial-temporal characteristics of synaptic EPSP summation on the dendritic trees of hippocampal CA1 pyramidal neurons as revealed by laser uncaging stimulation, *日本神経回路学会誌*, Vol. 17(1), 2-11 (2010), 査読有
21. Okazaki S, Kanoh S, Tsukada M, Oka K, Neural substrate of sound duration discrimination during an auditory sequence in the guinea pig primary auditory cortex, *Hearing research*, Vol. 259(1), 107-116 (2010), 査読有
22. Makoto Nishiyama, Kazunobu Togashi, Takeshi Aihara and Kyonsoo Hong, GABAergic activities control spike timing- and frequency-dependent long-term depression at hippocampal excitatory synapses, *Frontiers in Synaptic Neuroscience*, Vol. 2(22), 1-15 (2010), 査読有
23. 塚田 稔, 脳と芸術, *日本神経回路学会誌*, Vol. 16(2), 64-76 (2009), 査読有
24. Kimitake Kaneki, Osamu Araki, Minoru Tsukada, Dual synaptic plasticity in the hippocampus: Hebbian and spatiotemporal learning dynamics, *Cognitive neurodynamics*, Vol. 3(2), 153-63 (2009), 査読有
25. Muneyoshi Takahashi, Johan Lauwereyns, Yoshio Sakurai, Minoru Tsukada, Behavioral state-dependent episodic representations in rat CA1 neuronal activity during spatial alternation, *Cognitive neurodynamics*, Vol. 3(2), 165-75 (2009), 査読有
26. Muneyoshi Takahashi, Johan Lauwereyns, Yoshio Sakurai, Minoru Tsukada, A code for spatial alternation during fixation in rat hippocampal CA1 neurons, *Journal of neurophysiology*, Vol. 102(1), 556-67 (2009), 査読有
27. Shigeru Kuroda, Yasuhiro Fukushima, Yutaka Yamaguti, Minoru Tsukada, Ichiro Tsuda, Iterated function systems in the hippocampal CA1, *Cognitive neurodynamics*, Vol. 3(3), 205-222 (2009), 査読有

B01G3

1. Ueno A., Okuda J., Fujii T., Reactivation hypothesis in episodic memory: from the findings of neuroimaging studies, *Advances in Cognitive Neurodynamics (III)* 781-786 (2013), 査読有
2. Okuda J., Suzuki M., Fujii T., Correlated brain activations during formation of memory for future plans, *Advances in Cognitive Neurodynamics (III)* 437-442 (2013), 査読有
3. Abe N, Fujii T, Suzuki M, Ueno A, Shigemune Y, Mugikura S, Takahashi S, Mori E, Encoding- and retrieval-related brain activity underlying false recognition, *Neuroscience research*, Vol. 76(4), 240-50 (2013), 査読有
4. 藤井 俊勝, 記憶は脳のどこにあるのか, *臨床神経*, Vol. 53, 1234-1236 (2013), 査読有
5. 鈴木 麻希, 藤井 俊勝, エピソード記憶のイメージング, *Clinical Neuroscience*, Vol. 31, 1414-1417 (2013), 査読有
6. Toshihiro Nakamori, Motohiro Maebuchi, Jiro Okuda, Maki Suzuki, Ryuji Takeda, Akiyoshi Sawabe, Behavioral evidence for beneficial effects of soy peptide supplementation on higher brain function in healthy young volunteers, *Japanese Pharmacology & Therapeutics*, Vol. 41(5), 457-464 (2013), 査読有
7. Ogura K, Fujii T, Suzuki K, Mori E, Pure agraphia in Romaji after left inferior frontal gyrus infarction: A case of selective deficit in syllable-to-grapheme conversion in Japanese, *Brain and language*, Vol. 127(1), 1-5 (2013), 査読有
8. 鈴木 麻希, 藤井 俊勝, 記憶障害, *神経内科*, Vol. 77(5), 521-528 (2012), 査読有
9. Kotaro Hiraoka, Nobuyuki Okamura, Yoshihito Funaki, Akiko Hayashi, Manabu Tashiro, Kinya Hisanaga, Toshikatsu Fujii, Atsushi Takeda, Kazuhiko Yanai, Ren Iwata, Etsuro Mori, Cholinergic deficit and response to donepezil therapy in Parkinson's disease with dementia, *European neurology*, Vol. 68(3), 137-143 (2012), 査読有
10. Jiro Okuda, From prospection to prospective memory: constructing, encoding, and remembering future plans, *Psychologia*, Vol. 55(2), 141-148 (2012), 査読有
11. Maki Suzuki, Recollection of episodic memory and the hippocampus: evidence from fMRI, *Psychologia*, Vol. 55(2), 63-79 (2012), 査読有
12. Ayahito Ito, Nobuhito Abe, Toshikatsu Fujii, Akiko Hayashi, Aya Ueno, Shunji Mugikura, Shoki Takahashi, Etsuro Mori, The contribution of the dorsolateral prefrontal cortex to the preparation for deception and truth-telling, *Brain Research*, Vol. 1464, 43-52 (2012), 査読有
13. Kaeko Ogura, Toshikatsu Fujii, Nobuhito Abe, Yoshiyuki Hosokai, Mayumi Shinohara, Hiroshi Fukuda, Etsuro Mori, Regional cerebral blood flow and abnormal eating behavior in Prader-Willi syndrome, *Brain and Development*, Vol. 35(5), 427-434 (2012), 査読有
14. Ryusaku Hashimoto, Nobuhito Abe, Aya Ueno, Toshikatsu Fujii, Shoki Takahashi, Etsuro Mori, Changing the criteria for old/new recognition judgments can modulate activity in the anterior hippocampus, *Hippocampus*, Vol. 22(2), 141-148 (2012), 査読有
15. Hiromasa Takemura, Kazuyuki Samejima, Rufin Vogels, Masamichi Sakagami, Jiro Okuda, Stimulus-dependent adjustment of reward prediction error in the midbrain, *PloS one*, Vol. 6(12), e28337 (2011), 査読有
16. Risa Hanaki, Nobuhito Abe, Toshikatsu Fujii, Ueno A, Nishio Y, Hiraoka K, Shimomura T, Iizuka O, Shinohara M, Hirayama K, Mori E, The effects of aging and Alzheimer's disease on associative recognition memory, *Neurological sciences : official journal of the Italian Neurological Society and of the Italian Society of Clinical Neurophysiology*, Vol. 32(6), 1115-1122 (2011), 査読有
17. Jiro Okuda, Sam J Gilbert, Paul W Burgess, Chris D Frith, Jon S Simons, Looking to the future: automatic regulation of attention between current performance and future plans, *Neuropsychologia*, Vol. 49(8), 2258-2271 (2011), 査読有
18. Nobuhito Abe, Toshikatsu Fujii, Yoshiyuki Nishio, Iizuka O, Kanno S, Kikuchi H, Takagi M, Hiraoka K, Yamasaki H, Choi H, Hirayama K, Shinohara M, Mori E, False item recognition in patients with Alzheimer's disease, *Neuropsychologia*, Vol. 49(7), 1897-1902 (2011), 査読有
19. Ayahito Ito, Nobuhito Abe, Toshikatsu Fujii, Aya Ueno, Yuta Koseki, Ryusaku Hashimoto, Shunji Mugikura, Shoki Takahashi, Etsuro Mori, The role of the dorsolateral prefrontal cortex in deception when remembering neutral and emotional events, *Neuroscience research*, Vol. 69(2), 121-128 (2011), 査読有
20. 藤井 俊勝, 記憶とは, *Clinical Neuroscience*, Vol. 29, 144-147 (2011), 査読有
21. Ayahito Ito, Toshikatsu Fujii, Aya Ueno, Yuta Koseki, Masaru Tashiro, Etsuro Mori, Neural basis of pleasant and unpleasant emotions induced by social reputation, *Neuroreport*, Vol. 22(14), 679-683 (2011), 査読有

22. Yosuke Morishima, Jiro Okuda, Katsuyuki Sakai, Reactive mechanism of cognitive control system, *Cerebral cortex* (New York, N.Y. : 1991), Vol. 20(11), 2675-2683 (2010), 査読有
23. Nobuhito Abe, Toshikatsu Fujii, Aya Ueno, Yayoi Shigemune, Maki Suzuki, Manabu Tashiro, Etsuro Mori, Right temporal-lobe contribution to the retrieval of family relationships in person identification, *Neuroscience letters*, Vol. 468(1), 10-13 (2010), 査読有
24. 藤井 俊勝, 記憶とその障害, *高次脳機能研究*, Vol. 30(1), 19-24 (2010), 査読有
25. Akiko Hayashi, Nobuhito Abe, Aya Ueno, Yayoi Shigemune, Etsuro Mori, Manabu Tashiro, Toshikatsu Fujii, Neural correlates of forgiveness for moral transgressions involving deception, *Brain research*, Vol. 1332, 90-99 (2010), 査読有
26. Yayoi Shigemune, Nobuhito Abe, Maki Suzuki, Aya Ueno, Etsuro Mori, Manabu Tashiro, Masatoshi Itoh, Toshikatsu Fujii, Effects of emotion and reward motivation on neural correlates of episodic memory encoding: a PET study, *Neuroscience research*, Vol. 67(1), 72-79 (2010), 査読有
27. Syunnji Mugikura, Nobuhito Abe, Maki Suzuki, Aya Ueno, Shuichi Higano, Shoki Takahashi, Toshikatsu Fujii, Hippocampal activation associated with successful external source monitoring, *Neuropsychologia*, Vol. 48(6), 1543-1550 (2010), 査読有
28. Kikuchi H, Fujii T, Abe N, Suzuki M, Takagi M, Mugikura S, Takahashi S, Mori E, Memory repression: brain mechanisms underlying dissociative amnesia, *Journal of cognitive neuroscience*, Vol. 22(3), 602-613 (2010), 査読有
29. 藤井 俊勝, 高次脳機能の神経機能画像研究, *臨床神経*, Vol. 49(11), 933-934 (2009), 査読有
30. Ueno A, Abe N, Suzuki M, Shigemune Y, Hirayama K, Mori E, Tashiro M, Itoh M, Fujii T, Reactivation of medial temporal lobe and human V5/MT+ during the retrieval of motion information: a PET study, *Brain research*, Vol. 1285, 127-134 (2009), 査読有
31. Hiraoka K, Okamura N, Funaki Y, Watanuki S, Tashiro M, Kato M, Hayashi A, Hosokai Y, Yamasaki H, Fujii T, Mori E, Yanai K, Watabe H, Quantitative analysis of donepezil binding to acetylcholinesterase using positron emission tomography and [5-(11)C-methoxy]donepezil, *NeuroImage*, Vol. 46(3), 616-623 (2009), 査読有
32. Abe N, Fujii T, Hirayama K, Takeda A, Hosokai Y, Ishioka T, Nishio Y, Suzuki K, Itoyama Y, Takahashi S, Fukuda H, Mori E, Do parkinsonian patients have trouble telling lies? The neurobiological basis of deceptive behavior, *Brain : a journal of neurology*, Vol. 132(5), 1386-1395 (2009), 査読有

B01G4

1. Takao Fukui, Toshio Inui, How vision affects kinematic properties of pantomimed prehension movements, *Frontiers in psychology*, Vol. 4, 44 (2013), 査読有
2. Toshio Inui, Toward a unified framework for understanding the various symptoms and etiology of autism and Williams syndrome, *Japanese Psychological Research*, Vol. 55(2), 99-117 (2013), 査読有
3. 乾 敏郎, 誤った知覚から世界に関する修正不能な信念が生じる脳内メカニズム, *日本精神神経学会誌*, Vol. 114(2), 171-179 (2012), 査読有
4. 乾 敏郎, 円滑な問主観的インタラクションを可能にする神経機構, *こころの未来*, 14-17 (2012), 査読無
5. 乾 敏郎, 予測的な運動機能と自己意識(1), *ミネルヴァ通信「究」* 6月号, 11-16 (2012), 査読無
6. 乾 敏郎, 自らの行動が生む外界の変化を学習する. -随伴性と社会性, *ミネルヴァ通信「究」* 5月号, 11-16 (2012), 査読無
7. Hiroaki Mizuhara, Cortical dynamics of human scalp EEG origins in a visually guided motor execution, *NeuroImage*, Vol. 62(3), 1884-95 (2012), 査読有
8. Ogawa Kenji, Inui Toshio, Multiple neural representations of object-directed action in an imitative context, *Experimental Brain Research*, Vol. 216(1), 61-69 (2012), 査読有
9. 鹿内 学, 水原 啓暁, 他者の協調性によっておこる脳の報酬系の変調: fMRI 研究, *電子情報通信学会技術研究報告*, Vol. 111, 287-292 (2012), 査読無
10. 乾 敏郎, 言語ができるまで, *Brain Medical*, Vol. 23, 63-70 (2011), 査読無
11. 水原 啓暁, グローバルな神経協調による情報統合と機能障害, *神経心理学*, Vol. 27(2), 90-96 (2011), 査読無
12. Mizuhara Hiroaki, Yamaguchi Yoko, Neuronal ensemble for visual working memory via interplay of slow and fast oscillations, *European Journal of Neuroscience*, Vol. 33(10), 1925-1934 (2011), 査読有

13. Mizuhara Hiroaki, Inui Toshio, Is mu rhythm an index of the human mirror neuron system? A study of simultaneous fMRI and EEG, *Advances in Cognitive Neurodynamics*, 123-127 (2011), 査読有
14. Iwabuchi Toshiki, Ohba Masato, Inui Toshio, Ogawa Kenji, An fMRI Investigation of the Mental Perspective Shift in Language Comprehension, *Advances in Cognitive Neurodynamics*, 351-355 (2011), 査読有
15. 乾 敏郎, 言語獲得と理解の脳内メカニズム, *The Japanese Journal of Animal Psychology*, Vol. 60(1), 59-72 (2010), 査読有

C01G1

1. Konoike Naho, Kotozaki Yuka, Miyachi Shigehiro, Miyauchi C Makoto, Yomogida Yukihiro, Akimoto Yoritaka, Kuraoka Koji, Sugiura Motoaki, Kawashima Ryuta, Nakamura Katsuki, Rhythm information represented in the fronto-parieto-cerebellar motor system, *NeuroImage*, Vol. 63(1), 328-38 (2012), 査読有
2. Kuraoka Koji, Nakamura Katsuki, Categorical representation of objects in the central nucleus of the monkey amygdala, *The European journal of neuroscience*, Vol. 35(9), 1504-12 (2012), 査読有

C01G2

1. Hideyuki Takahashi, Kazunori Terada, Tomoyo Morita, Shinsuke Suzuki, Tomoki Haji, Hideki Kojima, Masahiro Yoshikawa, Yoshio Matsumoto, Takashi, Omori, Minoru Asada, Eiichi Naito : Different impressions of other agents, obtained through social interaction uniquely modulate dorsal and ventral, pathway activities in the social human brain, *Cortex*, Vol.58, 289-300 (2014), 査読有
2. Akiko Iwasaki, Takayuki Shimotomai, Kasumi Abe, Tomoaki Nakamura, Takayuki Nagai, Takashi Omori, Using Robots to Estimate Children's Personalities, *Transactions of Japan Society of Kansei, Engineering*, Vol.12(1) Special Issue, 219-227 (2013), 査読有
3. 高橋 英之, 岡田 浩之, 大森 隆司, 金岡 利知, 渡辺 一郎, エージェントの擬人化の背景にある並列的な認知処理, *人工知能学会論文誌*, Vol.28(2), 264-271 (2013), 査読有
4. 岩崎 安希子, 下斗米 貴之, 阿部 香澄, 中村 友昭, 長井 隆行, 大森 隆司, 遊びロボットによる子どもの性格傾向の推定に関する研究, *日本感性工学会論文誌*, Vol.12(1), 219-227 (2013), 査読有
5. Takahashi, H., Saito, C., Okada, H., Omori T., An investigation of social factors related to online mentalizing in a human-robot competitive game, *Japanese Psychological Research*, Vol.55(2), 144-153 (2013), 査読有
6. 阿部 香澄, 岩崎 安希子, 中村 友昭, 長井 隆行, 横山 絢美, 下斗米 貴之, 岡田 浩之, 大森 隆司, 子供と遊ぶロボット: 心的状態の推定に基づいた行動決定モデルの適用, *日本ロボット学会誌*, Vol.31(3), 263-274 (2013), 査読有
7. Tomoaki Nakamura, Komei Sugiura, Takayuki Nagai, Naoto Iwahashi, Tomoki Toda, Hiroyuki Okada, Takashi Omori, Learning Novel Objects for Extended Mobile Manipulation, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Vol.66(1-2), 187-204 (2012), 査読有
8. Kazuaki Kojima, Takaya Arita, How Do Equity Norms Evolve? - An Evolutionary Game Theory Approach to Distributive Justice, *Artificial Life and Robotics*, Vol. 17(2), 287-292 (2012), 査読有
9. Kengo Kobayashi, Reiji Suzuki, Takaya Arita, Emergence of Autocatalytic Reaction in a Meme Propagation Model Based on Particle Motion, *Artificial Life and Robotics*, Vol. 17(1), 92-96 (2012), 査読有
10. 岩瀬 雄祐, 鈴木 麗璽, 有田 隆也, 外界と相互作用するセルオートマトンと人間とのインタラクションの創発, *芸術科学会論文誌*, (2012), 査読有
11. 岩瀬 雄祐, 鈴木 麗璽, 有田 隆也, 外乱によって自己組織化するセルオートマトンに基づく普遍部品を用いた自律分散系の制御, *情報処理学会論文誌*, Vol. 53(8), 2001-2005 (2012), 査読有
12. Kenichi Minoya, Takaya Arita, Takashi Omori, Autonomous Acquisition of Cooperative Behavior based on a Theory of Mind using Parallel Genetic Network Programming, *Artificial Life and Robotics*, Vol. 16(2), 157-161 (2011), 査読有
13. 高橋 英之, 大森 隆司, 社会認知における「社会的思い込み効果」の役割とその脳内メカニズム, *認知科学*, Vol.18(1), 138-157 (2011), 査読有
14. Tsubasa Azumagakito, Reiji Suzuki, Takaya Arita, Visualizing Language Evolution as an Emergent Phenomenon based on Biological Evolution and Learning, *Artificial Life and Robotics*, Vol. 16(3), 366-372 (2011), 査読有
15. Kenichi Minoya, Tatsuo Unemi, Reiji Suzuki, Takaya Arita, A Constructive Approach to the Evolution of the Planning Ability, *International Journal of Artificial Life Research*, Vol. 2(3), 22-35 (2011), 査読有

16. Reiji Suzuki, Takaya Arita, Evolution of Cooperation on Different Combinations of Interaction and Replacement Networks with Various Intensity of Selection, *International Journal of Bio-inspired Computation*, Vol. 3(3), 151-158 (2011), 査読有
17. 長田 悠吾, 石川 悟, 大森 隆司, 森川 幸治, 意図推定に基づく行動決定戦略の動的選択による協調行動の計算モデル化, *認知科学*, Vol.17(2), 270-286 (2010), 査読有
18. 中井 淳一, 有田 隆也, 実進化型 2 足歩行ロボットシステムへの先行評価の導入, *人工知能学会誌*, Vol. 25(3), (2010), 査読有
19. Junichi Nakai, Takaya Arita, A Framework for Embodied Evolution with Pre-evaluation Applied to a Biped Robot, *Artificial Life and Robotics*, Vol. 15(3), 240-243 (2010), 査読有
20. Kana Sugiura, Takaya Arita, Why we talk?: Altruism and multilevel selection in the origin of language, *Artificial Life and Robotics*, Vol. 15, (2010), 査読有
21. 横山 絢美, 大森 隆司, 協調課題における意図推定に基づく行動決定過程のモデル的解析, *電子情報通信学会論文誌 A*, Vol.J92-A(11), 734-742 (2009), 査読有
22. Tatsuya Sato, Takaya Arita, Competitive Coevolutionary Algorithms can Solve Function Optimization Problems, *Artificial Life and Robotics*, Vol. 14(3), 440-443 (2009), 査読有
23. Hirofumi Ochiai, Reiji Suzuki, Takaya Arita, The Effects of the Trophic Level on the Stability of Food Webs, *Artificial Life and Robotics*, Vol. 14(3), 379-383 (2009), 査読有
24. 佐藤 竜也, 有田 隆也, 競合型共進化における多様性維持手法による適応度こう配の提供の効果, *電子情報通信学会論文誌*, 1015-1025 (2009), 査読有

C01G3

1. Takashi Hashimoto, Takeshi Konno, Junya Morita, Dividing roles and ordering information flow in the formation of communication systems: The influence of role reversal imitation, *Advances in Cognitive Neurodynamics (IV)*, Hans Liljenstrom (Ed.), Springer, 4 pages, (in printing), 査読有
2. Jiro Okuda, Maki Suzuki, Takeshi Konno, Junya Morita, Takashi Hashimoto, Planning based on one's own past and other's past during a communication task, *Advances in Cognitive Neurodynamics (IV)*, Hans Liljenstrom (Ed.), Springer, 4 pages, (in printing), 査読有
3. Takuma Torii, Takashi Hashimoto, Rethinking context and its calculation mechanism: Correlation-based leaning is effective to calculate chained context, *Springer Transactions on Computational Science*, (in press), 査読有
4. 橋本 敬, 言語とコミュニケーションの創発に対する複雑系アプローチとはなにか, *計測と制御*, Vol. 53(9), 789-793 (2014), 査読有
5. 金野 武司, 森田 純哉, 橋本 敬, 言語的コミュニケーションシステムの創発に関する実験的アプローチ, *計測と制御*, Vol.53(9), 801-807 (2014), 査読有
6. 田村 香織, 橋本 敬, 言語コミュニケーションにおける超越性の成立に関する実験的アプローチ, *計測と制御*, Vol.53(9), 808-814 (2014), 査読有
7. Kaori Tamura, Takashi Hashimoto, Symbol extension and meaning generation in cultural evolution for displaced communication, *The Evolution of Language: Proceedings of the 10th International Conference EVOLANG 10*, Erica A. Cartmill, Seán Roberts, Heidi Lyn, Hannah Cornishpp (Eds.), 326-333 (2014), 査読有
8. Takeshi Konno, Junya Morita, Takashi Hashimoto, Symbol communication systems integrate implicit information in coordination tasks, *Advances in Cognitive Neurodynamics (III): Proceedings of the Third International Conference on Cognitive Neurodynamics - 2011*, 453-459 (2013), 査読有
9. Takuma Torii, Takashi Hashimoto, Differentiation through symbolic communication, *Advances in Cognitive Neurodynamics (III)*, Yoko Yamaguchi (Ed.), Springer:Berlin, 523-530 (2013), 査読有
10. Kaori Tamura, Takashi Hashimoto, Source-target mapping strategy in displaced communication: Communication strategy to represent absent objects. In Markus Knauff, Michael Pauen, Natalie Sebanz & Ipke Wachsmuth (Ed.), *Proceedings of the 35th Annual Meeting of the Cognitive Science Society*, p.4133 (2013), 査読有
11. Guan hong Li, Takashi Hashimoto, Activities of mirror system involved in coordination game. In Markus Knauff, Michael Pauen, Natalie Sebanz and Ipke Wachsmuth (Eds.), *Proceedings of the 35th Annual Meeting of the Cognitive Science Society*, p.4023 (2013), 査読有
12. Kaori Tamura, Takashi Hashimoto, Displacement in communication, *Proceedings of the 9th International Conference (EVOLANG9)*, Thomas C. Scott-Phillips, Monica Tamariz, Erica A Cartmill, James R Hurford (Eds.), World Scientific, 352-359 (2012), 査読有

13. Takeshi Konno, Junya Morita, Takashi Hashimoto, How is pragmatic grounding formed in the symbolic communication systems?, Proceedings of the 9th International Conference (EVOLANG9), Thomas C. Scott-Phillips, Monica Tamariz, Erica A Cartmill, James R Hurford (Eds.), World Scientific, 482-483 (2012), 査読有
14. Takeshi Konno, Junya Morita, Akihito Kishino, Takashi Hashimoto, Jiro Okuda, Maki Suzuki, Three co-creation stages in formation of symbol communication systems, Proceedings of the 34th Annual Meeting of the Cognitive Science Society (CogSci2012), Naomi Miyake, David Peebles, and Richard P. Cooper (Eds.), Cognitive Science Society, TX:Austin, p.2735 (2012), 査読有
15. Junya Morita, Takeshi Konno, Takashi Hashimoto, The role of imitation in generating a shared communication system, Proceedings of the 34th Annual Meeting of the Cognitive Science Society (CogSci2012), Naomi Miyake, David Peebles, and Richard P. Cooper (Eds.), Cognitive Science Society, TX:Austin, 779-784 (2012), 査読有
16. Guan hong Li, Takashi Hashimoto, Size effect during emergence of symbolic communication system revealed by agent-based, modelling, Proceedings of the 34th Annual Meeting of the Cognitive Science Society (CogSci2012), Naomi Miyake, David Peebles, and Richard P. Cooper (Eds.), Cognitive Science Society, TX:Austin, p.2754 (2012), 査読有
17. Kaori Tamura, Takashi Hashimoto, Understanding displacement of communication by graphical communication tasks, Proceedings of the 34th Annual Meeting of the Cognitive Science Society (CogSci2012), Naomi Miyake, David Peebles, and Richard P. Cooper (Eds.), Cognitive Science Society, TX:Austin, p. 2884 (2012), 査読有
18. Takuma Torii, Takashi Hashimoto, Modelling generation and sharing of novel expressions and meanings in symbolic communication, International Journal Bio-Inspired Computation, Vol. 3(3), 168-178 (2011), 査読有
19. Takashi Hashimoto, Takeshi Konno, Language origin from simulation of language evolution, Comment on "Modeling the Cultural evolution of language" by Luc Steels, Physics of Life Reviews, Vol.8(4), 365-366 (2011), 査読有
20. 鳥居 拓馬, 橋本 敬, 離散連続結合モデルを用いた記号コミュニケーションにおける動的生成メカニズムの解析, 信学技報非線形問題, Vol. 110(122), 39-42 (2010), 査読有

C01G4

1. Inoue, Y., Sakaguchi, Y., Periodic change in phase relationship between target and hand motion during visuo-manual tracking task: Behavioral evidence for intermittent control, Human Movement Science, Vol.33, 211-226 (2014), 査読有
2. Naruse, Y., Takiyama, K., Okada, M., Umehara, H., Statistical method, for detecting phase shifts in alpha rhythm from human, electroencephalogram data, Physical Review E87, (2013), 査読有
3. Sakaguchi, Y., Intermittent brain motor control observed in continuous, tracking task, Advances in Cognitive Neurodynamics (III), 461-468 (2013), 査読有
4. Carpaneto J., Raos V., Umiltà M.A., Fogassi L., Akira M., Gallese, V., Micera, S., Continuous decoding of grasping tasks for a prospective, implantable cortical neuroprosthesis, Journal of Neuroengineering and Rehabilitation, Vol. 9(84), (2012), 査読有
5. 内藤 栄一, 上原 信太郎, 村田 哲, 出江 紳一, 感覚刺激と運動学習, 理学療法ジャーナル, Vol. 46(1), 25-35 (2012), 査読有
6. 村田 哲, 身体意識とミラーニューロン, Clinical Neuroscience, Vol. 29, 909-918 (2011), 査読有
7. Carpaneto, J., Umiltà, M.A., Fogassi, L., Murata, A., Gallese, V., Micera, S., Raos, V., Decoding the activity of grasping neurons recorded from the ventral premotor area F5 of the macaque monkey, Neuroscience, Vol. 188, 80-94 (2011), 査読有
8. Sakaguchi, Y., Ishida, F., Shimizu, T. and Murata, A., Time course of information representation of macaque AIP neurons in hand manipulation, task revealed by information analysis, Journal of Neurophysiology, Vol. 104(6), 3625-3643 (2010), 査読有
9. Naruse Y., Takiyama K., Okada M., Murata T., Inference in alpha rhythm phase and amplitude modeled on Markov random field using belief propagation from electroencephalograms, Physical Review E, Vol. 82, 011912 (2010), 査読有
10. Ishida H., Nakajima K., Inase M., Murata A., Shared Mapping of Own and Others' Bodies in Visuotactile Bimodal Area of Monkey Parietal Cortex, Cogn Neurosci, Vol. 22(1), 83-96 (2010), 査読有
11. Naruse Y., Takiyama K., Okada M., Murata T., Inference in alpha rhythm phase and amplitude modeled on Markov random field using, Physical Review E, Vol. 82, 011912 (11 pages) (2010), 査読有

12. Ishida, F., Sasaki, T., Sakaguchi, Y. and Shimai, H., Reinforcement-learning agents with different temperature parameters explain the variety of human action-selection behavior in a Markov decision process task, *Neurocomputing*, Vol. 72, 1979-1984 (2009), 査読有
13. 村田 哲, ミラーニューロンは他者を写すだけなのか, *こころの科学*, Vol. 11(148), 9-20 (2009), 査読有
14. Ishida H., Nakajima K., Inase M., Murata A., Shared Mapping of Own and Others' Bodies in Visuotactile Bimodal Area of Monkey Parietal Cortex, *Journal of cognitive neuroscience*, Vol. 21(1), 83-96 (2009), 査読有

A01K1

1. Tatsuo Yanagita, Design and Dynamics of Active-Touch Sensory Model, *Advances in Cognitive Neurodynamics (III)*, 583-589 (2013), 査読有
2. Hiroya Nakao, Tatsuo Yanagita, Yoji Kawamura, Phase description of stable limit-cycle solutions in reaction-diffusion systems, *Procedia IUTAM* 5, 227-233 (2012), 査読有
3. Tatsuo Yanagita, Alexander S. Mikhailov, Design of oscillator networks with enhanced synchronization tolerance against noise, *Physical Review E*, 85, 056206-056213 (2012), 査読有
4. Tetsuro Konishi Tatsuo Yanagita, Slow relaxation to equipartition in spring-chain systems, *Journal of Statistical Mechanics*, P09001- P09015 (2010), 査読有
5. Tatsuo Yanagita, Alexander S. Mikhailov, Design of easily synchronizable oscillator networks using Monte Carlo Optimization method, *Physical Review E*, 81,056204-056212 (2010), 査読有

A01K2

1. Takashi Tateno, The hyperpolarization-activated current regulates synchronization of gap-junction coupled dopaminergic neurons in the midbrain, *Transactions on Electronics, Information and Systems*, Vol. 7(3), 283-290 (2012), 査読有
2. Takashi Tateno, Morphological properties in dopaminergic neurons of the rat midbrain during early developmental stages and one numerical approach to passive-membrane modeling, *IEEE Japan Transactions on Electronics, Information and Systems*, Vol. 131(1), 50-55 (2011), 査読有

A01K3

1. Tetsuya Minatohara, Tetsuo Furukawa, The self-organizing adaptive controller, *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, Vol. 7(4), 1933-1947 (2011), 査読有

A01K4

1. Naoyuki Sato, Integration of visual scenes and motion signals by entorhinal grid cells during spatial imagery, *Australian Journal of Intelligent Information Processing Systems*, vol.11(1), 1-6 (2010), 査読有

B01K1

1. 中島 敏, 宮崎 淳, 嶋 啓節, 虫明 元, 順序動作課題と割込課題からなる二重課題を制御する神経機構, *日本神経回路学会誌*, Vol. 18(3), 129-134 (2011), 査読無
2. Shigeru Shinomoto, Takahiro Omi, Akihisa Mita, Hajime Mushiake, Keisetsu Shima, Yoshiya Matsuzaka, Jun Tanji, Deciphering elapsed time and predicting action timing from neuronal population signals. *Frontiers in computational neuroscience*, Vol. 5:29 (2011), 査読有
3. Hiromasa Sawamura, Keisetsu Shima, Jun Tanji, Deficits in action selection based on numerical information after inactivation of the posterior parietal cortex in monkeys. *Journal of neurophysiology*, Vol. 104(2), 902-10 (2010), 査読有

B01K2

1. Katori Y, Sakamoto K, Saito N, Tanji J, Mushiake H, Aihara K, Representational switching by dynamical reorganization of attractor atructure in a network model of the prefrontal cortex, *PLoS Comput Biol*, Vol. 7, e1002266 (2011), 査読有
2. 坂本 一寛, 脳信号計測法新時代への黎明, *電気学会誌*, Vol. 131(12), 822-826 (2011), 査読有
3. Sakamoto K, Kumada T, Yano M, A computational model that enables global amodal completion based on V4 neurons, *Lecture Notes Comput Sci*, Vol. 6443, 9-16 (2010), 査読有

B01K3

1. Itou Y, Nochi R, Kuribayashi H, Saito Y, Hisatsune T, Cholinergic activation of hippocampal neural stem cells in aged dentate gyrus, *Hippocampus*, Vol. 21(4), 446-59 (2011), 査読有
2. Aizawa K, Ageyama N, Terao K, Hisatsune T, Primate-specific alterations in neural stem/progenitor cells in the aged hippocampus, *Neurobiology of aging*, Vol. 32(1), 140-50 (2011), 査読有
3. Chin Y, Sato Y, Mase M, Kato T, Herculano B, Sekino M, Ohsaki H, Ageyama N, Ono F, Terao K, Yoshikawa Y, Hisatsune T, Transient decrease in cerebral motor pathway fractional anisotropy after focal ischemic stroke in monkey, *Neuroscience Research*, Vol. 66, 406-411 (2010), 査読有

4. Sekino M, Ohsaki H, Wada H, Hisatsune T, Ozaki O, Kiyoshi T, Fabrication of an MRI model magnet with an off-centered distribution of homogeneous magnetic field zone, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 20(3), 781-785 (2010), 査読有
5. Wada H, Sekino M, Ohsaki H, Hisatsune T, Ikehira H, Kiyoshi T, Prospect of High-Field MRI, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 20(3), 115-122 (2010), 査読有

B01K4

1. 関口 智樹, 大森 敏明, 岡田 真人, 確率的 Slow Feature Analysis における観測ノイズの影響, *情報処理学会論文誌数理モデル化と応用*, Vol.5(3), 26-31 (2012), 査読有
2. Keisuke Ota, Toshiaki Omori, Shigeo Watanabe, Hiroyoshi Miyakawa, Masato Okada, Toru Aonishi, Measurement of Infinitesimal Phase Response Curves from Noisy Real Neurons, *Physical Review E*, Vol. 84(4), 041902[7] (2011), 査読有
3. 大森 敏明, 岡田 真人, 海馬システムの数理モデル, *Clinical Neuroscience*, Vol. 29(2), 162-166 (2011), 査読無
4. Takamasa Tsunoda, Toshiaki Omori, Hiroyoshi Miyakawa, Masato Okada, *Toru Aonishi, Estimation of Intracellular Calcium Ion Concentration by Nonlinear State Space Modeling and EM Algorithm for Parameter Estimation, *Journal of the Physical Society of Japan*, Vol. 79(12), 124801-1-124801-8 (2010), 査読有
5. Takamasa Tsunoda, Yoshiaki Oda, Toshiaki Omori, Masato Okada, Masashi Inoue, Hiroyoshi Miyakawa, Toru Aonishi, Statistical Calibration Method for Physiological Ca²⁺ Fluorescence Signals, *Australian Journal of Intelligent Information Processing Systems*, Vol. 11(1), 29-34 (2010), 査読有

B01K5

1. K. Soma, R. Mori, R. Sato & S. Nara, “A Heuristic Approach to Intra-Brain Communications Using Chaos in a Recurrent Neural Network Model” , *Proc. of Int. Conf. on Numerical Analysis and Applied Mathematics (CDROM)*, Volume A, 1354-1357, (2011), 査読有
2. Ryosuke Yoshinaka, Masato Kawashima, Yuta Takamura, Hitoshi Yamaguchi, Naoya Miyahara, Kei-ichiro Nabeta, Yongtao Li, and Shigetoshi Nara, A novel adaptive control via simple, rule(s) using chaotic dynamics, in a recurrent neural network model,, and its hardware implementation, *Proceedings of the International Conference on Neural Computation*, 145-155 (2010), 査読有
3. Hiroyuki Yoshida, Shuhei Kurata, Yongtao Li, Shigetoshi Nara, Chaotic Neural Network Applied to Two-Dimensional Motion Control, *Cognitive Neurodynamics*, Vol. 4, 69-80 (2010), 査読有

B01K6

1. Mai Iwasaki, Thomas M. Poulsen, Kotaro Oka, Neal A. Hessler, Sexually dimorphic activation of dopaminergic areas depends on affiliation during courtship and pair formation, *Front. Behav. Neurosci.*,11:8:210. doi: 10.3389/fnbeh.2014.00210. eCollection (2014), 査読有
2. Mai Iwasaki, Thomas M. Poulsen, Kotaro Oka, Neal A. Hessler, Singing-related activity in anterior forebrain of male zebra finches reflects courtship motivation for target females, *PLoS One*. 2013;8(11):e81725. doi: 10.1371/journal.pone.0081725. eCollection (2013), 査読有
3. Haruhito Horita, Masahiko Kobayashi, Wan-chun Liu, Kotaro Oka, Erich D. Jarvis, Kazuhiro Wada, Specialized motor-driven *dusp1* expression in the song systems of multiple lineages of vocal learning birds, *PLoS One*. 7(8):e42173. doi: 10.1371/journal.pone.0042173 (2012), 査読有

B01K7

1. Takemura H, Samejima K, Vogels R, Sakagami M, Okuda J, Stimulus-dependent adjustment of reward prediction error in the midbrain, *PloS One* 6 e28337 (2011), 査読有
2. Doya, K., Ito, M., Samejima, K., Ch9, Model-based analysis of decision variables, In *Decision making, Affect, and Learning; Attention and Performance XXIII*, pp.189-204, Oxford University Press (2011), 査読有

B01K8

1. Yoshiyuki Kubota, Fuyuki Karube, Masaki Nomura, Allan T. Gullledge, Atsushi Mochizuki, Andreas Schertel, Yasuo Kawaguchi, Conserved properties of dendritic trees in four cortical interneuron subtypes, *Scientific Reports*, Vol. 1, 89 (2011), 査読有
2. Mieko Morishima, Kenji Morita, Yoshiyuki Kubota, Yasuo Kawaguchi, Highly differentiated projection-specific cortical subnetworks, *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience*, Vol. 31(28), 10380-91 (2011), 査読有
3. Jerry L Chen, Walter C Lin, Jae Won Cha, Peter T So, Yoshiyuki Kubota, Elly Nedivi, Structural basis for the role of inhibition in facilitating adult brain plasticity, *Nature neuroscience*, Vol. 14(5), 587-94 (2011), 査読有

4. Kubota Y, Shigematsu N, Karube F, Sekigawa A, Kato S, Yamaguchi N, Hirai Y, Morishima M, Kawaguchi Y, Selective Coexpression of Multiple Chemical Markers Defines Discrete Populations of Neocortical GABAergic Neurons, *Cerebral cortex* (New York, N.Y. : 1991), Vol.21(8), 1803-1817 (2011), 査読有

B01K9

1. Yasuhiro Tsubo, Yoshikazu Isomura, Tomoki Fukai, Power-law inter-spike interval distributions infer a conditional maximization of entropy in cortical neurons, *PLoS Computational Biology*, Vol. 8(4), e1002461, 査読有
2. Takashi Takekawa, Yoshikazu Isomura, Tomoki Fukai, Spike sorting of heterogeneous neuron types by multimodality-weighted PCA and explicit robust variational Bayes, *Frontiers in neuroinformatics*, Vol. 6, 5 (2012), 査読有
3. 磯村 宜和, 木村 梨絵, 高橋 宗良, マルチニューロン記録実験の実用プロトコール, *日本神経回路学会誌*, Vol. 18(1), 14-21 (2011), 査読無
4. Yutaka Yamaguti, Shigeru Kuroda, Yasuhiro Fukushima, Minoru Tsukada, Ichiro Tsuda, A mathematical model for Cantor coding in the hippocampus, *Neural Networks*, Vol. 24(1), 43-53 (2010), 査読有
5. Leonid A. Safonov, Yoshikazu Isomura, Siu Kang, Zbigniew R. Struzik, Tomoki Fukai, Hideyuki C'ateau, Near scale-free dynamics in neural population of waking/sleeping rats revealed by multiscale analysis, *PLoS ONE*, Vol. 5(9), e12869 (2010), 査読有
6. Yoko Fujiwara-Tsukamoto, Yoshikazu Isomura, Michiko Imanishi, Taihei Ninomiya, Minoru Tsukada, Yuchio Yanagawa, Tomoki Fukai, Masahiko Takada, Prototypic seizure activity driven by mature hippocampal fast-spiking interneurons, *Journal of Neuroscience*, Vol. 30(41), 13679-13689 (2010), 査読有
7. Leonid A. Safonov, Yoshikazu Isomura, Siu Kang, Zbigniew R. Struzik, Tomoki Fukai, Hideyuki C'ateau, Near scale-free dynamics in neural population of waking/sleeping rats revealed by multiscale analysis, *PLoS ONE*, Vol. 5(9), e12869 (2010), 査読有

B01K10

1. Jun Nishikawa and Kazuo Okanoya, Cantor coding of song sequence in the Bengalese finch HVC, *Advances in Cognitive Neurodynamics* (III), Y. Yamaguchi (ed.), Springer, pp. 629-634, (2012), 査読有
2. Katahira Kentaro, Nishikawa Jun, Okanoya Kazuo, Okada Masato, Extracting state transition dynamics from multiple spike trains using hidden Markov models with correlated poisson distribution, *Neural computation*, Vol. 22(9), 2369 - 2389 (2010), 査読有
3. 西川 淳, 高橋 美樹, 加藤 真樹, 岡ノ谷 一夫, 言語起源研究のためのモデル動物: ジュウシマツ, *生体の科学*, Vol. 61(1), 30-40 (2010), 査読無
4. 西川 淳, 機能的ネットワークの可視化によって探る時系列処理を司る局所神経回路メカニズム, *生物物理*, Vol. 50(3), 134-135 (2010), 査読有

C01K1

1. Shinji Yamaguchi, Sachiko Katagiri, Naoya Aoki, Eiji Iikubo, Takaaki Kitajima, Toshiya Matsushima, Koichi J Homma, Molecular function of microtubule-associated protein 2 for filial imprinting in domestic chicks (*Gallus gallus domesticus*), *Neuroscience Research*, Vol.69(1), 32-40 (2011), 査読有
2. Shinji Yamaguchi, Ikuko Fujita-Taira, Naoki Hirose, Takaaki Kitajima, Sachiko Katagiri, Ai Kawamori, Toshiya Matsushima, Koichi J. Homma, Bioluminescence imaging of c-fos gene expression accompanying filial imprinting in the newly hatched chick brain, *Neuroscience Research*, Vol. 67, 192-195 (2010), 査読有
3. Ai Kawamori, Toshiya Matsushima, Subjective value of risky foods for individual domestic chicks: a hierarchical Bayesian model, *Animal Cognition*, Vol. 67(192), (2010), 査読有
4. Hidetoshi Amita, Ai Kawamori, Toshiya Matsushima, Social influences of competition on impulsive choices in domestic chicks, *Biology Letters*, Vol. 6, 183-186 (2010), 査読有

C01K2

1. Nishida S, Tanaka T, Ogawa T, Transition of target-location signaling in activity of macaque lateral intraparietal neurons during delayed-response visual search, *Journal of Neurophysiology*, Vol. 112(6), 1516-1527 (2014), 査読有
2. Nishida S, Tanaka T, Shibata T, Ikeda K, Aso T, Ogawa T, Discharge-rate persistence of baseline activity during fixation reflects maintenance of memory-period activity in the macaque posterior parietal cortex, *Cerebral Cortex*, Vol. 24(6), 1671-1685 (2014), 査読有

3. Nishida S, Tanaka T, Ogawa T, Separate evaluation of target facilitation and distractor suppression in the activity of macaque lateral intraparietal neurons during visual search, *Journal of Neurophysiology*, Vol. 110(12), 2773-2791 (2013), 査読有
4. Tanaka T, Nishida S, Aso T, Ogawa T, Visual response of neurons in the lateral intraparietal area and saccadic reaction time during a visual detection task, *The European Journal of Neuroscience*, Vol. 37(6), 942-956 (2012), 査読有
5. Fujimoto A, Nishida S, Ogawa T, Dynamic alternation of primate response properties during trial-and-error knowledge updating, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 60(5), 747-753 (2012), 査読有
6. Atsushi Fujimoto, Satoshi Nishida, Tadashi Ogawa, Dynamic alternation of primate response properties during trial-and-error knowledge updating, *Journal of Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 60(5), 747-753 (2011), 査読有
7. Tadashi Ogawa, Hidehiko Komatsu, Differential temporal storage capacity in the baseline activity of neurons in macaque frontal eye field and area V4, *Journal of Neurophysiology*, Vol. 103(5), 2433-45 (2010), 査読有

C01K3

1. Onaka Tatsushi, Takayanagi Yuki, Yoshida Masahide, Roles of oxytocin neurones in the control of stress, energy metabolism, and social behavior, *Journal of neuroendocrinology*, Vol. 24(4), 587-98 (2012), 査読有
2. Maroot Kaewwongse, Yuki Takayanagi, Tatsushi Onaka, Effects of RFamide-related peptide (RFRP)-1 and RFRP-3 on oxytocin release and anxiety-related behaviour in rats, *Journal of neuroendocrinology*, Vol. 23(1), 20-7 (2011), 査読有
3. Yuki Takayanagi, Tatsushi Onaka, Roles of prolactin-releasing peptide and RFamide related peptides in the control of stress and food intake, *FEBS Journal*, Vol. 277(24), 4998-5005 (2010), 査読有
4. Takayanagi Yuki, Fujita E, Yu Z, Yamagata T, Momoi MY, Momoi T, Onaka Tatsushi, Impairment of social and emotional behaviors in *Cadm1*-knockout mice, *Biochemical and biophysical research communications*, Vol. 396(3), 703-8 (2010), 査読有

C01K4

1. 松元 健二, 松元 まどか, 村山 航, 出馬 圭世, 目標指向行動と内発的動機の神経機構, 基礎心理学研究, Vol. 29(2), 164-170 (2011), 査読有
2. Keise Izuma, Madoka Matsumoto, Kou Murayama, Kazuyuki Samejima, Norihiro Sadato, Kenji Matsumoto, Neural correlates of cognitive dissonance and choice-induced preference change, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 107(51), 22014-9 (2010), 査読有
3. Kou Murayama, Madoka Matsumoto, Keise Izuma, Kenji Matsumoto, Neural basis of the undermining effect of monetary reward on intrinsic motivation, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 107, 20911-20916 (2010), 査読有

C01K5

1. Midori Osada, Tetsu Okumura, Context based call variation in the male Bengalese finch (*Lonchura striata* var. *domestica*), *Advances in Cognitive Neurodynamics (III): Proceedings of the Third International Conference on Cognitive Neurodynamics - 2011*, 657-663 (2013), 査読有
2. 奥村 哲, 光硬化性のレジン接着を活用した, 小動物頭蓋骨への電極ステージやマイクロダイアリスガイドカニューレの固定. 静岡実験動物研究会々報 Vol. 38(1), 13-16 (2012), 査読有
3. 奥村 哲, 山下 祐一, 岡ノ谷 一夫, 谷 淳, 実験モデルとしての鳴禽類の歌制御システム, 日本神経回路学会誌, Vol. 18(3), 135-146 (2011), 査読有
4. Yasuko Tobari, Tetsu Okumura, Jun Tani, Kazuo Okanoya, A direct neuronal connection between the telencephalic nucleus *robustus arcopallialis* and the nucleus *nervi hypoglossi, pars tracheosyringalis* in Bengalese finches (*Lonchura striata* var. *domestica*), *Neuroscience research*, Vol. 71(4), 361-368 (2011), 査読有
5. Yamashita Yuichi, Okumura Tetsu, Okanoya Kazuo, Tani Jun, Cooperation of deterministic dynamics and random noise in production of complex syntactical avian song sequences: a neural network model, *Frontiers in computational neuroscience*, Vol. 5, 18 (2011), 査読有

C01K6

1. Keisuke Okuno, Tetsunari Inamura, Motion Coaching with Emphatic Motions and Adverbial Expressions for Human beings by Robotic System –Method for Controlling Motions and Expressions with Sole Parameter–, *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 3381-3386 (2011), 査読有

C01K7

1. Masatoshi Yoshida, Laurent Itti, David J. Berg, Takuro Ikeda, Rikako Kato, Kana Takaura, Brian J. White, Douglas P. Munoz, Tadashi Isa, Residual attention guidance in blindsight monkeys watching complex natural scenes, *Current Biology*, vol. 22(15), 1429-1434 (2012) 査読有
2. Rikako Kato, Takuro Ikeda, Kana Takaura, Masatoshi Yoshida, Tadashi Isa. Contribution of the retino-tectal pathway to visually guided saccades after lesion of the primary visual cortex in monkeys, *European Journal of Neuroscience*, vol. 33, 1952-1960 (2011), 査読有
3. Kana Takaura, Masatoshi Yoshida, Tadashi Isa, Neural substrate of spatial memory in the superior colliculus after damage to the primary visual cortex, *Journal of Neuroscience*, vol. 31, 4233-4241 (2011), 査読有
4. Takuro Ikeda, Masatoshi Yoshida, Tadashi Isa, Lesion of primary visual cortex in monkey impairs the inhibitory but not the facilitatory cueing effect on saccade, *Journal of Cognitive Neuroscience*, vol. 23, 1160-1169 (2011), 査読有

C01K8

1. Shimoda, K., Nagasaka, Y., Chao, Z. C., Fujii, N., Decoding continuous three-dimensional hand trajectories from epidural electrocorticographic signals in Japanese macaques, *J Neural Eng.* 9, 3, 036015, DOI: 10.1088/1741-2560/9/3/036015, (2012), 査読有
2. Nagasaka, Y., Shimoda, N., Fujii, N., Multidimensional recording (MDR) and data sharing: an ecological open research and educational platform for neuroscience, *PLoS ONE* 6(7): e22561. doi:10.1371/journal.pone.0022561 (2011), 査読有
3. *Nagasaka, Y., *Santos, SS., Fujii, N., & Nakahara, H., Encoding of social state information by neuronal activities on the macaque caudate nucleus, *Social Neuroscience* 2012 Jan;7(1), 42-58. Epub 2011 Oct 3. (* Equally contributed), (2012), 査読有

C01K9

1. Jun Namikawa, Ryunosuke Nishimoto, Jun Tani, A Neurodynamic Account of Spontaneous Behaviour, *PLoS Computational Biology*, Vol. 7(10), (2011), 査読有
2. Yuichi Yamashita, Tetsu Okumura, Kazuo Okanoya, Jun Tani, Cooperation of deterministic dynamics and random noise in production of complex syntactical avian song sequences: a neural network model, *Front. Comput. Neurosci.*, Vol. 5(18), (2011), 査読有

C01K10

1. Takayuki Hosokawa, Masataka Watanabe, Prefrontal neurons represent winning and losing during competitive video shooting games between monkeys, *Journal of Neuroscience*, Vol. 32(22), 7662-7671 (2012), 査読有
2. Masataka Watanabe, Are there internal thought processes in the monkey?--default brain activity in humans and nonhuman primates, *Behavioural brain research*, Vol. 221(1), 295-303 (2011), 査読有
3. 渡辺 正孝, 脳活動からみえる動物のこころ, *動物心理学研究*, Vol. 61(2), 131-139 (2011), 査読有

A01P1

1. Wang AY, Miura K, Uchida N, The dorsomedial striatum encodes net expected return, critical for energizing performance vigor, *Nature neuroscience*, Vol. 16(5), 639-47 (2013), 査読有
2. Miura K, A Semiparametric Covariance Estimator Immune to Arbitrary Signal Drift, *Interdisciplinary Information Sciences*, Vol. 19(1), 35-41 (2013), 査読有
3. Miura K, Mainen ZF, Uchida N, Odor representations in olfactory cortex: distributed rate coding and decorrelated population activity., *Neuron*, Vol. 74(6), 1087-98 (2012), 査読有

A01P2

1. Mizuki Oka, Yasuhiro Hashimoto, Takashi Ikegami, Self-organization on social media: endo-exo bursts and baseline fluctuations, *PLoS ONE*, 9(10), e109293, doi:10.1371/journal.pone.0109293, (2014), 査読有
2. Tom Froese, Hiroyuki Iizuka, Takashi Ikegami, Using minimal human-computer interfaces for studying the interactive development of social awareness, *Frontier. Psychol.*, 5 (1061), (2014), 査読有
3. Tom Froese, Hiroyuki Iizuka, Takashi Ikegami, Embodied social interaction constitutes social cognition in pairs of humans: A minimalist virtual reality experiment, *Scientific Report*. Vol. 4, No. 3672, (2014), 査読有
4. Tom Froese, Nathaniel Virgo and Takashi Ikegami: Motility at the Origin of Life: Its Characterization and a Model, *Artificial Life*. 20(1), 55-76 (2014), 査読有

5. Mizuki Oka, Takashi Ikegami, Exploring Default Mode and Information Flow on the Web, PLoS One, Vol. 8(4), e60398 (2013), 査読有
6. Tom Froese, Alex Woodward, Takashi Ikegami, Turing instabilities in biology, culture, and consciousness? On the enactive origins of symbolic material culture, Adaptive Behaviors, Vol. 21(3), 199-214 (2013), 査読有
7. Tom Froese, Charles Lenay, Takashi Ikegami, Imitation by social interaction? Analysis of a minimal agent-based model of the correspondence problem, Frontiers in Human Neuroscience, (2012), 査読有
8. Tom Froese, Thomas Fuchs, The extended body: a case study in the neurophenomenology of social interaction, Phenomenology and the Cognitive Sciences, Vol. 11(2), 205-235 (2012), 査読有
9. Geoff Nitschke, Martijn Schut, Agoston Eiben, Evolving Team Behaviors with Specialization, Genetic Programming and Evolvable Machines, Vol. 13(4), 493-536 (2012), 査読有
10. Ryoko Uno, Keisuke Suzuki, Takashi Ikegami, An Experimental Approach to Speakers' Perspectives in a Paired Wall Game, Advances in Complex Systems, Vol. 15(3), 1150020-1 - 1150020-20 (2012), 査読有

A01P3

1. Yasuaki Kobayashi, Hiroshi Kori, Reentrant transition in coupled noisy oscillators, Phys. Rev. E 91, 012901 (2015), 査読有
2. Yuki Izumida, Hiroshi Kori, Coarse-grained description of general oscillator networks, arXiv, 1311.0917 (2013), 査読無

A01P4

1. Takaaki Aoki, Toshio Aoyagi, Scale-Free Structures Emerging from Co-evolution of a Network and the Distribution of a Diffusive Resource on it, Physical review letters, Vol. 109(20), 208702 (2012), 査読有

A01P5

1. 杉山 貴昭, 秋山 正和, 手老 篤史, 四脚動物の自発的な歩容遷移を再現する結合振動子モデル, 応用数学合同研究集会資料, (2014), 査読無
2. 山口 達也, 手老 篤史, 國田 樹, 中垣 俊之, テトラヒメナの容器記憶現象に対するの数理モデル, 応用数学合同研究集会資料, (2014), 査読無
3. Yamaguchi Tatsuya, Akiyama Masakazu, Tero Atsushi, The mathematical model to the spatial adaptation of the circle container of tetrahymena, The impact of applications on mathematics, Lecture note Vol. 51, Kyushu University, (2013), 査読無
4. Sugiyama Takaaki, Akiyama Masakazu, Tero Atsushi, Modeling of gait transition in quadruped locomotion subject to coupled oscillators without switching system, The impact of applications on mathematics, Lecture note vol. 51, Kyushu University, (2013), 査読無

A01P6

1. Sho Yakushiji, Tetsuo Furukawa, Shape space estimation by higher-rank of SOM, Neural Computing and Applications, Vol. 22(7-8), 1267-1277 (2012), 査読有
2. Kazuhiro Tokunaga, Nobuyuki Kawabata, Tetsuo Furukawa, Self Evolving Modular Network, IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems, Vol. E95-D(5), 1506-1518 (2012), 査読有

A01P7

1. Hiromichi Suetani, Jun Morimoto, Canonical Correlation Analysis for Muscle Synergies Organized by Sensory-Motor Interactions in Musculoskeletal Arm Movements, 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA), 2591-2596 (2013), 査読有
2. U.Parlitz, Hiromichi Suetani, S. Luther, Identification of equivalent dynamics using ordinal pattern distributions, THE EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL SPECIAL TOPICS, 553-568 (2013), 査読有

A01P8

1. Naoyuki Sato, Fast entrainment of human electroencephalogram to a theta-band photic flicker during successful memory encoding, Frontiers in human neuroscience, Vol. 7(208), (2013), 査読有

B01P1

1. Haruka Arisawa, Ryosuke Hosaka, Keisetsu Shima, Hajime Mushiake, Toshi Nakajima, Cue-dependent Modulation of Synchrony in Primates' Medial Motor Areas, Advances in Cognitive Neurodynamics (IV), in press, 査読有
2. Atsushi Miyazaki, Toshi Nakajima, Keisetsu Shima, Hajime Mushiake, Neuronal Activity in the Prefrontal Cortex During Performance of a Dual Task Consisting of a Main- and An Interrupting-Task, Advances in Cognitive Neurodynamics (III), 795-801 (2013), 査読有

3. Toshi Nakajima, Ryosuke Hosaka, Ichiro Tsuda, Jun Tanji, Hajime Mushiake, Two-dimensional representation of action and arm-use sequences in the presupplementary and supplementary motor areas, *The Journal of neuroscience*, Vol. 33(39), 15533-44 (2013), 査読有
4. Atsushi Miyazaki, Toshi Nakajima, Keisetsu Shima, Hajime Mushiake, Neuronal Activity in the Prefrontal Cortex During Performance of a Dual Task Consisting of a Main- and An Interrupting-Task, *Advances in Cognitive Neurodynamics (III)*, 795-801 (2013), 査読有
5. Hajime Mushiake, Keisetsu Shima, Kazuhiro Sakamoto, Yuichi Katori, Kazuyuki Aihara, Dynamic Neuronal Representation in the Prefrontal Cortex, *Advances in Cognitive Neurodynamics (III)*, 9-15 (2013), 査読有
6. Jun-ichi Iwata, Keisetsu Shima, Jun Tanji, Hajime Mushiake, Neurons in the cingulate motor area signal context-based and outcome-based volitional selection of action, *Experimental brain research*, Vol. 229(3), 407-417 (2013), 査読有
7. Emiko Aizawa, Yasuhiro Sato, Takanori Kochiyama, Naohiro Saito, Masahiro Izumiyama, Joe Morishita, Motoyori Kanazawa, Keisetsu Shima, Hajime Mushiake, Michio Hongo, Shin Fukudo, Altered cognitive function of prefrontal cortex during error feedback in patients with irritable bowel syndrome, based on FMRI and dynamic causal modeling, *Gastroenterology*, Vol. 143(5), 1188-98 (2012), 査読有

B01P2

1. Sakamoto K, Katori Y, Saito N, Yoshida S, Aihara K, Mushiake H, Increased firing irregularity as an emergent property of neural-state transition in monkey prefrontal cortex, *PlosONE*, Vol. 8, e80906 (2013), 査読有
2. 坂本 一寛, 複雑系神経科学からの 10 の問題意識, *日本神経回路学会誌*, Vol. 20, 174-179 (2013), 査読無
3. 坂本 一寛, 虫明 元, 行動の計画と前頭前野ダイナミクス, *日本神経回路学会誌*, Vol. 20, 37-41 (2013), 査読無
4. Kazuhiro Sakamoto, Katsutoshi Yamamoto, Naohiro Saito, Kazuyuki Aihara, Jun Tanji, Hajime Mushiake, Neuronal synchrony during the planning and execution period in the prefrontal cortex, *Advances in Cognitive Neurodynamics (III)*, 331-338 (2012), 査読有
5. Hajime Mushiake, Keisetsu Shima, Kazuhiro Sakamoto, Yuichi Katori, Kazuyuki Aihara, Dynamical neuronal representation in the prefrontal cortex, *Advances in Cognitive Neurodynamics (III)*, 9-15 (2013), 査読有
6. Norihiko Kawaguchi, Kazuhiro Sakamoto, Yoshito Furusawa, Naohiro Saito, Jun Tanji, Hajime Mushiake, Dynamic information processing in the frontal association areas of monkeys during hypothesis testing behavior, *Advances in Cognitive Neurodynamics (III)*, Vol. 3, 691-698 (2012), 査読有

B01P3

1. Seiji Kuwada, Tomoya Aota, Kengo Uehara, Satoshi Hiraga, Yuta Takamura, Shigetoshi Nara, Behavioral Interactions of Two Individual Arm Robots Using Independent Chaos in Recurrent Neural Networks, *Proceedings of The 4th International Conference on Cognitive Neurodynamics 2013*, in press, 査読有
2. Ken-ichiro Soma, Ryota Mori, Shigetoshi Nara, Simultaneous Multichannel Communication Using Chaos in A Recurrent Neural Network, *Proceedings of The 4th International Conference on Cognitive Neurodynamics 2013*, in press, 査読有
3. Jousuke Kuroiwa, Shigetoshi Nara, Errorless description with two rules of cellular automata for digital sound data, *International Journal of Bifurcation and Chaos*, Vol. 23, 1350148 (2013), 査読有
4. Yu Arai, Ryota Mori, Fuyuki Aoto, Shigetoshi Nara, A Heuristic Model of Intra-Brain Communications Using Chaos in Artificial Neuron Systems, *Advances in Cognitive Neurodynamics (III)*, Y. Yamaguchi et al. (Eds.), 673-682, Springer Verlag, (2013), 査読有

B01P4

1. Nishida, H., Takahashi, M., & Lauwereyns, J., Within-sessions dynamics of theta-gamma coupling and high-frequency oscillations during spatial alternation in rat hippocampal area CA1, *Cognitive Neurodynamics*, 8, 363-372 (2014), 査読有.
2. Takahashi, M., Nishida, H., Redish, A. D., & Lauwereyns, J., Theta phase shift in spike timing and modulation of gamma oscillation: A dynamic code for spatial alternation during fixation in rat hippocampal area CA1, *Journal of Neurophysiology*, 111, 1601-1614 (2014), 査読有.
3. 高橋 宗良, 西田 洋司, Johan Lauwereyns, 行動準備状態における海馬の神経活動とその情報処理モデル, *心理学評論*, Vol. 56(2), 237-250 (2013), 査読有

4. Hiroshi Nishida, Muneyoshi Takahashi, Jin Kinoshita, Johan Lauwereyns, Transition dynamics in spatial choice, *Advances in Cognitive Neurodynamics (III)*, Proceedings of the Third International Conference on Cognitive Neurodynamics – 2011, 393-399 (2013), 査読有
5. Muneyoshi Takahashi, Yoshio Sakurai, Yoshikazu Isomura, Minoru Tsukada, Johan Lauwereyns, The theta cycle and spike timing during fixation in rat hippocampal CA1, *Advances in Cognitive Neurodynamics (III)*, Proceedings of the Third International Conference on Cognitive Neurodynamics – 2011, 773-779 (2013), 査読有
6. Yoshinori Ide, Muneyoshi Takahashi, Johan Lauwereyns, Guy Sandner, Minoru Tsukada, Takeshi Aihara, Fear Conditioning Induces Guinea Pig Auditory Cortex Activation by Foot Shock Alone, *Cognitive Neurodynamics*, Vol. 7(1), 67-77 (2013), 査読有
7. Hiroki Fujiwara, Kosuke Sawa, Muneyoshi Takahashi, Johan Lauwereyns, Minoru Tsukada, Takeshi Aihara, Context and the renewal of conditioned taste aversion: The role of rat dorsal hippocampus examined by electrolytic lesion, *Cognitive Neurodynamics*, Vol. 6(5), 399-407 (2012), 査読有
8. Hiroshi Nishida, Muneyoshi Takahashi, Gary D. Bird, Johan Lauwereyns, Neural mechanisms of bias and sensitivity in animal models of decision making, *ECTI Transactions on Computer and Information Technology*, Vol. 6(1), 1-9 (2012), 査読有

B01P5

1. Hiroki Nakatsuka, Kiyohisa Natsume, Circadian rhythm modulates long-term potentiation induced at CA1 in rat hippocampal slices, *Neurosci. Res.*, Vol. 80, 1-9, 10.1016/j.neures.2013.12.007 (2014), 査読有
2. 夏目 季代久, 中司 弘樹, 脳内で観察される周波数の異なる神経振動 The rhythms with Different Frequencies in Rodent Brains, *日本神経回路学会論文誌 The Brain & Neural Networks*, Vol. 20(1), 3-6 (2013), 査読有
3. Motoshi Nishimura, Kiyohisa Natsume, Phase dependency of long-term potentiation induction during the intermittent bursts of carbachol-induced β oscillation in rat hippocampal slices, *BIOPHYSICS*, Vol. 8, 173-181 (2012), 査読有
4. Touma Katayama, Kiyohisa Natsume, The change in EEG when you are bored, *J. Signal Processing*, Vol. 16(6), 637-641 (2012), 査読有

B01P6

1. Jun Igarashi, Yoshikazu Isomura, Kensuke Arai, Rie Harukuni, Tomoki Fukai, A θ - γ Oscillation Code for Neuronal Coordination during Motor Behavior, *The Journal of Neuroscience*, Vol. 33(47), 18515-30 (2013), 査読有
2. Kei Oyama, Shinya Ohara, Sho Sato, Fuyuki Karube, Fumino Fujiyama, Yoshikazu Isomura, Hajime Mushiake, Toshio Iijima, Ken-Ichiro Tsutsui, Long-lasting single-neuron labeling by in vivo electroporation without microscopic guidance, *Journal of Neuroscience Methods*, Vol. 218(2), 139-47 (2013), 査読有
3. Yoshikazu Isomura, Takashi Takekawa, Rie Harukuni, Takashi Handa, Hidenori Aizawa, Masahiko Takada, Tomoki Fukai, Reward-modulated motor information in identified striatum neurons, *The Journal of Neuroscience*, Vol. 33(25), 10209-20 (2013), 査読有
4. Hidenori Aizawa, Shin Yanagihara, Megumi Kobayashi, Kazue Niisato, Takashi Takekawa, Rie Harukuni, Thomas J McHugh, Tomoki Fukai, Yoshikazu Isomura, Hitoshi Okamoto, The synchronous activity of lateral habenular neurons is essential for regulating hippocampal theta oscillation, *The Journal of Neuroscience*, Vol. 33(20), 8909-21 (2013), 査読有
5. Yasuhiro Tsubo, Yoshikazu Isomura, Tomoki Fukai, Neural dynamics and information representation in microcircuits of motor cortex, *Frontiers in Neural Circuits*, Vol. 7, 85 (2013), 査読有
6. Yasuhiro Tsubo, Yoshikazu Isomura, Tomoki Fukai, Passage-time coding with timing kernel inferred from irregular cortical spike sequences, *J Stat Mech Theor Exp (JSTAT)*, P03004 (2013), 査読有
7. Riichiro Hira, Fuki Ohkubo, Katsuya Ozawa, Yoshikazu Isomura, Kazuo Kitamura, Masanobu Kano, Haruo Kasai, Masanori Matsuzaki, Spatiotemporal dynamics of functional clusters of neurons in the mouse motor cortex during a voluntary movement, *J Neurosci*, Vol. 33(4), 1377-1390 (2013), 査読有
8. Rie Kimura, Akiko Saiki, Yoko Fujiwara-Tsukamoto, Fuki Ohkubo, Kazuo Kitamura, Masanori Matsuzaki, Yutaka Sakai, Yoshikazu Isomura, Reinforcing operandum: rapid and reliable learning of skilled forelimb movements by head-fixed rodents, *J Neurophysiol*, Vol. 108(6), 1781-1792 (2012), 査読有

B01P7

1. Ayumi Yamada, Haruaki Fukuda, Kazuyuki Samejima, Sachiko Kiyokawa, Kazuhiro Ueda, Shigekuni Noba, Akira Wanikawa, The effect of an analytical appreciation of colas on consumer beverage choice, *Food Quality and Preference*, Vol. 34, 1-4 (2014), 査読有

B01P8

1. DeFelipe J, López-Cruz PL, Benavides-Piccione R, Bielza C, Larrañaga P, Anderson S, Burkhalter A, Cauli B, Fairén A, Feldmeyer D, Fishell G, Fitzpatrick D, Freund TF, González-Burgos G, Hestrin S, Hill S, Hof PR, Huang J, Jones EG, Kawaguchi Y, Kisvárdy Z, Kubota Y, Lewis DA, Marín O, Markram H, McBain CJ, Meyer HS, Monyer H, Nelson SB, Rockland K, Rossier J, Rubenstein JL, Rudy B, Scanziani M, Shepherd GM, Sherwood CC, Staiger JF, Tamás G, Thomson A, Wang Y, Yuste R, Ascoli GA, New insights into the classification and nomenclature of cortical GABAergic interneurons, *Nature reviews. Neuroscience*, Vol. 14(3), 202-16 (2013), 査読有

C01P1

1. Masahiro Kawasaki, Keiichi Kitajo, Kenjiro Fukao, Toshiya Murai, Yoko Yamaguchi, Yasuko Funabiki, Neural Dynamics for a Sudden Change in Other's Behavioral Rhythm, *Neural dynamics for a sudden change in other's behavioral rhythm*, *Advance in Cognitive Neurodynamics*, Vol. 4, (2014 in press). 査読有
2. 川崎 真弘, 北城 圭一, 深尾 憲二郎, 村井 俊哉, 山口 陽子, 船曳 康子, 発達障害者のコミュニケーションにおけるリズム調整, *信学技報*, Vol.113, 201-5 (2013), 査読無
3. Funabiki Y, Murai T, Toichi M, Cortical activation during attention to sound in autism spectrum disorders, *Res Dev Disabil*, Vol.33: 518-24 (2012), 査読有

C01P2

1. Ryuta Aoki, Yukihito Yomogida, Kenji Matsumoto, The neural bases for valuing social equality, *Neurosci Res*, in press, (2014), 査読有
2. Ryuta Aoki, Madoka Matsumoto, Yukihito Yomogida, Keise Izuma, Kou Murayama, Ayaka Sugiura, Colin F. Camerer, Ralph Adolphs, Kenji Matsumoto, Social Equality in the Number of Choice Options Is Represented in the Ventromedial Prefrontal Cortex, *J Neurosci*, Vol. 34(18), 6413-6421 (2014), 査読有
3. Kou Murayama, Madoka Matsumoto, Keise Izuma, Ayaka Sugiura, Richard M. Ryan, Edward L. Deci, Kenji Matsumoto, How Self-Determined Choice Facilitates Performance: A Key Role of the Ventromedial Prefrontal Cortex, *Cerebral cortex*, (2013), 査読有

C01P3

1. Zhao Q, Caiafa CF, Mandic DP, Chao ZC, Nagasaka Y, Fujii N, Zhang L, Cichocki A, Higher order partial least squares (HOPLS): a generalized multilinear regression method, *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, Vol. 35(7), 1660-73 (2013), 査読有
2. Nagasaka, Y., Chao, Z. C., Hasegawa, N., Notoya, T., & Fujii, N., Unintentional Synchronization of Behavior in Japanese Monkeys, *Advances in Cognitive Neurodynamics (III)*, 745-751 (2013), 査読有
3. Edward A. Wasserman, Yasuo Nagasaka, Leyre Castro Ruiz, Stephen J. Brzykcy, Pigeons learn virtual patterned-string problems in a computerized touch screen environment, *Animal cognition*, Vol. 16(5), 737-53 (2013), 査読有
4. Yasuo Nagasaka, Zenas C. Chao, Naomi Hasegawa, Tomonori Notoya, Naotaka Fujii, Spontaneous synchronization of arm motion between Japanese macaques, *Scientific reports*, Vol. 3, 1151 (2013), 査読有

C01P5

1. 服部 憲明, 脳脊髄障害後の運動機能回復のメカニズムと治療への応用, *脳* 21, Vol. 16(1), 25-29 (2013), 査読無
2. 畠中 めぐみ, 三原 雅史, 服部 憲明, 宮井 一郎, 神経変性疾患のリハビリテーション, *医薬ジャーナル*, Vol. 45(5), 115-119 (2012), 査読無し
3. Hiroaki Fujimoto, Masahito Mihara, Noriaki Hattori, Megumi Hatakenaka, Teiji Kawano, Hajime Yagura, Ichuro Miyai, Hideki Mochizuki, Cortical changes underlying balance recovery in patients with hemiplegic stroke, *Neuroimage*, Vol. 85(1), 547-554 (2014), 査読有

(2) 学会発表

A01G1

1. 西田 洋司, 高橋 宗良, 山口 裕, 津田 一郎, ローレンス・ヨハン, A predictive model of theta phase shift during fixation in the hippocampus, 第30回日本脳電磁図トポグラフィ研究会, 福岡山王ホール(福岡山王 病院内), (Jan. 11-12, 2014)
2. 田島 実香, 山口 裕, 津田 一郎, Gamma 波の伝搬に対する抑制性細胞の役割, 脳と心のメカニズム 第14回冬のワークショップ, ルスツリゾート, 札幌, (Jan. 8-10, 2014)
3. 津田 一郎, 社会を変える数学, 第14回九大・北大合同フロンティア・セミナー, 東京ステーションコンファレンス, (Nov. 21, 2013)
4. 津田 一郎, コミュニケーションする脳!?, 第22回先端科学移動大学 2013, 釧路市生涯学習センター, (Nov. 16, 2013)
5. 津田 一郎, 脳の中のカオス-数学、物理学、情報学、生物学が交差するサイエンス, 第22回先端科学移動大学 2013, 釧路湖陵高校, (Nov. 15, 2013)
6. 津田 一郎, カオス脳理論からコミュニケーション神経情報学へ向けて, 第26回情報伝送と信号処理ワークショップ(CSWS), 登別, (Nov. 13, 2013)
7. Tsuda, Modeling the Genesis of Functional Elements in the Networks of Interacting Units, The 3rd International Symposium on Innovative Mathematical Modeling, The University of Tokyo, (Nov. 12, 2013)
8. 由利 美智子, 山口 裕, The generalized iterated function system in the hippocampus, 津田一郎教授還暦記念研究集会 複雑系数理から動的脳観へ, 北海道大学理学部大講堂, (Sep. 17-18, 2013)
9. 山口 裕, 津田 一郎, Evolution of Heterogeneous Modules via Maximization of Bi-directional Information Transmission, 2013年度包括脳ネットワーク夏のワークショップ, 名古屋国際会議場, (Aug. 29- Sep. 1, 2013)
10. Yongtao Li, Ichiro Tsuda, A Plausible Model of Hippocampal-VTA Microcircuits, 2013年度包括脳ネットワーク夏のワークショップ, 名古屋国際会議場, (Aug. 29- Sep. 1, 2013)
11. 塚田 啓道, 藤井 宏, 津田 一郎, 合原 一幸, A Neurodynamical Account for Visual Hallucinations in Dementia with Lewy Bodies (DLB) with a Conceptual Model, 2013年度包括脳ネットワーク夏のワークショップ, 名古屋国際会議場, (Aug. 29- Sep. 1, 2013)
12. Ichiro Tsuda, Classes of Mathematical Modeling for Brain Dynamics, The Third Joint IEEE International Conference on Development and Learning and on Epigenetic Robotics, Osaka City Central Public Hall, Osaka, Japan, (Aug. 18-22, 2013)
13. 津田 一郎, 脳ダイナミクスの数理構造と医療, 北大一理研ジョイントシンポジウム「未来医療を拓く生体予測シミュレーション」, 北海道大学学術交流会館, (Aug. 1, 2013)
14. Ichiro Tsuda, A genesis of components in the networks of interacting units, The 4th International Conference on Cognitive Neurodynamics(ICCN'13), Agora for Biosystems, Sigtuna, Sweden, (Jun. 23-27, 2013)
15. Hiromichi Tsukada, Hiroshi Fujii, Ichiro Tsuda, Kazuyuki Aihara, Recurrent complex visual hallucinations in dementia with Lewy Bodies (II): a neurodynamical account based on nicotinic receptor loss hypothesis with a conceptual model, The 4th International Conference on Cognitive Neurodynamics(ICCN'13), Agora for Biosystems, Sigtuna, Sweden, (Jun. 23-27, 2013)
16. Yongtao Li, Ichiro Tsuda, A computational model of hippocampal-VTA microcircuits: Why expectation of reward in rat striatum at choice point is covert?, The 4th International Conference on Cognitive Neurodynamics (ICCN'13), Agora for Biosystems, Sigtuna, Sweden, (Jun. 23-27, 2013)
17. Yongtao Li, I. Tsuda, When Brain Meets Chaos, Cognitive Neurodynamics and Control Workshop, East China University of Science and Technology, Shanghai, China, (Apr. 26, 2013)
18. Yutaka Yamaguti, Evolution of Heterogeneous Network Modules via Maximization of Bi-directional Information Transmission, The 4th International Conference on Cognitive Neurodynamics(ICCN'13), Agora for Biosystems, Sigtuna, Sweden, (Jun. 23-27, 2013)
19. Tsuda, Mathematical modeling of the formation of episodic memory and its application to the dynamic functions in interacting brains, 2012 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Application (NOLTA2012), Palma, Majorca, Spain, (Oct. 22-26, 2012)
20. Toshi Nakajima, Ryosuke Hosaka, Ichiro Tsuda, Jun Tanji, Hajime Mushiake, Modular representation of multiple motor sequences based on action and effector use in the medial motor areas, Neuroscience 2012, New Orleans, (Oct. 13-17, 2012)
21. Tsuda, Cantor coding of the hippocampus in interacting brains, International Conference on Artificial Neural Networks (ICANN2012), Lausanne, Switzerland, (Sep. 11-14, 2012)

22. Yongtao Li, Ichiro Tsuda, Deliberation or Rapid Decision: Some Implication from Modeling Temporal Interaction between D1-like and D2-like receptors, Dynamic Brain Forum (DBF), Carmona, Seville, Spain, (Sep. 3-6, 2012)
23. H. Tsukada, H. Fujii, I. Tsuda, K. Aihara, Why People See Things That Are Not There? -A Neurodynamical Account with a Conceptual Model, Dynamic Brain Forum (DBF), Carmona, Seville, Spain, (Sep. 3-6, 2012)
24. Tsuda, Chaotic itinerancy in dynamically coupled brains, Dynamic Brain Forum (DBF), Carmona, Seville, Spain, (Sep. 3-6, 2012)
25. Yutaka Yamaguti, Ichiro Tsuda, Yoichiro Takahashi, Intermittent switching of information flow in coupled chaotic oscillators, Dynamic Brain Forum (DBF), Carmona, Seville, Spain, (Sep. 3-6, 2012)
26. Hiromichi Tsukada, Yutaka Yamaguti, Hiroshi Fujii, Ichiro Tsuda, The dynamics of memory retrieval in the neural networks of Pinsky-Rinzel type of neurons, The 5th Shanghai International Symposium on Nonlinear Sciences And Applications, Shanghai & Yangtze Cruise, China, (Jun. 27- Jul. 3, 2012)
27. Yutaka Yamaguti, Ichiro Tsuda, Yoichiro Takahashi, Intermittent switching of phase differences in coupled chaotic oscillators and coupled circle maps, The 5th Shanghai International Symposium on Nonlinear Sciences And Applications, Shanghai & Yangtze Cruise, China, (Jun. 27- Jul. 3, 2012)
28. Tsuda, Cantor sets meet the brain, The 5th Shanghai International Symposium on Nonlinear Sciences And Applications, Shanghai & Yangtze Cruise, China, (Jun. 27- Jul. 3, 2012)
29. Yongtao Li, Ichiro Tsuda, A Communication Model Based on Novelty-induced Learning, The 5th Shanghai International Symposium on Nonlinear Sciences And Applications, Shanghai & Yangtze Cruise, China, (Jun. 27- Jul. 3, 2012)
30. Tsuda, Ten Hierarchies of Mathematical Modeling on Neural Dynamics, West-Lake Workshop on Computing Neuroscience, Zhejiang University, China, (Jun. 25, 2012)
31. 山口 裕, 津田 一郎, 高橋 陽一郎, ヘテロ結合カオス振動子における情報伝達方向の間欠的遷移, 日本物理学会 第 67 回年次大会, 関西学院大学 西宮上ヶ原キャンパス, 兵庫県, (Mar. 24-27, 2012)
32. Ichiro Tsuda, Communicating brains: the origin of mind, Dynamics of Complex Systems 2012, Hokkaido University, Japan, (Mar. 6-8, 2012)
33. Ichiro Tsuda, Cantor sets meet the brain, “Chaos in the brain” , Laboratoire ETIS – Equipe NeuroCybernetique – UMR CNRS 8051, Universite de Cergy-Pontoise, Cergy-Pontoise, France, (Nov. 29, 2011)
34. 山口 裕, 津田 一郎, 高橋 陽一郎, ヘテロ相互作用系における情報伝達構造, 国際高等研究所 研究プロジェクト「諸科学の共通言語としての数学の発掘と数理学への展開」2011 年度第 2 回研究会, 国際高等研究所, 京都府, (Oct. 14-15, 2011)
35. 津田 一郎, コミュニケーションにおける意味創造: 記憶、学習、ミラーシステム、判断の素過程, 国際高等研究所 研究プロジェクト「諸科学の共通言語としての数学の発掘と数理学への展開」2011 年度第 1 回研究会, 国際高等研究所, 京都府, (Jul. 1-2, 2011)
36. Hiroshi Fujii, Takashi Kanamaru, Kazuyuki Aihara, Ichiro Tsuda, A New Role for Attentional Corticopetal Acetylcholine in Cortical Memory Dynamics, 9th International Conference on Numerical Analysis and Applied Mathematics, Halkidiki, Greece, (Sep. 19-25, 2011)
37. Yutaka Yamaguti, Ichiro Tsuda, Yoichiro Takahashi, Information Theoretic Approach to Dynamical Systems of Heterogeneously Interacting Chaotic Oscillators, 9th International Conference on Numerical Analysis and Applied Mathematics, Halkidiki, Greece, (Sep. 19-25, 2011)
38. Hiromichi Tsukada, Yutaka Yamaguti, Hiroshi Fujii, Ichiro Tsuda, Chaotic itinerancy-like memory retrieval in the neural networks of Pinsky-Rinzel type of neurons, The 34th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society, パシフィコ横浜, 日本, (Sep. 14-17, 2011)
39. Yutaka Yamaguti, Ichiro Tsuda, Switching of directions of information flows as a model of hetero-interactions in the neocortex, The 34th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society, パシフィコ横浜, 日本, (Sep. 14-17, 2011)
40. Ichiro Tsuda, Hunseok Kang, Dynamical analysis on copying-and-identifying process: toward the understanding of mirror-neuron systems, The 34th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society, パシフィコ横浜, 日本, (Sep. 14-17, 2011)
41. Ichiro Tsuda, Towards understanding of neural dynamics in communicating brains, The 3rd International Conference on Cognitive Neurodynamics (ICCN'11), Niseko, Hokkaido, Japan, (Jun. 9-13, 2011)

42. Hiromichi Tsukada, Yutaka Yamaguti, Hiroshi Fujii, Ichiro Tsuda, Transitory memory retrieval in the neural networks composed of Pinsky-Rinzel model neurons, The 3rd International Conference on Cognitive Neurodynamics (ICCN'11), Niseko, Hokkaido, Japan, (Jun. 9-13, 2011)
43. Yutaka Yamaguti, Ichiro Tsuda, Yoichiro Takahashi, Spontaneous switching of the direction of information flow, The 3rd International Conference on Cognitive Neurodynamics (ICCN'11), Niseko, Hokkaido, Japan, (Jun. 9-13, 2011)
44. Hiroshi Fujii, Takashi Kanamaru, Kazuyuki Aihara, Ichiro Tsuda, Attentional Cholinergic Projections May Induce Transitions of Attractor Landscape via Presynaptic Modulations of Connectivity, The 3rd International Conference on Cognitive Neurodynamics (ICCN'11), Niseko, Hokkaido, Japan, (Jun. 4- Oct. 4, 2011)
45. 津田 一郎, コミュニケーションする脳? -そのヘテロ複雑システムの理解-, 非線形科学コロキウム, 早稲田大学, (May 24, 2011)
46. 渡部 大志, 伊藤 孝男, 津田 一郎, 数学でニューロンをつくる, 脳と心のメカニズム 第11回冬のワークショップ, ルスツリゾート、北海道, (May 19, 2011)
47. 津田 一郎, 脳における伝達創成機構解明のための数理的アプローチ, ダイナミック・ブレイン研究会-New Trends of Dynamic Brain Research-, 伊豆, (Apr. 29- May 11, 2011)
48. 津田 一郎, 神経大規模ネットワークに現れるダイナミクスの様相, 生命ダイナミクスと大規模ネットワークシンポジウム (大阪大学グローバル COE プログラム) , みのお山荘 風の杜, 大阪府, (Feb. 8, 2011)
49. 津田 一郎, Complex memory: a theory for the archicorte, Dynamics of Complex Systems 2011-時間発展の非可逆性と予測可能性の限界に関する諸分野からの提言-, 北海道大学, (Mar. 7-9, 2011)
50. 山口 裕, 津田 一郎, ヘテロ相互作用系における情報伝達構造, 第 23 回自律分散システムシンポジウム, 北海道大学, (Jan. 29-30, 2011)
51. 津田 一郎, コミュニケーション脳のヘテロ複雑システムの理解に向けての研究, 第23回自律分散システムシンポジウム, 北海道大学, (Jan. 29-30, 2011)
52. Yongtao Li, Ichiro Tsuda, Novelty-induced Memories Transmission between Two Nonequilibrium Neural Networks, The Winter Workshop on the Mechanism of Brain and Mind, Rusutsu Resort, Hotel , Hokkaido, (Jan. 11-13, 2011)
53. 山口 裕, 津田 一郎, ヘテロ相互作用系における情報伝達構造の切り替わり, 脳と心のメカニズム 第11回冬のワークショップ, ルスツリゾート、北海道, (Jan. 11-13, 2011)
54. Ichiro Tsuda, A Mathematical Model for the Formation of Dynamic Memory in the Brain, Far-From-Equilibrium-Dynamics 2011, RIMS & Shiran-kaikan, Kyoto University, (Jan. 5, 2011)
55. Hiromichi Tsukada, Yutaka Yamaguti, Ichiro Tsuda, Transitory memory-retrieval in the neural networks composed of Pinsky-Rinzel model neurons, The 13th Slovenia-Japan seminar on nonlinear science and Waseda AICS symposium on nonlinear and nonequilibrium phenomena in complex systems, Nishiwaseda Campus, Waseda University, Japan, (Nov. 4-6, 2010)
56. 渡部 大志, 伊藤 孝男, 津田 一郎, 数学でニューロンをつくる, 日本数理生物学会大会 20 回大会, 北海道大学学術交流会館、北海道, (Sep. 13-16, 2010)
57. 津田 一郎, コミュニケーションする脳! ? -脳をカオスで語る-, 第 52 回サイエンスカフェ札幌, Sapporo55 ビル 1 階インナーガーデン, (Jul. 24, 2010)
58. Yutaka Yamaguti, Kousuke Ota, Shigeru Kuroda, Ichiro Tsuda, Fractal Encoding in a Model of Hippocampal CA1, International Symposium of Joint Research Network on Advanced Materials and Devices, Hotel-Nidom, Hokkaido, Japan, (Mar. 25-26, 2010)
59. 津田 一郎, コミュニケーション脳理解に対する数学的試み, 応用数学連携フォーラム第13回ワークショップ, 仙台, (Aug. 2, 2010)
60. 津田 一郎, 動的脳の情報創成とカオスの遍歴の役割, 包括脳ネットワーク夏のワークショップ, 札幌, (Jul. 27-30, 2010)
61. Yutaka Yamaguti, Kousuke Ota, Shigeru Kuroda, Ichiro Tsuda, Fractal Encoding in Hippocampal CA1, 包括脳夏のワークショップ, 札幌, (Jul. 27-30, 2010)
62. Tsuda, Transitory dynamics and its possible roles in the perception and dynamic memory in the brain, Department of Mathematics, Zhejiang University, Special Seminar, China, (Nov. 18, 2009)
63. Hiroshi Fujii, Kazuyuki Aihara and Ichiro Tsuda, Top-down Mechanism of Perception: A Scenario on the Role for Layer 1 and 2/3 Projections Viewed from Dynamical Systems Theory, Conference on Cognitive Neurodynamics(ICCN'09), Hangzhou, China, (Nov. 17, 2009)
64. Shigeru Kuroda, Yasuhiro Fukushima, Yutaka Yamaguti, Minoru Tukada, and Ichiro Tsuda, Emergence of Iterated Function Systems in the Hippocampal CA1, Conference on Cognitive Neurodynamics(ICCN'09), Hangzhou, China, (Nov. 17, 2009)

65. Tsuda, Chaotic Dynamics, Episodic Memory, and Self-identity, The 2nd International Conference on Cognitive Neurodynamics (ICCN'09), Hangzhou, China, (Nov. 16, 2009)
66. Yutaka Yamaguti, Shigeru Kuroda, Ichiro Tsuda, Representation of Time-series by a Self-similar Set in a Model of Hippocampal CA1, The 2nd International Conference on Cognitive Neurodynamics, Hangzhou, China, (Nov. 15-19, 2009)
67. Tsuda, Evolution through maps, What is Biological Evolution?, Coop-in-Kyoto, Kyoto, Japan, (Oct. 16-17, 2009)
68. Yutaka Yamaguti, Cantor Coding in a Model of Hippocampus, 12th Japan-Slovenia Seminar on Nonlinear Science, Maribor, Slovenia, (Oct. 7-9, 2009)
69. Tsuda, Chaotic dynamics, episodic memory, and the dynamic model for the hippocampus, 12th JAPAN - SLOVENIA SEMINAR ON NONLINEAR SCIENCE, Slovenia, (Oct. 7-9, 2009)
70. Tsuda, Chaotic dynamics and episodic memory in the brain, Budapest University of Technology and Economics, Special Seminar, Hungary, (Sep. 23, 2009)
71. Tsuda, Cantor coding: Theory and experimental verification, Section of Biophysics, Institute for Atomic and Nuclear Physics, Hungarian Academy of Science, Special Lecture, Hungary, (Sep. 22, 2009)
72. Tsuda, Chaotic brain dynamics in the skew product transformations, Section of Biophysics, Institute for Atomic and Nuclear Physics, Hungarian Academy of Science, Special Lecture, Hungary, (Sep. 21, 2009)
73. Yutaka Yamaguti, Shigeru Kuroda, Ichiro Tsuda, Cantor Coding in a model of hippocampal CA1, 第32回日本神経科学大会 (Neuroscience 2009), 名古屋, (Sep. 16-18, 2009)
74. 津田 一郎, 海馬におけるカオスとフラクタルのデュアルな関係—エピソード記憶の神経機構に関する数理モデル: 予言と実証, Dynamics of complex systems 2009 --- 複雑系解析における未解決問題への新しい挑戦 ---, 北海道大学理学部5号館, (Aug. 31- Sep. 2, 2009)
75. 津田 一郎, エピソード記憶と推論からみた脳の数理: カオスの遍歴の役割, 生物物理夏の学校, 支笏湖ユースホステル, (Jul. 1- Aug. 2, 2009)

A01G2

1. 西浦 廉政, 時間周期構造から空間周期構造へ, 第23回「非線形反応と協同現象」研究会, 北海道大学学術交流会館, (Dec. 7, 2013)
2. Yasumasa Nishiura, A computational approach to spontaneous pulse generators in dissipative systems, 2013 Northeastern Asia Symposium on High Performance Computing Methods and Modeling, Chengdu, (Sep. 23-24, 2013)
3. Yasumasa Nishiura, Dynamics of dissipative solitons in heterogeneous media and its application to biological problems, International Workshop "From Soft Matter to Protocell", 東北大学片平キャンパス, (Sep. 18-20, 2013)
4. Yasumasa Nishiura, A converter from time-periodicity to spatial-periodicity, Mathematics and Biology: a Roundtrip in the Light of Suns and Stars, Lorentz Center, (Apr. 15-19, 2013)
5. Kei-Ichi Ueda, Yasumasa Nishiura, Yoko Yamaguchi, Keiichi Kitajo, Transient dynamics of neural oscillators induced by nonlinear interactions, International conference on cognitive neurodynamics 2013, Sigtuna foundation, Sweden, (Jun. 24, 2013)
6. Kei-Ichi Ueda, Three-state Node Network for Loop Searching System, IMA Special Workshop Joint US-Japan Conference for Young Researchers on Interactions among Localized Patterns in Dissipative Systems, Minnesota University, (Jun. 13, 2013)
7. Kei-Ichi Ueda, Loop Searching System with Self-Recovery Property, SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems, Snowbird Ski and Summer Resort, (May 20, 2013)
8. Yasumasa Nishiura, Masaaki Yadome, Takashi Teramoto, Heterogeneity-induced pulse generators, Dynamics of Patterns, Mathematisches Forschungsinstitut Oberwolfach, (Dec. 16-22, 2012)
9. Yasumasa Nishiura, Masaaki Yadome, Takashi Teramoto, Heterogeneity-induced pulse generators, 2012 International Conference on Modeling, Analysis and Simulation, Meiji University, (Nov. 6-9, 2012)
10. Yasumasa Nishiura, Masaaki Yadome, Takashi Teramoto, Pulse generators as a converter from time-periodic motion to spatially periodic structure, Dynamical Systems in Studies of Partial Differential Equations, University of Minnesota, (Sep. 24-28, 2012)
11. Masaaki Yadome, Yasumasa Nishiura, Takashi Teramoto, Onset of heterogeneity-induced pulse generators in a three-component reaction diffusion system, Turing Symposium on Morphogenesis -Mathematical Approaches Sixty Years after Alan Turing-, Sendai International Center, (Aug. 27-31, 2012)

12. Yasumasa Nishiura, Masaaki Yadome, Takashi Teramoto, Heterogeneity-induced pulse generators, Turing Symposium on Morphogenesis -Mathematical Approaches Sixty Years after Alan Turing-, Sendai International Center, (Aug. 27-31, 2012)
13. Yasumasa Nishiura, Is codim 2 singularity imbedded in the dynamics of contemplative amoeboid locomotion?, "Mathematical Models of Biological Phenomena and their Analysis", 仙台国際センター (仙台市青山) , (Nov. 21-24, 2011)
14. Yasumasa Nishiura, Dynamics of localized patterns in dissipative systems, Conference "Geometric Methods for Infinite - Dimensional Dynamical Systems", Brown University, Providence, RI , USA, (Nov. 4-6, 2011)
15. Yasumasa Nishiura, Kei-Ichi Ueda, Seiji Takagi, Toshiyuki Nakagaki, Waves in heterogeneous media and their application to adaptive behavior of Physarum plasmodium, Engineering of Chemical Complexity, Berlin, Germany, (Jul. 4-8, 2011)
16. Yasumasa Nishiura, Takashi Teramoto, Masaaki Yadome, Heterogeneity-induced pulse generators, ICCN2011(The 3rd International Conference on Cognitive Neurodynamics), Hilton Niseko Village, Hokkaido, (Jun. 9-13, 2011)
17. 西浦 廉政, 合体・消滅・分裂の数理, 第9回 H S S ワークショップ, 北海道大学創成科学研究棟 (札幌) , (Feb. 24, 2011)
18. Yasumasa Nishiura, Dynamics of spatially localized patterns, Far-From-Equilibrium-Dynamics, 京都大学数理解析研究所, (Jan. 4-8, 2011)
19. 西浦 廉政, ヘテロ媒質が生み出す自発的リズムと空間構造, RIMS 研究集会 第7回 生物数学の理論とその応用, 京都大学数理解析研究所, (Nov. 16-19, 2010)
20. Yasumasa Nishiura, Spot dynamics in heterogeneous media and its application to adaptive behaviors of the Physarum plasmodium, Mini-Workshop on Modeling, Simulations and Analysis of Biological Pattern Formation, Heanel Sendai, Sendai, Miyagi, (Oct. 29-30, 2010)
21. 西浦 廉政, 遷移ダイナミクスにおける不安定性の思想, 2010 日本数学会 秋季総合分科会, 名古屋大学, (Sep. 22-25, 2010)
22. Yasumasa Nishiura, Transient dynamics revisited, Long-term workshop: Mathematical Sciences and Their Applications, Kamisuwa, Nagano, (Sep. 19- Oct. 2, 2010)
23. Yasumasa Nishiura, Transient dynamics revisited, International Workshop "Emerging Topics in Nonlinear Science", Schloss Goldrain, Italy, (Sep. 12-18, 2010)
24. 西浦 廉政, 散逸系における衝突の世界, 第59回理論応用力学講演会, 日本学術会議 (東京都港区) , (Jun. 8-10, 2010)
25. Yasumasa Nishiura, Takashi Teramoto, Rotational Motion of Traveling Spots in Dissipative Systems, SIAM DSPDEs'10 Emerging Topics in Dynamical Systems and Partial Differential Equations, Barcelona, Spain, (May 31- Jun. 4, 2010)
26. Yasumasa Nishiura, Collision dynamics and rotational motion of dissipative particles, Japanese French Meeting ReaDiLab 2010, Spatio-Temporal Patterns from Mathematics to Biomedical Applications, Archamps, France, (Mar. 15-17, 2010)
27. 寺本 敬, 鈴木 勝也, 西浦 廉政, Rotational motion of traveling spots in dissipative systems, 文部科学省特別教育研究経費「附置研究所間連携事業」最終成果報告会「新産業創造物質基盤技術研究センター」, 東京国際フォーラム、東京都 , (Mar. 10, 2010)
28. Xiaohui Yuan, Takashi Teramoto, Yasumasa Nishiura, Eigenvalue Behaviors and Bifurcation for Spot Dynamics in Heterogeneous Media, 2009 年度応用数学合同研究集会 , 龍谷大学 瀬田キャンパス , (Feb. 17-19, 2009)
29. 西 慧, 寺本 敬, 西浦 廉政, フロント・バック型パルスの非一様媒質中でのふるまい, 2009 年度応用数学合同研究集会 , 龍谷大学 瀬田キャンパス , (Feb. 17-19, 2009)
30. 西浦 廉政, Rotational motion of traveling spots in dissipative systems, SNP2009「非線形問題に現われる特異性の解析」, 関西セミナーハウス (京都市左京区) , (Nov. 30- Feb. 2, 2009)
31. 西浦 廉政, 非線形散逸系ダイナミクスの最近の話題, 京都大学物理学第一教室談話会 , 京都大学物理学教室第一教室, (Oct. 29, 2009)

A01G3

1. Kunihiko Kaneko, Characterization of Stem Cells and Cancer Cells on the Basis of Gene Expression Profile Stability and Dynamics, CDB Symposium "Quantitative Developmental Biology", 神戸, (Mar. 26-28, 2012)
2. Yusuke Goto, Kunihiko Kaneko, Simple Gene Networks Models Show Cell Differentiation Behavior, CDB Symposium "Quantitative Developmental Biology", 神戸, (Mar. 26-28, 2012)

3. Akira Konosu, Evolutionary Process Maintaining the Robustness in Development Conserves the Middle Stage in Development, CDB Symposium"Quantitative Developmental Biology", 神戸, (Mar. 26-28, 2012)
4. Takahiro Kohsokabe, Evolution of Pattern Formation, CDB Symposium"Quantitative Developmental Biology", 神戸, (Mar. 26-28, 2012)
5. 金子 邦彦, 環境適応の進化：揺らぎとルシャトリエ原理, 第 67 回日本物理学会年会, 神戸, (Mar. 24-27, 2012)
6. 斉藤 稔, 表現型の可塑性を考慮した集団的進化ダイナミクス, 第 67 回日本物理学会年会, 神戸, (Mar. 24-27, 2012)
7. 後藤 佑介, 金子 邦彦, 表現型可塑性が種分化を促す力学系モデル, 第 67 回日本物理学会年会, 神戸, (Mar. 24-27, 2012)
8. 香曾我部 隆裕, 金子 邦彦, 遺伝子制御ネットワークによる非周期空間パターン形成の仕組み及びその進化, 第 67 回日本物理学会年会, 神戸, (Mar. 24-27, 2012)
9. 栗川 知己, 金子 邦彦, 連想記憶の学習による自発的脳活動の形成, 第 67 回日本物理学会年会, 神戸, (Mar. 24-27, 2012)
10. 鴻巣 暁, 金子 邦彦, 発生過程の頑健性がつくる発生砂時計モデル, 第 67 回日本物理学会年会, 神戸, (Mar. 24-27, 2012)
11. Kunihiko Kaneko, Representation of biological plasticity in terms of dynamical systems, International Workshop on Anomalous Statistics, Generalized Entropies, and Information Geometry, 奈良, (Mar. 6-10, 2012)
12. Kunihiko Kaneko, Evolution of Robustness formulated in terms of Phenotypic Variances, Workshop 3: Robustness in Biological Systems, 米国, (Feb. 6-10, 2012)
13. Kunihiko Kaneko, 適応進化におけるルシャトリエ原理, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 富山, (Sep. 21-24, 2011)
14. 後藤 佑介, 金子 邦彦, inhomogeneous limit cycle, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 富山, (Sep. 21-24, 2011)
15. 斉藤 稔, 金子 邦彦, 短期記憶を持つリカレントネットワークの記憶保持と想起のダイナミクス, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 富山, (Sep. 21-24, 2011)
16. Kunihiko Kaneko, 'Bifurcation-ability' from Itinerant Motion Provides Biological Plasticity: Differentiation from Stem Cells and Neural Memory of Input/Output Relationships, Dynamics Days Europe 2011, ドイツ, (Sep. 12-16, 2011)
17. Kunihiko Kaneko, Evolution as a stochastic process, SMBE 2011, 京都, (Jul. 26-30, 2011)
18. Kunihiko Kaneko, Complex Systems Biology: exploring the logic of life through consistency principle, International Conference on Complex Systems 2011, 米国, (Jun. 26- Jul. 1, 2011)
19. Kunihiko Kaneko, Designing plastic and robust systems through evolution and learning, The 3rd International Conference on Cognitive Neurodynamics, 北海道, (Jun. 9-13, 2011)
20. Tomoki Kurikawa, Kunihiko Kaneko, "Memories as Bifurcations": A simple model, The 3rd International Conference on Cognitive Neurodynamics, 北海道, (Jun. 9-13, 2011)
21. Daisuke Shimaoka, Keiichi Kitajo, Kunihiko Kaneko, Yoko Yamaguchi, Ongoing global phase pattern and visual signal detection, The 3rd International Conference on Cognitive Neurodynamics, 北海道, (Jun. 9-13, 2011)
22. Kunihiko Kaneko, Itinerant Dynamics in Gene Expression Implies Pluripotency, Far-From-Equilibrium Dynamics, 京都, (Jan. 4-8, 2011)
23. 栗川 知己, 金子 邦彦, 分岐としての記憶を埋め込むことにより形成される自発的神経活動の構造, NEURO2010, 神戸, (Sep. 2-4, 2010)
24. Kunihiko Kaneko, Itinerant Dynamics in Gene Expression Implies Pluripotency, Biological networks - Principles and Dynamics, 北京, (Jul. 26-30, 2010)
25. Kurikawa, T., Kaneko, K., Spontaneous dynamics shaped through learning process with multiple timescales, 脳と心のメカニズム第 10 回冬のワークショップ, 留寿都, (Jan. 12-14, 2010)
26. Shimaoka, D., Kitajo, K., Kaneko, K., Yamaguchi, Y., Transient cortical activity during Necker cube perception from local clusters to global synchrony, Conference on Consciousness and its Measures, Limassol, Cyprus, (Nov. 29- Feb. 1, 2009)
27. Kurikawa, T., Kaneko, K., Learning Model with Multiple timescales and Change in a Structure of Phase Space, 第 47 回日本生物物理学会年会, 徳島, (Oct. 30- Nov. 1, 2009)
28. Shimaoka D, Kitajo K, Kaneko K, Yamaguchi Y, Transient Dynamics of EEG Activity during Necker Cube Perception; from clustering to Global Synchronization, International Symposium on Complex Systems Biology, Tokyo, (Sep. 29- Oct. 1, 2009)

29. Kurikawa, T., Kaneko, K., Change in structure of phase space through learning with multiple timescales, International Symposium on Complex Systems Biology, Tokyo, (Sep. 29- Oct. 1, 2009)

B01G1

1. Keiichi Kitajo, A novel manipulative approach to neural dynamics and information flow in the human brain., 計測自動制御学会ライフエンジニアリング部門シンポジウム(LE2013), 神奈川, (Sep. 12-14, 2013)
2. Keiichi Kitajo, Directed Information Flow in the Human Brain, The 2013 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2013), Santa Fe, USA, (Sep. 8-11, 2013)
3. Masahiro Kawasaki, Yutaka Uno, Jumpei Mori, Kenji Kobata, Keiichi Kitajo, TMS induces spatial propagation of phase resetting and directional information flow in human resting-state brain networks, 平成 25 年度包括脳ネットワーク夏のワークショップ, 名古屋, (Aug. 29- Sep. 1, 2013)
4. Keiichi Kitajo, Controlling neural oscillations and causal information flow in the human brain, Neural Oscillation Conference 2013, Okazaki, Japan, (Jul. 18-19, 2013)
5. Yutaka Uno, Yuji Mizuno, Keiichi Kitajo, Quantifying importance of brain regions in large-scale neural synchronization networks in cognitive processing with a Markov chain modeling, Neuro2013, Kyoto, Japan, (Jun. 20-23, 2013)
6. Yumi Nakagawa, Takashi Hanakawa, Yuji Mizuno, Keiichi Kitajo, Global control of human brain networks by repetitive TMS, Neuro 2013, Kyoto, Japan, (Jun. 20-23, 2013)
7. Yuji Mizuno, Masahiro Kawasaki, Keiichi Kitajo, Individual differences in interhemispheric neural synchrony associated with perceptual bias in apparent motion perception, Neuro 2013, Kyoto, Japan, (Jun. 20-23, 2013)
8. 北城 圭一, ヒトの脳の大域的ネットワークと情報流, 新学術領域: 予測と意思決定の脳内計算機構の解明による人間理解と応用, チュートリアル;ヒトの予測と意思決定の脳内ネットワーク解明のための測定法と解析法, 横浜, (Jun. 7, 2013)
9. 川崎 真弘, 北城 圭一, 深尾 憲二郎, 村井 俊哉, 山口 陽子, 船曳 康子, 発達障害者のコミュニケーションにおけるリズム調整, 電子情報通信学会・ヒューマン情報処理研究会, 沖縄, (May 30-31, 2013)
10. Keiichi Kitajo, State-dependent directed information flow in the human brain - A TMS-EEG manipulative approach -, Measuring Consciousness - Theory and Experiments, Kyoto, Japan, (Mar. 25, 2013)
11. 中川 佑美, 花川 隆, 水野 佑治, 北城 圭一, 連続経頭蓋磁気刺激によるヒト脳活動の周波数特異的な引き込み, 脳と心のメカニズム第 13 回冬のワークショップ, 北海道, (Jan. 9-11, 2013)
12. 水野 佑治, 川崎 真弘, 北城 圭一, 仮現運動知覚課題を用いた左右半球間の情報統合と位相同期の個人差の検討, 脳と心のメカニズム第 13 回冬のワークショップ, 北海道, (Jan. 9-11, 2013)
13. Masahiro Kawasaki, Yuji Mizuno, Keiichi Kitajo, Manipulative evaluation of alpha bottom-up networks in the resting-state by combined TMS-EEG, International Conference on NeuroRehabilitation (ICNR) 2012, Toledo, Spain, (Nov. 14-16, 2012)
14. Yuji Mizuno, Masahiro Kawasaki, Keiichi Kitajo, Individual evaluation of interhemispheric neural synchrony mediating perceptual bias in apparent motion perception - A TMS-EEG study and applications in rehabilitation -, International Conference on NeuroRehabilitation (ICNR) 2012, Toledo, Spain, (Nov. 14-16, 2012)
15. Masahiro Kawasaki, Yuji Mizuno, Keiichi Kitajo, Directional flow of TMS-induced phase perturbation across low frequency neural synchrony networks in the resting state, The 42nd Annual Meeting of Society for Neuroscience, New Orleans, USA, (Oct. 13-17, 2012)
16. Yinjie Cheng, Masahiro Kawasaki, Keiichi Kitajo, Yoko Yamaguchi, Temporal coordination as the formation of an attractor in a two-person alternate tapping task, The 42nd Annual Meeting of Society for Neuroscience, New Orleans, USA, (Oct. 13-17, 2012)
17. Yuji Mizuno, Masahiro Kawasaki, Keiichi Kitajo, Individual differences in inter-hemispheric neural synchrony and apparent motion perception in humans, The 42nd Annual Meeting of Society for Neuroscience, New Orleans, USA, (Oct. 13-17, 2012)
18. Florence I. Kleberg, Keiichi Kitajo, Masahiro Kawasaki, Yoko Yamaguchi, Slow and fast oscillations dissociate between encoding of familiarity and recollection, The 35th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society, Nagoya, Japan, (Sep. 18-21, 2012)
19. Masahiro Kawasaki, Yuji Mizuno, Keiichi Kitajo, Resting-state brain oscillatory networks revealed by TMS-induced EEG phase perturbation, 第 27 回生体生理工学シンポジウム, 札幌, (Sep. 19-21, 2012)

20. Yinjie Cheng, Masahiro Kawasaki, Keiichi Kitajo, Yoko Yamaguchi, Temporal coordination in two-person alternate tapping tasks: Difference between human-human and human-computer trials, The 35th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society, Nagoya, Japan, (Sep. 18-21, 2012)
21. Masahiro Kawasaki, Keiichi Kitajo, Dynamic coordination of human EEG oscillations for working memory manipulation revealed by single-shot TMS, 8th FENS Forum of Neuroscience, Barcelona, Spain, (Sep. 14-18, 2012)
22. 川崎 真弘, 北城 圭一, 山口 陽子, 人と人のタッピング同期に関連した2者間の脳波リズム同期, 電子情報通信学会ヒューマンコミュニケーション基礎研究会 (HCS), 立命館大学, 京都, (Aug. 18, 2012)
23. 川崎 真弘, 北城 圭一, 山口 陽子, Inter-brain synchronization for behavioral synchronization in an alternate tapping task, 2012年度包括型脳科学研究推進支援ネットワーク, 夏のワークショップ, 仙台, (Jul. 24-27, 2012)
24. 水野 佑治, 川崎 真弘, 北城 圭一, 仮現運動知覚と脳の左右半球コネクティビティとの関連性-TMS-EEGによる個人差の検討-, 2012年度包括型脳科学研究推進支援ネットワーク, 夏のワークショップ, 仙台, (Jul. 24-27, 2012)
25. Keiichi Kitajo, Tadashi Kitahara, Yumi Nakagawa, Masahiro Kawasaki, Frequency-specific directed information flow in the human brain - A TMS-EEG manipulative approach -, 8th FENS Forum of Neuroscience, Barcelona, Spain, (Jul. 14-18, 2012)
26. Keiichi Kitajo, Manipulation and control of neural synchrony by TMS, 6th Motor Control Workshop (MC2012), Okazaki, Japan, (Jun. 21-23, 2012)
27. Keiichi Kitajo, Tadashi Kitahara, Yumi Nakagawa, State-dependent directed information flow across synchrony networks in the human brain, The 18th Annual Meeting of Human Brain Mapping, Beijing, China, (Jun. 10-14, 2012)
28. 川崎 真弘, 北城 圭一, TMSによるワーキングメモリ操作時の前頭-感覚野の位相同期の変化, 日本認知心理学会第10回大会, 岡山, (Jun. 2-3, 2012)
29. Masahiro Kawasaki, Keiichi Kitajo, Yoko Yamaguchi, Synchronized EEG oscillations from 2 individuals during synchronized alternate tapping, Cognitive Neuroscience Society 2012 Annual meeting, Chicago, USA, (Mar. 31- Apr. 3, 2012)
30. 北城 圭一, 脳の振動同期ダイナミクス解析とその応用可能性, 第三回神経ダイナミクス研究会, 函館, (Mar. 21-22, 2012)
31. 程 殷杰, 川崎 真弘, 北城 圭一, 山口 陽子, 二人交互タッピングにおける協調リズムの生成 ~ 位相応答曲線モデルを用いた解析 ~, ニューロコンピューティング研究会, 東京, (Mar. 13-15, 2012)
32. 北城 圭一, ヒトの脳での同期ダイナミクスとノイズ誘起現象, 研究集会「非線形現象の解析・モデル化・制御」, 鹿児島, (Mar. 4-6, 2012)
33. Keiichi Kitajo, Yumi Nakagawa, Yutaka Uno, Yoko Yamaguchi, Phase control of human brain activity by single-shot TMS, The 41st Annual Meeting of Society for Neuroscience, Washington DC, USA, (Nov. 12-16, 2011)
34. Daisuke Shimaoka, Keiichi Kitajo, Kunihiro Kaneko, Yoko Yamaguchi, Role of spontaneous phase coherence across cortical areas on visual perception, The 34th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society, Yokohama, Japan, (Sep. 14-17, 2011)
35. Keiichi Kitajo, Yumi Nakagawa, Yutaka Uno, Ryohei Miyota, Masanori Shimono, Kentaro Yamanaka, Yoko Yamaguchi, State-dependency in large scale propagation of phase reset of ongoing activity, The 34th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society, Yokohama, Japan, (Sep. 14-17, 2011)
36. 宇野 裕, 中川 佑美, 山口 陽子, 北城 圭一, クラスタ統計量を用いた Phase Locking Value の条件間差のノンパラメトリック検定, 脳と心のメカニズム, 包括脳科学研究推進支援ネットワーク, 夏のワークショップ, 神戸, (Aug. 21-24, 2011)
37. 北城 圭一, ヒトの脳での確率共振とノイズ誘起現象, 京都力学系学際セミナー, 京都, (Jul. 15-16, 2011)
38. Masahiro Kawasaki, Keiichi Kitajo, Yoko Yamaguchi, Dual EEG analyses for synchronized behaviors of two person during an alternately tapping, 8th World Congress of International Brain Research Organization, Florence, Italy, (Jul. 14-18, 2011)
39. 北城 圭一, 脳の因果性の操作的解明 - TMS-EEG アプローチの観点から-, ニューロ・リハ・ロボ+Brain-IS 合同研究会, 北九州, (Jun. 27, 2011)
40. クレベルグ フローレンス, 北城 圭一, 川崎 真弘, 山口 陽子, Human recognition memory: Neural oscillations in familiarity and recollection, 日本認知心理学会第九回大会, 東京, (May 28-29, 2011)

41. 川崎 真弘, 北城 圭一, 山口 陽子, 協調タッピング課題時の「間 (ま)」に関する 2 名の脳リズム解析, 電子情報通信学会ヒューマン情報処理研究会 (HIP), 沖縄, (May 23-24, 2011)
42. Keiichi Kitajo, Stochastic resonance and noise-enhanced phenomena in the human brain, SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems 2011, Snowbird, USA, (May 22-26, 2011)
43. 北城 圭一, ヒトの知覚情報処理の操作的検証, 第 9 回認知科学セミナー, 横浜, (Mar. 14- May 14, 2011)
44. 北城 圭一, 経頭蓋磁気刺激による神経因果的アプローチ, 第二回神経ダイナミクス研究会, 福岡, (Jan. 29, 2011)
45. 北城 圭一, 中川 佑美, 山口 陽子, Phase control of human brain activity. ヒトの脳活動の位相制御, 脳と心のメカニズム 第 11 回 冬のワークショップ, ルスツ, 北海道, (Jan. 11-13, 2011)
46. 北城 圭一, ヒトの神経活動の振動同期と知覚の因果関係の操作的解明, 第 2 2 回埼玉大学脳科学セミナー, さいたま, (Oct. 16, 2010)
47. 北城 圭一, ヒトの神経活動の振動同期と知覚の因果関係の操作的解明, 埼玉大学第 2 2 回脳科学セミナー, さいたま市, (Oct. 15, 2010)
48. Yoko Yamaguchi, David Chik, Masahiro Kawasaki, Hideki Oka, Double frequency synchronization for working memory operation in the brain - a computational study for bridging human scalp EEG data and neural dynamics, Neuroinformatics2010, Kobe, (Aug. 30- Sep. 1, 2010)
49. Keiichi Kitajo, Manipulative approaches to neural synchrony and perception in humans, Neuro2010, 神戸, (Aug. 2-4, 2010)
50. 川崎 真弘, David Taiwai Chik, 北城 圭一, 山口 陽子, 作業記憶の脳波リズム回路、その報酬と注意による制御, 包括型脳科学研究推進支援ネットワーク・夏のワークショップ, 札幌, (Jul. 27-30, 2010)
51. 北城 圭一, ヒトの神経活動の振動同期と知覚の操作的解明, 芝浦工大 SIT 総合研究所・脳科学・ライフテクノロジー寄付研究センターキックオフシンポジウム, 東京, (Jul. 3, 2010)
52. 山口 陽子, 脳のリズムから知性の原理は捉えられるか?, 玉川大学若手&神経科学セミナー, 玉川大学, 東京, (Feb. 16, 2010)
53. Yoko Yamaguchi, Oscillation, Memory, Attention, RIKEN BSI Tutorial Series 2009, RIKEN, Wako, (Feb. 2, 2010)
54. Yoko Yamaguchi, Computational study of memory formation through dynamical interplays in the cortico-hippocampal system, 32nd Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society (Neuroscience 2009), Nagoya, (Sep. 16-18, 2009)
55. Yoko Yamaguchi, Path Integration and cognitive map formation in cortico-hippocampal theta networks, RIKEN BSI Symposium on Hippocampus, RIKEN, Wako, (Sep. 14, 2009)
56. 山口 陽子, 自己組織システムとしての脳のデザイン, 第 16 回科学技術交流フォーラム, 東京大学 東京, (Sep. 7, 2009)

B01G2

1. Yoshinori Ide, Muneyoshi Takahashi, Johan Lauwereyns, Minoru Tsukada, Takeshi Aihara, Optical imaging of plastic changes induced by fear conditioning in auditory, visual, and somatosensory cortices, The 4th International Conference on Cognitive Neurodynamics, ICCN2013, Sigtuna, Sweden, (Jun. 23-27, 2013)
2. Toshikazu Samura, Yasuomi Daishin Sato, Yuji Ikegaya, Hatsuo Hayashi, Minoru Tsukada, Takeshi Aihara, Diverse background activities hidden in power-law spontaneous activity of hippocampal CA3 slice culture, The 6th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and the 13th International Symposium on Advanced Intelligent Systems, Kobe, (Nov. 20-24, 2012)
3. Tadanobu Kamijo, Ichiro Tsuda, Yutaka Yamaguti, Yasuhiro Fukushima, Minoru Tsukada, Takeshi Aihara, Cantor coding for a spatio-temporal input sequence in the CA1, The Society for Neuroscience, Neuroscience2012, New Orleans, (Oct. 13-17, 2012)
4. Masashi Kondo, Tasuo Kitajima, Satoshi Fujii, Makoto Nishiyama, Takeshi Aihara, Location-dependent influence of feed-forward and feed-back inhibitions in hippocampal CA1 neurons: Analysis using optical imaging method with voltage-sensitive dyes, The Society for Neuroscience, Neuroscience2012, New Orleans, (Oct. 13-17, 2012)
5. Yoshiya Yamaguchi, Yutaka Sakai, A theoretical approach to animal's impulsive preference - Impulsive choice behavior is interpreted as a result of reward-maximization failure, SCIS-ISIS2012, Kobe, Japan, (Nov. 20-24, 2012)
6. Yoshiya Yamaguchi, Yutaka Sakai, Impulsive preference emerges as a result from reward-maximization failure, Neuroscience 2012, Nagoya, Japan, (Sep. 18-21, 2012)

7. 佐村 俊和, 杉崎 えり子, 酒井 裕, 林 初男, 相原 威, 長期抑圧の調節によるリカレントネットワークに生じる距離に依存する結合強度分布と指向性興奮伝播への影響, ニューロコンピューティング研究会, 北九州, (Oct. 5, 2012)
8. 近藤 将史, 相原 威, 海馬 CA1 野ニューロンにおける feed-forward/feed-back shunting 効果の時空間的解析, 第 35 回 日本神経科学大会, Nagoya, (Sep. 18-21, 2012)
9. 上條 中庸, 早川 博章, 福島 康弘, 窪田 芳之, 磯村 宜和, 相原 威, 歯状回顆粒細胞における樹状突起分岐での入力統合の超線形性, 日本神経回路学会 第 22 回全国大会, Nagoya, (Sep. 12-14, 2012)
10. 佐村 俊和, 酒井 裕, 林 初男, 相原 威, 興奮伝播を生ずるリカレントネットワークに生じる距離依存結合強度分布, 日本神経回路学会 第 22 回全国大会, Nagoya, (Sep. 12-14, 2012)
11. 近藤 将史, 相原 威, 海馬 CA1 神経細胞における抑制入力の動的膜電位抑制: 光計測法を用いた解析, 日本神経回路学会 第 22 回全国大会, Nagoya, (Sep. 12-14, 2012)
12. 早川 博章, 上條 中庸, 佐村 俊和, 相原 威, 海馬顆粒細胞の樹状突起部位に依存した情報処理, 日本神経回路学会 第 22 回全国大会, Nagoya, (Sep. 12-14, 2012)
13. 早川 博章, 上條 中庸, 佐村 俊和, 相原 威, 海馬歯状回における空間・非空間情報の処理様式の解析, 包括型脳科学研究推進支援ネットワーク 夏のワークショップ, 仙台, (Jul. 24-27, 2012)
14. 近藤 将史, 相原 威, 膜電位イメージング法を用いた海馬 CA1 野フィードフォワード・フィードバック抑制入力の時空間ダイナミクス解析, 包括型脳科学研究推進支援ネットワーク 夏のワークショップ, 仙台, (Jul. 24-27, 2012)
15. 上條 中庸, 海江田 岳, 早川 博章, 福島 康弘, 相原 威, 海馬歯状回顆粒細胞における非線形性, 第 89 回日本生理学会大会, 長野, (Mar. 29-31, 2012)
16. 上條 中庸, 海江田 岳, 早川 博章, 福島 康弘, 窪田 芳之, 相原 威, Non-linearities in the rat hippocampus dentate granule cell, 第 89 回 日本生理学会大会, 松本, (Mar. 29-31, 2012)
17. 武石 歴名, 近藤 将史, 佐々木 寛, 相原 威, 海馬 CA1 樹状突起の入力統合機能の研究, 電子情報通信学会 総合大会 2012, 岡山, (Mar. 20-23, 2012)
18. 上條 中庸, 早川 博章, 福島 康弘, 相原 威, 海馬樹状突起における非線形情報処理の解析, ニューロコンピューティング研究会, 町田, (Mar. 14-16, 2012)
19. 左氏 歩, 早川 博章, 武石 歴名, 相原 威, 佐々木 寛, 情動が事象関連脳電位に与える影響, ニューロコンピューティング研究会, 東京, (Mar. 14-16, 2012)
20. 近藤 将史, 佐々木 寛, 相原 威, Regulations of dendritic membrane potential dynamics by feed-forward/ feed-back inhibitory inputs: spatio-temporal analysis using voltage-sensitive imaging method, 第 12 回 冬のワークショップ『脳と心のメカニズム』, ルスツ, (Jan. 16-18, 2012)
21. Masashi Kondo, Hiroshi Sasaki, Takeshi Aihara, Spatial dependency of inhibitory components in hippocampal CA1 area: analysis using optical imaging method with voltage-sensitive dye, The 21st Annual Conference of the Japanese Neural Network Society, Okinawa, (Dec. 15-17, 2011)
22. Eriko Sugisaki, Yasuhiko Fukushima, Minoru Tsukada, Takeshi Aihara, Acetylcholine modulation on STDP in CA1 region of hippocampus, The Society for Neuroscience, Neuroscience2011, Washington DC, (Nov. 12-16, 2011)
23. Yusaku Segawa, Takeshi Aihara, Zhonggang Feng, Siu Kang, Tatsuo Kitajima, Inductive property of the voltage-dependent Ca²⁺-channels to subthreshold resonance, The Society for Neuroscience, Neuroscience2011, Washington DC, (Nov. 12-16, 2011)
24. Tadanobu Kamijo, Hirofumi Hayakawa, Ayumi Sashi, Yasuhiro Fukushima, Eiki Hida, Takeshi Aihara, Nonlinearity of the input integration of in the dentate Granule cell, The Society for Neuroscience, Neuroscience2011, Washington DC, (Nov. 12-16, 2011)
25. Hirofumi Hayakawa, Tadanobu Kamijo, Yasuhiro Fukushima, Tatsuo Kitajima, Takeshi Aihara, Different information processing depending on the dendritic locations in hippocampal granule cell, The Society for Neuroscience, Neuroscience2011, Washington DC, 2011, (Nov. 12-16, 2011)
26. Yoshinori Ide, Muneyoshi Takahashi, Johan Lauwereyns, Minoru Tsukada, Takeshi Aihara, Activation of Guinea Pig Auditory Cortex Induced by Foot Shock Alone after Fear Conditioning, The Society for Neuroscience, Neuroscience2011, Washington DC, (Nov. 12-16, 2011)
27. Takeshi Aihara, Tadanobu Kamijo, Hirofumi Hayakawa, Nonlinear information processing of the dentate granule cell in hippocampus, The 26th Symposium on Biological and Physiological Engineering (BPES2011), 滋賀, (Sep. 20-22, 2011)
28. 杉崎 えり子, 福島 康弘, 早川 博章, 塚田 稔, 相原 威, ラット海馬スライスの CA1 ネットワークにおけるスパイクタイミング依存可塑性へのアセチルコリン効果, Neuro2011, 横浜, (Sep. 14-17, 2011)
29. 早川 博章, 上條 中庸, 福島 康弘, 相原 威, 海馬歯状回の樹状突起における周波数依存的な情報処理, Neuro 2011, 横浜, (Sep. 14-17, 2011)

30. 上條 中庸, 早川 博章, 福島 康弘, 相原 威, ラット海馬歯状回における異なる入力の相互作用, *Neuro 2011*, 横浜, (Sep. 14-17, 2011)
31. 井出 吉紀, 高橋 宗良, Johan Lauwereyns, 塚田 稔, 相原 威, 恐怖条件づけにより聴覚野に生じる異なる感覚モダリティの統合, *Neuro 2011*, 横浜, (Sep. 14-17, 2011)
32. 早川 博章, 上條 中庸, 福島 康弘, 相原 威, 海馬歯状回顆粒細胞の樹状突起における情報処理の解析, *FIT2011 第 10 回情報科学技術フォーラム*, 函館, (Sep. 7-9, 2011)
33. 上條 中庸, 早川 博章, 福島 康弘, 相原 威, Integration of different inputs in the hippocampal granule cells, *脳と心のメカニズム 第 12 回 夏のワークショップ*, 神戸, (Aug. 21-22, 2011)
34. Yoshinori Ide, Muneyoshi Takahashi, Johan Lauwereyns, Minoru Tsukada, Takeshi Aihara, Integration of Different Sensory Modalities in the Auditory Cortex Established by Fear Conditioning, *The 34th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society*, Yokohama, (Sep. 14-17, 2011)
35. 近藤 将史, 相原 威, 逆伝搬活動電位の振幅変調による STDP への影響, *2011 年 包括脳夏のワークショップ*, 神戸, (Aug. 21-24, 2011)
36. Hirofumi Hayakawa, Tadanobu Kamijo, Yasuhiro Fukushima, Takeshi Aihara, Location dependency of information processing in the dendrite of hippocampal granule cells, *8th IBRO World Congress of Neuroscience*, IBRO2011, Florence, (Jul. 14-18, 2011)
37. Tadanobu Kamijo, Hirofumi Hayakawa, Yasuhiro Fukushima, Takeshi Aihara, Integration of different inputs in the rat hippocampal dentate gyrus, *8th IBRO World Congress of Neuroscience*, IBRO2011, Florence, (Jul. 14-18, 2011)
38. Masashi Kondo, Minoru Tsukada, Hiroshi Sasaki, Takeshi Aihara, Interaction of dendritic locations on STDP of hippocampal CA1 area using optical imaging, *8th IBRO World Congress of Neuroscience*, IBRO2011, Florence, (Jul. 14-18, 2011)
39. Yoshinori Ide, Muneyoshi Takahashi, Johan Lauwereyns, Guy Sandner, Minoru Tsukada, Takeshi Aihara, The Influence of Fear Conditioning on Activation of Guinea Pig Auditory Cortex in the Absence of Sound, *8th IBRO World Congress of Neuroscience (IBRO2011)*, Florence, (Jul. 14-18, 2011)
40. Eriko Sugisaki, Yasuhiro Fukushima, Minoru Tsukada, Takeshi Aihara, Modulation by acetylcholine of STDP in rat hippocampal CA1 network, *8th IBRO World Congress of Neuroscience*, IBRO2011, Florence, (Jul. 14-18, 2011)
41. 早川 博章, 上條 中庸, 福島 康弘, 相原 威, 海馬歯状回顆粒細胞の樹状突起における 2 点間の情報処理の違い, *ニューロコンピューティング研究会*, 沖縄, (Jun. 28-29, 2011)
42. Takeshi Aihara, Eriko Sugisaki, Yasuhiro Fukushima, Minoru Tsukada, Influence of the endogenous acetylcholine on STDP induction, *The 3rd International Conference on Cognitive Neurodynamics*, ICCN2011, Niseko, (Jun. 9-13, 2011)
43. Yoshinori Ide, Muneyoshi Takahashi, Johan Lauwereyns, Minoru Tsukada, Takeshi Aihara, Integration of Hetero Inputs to Guinea Pig Auditory Cortex Established by Fear Conditioning, *The 3rd International Conference on Cognitive Neurodynamics*, ICCN2011, Niseko, (Jun. 9-13, 2011)
44. Masashi Kondo, Tatu Kitajima, Takeshi Aihara, Backpropagating action potentials mediate other sites of STDP among hippocampal CA1 neuronal dendrites, *The 15th annual meeting of the ASSC satellite A joint Tamagawa University-Caltech Lecture Course*, Kyoto, (Jun. 7-8, 2011)
45. Tadanobu Kamijo, Hirofumi Hayakawa, Yasuhiro Fukushima, Takeshi Aihara, Information processing on the dendrite in hippocampal granule cells, *The 15th annual meeting of the ASSC satellite A joint Tamagawa University-Caltech Lecture Course*, Kyoto, (Jun. 7-8, 2011)
46. Yoshinori Ide, Minoru Tsukada, Takeshi Aihara, Optical imaging of plastic changes induced by fear conditioning in the auditory cortex, *Neuroscience 2010*, San Diego, (Nov. 13-17, 2010)
47. 杉崎 えり子, 福島 康弘, 早川 博章, 塚田 稔, 相原 威, 海馬 CA1 ネットワークにおけるアセチルコリンの STDP への効果, *第 25 回生体・生理工学シンポジウム*, 岡山, (Sep. 23-25, 2010)
48. Yoshinori Ide, Minoru Tsukada, Takeshi Aihara, Optical imaging of plastic changes induced by fear conditioning in the auditory cortex, *Joint Tamagawa-Keio-Caltech Lecture Course on Neuroeconomics*, Tokyo, (Sep. 8-10, 2010)
49. Makoto Yoneyama, Yasuhiro Fukushima, Takeshi Aihara, Minoru Tsukada, The spatial-temporal characteristics of synaptic EPSP summation on the dendritic trees of hippocampal CA1 pyramidal neurons as revealed by laser uncaging stimulation, *Joint Tamagawa-Keio-Caltech Lecture Course on Neuroeconomics*, Tokyo, (Sep. 8-10, 2010)
50. Yoshinori Ide, Minoru Tsukada, Takeshi Aihara, Optical Imaging of Plastic Changes Induced by Fear Conditioning in The Auditory Cortex, *Neuro2010*, kobe, (Sep. 2-4, 2010)

51. Yoshiya Yamaguchi, Yutaka Sakai, Purpose or Strategy? Reconsideration of temporal discount in non-Markov situation, Neuro 2010, Kobe, Japan, (Sep. 2-4, 2010)
52. Yutaka Sakai, A hypothesis of efficient learning rule: dopamine-dependent metaplasticity, Neuro 2010, Kobe, Japan, (Sep. 2-4, 2010)
53. H. Hayakawa, T. Kamijo, M. Yoneyama, Y. Fukushima, T. Aihara, Information processing on the dendrite in hippocampal granule cells, Neuro 2010, Kobe, (Sep. 2-4, 2010)
54. M. Yoneyama, Y. Fukushima, H. Kojima, Y. Isomura, T. Aihara, M. Tsukada, The spatial-temporal characteristics of synaptic EPSP summation on the dendritic trees of hippocampal CA1 pyramidal neurons using laser uncaging stimulation, Neuro 2010, Kobe, (Sep. 2-4, 2010)
55. A. Sashi, N. Emata, S. Fujii, T. Aihara, H. Sasaki, Event-related potential during memory encoding of words analyzed by pre/post-sleep recognition performance, Neuro 2010, Kobe, (Sep. 2-4, 2010)
56. M. Kondo, Y. Fukushima, M. Tsukada, T. Aihara, Interaction between dendritic inputs in Hippocampal CA1 neurons: the analysis using optical imaging method, Neuro 2010, Kobe, (Sep. 2-4, 2010)
57. E. Sugisaki, Y. Fukushima, M. Tsukada, T. Aihara, Cholinergic modulation on STDP in hippocampal CA1 network, Neuro 2010, Kobe, (Sep. 2-3, 2010)
58. 吉田 典弘, 興石 健一, 早川 博章, 北嶋 龍雄, 相原 威, 海馬 CA1 ニューロンの樹状突起における逆伝搬活動電位の伝送特性, 第 29 回日本シミュレーション学会大会, 山形, (Jun. 19-20, 2010)
59. T.Aihara, M.Kondo, Y.Fukushima, H.Sasaki, M.Tukada, The interaction between distal and proximal dendritic inputs in hippocampal CA1 neurons, The 87th Annual Meeting of the Physiological Society of Japan, Morioka, (May 19-21, 2010)
60. 杉崎 えり子, 福島 康弘, 早川 博章, 塚田 稔, 相原 威, 海馬 CA1 野におけるトップダウン入力による情報統合メカニズム, 電子通信学会 総合大会, 仙台, (Mar. 16-18, 2010)
61. 早川 博章, 上條 中庸, 坂田 幸介, 相原 威, 海馬歯状回における入力情報の統合, 電子通信学会総合大会, 仙台, (Mar. 16-18, 2010)
62. Kondo M, Fukushima Y, Tsukada M, Aihara T, The interuaction of dendritic inputs in hippocampal CA1 neurons, Joint Tamagawa-Caltech Lecture Course on DECISION MAKING, Tokyo, (Mar. 3-5, 2010)
63. Sugisaki E, Fukushima Y, Hyakawa H, Tsukada M, Aihara T, The effect of colinergic inputs for STDP induction in hippocampal CA1, Joint Tamagawa-Caltech Lecture Course on DECISION MAKING, Tokyo, (Mar. 3-5, 2010)
64. 上條 中庸, 高橋 英之, 相原 威, 不安感は写真鑑賞時の視線の動きに反映される, 日本神経回路学会 脳と心のメカニズム第 10 回 冬のワークショップ, 北海道, (Jan. 12-14, 2010)
65. 近藤 将史, 福島 康弘, 塚田 稔, 相原 威, 海馬 C A 1 樹状突起の入力情報統合機, 日本神経回路学会 脳と心のメカニズム第 10 回 冬のワークショップ, 北海道 ルスツ, (Jan. 12-14, 2010)
66. Kondo M, Fukushima Y, Kitajima T, Tukada M, Aihara T, The analysis of interaction among dendritic inputs in Hippocampal CA1 neurons, Neuroscience2009, Cicago, (Oct. 17-21, 2009)
67. Kondo M, Fukushima Y, Tukada M, Aihara T, The influence of modulating the Back-Propergating Action-Potential on STDP in hippocampal CA1 area, IUPS2009, Kyoto, (Jul. 27- Aug. 1, 2009)

B01G3

1. 藤井 俊勝, 記憶は脳のどこにあるのか, 第 54 回日本神経学会学術大会シンポジウム「神経心理学の進歩: たいせつなことをわかりやすく」, 東京, (Jan. 7, 2014)
2. Ueno A, Ito A, Kawasaki I, Kawachi Y, Yoshida K, Murakami Y, Sakai S, Iijima T, Matsue Y, Fujii T, Neural correlates of facial recognition with and without cosmetics: an fMRI study, International Neuropsychological Society Mid-Year Meeting 2013, Amsterdam, The Netherlands, (Jul. 10-13, 2013)
3. Murakami Y, Ito A, Kawasaki I, Ueno A, Kawachi Y, Mugikura S, Matsue Y, Sakai S, Takahashi S, Fujii T, Effects of cosmetics use and gaze direction on facial attractiveness: an fMRI study, International Neuropsychological Society Mid-Year Meeting 2013, Amsterdam, The Netherlands, (Jul. 10-13, 2013)
4. Kawasaki I, Fujii T, Ito A, Ueno A, Mugikura S, Takahashi S, Mori E, Neural correlates of pleasant and unpleasant emotions induced by social reputation from the same and opposite genders, International Neuropsychological Society Mid-Year Meeting 2013, Amsterdam, The Netherlands., (Jul. 10-13, 2013)

5. Ito A, Fujii T, Abe N, Kawasaki I, Hayashi A, Ueno A, Yoshida K, Sakai S, Mugikura S, Takahashi S, Mori E, Gender differences in the patterns of vmPFC activity associated with preference judgments for faces, International Neuropsychological Society Mid-Year Meeting 2013, Amsterdam, The Netherlands, (Jul. 10-13, 2013)
6. Jiro Okuda, Maki Suzuki, Takeshi Konno, Junya Morita, Takashi Hashimoto, Planning based on one's own past and other's past during a communication task, The 4th International Conference on Cognitive Neurodynamics (ICCN2013), Agora for Biosystems, Sigtuna, Sweden, (Jun. 23-27, 2013)
7. 日高 智貴, 増谷 直人, 木下 裕輝, 白石 優旗, 河合 由起子, 奥田 次郎, 携帯型端末を用いた脳情報に基づく情報推薦システムの提案, The 5th Forum on Data Engineering and Information Management (deim2013), 磐梯熱海, 福島, (Mar. 5, 2013)
8. Maki Suzuki, Jiro Okuda, Aya Ueno, Yoshihiko Matsue, Toshikatsu Fujii, Neural correlates of the retrieval of temporal order memory, 42nd Annual Meeting of Society for Neuroscience (Neuroscience 2012), New Orleans, USA, (Oct. 17, 2012)
9. Jiro Okuda, Maki Suzuki, Takashi Hashimoto, Takeshi Konno, Junya Morita, Experimental approaches to mechanisms of memory-guided future planning, Dynamic Brain Forum 2012, Carmona, Spain, (Sep. 3-6, 2012)
10. 藤井 俊勝, 高次脳機能障害についてー前頭葉障害を中心にー, 気仙沼市保健・医療・福祉系職員スキルアップ研修会, 気仙沼, 宮城, (May 19, 2012)
11. Maki Suzuki, Jiro Okuda, Toshikatsu Fujii, Hippocampal activity during recollection of different contextual information: an fMRI study, 10th Tsukuba International Conference on Memory, Tokyo, Japan, (Mar. 4-6, 2012)
12. 奥田 次郎, 展望する脳ーコミュニケーションの仕組みの理解に向けてー, 北陸先端科学技術大学院大学 知識科学研究科セミナー, 北陸先端科学技術大学院大学 (石川), (Nov. 24, 2011)
13. 藤井 俊勝, 記憶と嘘, 玉川大学脳科学リテラシー部門第 10 回研究会, 東京, (Oct. 8, 2011)
14. Maki Suzuki, Jiro Okuda, Aya Ueno, Yoshihiko Matsue, Toshikatsu Fujii, Neural correlates of the retrieval of temporal order information about discontinuous events: Effects of temporal lag, 第 34 回日本神経科学大会 34th Annual Meeting of Japanese Neuroscience Society, 横浜 Yokohama, (Sep. 14-17, 2011)
15. Aya Ueno, Jiro Okuda, Toshikatsu Fujii, Reactivation hypothesis in episodic memory: from the findings of neuroimaging studies, The 3rd International Conference on Cognitive Neurodynamics, Niseko, (Jun. 9-13, 2011)
16. 奥田 次郎, 未来はどこからやって来る?ー展望的な人間の脳情報処理と社会コミュニケーションー, 第 69 回 京都産業大学 市民講座, 京都, (Apr. 27, 2011)
17. Aya Ueno, Ayahito Ito, Yuta Koseki, Akiko Hayashi, Etsuro Mori, Yoshihiko Matsue, Toshikatsu Fujii, Distinct brain activations predicting the choice of likes and dislikes, International Neuropsychological Society, 39th Annual Meeting, Boston, USA, (Feb. 2-5, 2011)
18. Yuta Koseki, Ayahito Ito, Nobuhito Abe, Aya Ueno, Akiko hayashi, Etsuro Mori, Yulwan Sung, Yoshihiko Matsue, Toshikatsu Fujii, Dissociating areas for novelty detection and for episodic encoding within the human medial temporal lobe, International Neuropsychological Society, 39th Annual Meeting, Boston, USA, (Feb. 2-5, 2011)
19. Nobuhito Abe, Toshikatsu Fujii, Maki Suzuki, Aya Ueno, Yayoi Shigemune, Shunji Mugikura, Shoki Takahashi, Etsuro Mori, False recollection and recognition: an event-related fMRI study, International Neuropsychological Society, 39th Annual Meeting, Boston, USA, (Feb. 2-5, 2011)
20. Ayahito Ito, Nobuhito Abe, Toshikatsu Fujii, Aya Ueno, Yuta Koseki, Ryusaku Hashimoto, Shunji Mugikura, Shoki Takahashi, Etsuro Mori, The role of dorsolateral prefrontal cortex in deception for emotional and neutral events, International Neuropsychological Society, 39th Annual Meeting, Boston, USA, (Feb. 2-5, 2011)
21. Akiko Hayashi, Nobuhito Abe, Toshikatsu Fujii, Ayahito Ito, Aya Ueno, Yuta Koseki, Shunji Mugikura, Shoki Takahashi, Etsuro Mori, Neural correlates of moral judgment about anti- and pro-social lying, International Neuropsychological Society, 39th Annual Meeting, Boston, USA, (Feb. 2-5, 2011)
22. 奥田 次郎, 藤井 俊勝, 行動予定の脳機構, 包括脳ネットワーク 夏のワークショップ, 札幌, (Jul. 27-30, 2010)
23. 鈴木 麻希, 阿部 修士, 麦倉 俊司, 奥田 次郎, 高橋 昭喜, 藤井 俊勝, 経験の長さの記憶に関わる神経基盤: 機能的 MRI 研究, 包括脳ネットワーク 夏のワークショップ, 札幌, (Jul. 27-30, 2010)
24. Toshikatsu Fujii, An fMRI study on dissociative amnesia, Neurotalk 2010, Singapore, (Jun. 25-28, 2010)

25. Jiro Okuda, Representation and operation of intentions in the brain: From studies of deception and prospective memory, How and why economists and philosophers do experiments: dialogue between experimental economics and experimental philosophy, Kyoto, (Mar. 27-28, 2010)
26. 藤井 俊勝, ヒトの記憶の脳内基盤, 第 21 回東北神経心理懇話会特別講演, 仙台, (Jan. 30, 2010)
27. 藤井 俊勝, 記憶障害のみかた, 第 14 回日本神経精神医学会教育講演, 仙台, (Nov. 5-6, 2009)
28. 奥田 次郎, 脳科学からみた人間の記憶=予見システムと行動決定, 筑波大学大学院システム情報工学研究科 経済学・ゲーム理論セミナー, つくば, (Nov. 5, 2009)
29. 藤井 俊勝, 嘘とだましの神経メカニズム, 日本学術会議神経関係 3 分科会合同市民公開シンポジウム「社会性の脳科学」, 東京, (Oct. 31, 2009)
30. 藤井 俊勝, 記憶とその障害, 第 33 回日本高次脳機能障害学会教育セミナー, 札幌, (Oct. 29, 2009)
31. Yamamoto M, Hayamizu N, Matsuda T, Okuda J, Sakagami M, Brain activity for monetary gain and loss prediction based on salient and uncertain perception, Neuroscience2009 (39th Annual Meeting of Society for Neuroscience), Chicago, (Oct. 17-21, 2009)
32. Yamamoto M, Matsumoto M, Matsuda T, Okuda J, Sakagami M, Brain activity for monetary loss prediction based on ambiguous perception, Neuroscience2009 (第 32 回日本神経科学会), 名古屋, (Sep. 16-18, 2009)
33. Yoshida T, Ito M, Morimura T, Samejima K, Okuda J, Yoshimoto J, Doya K, Brain mechanisms for evaluating probabilistic and delayed rewards, Neuroscience2009 (第 32 回日本神経科学会), 名古屋, (Sep. 16-18, 2009)
34. Jiro Okuda, Memory and prospection of the brain: What can cognitive brain science suggest to inductive game theory and decision-making?, Logic, Game Theory, and Social Choice 6, Tsukuba, (Aug. 26-29, 2009)

B01G4

1. Manabu Shikauchi, Hiroaki Mizuhara, Brain Activity by Selfish Partner Dynamically Modulates the Reward-related Cortical Network, Society for Neuroscience, San Diego, (Nov. 9-13, 2013)
2. Takayuki Onojima, Keiichi Kitajo, Hiroaki Mizuhara, Intelligibility of speech perception depends on the pre-stimulus oscillatory phase, Conference on Neural Oscillation 2013, 岡崎, (Jul. 18-19, 2013)
3. 鹿内 学, 水原 啓暁, 相手の非協調性に関わる脳活動により変化する報酬系領野間の情報伝達, 信学技報, 徳島, (Jul. 1, 2013)
4. Hiroaki Mizuhara, Spatiotemporal analysis of human neural oscillation by simultaneous fMRI-EEG, Conference on Neural Oscillation 2013, 岡崎, (Jul. 18-19, 2013)
5. 小野島 隆之, 北城 圭一, 水原 啓暁, 自発脳波位相により変化する音声聴取成績, 日本認知心理学会第 11 回大会, 筑波, (Jun. 29-30, 2013)
6. Hiroaki Mizuhara, Takafumi Sasaoka, Yutaka Yamaguti, Hiroshi Watanabe, Ichiro Tsuda, EEG (de-)synchronization of the intra/inter-brain during cooperative finger tapping, International Conference on Cognitive Neurodynamics 2013, Sweden, (Jun. 23-27, 2013)
7. Hiroaki Mizuhara, Neural Synchrony: Common Framework for Understanding Inter-cortical and Inter-brain Communication, 大阪大学浅田稔研究室 特別推進研究研究会, 大阪, (Apr. 26, 2013)
8. Hiroaki Mizuhara, Neural synchronization of the intra-/inter-brain for hetero systems communication, Workshop on Measuring Consciousness - Theory and Experiments, 京都, (Mar. 25, 2013)
9. 水原 啓暁, 神経振動子協調による皮質間/個体間コミュニケーション, 神経ダイナミクス研究会, 山口, (Mar. 8-9, 2013)
10. 鹿内 学, 水原 啓暁, 社会的環境で報酬系活動を変化させる領野間ネットワークの調節器, 第 2 回社会神経科学研究会, 愛知県岡崎市, (Jan. 30, 2013)
11. 鹿内 学, 水原 啓暁, fMRI 脳活動解析における統計的因果推論の適用, 第 15 回情報論的学習理論ワークショップ(IBIS2012), 東京, (Nov. 8, 2012)
12. 鹿内 学, 水原 啓暁, 非協力的な相手との行動によって変化する報酬関連領野の活動, 日本神経科学大会, 名古屋, (Sep. 19, 2012)
13. Hiroaki Mizuhara, Suguru Inoue, Takafumi Sasaoka, Manabu Shikauchi, Boosting the intelligibility of vocal communication via inter-individual entrainment of neuronal oscillations, Dynamic Brain Forum 2012, Spain, (Sep. 3-6, 2012)
14. 水原 啓暁, 井上 卓, 笹岡 貴史, 鹿内 学, ミラーニューロンシステムにより促進される音声知覚, 日本認知心理学会, 岡山, (Jun. 2-3, 2012)
15. 水原 啓暁, 脳波階層カップリングによる 音声言語コミュニケーション促進原理, 第 3 回神経ダイナミクス研究会, 公立はこだて未来大学・北海道, (Mar. 21, 2012)

16. 鹿内 学, 水原 啓暁, 他者の状態によって変調する脳の報酬系: fMRI 研究, 第 10 回 日本認知心理学会, 岡山, (May 15, 2012)
17. 鹿内 学, 水原 啓暁, 他者の協調性によっておこる脳の報酬系の変調: fMRI 研究, 電子情報通信学会ニューロコンピューティング研究会, 玉川大学・東京, (Mar. 14-16, 2012)
18. 水原 啓暁, fMRI と EEG の同時計測による皮質脳波の再構築, ダイナミックブレインワークショップ, 沖縄大学院大学・沖縄, (Dec. 17, 2011)
19. 水原 啓暁, 神経振動子の階層カップリングによる皮質間/個体間コミュニケーション: fMRI と EEG の同時計測によるアプローチ, 京都大学大学院医学研究科 神経科学セミナー, 京都大学・京都, (Nov. 21, 2011)
20. 笹岡 貴史, 乾 敏郎, 遅延・変換フィードバック下での自他認識に関わる脳内基盤 1, 日本認知心理学会第 9 回大会, 東京都 学習院大学, (Mar. 28- May 29, 2011)
21. 水原 啓暁, 乾 敏郎, The origin of scalp EEG during a motor execution task: A new method for simultaneous fMRI and EEG, 16th Annual Meeting of the Organization for Human Brain Mapping., Barcelona, Spain, (Jun. 6-10, 2010)
22. 水原 啓暁, 乾 敏郎, 把持運動における皮質間のグレンジャー因果性の動特性, 日本認知心理学会第 8 回大会, 福岡県福岡市 西南学院大学, (May 29-30, 2010)
23. Mizuhara H, Inui T, Is mu rhythm an index of the human mirror neuron system? A study of simultaneous fMRI and EEG, The 2nd International Conference on Cognitive Neurodynamics, Hangzhou, China, (Nov. 15-20, 2009)

C01G1

1. Naho Konoike, Yuka Kotozaki, Shigehiro Miyachi, Carlos Makoto Miyauchi, Yukihiro Yomogida, Yoritaka Akimoto, Koji Kuraoka, Motoaki Sugiura, Ryuta Kawashima, Katsuki Nakamura, Neural substrates representing temporal and motor sequences of rhythm, The 44th annual meeting of Society for Neuroscience, Washington D.C., (Nov. 15-19, 2014)
2. 鴻池 菜保, リズム情報処理に関わる前頭葉—頭頂葉—小脳システム, 『平成 24 年度生理学研究所研究会・グローバルネットワークによる脳情報処理』, 岡崎, (Jan. 25, 2013)
3. Katsuki Nakamura, Naho Konoike, Yuka Kotozaki, Shigehiro Miyachi, Carlos Makoto Miyauchi, Yukihiro Yomogida, Yoritaka Akimoto, Koji Kuraoka, Motoaki Sugiura, Ryuta Kawashima, Working memory of rhythm information in the front-parieto-cerebellar motor system, Dynamic Brain Forum 2012, Carmona, (Sep. 3-6, 2012)
4. Noriko Inoue-Nakamura, Takeo Sasaki, Katsuki Nakamura, Visual scanning patterns during reading a picture book aloud by mothers in children with pervasive developmental disorder, Dynamic Brain Forum 2012, Carmona, Seville, Spain, (Sept. 3-6, 2012)
5. Naho Konoike, Yuka Kotozaki, Shigehiro Miyachi, Carlos Makoto Miyauchi, Yukihiro Yomogida, Yoritaka Akimoto, Koji Kuraoka, Motoaki Sugiura, Ryuta Kawashima, Katsuki Nakamura, Neural substrates for maintenance of rhythm information, 第 35 回日本神経科学大会, Nagoya, (Sep. 18-21, 2012)
6. Koji Kuraoka, Katsuki Nakamura, Categorical representation of social information in the central nucleus of monkey amygdala, The 41th Annual meeting, Society for Neuroscience, Washington DC, (Nov. 12-16, 2011.)
7. Naho Konoike, Yuka Kotozaki, Shigehiro Miyachi, Carlos Makoto Miyauchi, Yukihiro Yomogida, Yoritaka Akimoto, Koji Kuraoka, Motoaki Sugiura, Ryuta Kawashima, Katsuki Nakamura, Different contributions of frontal, parietal and temporal cortices to working memory of rhythm, The 41st annual meeting of Society for Neuroscience, Washington D.C., (Nov. 12-16, 2011)
8. 倉岡 康治, 中村 克樹, サルの扁桃体と腹外側前頭前皮質で異なる表情情報表現の時間的变化, 第 34 回日本神経科学大会, 横浜, (Sep. 14-17, 2011) Different temporal pattern of information processing about facial emotion conveyed by single neurons between the monkey amygdala and ventrolateral prefrontal cortex. Neuroscience Research 2011, 71 巻(supplement), p.e283.
9. Katsuki Nakamura, Neural mechanisms of nonverbal communication, The 15th annual meeting of the Association for the Scientific Study of Consciousness(ASSC) Social Neuroscience Satellite, Joint Tamagawa - Caltech, Lecture Course 2011, Kyoto University, Kyoto, (Jun. 7, 2011)

C01G2

1. Takuro Kojima, Reiji Suzuki, Takaya Arita, Coevolution of Cooperation and Niche Construction Based on Modifications of Physical Structures of Interactions, 6th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems, and the 13th International Symposium on Advanced Intelligent Systems 2012, Kobe, Japan, (Nov. 20-24, 2012)

2. Solvi Arnold, Reiji Suzuki, Takaya Arita, Second Order Learning and the Evolution of Mental Representation, 13th International Conference on the Simulation and Synthesis of Living Systems (ALIFE XIII), Lansing, USA, (Jul. 19-22, 2012)
3. Keita Nishimoto, Ivan Tanev, Katsunori Shimohara, Reiji Suzuki, Takaya Arita, Coevolutionary Dynamics between Roles and Social Sensitivity in an Extended Minority Game, 13th International Conference on the Simulation and Synthesis of Living Systems (ALIFE XIII), Lansing, USA, (Jul. 19-22, 2012)
4. Reiji Suzuki, Takaya Arita, Reconsidering Language Evolution from Coevolution of Learning and Niche Construction using a Concept of Dynamic Fitness Landscape, Five Approaches to Language Evolution (Evolang IX Workshop), Kyoto, Japan, (Mar. 13, 2012)
5. Tsubasa Azumagakito, Reiji Suzuki, Takaya Arita, A Simple Integrated Framework for Investigating Genetic and Cultural Evolution of Language, 9th International Conference on the Evolution of Language (Evolang IX), Kyoto, Japan, (Mar. 13-16, 2012)
6. Solvi Fylgja Arnold, Reiji Suzuki, Takaya Arita, Modelling Mental Representation as Evolved Second Order Learning, 17th International Symposium on Artificial Life and Robotics, Oita, Japan, (Jan. 19-21, 2012)
7. Kazuaki Kojima, Takaya Arita, How Do Equity Norms Evolve? - An Evolutionary Game Theory Approach to Distributive Justice, 17th International Symposium on Artificial Life and Robotics, Oita, Japan, (Jan. 19-21, 2012)
8. Kenichi Minoya, Takaya Arita, Takashi Omori, An Artificial Life Approach for Investigating the Emergence of a Theory of Mind based on a Functional Model of the Brain, IEEE Symposium on Artificial Life, Paris, France, (Apr. 13-15, 2011)
9. Tsubasa Azumagakito, Reiji Suzuki, Takaya Arita, Visualizing Language Evolution as an Emergent Phenomenon based on Biological Evolution and Learning, 16th International Symposium on Artificial Life and Robotics, Beppu, Japan, (Jan. 27-29, 2011)
10. Takahiro Otani, Takaya Arita, An Implementation of Probabilistic Model-building Coevolutionary Algorithm, 16th International Symposium on Artificial Life and Robotics, Beppu, Japan, (Jan. 27-29, 2011)
11. Kenichi Minoya, Takaya Arita, Takashi Omori, Autonomous Acquisition of Cooperative Behavior based on a Theory of Mind using Parallel Genetic Network Programming, 16th International Symposium on Artificial Life and Robotics, Beppu, Japan, (Jan. 27-29, 2011)
12. Reiji Suzuki, Takaya Arita, Effects of Temporal Locality of Ecological Processes on Coevolution of Learning and Niche Construction, Artificial Life XII, Odense, Denmark, (Oct. 14, 2010)
13. Solvi Arnold, Reiji Suzuki, Takaya Arita, Evolving Learning Ability in Dynamic Environments: The Structuring Force of Environmental Heterogeneity, Artificial Life XII, Odense, Denmark, (Aug. 19-23, 2010)
14. Yusuke Iwase, Reiji Suzuki, Takaya Arita, Controlling Macro-Level State-Transitions by Using Universal Components that are Self-organized by a Cellular Automaton, Artificial Life XII, Odense, Denmark, (Aug. 19-23, 2010)
15. Muhammad Attamimi, Akira Mizutani, Tomoaki Nakamura, Komei Sugiura, Takayuki Nagai, Naoto Iwahashi, Hiroyuki Okada, Takashi Omori, Learning Novel Objects Using Out-Of-Vocabulary Word Segmentation and Object Extraction for Home Assistant Robots, 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ShanDong, China, (Jul. 15-17, 2010)
16. Reiji Suzuki, Takaya Arita, Evolution of Cooperation on Different Combinations of Interaction and Replacement Networks with Various Intensity of Selection, IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC2009), Trondheim, Norway, (Mar. 18-21, 2010)
17. Reiji Suzuki, Yasunori Noba, Takaya Arita, Coevolution of Learning and Niche Construction, 13th Asia Pacific Symposium on Intelligent and Evolutionary Systems, Kasuga-city, Fukuoka, Japan, (Feb. 4-5, 2010)
18. 内田 淳, 岡田 浩之, 時系列の逐次処理によって対称性 (刺激等価性) の学習を行うニューラルネットワークモデル, ニューロコンピューティング研究会 (NC), 町田市 玉川大学, (Mar. 9-11, 2010)
19. Junichi Nakai, Takaya Arita, Introducing pre-evaluation into the Embodied-Evolution framework for a biped robot, 15th International Symposium on Artificial Life and Robotics, Beppu, Oita, (Feb. 3-6, 2010)
20. Kana Sugiura, Takaya Arita, Why we talk?: Altruism and multilevel selection in the origin of language, 15th International Symposium on Artificial Life and Robotics, Beppu, Oita, Japan, (Feb. 3-6, 2010)

21. Kenichi Minoya, Tatsuo Unemi, Reiji Suzuki, Takaya Arita, A Constructive Approach to the Evolution of the Planning Ability, 13th Asia Pacific Symposium on Intelligent and Evolutionary Systems, Kasuga-city, Fukuoka, Japan, (Feb. 4-5, 2009)
22. Reiji Suzuki, Takaya Arita, Effects of Learning on Evolution of Communication, ESF-COST High-Level Research Conference, Systems Chemistry II, Lake Balaton, Hungary, (Oct. 18-23, 2009)
23. Reiji Suzuki, Takaya Arita, Adaptive Walk on Fitness Soundscape, Tenth European Conference on Artificial Life, Budapest, Hungary, (Sep. 13-16, 2009)
24. Kazuaki Kojima, Reiji Suzuki, Takaya Arita, Repeated Reorganizations of Evolutionary Transitions in Individuality according to a Group Covariance Effect, The Workshop at ECAL 2009: Levels of Selection and Individuality in Evolution, Budapest, Hungary, (Sep. 13-16, 2009)
25. Hiroyuki Okada et.al :Team eR@sers, Team eR@sers 2009 in the @Home League Team Description Paper, RoboCup2009, Graz Austria, (Jun. 29- Jul. 5, 2009)

C01G3

1. Takashi Hashimoto, An integrative study on the process and mechanism of the co-creation of symbolic communication systems, 第 307 回言語学セミナー, Institute of Linguistics, Chinese Academy of Social Science, 北京中国社会科学院, 中国, (Mar. 6, 2014)
2. 田村 香織, 橋本 敬, 超越的コミュニケーション実現のための記号システムの変化, 日本人間行動進化学会 (HBES-J) 第 6 回大会, 広島修道大学 3 号館, (Dec. 7-8, 2013)
3. 橋本 敬, コミュニケーションの成立過程で人はなにをしているか? -言語進化実験・脳計測・シミュレーションの統合的アプローチ-, JAIST シンポジウム 2013, 富士ソフトアキバプラザ 6 階セミナールーム, (Nov. 22, 2013)
4. 橋本 敬, 実験記号論によるヒトの記号コミュニケーション形成プロセスの検討, RIMS 研究集会 第 10 回生物数学の理論とその応用 企画シンポジウム「コミュニケーション生物学」, 京都大学数理解析研究所 4 階 420 号室, (Nov. 21, 2013)
5. 橋本 敬, サービス・オートポイエーシス～組織を活かす新たなシステム論～, 新潟国際情報大学開学 20 周年記念シンポジウム「新潟における経営革新の実践を考えるー人間中心の情報と経営の実線ー」, 新潟日報「メディアシップ」, (Nov. 3, 2013)
6. Takuma Torii, Modeling group idea generation: combination, communication, and qualitative measure, 第 1 回 JAIST Poster Challenge, 北陸先端科学技術大学院大学, (Oct. 12, 2013)
7. Guan hong Li, Mirror neuron system involvement in the formation of symbolic communication systems, 第 1 回 JAIST Poster Challenge, 北陸先端科学技術大学院大学, (Oct. 12, 2013)
8. 金野 武司, 森田 純哉, 橋本 敬, 人工言語の共創実験: 使用する記号の類似性が導く言外の意味の成立, 日本認知科学会第 30 回大会, 玉川大学視聴覚センター, (Sep. 12-14, 2013)
9. Takeshi Konno, Junya Morita, Takashi Hashimoto, Information flow across individuals in formation of symbol communication systems, 35th Annual Conference of the Cognitive Science Society (CogSci 2013), Humboldt University, Germany, (Jul. 31- Aug. 3, 2013)
10. Kaori Tamura, Takashi Hashimoto, Source-target mapping strategy in displaced communication: Communication strategy to represent absent object, 35th Annual Conference of the Cognitive Science Society (CogSci 2013), Humboldt University, Germany, (Jul. 31- Aug. 3, 2013)
11. Guan hong Li, Takeshi Konno, Jiro Okuda, Activities of Mirror System Involved In Coordination Game, 35th Annual Conference of the Cognitive Science Society (CogSci 2013), Humboldt University, Germany, (Jul. 31- Aug. 3, 2013)
12. Takashi Hashimoto, Takeshi Konno, Junya Morita, Dividing roles and ordering information flow by role reversal imitation in the formation of communication systems, The 4th International Conference on Cognitive Neurodynamics (ICCN2013), Agora for Biosystems, Sigtuna, Sweden, (Jun. 23-27, 2013)
13. 金野 武司, 森田 純哉, 橋本 敬, 人工言語の共創実験における二者間での移動情報量の分析, 人工知能学会全国大会 (第 27 回), 富山国際会議場「大手町フォーラム」, (Jun. 4-7, 2013)
14. 田村 香織, 橋本 敬, 超越的コミュニケーションにおける自他の仮説形成, 人工知能学会全国大会 (第 27 回), 富山国際会議場「大手町フォーラム」, (Jun. 4-7, 2013)
15. 李 冠宏, 橋本 敬, 記号コミュニケーションシステムの形成過程におけるサイズ効果, 人工知能学会全国大会 (第 27 回), 富山国際会議場「大手町フォーラム」, (Jun. 4-7, 2013)
16. 橋本 敬, コミュニケーションシステムの共創: 言語進化実験による検討, 日本マーケティング・サイエンス学会, 構造計画研究所本所新館 会議室, (Mar. 18- May 18, 2013)

17. 金野 武司, 森田 純哉, 橋本 敬, コミュニケーションシステムの形成過程に見る知識共創の基盤, 第 3 回知識共創フォーラム, 北陸先端科学技術大学院大学 東京サテライトキャンパス, (Mar. 2-3, 2013)
18. Takashi Hashimoto, Evolution of language: simulation and experimental approaches, International workshop on perception and representation of intention involved in spoken language, 石川県 石川ハイテクセンター, (Feb. 5, 2013)
19. 橋本 敬, ワークショップ「進化言語学の方法論的基盤」: 進化言語学における構成論と実験の論理, 日本認知科学会第 29 回大会, 仙台国際センター, (Dec. 15, 2012)
20. 田村 香織, 橋本 敬, その場にはないものについてコミュニケーションできるとはどういうことか? —描画コミュニケーション課題による検討—, 日本人間行動進化学会 第 5 回大会, 東京大学駒場キャンパス, (Dec. 2, 2012)
21. Takuma Torii, Takashi Hashimoto, Blending defined on difference, and an implementation using dynamical approach, The 6th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems / The 13th International Symposium on Advanced Intelligent Systems, Kobe International Conference Center, Japan, (Nov. 20-24, 2012)
22. 橋本 敬, サービス・オートポイエーシス・システム- 生成的コミュニケーションに基づいたサービスの複雑システム論へ向けて, JAIST サービス・イノベーションシンポジウム 2012, 北陸先端科学技術大学院大学 東京サテライト, (Oct. 8, 2012)
23. Takashi Hashimoto, Takeshi Konno, Junya Morita, Co-creation process of symbolic communication systems: Cognitive experiments and constructive studies, Dynamic Brain Forum 2012, Carmona, Spain, (Sep. 4-6, 2013)
24. Guan hong Li, Takashi Hashimoto, Investigate the Neural Mechanism of the Emergence of Symbolic Communication System, 第 18 回創発システムシンポジウム 創発夏の学校 2012, 滋賀県大津市北小松 同志社リトリートセンター, (Sep. 1-3, 2012)
25. 橋本 敬, ワークショップ「進化言語学の展開」: はじめに, 日本進化学会第 14 回大会, 首都大学東京, (Aug. 21, 2012)
26. Guan hong Li, Takashi Hashimoto, Size Effect During Emergence of Symbolic Communication System Revealed by Agent-based Modelling, The 34th annual meeting of the Cognitive Science Society, Sapporo Convention Center, Japan, (Aug. 4, 2012)
27. Takeshi Konno, Junya Morita, Takashi Hashimoto, Three co-creation stages in formation of symbol communication systems, The 34th annual meeting of the Cognitive Science Society, Sapporo Convention Center, Japan, (Aug. 3, 2012)
28. Kaori Tamura, Takashi Hashimoto, Understanding displacement of communication by graphical communication tasks, The 34th annual meeting of the Cognitive Science Society, Sapporo Convention Center, Japan, (Aug. 2, 2012)
29. Junya Morita, Takeshi Konno, Takashi Hashimoto, The Role of Imitation in Generating a Shared Communication System, The 34th Annual Meeting of the Cognitive Science Society (CogSci2012), Sapporo, Japan, (Aug. 1-4, 2012)
30. Takashi Hashimoto, Integrative study on co-creation of symbolic communication systems, 2012 年度 包括脳ネットワーク夏のワークショップ, 伝達創成機構・予測と意思決定 合同シンポジウム「Interactive brain dynamics for decision making and communication 意思決定とコミュニケーションの脳ダイナミクスと相互作用」, 仙台国際センター, (Jul. 27, 2012)
31. Takashi Hashimoto, ラウンドテーブル「記号を用いたコミュニケーションを実現するために何が必要か?—記号創発ロボティクスの視点から—」: 記号を用いたコミュニケーションを実現するために, さらに何が必要か?~Beyond Symbol Grounding, 日本赤ちゃん学会 第 12 回学術集会, 玉川大学, (Jun. 2, 2012)
32. Takuma Torii, Takashi Hashimoto, Differentiation through symbolic communication, 3rd International Conference on Cognitive Neurodynamics 2011, Niseko, Japan, (Apr. 27, 2012)
33. Takashi Hashimoto, Constructive and Experimental Studies on the Evolution of Language and Communication, Cognitive Science Spring Seminars, University of Malta, (Mar. 26-29, 2012)
34. 森田 純哉, 統合認知アーキテクチャの魅力と困難: ACT-R を利用した研究事例, 日本認知科学会第 46 回学習と対話研究会, 東京工業大学大岡山キャンパス, (Mar. 22, 2012)
35. Takashi Hashimoto, Integrative Approach to Dynamic Feature of Symbolic Communication System, EvolangIX Workshop: Constructive Approaches to Language Evolution, Campus Plaza Kyoto, Japan, (Mar. 13, 2012)
36. Takeshi Konno, Junya Morita, Takashi Hashimoto, How is pragmatic grounding formed in the symbolic communication systems?, The 9th International Conference on the Evolution of Language, Campus Plaza Kyoto, Japan, (Mar. 13-16, 2012)

37. Kaori Tamura, Takashi Hashimoto, Displacement in communication, The 9th International Conference on the Evolution of Language, Campus Plaza Kyoto, Japan, (Mar. 13-16, 2012)
38. 森田 純哉, 金野 武司, 橋本 敬, コミュニケーション成立の観察実験に基づく認知モデルの設計, 日本認知科学会第 28 回大会, 東京大学本郷キャンパス, (Sep. 23, 2011)
39. 金野 武司, 森田 純哉, 橋本 敬, 記号コミュニケーションシステムの構成要素とその成立に寄与する行動傾向, 日本人間行動進化学会第 4 回大会, 北海道大学, (Nov. 19-20, 2011)
40. 鳥居 拓馬, 橋本 敬, 概念合成への力学系アプローチ, 第 14 回 知識科学シンポジウム, 東京, (Nov. 13, 2011)
41. 橋本 敬, 言語とコミュニケーションの進化～実験アプローチの展開, 「複雑系科学と応用哲学」沖縄研究会第 1 回大会, 琉球大学, (Aug. 30, 2011)
42. Takeshi Konno, Junya Morita, Takashi Hashimoto, Symbol communication systems integrate implicit information in coordination tasks, 3rd International Conference on Cognitive Neurodynamics 2011, Niseko, Japan, (Jun. 9-13, 2011)
43. 鳥居 拓馬, 橋本 敬, 離散・連続相互作用系による動的コミュニケーションのシミュレーション分析, 人工知能学会全国大会, 長崎, (Jun. 9-11, 2011)
44. Takashi Hashimoto, Evolution of symbolic communication and language: Constructive and experimental approaches, Global COE International Symposium "Future Trends in the Biology of Language", 東京, (Mar. 9-10, 2011)
45. 金野 武司, 森田 純哉, 橋本 敬, 調整課題における記号コミュニケーションシステムの形成実験, 言語理解とコミュニケーション研究会, 金沢, (Jan. 28-29, 2011)
46. 橋本 敬, 金野 武司, 森田 純哉, 記号コミュニケーションのプロトコル形成実験を通じた言語進化の考察, 日本人間行動進化学会, 神戸, (Dec. 4-5, 2010)
47. 橋本 敬, 言語と記号コミュニケーションの進化: 構成論と実験によるアプローチ, VCASI (Virtual Center for Advanced Studies in Institution) 公開研究会「言語の起源と進化について」, 東京, (Oct. 1, 2010)
48. 橋本 敬, 言語と記号コミュニケーションの進化, 玉川大学若手の会, 玉川大学脳科学研究所, (Sep. 30, 2010)
49. 橋本 敬, 森田 純哉, 金野 武司, 鳥居 拓馬, 生成的コミュニケーションと進化, 包括脳ネットワーク 夏のワークショップ, 札幌, (Jul. 27-30, 2010)
50. 鳥居 拓馬, 橋本 敬, 離散連続結合モデルを用いた記号コミュニケーションにおける動的生成メカニズムの解析, 電子情報通信学会 非線形問題研究会, 石川県金沢市, (Jul. 12-13, 2010)
51. 鳥居 拓馬, 橋本 敬, 離散連続相互作用系による動的コミュニケーションのシミュレーション分析, 第 24 回人工知能学会全国大会, 長崎, (Jun. 9-11, 2010)

C01G4

1. He, Z., Miyashita, E., Analysing a hand movement and gazes to find whether a monkey sets via point in a free curve drawin, 43rd Annual Meeting of the Society for Neuroscience, San Diego, CA, (Nov. 9-13, 2013)
2. Naruse, Y., Takiyama, K., Okada, M., Umehara H., Evaluation of the amount of phase shift in the alpha rhythm, Neuroscience 2013, San Diego, CA, (Nov. 9-13, 2013)
3. 成瀬 康, 単一試行脳波から α 波位相シフトを検出出来る新しい 統計的手法, Neural Oscillation Conference 2013, 愛知県 岡崎市, (Jul. 18-19, 2013)
4. 成瀬 康, 瀧山 健, 岡田 真人, 梅原 広明, 単一試行から α 波の位相シフト を抽出できる新手法を用いた, 視覚刺激に同期しない位相シフトの発見, 第 28 回日本生体磁気学会大会, 新潟県 新潟市, (Jun. 7-8, 2013)
5. 井上 康之, 阪口 豊, ウェーブレット解析を用いた運動間欠性の抽出手法の開発, 電子情報通信学会 技術研究報告, 東京都町田市, (Mar. 13-15, 2013)
6. 田中 雅人, 井上 康之, 阪口 豊, モデル予測制御に基づくヒトの目標追従運動の間欠的制御モデル, 電子情報通信学会技術研究報告, 東京都町田市, (Mar. 13-15, 2013)
7. Miyashita, E., Execution of motor control by the brain: regarding the primary motor cortex as a forward mode, the 25th Bioengineering Conference, Tsukuba, Ibaraki, (Jan. 9-11, 2013)
8. 村田 哲, ミラーニューロンシステムだけではない頭頂-運動前野ネットワーク, 「神経ダイナミクスから社会的相互作用へ至る過程の理解と構築による構成的発達科学」研究会, 大阪, (Dec. 21, 2012)
9. Shiga, K., and Sakaguchi, Y., Relationship between the alpha-band EEG waves observed at frontal, parietal and occipital scalps, BPES2011, Kusatsu, (Sep. 20-22, 2012)
10. Inoue, Y., Sakaguchi, Y., Mechanism of body operation in Japanese classical martial arts: Motion analysis of quiet standing and walking, the 27th Symposium on Biological and Physiological Engineering (BPES2012), Sapporo, Hokkaido, (Sep. 19-21, 2012)

11. Nabe, T., Miyashita, E., Estimation of via-points during a monkey free drawing of a circle like closed curve, The 35th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society, Nagoya, Aichi, (Sep. 18-21, 2012)
12. 村田 哲, 運動と認知を結ぶ手, 第 36 回日本神経心理学会 シンポジウム「手と脳」, 東京, (Sep. 14, 2012)
13. Sakaguchi, Y., Inoue, Y., Temporal relationship between eye and hand movements during visuo-manual tracking task, Dynamic Brain Forum (DBF2012), Carmona, Spain, (Sep. 3-6, 2012)
14. Maeda K., Murata A., Neural activity in area AIP/PFG related to visual feedback during hand manipulation, Mirror neurons New frontiers 20 years after their discovery, Italy, (Aug. 31- Sep. 6, 2012)
15. Naruse, Y., Takiyama, K., Okada, M., Umehara, H., A novel method for detection of phase shift of alpha rhythm in single trial, 18th International Conference on Biomagnetism, Paris, France, (Aug. 26-30, 2012)
16. 成瀬 康, 非線形的な脳内情報処理に関連する脳活動, 知能化医療システム研究会, 岡山県笠岡市, (Jul. 21, 2012)
17. 成瀬 康, 脳情報を脳波から抽出する技術の開発, 第 49 回人工知能学会 分子生物情報研究会, Kobe, Hyogo, (Jul. 13, 2012)
18. Murata A., Maeda K., Naito E., Body schema as a link between motor control and cognitive function, ICME International Conference on Complex Medical Engineering, Kobe, Japan, (Jul. 1-4, 2012)
19. Ota J., Asama H., Takakusaki K., Murara A., Kond T., The concept of mobiligence and its future, ICME International Conference on Complex Medical Engineering, Kobe, (Jul. 1-4, 2012)
20. 井上 康之, 阪口 豊, 連続的な手動追従課題の遂行時における眼球運動の協調的な振る舞い, 第 5 回モーターコントロール研究会, Okazaki, Aichi, (Jun. 21-23, 2012)
21. 鍋 知宏, 宮下 英三, 目は口ほどにものを言う: サッカードから運動の分節化を探る, 第 6 回 Motor Control 研究会, Okazaki, Aichi, (Jun. 21-23, 2012)
22. 村田 哲, 運動制御と認知を結ぶミラーニューロン, 音声研究会聴覚研究会共催研究会, 厚木, (Jun. 15, 2012)
23. 成瀬 康, 瀧山 健, 岡田 真人, 梅原 広明, 単一試行から α 波の位相変化を抽出できる新しい手法の定量評価, 第 27 回日本生体磁気学会大会, Tokyo, (May 31- Jun. 1, 2012)
24. 村田 哲, 身体性とミラーニューロン, 第 2 3 回四国作業療法学会, 高知, (May 20, 2012)
25. Inoue, Y., Sakaguchi, Y., Intermittency in visual information acquisition in continuous tracking task, Annual Meeting of the Society for Neural Control Movement (NCM), #1-F-43, 2012., Venice, Italy, (Apr. 22-29, 2012)
26. 村田 哲, Win Nyi Shein, 酒田英夫, 頭頂連合野における操作対象の物体内相 対的位置表現, 第 89 回日本生理学会大会, 松本市, (Mar. 29-31, 2012)
27. 宮下 英三, M1 と PMdc の速度に関連した神経細胞活動を推定した状態として捉える, 第 8 9 回日本生理学会大会, 長野, (Mar. 29-31, 2012)
28. 志賀 一雅, 阪口 豊, 前頭部と後頭部で計測される α 帯域脳波の関係について, 電子情報通信学会ニューロコンピューティング研究会, 町田市, (Mar. 14-16, 2012)
29. 井上 康之, 阪口 豊, ヒトの予測的な運動制御における視覚情報の効果, 電子情報通信学会ニューロコンピューティング研究会, 町田市, (Mar. 14-16, 2012)
30. 石野 智晴, 阪口 豊, 打ち下ろし動作における最適運動パタンの探索, 電子情報通信学会, Machida, Tokyo, (Mar. 14-16, 2012)
31. Sakaguchi, Y., Detecting intermittency in arm movement using AR model, JNNS2011, Okinawa, (Dec. 15-17, 2011)
32. 村田 哲, Mirror neuron and corporeal awareness, Neuro2011, 横浜市, (Sep. 14-17, 2011)
33. 阪口 豊, 連続的目標追従運動においてみられる運動制御の間欠性, 第 5 回モーターコントロール研究会, 岡崎市, (Jun. 16-18, 2011)
34. Asano, T., Izawa, J. and Sakaguchi, Y., Intermittent update of target representation during manual tracking task, ICCN2011, Hokkaido, (Jun. 9-13, 2011)
35. Sakaguchi, Y., Intermittent brain motor control observed in continuous tracking task, ICCN2011, Hokkaido, (Jun. 9-13, 2011)
36. Naruse, Y., Takiyama, K., Okada, M., Umehara, H., A novel method for estimating instantaneous phase and amplitude of ongoing oscillations and detecting phase modulation, Neuroscience 2011, Washington, DC, (Nov. 12-16, 2011)

37. 成瀬 康, 瀧山 健, 岡田 真人, 村田 勉, 自発的周期における位相変調を単一試行から抽出する新しい手法, 第 34 回日本神経科学大会, 横浜, (Sep. 14-17, 2011)
38. Sakaguchi, Y., Intermittent motor control observed in visuo-manual tracking, 34th Annual Meeting of Japanese Neuroscience Society, Yokohama, (Sep. 14-17, 2011)
39. 成瀬 康, 瀧山 健, 岡田 真人, 梅原 広明, 視覚刺激によるアルファ波位相変調の検出, ニューロコンピューティング研究会, 神戸, (Jul. 25-26, 2011)
40. 成瀬 康, 瀧山 健, 岡田 真人, 村田 勉, ベイズ推定を用いた新しい α 波瞬時位相, 振幅の推定法の提案, 第 25 回生体生理工学シンポジウム, 岡山, (Sep. 23-25, 2010)
41. 成瀬 康, 瀧山 健, 岡田 真人, 村田 勉, Exact inference method for Markovrandom field models of instantaneous phase and amplitude of oscillatory activities from electroencephalograms, Neuro2010, 神戸, (Sep. 2-4, 2010)
42. 石川 拓海, 阪口 豊, 課題終了と誤差フィードバックの時間差が視覚運動適応に与える影響, Neuro2010, 神戸, (Sep. 2-4, 2010)
43. 成瀬 康, 瀧山 健, 岡田 真人, 村田 勉, 確率モデルを用いた新しい α 波瞬時位相, 振幅の推定法, 第 25 回日本生体磁気学会, 千葉, (Jul. 29-30, 2010)
44. 村田 哲, 体性感覚情報処理に関する神経基盤, 第 45 回理学療法学会, 岐阜, (May 27-29, 2010)
45. 成瀬 康, 瀧山 健, 岡田 真人, 村田 勉, マルコフ確率場モデルにおける確率伝播法をもちいた α 波位相, 振幅の同時推定, 電子情報通信学会ニューロコンピューティング研究会, 町田市, (Mar. 10, 2010)
46. 阪口 豊, 感覚フィードバックと実時間性, 電子情報通信学会身体性情報学研究会, 東京, (Dec. 12, 2009)
47. Murata, A., Shein, W.N., Sakata, H., Object-centered position coding for hand manipulation action in the parietal cortex of the monkey, 3th International Symposium of Mobiligence, Awaji, Japan, (Nov. 19, 2009)
48. Murata, A., Ishida, H., Nakajima, K., Inase, M., Other's body representation referred to self body in the parietal cortex of the monkey, NIPS International Workshop for Scientific Study of Consciousness 2009, Okazaki, Japan, (Sep. 19, 2009)
49. Ishikawa, T., Sakaguchi, Y., Effect of timing of error feedback on prism adaptation in a virtual shooting task, Neuro2009, Nagoya, Japan, (Sep. 18, 2009)
50. Murata, A., Ishida, H., Nakajima, K., Inase, M., Other's body representation referred to self body in the parietal cortex of the monkey, 36th International congress of physiological sciences, Kyoto, Japan, (Jul. 28, 2009)
51. 石田 文彦, 村田 哲, 阪口 豊, サル F5-AIP 野における手操作関連神経活動の情報量解析, 第 3 回生理学研究所 Motor Control 研究会, 岡崎市, (May 29, 2009)

A01K1

1. 柳田 達雄, モンテカルロ法による力学系の解析と設計, RIMS 共同研究「マクロ経済動学の非線形数理」, 京都大学数理解析研究所, (Aug. 30, 2011)
2. 柳田 達雄, 協働現象の数理, 日本物理学会 第 67 回年次大会, 関西学院大学, (Mar. 24, 2012)
3. 小西 哲郎, 柳田 達雄, 3 次元中の強束縛な鎖状多体系におけるエネルギー分配と特異な振舞い, 基研研究会 2011 「非平衡系の物理 - ミクロとマクロの架け橋」, 湯川記念館パナソニックホール, 京都, (Aug. 18-20, 2011)
4. 小西 哲郎, 柳田達雄, 3 次元中の強束縛ひも状系: 末端と分岐点での運動の特異性, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 富山大学, (Sep. 22, 2011)
5. 柳田 達雄, モンテカルロ法による機能力学系の設計 ~ アクティブ・タッチ・センサー設計のこころみ ~, ニューロコンピューティング研究会, 北海道大学 百年記念会館, (Jan. 24, 2011)
6. 小西 哲郎, 柳田達雄, 鎖状多体系における末端部の活発な運動とゆっくりした緩和, 2010 年度 高分子計算機科学研究会・高分子ナノテクノロジー研究会合同討論会, 東京大学山上会館, (Dec. 10, 2010)
7. 小西 哲郎, 柳田 達雄, 鎖状多体系のダイナミクス: 末端部の活発な運動とゆっくりした緩和, 第 24 回分子シミュレーション討論会, 福井県民ホール, (Nov. 24, 2010)
8. 小西 哲郎, 柳田 達雄, 鎖状多体系の末端における活発な運動と遅い緩和, 非線形波動現象の多様性と普遍性, 京都大学数理解析研究所, (Oct. 14, 2010)
9. T. Yanagita, Design and Statistical Properties of Easily Synchronizable Oscillator Networks, Emergence and Design of Robustness, IFISC, Palma de Mallorca, Spain, (Sep. 22, 2010)
10. T. Yanagita, Design and statistical properties of easily synchronizable oscillator networks, International Workshop Emerging Topics in Nonlinear Science, Schloss Goldrain, Italy, (Sep. 16, 2010)

11. T. Yanagita, A. Mikhailov, Statistical Characters of Synchronization-Optimized Oscillator Networks, International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA 2010), Krakow, Poland, (Sep. 8, 2010)
12. T. Yanagita, S. A. Mikhailov, Design and Statistical Properties of Easily Synchronizable Oscillator Networks, Unwinding Complexity, Port Douglas, Australia, (Jul. 25, 2010)

A01K2

1. Y. Inui and T. Tateno, Computational modeling of molecular networks underlying postsynaptic plasticity in striatal medium spiny neurons, 7th Forum of European Neuroscience, Amsterdam, Netherlands, (Jul. 5-6, 2010)

A01K3

1. 古川 徹生, 大久保 貴之, 隠れマルチダイナミカルシステムの学習理論とアルゴリズム ～ 高階位相写像による実現, ニューロコンピューティング研究会, 公立はこだて未来大学, (Jan. 26-27, 2012)
2. 石橋 英朗, 古川 徹生, 潜在変数分布で評価する高階自己組織化マップ ～ ヘテロなデータ集合体の可視化ツール ～, ニューロコンピューティング研究会, 玉川大学, (Mar. 14-16, 2012)
3. 松下 聡史, 古川 徹生, 変分近似を見直すと SOM と GTM は一元的に理解できる, ニューロコンピューティング研究会, 玉川大学, (Mar. 14-16, 2012)
4. Satoshi Matsushita, Tetsuo Furukawa, Bayesian optimization makes GTM resemble to SOM, The 21st Annual Conference of the Japanese Neural Network Society (JNNS2011) , Okinawa, Japan, (Dec. 15-17, 2011)
5. Tetsuo Furukawa, Takashi Ohkubo, What is Required for a Multi-Dynamical System Learning Task?, The 21st Annual Conference of the Japanese Neural Network Society (JNNS2011) , Okinawa, Japan, (Dec. 15-17, 2011)
6. Masahide Nakano, Takashi Ohkubo, Tetsuo Furukawa, Som Canonica: Establishing A Standard Algorithm of Self-Organizing Maps, The 21st Annual Conference of the Japanese Neural Network Society (JNNS2011) , Okinawa, Japan, (Dec. 15-17, 2011)
7. Hideki Ishibashi, Keisuke Yoneda, Tetsuo Furukawa, Another-SOM2 for Metrics Map: A Self-Referable Neural Network, The 21st Annual Conference of the Japanese Neural Network Society (JNNS2011) , Okinawa, Japan, (Dec. 15-17, 2011)
8. 渡邊 隆之, 古川 徹生, 教師あり SOMによるメトリクス学習, 第13回日本知能情報ファジィ学会九州支部学術講演会, 佐賀大学 (本庄キャンパス 理工学部 大学院棟 1階), (Dec. 10, 2012)
9. 東 祐介, 古川 徹生, トポロジー分類のための高階処理の開発, 第13回日本知能情報ファジィ学会九州支部学術講演会, 佐賀大学 (本庄キャンパス 理工学部 大学院棟 1階), (Dec. 10, 2011)
10. 一ノ瀬 裕介, 古川 徹生, 混合ガウスモデルと自己組織化マップによる階層情報処理, 第13回日本知能情報ファジィ学会九州支部学術講演会, 佐賀大学 (本庄キャンパス 理工学部 大学院棟 1階), (Dec. 10, 2011)
11. 松下 聡史, 中野 将秀, 古川 徹生, 確率的生成モデルによる位相保存写像のアルゴリズム導出, 第14回情報論の学習理論ワークショップ, 奈良女子大学, (Nov. 9-11, 2011)
12. 古川 徹生, 位相保存写像の標準理論確立の試み, ニューロコンピューティング研究会, 九州大学大橋キャンパス, (Oct. 19-20, 2011)
13. Tetsuo Furukawa, Takashi Ohkubo, Kazuhiro Tokunaga, Requirements for the Learning of Multiple Dynamics, 8th WORKSHOP ON SELF-ORGANIZING MAPS (WSOM2011) , Finland, Espoo, (Jun. 14-17, 2011)
14. Satoshi Matsushita, Takashi Ohkubo, Tetsuo Furukawa, Multi-dynamics learning algorithm based on SOM2, The 3rd International Conference on Cognitive Neurodynamics (ICCN2011) , Hilton Niseko Village, Hokkaido, Japan, (Jun. 9-13, 2011)
15. 徳永 憲洋, 自己進化型モジュラーネットワークの有効性検証, 第26回ファジィシステムシンポジウム, 広島, 東広島市, (Sep. 13-15, 2010)
16. 大久保 貴之, 古川 徹生, マルチダイナミクス学習を実現するために何を考えるべきか, 2010年度包括脳ネットワーク夏のワークショップ, 北海道, 札幌市, (Jul. 26-30, 2010)
17. 大久保 貴之, 古川 徹生, SOM Canonica への試み ～ 多様なモデル集合を扱う学習基盤を目指して ～, ニューロコンピューティング研究会, 沖縄, 那覇市, (Jun. 18-19, 2010)

A01K4

1. Naoyuki Sato, Functional dissociation of upper and lower theta-band oscillations in human scalp EEG during episodic memory encoding, The 40th annual meeting of Society for Neuroscience, San Diego, US, (Nov. 13-17, 2010)
2. 佐藤 直行, 海馬神経回路モデルを用いた記憶想起の予測, 第1回ユーロ・リハ・ロボ研究会 (WSNRR), 仙台, (Aug. 3, 2010)

3. 佐藤 直行, エピソード記憶の記銘における脳波シータ高帯域と低帯域の機能的差異, 包括型脳科学研究推進支援ネットワーク 夏のワークショップ, 札幌, (Jul. 27-30, 2010)

B01K1

1. Atsushi Miyazaki, Toshi Nakajima, Keisetsu Shima, Hajime Mushiake, The effect of interrupting a memory-guided sequential motor task on neuronal activity in the dorsal premotor area, Neuro 2011 (第 34 回日本神経科学大会), 横浜, (Sep. 14-17, 2011)
2. Atsushi Miyazaki, Toshi Nakajima, Keisetsu Shima, Hajime Mushiake, Neuronal activity in the prefrontal cortex during performance of a dual task consisting of a main- and an interrupting-task, The 3rd international conference on cognitive neurodynamics, ニセコ, (Jul. 9-13, 2011)
3. Ryosuke Hosaka, Toshi Nakajima, Kazuyuki Aihara, Yoko Yamaguchi, Hajime Mushiake, Modulation of LFP beta oscillation while updating motor plan in primate medial motor areas, Neuroscience 2010, San Diego, (Nov. 13-17, 2010)
4. Toshi Nakajima, Atsushi Miyazaki, Keisetsu Shima, Jun Tanji, Hajime Mushiake, Recall error of a memorized motor sequence after performance of an interrupting motor task -A behavioral analysis, 包括型脳科学研究推進支援ネットワーク 夏のワークショップ, 札幌, (Jul. 27-30, 2010)

B01K2

1. Kazuhiro Sakamoto, Yuichi Katori, Kazuyuki Aihara, Hajime Mushiake, Changes in firing variability depend on network resilience, The 21th Annual Conference of the Japanese Neural Network Society, Okinawa, (Dec. 15-17, 2011)
2. Naoya Saijo, Jun-ichi Shikata, Toru Ishizuka, Yuji Uezawa, Maki Suemitsu, Hajime Mushiake, Kazuhiro Sakamoto, A background correction method for Raman spectra of mixed neurotransmitters: Toward a new label-free imaging technology of brain activity, Neuroscience 2011, パシフィコ横浜, (Sep. 14-17, 2011)
3. Masaya Toyoshima, Yusuke Shibata, Kazuhiro Sakamoto, Naohiro Saito, Jun Tanji, Hajime Mushiake, Neuronal activity in the dorsal premotor cortex during a path-planning task, Neuroscience 2011, パシフィコ横浜, (Sep. 14-17, 2011)
4. Norihiko Kawaguchi, Kazuhiro Sakamoto, Yoshito Furusawa, Naohiro Saito, Jun Tanji, Hajime Mushiake, Involvement of the supplementary eye field (SEF) in monitoring behavioral consequences in a serial oculomotor search task, 第 89 回 日本生理学会大会, 横浜, (Mar. 28-30, 2011)
5. Kazuhiro Sakamoto, Yuichi Katori, Naohiro Saito, Jun Tanji, Kazuyuki Aihara, Hajime Mushiake, The modulation of firing variability can be a measure for dynamical states in neuronal network, The 1st Tohoku International Symposium on Multidisciplinary Neuroscience, 仙台, (Jan. 21-23, 2011)
6. Yuichi Katori, Kazuhiro Sakamoto, Hajime Mushiake, Kazuyuki Aihara, Transition of information representation in a multi-stable attractor model of the prefrontal cortex, Neuro 2010, Kobe, (Sep. 2-4, 2010)
7. Kazuhiro Sakamoto, Taichi Kumada, Masafumi Yano, A neurocomputational model for amodal completion in ambiguous figures, Neuro 2010, Kobe, (Sep. 2-4, 2010)
8. Kazuhiro Sakamoto, Yuichi Katori, Naohiro Saito, Jun Tanji, Kazuyuki Aihara, Hajime Mushiake, The modulation of firing variability can be used to access the dynamical state in neuronal networks, 第 87 回日本生理学会大会, 盛岡, (May 19-21, 2010)
9. Yuichi Katori, Kazuhiro Sakamoto, Hajime Mushiake, Kazuyuki Aihara, Transition of information representation in a multi-stable attractor model of the prefrontal cortex, 第 87 回日本生理学会大会, 盛岡, (May 19-21, 2010)

B01K3

1. 陳 揚, 中條 蒔子, 能智 禄弥, 関野 正樹, 大崎 博之, 久恒 辰博, ラット中大脳動脈閉塞モデルの海馬における拡散 MRI 解析, 第 38 回日本磁気共鳴医学会大会, つくば市, (Sep. 30- Oct. 2, 2010)
2. 金子 順, 久恒 辰博, 成体マウス海馬歯状回における神経幹細胞の細胞周期解析, 35th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society, 神戸市, (Sep. 2-4, 2010)
3. 加藤 智将, 能智 禄弥, 栗林 寛, 石鍋 健太郎, 伊藤 佳絵, 福田 諭, 久恒 辰博, 成体海馬神経新生の活動依存的調節, 36th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society, 神戸市, (Sep. 2-4, 2010)
4. 島谷 真由, Bruno Herculano, 谷口 香織, 久恒 辰博, 老齡アルツハイマーマウスでは空間記憶だけでなく音の記憶に対する認知が低下した, 33rd Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society, 神戸市, (Sep. 2-4, 2010)

5. 陳 揚、関野 正樹、大崎 博之、久恒 辰博, ラット中大脳動脈閉塞モデルにおける海馬機能の変化, 34th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society, 神戸市, (Sep. 2-4, 2010)
6. 久恒 辰博, Aging and anti-aging of brain function: A Role of Adult Neurogenesis, in Asian Aging Core for Longevity Research and Education 2010, Jeju, Republic of Korea, (Aug. 23, 2010)
7. 久恒 辰博, Donepezil promotes the proliferation of neural stem cells in the dentate gyrus of aged mice, Alzheimer's Association International Conference on Alzheimer's Disease 2010, Honolulu, USA, (Jul. 10-15, 2010)
8. 久恒 辰博, Activity Dependent Modulation of Adult Hippocampal Neurogenesis, BIT's 1st Annual Neuro Talk, Singapore, (Jun. 26, 2010)
9. 久恒 辰博, Regulations and functions of adult neurogenesis, 43rd Annual Meeting for the Japanese Society of Developmental Biologist, 京都市, (Jun. 23, 2010)
10. 久恒 辰博, Hippocampal circuitry regulates adult neurogenesis, Adult neurogenesis: structure and function, Frauenchiemsee, Germany, (May 28, 2010)

B01K4

1. 萬田 暁, 大森 敏明, 北園 淳, 岡田 真人, スパースな局在興奮を持つ神経回路モデル, 日本物理学会第 67 回年次大会, 関西学院大学, (Mar. 24-27, 2012)
2. 飯田 宗徳, 大森 敏明, 青西 亨, 岡田 真人, 神経細胞の位相応答曲線に対する摂動強度の影響, 日本物理学会第 67 回年次大会, 関西学院大学, (Mar. 24-27, 2012)
3. 関口 智樹, 大森 敏明, 岡田 真人, Slow Feature Analysis への確率伝搬法の適用, 日本物理学会第 67 回年次大会, 関西学院大学, (Mar. 24-27, 2012)
4. 大森 敏明, 青西 亨, 岡田 真人, 樹状突起膜電位の時空間ダイナミクスを統計的に推定する, 日本物理学会第 67 回年次大会, 関西学院大学, (Mar. 24-27, 2012)
5. 北園 淳, 大森 敏明, 青西 亨, 岡田 真人, 膜電位イメージングに基づく樹状突起の膜抵抗の不均一分布の推定, 日本物理学会第 67 回年次大会, 関西学院大学, (Mar. 24-27, 2012)
6. 飯田 宗徳, 大森 敏明, 青西 亨, 岡田 真人, 神経細胞の位相応答曲線における摂動強度の影響, 電子情報通信学会ニューロコンピューティング研究会, 玉川大学, (Mar. 14-16, 2012)
7. 角田 敬正, 織田 善晃, 大森 敏明, 井上 雅司, 宮川 博義, 岡田 真人, 青西 亨, ベイズ推定法による定量的カルシウム動態推定, 電子情報通信学会ニューロコンピューティング研究会, 玉川大学, (Mar. 14-16, 2012)
8. 関口 智樹, 大森 敏明, 岡田 真人, 確率的 Slow Feature Analysis における観測ノイズの影響, 情報処理学会数理モデル化と問題解決研究会, 指宿市民会館, (Mar. 1-2, 2012)
9. 萬田 暁, 大森 敏明, 北園 淳, 岡田 真人, スパースな局在興奮を持つ神経回路モデル, 電子情報通信学会ニューロコンピューティング研究会, 公立ほこだて未来大学, (Jan. 26-27, 2012)
10. Takamasa Tsunoda, Yoshiaki Oda, Toshiaki Omori, Masashi Inoue, Hiroyoshi Miyakawa, Masato Okada, Toru Aonishi, Extended Kalman Filter for Estimation of Dendritic Spatiotemporal Calcium Dynamics, 21st Annual Conference of the Japanese Neural Network Society, Okinawa Institute of Science and Technology, (Dec. 15-17, 2011)
11. Munenori Iida, Toshiaki Omori, Toru Aonishi, Masato Okada, Nonlinear Effect on Phase Response Curve of Neuron Model, 18th International Conference on Neural Information Processing, Shanghai, China, (Nov. 14-17, 2011)
12. Jun Kitazono, Toshiaki Omori, Toru Aonishi, Masato Okada, Statistical Estimation of Dendritic Membrane Resistance Distribution Using the Line Process, The 41st Annual Meeting of the Society for Neuroscience (Neuroscience 2011), Washington Convention Center, U.S.A., (Nov. 12-16, 2011)
13. Takamasa Tsunoda, Toru Aonishi, Hiroyoshi Miyakawa, Masashi Inoue, Masato Okada, Toshiaki Omori, Yoshiaki Oda, Estimation of Dendritic Spatiotemporal Calcium Dynamics by Nonlinear State Space Modeling, International Conference on Modeling and Simulation Technology, Tokai University Takanawa Campus, Tokyo, Japan, (Oct. 22-23, 2011)
14. 大森 敏明, 青西 亨, 岡田 真人, 樹状突起上に不均一に分布する膜応答特性を統計的に推定する, 電子情報通信学会ニューロコンピューティング研究会, 神戸大学, (Jul. 25-26, 2011)
15. 関口 智樹, 大森 敏明, 岡田 真人, Slow Feature Analysis への確率伝搬法の適用, 電子情報通信学会ニューロコンピューティング研究会, 神戸大学, (Jul. 25-26, 2011)
16. 大森 敏明, リズム現象の数理～非線形神経システムへの位相縮約によるアプローチ, 第 88 回知能化医療システム研究会, 笠岡第一病院, (Jul. 23, 2011)
17. 大森 敏明, 樹状突起に不均一に分布する膜応答特性の推定～ベイズ統計に基づく情報抽出～, 第 5 回学融合ビジュアルライゼーションシンポジウム, 東京大学, (Jun. 24, 2011)

18. Toshiaki Omori, Toru Aonishi, Masato Okada, Statistical Estimation of Non-Uniform Distribution of Dendritic Membrane Properties, The 3rd International Conference on Cognitive Neurodynamics, Hilton Niseko Village, Hokkaido, Japan, (Jun. 9-13, 2011)
19. 北園 淳, 大森 敏明, 青西 亨, 岡田 真人, ラインプロセスを用いた樹状突起の膜抵抗分布の統計的推定, 日本物理学会第 66 回年次大会, 新潟大学, (Mar. 25-28, 2011)
20. 飯田 宗徳, 大森 敏明, 青西 亨, 岡田 真人, 神経細胞の位相応答曲線における非線形効果, 日本物理学会第 66 回年次大会, 新潟大学, (Mar. 25-28, 2011)
21. 大森 敏明, 青西 亨, 岡田 真人, 樹状突起上に不均一に分布する膜応答特性の統計的推定, 日本物理学会第 66 回年次大会, 新潟大学, (Mar. 25-28, 2011)
22. 北園 淳, 大森 敏明, 青西 亨, 岡田 真人, ラインプロセスを用いた樹状突起の膜抵抗分布の統計的推定, 電子情報通信学会ニューロコンピューティング研究会, 玉川大学, (Mar. 7-9, 2011)
23. Jun Kitazono, Toshiaki Omori, Toru Aonishi, Masato Okada, Estimating the Distribution of the Dendritic Membrane Resistance with the Line Process, Japan-Germany Joint Workshop on Computational Neuroscience, Okinawa Institute of Science and Technology, (Mar. 2-5, 2011)
24. Toshiaki Omori, Toru Aonishi, Masato Okada, Switch of Encoding Characteristics in Single Neurons by Subthreshold and Suprathreshold Stimuli, Japan-Germany Joint Workshop on Computational Neuroscience, Okinawa Institute of Science and Technology, (Mar. 2-5, 2011)
25. 大森 敏明, 樹状突起膜電位の時空間ダイナミクスを統計的に推定する, 統計数理研究所研究会「神経科学と統計科学の対話」, 統計数理研究所, (Dec. 19-20, 2010)
26. Toshiaki Omori, Toru Aonishi, Masato Okada, Switch of Encoding Characteristics in Single Neurons by Subthreshold and Suprathreshold Stimuli, The 40th Annual Meeting of the Society for Neuroscience (Neuroscience 2010), San Diego Convention Center, (Nov. 13-17, 2010)
27. 大森 敏明, 青西 亨, 岡田 真人, 樹状突起上に不均一に分布する膜応答特性の統計的推定～イメージングデータからの情報抽出, 計測自動制御学会第 25 回生体・生理工学シンポジウム, 岡山大学, (Sep. 23-25, 2010)
28. 大森 敏明, 青西 亨, 岡田 真人, 樹状突起上に不均一に分布する膜応答特性の統計的推定, 第 33 回日本神経科学大会第 53 回日本神経化学学会大会第 20 回日本神経回路学会大会合同大会(Neuro2010), 神戸コンベンションセンター, (Sep. 2-4, 2010)
29. Toshiaki Omori, Opening Remarks: "Dynamic Clamp: Bridging between Theory and Experiment", Joint Conference of the 33rd Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society, the 53rd Annual Meeting of the Japanese Society for Neurochemistry, and the 20th Annual Meeting of Japanese Neural Network Society (Neuro2010), Kobe Convention Center, (Sep. 2-4, 2010)
30. 大森 敏明, 青西 亨, 岡田 真人, 樹状突起上で不均一に分布する膜特性を推定する, 平成 22 年度「包括脳ネットワーク」夏のワークショップ, ホテルさっぽろ芸文館, (Jul. 27-30, 2010)
31. Toshiaki Omori, Toru Aonishi, Masato Okada, Statistical Estimation of Non-Uniform Dendritic Membrane Properties, The Fourth International Neural Microcircuitry Conference, Signal Processing Mechanism of Cortical Neuron, Kanucha Resort, (Jun. 24-27, 2010)
32. 大森 敏明, イメージングデータからの神経樹状突起ダイナミクスの抽出, 第 3 回学融合ビジュアルイノベーションシンポジウム, 東京大学武田ホール, (May 17, 2010)

B01K5

1. 柚 賢一郎, 奈良 重俊, リカレント型神経回路網におけるカオスのダイナミクスを媒体とした信号伝搬, 平成 23 年度 電気・情報関連学会中国支部第 62 回連合大会, 広島工業大学, 広島市, (Oct. 22, 2011)
2. 笠原 智晃, 奈良 重俊, 自己電気工学効果素子多重拡散結合系におけるカオスを用いた二足歩行ロボットの移動制御, 平成 23 年度 電気・情報関連学会中国支部第 62 回連合大会, 広島工業大学, 広島市, (Oct. 22, 2011)
3. 多田 亮介, 奈良 重俊, 自己電気光学効果素子における時間遅延効果導入モデルの解析, 平成 23 年度 電気・情報関連学会中国支部第 62 回連合大会, 広島工業大学, 広島市, (Oct. 22, 2011)
4. 矢野 智之, 奈良 重俊, 非線形光電子能動素子拡散結合ネットワークにおけるカオスとその機能応用, 平成 23 年度 電気・情報関連学会中国支部第 62 回連合大会, 広島工業大学, 広島市, (Oct. 22, 2011)
5. 松本 翔, 奈良 重俊, リカレント型神経回路網モデルにおけるカオスを用いた移動制御—準 3 次元迷路求解へ向けた計算機実験システムの構築—, 平成 23 年度 電気・情報関連学会中国支部第 62 回連合大会, 広島工業大学, 広島市, (Oct. 22, 2011)
6. 栗田 誠治, 奈良 重俊, リカレント型神経回路網モデルにおけるカオスを用いたアーム制御, 平成 23 年度 電気・情報関連学会中国支部第 62 回連合大会, 広島工業大学, 広島市, (Oct. 22, 2011)

7. 青田 朋也, 奈良 重俊, リカレント型神経回路網モデルにおけるカオスを用いた身体制御-アームロボットシステムへの実装-, 平成 23 年度 電気・情報関連学会中国支部第 62 回連合大会, 広島工業大学, 広島市, (Oct. 22, 2011)
8. 西 恵美, 奈良 重俊, 少数原子クラスターにおける Biostation による分子構造解析, 平成 23 年度 電気・情報関連学会中国支部第 62 回連合大会, 広島工業大学, 広島市, (Oct. 22, 2011)
9. 宮原 直哉, 奈良 重俊, 擬似神経回路網におけるカオスのダイナミックスの二輪自走ロボットへの制御応用-相互作用するロボット系の製作とその機能実験-, 平成 23 年度 電気・情報関連学会中国支部第 62 回連合大会, 広島工業大学, 広島市, (Oct. 22, 2011)
10. 山口 倫志, 宮原 直哉, 奈良 重俊, リカレント型神経回路網モデルにおけるカオスを用いた移動体制御応用-準三次元移動制御の実現へ向けたシステム開発-, 平成 23 年度 電気・情報関連学会中国支部第 62 回連合大会, 広島工業大学, 広島市, (Oct. 22, 2011)
11. 仙波 幸信, 奈良 重俊, 非線形動的電子素子拡散結合系におけるカオスの発生とその移動制御への応用 -高次元カオスの二次元射影における動的構造解析-, 平成 23 年度 電気・情報関連学会中国支部第 62 回連合大会, 広島工業大学, 広島市, (Oct. 22, 2011)
12. 森 良太, 奈良 重俊, リカレント型神経回路網モデルにおけるカオスのダイナミックス -スモールワールド的ネットワークにおける時空間相関解析-, 平成 23 年度 電気・情報関連学会中国支部第 62 回連合大会, 広島工業大学, 広島市, (Oct. 22, 2011)
13. 新井 裕, 奈良 重俊, 非線形電子能動デバイスのネットワークにおけるカオスの機能的応用～スモールワールド系を用いた信号伝達の試み～, 平成 23 年度 電気・情報関連学会中国支部第 62 回連合大会, 広島工業大学, 広島市, (Oct. 22, 2011)
14. 森分 雄太, 奈良 重俊, 少数アミノ酸ペプチド結合クラスターの構造解析-タンパク質の構造変化における水素結合の役割解明に向けて-, 平成 23 年度 電気・情報関連学会中国支部第 62 回連合大会, 広島工業大学, 広島市, (Oct. 22, 2011)
15. Ken-ichiro Soma, Ryota Mori, Ryuichi Sato, Shigetoshi Nara, A Heuristic Approach to Intra-Brain Communications Using Chaos in a Recurrent Neural Network Model, International Conference on Numerical Analysis and Applied Mathematics, Halkidiki/Greece, (Oct.19-25, 2011)
16. 柚 賢一郎, 矢野 智之, 奈良 重俊, 神経回路網におけるカオスに基いた脳内通信の原型モデル, 文部科学省科学研究費補助金 新学術領域研究 ヘテロ複雑システムによるコミュニケーション理解のための神経機構の解明, 平成 23 年度 第 1 回全体会議, 神戸市, (Aug. 25-26, 2011)
17. Yu Arai , Ryota Mori, Fuyuki Aoto, Shigetoshi Nara, A Heuristic Model of Intra-Brain Communications Using Chaos in Artificial Neuron Systems, The 3rd International Conference on Cognitive Neurodynamics (ICCN 2011) , Niseko/Japan, (Jun. 9-13, 2011)
18. 奈良 重俊, 力学と統計力学のはざまー生体高分子における情報伝達・エネルギー輸送・変換の素過程に潜む不可思議さー, 文部科学省「物質・デバイス領域共同研究拠点」北海道大学・電子科学研究所: 岡山大学大学院自然科学研究科共同研究会, 複雑系数理とその応用に関するシンポジウム, 北海道大学・電子科学研究所, (Nov. 9, 2010)
19. Ryosuke Yoshinaka, Masato Kawashima, Yuta Takamura, Hitoshi Yamaguchi, Naoya Miyahara, Kei-ichiro Nabeta, Yongtao Li, Shigetoshi Nara, A novel adaptive control via simple rule(s) using chaotic dynamics in a recurrent neural network model, and its hardware implementation, International Conference on Neural Computation, Valencia/Spain, (Oct. 24-26, 2010)
20. 青戸 冬樹, 川嶋 理人, 奈良 重俊, 非線形電子能動素子(擬似神経細胞素子)拡散結合ネットワークにおけるカオスを媒体とした信号伝搬, 平成 22 年度 電気・情報関連学会中国支部第 61 回連合大会, 岡山県立大学, 岡山県総社市, (Oct. 23, 2010)
21. 浅井 信貴, 奈良 重俊, アミノ酸少数クラスター系の構造解析, 平成 22 年度 電気・情報関連学会中国支部第 61 回連合大会, 岡山県立大学, 岡山県総社市, (Oct. 23, 2010)
22. 鍋田 敬一郎, 奈良 重俊, 非線形電子能動素子の拡散結合ネットワークモデルにおけるカオスパターンダイナミックスの研究, 平成 22 年度 電気・情報関連学会中国支部第 61 回連合大会, 岡山県立大学, 岡山県総社市, (Oct. 23, 2010)
23. 佐藤 龍一, 奈良 重俊, リカレント型神経回路網におけるカオスを媒体とした信号伝搬, 平成 22 年度 電気・情報関連学会中国支部第 61 回連合大会, 岡山県立大学, 岡山県総社市, (Oct. 23, 2010)
24. 上原 健悟, 奈良 重俊, リカレント型神経回路網モデルにおける複雑なダイナミックスを用いた身体制御応用への試みー腕系への適用ー, 平成 22 年度 電気・情報関連学会中国支部第 61 回連合大会, 岡山県立大学, 岡山県総社市, (Oct. 23, 2010)
25. 吉中 良輔, 宮原 直哉, 山口 倫志, 奈良 重俊, 感覚, 介在, 運動神経系をもつ準階層リカレント型ニューラルネットワークモデルにおけるカオスダイナミックスを用いた自律行動制御の実現に向けて, 平成 22 年度 電気・情報関連学会中国支部第 61 回連合大会, 岡山県立大学, 岡山県総社市, (Oct. 23, 2010)

26. 山口 倫志, 吉中 良輔, 宮原 直哉, 奈良 重俊, リカレント神経回路網モデルにおけるカオスを用いた移動体制御応用—準三次元迷路へ向けた基礎研究—, 平成 22 年度 電気・情報関連学会中国支部第 61 回連合大会, 岡山県立大学, 岡山県総社市, (Oct. 23, 2010)
27. 新井 裕, 奈良 重俊, 非線形光電子能動デバイスの多重拡散結合系におけるカオスの機能的応用—信号伝達の試み—, 平成 22 年度 電気・情報関連学会中国支部第 61 回連合大会, 岡山県立大学, 岡山県総社市, (Oct. 23, 2010)
28. 森分 雄太, 奈良 重俊, 三原子クラスターの構造解析, 平成 22 年度 電気・情報関連学会中国支部第 61 回連合大会, 岡山県立大学, 岡山県総社市, (Oct. 23, 2010)
29. 仙波 幸信, 奈良 重俊, 非線形動的な光電子素子拡散結合系におけるカオスの発生とその移動制御への応用-ノイズ効果の解析-, 平成 22 年度 電気・情報関連学会中国支部第 61 回連合大会, 岡山県立大学, 岡山県総社市, (Oct. 23, 2010)
30. 森 良太, 奈良 重俊, リカレント型神経回路網モデルにおけるカオスのダイナミックスの時空間相関解析 O-junction と D-junction の比較, 平成 22 年度 電気・情報関連学会中国支部第 61 回連合大会, 岡山県立大学, 岡山県総社市, (Oct. 23, 2010)
31. 宮原 直哉, 山口 倫志, 吉中 良輔, 奈良 重俊, リカレント型神経回路網におけるカオスのダイナミックスの二輪自走ロボットへの制御応用, 平成 22 年度 電気・情報関連学会中国支部第 61 回連合大会, 岡山県立大学, 岡山県総社市, (Oct. 23, 2010)
32. 奈良 重俊, 力学と統計力学のはざま—生体高分子における情報伝達・エネルギー輸送・変換の素過程に潜む不可思議さ—, 岡山大学 (奈良研究室)・立命館大学 (池田研究室) 共催研究会, 立命館大学, (Sep. 25-26, 2010)
33. 青戸 冬樹, 奈良 重俊, 神経回路網におけるカオスに基いた脳内通信の原型モデル, 文部科学省科学研究費補助金 新学術領域研究 ヘテロ複雑システムによるコミュニケーション理解のための神経機構の解明, 平成 22 年度 第 2 回全体会議, シャトラーゼ ガトーキングダム サッポロ, 札幌市, (Sep. 15-16, 2010)
34. 青戸 冬樹, 佐藤 龍一, 奈良 重俊, 神経回路網におけるカオスに基いた脳内通信の原型モデル, 文部科学省科学研究費補助金 新学術領域研究 ヘテロ複雑システムによるコミュニケーション理解のための神経機構の解明, 平成 22 年度 包括脳夏のワークショップおよび第一回新学術領域全体会議, さっぽろ芸文館, 札幌市, (Jul. 27-28, 2010)
35. 井上 交一郎, 川嶋 理人, 鍋田 敬一郎, 青戸 冬樹, 仙波 幸信, 奈良 重俊, 擬似神経素子 (動的自己電気光学効果素子) ネットワークにおける大自由度カオスを用いた不良設定問題求解と素子ノイズ, 日本物理学会 第 65 回年次大会, 岡山大学, (Mar. 20-23, 2010)

B01K6

1. Y.MARUYAMA, S.HASE, K.HOTTA, K.OKA, Song-induced expression pattern of Arc mRNA in brain of female zebra finch, NEUROSCIENCE 2011, Washington (USA), (Nov. 12-16, 2011)
2. 岩崎麻衣, 原衣利奈, 岡浩太郎, Hessler Neal, 歌鳥の求愛行動に伴う中脳ドーパミン回路の応答解析, 第 34 回日本神経科学大会, パシフィコ横浜 (神奈川), (Sep. 15-17, 2011)
3. 高延 岳史, 高山 文博, 堀田 耕司, 岡 浩太郎, さえずりに対するメスキンカチヨウ海馬体神経活動の pH イメージング法を用いた解析, 第 20 回日本バイオイメーキング学会, 千歳, (Aug. 31- Sep. 2, 2011)
4. Fumihiko Takayama, Yosuke Maruyama, Kohji Hotta, Kotaro Oka, Optical imaging of Neuronal Activity during Song Recognition in Female Zebra finch, ICCN2011 initial Abstract submission, Niceko(Japan), (Jun. 9-12, 2011)
5. Machiko Yamamoto, Fumihiko Takayama, Kohji Hotta, Kotaro Oka, Neuronal distribution of hippocampal formation in female zebra finch by multicolor-imaging, The 16th Takeda Science Foundation Symposium on Bioscience, 東京、シェラトン都ホテル, (Dec. 1-2, 2010)
6. F. Takayama, H. Horita, K. Hotta, K. Oka, In vivo pH imaging of auditory stimulation-induced neural activity in female zebra finch, 40th ANNUAL MEETING NEUROSCIENCE 2010, San Diego, U.S.A, (Nov. 13-17, 2010)
7. H. Hirota, M. Kobayashi, K. Oka, E.D. Jarvis, K. Wada, Repeated evolution of activity-dependent motor-driven *dusp1* expression in song nuclei of vocal learning birds, 40th ANNUAL MEETING NEUROSCIENCE 2010, San Diego, U.S.A, (Nov. 13-17, 2010)
8. M. Yamamoto, F. Takayama, K. Hotta, K. Oka, Neuronal cytoarchitecture of hippocampal formation in female zebra finch, 40th ANNUAL MEETING NEUROSCIENCE 2010, San Diego, U.S.A, (Nov. 13-17, 2010)
9. 高山 文博, 堀田 耕司, 岡 浩太郎, pH イメージング法を用いた音刺激に伴うメスキンカチヨウ海馬体神経活動のリアルタイム計測, 第 19 回日本バイオイメーキング学会学術集会, 横浜, (Sep. 9-11, 2010)

10. 山本 真千子, 高山 文博, 堀田 耕司, 岡 浩太郎, メスキンカチョウ海馬体における神経細胞構築のマルチカラーイメージングによる解析, 第 19 回日本バイオイメーキング学会学術集会, 横浜, (Sep. 9-11, 2010)

B01K7

1. 鮫島 和行, 意思決定と価値学習の神経機構 –理論と実験の統合アプローチ–, 東北大学電気通信研究所研究会, 東北大学電気通信研究所, 仙台, (Dec. 2, 2011)
2. Nomura, I, Samejima K., Washida, Y., Ueda, K., The effect of risk attitude on product choices, The annual meeting of cognitive science society (Cogsci 2011), Boston, USA, (Jul. 21, 2011)
3. 野村 郁也, 大貫 泰, 鮫島 和行, 鷺田 祐一, 植田 一博, 岡田 浩之, 大森 隆司, The effect of brand awareness and risk attitude on product choices, 脳と心のメカニズム第 11 回冬のワークショップ, ルスツリゾート, 北海道, (Jan. 11, 2011)
4. Nonomura, S, Samejima, K, Doya, K., Tanji, J., Neural activity in the dorsal striatum during cognitive decision making, Neuro 2010 (第 33 回 日本神経科学学会大会, 第 20 回日本神経回路学会大会, 第 53 回日本神経化学学会大会合同大会), 神戸コンベンションセンター, 兵庫 (Sep. 3, 2010)

B01K8

1. Andreas Schertel, Yoshiyuki Kubota, Following the path of microtubules in bifurcated dendrites: Using FIB/SEM microscopy for ultrastructural volume reconstruction of cortical tissue, Microscopy & Microanalysis 2011, Nashville, TN, USA, (Aug. 7-11, 2011)
2. Yoshiyuki Kubota, Fuyuki Karube, Masaki Nomura, Allan T. Gullledge, Atsushi Mochizuki, Yasuo Kawaguchi, Dendritic dimensions and signal conduction properties of cortical nonpyramidal cells, The 3rd International Conference on Cognitive Neurodynamics, 北海道ニセコヒルトン, (Jun. 9-13, 2011)
3. Kubota Y, 大脳皮質非錐体細胞へのシナプス入力分布, 第 88 回日本生理学会、第 116 回日本解剖学会 合同大会 日中韓シンポジウム, パシフィコ横浜(東日本大震災の影響で、誌上発表に変更), (Mar. 28-30, 2011)
4. Kubota Y, Karube F, Nomura M, Gullledge A, Mochizuki A, Kawaguchi Y, Dendritic dimensions and signal conduction properties of cortical nonpyramidal cells, 2010 Annual Meeting Society For Neuroscience, サンディエゴ、米国, (Nov. 13-17, 2010)
5. Yoshiyuki Kubota, Fuyuki Karube, Masaki Nomura, Allan Gullledge, Atsushi Mochizuki and Yasuo Kawaguchi, 大脳皮質非錐体細胞の樹状突起の形態と機能特性, 日本神経科学大会, 神戸, (Sep. 2-4, 2010)
6. Kubota Y, Karube F, Nomura M, Gullledge A, Mochizuki A, Kawaguchi Y, Dendritic dimensions and signal conduction properties of cortical nonpyramidal cells, 第 5 回国際神経回路会議 JST international meeting “Microcircuitry of Cortex”, 東京, (Jun. 29-30, 2010)
7. Kubota Y, Karube F, Nomura M, Gullledge A, Mochizuki A, Kawaguchi Y, Dendritic dimensions and signal conduction properties of cortical nonpyramidal cells, 第 4 回国際神経回路会議 JSPS international meeting “Signal Processing Mechanisms of Cortical Neurons”, カヌチャリゾート、沖縄県, (Jun. 23-27, 2010)

B01K9

1. 磯村 宜和, 傍細胞記録法: 行動課題を遂行するラットへの応用, 生理学若手サマー (ウィンター) スクール, 東京, (Feb. 11-12, 2012)
2. Yoshikazu Isomura, Microcircuitry mechanism of voluntary movements, Japan-France Joint Symposium on Neural Dynamics and Plasticity: from Synapse to Network, Kyoto, Japan, (Jan. 12-13, 2012)
3. Yasuhiro Fukushima, Yoshikazu Isomura, Yutaka Yamaguti, Shigeru Kuroda, Ichiro Tsuda, and Minoru Tsukada, Inhibitory network dependency in Cantor coding, The 3rd International Conference on Cognitive Neurodynamics (ICCN'11), Niseko, Hokkaido, Japan, (Jun. 9-11, 2011)
4. Yasuhiro Fukushima, Minoru Tsukada, Ichiro Tsuda, Yutaka Yamaguti, Shigeru Kuroda, Inhibitory network dependency of Cantor coding in hippocampal CA1, Neuro2010 (The 33rd annual meeting of the Japan Neuroscience Society), Kobe, (Sep. 2-4, 2010)
5. Yoshikazu Isomura, Microcircuitry mechanism underlying self-initiation of voluntary movements, The 5th Neural Microcircuitry Conference, Tokyo, (Jun. 29-30, 2010)

B01K10

1. Jun Nishikawa and Kazuo Okanoya, Functional networks extracted by simultaneous multi-neuronal recording from the Bengalese finch HVC microcircuit, The 1st annual Songbird Satellite Meeting (Organizers: S. Bottjer, A. Doupe, D. Margoliash) in The 41st Annual Meeting of Society for Neuroscience (Neuroscience 2011), Washington DC, USA, (Nov. 11, 2011)

2. Jun Nishikawa and Kazuo Okanoya, Neural representation of song sequence in birds, シンポジウム: Advances in the study of sensorimotor coordination in singing birds (オーガナイザー: 岡ノ谷一夫, 和多和宏) 第 34 回日本神経科学大会 (Neuroscience 2011), 横浜, 神奈川, (Sep. 14-17, 2011)
3. 西川 淳, ジュウシマツにおける囀り時系列の神経表現, ニューロエソロジー談話会シンポジウム「神経行動学: 切れ味と可能性を探る」(オーガナイザー: 岡田龍一, 西川淳), 日本動物心理学会・日本動物行動学会・応用動物行動学会・日本家畜管理学会による合同大会(Animal2011), 東京, (Sep. 8-11, 2011)
4. Jun Nishikawa and Kazuo Okanoya, Cantor coding of song sequence in the Bengalese finch HVC, The 3rd International Conference on Cognitive Neurodynamics (ICCN'11), Niseko, Hokkaido, Japan, (Jun. 9-11, 2011)
5. 西川 淳, 岡ノ谷 一夫, 鳥類歌中枢 HVC におけるカントールコーディングの in vivo による実験的検証, 包括脳ネットワーク 夏のワークショップ 2010, 札幌 (北海道), (Jul. 27-30, 2010)

C01K1

1. Amita Hidetoshi, Matsushima Toshiya, Competitive foraging context nullifies the neural representation of anticipated/gained rewards in nucleus accumbens and medial striatum of the domestic chick, Annual meeting of the Society for Neuroscience, Washington DC, USA, (Nov. 12-16, 2011)
2. 川森 愛, 松島 俊也, 食性とリスク感受性: 同所性近縁種シジュウカラ科 3 種の比較, 日本動物学会 (第 82 回), 旭川, 北海道, (Sep. 21-23, 2011)
3. 小倉 由紀子, 松島 俊也, 社会採餌は過剰労働を引き起こす, 日本動物学会 (第 82 回), 旭川, 北海道, (Sep. 21-23, 2011)
4. 三浦 桃子, 松島 俊也, ニワトリ雛による BM 知覚の発達には性差がある, 日本動物学会 (第 82 回), 旭川, 北海道, (Sep. 21-23, 2011)
5. 福岡 要, 黒田 令子, 松島 俊也, カラスの「遊び行動」の時間的変動—エネルギー要因と社会的要因—, 日本動物学会 (第 82 回), 旭川, 北海道, (Sep. 21-23, 2011)
6. 網田 英敏, 松島 俊也, 社会採餌は餌の予期・獲得の神経表象を無効化する: ニワトリ雛基底核の神経活動解析, 日本動物学会 (第 82 回), 旭川, 北海道, (Sep. 21-23, 2011)
7. 三浦 桃子, 松島 俊也, ニワトリによる BM 知覚の発達には性差がある, 日本動物心理学会 (第 71 回)・日本動物行動学会 (第 30 回)・応用動物行動学会・日本家畜管理学会合同大会, 慶応大学 (三田), 東京, (Sep. 8-11, 2011)
8. 川森 愛, 松島 俊也, 虫好きはリスクに寛容—シジュウカラ科 3 種の食性とリスク感受性, 日本動物心理学会 (第 71 回)・日本動物行動学会 (第 30 回)・応用動物行動学会・日本家畜管理学会合同大会, 慶応大学 (三田), 東京, (Sep. 8-11, 2011)
9. 福岡 要, 松島 俊也, カラスの「遊び行動」—エネルギー収支と社会関係形成の影響—, 日本動物心理学会 (第 71 回)・日本動物行動学会 (第 30 回)・応用動物行動学会・日本家畜管理学会合同大会, 慶応大学 (三田), 東京, (Sep. 8-11, 2011)
10. 小倉 由紀子, 松島 俊也, 社会採餌は労働投資量を増大させる, 日本動物心理学会 (第 71 回)・日本動物行動学会 (第 30 回)・応用動物行動学会・日本家畜管理学会合同大会, 慶応大学 (三田), 東京, (Sep. 8-11, 2011)
11. 松島 俊也, 競争と意思決定、ただしヒヨコの場合, 日本生態学会第 58 回大会, 札幌, 北海道, (Mar. 8-12, 2011)
12. 三浦 桃子, 松島 俊也, 刻印付けはヒヨコの BM 選好性を誘導する, 日本動物行動学会第 29 回大会, 那覇、沖縄, (Nov. 19-21, 2010)
13. 川森 愛, 松島 俊也, シジュウカラ科 3 種の食性分化: リスク感受性の違いから進化過程を考察する, 日本動物行動学会第 29 回大会, 那覇、沖縄, (Nov. 19-21, 2010)
14. 小倉 有紀子, 松島 俊也, 他者の視覚的知覚はヒヨコ *Gallus domesticus* の労働投資量を増大させる, 日本動物行動学会第 29 回大会, 那覇、沖縄, (Nov. 19-21, 2010)
15. 福岡 要, 松島 俊也, カラスの遊び行動—北海道大学における行動記載—, 日本動物行動学会第 29 回大会, 那覇、沖縄, (Nov. 19-21, 2010)
16. 松島 俊也, 神経行動学入門, 日本動物行動学会第 29 回大会, 那覇、沖縄, (Nov. 19-21, 2010)
17. Toshiya Matsushima, Momoko Miura, Lucia Regolin, Giorgio Vallortigara, Imprinting induces predisposed preference to biological motion in newly-hatched domestic chicks, The 33rd Japan Neuroscience Meeting (Neuro2010), Kobe, Japan, (Sep. 2-4, 2010)
18. Hidetoshi Amita, Toshiya Matsushima, Competitive foraging enhances impulsive choices in domestic chicks, The 33rd Japan Neuroscience Meeting (Neuro2010), Kobe, Japan, (Sep. 2-4, 2010)

19. Yukiko Ogura, Toshiya Matsushima, Competition deteriorates foraging efficiency by increasing work investment in domestic chicks, The 33rd Japan Neuroscience Meeting (Neuro2010), Kobe, Japan, (Sep. 2-4, 2010)
20. Shinji Yamaguchi, Naoya Aoki, Daisuke Kobayashi, Eiji Iikubo, Toshiya Matsushima, Koichi J. Homma, Brain-derived neurotrophic factor (BDNF)/TrkB signaling is involved in filial imprinting of domestic chicks, The 33rd Japan Neuroscience Meeting (Neuro2010), Kobe, Japan, (Sep. 2-4, 2010)
21. Iku Kimura, Takeshi Izumi, Yu Ohmura, Toshiya Matsushima, Taku Yamaguchi, Takayuki Yoshida, Mitsuhiro Yoshioka, Infralimbic cortex contains neurons related for inhibitory control of impulsive behavior, The 33rd Japan Neuroscience Meeting (Neuro2010), Kobe, Japan, (Sep. 2-4, 2010)
22. Toshiya Matsushima, Chick economics: some good reasons to be impulsive., Rovereto Workshop on Cognition and Evolution, Rovereto, Italy, (Jun. 18-20, 2010)
23. Momoko Miura, Toshiya Matsushima, Imprinting induces predisposed preference to biological motion in newly-hatched domestic chicks, Rovereto Workshop on Cognition and Evolution, Rovereto, Italy, (Jun. 18-20, 2010)

C01K2

1. Tadashi Ogawa, Prefrontal activity during trial-and-error knowledge updating, Symposium on Neural Dynamics and Plasticity at Kyoto, Kyoto, (Jan. 11-12, 2012)
2. 小川 正, 試行錯誤による問題解決時の前頭前野機能, NBR 公開シンポジウム「ニホンザルバイオリソースプロジェクト第2期の成果と将来展望」, 東京(東京医科歯科大学 M&D タワー 鈴木章夫記念講堂), (Dec. 9, 2011)
3. 西田 知史, 田中 智洋, 柴田 智広, 池田 和司, 小川 正, 後頭頂皮質における注視期間活動の時間的構造は記憶期間の活動強度を予測する The strength of memory-period activity is predicted by intrinsic temporal structures in fixation-period baseline activity in macaque posterior parietal cortex, 日本神経科学大会 2011, 横浜, (Sep. 14-17, 2011)
4. 田中 智洋, 西田 知史, 小川 正, 異なる視覚刺激による眼球運動潜時が同じであっても目標選択時間は異なる, 日本神経科学大会 2011, 横浜, (Sep. 14-17, 2011)
5. 大淵 藍, 田中 智洋, 小川 正, マカクザルの視覚探索課題においてサッカード反応時間に見られる視覚的特徴次元の統合の効果 Effects of integration of multiple feature dimensions on saccadic reaction times in visual search for macaque monkeys, 日本神経科学大会 2011, 横浜, (Sep. 14-17, 2011)
6. 藤本 淳, 西田 知史, 小川 正, 探索方略の柔軟な転換に関わるサル前頭前野の神経活動 Neural activity in Macaque Prefrontal Cortex in Flexible Switching of Search Strategies, 日本神経科学大会 2011, 横浜, (Sep. 14-17, 2011)
7. 西田 知史, 田中智洋, 柴田 智広, 池田 和司, 小川 正, Intrinsic temporal structures in baseline activity of single parietal neurons reflect delay-period activity during a memory-guided saccade task, 包括脳ネットワーク 夏のワークショップ 2011, 神戸, (Aug. 21-24, 2011)
8. 田中 智洋, 西田 知史, 小川 正, 視覚探索課題における脳内の目標選択時間は刺激の視覚的特徴とサッカード眼球運動潜時の両方に依存する, ニューロコンピューティング研究会 2011, 沖縄, (Jun. 23-24, 2011)
9. Tadashi Ogawa, Attention and target selection for saccade in macaque posterior parietal cortex - Non-spatial vs. spatial target selection -, The 15th annual meeting of the ASSC, Satellite Symposium, Neurophysiology of Attention and Awareness, Kyoto, (Jun. 13, 2011)
10. Tadashi Ogawa, Hierarchical organization of visual selection, Structure and functional linkages of areas in the cerebral cortex for cognition, action, and decision, 第88回日本生理学会大会, 横浜, (Mar. 28-30, 2011)
11. Tadashi Ogawa, Neuronal activity in the prefrontal cortex during the course of updating knowledge for problem solution, 第1回 東北大学脳科学国際シンポジウム, 東北大学(仙台), (Jan. 21-23, 2011)
12. Tomohiro Tanaka, Satoshi Nishida, Ai Ohbuchi, Atsushi Fujimoto, Tadashi Ogawa, Dynamic coding of target selection and saccade planning during visual search by macaque posterior parietal neurons, Neuro2010, Kobe, Japan, (Sep. 2-4, 2010)
13. Atsushi Fujimoto, Satoshi Nishida, Tomohiro Tanaka, Tadashi Ogawa, Neural activity in macaque prefrontal cortex during learning through trial-and-error behaviors, Neuro2010, Kobe, Japan, (Sep. 2-4, 2010)

14. Atsushi Fujimoto, Satoshi Nishida, Tadashi Ogawa, Prefrontal Neurons Reflect Currently Executing Search Mode Depending on Learning Phase at Problem Solution, 2010 年度 包括脳ネットワーク夏のワークショップ, ホテルさっぽろ芸文館, (Jul. 27-30, 2010)
15. 西田 知史, 田中 智洋, 柴田 智広, 池田 和司, 小川 正, 自発発火活動の時間相関による遅延活動期間の情報保持性能の潜在的表現, 電子情報通信学会ニューロコンピューティング研究会, 京都大学, (Jul. 27, 2010)

C01K3

1. 高柳 友紀, 高島 明秀, 尾仲 達史, セクレチンはオキシトシン受容体の活性化を介して社会行動を促進する。 , Neuro 2010, 神戸, (Sep. 2-4, 2010)

C01K4

1. Kenji Matsumoto, Kou Murayama, Madoka Matsumoto, Keise Izuma, Neural correlates of the undermining effect of monetary reward on intrinsic motivation, ASSC15, Kyoto, (Jun. 9-12, 2011)
2. Madoka Matsumoto, Kou Murayama, Keise Izuma, Andrew J. Elliot, Kenji Matsumoto, Neural Basis of Setting Self- and Other-Standard Goals, ASSC15 Social Neuroscience Satellite, Kyoto, (Jun. 7-8, 2011)
3. Keise Izuma, Madoka Matsumoto, Kou Murayama, Kazuyuki Samejima, Norihiro Sadato, Kenji Matsumoto, Neural correlates of preference change and cognitive dissonance, Neuroscience 2010, San Diego, (Nov. 13-17, 2010)
4. Kenji Matsumoto, Kou Murayama, Madoka Matsumoto, Keise Izuma, Neural correlates of the undermining effect of expected monetary rewards on intrinsic motivation, Neuroscience 2010, San Diego, (Nov. 13-17, 2010)
5. Keise Izuma, Madoka Matsumoto, Kou Murayama, Kenji Matsumoto, Neural correlates of cognitive dissonance and choice-induced preference change, Neuroeconomics 2010, Evanston, IL, USA, (Oct. 15-17, 2010)
6. Kenji Matsumoto, Kou Murayama, Madoka Matsumoto, Keise Izuma, Monetary reward and intrinsic motivation: neural basis of motivation crowding-out effect, Neuroeconomics 2010, Evanston, IL, USA, (Oct. 15-17, 2010)
7. Kou Murayama, Madoka Matsumoto, Keise Izuma, Kenji Matsumoto, Performance-contingent monetary reward decreases motivation: Neural correlates of undermining effect, HBM 2010, Bancelona, (Jun. 6-10, 2010)
8. Kou Murayama, Madoka Matsumoto, Keise Izuma, Kenji Matsumoto, Neural correlates of undermining effect, The 4th International Self-Determination Theory Conference, Kingdom of Belgium, (May 13-16, 2010)

C01K5

1. 鈴木 結貴, 石川 怜, 奥村 哲, 小鳥の順序、時間及び弁別課題のオペラント学習. 第 15 回静岡ライフサイエンスシンポジウム, 静岡県袋井市, (Mar. 8, 2014), (最優秀ポスター賞受賞)
2. 宮崎 郁成, 奥村 哲, ジュウシマツ脳のカテコールアミン作動性神経の分布様式. 第 13 回静岡ライフサイエンスシンポジウム, 静岡県袋井市, (Mar. 16, 2012)
3. 奥村 哲, 光硬化性のレジンの接着を活用した小動物頭蓋骨への電極ステージやマイクロダイアリスガイドカニューレの固定, 第 3 9 回静岡実験動物研究会研究発表会, 掛川市、静岡県, (Oct. 21, 2011)
4. 長田 翠, 奥村 哲, 他個体の動画と地鳴き呈示によるジュウシマツ雄の音声行動の変化, Animal 2011 日本動物行動学会, Tokyo, (Sep. 8-11, 2011)
5. Midori Osada, Tetsu Okumura, Context-dependent call variation in the male Bengalese finch, Context-dependent call variation in the male Bengalese finch, Niseko, Hokkaido, (Jun. 9-13, 2011)
6. 長田 翠, 奥村 哲, ジュウシマツのオスの音声行動の他個体の地鳴きによる変化, 第 1 2 回静岡ライフサイエンスシンポジウム・平成 2 2 年度科学交流フォーラム, 静岡県静岡市, (Mar. 4, 2011)
7. 三浦 慎也, 奥村 哲, 音声行動が性的 2 型を示すジュウシマツ脳のカテコールアミン作動性神経の雌雄比較, 第 1 2 回静岡ライフサイエンスシンポジウム・平成 2 2 年度科学交流フォーラム, 静岡県静岡市, (Mar. 4, 2011)
8. Tetsu Okumura, Takashi Endo, Kazuo Okanoya, Jun Tani, 小鳥の歌文法と歌神経核の細胞外モノアミンレベルの連続測定, 2010 年度 包括型脳科学研究推進支援ネットワーク夏のワークショップ, 札幌, (Jul. 27-30, 2010)
9. Tetsu Okumura, Takashi Endo, Kazuo Okanoya, Jun Tani, In vivo microdialysis of song nucleus (Nif and AreaX) in the Bengalese finches (*Lonchura striata* var. *domestica*), The 87th Annual meeting of the physiological society of Japan, Morioka, Japan, (May 19-20, 2010)

C01K6

1. Tetsunari Inamura, Keisuke Okuno, Robotic Motion Coach: Effect of Motion Emphasis and Verbal Expression for Imitation Learning, 3rd International Conference on Cognitive Neurodynamics, Niseko, Japan, (Jun. 10-12, 2011)
2. 稲邑 哲也, デフォルメ動作と言語注意を使用したロボットシステムによる動作コーチングの研究—ミメシスモデルによるコーチングの定量的・定性的評価の実現—, 第16回ロボティクスシンポジウム, 指宿, (Mar. 14- May 15, 2011)
3. Tetsunari Inamura, Behavior Recognition and Demonstration for Human-Robot Cooperation, Dagstuhl Seminar on Plan Recognition (No.11141), Dagstuhl, (Apr. 4-8, 2011)
4. 稲邑 哲也, 感覚運動情報のシンボル化と強調動作提示法に基づくコーチングロボット, 電子情報通信学会ヒューマン情報処理研究会, 沖縄国際大学, (Feb. 21-22, 2011)
5. 奥野 敬丞, デフォルメ動作と言語注意を用いたロボットシステムによる動作コーチングの研究—ミラーニューロンシステムの工学的モデルを用いた評価と教示—, 脳と心のメカニズム第11回冬のワークショップ, ルスツリゾート, (Jan. 11-13, 2011)
6. 奥野 敬丞, ミメシスモデルを用いたデフォルメ動作提示と言語コミュニケーションによって人間をコーチするロボットシステムの研究, 第28回日本ロボット学会学術講演会, 名古屋工業大学, (Sep. 22-24, 2010)
7. 奥野 敬丞, 運動から感覚を推定可能なプリミティブ表現とコミュニケーションに基づく動作コーチング, 包括型脳科学研究推進支援ネットワーク 夏のワークショップ 2010, 札幌, (Jul. 28, 2010)
8. 稲邑 哲也, 原始シンボル表現を用いた動作のデフォルメ提示による動作コーチング, 2010年度人工知能学会全国大会, 長崎, (Jun. 9-11, 2010)

C01K7

1. 吉田 正俊, Neural information processing in the superior colliculus of blindsight monkey, Association for Scientific Study of Consciousness (ASSC15) Satellite symposium “Neurophysiology of Attention and Awareness”, 京都大学, 京都, (Jun.13, 2011)
2. 吉田 正俊, Express saccade without V1, Annual meeting of the Society for Neuroscience, Washington DC, USA, (Nov. 14, 2011)
3. 吉田 正俊, Guidance of gaze based on color saliency in monkeys with blindsight, 第14回意識の科学的研究学会大会, 89 Chestnut, カナダ, (Jun. 24, 2010)

C01K8

1. Yasuo Nagasaka, Zenas C. Chao, Naomi Hasegawa, Tomonori Notoya, Naotaka Fujii, Unintentional motor synchronization in Japanese monkeys, Neuro 2010, Kobe, (Oct. 13, 2010)
2. 長坂 泰勇, Zenas C. Chao, 長谷川 有美, 能登谷 智則, 藤井 直敬, 複数ニホンザルにおける上肢運動の無意図的な同調, 日本動物心理学会第70回大会, 東京, (Aug. 27-29, 2010)
3. Yasuo Nagasaka, Zenas C. Chao, Naomi Hasegawa, Tomonori Notoya, Naotaka Fujii, Synchronization of Unintentional Behavior in Japanese Monkeys, The 7th International Conference on Cognitive Science, Beijing, China, (Aug. 17-20, 2010)
4. 長坂 泰勇, Zenas C. Chao, 長谷川 有美, 能登谷 智則, 藤井 直敬, 霊長類における無意図的な上肢運動の同調, 包括型脳科学研究推進支援ネットワーク夏のワークショップ 2010, 札幌, (Jul. 27-30, 2010)

C01K9

1. Jun Namikawa, Ryuichiro Nishimoto, Hiroaki Arie, Jun Tani, Synthetic approach to understanding meta-level cognition of predictability in generating cooperative behavior, The Third International Conference on Cognitive Neurodynamics, Niseko, Hokkaido, (June 9-13, 2011)

C01K10

1. Takashi Kojima, Tohru Kodama, Yoshiko Honda, Takayuki Hosokawa, Masataka Watanabe, Oral administration of methylphenidate increases dopamine release in the prefrontal cortex and striatum in the monkey - a microdialysis study, Society for Neuroscience Meeting, Washington DC, (Nov. 12-16, 2012)
2. Mariko Kuwajima, Takayuki Hosokawa, Tohru Kodama, Masataka Watanabe, Differential activity of monkey anterior cingulate neurons depending on the rival's identity and animacy during the competitive game, 40th Society for Neuroscience Meeting, San Diego, USA, (Nov. 13-17, 2010)
3. Takayuki Hosokawa, Masataka Watanabe, Irrational reward contingency in the competitive video game suppress outcome-related prefrontal neuronal activity in the monkey, 40th Society for Neuroscience Meeting, San Diego, USA, (Nov. 13-17, 2010)

4. 渡邊 正孝, 認知神経科学領域における社会脳—動物の社会行動と脳内報酬系, 日本心理学会第74回大会, 大阪大学豊中キャンパス, (Sep. 20-22, 2010)
5. 渡邊 正孝, 脳活動から見える動物のこころ, 第70回日本動物心理学会大会, 帝京大学、東京, (Aug. 27-29, 2010)
6. Masataka Watanabe, Takayuki Hosokawa, Prefrontal neuronal activity in the monkey during competitive and noncompetitive video shooting games, 15th Biennial Scientific Meeting of the International Society for Comparative Psychology, Awaji-Yumebutai International Conference Center, Hyogo, (May 19-21, 2010)

A01P1

1. 三浦 佳二, Hodge-小平分解から見た現代幾何学入門, ヘテロ・ニューロアナリシス研究会, 仙台, (Dec. 16, 2013)
2. 三浦 佳二, グラフ上の流れの Hodge-小平分解入門, SMART 研究会「応用現代幾何学」, 仙台, (Sep. 3-5, 2013)
3. Nakada K, Miura K, Wagatsuma H, Phase Response Curves Explain How Multiplicative Feedback on Neural Phase Elements Differs from Adaptive Physical Feedback in Robotic Motion Controls, IJCNN2013, Dallas, (Aug. 4-9, 2013)
4. Miura K, Aoki T, Hodge-Kodaira Decomposition of Evolving Neural Networks, SIAM Applied Algebraic Geometry, Fort Collins, (Aug. 1-4, 2013)
5. Nakada K, Miura K, Asai T, Dynamical System Design for Silicon Neurons using Phase Reduction Approach, IEEE EMBC2013, Osaka, (Jul. 3-7, 2013)
6. 三浦 佳二, Alice Y Wang, 内田直滋, 価値ニューロンから見たやる気のみカニズム, 第140回東北大学加齢医学研究所集談会, 仙台, (Jun. 29, 2013)
7. Miura K, Aoki T, Hodge-Kodaira Decomposition of Evolving Neural Networks, ICCN2013, Sigtuna, (Jun. 23-27, 2013)
8. Nakada K, Miura K, Asai T, Dynamical Systems Design of Silicon Neurons using Phase Reduction Method, Neuro2013, Kyoto, (Jun. 20- Jul. 23, 2013)
9. Miura K, Effects of Noise Correlations on Population Coding, Francis Crick Symposium on Neuroscience: The Changing Brain, Shanghai, (May 6-10, 2013)
10. 三浦 佳二, Near zero noise correlations underlie efficient population codes in olfactory cortex, 脳と心のみカニズム 冬のワークショップ, ルスツ, 北海道, (Jan. 9-11, 2013)
11. 三浦 佳二, Estimating intrinsic noise correlations under arbitrary signal drift, 「情報統計力学の最前線 —確率が繋ぐ自然現象と情報処理の数理—」(YSM-SPIP), 仙台, (Dec. 14-16, 2012)
12. Kazuki Nakada, Keiji Miura, Tetsuya Asai, Hisa-aki Tanaka, Dynamical Systems Design of Nonlinear Oscillators using Phase Reduction Approach, IEEE APCCAS, Kaohsiung, Taiwan, (Dec. 2-5, 2012)
13. Keiji Miura, Effects of Noise Correlations on Population Coding, SCIS-ISIS, Kobe, Japan, (Nov. 20-24, 2012)
14. Keiji Miura, Kazuki Nakada, Synchronization Analysis of Resonate-and-Fire Neuron Models with Delayed Resets, SCIS-ISIS, Kobe, Japan, (Nov. 20-24, 2012)
15. Kazuki Nakada, Keiji Miura, Tetsuya Asai, Silicon Neuron Design based on Phase Reduction Analysis, SCIS-ISIS, Kobe, Japan, (Nov. 20-24, 2012)
16. Kazuki Nakada, Keiji Miura, Clock Synchronization Protocol Using Resonate-and-Fire Type of Pulse-Coupled Oscillators for Wireless Sensor Networks, iconip, Doha, Qatar, (Nov. 12-15, 2012)
17. 中田 一紀, 三浦 佳二, 浅井 哲也, 位相縮約に基づくシリコンニューロンのダイナミカルシステムデザイン, ニューロコンピューティング研究会(NC), 北九州, (Oct. 4-5, 2012)
18. Keiji Miura, Near zero noise correlations underlie efficient population codes in olfactory cortex, RIKEN BSI Forum, Saitama, (Oct. 1, 2012)
19. Keiji Miura, Zachary F. Mainen, Naoshige Uchida, Near zero noise correlations underlie efficient population codes in olfactory cortex, Neuroscience 2012, Nagoya, (Sep. 18-21, 2012)
20. 三浦 佳二, 藤田 武志, グラフ上の流れの Hodge 分解の考察と金属ガラス時系列への応用, ネットワーク科学の数理と展開, 仙台, (Sep. 13-14, 2012)
21. 三浦 佳二, グラフの Hodge 分解とその周辺, ヘテロ・ニューロアナリシス研究会, 仙台, (Jul. 24, 2012)
22. Keiji Miura, Zachary F. Mainen, Naoshige Uchida, Fast, efficient population codes in olfactory cortex through decorrelation and synchronization to theta-frequency sniffing, 包括脳 脳と心のみカニズム 夏のワークショップ, 仙台, (Jul. 24-27, 2012)
23. Keiji Miura, An unbiased estimator of noise correlations under signal drift, SIAM Annual Meeting, Minneapolis, USA, (Jul. 9-13, 2012)

A01P2

1. Norihiro Maruyama, Mizuki Oka, Takashi Ikegami, Creating Space-Time Affordances via an Autonomous Sensor Network, The 2013 IEEE Symposium on Artificial Life, Singapore, (Apr. 16-19, 2013)
2. Alexander Woodward, Patrice Delmas, Takashi Ikegami, An optimal parameter analysis and GPU acceleration of the image receptive fields neural network approach, IVCNZ '12, New Zealand, (Nov. 26-28, 2012)
3. Tom Froese, Takashi Ikegami, Nathaniel Virgo, The Behavior-Based Hypercycle: From Parasitic Reaction to Symbiotic Behavior, Artificial Life 13, Michigan, USA, (Jul. 19-21, 2012)
4. Mizuki Oka, Takashi Ikegami, Characterizing Autonomy in the Web via Transfer Entropy Network, Artificial Life 13, East Lansing, Michigan, (Jul. 7-22, 2012)
5. Geoff Nitschke, Behavioral Heterogeneity and Collective Construction, 2012 IEEE Congress on Evolutionary Computation, Brisbane, Australia, (Jun. 10-15, 2012)

A01P3

1. Yasuaki Kobayashi, Hiroshi Kori, Reentrant transition in coupled noisy oscillators, The 15th RIES-Hokudai International Symposium, CHÂTERAISÉ Gateaux Kingdom SAPPORO, Japan, (Dec. 16-17, 2014)
2. 小林 康明, 郡 宏, ノイズを受けた2振動子系におけるリエントラント転移, 応用数学連携フォーラム, 東北大学, (Oct. 15, 2014)
3. 小林 康明, 郡 宏, ノイズを受けた2振動子系におけるリエントラント転移, 日本物理学会秋季大会, 中部大学, (Sep. 7-10, 2014)
4. Yuki Izumida, Hiroshi Kori, Coarse-graining oscillator networks, International Workshop on Spatiotemporal Pattern Formation in Biological and Active Matters, Poster Presentation (P13), Tokyo, (Mar. 2, 2014)
5. 小林 康明, 郡 宏, ノイズを受けた2振動子系におけるリエントラント転移, 応用数理研究会, かんぼの宿 山代, (Aug. 20-22, 2013)
6. 泉田 勇輝, 郡 宏, 振動子ネットワークの少数モードによる粗視的記述, 日本物理学会第68回年次大会 口頭発表 (27aXM-9), 広島大学東広島キャンパス, (Mar. 27, 2013)
7. 小林 康明, 郡 宏, ノイズのある振動子系のリエントラント転移, 日本物理学会年次大会, 広島大学, (Mar. 26-29, 2013)
8. Hiroshi Kori, Novel synchronization phenomena in coupled noisy oscillators: Common-noise-induced synchronization and reentrant transition, Engineering of Chemical Complexity 2013, Rostock-Warnemuende, Germany, (Jun. 10-13, 2013)
9. Yuki Izumida Hiroshi Kori, Reduction of dynamics on general network structure, The First Annual Winter q-bio Meeting, Poster Presentation (P33), Honolulu, Hawaii, (Feb. 20, 2013)

A01P4

1. Takaaki Aoki, Toshio Aoyagi, Self-Organized Network Structure Emerging from Co-Evolving Dynamics Between Resources on Nodes and Weighted Connections, Network Frontier Workshop 2013, Northwestern University Evanston, IL, (Dec. 4-6, 2013)
2. Takaaki Aoki, トラフィックダイナミクスに基づくネットワーク自己組織化, 電子情報通信学会 非線形問題研究会, サンポートホール高松 香川県, (Oct. 28-29, 2013)
3. Koichiro Yawata, Takaaki Aoki, Toshio Aoyagi, 動的に変化するネットワーク上における資源拡散系のべき分布の発生とマイクロの非正常性, 日本物理学会 2013年秋季大会, 徳島大学, (Sep. 25-28, 2013)
4. Takaaki Aoki, Koichiro Yawata, Toshio Aoyagi, ネットワーク上のリソース分布と構造との相互作用系における平衡状態の解析, 第23回日本数理生物学会大会, 静岡大学浜松キャンパス, (Sep. 11-13, 2013)
5. Takaaki Aoki, Koichiro Yawata, Toshio Aoyagi, Equilibrium state of an adaptive network depending on diffusion dynamics of a resource, International Workshop on Phase Transition, Critical Phenomena and Related Topics in Complex Networks, Hokkaido University, (Sep. 9-11, 2013)
6. Takaaki Aoki, Stationary state of a recurrent network under ongoing synaptic plasticity, 包括脳ネットワーク夏のワークショップ, 名古屋国際会議場, (Aug. 29- Sep. 1, 2013)
7. Takaaki Aoki, Effects of synaptic plasticity in heterogeneous neural networks, The 4th International Conference on Cognitive Neurodynamics (ICCN2013), Agora for Biosystems, Sigtuna, Sweden, (Jun. 23-27, 2013)
8. Takaaki Aoki, ネットワーク上の反応拡散系とネットワーク形成の相互作用, 2013年度第1回電子情報通信学会複雑コミュニケーションサイエンス時限研究会, 立命館大学, (Jun. 3-4, 2013)

9. Takaaki Aoki, Self-Organized Network Structure by Co-Evolving Dynamics Between Reaction-Diffusive Resources on Nodes and Weighted Connections, SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems, Snowbird, Utah, USA, (May 19-23, 2013)
10. Koichiro Yawata, Takaaki Aoki, Toshio Aoyagi, 動的なネットワーク上の反応拡散系におけるミクロな非定常性, 日本物理学会 第 68 回年次大会, 広島大学, (Mar. 26-29, 2013)
11. Takaaki Aoki, Toshio Aoyagi, Co-evolving Network Dynamics between Reaction-Diffusive Resources on Nodes and Weighted Connections, 2012 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA 2012), Palma, Majorca, Spain, (Oct. 22-26, 2012)
12. Takaaki Aoki, Toshio Aoyagi, 反応拡散系ダイナミクスに基づくネットワーク構造の形成過程, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 横浜国立大学, (Sep. 18-21, 2012)
13. Takaaki Aoki, 反応拡散系ダイナミクスに基づくネットワーク構造の形成過程, ネットワーク科学の数理と展開, 東北大学, (Sep. 13-14, 2012)
14. Takaaki Aoki, 変化するネットワーク上の結合力学系のダイナミクス, ヘテロ・ニューロアナリシス研究会, 東北大学, (Jul. 24, 2012)

A01P5

1. 手老 篤史, 生物の周期行動を題材とした数理と工学の融合, 共進化社会システム創成拠点フォーラム, TKP 市ヶ谷カンファレンスセンター, 東京, (Mar. 12, 2014)
2. 手老 篤史, 数理生物における進化的計算, 進化計算: 講習会とパネル討論, 九州大学, (Dec. 13, 2013)
3. 手老 篤史, 単細胞のかしこさ, 公開講座「現代数学入門」2013, 九州大学, (Jul. 27, 2013)
4. 手老 篤史, 中垣 俊之, 小林 亮, 粘菌の迷路解きに学ぶ生物の適応ネットワーク, トランスポーター研究会, 熊本大学, (Jun. 15, 2013)
5. 手老 篤史, 中垣 俊之, 小林 亮, 単細胞生物に学ぶ最適なネットワーク, 分子シミュレーション討論会, 九州大学, (Nov. 28, 2012)
6. 手老 篤史, 中垣 俊之, 小林 亮, 生物の適応ネットワークに学ぶフローネットワーク理論, 九州大学組合せ数学セミナー, リファレンス 駅東ビル, 福岡, (Nov. 17, 2012)
7. 手老 篤史, 中垣 俊之, 小林 亮, 生物の輸送ネットワークの形状について, ME セミナー, 九州大学, (Oct. 4, 2012)
8. 手老 篤史, 中垣 俊之, 小林 亮, 数学でわかる、単細胞のかしこさ, 公開講座, 九州大学, (Aug. 18, 2012)

A01P6

1. 石橋 英朗, クラス推定型高階 SOM によるライフパターンの可視化 ~ ユーザの環境を考慮した解析手法 ~, ニューロコンピューティング研究会, 徳島大学, (Jul. 19-20, 2013)

A01P7

1. Hiromichi Suetani, Emergence of Chaotic Itinerancy for Recalling Reliable and Precise Timing, International Conference on Cognitive Neurodynamics 2013, Sigtuna, Sweden, (Jun. 23-27, 2013)
2. 末谷 大道, David Rodriguez, 赤穂 昭太郎, Ulrich Parlitz, カオス結合系としての粒子フィルタとその解析 Particle Filters as Drive-Response Chaotic Systems, 日本物理学会第 68 回年次大会, 東広島市, (Mar. 26-29, 2013)
3. Hiromichi Suetani, Jun Morimoto, Canonical Correlation Analysis for Muscle Synergies Organized by Sensory-Motor Interactions in Musculoskeletal Arm Movements, 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2013), Germany, (May 8, 2013)
4. Hiromichi Suetani, Shotaro Akaho, Stefan Luther, Ulrich Parlitz, Manifold Learning for Data Assimilation and Control of Chaotic, Dynamics Days Europe 2012, University of Gothenburg, Sweden, (Sep. 2-7, 2012)
5. 末谷 大道, カオス結合系の同期・非同期ダイナミクスとその数理, 結合系セミナー, 京都大学, (Jul. 3, 2012)

A01P8

1. Naoyuki Sato, Taiki Sato, Takeya Okazaki, Mitsuru Takami, Electroencephalogram dynamics during social communication among multiple persons, The 20th International Conference on Neural Information Processing (ICONIP2013), Korea, (Nov. 3-7, 2013)
2. Naoyuki Sato, A computational model of cortical pathways formed with electroencephalogram synchronization, The 4th International Conference on Cognitive Neurodynamics (ICCN2013), Sweden, (Jun. 23-27, 2013)
3. Naoyuki Sato, Variety of cortical pathways formed by topographic neural projection: A computational study, The 19th International Conference on Neural Information Processing (ICONIP2012), Doha, Qatar, (Nov. 12-15, 2012)

B01P1

1. Ryosuke Hosaka, Toshi Nakajima, Kazuyuki Aihara, Yoko Yamaguchi, Hajime Mushiake, Laterality of LFP Oscillations in Medial Motor Area of Monkey, International Conference on Energy, Environment and Human Engineering, Yangon, (Dec. 21-23, 2013)
2. Ryosuke Hosaka, Toshi Nakajima, Kazuyuki Aihara, Yoko Yamaguchi, Toshi Nakajima, Different lateralization of gamma and beta oscillations in primate medial motor area, 電子情報通信学会非線形問題研究会, HongKong City University, (Dec. 6-7, 2013)
3. Toshi Nakajima, Haruka Arisawa, Ryosuke Hosaka, Keisetsu Shima, Hajime Mushiake, The influence of arm-movement preparation on interhemispheric beta synchronization in the medial motor areas, Neuroscience 2013, San Diego, (Nov. 9-13, 2013)
4. Ryosuke Hosaka, Toshi Nakajima, Kazuyuki Aihara, Yoko Yamaguchi, Hajime Mushiake, Laterality of Gamma-Oscillations in Primate Medial Motor Area during Visually-Guided Movements, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 福岡, (Sep. 17-20, 2013)
5. Ryosuke Hosaka, Toshi Nakajima, Kazuyuki Aihara, Yoko Yamaguchi, Hajime Mushiake, Modulation of Beta and Gamma Oscillations of LFP in Monkey Medial Motor cortex, 回路とシステムワークショップ, 淡路島, (Jul. 29-30, 2013)
6. Ryosuke Hosaka, Toshi Nakajima, Kazuyuki Aihara, Yoko Yamaguchi, Hajime Mushiake, Laterality of Gamma-Oscillations in Primate Supplementary Motor Area during Performance of Visually-Guided Movements, International Conference on Cognitive Neurodynamics, Sigtuna, Sweden, (Jun. 23-27, 2013)
7. Haruka Arisawa, Ryosuke Hosaka, Keisetsu Shima, Toshi Nakajima, Hajime Mushiake, Cue-dependent Modulation of Synchrony in Primates' Medial Motor Areas, 4th International Conference on Cognitive Neurodynamics, Sigtuna, Sweden, (Jun. 23-27, 2013)
8. Ryosuke Hosaka, Toshi Nakajima, Kazuyuki Aihara, Yoko Yamaguchi, Hajime Mushiake, Laterality of Gamma-Oscillations in Monkey Medial Motor Cortex, 電子情報通信学会 非線形問題研究会, 福岡大学, (May 27-28, 2013)
9. Ryosuke Hosaka, Toshi Nakajima, Kazuyuki Aihara, Yoko Yamaguchi, Hajime Mushiake, Reciprocal activation of beta and gamma oscillations in primate medial motor areas, Neuroscience 2012, New Orleans, (Oct. 13-17, 2012)

B01P2

1. Sakamoto K, The Potential of Multilateral Analyses of Neuronal Activities in Future Brain-Machine Interface Research, IEEE EMBC, ThD11.29, 2013, Osaka, Japan, (Jul. 3-7, 2013)
2. Norihiko Kawaguchi, Kazuhiro Sakamoto, Masashi Aoki, Hajime Mushiake, Mental Manipulation of Origami Revealed Functional Involvements of Intraparietal Areas and Premotor Areas: A fMRI study, Neural Oscillation Conference 2013, Okazaki, (Jul. 18, 2013)
3. Sakamoto K, Saito N, Yoshida S, Mushiake H, Excitation-inhibition balance of the prefrontal neurons in the execution period of a path-planning task, The 4th International Conference on Cognitive Neurodynamics, ICCN, 2013, Sigtuna, Sweden, (Jun. 23-27, 2013)
4. Norihiko Kawaguchi, Kazuhiro Sakamoto, Naohiro Saito, Hajime Mushiake, Multiple prediction errors (Surprise signals) in the supplementary eye field drive the exploration-exploitation transitions during an oculomotor search task, Neuro2013, Kyoto, (Jun. 20-23, 2013)
5. Kazuhiro Sakamoto, Naohiro Saito, Hajime Mushiake, Are synchronous neurons in the cortex unique?, IEEE SCIS-ISIS, Kobe, (Nov. 20-24, 2012)
6. Norihiko Kawaguchi, Kazuhiro Sakamoto, Yoshito Furusawa, Jun Tanji, Masashi Aoki, Hajime Mushiake, The role of the supplementary eye field in evaluating outcomes during an oculomotor search task, Neuroscience 2012, Nagoya, (Sep. 18-21, 2012)
7. Kazuhiro Sakamoto, Naohiro Saito, Shun Yoshida, Yuichi Katori, Jun Tanji, Kazuyuki Aihara, Hajime Mushiake, Time-development of excitation-inhibition balance in the prefrontal cortex during a path-planning task, Neuroscience 2012, Nagoya, (Sep. 18-21, 2012)
8. Kazuhiro Sakamoto, Norihiko Kawaguchi, Hajime Mushiake, Is advance planning of sequential movements reflected in the behavior of monkeys?, The 22th Annual Conference of the Japanese Neural Network Society, Nagoya, (Sep. 12-14, 2012)
9. Yuichi Katori, Kazuhiro Sakamoto, Hajime Mushiake, Kazuyuki Aihara, Dynamical reorganization of attractor structure in neural network model with dynamic synapses, The 22th Annual Conference of the Japanese Neural Network Society, Nagoya, (Sep. 12-14, 2012)
10. Kazuhiro Sakamoto, Prefrontal dynamics during behavioral planning, Postech-Kyutech Joint Workshop on Neuroinformatics, Kitakyushu, (Aug. 21, 2012)

11. Hiroaki Wagatsuma, Marie Fukudome, Kaori Tachibana, Kazuhiro Sakamoto, Extending the world to sense and behave: a supportive system focusing on the body coordination for neurocognitive rehabilitation, The Fourth International Conference on Advanced Cognitive Technologies and Applications, Niece, (Jul. 22-27, 2012)

B01P3

1. Seiji Kuwada, Tomoya Aota, Kengo Uehara, Satoshi Hiraga, Yuta Takamura, Shigetoshi Nara, Behavioral Interactions of Two Individual Arm Robots Using Independent Chaos in Recurrent Neural Networks, Proceedings of The 4th International Conference on Cognitive Neurodynamics 2013 (ICCN2013), Agora for Biosystems, Sigtuna, Sweden, (Jun. 23-27, 2013)
2. Ken-ichiro Soma, Ryota Mori, Shigetoshi Nara, Simultaneous Multichannel Communication Using Chaos in A Recurrent Neural Network, Proceedings of The 4th International Conference on Cognitive Neurodynamics 2013 (ICCN2013), Agora for Biosystems, Sigtuna, Sweden, (Jun. 23-27, 2013)
3. 柚 賢一郎, 奈良重俊, リカレント型神経回路網モデルにおけるカオスを媒体とした, 同時多チャンネル信号伝達, 日本物理学会第 69 回年次大会, 東海大学, (Mar. 27, 2014)
4. 奈良 重俊, 長屋 智之, 神経回路網のカオスを用いたヘテロ脳間及び脳内ヘテロコミュニケーションの原型モデル, 新学術領域研究「ヘテロ複雑システムによるコミュニケーション理解のための神経機構の解明」平成 25 年度 第 2 回全体会議, 日本科学未来館 7 階会議室 1・2, 東京都, (Mar. 20, 2014)
5. 後藤 善友, 土手 良介, 長屋 智之, 奈良 重俊, 自己電気光学効果素子結合系におけるトポロジカル欠陥の時間発展, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 徳島大学, (Sep. 26, 2013)
6. 柚 賢一郎, 吉田 暁輔, 奈良 重俊, リカレント型神経回路網モデルにおけるカオスを媒体とした同時 3 チャンネル信号伝達, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 徳島大学, (Sep. 25, 2013)
7. 奈良 重俊, 長屋 智之, 神経回路網のカオスを用いたヘテロ脳間及び脳内ヘテロコミュニケーションの原型モデル, 文部科学省科学研究費補助金・新学術領域研究, ヘテロ複雑システムによるコミュニケーション理解のための神経機構の解明, 平成 25 年度 第 1 回全体会議, 京都大学北部総合教育研究棟, (Jul. 25, 2013)
8. 奈良 重俊, ATP・ADP の合成・分解酵素における分子過程に潜む不可思議さ, シンポジウム: 生命科学に取り組む異分野の融合と交流の推進 --スーパーコンピュータ「京」と生命科学--, (於) 岡山大学, (Jul. 19, 2013)
9. 柚 賢一郎, 松本 翔, 栗田 誠治, 奈良 重俊, 文部科学省科学研究費補助金・新学術領域研究「ヘテロ複雑システムによるコミュニケーション理解のための神経機構の解明」平成 24 年度・第 2 回全体会議・事前班会議, 京都大学東京オフィス, (Dec. 17-18, 2012)
10. 矢野 智之, 奈良 重俊, 非線形光電子能動デバイスを用いた擬似神経細胞素子提案とそのネットワーク構築・動作解析, 文部科学省「物質・デバイス領域共同研究拠点」第二回複雑系数理とその応用に関するシンポジウム, 北海道大学・電子科学研究所, (Nov. 13, 2012)
11. 柚 賢一郎, 奈良 重俊, リカレント型神経回路網モデルにおけるカオスのダイナミクスを媒体とした信号伝達, 平成 24 年度 電気・情報関連学会中国支部第 63 回連合大会, 島根大学, 松江市, (Oct. 20, 2012)
12. 笠原 智晃, 奈良 重俊, 自己電気光学効果素子多重拡散結合系におけるカオスを用いたロボットの制御, 平成 24 年度 電気・情報関連学会中国支部第 63 回連合大会, 島根大学, 松江市, (Oct. 20, 2012)
13. 多田 亮介, 奈良 重俊, 自己電気光学効果素子における時間遅延効果導入モデルの解析, 平成 24 年度 電気・情報関連学会中国支部第 63 回連合大会, 島根大学, 松江市, (Oct. 20, 2012)
14. 矢野 智之, 奈良 重俊, 非線形光電子能動素子拡散結合ネットワークにおけるカオスを媒体とした信号伝搬, 平成 24 年度 電気・情報関連学会中国支部第 63 回連合大会, 島根大学, 松江市, (Oct. 20, 2012)
15. 松本 翔, 奈良 重俊, リカレント型神経回路網モデルにおけるカオスを用いた制御応用—相互作用する移動体を用いた計算機実験—, 平成 24 年度 電気・情報関連学会中国支部第 63 回連合大会, 島根大学, 松江市, (Oct. 20, 2012)
16. 栗田 誠治, 奈良 重俊, リカレント型神経回路網モデルにおけるカオスを用いたアーム制御, 平成 24 年度 電気・情報関連学会中国支部第 63 回連合大会, 島根大学, 松江市, (Oct. 20, 2012)
17. 青田 朋也, 奈良 重俊, リカレント型神経回路網モデルにおけるカオスを用いた生体制御 - アームロボットシステムへの応用 -, 平成 24 年度 電気・情報関連学会中国支部第 63 回連合大会, 島根大学, 松江市, (Oct. 20, 2012)
18. 西 恵美, 奈良 重俊, 少数原子クラスターにおける BIOSTATION による分子構造解析, 平成 24 年度 電気・情報関連学会中国支部第 63 回連合大会, 島根大学, 松江市, (Oct. 20, 2012)
19. 奈良 重俊, 生体高分子における情報伝達・エネルギー輸送・変換の素過程に潜む不可思議さ, シンポジウム: 生命科学に取り組む異分野の融合と交流の推進-スーパーコンピュータ「京」と生命科学-, 岡山大学, (Jun. 1, 2012)

20. 松本 翔, 柚 賢一郎, 栗田 誠治, 奈良 重俊, 新学術領域研究「ヘテロ複雑システムによるコミュニケーション理解のための神経機構の解明」平成 24 年度 第 1 回全体会議, 北海道大学・学術交流会館, 札幌市, (May 8, 2012)
21. 奈良 重俊, 力学と統計力学のはざま, ワークショップ「力学的決定性と統計性の中間領域を探る IV」, 関西セミナーハウス, 京都市, (Mar. 28, 2012)
22. 矢野 智之, 奈良 重俊, 非線形光電子能動素子拡散結合ネットワークにおけるカオスを媒体とした信号伝搬, 電子情報通信学会 2012 年総合大会, 岡山大学, (Mar. 22, 2012)
23. 仙波 幸信, 奈良 重俊, 非線形動的な光電子素子拡散結合系におけるカオスの発生とその制御応用, 電子情報通信学会 2012 年総合大会, 岡山大学, (Mar. 21, 2012)
24. 森 良太, 奈良 重俊, リカレント型神経回路網モデルにおけるカオスのダイナミクス - スモールワールド的ネットワークにおける時空間相関解析 -, 電子情報通信学会 2012 年総合大会, 岡山大学, (Mar. 21, 2012)
25. 多田 亮介, 奈良 重俊, 自己電気光学効果素子における時間遅延効果導入モデルの解析, 電子情報通信学会 2012 年総合大会, 岡山大学, (Mar. 21, 2012)
26. 新井 裕・奈良 重俊, 非線形光電子能動デバイスのネットワークにおけるカオスの機能的応用 - スモールワールド系を用いた信号伝達の試み -, 電子情報通信学会 2012 年総合大会, 岡山大学, (Mar. 20, 2012)
27. 柚 賢一郎・奈良 重俊, リカレント型神経回路網モデルにおけるカオスのダイナミクスを媒体とした信号伝達, 電子情報通信学会 2012 年総合大会, 岡山大学, (Mar. 20, 2012)
28. 山口 倫志・宮原 直哉・奈良 重俊, リカレント型神経回路網モデルにおけるカオスを用いた移動体制御応用-準三次元移動制御の実現へ向けたシステム開発-, 電子情報通信学会 2012 年総合大会, 岡山大学, (Mar. 20, 2012)
29. 宮原 直哉・奈良 重俊, 擬似神経回路網におけるカオスのダイナミクスの二輪自走ロボットへの制御応用-相互作用するロボット系の製作とその機能実験-, 電子情報通信学会 2012 年総合大会, 岡山大学, (Mar. 20, 2012)
30. 西 恵美・奈良 重俊, 生体高分子の動的構造変化の解析に向けて-高分子解析ソフトウェアの低分子量への試験的適用-, 電子情報通信学会 2012 年総合大会, 岡山大学, (Mar. 20, 2012)
31. 森分 雄太・奈良 重俊, 少数アミノ酸ペプチド結合クラスターの構造解析-タンパク質の動的構造変化における水素結合の役割解明に向けて-, 電子情報通信学会 2012 年総合大会, 岡山大学, (Mar. 20, 2012)
32. 青田 朋也, 奈良 重俊, リカレント型神経回路網モデルにおけるカオスを用いた生体制御 - アームロボットシステムへの応用 -, 電子情報通信学会 2012 年総合大会, 岡山大学, (Mar. 20, 2012)
33. 桑田 誠治, 奈良 重俊, リカレント型神経回路網モデルにおけるカオスを用いたアーム制御, 電子情報通信学会 2012 年総合大会, 岡山大学, (Mar. 20, 2012)
34. 笠原 智晃, 奈良 重俊, 自己電気光学効果素子多重拡散結合系におけるカオスを用いたロボットの移動制御, 電子情報通信学会 2012 年総合大会, 岡山大学, (Mar. 20, 2012)
35. 奈良 重俊, 力学と統計力学のはざま - 生体高分子における情報伝達・エネルギー輸送・変換の素過程に潜む不可思議さ -, 日本物理学会 2012 年秋季大会・領域 11・12 合同シンポジウム「化学反応や生体高分子の構造変化における状態変化の起源を探る」, 京都産業大学, (Mar. 27, 2012)
36. 松本 翔, 奈良 重俊, リカレント型神経回路網モデルにおけるカオスを用いた制御応用-準 3 次元迷路求解例に関する計算機実験システムの構築 -, 電子情報通信学会 2012 年総合大会, 岡山大学, (Mar. 22, 2012)
37. 奈良 重俊, 力学と統計力学のはざま, 文部科学省「物質・デバイス領域共同研究拠点」複雑系数理とその応用, 北海道大学・電子科学研究所, (Jan. 30, 2012)

B01P4

1. Noha Mohsen Zommara, 西田洋司, 高橋宗良, Johan Lauwereyns, Different modulation of gamma band during two different spatial tasks, 2013 年度包括脳ネットワーク 夏のワークショップ, 名古屋, (Aug. 31, 2013)
2. Hiroshi Nishida, Muneyoshi Takahashi, A. David Redish, Johan Lauwereyns, High frequency oscillations for behavioral stabilization during spatial alternation, The 4th International Conference on Cognitive Neurodynamics, Sigtuna, Sweden, (Jun. 23-27, 2013)
3. Noha Mohsen Zommara, Hiroshi Nishida, Muneyoshi Takahashi, Johan Lauwereyns, Gamma-band shift in the activity of rat hippocampal CA1: a comparison of memory-guided and visually-cued spatial choice, The 4th International Conference on Cognitive Neurodynamics, Sigtuna, Sweden, (Jun. 23-27, 2013)
4. 西田 洋司, 高橋 宗良, A. David Redish, Johan Lauwereyns, 認知課題中における海馬内高周波帯域脳波のセッション内ダイナミクス, 第 36 回日本神経科学大会, 京都, (Jun. 20-23, 2013)

5. Noha Mohsen Zommara, Hiroshi Nishida, Muneyoshi Takahashi, Johan Lauwereyns, The role of gamma-band activity in hippocampal CA1 during memory-guided versus visually-cued spatial choice, 43rd Annual Meeting of the American Society for Neuroscience (Neuroscience 2013), San Diego, U.S.A., (Nov. 9-13, 2013)
6. Hiroshi Nishida, Muneyoshi Takahashi, A. David Redish, Johan Lauwereyns, Abrupt information changes in the hippocampal CA1 area during memory-guided alternation, 43rd Annual Meeting of the American Society for Neuroscience (Neuroscience 2013), San Diego, U.S.A., (Nov. 9-13, 2013)
7. 西田 洋司, 高橋 宗良, A. David Redish, Johan Lauwereyns, Effects of practice on neural mechanisms of memory-guided alternation in rat hippocampal area CA1, 2013 年度包括脳ネットワーク 夏のワークショップ, 名古屋, (Aug. 31, 2013)
8. Hiroshi Nishida, Muneyoshi Takahashi, A. David Redish, Johan Lauwereyns, Two types of high frequency oscillation in rat hippocampal CA1 during spatial alternation, 脳と心のメカニズム 第13回冬のワークショップ, 留寿都, (Jan. 9-11, 2013)
9. Johan Lauwereyns, Hiroshi Nishida, Gary D. Bird, A. David Redish, Muneyoshi Takahashi, Differential gamma activity related to correct spatial alternation in rat hippocampal CA1, 42nd Annual Meeting of the American Society for Neuroscience (Neuroscience 2012), New Orleans, U.S.A., (Oct. 13-17, 2012)
10. Gary D. Bird, Hiroya Sakai, Hiroshi Nishida, Jin Kinoshita, Muneyoshi Takahashi, Johan Lauwereyns, Behavioral transition dynamics and the effects of reward probability and magnitude, 42nd Annual Meeting of the American Society for Neuroscience (Neuroscience 2012), New Orleans, U.S.A., (Oct. 13-17, 2012)
11. Hiroshi Nishida, Muneyoshi Takahashi, Gary D. Bird, A. David Redish, Johan Lauwereyns, A critical code for correct spatial alternation in rat hippocampal CA1, 第35回日本神経科学大会, 名古屋, (Sep. 18-21, 2012)
12. Gary D. Bird, Hiroya Sakai, Hiroshi Nishida, Jin Kinoshita, Muneyoshi Takahashi, Johan Lauwereyns, Effects of the probability and magnitude of reward on behavioral transition dynamics, 第35回日本神経科学大会, 名古屋, (Sep. 18-21, 2012)
13. Hiroshi Nishida, Muneyoshi Takahashi, Gary D. Bird, A. David Redish, Johan Lauwereyns, Gamma activity in rat hippocampal CA1 predicts performance in a spatial alternation task, 日本神経回路学会 第22回全国大会, 名古屋, (Sep. 12-14, 2012)
14. Hiroshi Nishida, Muneyoshi Takahashi, Gary D. Bird, A. David Redish, Johan Lauwereyns, Gamma activity that predicts error during spatial alternation in rat hippocampal CA1, Dynamic Brain Forum 2012, Carmona, Spain, (Sep. 3-6, 2012)
15. Johan Lauwereyns, Convergent measures of abstract spatial coding in hippocampus, Dynamic Brain Forum 2012, Carmona, Spain, (Sep. 3-6, 2012)
16. Muneyoshi Takahashi, Hiroshi Nishida, A. David Redish, Johan Lauwereyns, Predicting the flow of information by gamma oscillations in hippocampus during preparatory waiting, Dynamic Brain Forum 2012, Carmona, Spain, (Sep. 3-6, 2012)
17. Hiroshi Nishida, Muneyoshi Takahashi, Gary D. Bird, A. David Redish, Johan Lauwereyns, Gamma activity in rat hippocampal CA1 predicts performance in a spatial alternation task, Dynamic Brain Forum 2012, Carmona, Spain, (Sep. 3-6, 2012)
18. 高橋 宗良, 西田 洋司, A David Redish, Johan Lauwereyns, 行動準備状態の海馬における情報の流れをシータ・ガンマリズムから推測する, 2012 年度包括脳ネットワーク 夏のワークショップ, 仙台, (Jul. 26, 2012)
19. 西田 洋司, 高橋 宗良, 伊良皆 啓治, Johan Lauwereyns, 静止状態のラット海馬 CA1 領域におけるクロス周波数カップリング, 第51回日本生体医工学会大会, 福岡, (May 10-12, 2012)

B01P5

1. Itsuki Kageyama, Kiyohisa Natsume, Carbachol-induced neuronal oscillation in rat hippocampal slices and temperature, The 4th International Conference on Cognitive Neurodynamics, Sigtuna, Sweden, (Jun. 23-27, 2013)
2. Itsuki Kageyama, Kiyohisa Natsume, Experimental verification of dynamical cell assembly (DCA) with the nerve rhythm. - Is DCA characterized by a kind of the nerve rhythm?, The 36th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society, Kyoto, (Jun. 20-23, 2013)
3. Itsuki Kageyama, Kiyohisa Natsume, Impact of temperature on carbachol-induced hippocampal neural rhythm, The 35th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society, Nagoya, (Sep. 18-21, 2012)

B01P6

1. 磯村 宜和, ラット運動野研究: 領域内から領域間へ, 第 2 回ヘテロ・ニューロアナリシス研究会シンポジウム, 仙台, (Dec. 16, 2013)
2. Akiko Saiki, Rie Kimura, Yoko Fujiwara-Tsukamoto, Yutaka Sakai, Yoshikazu Isomura, Neuronal ensemble activity for motor control with different forces in rat caudal and rostral forelimb areas, Neuroscience 2013 (The Annual Meeting of the Society for Neuroscience), San Diego, USA, (Nov. 13, 2013)
3. Yoshikazu Isomura, Reward-modulated motor information in dorsolateral striatum neurons, Dynamic Brain Forum (DBF) 2013, The 4th International Conference on Cognitive Neurodynamics, Sigtuna, Sweden, (Jun. 26, 2013)
4. Akiko Saiki, Rie Kimura, Yoko Fujiwara-Tsukamoto, Yutaka Sakai, Yoshikazu Isomura, Neuronal ensemble activity for motor control with different forces in rat caudal and rostral forelimb areas, Neuro2013 (The 36th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society), Kyoto, (Jun. 20, 2013)
5. Rie Kimura, Akiko Saiki, Yoko Fujiwara-Tsukamoto, Yutaka Sakai, Yoshikazu Isomura, Cooperative multineuronal spike activities related to externally- and internally-initiated movements in rat primary and secondary motor cortices, Neuro2013 (The 36th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society), Kyoto, (Jun. 20, 2013)
6. 磯村 宜和, 運動発現を担う皮質内回路機構, システム神経科学セミナー, 東京都小平市, (Jan. 24, 2013)
7. 磯村 宜和, 手を動かす大脳皮質回路の仕組み, 玉川大学GCOE・大阪大学認知脳GCOE合同ワークショップ, 名古屋, (Jan. 19-20, 2013)
8. 磯村 宜和, Motor information processing in rodent primary and secondary motor cortices, 意思決定とコミュニケーションの脳ダイナミクスと相互作用, 仙台, (Jul. 24-27, 2012)
9. 磯村 宜和, ラット脳活動の電気生理学的解析, チュートリアル: ラット遺伝子改変技術を脳科学研究に活かすために, 仙台, (Jul. 24-27, 2012)

B01P7

1. 鮫島 和行, 野々村 聡, 加藤 康広, 銅谷 賢治, 丹治 順, 予測報酬比較による認知的な選択時の線条体神経活動, 第 28 回日本大脳基底核研究会, 修善寺, 静岡県, (Jan. 7, 2014)
2. 鮫島 和行, 脳科学の立場から見た、新商品選択の認知機構, 日本心理学会第 77 回大会シンポジウム「心理学がビジネスを変える!?', 札幌、北海道, (Jan. 7, 2014)
3. Satoshi Nonomura, Yasuhiro Kato, Kazuyuki Samejima, Kenji Doya, Jun Tanji, The neuronal activity in the rostral striatum during action value comparisons of objects and movements, Annual Meeting of Society for neuroscience, San Diego, California, USA, (Nov. 9-13, 2013)
4. Ikuya Nomura, Kazuyuki Samejima, Kazuhiro Ueda, Yuichi Washida, Hiroyuki Okada, Takashi Omori, Choosing unknown goods: An fMRI study of product choice, The 20th Annual meeting of Cognitive neuroscience society, San Francisco, California, USA, (Apr. 13-16, 2013)

B01P8

1. Kubota Yoshiyuki, Hatada Sayuri, Kawaguchi Yasuo, An excitatory and inhibitory synapse density on various GABAergic nonpyramidal cells in the rat cerebral cortex, 第 118 回日本解剖学会総会・全国学術集会, 高松, (Mar. 28-30, 2013)
2. 窪田 芳之, 神経の形、神経どうしのつながりを見る, 第 10 回脳をみるシンポジウム in 三原, 広島県三原市, (Mar. 9, 2013)
3. 窪田 芳之, 大脳皮質 FS バスケット細胞から錐体細胞への抑制性シナプスの結合特性, 自然科学研究機構プロジェクト「脳神経情報の階層的研究」「機能生命科学における揺らぎと決定」合同シンポジウム, 岡崎, (Mar. 5, 2013)
4. Yoshiyuki Kubota, Fuyuki Karube, Masaki Nomura, Allan T. Gulledge, Atsushi Mochizuki, Andreas Schertel, Yasuo Kawaguchi, Conserved properties of dendritic trees in four cortical interneuron subtypes, International Conference of Physiological Sciences 2012, Suzhou, China, (Nov. 1-4, 2012)
5. 窪田 芳之, Conserved properties of dendritic trees in four cortical interneuron subtypes, 第 35 回日本神経科学学会大会 シンポジウム”神経突起の形成とリモデリングを制御する新規メカニズムと普遍原理”, 名古屋, (Sep. 18-21, 2012)
6. Yoshiyuki Kubota, Satoru Kondo, Masaki Nomura, Sayuri Hatada, Hiroko Kita, Noboru Yamaguchi, Fuyuki Karube, Yasuo Kawaguchi, Locally limited IPSC conduction on cortical pyramidal cell induced by FS nonpyramidal cell, FENS Forum 2012, symposium “Inhibitory functional architecture in the cerebral cortex”, Barcelona, Spain, (Jul. 14-18, 2012)

C01P1

1. Masahiro Kawasaki, Hidetsugu Komeda, Toshiya Murai, Yasuko Funabiki, Different strategy for movement imitation in ASD, Neuroscience 2014, Washington DC USA, (Nov. 11, 2014)
2. Masahiro Kawasaki, Yasuko Funabiki, Keiichi Kitajo, Kenjiro Fukao, Toshiya Murai, Yoko Yamaguchi, Inter-Brain Synchronization for Human-Human Communication: Elucidation in Autism Spectrum Disorders, Proc, International Conference on Brain and Health Informatics, Maebashi, Gunma, (Oct. 29, 2013)
3. Masahiro Kawasaki, Keiichi Kitajo, Kenjiro Fukao, Toshiya Murai, Yoko Yamaguchi, Yasuko Funabiki, Different mechanisms for coordinating with other's rhythms in autistic and control adults, Neuroscience 201, San Diego, California, USA, (Nov. 12, 2013)
4. 川崎 真弘, 米田 英嗣, 村井 俊哉, 船曳 康子, 運動模倣時における発達障害と定型発達の方略の違い, 日本認知心理学会第 12 回大会, 仙台, (Jun. 29, 2014)
5. 川岸 久也, 船曳 康子, 発達障害児の乳幼児期における運動発達, 日本発達心理学会第 25 回大会, 京都大学百周年時計台記念館国際交流ホール, 京都市左京区, (Mar. 22, 2014)
6. 清水 里美, 青山 芳文, 船曳 康子, 鋒山 智子, 安井 加代子, 亀谷 奈津子, 関口 佳美, 奥村 康枝, 渡邊 静代, 発達障害の特性理解を深める研修内容の工夫～S.E.N.S の会京都支部会の MSPA を用いた研修実践から～, 一般社団法人日本 LD 学会第 22 回大会.パシフィコ横浜(横浜国際会議場), 横浜市西区, (Oct. 14, 2013)
7. 水谷 忠央, 村井 俊哉, 船曳 康子, 自閉症スペクトラム障害者における運動と視覚性記憶との関連, 第 54 回日本児童青年精神医学会総会, 札幌コンベンションセンター, 札幌市白石区, (Oct. 11, 2013)
8. 船曳 康子, 村井 俊哉, 十一 元三, 自閉症スペクトラム障害者における聴覚皮質の反応, Neuro2013 (第 36 回日本神経科学大会, 第 56 回日本神経化学会大会, 第 23 回日本神経回路学会大会), 国立京都国際会館イベントホール, 京都市左京区, (Jul. 22, 2013)
9. 船曳 康子, 村井 俊哉, 十一 元三, 自閉症スペクトラム障害者の聴覚反応—注意に着服して, 第 53 回日本児童青年精神医学会総会, 東京, (Nov. 2, 2012)

C01P2

1. Kenji Matsumoto, やる気と脳-価値と動機づけの脳機能イメージング, 第 37 回日本高次脳機能障害学会学術総会, 島根県, (Nov. 29-30, 2013)
2. Adam N Phillips, Yukihito Yomogida, Ryuta Aoki, Ayaka Sugiura, Kaosu Abe, Kenji Matsumoto, The Neural Basis of Scarcity Value for Conspicuous Products, Neuroscience2013, San Diego, CA, USA, (Nov. 9-13, 2013)
3. Ryuta Aoki, Ayaka Sugiura, Yukihito Yomogida, Madoka Matsumoto, Kou Murayama, Keise Izuma, Kenji Matsumoto, Neuroanatomical correlates of general self-efficacy: a voxel-based morphometry study, Neuroscience2013, San Diego, CA, USA, (Nov. 9-13, 2013)
4. Adam N Phillips, Yukihito Yomogida, Ryuta Aoki, Ayaka Sugiura, Kaosu Abe, Kenji Matsumoto, Neural Basis of the Scarcity Effect for Conspicuous Items, Neuroeconomics 2013, Lausanne, Switzerland, (Sep. 27-29, 2013)
5. Ayaka Sugiura, Kou Murayama, Madoka Matsumoto, Keise Izuma, Yukihito Yomogida, Ryuta Aoki, Atsuko Saito, Kenji Matsumoto, Neural basis of persistence after failure in relation with self-efficacy, MCC 2013-Neural circuits for adaptive control of behavior, Paris, France, (Sep. 24-26, 2013)
6. Yukihito Yomogida, Madoka Matsumoto, Ryuta Aoki, Ayaka Sugiura, Kenji Matsumoto, The neural basis of changes in social norms by persuasion, Neuro2013, Kyoto, Japan, (Jun. 20-23, 2013)
7. Ryuta Aoki, Madoka Matsumoto, Yukihito Yomogida, Keise Izuma, Kou Murayama, Ayaka Sugiura, Colin F. Camerer, Ralph Adolphs, Kenji Matsumoto, Increasing number of choice options and their social equality are represented by dissociable components of the human reward system, Neuro2013, Kyoto, Japan, (Jun. 20-23, 2013)
8. Kenji Matsumoto, Kou Murayama, Madoka Matsumoto, Keise Izuma, Ayaka Sugiura, Neural correlates of motivation and performance enhancement by self-determination, 日本神経科学大会, 名古屋, (Jan. 5, 2013)
9. Ryuta Aoki, Madoka Matsumoto, Yukihito Yomogida, Keise Izuma, Kou Murayama, Ayaka Sugiura, Colin Camerer, Ralph Adolphs, Kenji Matsumoto, Neural correlates of the reward value for number of choice options, Neuroscience 2012, New Orleans, (Oct. 13-17, 2012)
10. Yukihito Yomogida, Madoka Matsumoto, Ryuta Aoki, Ayaka Sugiura, Kenji Matsumoto, The neural basis of persuasion on social norms, Neuroscience 2012, New Orleans, (Oct. 13-17, 2012)

11. Ayaka Sugiura, Kou Murayama, Madoka Matsumoto, Yukihiro Yomogida, Ryuta Aoki, Toshikazu Hasegawa, Kenji Matsumoto, Neural basis of self-efficacy in relation with persistence after failure, Neuroscience 2012, New Orleans, (Oct. 13-17, 2012)
12. Ryuta Aoki, Madoka Matsumoto, Yukihiro Yomogida, Keise Izuma, Kou Murayama, Ayaka Sugiura, Colin Camerer, Ralph Adolphs, Kenji Matsumoto, Neural correlates of the reward value for number of choice options, Annual meeting of Society for Social Neuroscience 2012, New Orleans, (Oct. 11-12, 2012)
13. Yukihiro Yomogida, Madoka Matsumoto, Ryuta Aoki, Ayaka Sugiura, Kenji Matsumoto, The neural basis of persuasion on social norms, Annual meeting of Society for Social Neuroscience 2012, New Orleans, (Oct. 11-12, 2012)
14. Ayaka Sugiura, Kou Murayama, Madoka Matsumoto, Yukihiro Yomogida, Ryuta Aoki, Toshikazu Hasegawa, Kenji Matsumoto, Neural basis of self-efficacy in relation with persistence after failure, Annual meeting of Society for Social Neuroscience 2012, New Orleans, (Oct. 11-12, 2012)
15. Yukihiro Yomogida, Madoka Matsumoto, Ryuta Aoki, Ayaka Sugiura, Kenji Matsumoto, The neural basis of persuasion on attitude towards social norms, Neuroeconomics 2012, Miami, (Sep. 28-30, 2012)
16. Ryuta Aoki, Madoka Matsumoto, Yukihiro Yomogida, Keise Izuma, Kou Murayama, Ayaka Sugiura, Colin Camerer, Ralph Adolphs, Kenji Matsumoto, Reward value for number of choice options and its equality, Neuroeconomics 2012, Miami, (Sep. 28-30, 2012)
17. Ayaka Sugiura, Kou Murayama, Madoka Matsumoto, Yukihiro Yomogida, Ryuta Aoki, Toshikazu Hasegawa, Kenji Matsumoto, Neural basis of persistence after failure associated with self-efficacy, 日本神経科学大会, 名古屋, (Sep. 18-21, 2012)

C01P3

1. Yasuo Nagasaka, Tomonori Notoya, Naotaka Fujii, Substitutional reality system for macaque monkeys, The 21st International Conference On Comparative Cognition, Melbourne, Florida, (Mar. 26-29, 2014)
2. Yasuo Nagasaka, Latent social behavior in Japanese macaques, The 9th Inuyama Comparative Social Cognition Symposium (iCS 2-9), Primate Research Institute, Kyoto Univ. Inuyama, Aichi, Japan, (Jan. 11-12, 2014)
3. Y. Nagasaka, S. Wakisaka, T. Notoya, N. Fujii, Substitutional Reality for research in animal cognition, Society for Neuroscience Neuroscience 2013, San Diego, USA, (Nov. 9-13, 2013)
4. 長坂 泰勇, 能登谷 智則, 藤井 直敬, サル用代替現実 (substitutional reality for monkeys; mSR) システムの構築と評価, 日本動物心理学会第 73 回大会, 筑波大学, 茨城, (Sep. 14-16, 2013)
5. 山口 佳恵, 長坂泰勇, リスザルにおけるチャックコールと返答の発達, 日本動物心理学会第 73 回大会, 筑波大学, 茨城, (Sep. 14-16, 2013)
6. 長坂 泰勇, 能登谷 智則, 藤井 直敬, サル用代替現実 (Substitutional Reality System for Macaques; mSR) システムの構築とその評価, 2013 年度 包括脳ネットワーク夏のワークショップ, 名古屋国際会議場, (Aug. 29- Sep. 1, 2014)
7. Yasuo Nagasaka, Zenas C. Chao, Naomi Hasegawa, Tomonori Notoya, Naotaka Fujii, Monkey see, Monkey sync, Conference on Comparative Cognition, Florida, USA, (Mar. 6-9, 2013)
8. Edward A. Wasserman, Yasuo Nagasaka, Leyre Castro, Stephen J. Brzykcy, Pigeons learn virtual patterned-string problems in a computerized touchscreen environment, Conference on Comparative Cognition, Florida, USA, (Mar. 6-9, 2013)
9. Yoshie Yamaguchi, Yasuo Nagasaka, Acquisition of vocal communication in squirrel monkeys, Conference on Comparative Cognition, Florida, USA, (Mar. 6-9, 2013)
10. Stephen J. Brzykcy, Edward A. Wasserman, Yasuo Nagasaka, Sacha Perez-Acevedo, Do pigeons (Columba livia) demonstrate behavioral sensitivity to connectedness and effort in the virtual string task?, Conference on Comparative Cognition, Florida, USA, (Mar. 6-9, 2013)

C01P5

1. 乙宗 宏範, 服部 憲明, 前田 彬, 森 正志, 工藤 俊介, 藤田 暢一, 藤本 宏明, 河野 悌司, 長廻 倫子, 吉岡 知美, 畠中 めぐみ, 矢倉 一, 大森 隆司, 宮井 一郎, Kinect を用いた 3 次元歩行解析システムの開発, 第 55 回日本神経学会学術大会, 福岡, (May 21, 2014)
2. 服部 憲明, MRI を用いた脳卒中研究について, 第 39 回日本脳卒中学会総会 (シンポジスト), 大阪, (Mar. 15, 2014)
3. 服部 憲明, 工藤 俊介, 森 正志, 宮井 一郎, Kinect による stick picture 映像観察時の脳活動についての検討, 第 7 回 Motor Control 研究会, 東京, (Sep. 7, 2013)

(3) 図書

A01G1

1. ウォルター・J・フリーマン, 脳はいかにして心を創るのかー神経回路網のカオスが生み出す志向性・意味・自由意志, 産業図書, 浅野 孝雄 (訳) 津田 一郎 (校閲), 294p., (2011)
2. 津田 一郎, 自己組織化ハンドブック (「保存系・散逸系」 pp17-18), N T S, 監修 国武 豊喜, 編集幹事 下村 正嗣、山口 智彦, (2009)
3. 青柳 富誌生, 脳の計算論(シリーズ脳科学 1) (第3章 リズム活動と位相応答 pp45-92), 東京大学出版会, 深井 朋樹 (編集), 甘利 俊一 (監修), (2009)
4. 青柳 富誌生, 現代数理科学事典 第2版 (5章 神経脳科学、5.1.1 神経細胞と脳の情報表現、5.1.2 神経細胞の数理モデル、pp300-305、5.2.1 神経細胞集団と同期、pp308-311), 丸善, 現代数理科学事典編集委員会 (著), 広中 平祐 (編集), 甘利 俊一 (編集), 伊理 正夫 (編集), 巖佐 庸 (編集), 楠岡 成雄 (編集), 一松 信 (編集), 室田 一雄 (編集), 和達 三樹 (編集), (2009)

A01G2

1. 西浦 廉政, 非平衡ダイナミクスの数理, 岩波書店, 318p., (2009)

A01G3

1. Kunihiko Kaneko (分担執筆), Evolutionary Systems Biology (Phenotypic Plasticity and Robustness: Evolutionary Stability Theory, Gene Expression Dynamics Model, and Laboratory Experiments pp.249-278), Springer, Orkun S. Soyer(編集), (2012)

B01G2

1. 塚田 稔, 自己組織化ハンドブック (2. 2. 1 「脳の可塑性」 P.379-385), (株) エン・ティー・エス, 下村 政嗣 山口智彦(編集), (2009)

B01G3

1. 藤井 俊勝 (分担執筆), 脳血管障害と神経心理学 第2版 (記憶障害 pp. 58-66), 西村書店, 平山 恵造, 田川 皓一編, (2013)
2. 奥田 次郎 (分担執筆), 社会脳科学の展望ー脳から社会をみる (社会脳シリーズ I) (展望する脳 pp. 1-33), 新曜社, 荻阪 直行(編集), (2012)
3. 阿部 修士, 藤井 俊勝, 社会脳科学の展望ー脳から社会をみる (社会脳シリーズ I) (嘘をつく脳 pp. 35-61), 新曜社, 荻阪 直行(編集), (2012)
4. Toshikatsu Fujii, Handbook of Behavior, Food and Nutrition. (Frontal behavioural symptoms in Prader-Willi syndrome.pp.1445-1456.), Springer, Preedy VR, Watson RR, Martin CR(編集), (2011)
5. Toshikatsu Fujii, Neurovascular Imaging: MRI & Microangiography (Perforating branches of the anterior communicating artery: anatomy and infarction pp. 189-196), Springer, Shoki Takahashi(編集), (2010)
6. 藤井 俊勝, 阿部 修士, 森 悦朗, 脳卒中症候学 (記憶障害 pp. 790-803), 西村書店, 田川 皓一(編集), (2010)
7. 藤井 俊勝, よくわかる認知科学 (嘘とだまし pp.150-151), ミネルヴァ書房, 乾 敏郎, 川口 潤, 吉川 左紀子(編集), (2010)
8. Fujii T, Suzuki M, The Encyclopedia of Neuroscience, vol 1 (Episodic memory pp.1139-1142), Springer, Binder MC, Hirokawa N, Windhorst U(編集), (2009)
9. 藤井 俊勝, 語源で覚える英単語 3 6 0 0, 281p., 青灯社, (2009)

B01G4

1. 乾 敏郎 (監修), 「知識の森」 感覚・知覚・認知の基礎, オーム社, 電子情報通信学会 (編集), 電子通信学会 (編集), 282p., (2012),

C01G1

1. 鴻池 菜保・中村 克樹, 「視覚の神経科学 一顔・表情一」, 『Clinical Neuroscience』, 30, 902-905 (2012)

C01G2

1. 有田 隆也, 生物から生命へ, 筑摩書房, 208p., (2012)
2. Takaya Arita, Introduction to Modern Robotics (Evolution and Cooperation: How to Evolve a Cooperative Team), iConcept, Sho Yokota and Daisuke Chugo(編集), 362p., (2012)
3. Takaya Arita, Multi-Agent Applications with Evolutionary Computation and Biologically Inspired Technologies (Evolutionary Search for Cellular Automata with Self-Organizing Properties toward Controlling Decentralized Pervasive Systems pp. 308-320), IGI Global, (2010)
4. 有田 隆也, 進化技術ハンドブック (16.6 節 「人工生命」 コラム 「ボールドウィン効果」 233-238), 近代科学社, 川上 浩司(編集), (2010)
5. Yoshiyuki Nakamichi Y, Takaya Arita, Food Exploitation by Social Insects: Ecological, Behavioral, and Theoretical Approaches (Evolutionary Simulation of Pheromone Communication

in Ant Foraging 279-292), CRC Press, Stefan Jarau, Michael Hrnacir(編集), (2009)

C01G3

1. 橋本 敬, 言語と身体性 (第 9 章「記号コミュニケーションはどのように成立するか」 pp.235-260), 今井 むつみ, 佐治 伸郎 (編著), 岩波講座 コミュニケーションの認知科学 第 1 巻, 岩波書店, (2014)

C01G4

2. 村田 哲, (シリーズ移動知) 第 3 巻 環境適応 内部表現と予測のメカニズム (第 5 章 脳内の身体 p151-181), オーム社, 伊藤 宏司 他(編集), (2010)

B01K5

1. R. Yoshinaka, M. Kawashima, Y. Takamura, H. Yamaguchi, N. Miyahara, K. Nabeta, Y. Lee, S. Nara, Adaptive Control of Robot Systems with Simple Rules Using Chaotic Dynamics in Quasi-layered Neural Networks, Studies in Computational Intelligence, Vol. 399, pp. 287-305, K. Madani, A. D. Correia, A. Rosa & J. Filipe (Eds.), Springer Verlag, (2011)

C01K1

1. 松島 俊也, シリーズ「移動知」第 3 巻 環境適応 内部表現と予測のメカニズム (利益からの逃走—不確実な世界で生き延びるために pp.183-226), オーム社, (2010)

C01K2

1. 小川 正, 映像情報メディア工学大事典, オーム社, 映像情報メディア学会 (内川 恵二) (編集), 1760p., (2010)

C01K3

1. 久恒 辰博, なぜ、歩くと脳は老いにくいのか, PHP 研究所, 202p., (2010)

C01K5

1. 奥村 哲, 新訂生理学実習書 (第 13 章 5 節 生理的代用液と緩衝溶液の調整 pp. 254-258), 日本生理学会教育委員会 (監修), 南江堂, (2013)

C01K10

1. 渡辺 正孝, サルに内的思考過程は存在するか? — サルにおけるデフォルト脳活動 シリーズ社会脳、第 1 巻、「社会神経科学の展望——脳から社会をみる」, 新曜社, 荳阪 直行 (編集), 272p., (2012)
2. D. O. ヘップ, 行動の機構——脳メカニズムから心理学へ (翻訳), 岩波書店, 渡辺 正孝 他 (翻訳) (編集), (上) 368p., (下) 304p., (2011)
3. 渡辺 正孝, 発想と企画の心理学 (第 1 章「発想の大脳メカニズム」 pp.14-27), 朝倉書店, 高橋 誠 (編集), (2010)

A01P1

1. 三浦 佳二 (分担執筆), 嗅覚と匂い・香りの産業利用最前線 (匂い判別の情報伝達メカニズムの解明 pp. 55-68), NTS, (2013)

B01P3

1. Yongtao Li, Shigtoshi Nara, Solving Complex Control Tasks via Simple Rule(s): Using Chaotic Dynamics in a Recurrent Neural Network Model, The Relevance of the Time Domain to Neural Network Models, Chap. 9, Vol. 3, 159-178, A.R. Rao, G.A. Cecchi (Eds.), Springer Verlag USA, (2012)

B01P4

1. Johan Lauwereyns, Brain and the Gaze: On the Active Boundaries of Vision, MIT Press, 312p., (2012)

B01P6

1. 礪村 宜和 (分担執筆), ブレインサイエンス・レビュー2013 (運動指令を形成する皮質内機能的回路の探索 p.p. 9-26), クバプロ, 廣川 信隆(編集), (2013)

C01P1

1. 船曳 康子, 第 12 章聴覚, 第Ⅲ部知覚・言語・運動, 発達科学ハンドブック第 8 巻「脳の発達科学」, 日本発達心理学会, 新曜社, (印刷中)

研究成果による産業財産権の出願・取得状況

B01G2

1. 相原 威, 特許出願「脈動測定装置、脈動測定方法、及びプログラム」, 出願番号 2013-126786, 特許出願 2013/6/17 学校法人玉川学園

B01P6

1. 礪村 宜和, 特許出願「動物学習支援装置、及び動物学習支援機能付き飼育ケージ」, 出願番号 2013-205207, 特許出願 2013/09/30 学校法人玉川学園

B01K9

1. 礪村 宜和, 特許出願「動物実験装置」, 出願番号 2011-139810, 特許出願 2011/6/23 学校法人玉川学園

總 括 班

ヘテロ複雑システムによるコミュニケーション理解のための神経機構の解明

研究代表：北海道大学電子科学研究所・教授 津田一郎

概要

総括班は、計画研究間ならびに計画研究と公募研究の間の共同研究を企画実行し、新領域を推進した。国際研究集会である Dynamic Brain Forum, ICCN2011 を組織し、ICCN2013 を共同で組織すると共に、領域ホームページを Dynamic Brain Platform にリンクし、ニュースレターを発行するなど研究成果を国の内外に発信した。高校生理科教室、サイエンスカフェを開催し、成果を社会に還元した。さらに、若手人材育成でも実績を上げた。領域の研究成果のまとめを Neural Networks 誌と Neuroscience Research 誌のそれぞれ特集号に発表した。

Abstract

We organized a whole project, promoting collaborations among projects, thereby yielding outstanding research results. We organized Dynamic Brain Forum and international conference ICCN2011, and co-organized ICCN2013. We made a project home page and linked to Dynamic Brain Platform in Riken, whereby the contents of the research were able to be jointly owned among researchers with different expertise. We also organized ‘science café’ and ‘science school for high school students’. We also promoted to move young researchers in mathematical science lab to experimental lab, which provided a good opportunity to establish them in joint research with experimentalists. We published review articles on the research results in the special issue of Neural Networks and also in Neuroscience Research.

1. 研究開始当初の背景

コミュニケーションとは人や動物が他者と記号化された情報をやり取りし意味や感情を共有する過程であると捉えられている。この過程において協働や協調が生まれてくると言われており、主に人間工学や社会科学の立場で活発に研究されてきたが、その本質的な解明には至っていない。コミュニケーションの本質は自己と他者の間の動的な相互作用であり、その過程では自己と他者のメンタルな過程の変動により感覚モダリティーや意味や感情などの情報のモダリティーが動的に遍歴する。従って、コミュニケーションを理解するための神経情報学とは脳内の異なる機能モジュール間の神経連絡における電氣的、磁氣的、化学的な相互作用に着目し、機能モジュール間の新しい状態を研究する領域である。領域研究開始前約10年間で、脳の引き込み協調の事例が多く発見され、コミュニケーションによる協調の創発との関係に関心が高まっていた。さらに、脳のこのようなダイナミックな活動を過去 50 年余りに亘って開発されてきた非線形動力学、複雑系の数理論論によって解明する研究動向が世界的に注目され始めていた。特に、非線形・非平衡系における自己組織化がさまざまな分野で共通の興味となり、シナプティック、カタストロフ理論、散逸構造理論などを経て、カオス理論、フラクタル幾何学などが基礎科学分野で活発に研究され、確立されてきた。この流れの中で、複雑系科学、非線形科学への関心が高まった。このような研究活動において、カオス結合系や振動子結合系を用いて多くの同期現象が解明され、結合が弱い弱結合系に関しては蔵本らによって精

密な理論体系が構築された。そこにおいては、主に一様な要素の集合体や結合系が対象であり、さらに理論を発展させヘテロなシステムが相互作用したときにおこる非定常過程から新たな定常状態へと到る過程の解明への機運が高まっていた。また、工学分野においても、制御理論や神経回路理論が発展し、多くのシステムの制御機構が適応制御や学習制御の観点から解明され、その後、特にわが国においては創発や移動知といった新しい研究分野が創出された。そこにおいては、個体もしくは個体群が環境と相互作用することによっていかにして知能を獲得するに到るかの研究が活発になされてきた。しかしながらその神経機構に関する研究は十分になされてはいなかった。特に、従来の脳科学は単一の脳の定常的な活動に関する研究が主であり、複数の脳の相互作用やダイナミクスに関する研究は十分に行われているとは言えない状況であった。そこで、脳のダイナミクスに着目し、コミュニケーションの神経機構を複数の脳間の相互作用系として扱い、新しい複雑系科学と結びつくことでブレークスルーが期待された。このような研究動向が本領域申請の背景であった。

2. 研究の目的

高次霊長類に特徴的な認知機能であるコミュニケーションの脳内神経機構を複雑数理システム論によって解明し、「コミュニケーション神経情報学」という新領域を確立することが本研究の全体を通じた目的である。そのために、A. 数理システム論、B. ヘテロ脳内システム間相互作用、C. 個体間相互作用の3研究項目をたて、それぞれに複数の研究項目を配置し、共同研究を行いやすくする。特に、理論と実験の共同研究を推進していく。コミュニケーションに伴う脳のダイナミクスを引き込み協調とカオス的遍歴により解釈していく枠組みを整備し、具体的なコミュニケーションの実験タスクを決定し、脳内ダイナミクスの測定を行う。

本研究領域において解決すべき問題は、人間や動物のコミュニケーションにおける自律的な役割分担の出現、協調的行動の出現のメカニズムである。本研究領域で特に着目するのは、異なるシステム間に接触が起き、両者間に動的な相互作用が起きることでシステム間の関係性が変わり、新しい関係が生成される点である。この移行期におきる非定常でダイナミックな状態変化のメカニズムを研究する。また、従来社会経済システムなどの領域ではイノベーションの研究がなされてきたが、その議論は概念的なレベルにとどまっている。それに対して本研究領域では、対象をコミュニケーション及び脳内過程とし、数理的手法によるモデル研究と人やサルなどの脳活動の観測をとおしてコミュニケーションのメカニズムを解明する。すなわち、コミュニケーションの条件、状況、構造などを数理的に解析し、その脳内メカニズムを明らかにする。これは、例えばコミュニケーション障害の解明など現代社会が抱える深刻な問題の解決につながることを期待される。そこで、本研究では個体間相互作用における脳活動を脳波、脳磁図、fMRI、慢性電極などの方法で計測し、個体の脳活動が相互作用によって変化し新しい活動状態が生まれ、そしてそれがシステムレベルでの新しい様相の生成へと到る過程を調べる。このようなコミュニケーションの神経機構を解明するためにコミュニケーションロボットを構築し、特にロボットの子供とのコミュニケーションを調べることで、コミュニケーション可能な論理階型とその状況依存性を調べ、神経機構が表現すべき高次機能を明らかにする。

次に各研究項目において解決すべき課題を述べる。

A. 数理システム論

脳の柔軟で創造的な活動の原理を神経回路として捉える試みは半世紀に亘って神経回路理論と

して進められて来た。しかしながら、この伝統的なアプローチは等価な要素が一様な結合を持つことを大前提としたものであり、現在までにコミュニケーションの脳内機構の解明には到っていない。一方で最近の実験的研究では、脳の異なる部位の神経は時間スケールやその動的挙動において非線形で多様な性質を持つことが明らかになってきた。これらヘテロなシステムが様々な相互作用をすることで自らの振る舞いを規定するルールがシステムの中に生成され、異なる情報に関係を発見することが脳の働きである。研究項目 A では、こうした複雑な動的システムの情報創成原理を明らかにし、項目 B, C で得られる実験データの解析に関する方法と手段を提供する。

B. ヘテロ脳内システム間相互作用

最近の実験によると、システムとしての脳は複数の“内部状態”をもつ準安定な系であり、準安定状態としての脳波の引き込みと脱引き込みの連鎖によるカオス的遍歴が、コミュニケーション成立のための鍵になる脳活動ではないかと推測されている。コミュニケーションにおける脳の情報処理機構は感覚情報の入力に駆動されたボトムアップ型相互作用と、内在的な活動に依存するトップダウン型相互作用から成り立っている。例えば、感覚皮質はそれぞれ特定の物理刺激にボトムアップ的に応答する脳の領域とされてきたが、最近、脳活動イメージングによって例えば人間の聴覚野は音がなくても活動することが示され、他者の想起や状況の想像などのようなコミュニケーションにおけるトップダウン的な信号の必要性が示唆されてきた。これらの解明にはヘテロシステム間の相互作用による新しい様相の出現の問題が解決されなくてはならない。さらに、コミュニケーションには他者行為の理解のための感覚・運動統合が重要であると考えられ、それを実現するミラーニューロンシステムも、脳内の遠距離皮質間の相互作用における振動子ダイナミクスの引き込み協調によって実現されていることが示唆されてきた。しかしながら、従来のコミュニケーションのメカニズムの研究においては個体内システム相互作用のダイナミクスは考慮されておらず、この問題に関しても未だ詳細なメカニズムは明らかになっていなかった。研究項目 B では、コミュニケーションにおける脳内のヘテロシステム間相互作用による情報創成機構を主に人に対する実験研究で明らかにする。また、ラットのような小動物を使ってコミュニケーションで重要になるトップダウン・ボトムアップ神経機構の基本を解明する。項目 A と連動し、実験タスクの考案、ならびに新しい動力的なデータ解析を行う。項目 C の個体間相互作用における基本神経機構を解明し、項目 C で得られたデータの解釈を提供する。

C. 個体間相互作用

対人コミュニケーション場面での自律的な役割分担の発見と協調行動の生成は、社会的な文脈の中でのヘテロな個体間に新しい関係性が生まれることで異なる機能を創発させる脳の高次機能の一つであると考えられる。このとき新しい役割分担などの新状態が創発されると考えられる。この現象は、脳という行動主体が他者との相互作用によって自己の内部システムを変化させる動的学習の顕れであると考えられる。この動的学習の脳内表現をサル、ラット、人の実験を通じて実証して行く。また、人と人の相互作用を成り立たせる言語活動においても類似の構造が見出される。認知言語学や進化言語学の最近の研究では、新しい表現や意味の生成には類似性に基づいたアナロジー生成能力が利用されていることがわかってきた。このようなコミュニケーションに関わるシステム間相互作用について、個体と環境の相互作用を含め、個体間相互作用のダイナミクスをロボット研究とも連動

し、対応する脳内活動を解明することで明らかにしていく。研究項目 C では、項目 B と連動しコミュニケーションにおける認知の脳内情報表現を明らかにする。また、項目 A と連動し、実験タスクの考案、ならびに新しい動力的なデータ解析を行う。

3. 研究の方法と成果

方法

総括班は各研究項目間の共同研究を推進するとともに各研究項目に研究項目担当者をあて、各研究項目のグループ内の共同研究を推進する。総括班は総括班会議、全体会議を主催する。各研究項目、共同研究の進捗状況に応じて総括班代表者、分担者に内部審査委員、外部有識者を加えた幹事会を開催する。これらにおいて、平成22年度以降毎年実施するDynamic Brain Forumの準備、また平成23年開催のICCN2011と平成25年開催のICCN2013の準備も合わせて行う。総括班会議において、各研究項目間の共同研究の準備を行う。博士研究員、ポスドクの募集を統一的に行い、各班における雇用開始を補助する。平成22年度、24年度の公募班募集により計画研究を補完し、領域研究を強化する。また、領域のホームページを立ち上げ、研究活動などを逐次公開し広報に努める。さらに、理化学研究所に事務局を置くDynamic Brain Platform内に領域のプラットホームを構築し、班員間のディスカッションや共同研究のためのデータ取得を行う非公開ページと領域ホームページとリンクする公開ページの両方を構築する。これらを円滑に推進するために、領域の総括として津田一郎、総括補佐として西浦廉政、領域事務局として水原啓明、企画調整として大森隆司、乾敏郎を配置する。また、研究項目 A, B, C の項目担当者としてそれぞれ金子邦彦、山口陽子、大森隆司を配し、領域間の共同研究、特に理論と実験の共同研究体制を確立する。

成果

A 数理システム論では、サブ研究項目 A-1 脳ヘテロシステムの複雑系理論、A-2 複雑系数理を立て研究を行った。B ヘテロ脳内システム間相互作用では、サブ研究項目 B-1 脳内ヘテロシステム論、B-2 個体間コミュニケーションの脳内情報表現を立て研究を行った。C 個体間相互作用では、サブ研究項目 C-1 動的インタラクションによるコミュニケーション機能の発生、C-2 コミュニケーションを支える基盤メカニズムを立て研究を行った。

各計画研究と公募研究が有機的に相互作用し、機能したことで、領域全体としては多くの研究成果が上がった。全体で290に上る原著論文、全体で760に上る基調講演、特別講演、招待講演を含む国際会議、国際シンポジウム講演を行った。また39の著書の出版があった。

また、総括班会議において、C 班のロボット研究と言語研究について、その提案内容を専門家を交えて詳細に検討し、数理理論、力学系理論、身体性理論の立場から新たな提案を行い、研究計画の修正を行うなどした。これにより、研究は大きな成功を収めるに至った。さらに総括班は、関連する脳機能の測定、解析に関するC班とB班の計画班間の共同研究を推進し、大きな成果を上げることに寄与した。さらに、総括班はA班とB班、B班とC班の計画班間、および計画班と公募班間の共同研究を企画し、これを推進し大きな成果を上げることに寄与した。

総括班はDynamic Brain Forum(DBF)を組織して、領域研究を世界レベルに拡大することに努めた。領域研究期間中のDBFは2011年日本、ニセコ、2012年スペイン、カルモナ、2013年スウェー

デン, シグトゥナで開催した. また, 認知神経ダイナミクスの国際大会である ICCN (ICCN2011, 日本, ニセコは主催, ICCN2013 スウェーデン, シグトゥナは共催)を組織するとともに, 領域研究の成果を発表した. 最終年度に, Neural Networks 誌と Neuroscience Research 誌のそれぞれの special issue に領域研究成果及び成果概要を発表した.

さらに総括班は, A 班の理論研究班の若手研究者を B 班の実験研究班や類似の研究を行っている米国ミネソタ大学の D. Redish 教授のところへ送り込み実験データの理論解析を実験研究者と共に行う経験を積ませた. その成果は共著論文の発表にとどまらず, 若手研究者の意識や研究スタイルを良い方向に変えるのに役立ったと思われる.

また, 総括班はサイエンスカフェや高校生理科教室を通じて, 研究成果を社会に広く広めるとともに次代を担う若者にコミュニケーション神経情報学研究は言うに及ばず, 広く脳科学や複雑系科学, さらには数学的思考の実験科学への関わりの意義について広報した. アンケート調査の結果, これらのアウトリーチ活動は大きな成功をおさめたと言える. また, 総括班は理化学研究所に本部を置く DBPF (Dynamic Brain Platform) と連携をとり, 領域研究成果を DBPF に公開し, 領域内での最新の成果の共有を効率的に進めるとともに, いち早く研究成果を社会に公開できる仕組みを作った. アウトリーチ活動の締めくくりとして最終年度に日本科学未来館にて公開シンポジウムを行い, アンケート調査の結果は大変好評であった.

次に, 研究において特に目立った成果の概略を述べる.

研究項目 A では, 学習, 動的記憶, 神経回路の再構築に関する新しい理論が数学モデルとともに構築された. コミュニケーションの間に相手からの情報を受け取りそれを保持し自分の記憶構造を壊さないで新しい記憶を作っていく仕組みが明らかになった. また, 記憶をアトラクターとする従来の説とは異なり, 入出力の関係がアトラクター化され, 記憶はそこへ至る分岐構造に反映されるという新しい学習方式が提案された. さらに, 神経回路の一部が欠損した時にネットワークを再構築する数学モデルが提案され, 余次元3の分岐構造との関係が明確になる可能性が出てきた. また, 新しい自己組織化理論が提案された. 従来の自己組織化理論はマイクロな要素の相互作用によってマクロな秩序が生成される仕組みに関するものである. ここではこの現象を第一種自己組織化と呼ぶ. これに対して, 本領域において, 第二種自己組織化と呼ぶべき現象を明確にした. マクロに制約条件が与えられたときに要素が機能分化, 構造分化を起こす現象は生命現象のような複雑系では普遍にみられるものである. 胚発生や脳の機能分化はその典型例である. この第二種自己組織化の可能な一つの仕組みが提案され, 数学モデルによって具体例が与えられた.

研究項目 B では, 人と人の交互タッピングなどで, 運動性 α 波である μ 波と γ 波に同期が取れた行動か否かで特徴的な違いがあることが発見された. さらには, 鏡に映った指の運動をまねる実験において, 自己と他者の認識の違いが脳波に現れることが発見され, 身体性と自己・他者認識の脳内機構解明に大きく前進した. さらに, B 班と A 班の共同研究においても重要な成果が得られた. 実験データ解析を理論グループが行うことによって, 新しい切り替え写像力学系の存在が明らかになり, 発展型力学系や非自励型力学系の理論構築に大きく寄与することとなった.

研究項目 C では無意味記号の交換によるコミュニケーションゲーム課題において, 共通知識の獲得には共通基盤の確立, シンボルシステムの共有, 役割分担の三つの段階が必要であることが明らかになり, これらに特徴的な脳活動が脳波レベルで発見された. また, C 班と B 班の共同研究におい

て、健常者と自閉症児でタッピング課題遂行時の脳波に顕著な違いが現れることが分かった。この研究成果は自閉症患者の特徴づけにとどまらず将来脳波を外部から操作するなどしての治療に道を開くものとして注目される。

上で述べたように、理論系の若手研究者を国の内外の実験系の研究室に滞在させることで、データ解析の共同研究、新しい数学モデルの構築に進展が見られた。総括班主導で効果的なグループの組み合わせを考え共同研究を推進したことで、新しい研究の方向性が生まれた。特に、前期において研究の進行とともに補強強化すべきであると判明した点について新しい公募班を採用し、計画班との共同研究を推進したことで、研究が爆発的に進展し、画期的な成果が上がったことは、総括班の役目が十分に果たされた結果であると考えている。

ヘテロ複雑システムによる コミュニケーション理解のための神経機構の解明

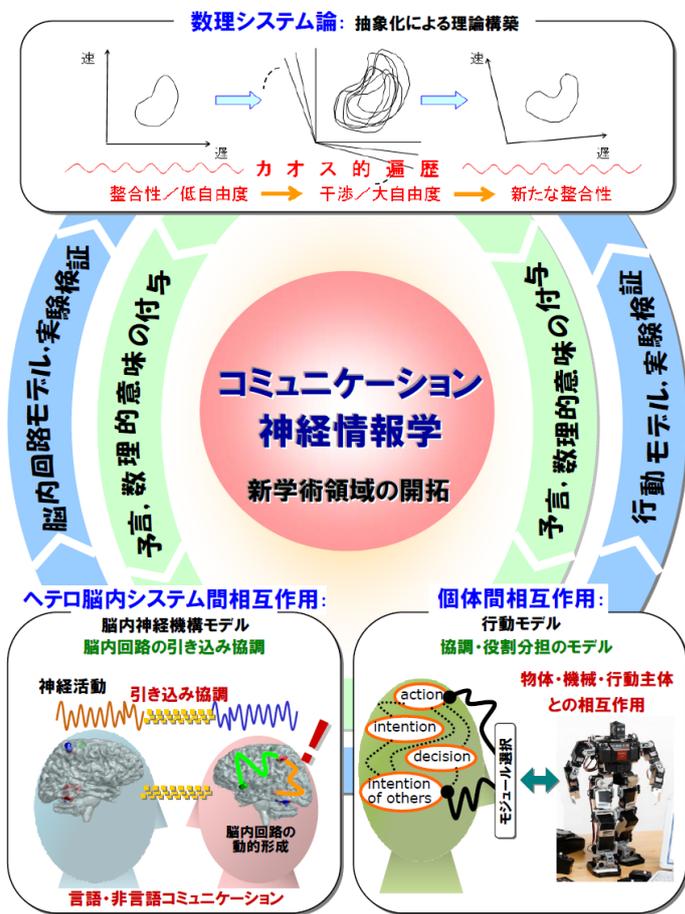


図1 領域共同研究によるコミュニケーション神経情報学の開拓

- [5] Y. Li, I. Tsuda, “Novelty-induced memory transmission between two nonequilibrium neural networks”, *Cognitive Neurodynamics*, 7(3), 225-236, 2013, DOI: 10.1007/s11571-012-9231-z
- [6] I. Tsuda, “Chaotic itinerancy”, *Scholarpedia*, 8(1):4459, 2013, DOI: 10.4249/scholarpedia.4459
- [7] H. Kang, I. Tsuda, “Dynamical analysis on duplicating-and-assimilating process: Toward the understanding of mirror-neuron systems”, *J. of Integrative Neuroscience* Vol.11, No.4 pp363-384, 2012, DOI: 10.1142/S0219635212500240
- [8] H. Mizuhara, “Cortical dynamics of human scalp EEG origins in a visually guided motor execution”, *NeuroImage*, Vol. 62(3), 1884-95, 2012, DOI: 10.1016/j.neuroimage.2012.05.072
- [9] I. Tsuda, “Chaotic Dynamics, Episodic Memory, and Self-identity”, *Advances in Cognitive Neurodynamics(II): Proceedings of the Second International Conference on Cognitive Neurodynamics - 2009*, eds. R. Wang and F. Gu, Springer pp11-18, 2011, DOI: 10.1007/978-90-481-9695-1_2
- [10] S. Kuroda, Y. Fukushima, Y. Yamaguti, M. Tsukada, I. Tsuda, “Emergence of Iterated Function Systems in the Hippocampal CA1”, *Advances in Cognitive Neurodynamics(II): Proceedings of the Second International Conference on Cognitive Neurodynamics - 2009*, eds. R. Wang and F. Gu, Springer, pp103-106, 2011, DOI: 10.1007/978-90-481-9695-1_15
- [11] Y. Yamaguti, S. Kuroda, Y. Fukushima, M. Tsukada, and I. Tsuda, “A Mathematical Model for Cantor Coding in the Hippocampus ” , *Neural Networks* 24, pp43-53, 2011, DOI: 10.1016/j.neunet.2010.08.006
- [12] S. Tadokoro, Y. Yamaguti, H. Fujii, I. Tsuda, “Transitory Behaviors in Diffusively Coupled Nonlinear Oscillators ” , *Cognitive Neurodynamics* 5(1), pp1-12, 2011, DOI: 10.1007/s11571-010-9130-0
- [13] H. Kang, I. Tsuda, “On embedded bifurcation structure in some discretized vector fields”, *CHAOS* 19, 033132-1 - 033132-12, 2009, DOI: 10.1063/1.321293
- [14] S. Kuroda, Y. Fukushima, Y. Yamaguti, M. Tsukada, I. Tsuda, “Iterated function systems in the hippocampal CA1 ” , *Cognitive Neurodynamics* 3(3), pp205-222, 2009, DOI: 10.1007/s11571-009-9086-0

計 画 班

動的脳の情報創成とカオスの遍歴の役割

北海道大学電子科学研究所・教授 津田一郎

概要

本研究は[1] 脳内ヘテロシステム間相互作用系, [2]ヘテロ力学系ネットワーク系, [3] ランダム力学系のサブテーマで行った. [1]ではホジキン・ハクスレー型ニューロンのネットワークモデルを基盤にして, 動的連想記憶を実現し, これを視覚性幻覚のモデルに発展させた. [2]ではカオス力学系のヘテロ結合モデルと新しい学習則を提案した. [3]ではラットの行動実験における海馬の活動を定式化できることを発見した. どの系においてもカオスの遍歴が基礎になっていることが明らかになった. さらに, システムが拘束条件から成分(部品)を分化させる新しい自己組織化原理を提案した.

Abstract

This research consists of the following three sub-themes: [1] Intra-brain hetero-interactions, [2] hetero-coupled dynamical systems, [3] random dynamical systems. In [1], we established a network model of Hodgkin-Huxley type of neurons, based on which a dynamic associative memory was realized. This model was extended to a model for complex visual hallucination. In [2], we proposed a model for hetero-interactions of dynamical systems, and also a new learning algorithm. In [3], we found a new dynamical system embedded in the data of activity of place neurons in rat hippocampus, such that the probabilities of renewal of dynamics change in time. Furthermore, we proposed a new principle of self-organization as the second order, in which components or elements are differentiated under the constraints at a macroscopic level of system.

1. 研究開始当初の背景

池田, 金子, 津田は大自由度力学系の新状態であるカオスの遍歴を共同で提唱し, 各々具体的なモデルを構築した. カオスの遍歴は近年数学的にも研究され, 類似の遷移過程はサドル・ノード分岐を介した遷移現象として国内外で活発に研究されてきた. 脳内ダイナミクスに関して, トップダウン“注意”に伴うアセチルコリン・ネットワークの構造と役割についてのデータが発見された. 関連して, 代表者が提案した擬似アトラクタの脳における役割(Tsuda, 1984; 1992)も, Freeman, Haken, Varela, Kayらによって活発に研究され始めた(Freeman 1995). 大域擬似アトラクタの動的・過渡的な出現が広域なヘテロ領野間の過渡的同期現象を説明し, さらには知覚・認知の神経基盤を与えるとする仮説が藤井らによって提案された(Fujii et al, 2007). さらに, 代表者は 海馬におけるコントロールコーディングの理論的予言を行い, 玉川大学グループの実験によってその一部が検証された(Fukushima et al, 2007). また代表者はサル連続連想と推論に関する理論モデルを提案し, 玉川大学グループの坂上らによって実験的に検証された(Pan et al, 2008).

さらに, 最近, 計測技術の進歩とともに脳のよりダイナミックな活動状態が観測できるようになり, 脳の複雑な遷移過程を伴うダイナミクスとその機能的意味に関する研究が注目を集めるに至った. 遷移過程は非定常で反復され“カオスの”である. それらは脳の自発的な活動, いわゆる ongoing activity においても, 刺激存在下での動物の情報処理段階でも見いだされていた. Ongoing activity

に関しては、視覚野で視覚属性を表現する脳活動が常に自発的に表れる(Kenet ら, 2003)という報告や、刺激に独立な思考過程が default network によっておこる(Mason ら, 2007)という報告などがある。また、刺激存在下のダイナミクスに関しては、閾値下での神経活動の局所集合電位(LFP)に自発的で非定常な同期、脱同期の反復が観測され(Gray ら, 1992), さらには嗅球脳波や皮質脳波にカオスの遍歴的な遷移過程が観測されるとともに(Skarda & Freeman, 1987; Freeman 2003, 2006), 嗅皮質, 海馬, 内嗅野にいたる広い範囲にわたっても遍歴的な電位変化が見られた(Kay ら, 1996). これら遷移過程が知覚, 判断, 行動という一連の情報処理に関係していることが示唆されていた。また, エピソード的な短期記憶を長期記憶へと移行させるのに必須の場所として知られている海馬 CA3 の培養組織において, 複数の神経活動状態間の遷移が観測された(Sasaki ら, 2007). これらの脳内の動的遷移過程はコミュニケーションにおける他者理解に必要なエピソード的な短期記憶や瞬時の判断などの認知過程に必要な機構であると推察される。

まとめると, 最近の実験事実は, 脳システムは複数の“内部状態”をもつ準安定な系であり, 情報処理の準備段階, 処理過程ともにそれらの準安定状態間の“カオス的”な遷移過程と $\gamma - \theta$ 帯域における領野間の広域的な過渡的同期が認知の過程であるという見方を示唆していた。これらの事から, 代表者らは, 中隔-海馬-皮質相互作用系, 内側前頭皮質-マイネルト核-大脳新皮質注意回路系などの広域的なヘテロシステムの相互作用系の情報創成におけるカオスの遍歴の役割に関する研究を着想した。これを実行するために次の三つのサブテーマを設けて研究した。それぞれの背景は以下のとおりである。

(1) 脳内ヘテロシステム間相互作用系

海馬 CA3-CA1 相互作用系はこの典型であり, 多くの研究があるが, 代表者たちは, CA3 でのカオスの遍歴によるエピソードの再生産とその CA1 におけるコントロールコーディングを発見した。また, 上に述べたように, 嗅皮質, 海馬, 内嗅野にいたる広い範囲にわたってもカオス的で遍歴的な電位変化が見られた。さらに脳内の広範囲でデフォルトモードネットワークの存在が指摘され, 自発活動についても多くの報告があった。さらに, トップダウン注意に関するアセチルコリンの役割に関する報告もあり, 視覚経路, 前頭前野, 側頭葉など広範囲にわたる軸索経路の存在とその欠損による視覚性幻覚が特にレビー小体型認知症患者において見出されていた。

(2) ヘテロ力学系ネットワーク系

従来の力学系の結合系は結合写像格子(CML), 大域結合写像(GCM), 振動子の結合系など, いずれも同一の力学系の同一変数間の結合であった。脳のようなヘテロな結合系を研究するためには, 異種の力学系の結合か, 同種力学系の異種変数間の結合を研究する必要がある。大脳新櫃は同種の機能モジュールから構成されていることは古くから知られているが, 均質な機能モジュールの集合は結合が対象ではないことが知られている。例えば, 下位モジュールの表層(1層-3層)は上位モジュールの4層に結合し, 上位モジュールの深層(5-6層)は下位モジュールの表層と深層に結合する。

(3) ランダム力学系

力学系にノイズ項が付いた系は統計物理では多自由度の系を少数自由度の力学系とその剰余としての雑音項に分離して扱う。通常はこれを確率微分方程式として定式化するが、最近のランダム力学系の研究では、力学系の諸概念がノイズ項があることにより変更されるか否か、あるいは拡張される必要があるかどうかに興味の対象になっている。さらに、ノイズ項を一般に非定常入力と考えると、非自律型力学系になり、脳のような、特にコミュニケーションをしている脳のような非定常入力を受けるシステムの基礎研究には欠かせない道具立てを与えることになる。

2. 研究の目的

(1) 脳内ヘテロシステム間相互作用系

海馬 CA3-CA1ヘテロ相互作用系のカオス的遍歴—コントロールコーディングを確立し、コントロールコーディング成立の条件を明らかにする。ホジキン・ハックスレー型の生理ニューロンモデルを結合した神経回路モデルによって動的連想記憶を実現し、 γ 帯域と θ 大域のような異なる周波数領域の入力の情報処理様式を明らかにし、これを拡張して視覚性幻覚のモデルを構築する。さらに、異なる連想記憶回路の結合系により、コミュニケーション時の短期学習と記憶保持の関係を明らかにする。抽象的なレベルにおいてミラーニューロンシステムのモデルを提案する。

(2) ヘテロ力学系ネットワーク系

大脳新皮質機能モジュール間のヘテロ結合を参照して、異なる変数間の結合を導入した結合力学系のモデルを作り、そのダイナミクスと情報の関係を明らかにする。さらに、脳の機能モジュールがいかに生成されるかに関する数理モデルを提案する。

(3) ランダム力学系

従来の力学系は入力がないことが前提であるので、これを入力付の力学系として拡張し、非自律力学系としてそのダイナミクスの特徴を調べる。他の班において得られるコミュニケーション課題の実験データを解析し、非自律力学系の特徴を抜き出す。

3. 研究の方法と成果

(1) 脳内ヘテロシステム間相互作用系

海馬 CA3-CA1 相互作用系を生理学的に認められたホジキン・ハックスレー型ニューロンモデルであるピンスキー・リンツェルの 2-コンパートメントモデルとワン・ブジャーキモデルを基に構築し、まず CA3 で学習した記憶間のカオス的遍歴が生まれることを確認した。すなわち、動的連想記憶はホジキン・ハックスレー型ニューロンのような生理学的なニューロンモデルのリカレントネットでも実現されることが確認された。次にそのダイナミクスが CA1 に入力されたときコントロールコーディングが可能な条件を求め、入力パターン間の間隔が約 30 ミリ秒—200 ミリ秒であるならばコントロールコーディングは可能であるということが分かった。これは γ 帯域から θ 帯域までの入力ならこのコーディングが可能であることを意味している。さらにコントロールコーディングが復号化されるかどうかを調べた。コントロールコーディング可能な状態でのニューロンの活動分布がきれいな二山分布であり、谷がニューロンの発火に対する閾値に一致していることから、復号化は二値情報(閾値より上か下か)によって行

える可能性がある。二値で復号化した時にどれだけの情報量がコントロール集合が持っていた情報を表現するかを計算した結果、約80%の情報が二値で再現できることが分かった。さらに、CA1がどのような距離空間でパターン分離を行っているかを調べ、ハウスドルフ距離である可能性があることが指摘できた。

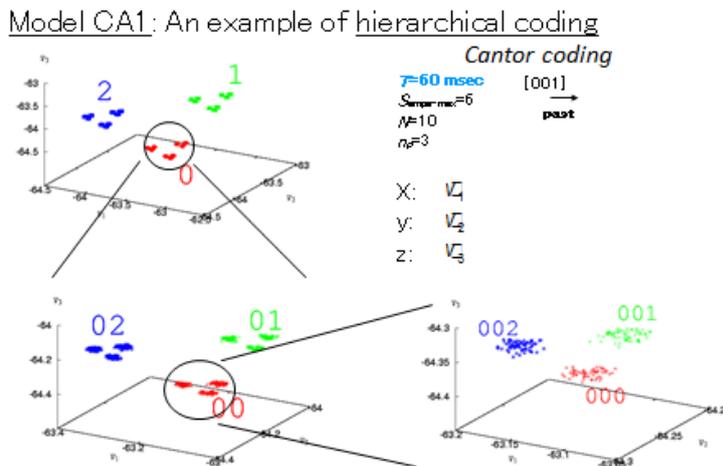


図 1 ピンスキー・リンツェルの 2-コンパートメントモデル(錐体細胞)とワン・ブジャーキモデル(介在型抑制細胞)からなる海馬 CA1 の神経回路モデルが示すコントロール集合的な活動状態。これにより入力時系列の相空間での階層的符号化が可能になる。

さらにこの基礎ニューロンモデルによって動的連想回路が作られるという前段の研究結果をもとに、 γ 波と θ 波の異なる時系列が回路網に同時に入力されたとき、同期のタイミングをうまく使うことで時間切り分けで処理できることが分かった。

さらに、このモデルを脳の大域結合である視覚性入力がある前頭前野と側頭葉の相互作用系に適用した。この大域的な結合に欠損があると視野の一部に現実の入力とは異なる視覚像が形成されるという幻覚の数理モデルを作ることができた。これはレビー小体型認知症患者でしばしば観察される視覚性幻覚の神経機構を解明するためのモデルとして今後重要になってくると思われる。

また、異なる記憶を学習した二つの動的連想回路を結合させ、自己の記憶を破壊しないで互いの記憶をいかに学習するかを研究した。個々の連想回路は自身にとって新規なパターンが入力されたときのみ学習するという新規性学習を導入すると、自身の記憶を保持したまま相手の記憶を学習することができることが分かった。これはコミュニケーション時に短時間で相手からの情報を保持しつつ自己の記憶を保持し記憶空間を拡大することで更新していく仕組みを明らかにするものである。

コミュニケーションにとって重要な機能の一つにまね機能がある。いわゆるミラーニューロンシステムとして知られている神経回路の大域結合がある。これをまず抽象的なレベルで構築し、力学系としての特徴を抽出した。二つのシステムは互いに似たダイナミクスを行いながら複雑な分岐を繰り返し、動く不動点を経て静止した同一不動点に互いに収束する。互いの情報を得ながら互いに真似をす

るというダイナミクスは実は非常に複雑なダイナミクスの過程を経て達成され得るということが明らかになった。

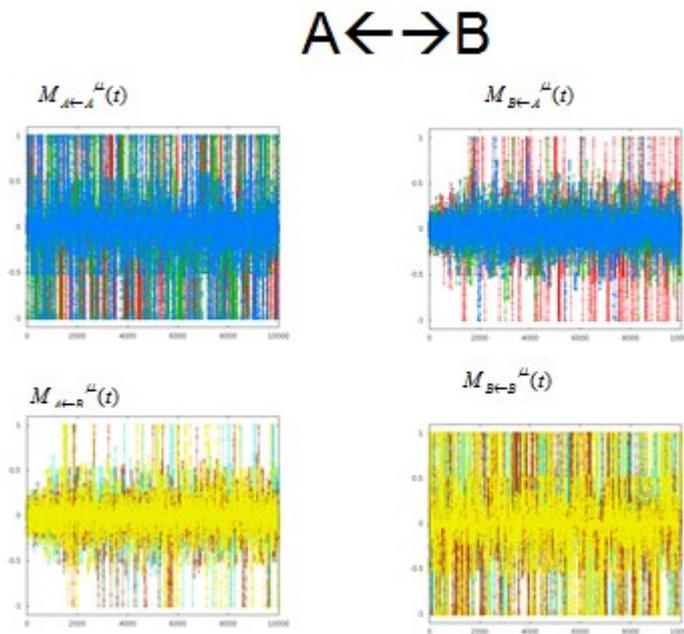
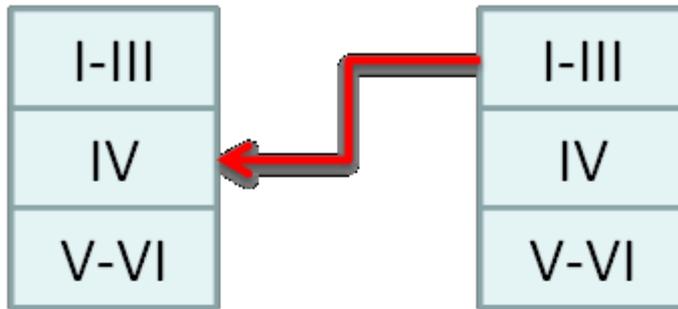


図 2 リカレントネットに新規性学習を適用した結果, 自分の記憶を保持しながら相手の記憶を学習し, それらすべてを想起することができる. (左上)システム A は自身の記憶をダイナミックに想起する. (右下)システム B は A とは異なる自身の記憶をダイナミックに想起する. (右上)システム B は A の記憶も学習し, それらをダイナミックに想起することができる. (左下)システム A は B の記憶も学習しそれらをダイナミックに想起することができる.

(2) ヘテロ力学系ネットワーク系

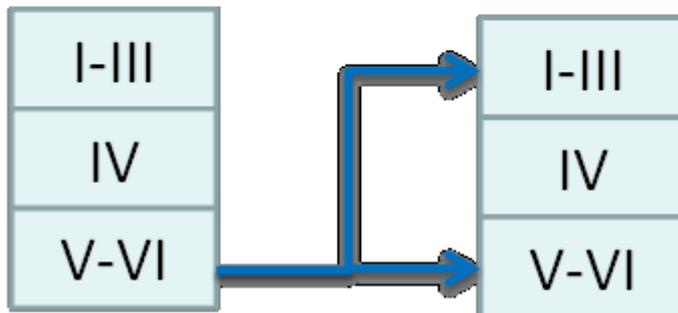
大脳新皮質の表層, 入力層(4層), 深層を3変数で表現し, 大脳新皮質におけるモジュール結合を二つの同種力学系の異種変数結合系で表現した. 具体例としてレスラー方程式を使用した. この要素力学系の選択にさほどよらない性質として, 互いの位相差がカオス的遍歴的に反転する現象がみられる. このときの情報の流れを見るために, 他からの情報の流れを移動エントロピーで計算した. その結果, 位相差の符号に応じて一方から他方への情報の流れが明確にあることが判明した.

Ascending couplings



“Higher”

“Lower”



Descending couplings

図3 大脳新皮質の層間の非対称結合様式. 上向性の結合は浅層から4層へ, 下向性の結合は深層から浅層と深層へと向かう. 浅層, 4層, 深層を x, y, z と異なる変数で現わし, 二つのモジュールをそれぞれ3変数力学系で現わしたとき, 二つの力学系の結合は $x \rightarrow y$ と $z \rightarrow x, z$ という具合にヘテロになる. こういったヘテロ結合の一般的性質を研究した.

新しい自己組織化原理を提案した. 従来の自己組織化原理はマイクロな要素が相互作用することでマクロな秩序が生成される仕組みに関する原理である. これをここでは第一種自己組織化原理ということにする. 本新学術領域研究を行うことで, これとは異なる第二種自己組織化原理のモデルを構築することができた. 第二種自己組織化原理は次のように記述することができる. システムに拘束条件が与えられたとき, それを変分的に使うシステム内に成分あるいは要素が分化してくる仕組みに関する原理である. 胚発生や脳の機能分化の原理を与えるものと考えられる. ここでは二つのモデルを研究した.

1. ニューロン型力学系の分化

関数空間のある部分空間からランダムに初期関数を選択し, 時間離散の力学系を構成し, それらを結合する. 外部から情報を入力し, それが結合システム全体に最大伝搬することを拘束条件に定める. 遺伝的アルゴリズムを使って力学系のパラメーターを変化させ, 上記の拘束条件を満足するよ

うに力学系を選択する。進化が定常に達した時、興奮型力学系が定常的に選択されるようになった。これはニューロンが如何に生物進化の過程で生まれてきたかに関する神経機構に示唆を与える結果である。

2. 機能モジュールの分化

ランダムな一様結合をもつ振動子型力学系のネットワークに伝搬情報量最大という変分を置くと、互いにダイナミクスの異なるモジュールが分化してくることが分かった。一つのモジュールは個々の力学系が同位相で振動し、他のモジュールは同位相で振動するものが支配的ではあるが他の位相関係も含まれており、これら分化したモジュール間の力学系の結合はまた同位相同期と逆位相同期に分化した。この結果は脳の機能モジュールが神経発達の過程で如何に生まれてきたかに関する神経機構に示唆を与える結果である。

(3) ランダム力学系

B 班のローレンス班(公募班)が発見したラット海馬の場所ニューロンの複雑な位相歳差運動のデータを共同で解析した。その結果、単一の力学系では説明できず、複数の力学系の切り替え写像においてその切り替え確率を時間的に変化させることで様々な位相歳差運動が生成できることを発見した。この状態を二次元空間に射影すると定義域が部分的に重なった力学系に見えるが、この重なりを取り除くと変化する確率を持つ切り替え写像系として定式化できることが分かった。この結果はラットが紋切り型ではない開拓型の学習をするときに熟慮行動が始まる直前に起こることから、創造的な学習に際して、海馬のダイナミクスが力学系を切り替える仕方を変化させながら学習することを示しており、脳のダイナミクスを数学的に記述する新しい方法の提案につながるものである。一般に切り替え写像系は非自律力学系の一種と考えられるが、この観点からは、その入力依存性を変化させる法則をさらに脳が生み出していることになり、脳の階層的なルール生成を示唆する結果である。

参考文献

- [1] Y. Yamaguti, I. Tsuda, Y. Takahashi, “Information flow in heterogeneously interacting systems”, *Cognitive Neurodynamics*, 8(1), pp17-26, 2014, DOI: 10.1007/s11571-013-9259-8
- [2] T. Kanamaru, H. Fujii, K. Aihara, “Deformation of Attractor Landscape via Cholinergic Presynaptic Modulations: A Computational Study Using a Phase Neuron Model”, *PLoS One*, Vol.8 Issue 1, e53854, 2013, DOI: 10.1371/journal.pone.0053854
- [3] H. Tsukada, Y. Yamaguti, I. Tsuda, “Transitory memory retrieval in a biologically plausible neural network model”, *Cognitive Neurodynamics*, 7(5), pp409-416, 2013, DOI: 10.1007/s11571-013-9244-2
- [4] Y. Li, I. Tsuda, “Novelty-induced memory transmission between two nonequilibrium neural networks”, *Cognitive Neurodynamics*, 7(3), 225-236, 2013, DOI: 10.1007/s11571-012-9231-z
- [5] Y. Fukushima, Y. Isomura, Y. Yamaguti, S. Kuroda, I. Tsuda, “Inhibitory Network Dependency in Cantor Coding”, *Advances in Cognitive Neurodynamics (III), Proceedings of the Third International Conference on Cognitive Neurodynamics - 2011*, ed. Y. Yamaguchi, Springer,

pp635–640, 2013, DOI: 10.1007/978-94-007-4792-0_85

[6] I. Tsuda, “Chaotic itinerancy”, Scholarpedia, 8(1):4459, 2013, DOI: 10.4249/scholarpedia.4459

[7] T. Aoki, T. Aoyagi, “Scale-Free Structures Emerging from Co-evolution of a Network and the Distribution of a Diffusive Resource on it”, Physical review letters, Vol. 109(20), 208702, 2012, DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.208702

[8] H. Kang, I. Tsuda, “Dynamical analysis on duplicating-and-assimilating process: Toward the understanding of mirror-neuron systems”, J. of Integrative Neuroscience Vol.11, No.4 pp363–384, 2012, DOI: 10.1142/S0219635212500240

[9] 津田一郎, “脳を創造する共創の場”, 計測と制御, Vol.51, No.11, pp1056–1058, 2012, <http://www.sice.or.jp/~journal/journal/sice51-11.html>

[10] H. Fujii, T. Kanamaru, K. Aihara, I. Tsuda, “A New Role for Attentional Corticopetal Acetylcholine in Cortical Memory Dynamics”, AIP Conference Proceedings Vol. 1389 “International Conference on Numerical Analysis and Applied Mathematics 2011”, eds T. E. Simos et al., American Institute of Physics, pp1340–1343, 2011, DOI: 10.1063/1.3637868

[11] S. Kuroda, Y. Fukushima, Y. Yamaguti, M. Tsukada, I. Tsuda, “Emergence of Iterated Function Systems in the Hippocampal CA1”, in Advances in Cognitive Neurodynamics (II): Proceedings of the Second International Conference on Cognitive Neurodynamics - 2009, eds. R. Wang and F. Gu, Springer, pp103–106, 2011, DOI: 10.1007/978-90-481-9695-1_15

[12] Y. Yamaguti, S. Kuroda, Y. Fukushima, M. Tsukada, and I. Tsuda, “A Mathematical Model for Cantor Coding in the Hippocampus ”, Neural Networks 24, pp43–53, 2011, DOI: 10.1016/j.neunet.2010.08.006

[13] H. Kang, I. Tsuda, “On embedded bifurcation structure in some discretized vector fields”, CHAOS 19, 033132-1 - 033132-12, 2009, DOI: 10.1063/1.321293

[14] S. Kuroda, Y. Fukushima, Y. Yamaguti, M. Tsukada, I. Tsuda, “Iterated function systems in the hippocampal CA1 ”, Cognitive Neurodynamics 3(3), pp205–222, 2009, DOI: 10.1007/s11571-009-9086-0

ヘテロな動的パターンの相互作用の数理的解明とその生命科学への展開

研究代表: 東北大学原子分子材料科学高等研究機構・教授 西浦廉政

概要

時空間での外的環境の変化に対し、システムがどのようにダイナミックに適応するかを、ヘテロ環境下での空間局在パルスの自発生成、経頭蓋磁気刺激(TMS)に対する脳波の同期・脱同期現象、そして外的環境変化に対する柔軟なアトラクター遷移を中心に研究を実施した。パルスの自発生成においては、縮退したバタフライ型2重ホモクリニック点が組織中心であることが明らかにされた。TMSによる位相リセット及びその空間伝搬については多重内部状態を有する集団振動子モデルで説明が可能となった。ループ探索機能やその修復等の柔軟なアトラクター遷移を表現できる数理モデルの提案を行った。

Abstract

We investigated how the system responds to an environmental change in space and time for the following cases: self-generation of traveling pulses at the defect points in the media, synchronization and de-synchronization of EEG by the stimulus of TMS, and a flexible switching of attractors in response to the environmental change. As for the pulse-generators, it was found that double-homoclinic-loop of butterfly type plays an organizing center from dynamical system point of view. An oscillator network model of FHN type with multiple internal states was presented to explain the above dynamical behaviors of EEG. Also it was shown that such a network model has a spontaneous loop-finding ability and robust against the destruction of such structure.

1. 研究開始当初の背景

(1) 空間ヘテロ構造に由来する動的パターンの自発生成の解析

時間的振動パターンが空間ヘテロ構造あるいは化学物質の非一様分布に起因して空間周期構造を誘発する機構は生命の胚発生から化学反応まで極めて広く存在する。それらは情報の生成と伝搬を担っており、さらに非一様性の形状や強さによりそのパターンは多彩である。そのような自発的なパターン生成機構やその制御はパターン相互のコミュニケーションにとって本質的であるが、その数学的解明は未解決問題として残されていた。

(2) 脳波状態に依存する情報伝播効率

ヒトの脳内ダイナミクスでは、神経細胞の発火タイミングや脳波リズムの同期・脱同期現象などの協同現象が観察されており、それらは脳機能の制御等に重要な役割をしていると考えられている。本研究では、開眼・閉眼時に観察される脳波状態の変化に着目し、その機能的役割について考察する。従来の研究では、開眼時に比べ閉眼時におけるアルファ帯の脳波パワーが高いことが知られていた。しかし、そのような脳波パワーの変化がどのような機能的役割を果たすかについて数理的理解には至っていなかった。

(3) 環境変化に対して柔軟なアトラクター遷移を実現する数理モデルの作成

ヒト同志がコミュニケーションを取る際は脳波の同期状態が観察されることが報告されている。コミュニケーションを成立させるためには、時々刻々と変化する状況に対して適切な応答を示す必要がある。そのため、コミュニケーション時における脳内ダイナミクスを理解するためには、予期せぬ環境変化に対する脳波同期ネットワークの適切な制御機構を理解することが必要であると考えられる。

脳内ダイナミクスを力学系として考察する際には、外界の変化は方程式のパラメータ変化や境界条件の変化に対応すると考えられる。そのため、パラメータ変化に対して柔軟にアトラクターを遷移させる仕組みを解明できれば、コミュニケーション時における脳波の機能的役割を解明するための新たな実験デザインの提案が可能になると期待される。

2. 研究の目的

(1) 空間ヘテロ構造に由来する動的パターンの自発生成の解析

コミュニケーションを相互作用による情報の交換ならびにその交換を通しての自分と相手へのフィードバックダイナミクスと捉え、主体としての個(individual)が存在し、豊かな内部ダイナミクスをもつ典型例の一つとして散逸系における粒子解ダイナミクスがある。1次元におけるその典型例がパルスであり、媒質の非一様性に起因するその自発的生成機構の力学系的見地からの解明を行う。非一様性への依存性や生成パルスの分類を統一的に行うために、生成機構の組織中心の同定が極めて重要な課題となる。

(2) 脳波状態に依存する情報伝播効率

脳波ダイナミクスを再現する数理モデルの作成と、数理モデルに対する数値実験による現象の再現により、脳波パワーの変化の機能的意義を考察する。脳波ダイナミクスを再現する数理モデルを作成するために、実験的に観察される特徴的なダイナミクスを定性的に再現するモデルを作成することを試みる。B01G1 班の北城らは経頭蓋磁気刺激(TMS)を用いた実験によって、脳波の位相リセット状態が空間伝播することを示した。さらに、開眼・閉眼時の場合に実験を行った結果、磁気刺激を加える直前の脳波パワーが低いときよりも高いときの方が、TMS 印加後の位相リセットが起きにくいことを示した。

しかし、神経細胞レベルのダイナミクスで考えると、脳波のパワーが高い状態では神経細胞の活動の協同現象が起きていると考えられるため、TMS 時印加時の神経細胞群の位相が閉眼時の方が開眼時のそれよりも揃っていることが期待されるが、実験結果はその逆を示している。この現象が観察される数理機構を解明することを目的に数理的アプローチによる研究を行った。

(3) 環境変化に対して柔軟なアトラクター遷移を実現する数理モデルの作成

(a) 脳波モデルによる柔軟なアトラクター遷移の実現

外部環境変化に対して柔軟なアトラクター遷移を実現する上で、外部刺激を脳内に伝えるフィードフォワードの情報の流れと結果を評価するためのフィードバックの情報の流れの両方が重要であると考えられている。そこで、フィードフォワードとフィードバックからなるネットワークにおいて、柔軟

なアトラクター遷移を実現するために必要なノードが有すべき非線形性と分岐構造, 及びノード間制御ルールを解明することを試みた. この研究を行うことによって, 局所的な神経ネットワークの切断や境界条件の変化に対して新たなアトラクターを自発的に発見する数理機構が明らかになり, 脳の自律分散的な数理機構の本質を理解できる.

(b) 柔軟なアトラクター遷移を実現する低次元モデルの提案

(a)で提案する脳波ダイナミクスに対する数理モデルでは, 各ノードが集団振動子で記述されているため高次元力学系となる. そのため, 分岐構造解析やダイナミクスの分類を行うことが一般的に困難である. ダイナミクスを定性的に再現する低次元モデルの作成が可能になれば, 現象を再現するための必要条件を数理解析しやすい形で示すことが可能になる. そこで, (a)で提案したモデルにおいて柔軟なアトラクターを再現する際に, 単一ノードが有すべきダイナミクスを定性的に再現する低次元モデルを提案することを試みる.

また, ネットワーク内の2点を繋ぐパスを自律分散的に発見するシステムを構築するために, 提案した低次元モデルを基に経路探索モデルの作成を試みた. また, 工学的な応用においてノード数の増加に対する経路探索時間の増加オーダーを減少させることはモデルを実装化する上で重要な問題となる. そこで, ネットワーク構造を改変し, 経路探索時間の短縮を試みる. この研究により, 脳の即時的なアトラクター遷移の数理機構の理解につながると期待される.

3. 研究の方法と成果

(1) 空間ヘテロ構造に由来する動的パターンの自発生成の解析

次のような力学系的方法論とホモクリニック軌道追跡数値計算法を主として用いる.

1. 余次元2近傍での縮退ホモクリニック軌道の開折ダイナミクスとその分類.
2. 開折パラメータの選択とそれによるホモクリニック軌道の数値的追跡.
3. 不安定多様体のオリエンタビリティの追跡

ホモクリニック軌道のパラメータに関する大域的追跡は数値計算として, 非常に負荷も大きく長時間の探索計算を要する. 西浦班で開発された大域軌道追跡計算手法は汎用性も高く, この課題においても大きな役割を果たした.

パルスジェネレーターパターン(図1(a))の出現機構を解明するために, 反応拡散型の数理モデルにジャンプタイプの空間不均一場を考慮した数理モデルの数値解析を行った. 定常パルスと振動パルスの大域的な分岐解析を行い, 定常パルスがジャンプの高さが小さいときまたは大きいときに安定に存在すること, その安定性がホップ分岐によって失うこと, 及びホップ分岐点から現れる安定振動パルスが周期倍加分岐によって不安定化することを示した. このことで, パルスジェネレーターが定常解と振動解の双方ともに安定性を失った範囲でみられることを明らかにした.

数値シミュレーションを行い, パルスの発生方法に多様な規則パターンがあることを示した. これらのパターンは, ジャンプ近傍で振動するパルスの運動(breathing motion)と発射するパルスの運動(emitted traveling pulse)に着目することで区別することができる. 特に, ジャンプの高さを連続的に変えると, パルスが n 回発射した後に1回往復振動するパターン PG_n ($n=0, 1, 2, \dots$)の連続的な変化が

みられる。分岐構造解析の結果、 PG_{∞} のサドルノード分岐(SN)と PG_0 の周期倍加分岐(PD)の間のパラメータ領域で、パルスジェネレーターのカスケード構造を発見し、 n が大きくなるにつれ、分岐枝のU字形が小さくなり、パルスジェネレーターの存在領域が狭くなることが示唆された(図 1(b))。U字形の分岐枝が消滅するパラメータ近傍において分岐構造解析を行うことによって、ホモクリニック分岐が起きていることが明らかになった。

また、 PG_0 と PG_{∞} の周期解も同様にホモクリニック軌道から分岐して出現することが示唆された。ホモクリニック軌道を数値的に求めるために、ドリフトモードの不安定多様体に沿って定常解から離れる解軌道を調べ、その行き先が並進モードの安定多様体に沿って再び定常解に戻るか調べた。その結果、同一の定常解の分岐枝上に PG_n に対応するホモクリニック分岐点 HOM_n_{\pm} を発見した。興味深いことは、U字の分岐枝の左側と右側に対応するホモクリニック分岐点 (HOM_n- と HOM_n+) において、ホモクリニック軌道の振る舞いが定性的に異なることである。すなわち、2つのホモクリニック軌道は相異なる不安定多様体から出発し、同じ方向の安定多様体に沿って定常解に戻る。この特徴は、余次元2のバタフライ分岐点にみられるダブルホモクリニック軌道の性質を示した。

PG_n のホモクリニック分岐点を2パラメータ空間の広い範囲で追跡する方法を開発し、パルスジェネレーターの豊富なパターンを生み出す原因を探索した。その結果、 HOM_0- と $HOM_{\infty+}$ に対応する2つのホモクリニック分岐曲線(C_b と C_e)が交わるバタフライ分岐点を発見し、残りの HOM_n- と HOM_n+ のホモクリニック分岐曲線が C_b と C_e に沿ってバタフライ分岐点に漸近する様子がみられた(図 1(c))。このことから、バタフライ分岐点が複雑なパルスジェネレーターパターンを生み出す機構であると提案した。これらの結果を論文[1]にまとめ発表した。早期の結果は[2]にまとめた。

(2) 脳波状態に依存する情報伝播効率

脳波実験で観察された特徴的なダイナミクスとして次の現象を再現することを試みた。

1. TMS 印加後の位相リセットの空間伝播
2. 開眼・閉眼時における位相リセット伝播効率の変化

脳波は多数の神経細胞の集団的な振動現象によって発生すると考えられているため、各神経細胞の活動は FitzHugh-Nagumo (FHN) モデルを用いて振動状態を生成し、領野内の神経細胞の活動の総和を脳波として表現した。領野間を繋ぐ結合関数には非線形性を仮定した。また、TMS の効果は領野内の神経細胞に一様に加わる外力項として表現した。

数理モデルに対して領野内の集団振動子ダイナミクスの分岐構造を調べ、分岐点近傍における脳波リセットの空間伝播効率を比較した。また、TMS 印加後の位相リセット状態の初期値依存性を調べることによって、実験で観察された開眼・閉眼条件の差が発生する仕組みを解析した。

モデルに対する数値実験によって次の知見が得られた。

(a) 開眼時の安定した位相リセットを実現するための数理的条件

開眼時には脳波のアルファ帯域のパワーが小さく、閉眼時には高いことから、開眼条件では領野内の神経細胞の位相がランダムに分布しており、閉眼時には位相同期が生じていると仮定した。そ

それぞれの状況を実現するパラメータにおいて、TMS を印加した後のダイナミクスを調べた。領野内の自己フィードバックに非線形性を導入することによって、初期位相がばらついていた方が高確率で位相リセットが起きることを確かめた。この結果は、実験で観察された開眼・閉眼条件下での位相リセットの程度の差を引き起こす仕組みを説明していると考えられる。

(b) 位相リセットの空間伝播

同期状態の位相リセット状態が空間的に伝播する現象を再現するために、領野間の相互作用関数に階段関数を採用した。同期状態がある閾値を越えたタイミングで領野間の相互作用をオン状態にすることにより、位相リセット状態を空間的に伝播できることが明らかになった。

(c) 効率的な情報伝播を実現する分岐構造

脳波実験では、TMS 後に同期状態から脱同期状態への急激な遷移現象が観察される。そのような現象を数値実験で再現するためには、集団振動子の同期振動解のサドル・ノード分岐を実現することが必要である。そこで、サドル・ノード分岐を実現するために、領野内の自己フィードバックループに関して階段関数を採用した数理モデルを提案し、実験で観察される現象を定性的に再現することに成功した。この数値実験結果により、臨界点近傍において情報伝達効率が最適化されることが示唆された。

(3) 環境変化に対して柔軟なアトラクター遷移を実現する数理モデルの作成

ネットワークの切断や境界条件の変化に対してアトラクターを自発的に遷移させる、自己修復性を実現するモデルを作成する。自己修復性を実現するためには、アトラクターの生成・崩壊を適切なタイミングで行う必要があり、それを実現するノード状態間の制御ルールを発見することが中心的な課題となる。

力学系を用いたネットワークでは、オンとオフの2状態間遷移を考慮したモデルが数多く提案されているが、2状態では自己修復性を実現することが困難であった。そこで、本研究では複数状態を定義することにより、ネットワーク切断時の自己修復的なループ探索を実現することを試みた。

(a) 脳波モデルによる柔軟なアトラクター遷移の実現

ノード状態として3状態(1つのオン状態と2つのオフ状態)を定義した。オン状態は集団振動子の同期状態、オフ状態(オフ1状態)の1つは振動子の脱同期状態、もう1つのオフ状態(オフ2状態)は振幅が小さい状態での位相同期振動状態である。オン状態は他のノードからの興奮性相互作用、オフ1状態は他のノードからの相互作用がない状態、オフ2状態は他のノードからの抑制性の相互作用を受けた時に実現するようにパラメータを調整する。その結果、ネットワーク内に含まれるループ構造の自動的な探索、及びネットワーク切断時の再探索を可能にする数理モデルを作成することに成功した。その成果は文献[3]にまとめた。

(b) 柔軟なアトラクター遷移を実現する低次元モデルの提案

(a)で提案した集団振動子によるノードが持つ基本的な性質を2変数のモデルで定義するために、

FHN モデルの非線形性を改変した数理モデルを作成した。次に、改変 FHN モデルに対して分岐構造解析を行い、自己修復機能に必要な分岐構造を明らかにした。最後に、単一のループを探索可能になるようにノード間の状態遷移を考案した。

ノード状態を定義する際には、改変 FHN モデルのヌルクラインを基に決定した。ノードが相互作用を受けない場合、興奮性の相互作用を受けた場合、興奮性・抑制性の両方の相互作用を受けた場合の3つの場合におけるヌルクラインより、それぞれの場合において安定な定常解を1つ持つようにパラメータを設定した(図 3(a))。このようなパラメータの下、2つのオン状態と2つのオフ状態を定義した。

図 3(b)のフィードバック付の階層的なネットワークにおいて数値実験を行い、フィードバックパスを含むループ構造を自発的に探索可能であることを示した。さらに、ネットワークの切断およびフィードバックループの位置を変化させた際にも自発的に新たな経路を探索することを示し、提案したシステムが自己修復性を有することを確認した(図 3(b))。特に、ネットワークの切断時においては、post-inhibitory-rebound 効果によって新たな経路の探索活動を開始し、サドル・ノード分岐の効果によって、ループに関わりのないノードがオフ状態に収束する様子が観察された。この成果は文献[4]にまとめた。

(c) 経路探索モデルの作成

改変 FHN による低次元モデルをさらに改良し、経路探索モデルを作成した。フィードフォワード層とフィードバック層の2つのネットワーク層を仮定し、それらの層の間に抑制性の相互作用を組み込むことによって、特定の経路を循環経路として表現した。

経路探索時間を短縮するためには、アトラクターの並列的探索過程と、経路発見後の即時的選択を力学系として表現する必要がある。そのような現象を実現するために、フィードフォワード層とフィードバック層の間の抑制性相互作用を制御する関数の非線形性に着目し数理モデルを作成した。

作成した数理モデルにおいてパラメータサーチを行うことによって、与えたスタートとゴール点を繋ぐ経路を自発的に発見し、ネットワークの切断やスタート点・ゴール点の位置の変化に対しても柔軟に新たな経路を発見することを確認した。経路探索モデルにおいて、抑制性相互作用の閾値を変化させることによって経路探索時間が大幅に短縮可能であることを発見した。例えば、階層型ネットワークでは階層の深さに対して指数的に増加していた探索時間を線形オーダーに減らすことに成功した。その成果の一部は文献[5]にまとめた。

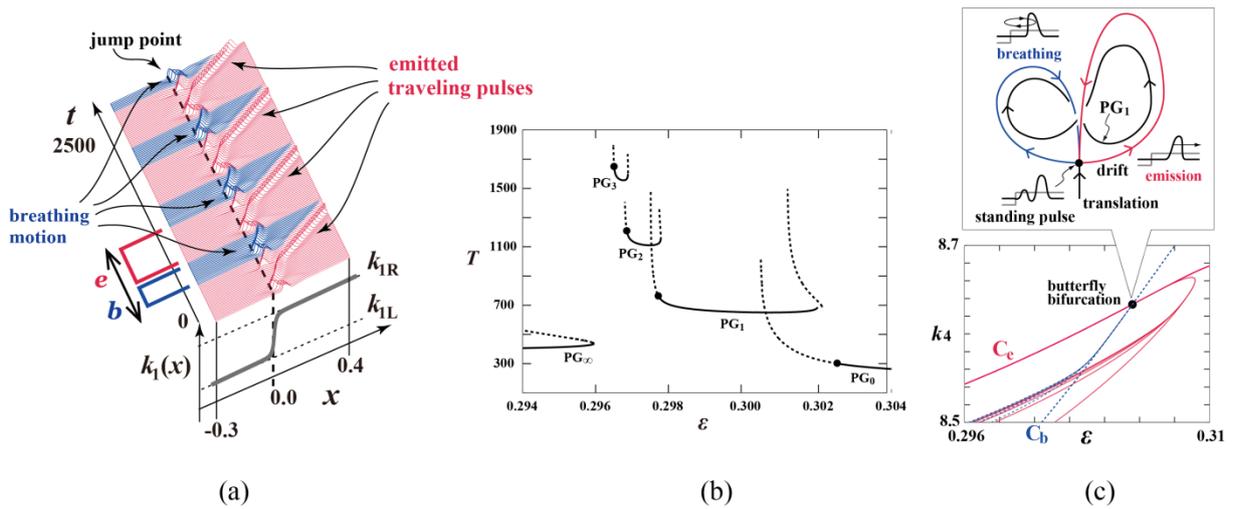


図 1 (a) ジャンプ型の不均一場から駆動するパルスジェネレーターパターン (b) パルスジェネレーターのカスケード構造. 実線と破線はそれぞれ安定解と不安定解. 横軸と縦軸はジャンプの高さとパルスジェネレーターの周期を示す. ●は周期倍加分岐点を表す. (c) 図 3. ホモクリニックバタフライの模式図と2次元空間にあるバタフライ分岐点の開析. 実線と破線は HOM_{n+} と HOM_n -に関連するホモクリニック分岐曲線.

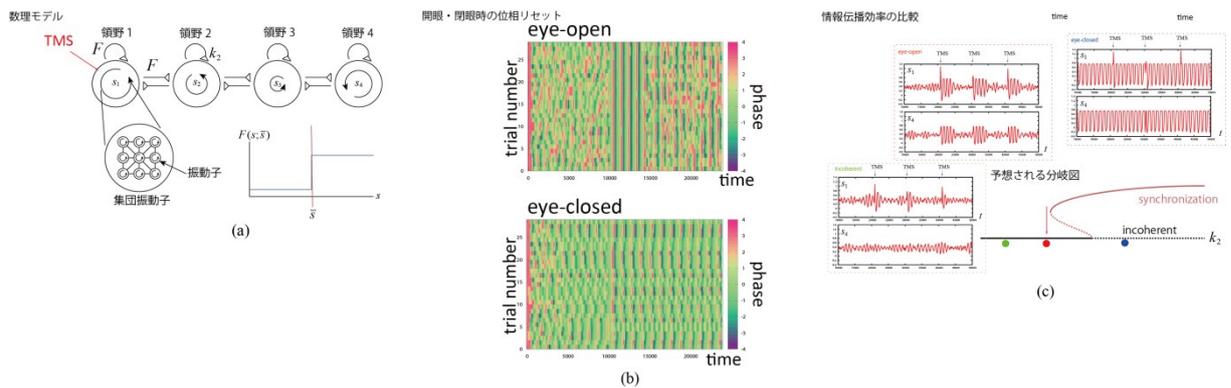
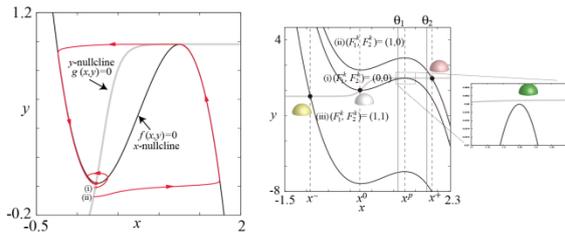
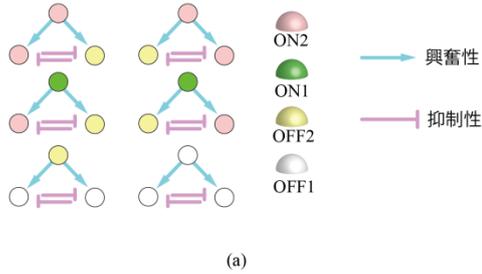


図 2 (a) 数理モデルの概略. (b) 単一領野に外部刺激を加えた時に観察される位相リセット現象. (c) ノードダイナミクスの数値シミュレーションから予想される分岐図と分岐点近傍における特徴的なダイナミクス.

ノード状態の定義



ノード間制御ルール



数値実験結果

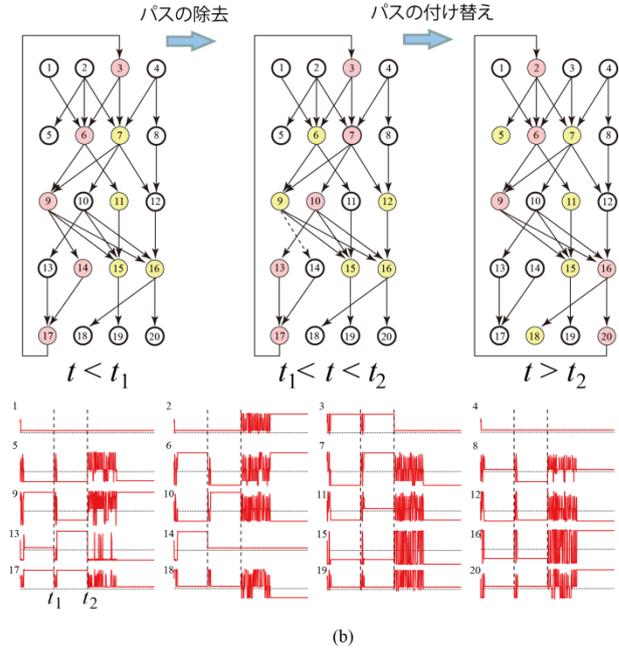


図 3 (a) ノード状態の定義とノード間制御ルール. (b) 数理モデルの数値実験結果. ループネットワークを自発的に探索し、ネットワーク切断やネットワークの変化に対しても柔軟にループネットワークを探索することが観察される.

参考文献

- [1] M. Yadome, Y. Nishiura, T. Teramoto, Robust pulse generators in an excitable medium with jump-type heterogeneity, SIAM J. Appl. Dyn. Syst., (2014) (in press)
- [2] Y. Nishiura, T. Teramoto, M. Yadome, Heterogeneity-Induced Pulse Generators, Advances in Cognitive Neurodynamics, Vol. III, 2013, 371-37
- [3] K. -I. Ueda, M. Yadome, Y. Nishiura, Multistate network for loop searching system with self-recovery property, Phys. Rev. E, Vol. 89, 2014, 022810
- [4] K. -I. Ueda, Three-state network design for robust loop-searching systems, Phys. Rev. E, Vol. 87, 2013, 052920
- [5] K. -I. Ueda, Y. Nishiura, Y. Yamaguchi, and K. Kitajo, Continuous model for pathfinding system with self-recovery property. arXiv preprint arXiv:1309.2845, 2013.

多時間スケールダイナミクスによるメタルール生成とそれに基づく学習, 進化の理論

研究代表: 東京大学総合文化研究科・教授 金子邦彦

概要

生命システムは, 多くの異なる時間スケールを持った素子からなり, その発展を通して, 自らの発展を規定するルールを生成する. このような規則の内側からの生成の原理を, 異なる時間スケールを持った力学系の理論をふまえて, 力学系にもとづく記憶と学習, 細胞内の多成分力学系による適応, 結合力学系による細胞分化, 表現型を形成する力学系の進化の問題を例にとりて研究した. (1) 入出力ダイナミクスの分岐としての記憶と学習 (2) 振動力学系の相互作用誘起分岐による細胞分化理論 (3) 大自由度集団適応 (4) 表現型のゆらぎと進化の一般法則, およびロバストネスの進化と可塑性の力学系表現 (5) 多時間スケール系のカオス的遍歴が主たる結果である. この研究を通して, ヘテロでダイナミックな素子集団から, 環境の変化に対して柔軟に適応し安定した機能が生まれることを示し, 生命システムのみたす特性の基盤を明らかにし, 認知過程, 伝達創成の数理的基盤を提供した.

Abstract

Biological systems consists of hierarchy with different time scales. Usually slow subsystem provides a rule for faster subsystem, while the change in the slower system is also determined from a faster subsystem. For example, in learning, synapse change is a result of faster dynamics of neural activity. In evolution, genotype is selected as a result of phenotype which is shaped by a dynamical system whose rule is determined by the genotype. Development and adaptation also consist of such hierarchy of time scales. Here we study such dynamics of dynamical systems. Specific results include (1) memory and learning of input-output relationship as bifurcation (2) stem cell differentiation as interaction-induced bifurcation of intra-cellular dynamical systems (3) high-dimensional adaptation dynamics (4) evolutionary correspondence between genotypic variation and phenotypic dynamics; evolution of rules of robust dynamics (5) chaotic itinerancy of fast-slow dynamics. With this study, we uncover how heterogeneous dynamical systems lead to plastic and robust generation of rules that govern the system itself, thereby providing a basis for mathematical study of biological systems.

1. 研究開始当初の背景

(1) 大自由度力学系の研究

これまでにカオス結合系の集団運動やカオス的遍歴を見出して, 大自由度力学系の普遍的性質を見出してきた. 一方で, これらと生命システムの持つ可塑性との関係を探ろうとしてきた. これらの研究を基盤として, 一方では時間スケールの異なる結合系の研究を行い, 他方, それをふまえて, 力学系のルールを変えるシステムとしての認知, 学習, 記憶, 適応, 進化の理解を目指していた.

(2) 生命システム, 特に, 適応, 進化の研究

生命システムは, 自らの発展を規定する規則がそのシステムの中から生成されてくる. 例えば発生の規則は進化により定まり, 認知活動の発展規則は学習により決まる. その一方で進化は発生の結果であり, 学習は神経活動に依存する. そこで, 速いスケールで生じる時間発展とゆっくりしたスケールで起こる規則の変化は相互に関係してくる. この両者の関係から生命システムの適応, 発生, 進化の持つ普遍的性質を調べて, それにより生命システムの可塑性をゆらぎとダイナミクスの視点から表現することを試みてきた. 特に細胞生物学者と協働して, 複製, 適応, 進化, 細胞分化の普遍的論理を確率過程と力学系の視点から抽出してきた.

(3) 記憶と学習のダイナミクス

これまで, 記憶, 表書をアトラクタとして, 多くの記憶を持つ系として多数アトラクタをもつ力学系のデザイン, またはそれに至る学習ダイナミクスが研究されてきた. 例えば Hopfield モデルと呼ばれるものがその一例であり, Hebb 則での学習などが議論されてきた. この立場では入力初期条件を与えるものである, そのために入力がない状態は議論するのが困難である. 一方で入力がなくとも脳は自発活動を示し, それが単なるノイズでもないことが明らかになってきており, その意義が注目されてきた. そこで新たな枠組みが必要とされていた.

2. 研究の目的

(1) 分岐としての記憶, 学習

1の(3)で述べた問題に答えるべく, 入出力関係の学習, 記憶と自発活動を結び付けられるスキームを提案する. “表象=分岐”という新しい枠組みを提示し, それを実装するモデルを導入し解析する.

(2) 相互作用による分化の解明

これまで進めてきた, 力学系による細胞分化の研究を進めて, そのしくみを相互作用による分岐として明らかにする. その分岐構造を解析し, 一般に相互作用による状態分化の一般的機構を提出する.

(3) 大自由度適応系

生命システムは外界に応じて, 状態を変える一方で, 内部をできるだけもとに戻す(ホメオスタシス)性質を持つ. この特性を力学系として表現する. 特に, 多くの変数が集団としてこのような適応を実現する仕組み, そして, そこでの異なる時間スケールの意義を明らかにする.

(4) 多時間スケール系のダイナミクス

速い素子と遅い素子が相互作用している力学系を考える. 遅い素子が速い素子の発展規則を与える一方で, その速い素子の集団的振る舞いが遅い素子の変化をスイッチさせる仕組みを調べ, 生命システムのルール変化ダイナミクスの数理的基盤を与える.

(5) 進化における表現型遺伝子型対応のダイナミクス

生命システムは自らを発展させるダイナミクス(発生過程, 遺伝子発現ダイナミクスなど)を有し, それにより表現型がつけられる. その一方で遺伝子型はその発展の規則を与えるが, 表現型の結果として進化する. この相互フィードバック系を通してルールは変化していく. このことは, 突然変異など遺伝子の変化がランダムであっても, 表現型の変化には方向性をもたらす, 変化に制限がかかることを意味する. そこでこのような進化の方向への一般規則, 安定性の進化を議論する.

3. 研究の方法と成果

(1) 分岐としての記憶, 表象

我々の枠組みでは入力系は初期状態ではなく, 系の入力パラメタとして導入される. 入力がない状態から, 印加した状態へパラメタが変化することで系が変化(分岐)する. この点が, 入力系初期状態の選択であり系自体は変わらないとした従来の枠組みと大きく異なる点である. 一方で, 入力に対する応答は, 入力により変化した後の相空間上のアトラクタとして定義されるので, この点はアトラクタ型のニューラルネットワークと共通している. 他方, この点はアトラクタを用いずに入力を伝播させるフィードフォワード型のニューラルネットワークとは異なる.

この枠組みでは, 複数のターゲットを記憶する場合でも一つの相空間上に複数のアトラクタが存在する必要はない. なぜなら, 入力毎に系の相空間自体が変化し, 変化後の相空間構造は入力によって異なり得るからである. 実際われわれのモデルでは, 入力により変化した相空間においては少数のアトラクタしか生じない. この点は以前の記憶を保持しつつ新しい記憶を埋め込んでいく上で利点になる. 一方で, この枠組みでは入力がないときにも神経活動が存在し, それはどのような入力を埋め込んだかに依存する. こうした自発的神経活動の意義は近年の実験でも示唆されており, 自発活動と入力での誘起活動との関係が調べられるのも我々の枠組みの利点である. そこで, この基本的枠組みに基づき順次, 以下の研究を行った.

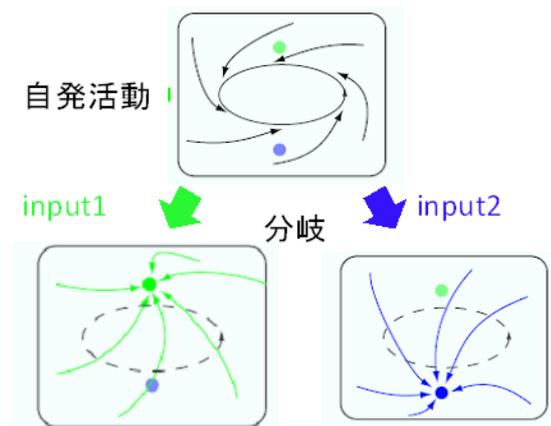


図1: 分岐による記憶構造の模式図

(i). 強化学習を用いた複数のシナプスの時間スケールをもつ層状ニューラルネットワークモデル;

層状の神経力学系を考え, そのシナプスが, 入出力関係を学習するように Hebb および anti-Hebb 機構によって変化するとする. その結果, フィードフォワード及びフィードバックのシナプス変化の時間スケールが適切な関係をみたと, 最大の記憶容量を持ちうることを示した. この際に, 神経系の

ダイナミクスがいかに入力に応じて出力を出すよう分岐するかを解析した。特に、入力がない時に、記憶に対応した出力を経巡る自発的神経活動が生成されることを見出した。

(ii)入出力関係をシナプス結合に埋め込んだモデル:

ホップフィールドネットワーク(HNN)を改変したネットワークモデルを導入した。具体的には HNN からネットワークの結合強度を

$$J_{ij} = \sum_{\mu} \xi_i^{\mu} \xi_j^{\mu} \rightarrow \sum_{\mu} (\xi_i^{\mu} - \eta_i^{\mu})(\xi_i^{\mu} + \eta_i^{\mu})$$

のように改変した。但しここで $(\eta_i^{\mu}, \xi_i^{\mu})$ は学習すべき入力とそれに対応する出力パタンペアを表す。詳細は本論文で述べられるが、新しい結合形より入力印加時のダイナミクスが HNN と同じ形の表現されることになる。これにより、入力印加時にターゲットが安定な固定点となる。

このモデルが多数のペアを学習することができ、その記憶容量は $0.7N$ (ここで N は要素数)程度であることを、数値シミュレーションを用いて示した。また学習数が極少数の場合を除き、自発神経活動はカオスとなり、ターゲットに他の入力パターンやランダムパターンに比べより近づく挙動を示すことを明らかにした。

また、分岐としての記憶スキームが、以上のような神経場のモデルでなく、1神経の発火ダイナミクスの集団系でも、その集団運動の分岐として成り立つことを示した。具体的には積分-発火型ニューロンモデルにおいて、その平均発火ダイナミクスが入力に応じて分岐して、それにより出力を与える記憶描像がうまく働くことを示して、また、ノイズに対する安定性を明らかにした。

(iii)ランダムネットワークに学習を導入したモデル:

採用された学習則はよく用いられるヘブ則のようにシナプス前細胞、後細胞の二体相関で定まる簡単な学習則であり、新しい枠組みのための特殊な学習則ではない。この結果、学習パラメタと学習時の入力強度がある程度の条件をみたせば、このモデルでも多数の学習ができることを示した。さらにこの場合、ネットワーク構造は先のモデルに類似した特徴を持つ構造が形成されていることを明らかにした。

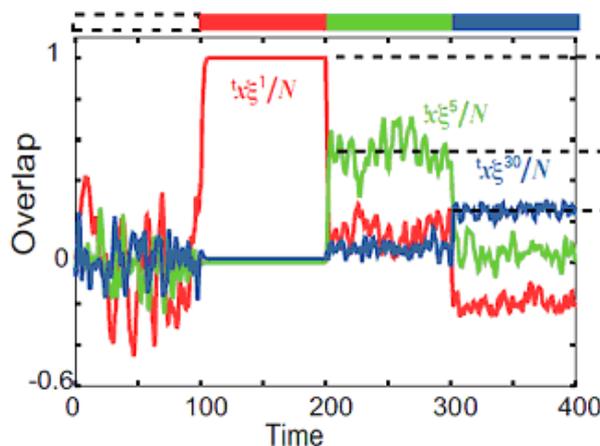


図2

入力(赤, 緑, 青で表示)に応じて、そのターゲットパタンとのオーバーラップが選択的に上昇する。入力がない時(左端)はカオス的に状態を経めぐる。(Kurikawa, Kaneko, PLoS. Comp Biol. (2013))

(iv) 相関のある出力パタンの記憶とカテゴリーの形成:

導入した学習モデルに相関のある入出力マップを逐次的に繰り返し学習させた. するとその相関に応じて入力をカテゴリー化させることが自発的に生じた. この時, カテゴリーは相空間内の階層的構造として記述され, 入力が強くなるに従い, 細かいカテゴリーの分別が生じることが示された. 一方で時間的にみたときに, まず大雑把なカテゴリーに対応するアトラクタに漸近, ついで, 細かく分かれたアトラクタへと分類されることが示された. これは我々が認知する過程と対応している. さらに入力がないときは, このようなカテゴリー構造を内包する自発神経活動が生ずることを示した.

以上のように, 伝統的な“表象＝アトラクタ”の枠組みに変わる“表象＝分岐”という枠組みを提案し, この枠組みに基づいた3つの異なるモデルを解析した. そして, それらについて自発神経活動と誘起神経活動の関係に着目した解析を行った. 結果として, 上のモデルすべてで記憶が形成される領域では自発神経活動はターゲットを変遷する構造が形成されることが示された. ターゲットは入力パターンを印加した時の応答と考えられるので, 以上の結果は新しい枠組みのもとで, 記憶を行うために形成される構造として, 自発神経活動が誘起神経活動と似たパターンを遷移するが形成される可能性を示唆している. この結果は近年の実験とも対応する成果である(Kurikawa, Kaneko 2011, 2012, 2013, 2014 および準備中).

(2) 結合力学系による相互作用系の論理抽出: 相互作用により状態を分化させる力学系

これまで我々が展開してきた細胞分化の理論をふまえて, 遺伝子発現力学系をもつ細胞が相互作用するモデルを網羅的に調べ, その結果, 細胞数の増加により, 発現振動→振動位相の同期が細胞ごとに破れる→一部の細胞が固定点状態へ分岐, という過程を通して幹細胞からの分化決定が説明できることを示した. 特にたった2つの遺伝子だけで, 複製と分化を両立させる細胞状態が実現することを発見し, さらにこの際に分岐が Invariant Curve 上の SaddleNode 分岐であることを示し, 分岐理論での解析に成功した. さらに, この系を組み合わせるとより複雑な階層的細胞分化も可能であることを示した. こうした振動は最近 ES 細胞のタンパク HeS1 の計測でも見出されており, また安定した分化をおこす仕組みとして興味を持たれている. (Suzuki, Furusawa, Kaneko 2011, Furusawa, Kaneko 2012a, Kaneko, 2011, Goto, Kaneko 2013).

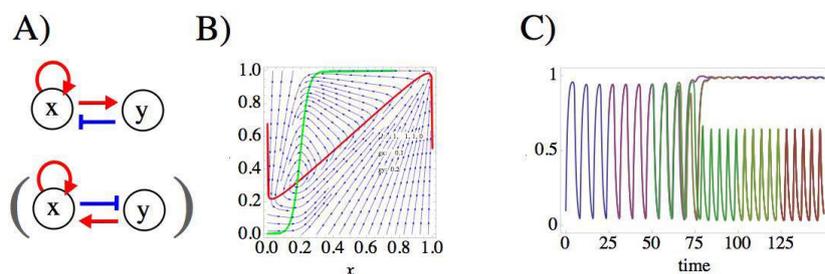


図3

2成分系での相互作用による細胞分化: Saddle-Node Bifurcation on Invariant Curve による振動→固定の分岐

(3)大自由度適応系と生物学的可塑性の数理

(i)大自由度反応ネットワークの自律的な適応:

触媒反応ネットワークで、栄養取り込みが生成された触媒によるというフィードバックを取り入れると、細胞状態が臨界状態に向かうことを示し、この場合、外部の栄養条件を変えると一旦応答が現れた後、もとの臨界状態に戻り最適な成長を回復することを見出した。このような適応は触媒反応ネットワークの多成分で協同的に生じており、生物の持つホメオスタシスの理解へとつながる結果である。(Furusawa,Kaneko, 2012b)

(ii)大自由度遺伝子制御ネットワークにおける集団的適応:

ついで、遺伝子制御ネットワークモデルをその1つの遺伝子応答が適応するように(遺伝アルゴリズムで)進化させると、その結果、多くの遺伝子が協同して適応的応答を示すことを見出した。これは、少数遺伝子のネットワークモチーフが適応を示す仕組みとは異なり、集団運動としての大自由度(多数遺伝子)系固有の新しい適応過程が存在することを意味する。実際の細胞でも多くの遺伝子発現が協同的に適応を示しているデータが得られており、その点からも着目される。(Inoue,Kaneko,2013).

(4) 多時間スケール力学系での遷移現象:速い変数の集団カオスによる遅い変数のカオスの遍歴:

多数の速い変数と1つの遅い変数が結合した力学系において、遅い変数のダイナミクスが順次遷移していく現象を見出した。この状態遷移が、速い変数を消去して得られる、遅い変数の運動をあらゆるブランチ間の遷移で表現されること、さらに、この遷移が速い変数の集団的カオスによる、確率的状態遷移が生じることを明らかにした。遅い変数によるコントロールと速い変数によるスイッチを両立させた固有のダイナミクスである。これは、神経系のように異なる時間スケールを持つ系で遅い変数が速い変数を制御する一方で、速い変数からのフィードバックで切り替えられること、その切り替えにカオス的に生じることを示している。

これにより、「異なる時間スケールの素子が整合性を保った状態へとひきこまれることで適応、記憶が与えられ、一方、新しい入力に対しては、いったんその整合性が破れカオスの遍歴が生じて状態遷移を起こし、その後、それをもとに、新奇の入出力関係の結びつけ、記憶形成が行われる」という描像への数理的基盤を与えた(Aoki,Kaneko,2013)。

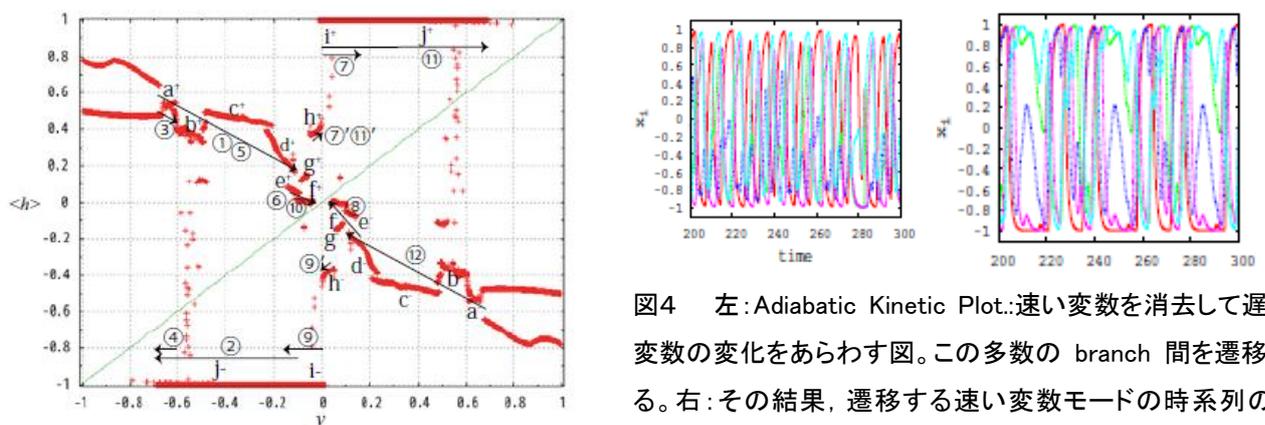


図4 左: Adiabatic Kinetic Plot.:速い変数を消去して遅い変数の変化をあらゆるブランチ間の遷移で表現されること、さらに、この遷移が速い変数の集団的カオスによる、確率的状態遷移が生じることを明らかにした。遅い変数によるコントロールと速い変数によるスイッチを両立させた固有のダイナミクスである。これは、神経系のように異なる時間スケールを持つ系で遅い変数が速い変数を制御する一方で、速い変数からのフィードバックで切り替えられること、その切り替えにカオス的に生じることを示している。

右: その結果、遷移する速い変数モードの時系列の2例。
変数ごとに異なる色で重ね書き。(Aoki, Kaneko, Phys.Rev.Lett.. (2013))

(5) 表現型ダイナミクスの進化と進化しやすさ, 安定性の表現:

(i)揺らぎで見た, 進化と発生をつなぐ関係の定式化:

力学系の発展結果の状態から適応度を定め, 高い適応度をうむ力学系を進化させそのような力学系の特性を調べた. 特に, 状態変数のゆらぎを, 力学系でのノイズによるもの V_{ip} と遺伝的変異によるもの V_g に分けて求めた. これまで, その両者が比例しながら減少していくことを示し, それをノイズ及び遺伝子変異に対する安定性の進化として理解した. また, 多くの表現型(遺伝子発現)についてその両者の揺らぎが多くの変数にわたって比例していることを見出した. これはノイズに対して安定性を持つ力学系の特性であり, またその理由を説明した. 一方で, 表現型進化を統計力学的に定式化し, この安定性進化をスピングラス理論のレプリカ対称性の獲得として解析した. さらに, 環境が変動する際に, ノイズが適度な大きさを持つと, 外界への適応性と進化的な安定性が両立させられることを示した. (Kaneko, 2012a, 2012b, Sakata, Hukushima, Kaneko 2012)

(ii)進化におけるルシャトリエ原理:

環境変化によって生じた表現型の変化が打ち消されていくように遺伝的進化が生じることを大自由度反応系の細胞モデル力学系のシミュレーションで明らかにした. この補償度合いが多くの成分で共通であることを見出し, その理論を構築した. 一方で, 大腸菌の環境適応に際する遺伝子発現データにより, 理論の検証を行った. 以上により, 進化や学習でゆっくり変化する生命システムの可塑性と安定性(ホメオスタシス)をあらわす数理的基盤を与えた(Furusawa, Kaneko, 準備中, Kaneko, Furusawa, Yomo 準備中).

(6)その他:

視覚野の情報処理が領野間をつなぐ情報へといかに結びつくかについて伝搬する α 波と関連する可能性を示す実験(Shimaoka ら, 山口グループとの共同研究), 表現型ゆらぎと進化の Baldwin 効果の定式化, 冗長性の進化(Saito, Ishihara, Kaneko 2013, 2014), 細胞内に非常に遅い緩和が生まれる仕組みの提案とそれによるシナプス記憶の仮説提唱(Hatakeyama, Kaneko 投稿中)などの研究も行った.

参考文献

[1] 分岐としての記憶, 表象

T. Kurikawa and K. Kaneko, "Learning Shapes Spontaneous Activity Itinerating over Memorized States" PLoS One, (2011) Vol.6, e17432

Tomoki Kurikawa and Kunihiko Kaneko "Associative Memory Model with the Spontaneous neural Activity" Europhys. Lett. 98 (2012) 48002

T. Kurikawa and K. Kaneko, "Embedding Responses in Spontaneous Neural Activity Shaped through Sequential Learning", PLoS Computational Biology, 2013, 9, e1002943

T. Kurikawa and K. Kaneko, "Memories as bifurcations: Realization by collective dynamics of spiking neurons under stochastic inputs" submitted to Neural Networks

[2]相互作用力学系による分化

Narito Suzuki, Chikara Furusawa, and Kunihiko Kaneko, "Oscillatory Protein Expression Dynamics Endows Stem Cells with Robust Differentiation Potential" PLoS One 6: e27232 (2011)

C. Furusawa and K. Kaneko "A Dynamical-Systems View of Stem Cell Biology", Science 338 (2012a) 215-217

K. Kaneko, "Characterization of stem cells and cancer cells on the basis of gene expression profile stability, plasticity and robustness" Bioessays 2011 Vol. 33: 403-413

Y. Goto and K. Kaneko, "Minimal Model for Stem-Cell Differentiation" Phys.Rev.E.88(2013) 032718
[3]大自由度適応力学系

Chikara Furusawa and Kunihiko Kaneko, "Adaptation to optimal cell growth through self-organized criticality" Phys. Rev. Lett., 108(2012b) 208103

Masayo Inoue, Kunihiko Kaneko, "Cooperative Adaptive Response in Gene Regulatory Networks with Many Degrees of Freedom" PLoS Computational Biology, April 2013, Vol.9, Issue 4, e1003001
[4] Slow-Fast 力学系における遷移現象

Hidetoshi Aoki and Kunihiko Kaneko, "Slow Stochastic Switching by Collective Chaos of Fast Elements" Phys.Rev.Lett., 111, 144102 (2013)

[5] 進化力学系

Kunihiko Kaneko, "Evolution of Robustness and Plasticity under Environmental Fluctuation: Formulation in terms of Phenotypic Variances" J. Stat. Phys. 2012a, Volume 148, pp 686-704

Kunihiko Kaneko, "Phenotypic Plasticity and Robustness: Evolutionary Stability Theory, Gene Expression Dynamics Model, and Laboratory Experiments" Evolutionary Systems Biology (2012b) (Springer, ed. O. Soyer)

Ayaka Sakata, Koji Hukushima and Kunihiko Kaneko, "Replica symmetry breaking in an adiabatic spin-glass model of adaptive evolution" Europhys. Lett. vol. 99 68004 (2012)

[6]その他

Nen Saito, Shuji Ishihara, and Kunihiko Kaneko, "Evolution of Genetic Redundancy : The Relevance of Complexity in Genotype-Phenotype Mapping" New J. Physics, in press

Nen Saito, Shuji Ishihara, and Kunihiko Kaneko, "The Baldwin effect under multi-peaked fitness landscapes: Phenotypic fluctuation accelerates evolutionary rate", Phys. Rev. E 87, 052701 (2013)

脳神経回路の同期の生成崩壊に基づく認知情報生成機構の解明

研究代表：理化学研究所脳科学総合研究センター・神経情報基盤センター長
山口陽子

概要

神経細胞から行動に至る空間・時間的に多重スケールなシステムにおいて随時多重なスケールでの自己組織的なパターンとしての同期の生成が現れることがこれまで報告されてきた。本研究ではそれら多重な階層でおきる同期非同期の遷移が脳の情報生成を可能にしていることを作業仮説として、ヒト認知課題の実験とデータ解析、理論的検証とを行った。記憶・知覚課題で脳波リズムの同期生成が力学モデルの振舞として理解できるだけでなく、認知機能動機付け、嗜好などの予見的な指標となることを示した。また経頭蓋磁気刺激を与えて脳内大域的リズム回路が操作的に扱えることを示した。さらに2者間のコミュニケーションとして時間的協調性の形成を伴う行動課題を開発し、2者の脳間で現れる脳波リズムの同期が行動・心理指標と相関を持つことを示した。さらにこれらの指標は自閉症スペクトラム症候群と健常者群との比較も可能にすることを示した。以上の結果は、脳内、脳間神経活動の同期・非同期の分岐としての理解がコミュニケーション情報学の基盤として有用であることを支持する。

Abstract

We hypothesized that the transition between synchronization and desynchronization among heterogeneous neuronal and behavioral systems should underlie on the neural principle of the cognitive control. To elucidate this hypothesis, we conducted human EEG measurements and analyses based on dynamical system theory. We found that EEG synchronization/ desynchronization in multiple space-time scales in the brain and behaviors can yield predictive indices of cognitive functions, such as working memory capacity, motivation and subjective preference. In two person experiments, an EEG synchronization index was found to represent smooth communication. In conclusion, these results support our working hypothesis.

1. 研究開始当初の背景

脳神経系における同期現象はスパイク時系列、ヘテロで複雑なシステムにこのような動的回路が自己組織的に形成されることが脳の柔軟な情報創成を可能としていると考えられるがこれまでの多くの報告が現象の羅列に留まったため、副産物的な現状であることもしばしば議論になっていた。また、本グループではこれまで、脳波の中でシータリズムが海馬関連の記憶や前頭部の中央実行系の機能と関連して現れることを計算論モデルとヒト脳波測定研究より提唱していた。しかし、そのシータリズムが他の部位、他のリズムとの動的リンクが、認知機能と直接関係するかどうかについては、未解明であった。また、認知機能選択的に発生する脳波リズムの出現に限定すると、いろいろ報告があるものの、それが、因果性を伴う過程として、大域的回路の拘束を含めた計算論モデルとして解析することで広く文脈に依存した認知課題の計算論を解明する汎用性の高いモデルを作成する。以上より本

研究では個体の脳波を測定して、ヘテロな部位の同期による脳内大域的回路の生成と認知機能の関係を知覚・記憶課題を用いて解析し、脳波同期活動に外部刺激を与えることで、同期性を操作的に理解することを試みる。また、2個体での脳活動測定は fMRI など開始されていたが、脳波測定では殆ど研究がなかった。2個体でコミュニケーション時に脳波リズムにおける個体間同期があるかどうか、それがコミュニケーションに機能の上で関与するのかなど、現象としてもメカニズムとしても殆ど手がついていなかった。

2. 研究の目的

(1) 知覚・記憶課題における脳リズム回路

脳の創発的な活動のためには、脳内神経回路の局所的な計算が独立でなく相互に拘束しあうことで、新たな全体と部分の関係が生まれることが重要である。そのための神経機構として、本課題では脳のヘテロな部位での神経活動リズムの同期による大域的回路形成とその崩壊が認知情報生成の動的な過程であるという作業仮説をたてた。この検証のため、認知課題の一連の過程で、脳の大域的回路の中で同期非同期を測定して結合振動子モデルの挙動として解明するのが目的である。課題としては、視覚・聴覚の作業記憶とそれに対する報酬や色の嗜好の効果、弁別閾値付近の視覚刺激の知覚、視覚パターンの再認課題を用いた。

(2) 経頭蓋磁気刺激を用いた脳波同期の操作的研究

ヒト脳波実験では、これまでに外部刺激を用いることでリズムの同期に変動を与えて、その認知思考機能における因果性を解析する。実験と理論が相互に利用できるデータベースと計算論モデルをプラットフォーム上に構築することによって、領域内での共同研究をも推進する。さらにコミュニケーション課題では知覚環境を社会環境に置き換えることで、計算論モデルが有効に作動することを検証する。

(3) 2者コミュニケーションにおける脳波・行動における同期性

我々は、人間のコミュニケーションの中に含まれる行動リズムの同期現象(たとえば拍手の同期)に注目し、その個体内だけではなく個体間での脳メカニズムの特定を試みた。1つめは無意識的な行動リズム同期、2つめは意識的な行動リズム同期、3つめはコミュニケーションが困難であると定義されている発達障害者に対する意識的な行動リズム同期、を調べる研究を行った。

3. 研究の方法と成果

(1) 知覚・記憶課題における脳リズム回路 [文献 1- 5]

作業記憶課題においては視覚、聴覚のマルチモーダルな知覚情報を用い、それぞれの知覚記憶のバッファー、それらを制御する中央実行系などを含めた大域的回路の形成を局所部位での脳

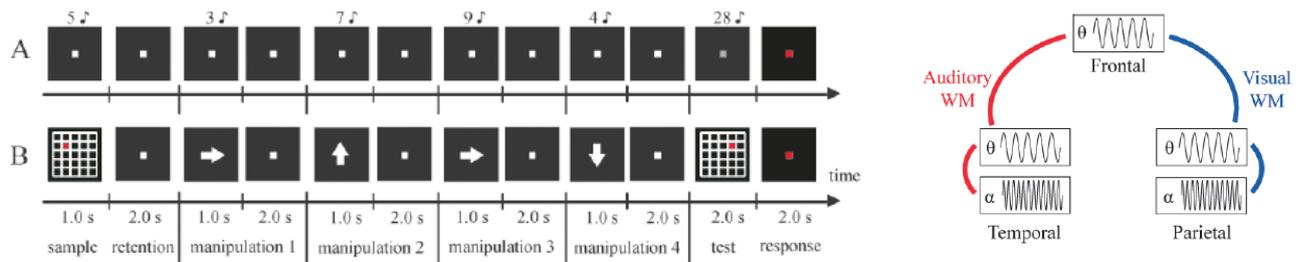


図1 視覚・聴覚作業記憶の課題(左)とその記憶操作中に現れる脳波同期の模式図(右)(文献1より)

波リズムの発生と、部位間の動的リンクを異なる周波数後の同期、非同期にて解析した。その結果、これまで心理学的な知見から提案されていた作業記憶のスキームが、脳リズムの部位とそれら相互の同期による動的リンクとして理解できることが明らかになった。基本的な機能に関わる脳リズムはアルファが記憶バッファの保持活動に対応、バッファと前頭の中央実行系部位をつなげるのが、シータの遠達同期とシータ・アルファの1周期対2周期(1対2)での局所同期による。課題に正解した場合に金銭報酬を与える条件では、報酬条件で記憶容量が増加し、この増加に相関して前頭部分でのシータ・ベータの1対4の同期が増加することがわかった。報酬系のベータ波での活動が中央実行系部位にリンクすることで、記憶容量の増加をもたらしていると解釈できる。また作業記憶課題で、視覚刺激の色を好きな色、嫌いな色の場合で比較すると、好きな色で記憶容量の増加が見られた。色の嗜好性は脳波ではシータ・アルファの振幅増加として観察され、注意性の成分と一致することが確認された。このように作業記憶課題においては認知制御の様々な部分が一定の部位の一定の周波数帯のリズムとして観察され、それが他の部位、他の周波数と整数非の周期で位相固定することが見いだされた。この性質は非線形振動子結合系モデルで理解できるものであり、脳神経回路が非線形力学系として動的にリンクの切替を行っていることを支持するものである。

さらに視覚刺激呈示後の再認時に、既に呈示されたことをありありと思い出すか、呈示されたと知っているだけか(remember/know パラダイム)を用いて、実験を行い、2種の記憶がそれぞれどのような条件で生まれるのかについて脳波を解析した。その結果、remember の記憶に対しては刺激呈示前と呈示後のシータ波の同期が大きく出ていることがわかった。このことは刺激以前に自発的活動として関連の回路がシータ波で継続的にリンクされていることが受けた刺激を remember の記憶を有効に保持しやすくすると理解できる。同記憶が海馬の関与するエピソード記憶と関係するとすれば、これまで我々のグループで出してきた海馬関連記憶に現れる前頭と頭頂のシータ波に関する知見とも一致する。また、脳内同期はかならずしも同じタイミングでのリズム活動でなく、空間的に伝搬する波動として認知機能依存的に観察された。その1つはアルファ波帯域での脳内波動伝播のあるなしが、弁別閾値近辺での知覚の有無を左右する可能性を示す結果を得たものである。もう1つは、多義図形として知られるネッカーキューブの知覚交代に伴う脳波と fMRI の同時測定実験である。見えが交代する瞬間に数ヘルツの低い脳波帯域で一過的活動が前頭から後頭にかけて伝播するのが観察された。こうした過渡的な状態での伝播活動については、本領域の西浦班と共同研究することにより、分岐理論からの解明の研究として進展している。

(2) 経頭蓋磁気刺激を用いた脳波同期の操作的な研究 [文献 6 – 8]

我々は経頭蓋磁気刺激(transcranial magnetic stimulation: TMS)—脳波測定システムを用いてヒトの脳の大域的な位相同期ダイナミクスの操作的な検証を目指した. 単発 TMS により刺激近辺部位での自発活動の振動の位相リセットができること, また, この位相リセットは刺激近辺部位から大域的に伝播し周波数特異的かつ状態依存的であることを示した. 例えば視覚野に TMS を印加し誘発される位相リセットの伝播様相を解析すると開眼時に閉眼時に比べてより強く視覚野から運動野等の離れた部位への伝播現象がアルファ波 10Hz 近辺で特に強く起きる. つまり開眼時には閉眼時に比べて

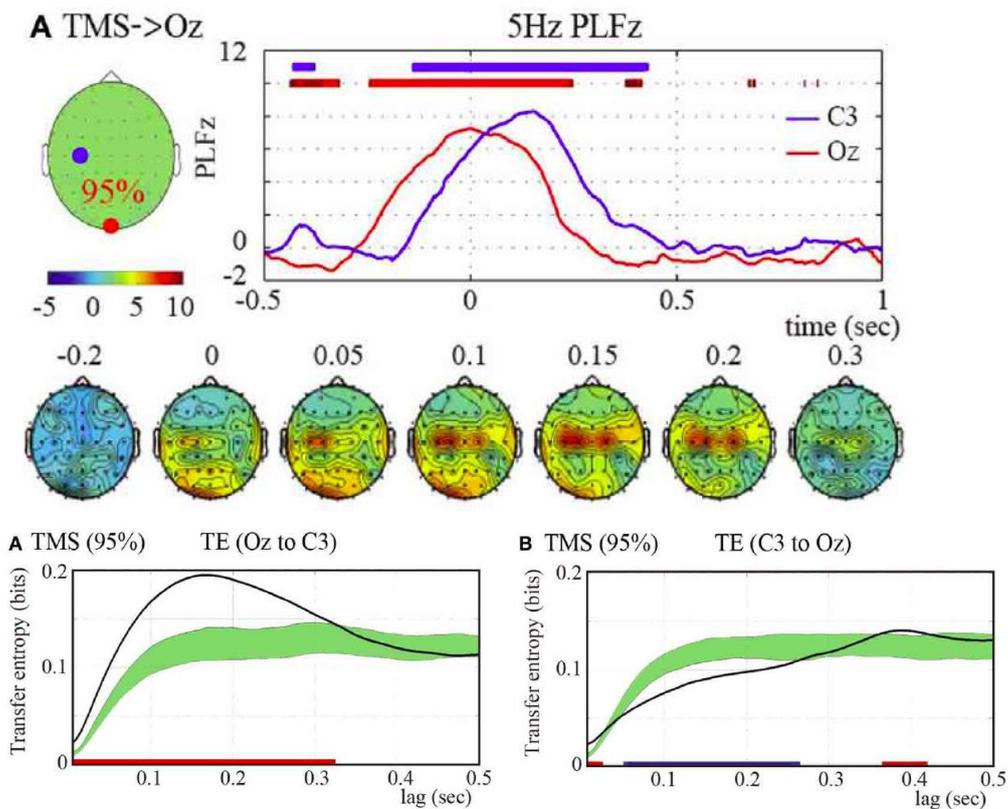


図2 TMSによるEEGの位相リセットの時空間パターンとTransfer Entropy(Xより)

上:被験者平均した5HzのPLFzのタイムコース(視覚野Ozと運動野C3電極).

中:PLFzのヘッドマップ. 刺激された視覚野から運動野近辺へと遠距離の伝播がある. 下:Transfer Entropyの変化. 横軸はタイムラグ, 縦軸はTransfer Entropy, 実線がTMS印加時のTransfer Entropy, 緑の部分はTMS刺激前のベースライン時の99%信頼区間. 視覚野(Oz)から運動野(C3)へのTransfer EntropyがTMSにより顕著に上昇している.

位相同期ネットワーク内でのボトムアップ的なコネクティビティが強いことが示唆された. またこのような位相リセットの伝播とその状態依存性を引き起こす仕組みについて, 結合振動子系の数理モデル

を用いた理論面からの共同研究を行った。

さらに刺激部位と他の部位の位相時系列間の有向情報流が TMS 印可により増加することを因果性の解析手法を用いて実証した。具体的には視覚野 TMS 時に刺激前に比べて視覚野から運動野への 5Hz 位相の Transfer Entropy 解析で定量化される情報流が増加することを実証した。このことは TMS の効果は局所モジュールへの干渉のみではなく、ヘテロなネットワーク全体での情報流の変化を引き起こすことを意味する。また TMS のみでなく、tDCS や tACS 等の脳刺激手法により脳の大域的な位相ダイナミクスと関連した情報流を制御することができる可能性が示唆された。

今後はこれらの結果に基づき、さまざまな脳刺激手法を用いて、ヒトや動物の大域的な位相同期ダイナミクスと情報流を操作、制御し、脳機能に関連するネットワークの操作的な解明を目指している。

(3) 2者コミュニケーションにおける脳波・行動における同期性

i). 言語コミュニケーション課題を用いた無意識的な行動リズム同期と脳波リズム同期[文献 9]

2者間で交互にアルファベットを発話する課題を用いて、その発話時間と発話間隔によって発話リズムを評価した。ほとんどのペアは2者間で発話リズムが同期することが示された。一定のリズムで発話するコンピュータを相手にした場合にはこのような発話リズムの同期は観測されなかった。さらにこの課題遂行時の脳波データを2者から同時に計測し、周波数解析を行った。発話課題時に顕著な変化を見せるシータ波とアルファ波の脳波リズム(6-12Hz)の振幅に注目した結果、頭頂と側頭の電極で2者間の脳波リズムが同期することが分かった。さらに興味深いことにこの2者間の脳波リズム同期は行動リズムの同期が高いペアほど高く、有意に相関した。以上の結果2者間での脳波リズムの同期が、コミュニケーション時の無意識の行動リズム同期と関係があることを示唆する。



図3 交互発話実験の様子(左, 中)と、二人の脳から測定された脳波の同期結果模式図(右)(文献9より)

ii). 非言語コミュニケーション課題を用いた意識的な行動リズム同期と脳波リズム同期[文献 10]

2者で他者とリズムを揃えるように交互にタッピングを行う課題を用いて、2者間の脳波リズムの位相同期を調べた。タッピング課題は相手が、人間の場合と一定の時間間隔でタッピングする PC プログラムの2条件で行った。パフォーマンス結果より、被験者ペアを他者のリズム合わせが上手な群と下手な群に分けた。脳波リズムの振幅結果は、運動野においてタッピング時に、アルファ波とベータ波が減少する結果を示した。このアルファ波とベータ波の時間構造において、他者とのリズム合わせ

が上手なグループは2つの脳波リズムが分離しているのに対して、下手なグループは2つの脳波リズムが同じ時間タイミングで出現した。さらに位相同期解析を行った結果、上手なグループのみが、2者間でアルファ波の位相同期が有意であった。

以上の結果は、コミュニケーション時に意識的に行動リズムを同期させることに、個体内の階層的な脳波リズムの時間関係だけでなく、個体間の位相同期が重要な役割を担うことを示唆する。

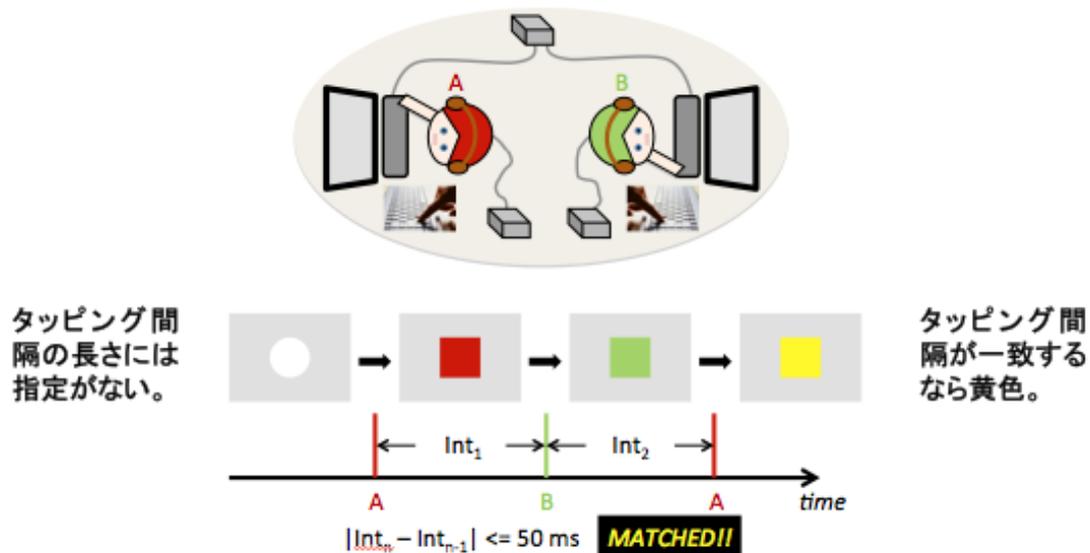


図4 交互タッピング実験課題の一例 下はモニター上に表示を示す。キー押しの時間と手前のキー押しの時間との間隔(タッピング間隔)がその手前にできたタッピング間隔とできるだけ同じになるように指示されている。二人の前に呈示されるモニターは同じ表示で、参加者がキーを押す毎にそれぞれ異なる色の図形がモニターに表示される。タッピング間隔の差が一定の範囲(50ms等)に収まった場合は、呈示図形が黄色になる。

iii). 発達障害者に対する意識的な行動リズム同期と脳波リズム同期[文献 11]

2で用いた交互タッピング課題を使って、発達障害群と定型発達群の違いを比較した。タッピング課題は相手が、人間の場合(必ず相手は定型発達者)、一定の時間間隔でタッピングするPCコンピュータ、急な変動を加えたタッピングを行うPCコンピュータの3条件である。一定の時間間隔でタッピングするPCコンピュータが相手では2群に差がなかったものの、人間が相手の場合、急な変動を加えたタッピングを行うPCコンピュータが相手の場合では、有意に発達障害群の方が相手とリズムを合わせるのが困難であった。さらにこのパフォーマンス結果は、発達障害を診断するスケールと有意に相関した。また課題遂行時の脳波リズムを解析した結果、発達障害群のみが前頭シータ波が有意に増加する結果を示した。以上の結果より、発達障害者は、コミュニケーションにおける急な変化やゆらぎに合わせるのが困難であること、ワーキングメモリに関わる前頭シータ波が増えた結果から他

者とリズムを合わせる際に認知負荷がかかっていることがわかった。

本研究期間内の我々の研究グループでは、脳波リズムが表現する脳ネットワークが複雑な認知機能を表現する可能性を示唆している[4]。今後はこれらの結果に基づき、コミュニケーションにおける個体内及び個体間をつなぐ脳波リズムの階層的なメカニズムを理解するとともに、発達障害などのコミュニケーション障害を診断する、軽減する整理指標の特定を目指している。

文献

- [1] M Kawasaki, K Kitajo, Y Yamaguchi, Dynamic links between theta executive functions and alpha storage buffers in auditory and visual working memory, *European Journal of Neuroscience* 31 (9), 1683–1689, 2010
- [2] M Kawasaki, K Kitajo, Y Yamaguchi, Fronto-parietal and fronto-temporal theta phase synchronization for visual and auditory-verbal working memory, *Frontiers in psychology* 5, 2014
- [3] FI Kleberg, M Kawasaki, K Kitajo, Y Yamaguchi, Ongoing theta oscillations predict encoding of subjective memory type, *Neuroscience research*, 2014
- [4] D Shimaoka, K Kitajo, K Kaneko, Y Yamaguchi, Ongoing Global Phase Pattern and Visual Signal Detection, *Advances in Cognitive Neurodynamics (III)*, 509–514, 2013
- [5] TJ Ozaki, N Sato, K Kitajo, Y Someya, K Anami, H Mizuhara, S Ogawa, Y Yamaguchi, Traveling EEG slow oscillation along the dorsal attention network initiates spontaneous perceptual switching, *Cognitive neurodynamics* 6 (2), 185–198, 2012
- [6] Keiichi Kitajo, Yumi Nakagawa, Yutaka Uno, Ryohei Miyota, Masanori Shimono, Kentaro Yamanaka, Yoko Yamaguchi, A manipulative approach to neural dynamics by combined TMS-EEG. *Advances in Cognitive Neurodynamics III*, 155–160, 2013
- [7] 北城圭一 TMS-EEG によるヒトの脳活動ダイナミクスと情報流の操作的研究 *Clinical Neuroscience* 32(7) (in press)
- [8] Masahiro Kawasaki, Yutaka Uno, Jumpei Mori, Kenji Kobata, Keiichi Kitajo, Transcranial magnetic stimulation-induced global propagation of transient phase resetting associated with directional information flow. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2014 doi: 10.3389/fnhum.2014.00173

- [9] Kawasaki M., Yamada Y., Ushiku Y., Miyauchi E., Yamaguchi Y., Inter-brain synchronization during coordination of speech rhythm in human-to-human social interaction. *Scientific reports* 3 (2013) 1692.
- [10] 川崎真弘・北城圭一・山口陽子「人と人のタッピング同期に関連した 2 者間の脳波リズム同期」
信学技報 112(176) 73-78 (2012)
- [11] Kawasaki M., Kitajo K., Fukao K., Murai T., Yamaguchi Y., and Funabiki Y., Neural dynamics for a sudden change in other's behavioral rhythm. In *Advances in Cognitive Neurodynamics IV*, Liljenstrom, H. (ed), Springer-verlag, 2014 (in press).

異なる入力情報の相互作用による自己組織化メカニズムの解明

研究代表：玉川大学工学部・教授 相原威

概要

脳内の外界モデル形成には、外界からのボトムアップ(感覚)情報だけでなく、注意や情動などによる広範囲調節系と呼ばれる内因性の情報も融合する必要がある。海馬や皮質などの神経回路への調節系の信号は、集中時などに内在性アセチルコリン(Ach)として放出され、記憶に関与するとの報告がある。そこで、本研究はボトムアップ入力の統合に対するAChによる修飾を細胞およびネットワークレベルの実験により検証を行った。

Abstract

For establish an internal model of external world, it is necessary to integrate not only the bottom-up (sensory) information from an external world but the endogenous information called diffuse modulatory systems, attention and emotion, etc. One of signal from diffuse modulation systems to neural circuits, such as a hippocampus and a cortical substance, is intrinsic acetylcholine during a concentration, which is related to memory. In this work, the influence of acetylcholine on the integration of a bottom-up input in cells or cortical neural networks was investigated.

1. 研究開始当初の背景

脳は外界のモデルを個体の目的に合わせて脳内に再構成し、しかもその状態を操作することができる。この操作が新しい知識を生み出す情報創成の根源である。このような脳内モデルの形成には外界からのボトムアップの情報だけでなく、トップダウンの情報も融合する必要がある。従来の研究によってボトムアップ情報のみに依存した外界モデルの形成メカニズムは実験的にも理論的にも徐々に明らかになりつつあるが、情報創成の視点から見たトップダウン機能を実現するメカニズムに関する研究はほとんどない。

本研究では、まずトップダウンの作用として、情動や集中時に関する広範囲調節系(特にアセチルコリン)による感覚情報(ボトムアップ情報)統合への修飾に注目し、個体の目的に合わせた脳内モデルの自己組織化を可能にするメカニズムを探る。またそうした情動的情報は、個体間のコミュニケーションで重要な情報と直結しており、脳内モデルの自己組織化に与えるコミュニケーションの影響として捉えることができる。ボトムアップとトップダウンというヘテロな系の相互作用ダイナミクスを実験と理論の両側面から明らかにすることで、コミュニケーションの脳内神経機構を探る糸口としていく。

具体的には、本研究はボトムアップ情報とトップダウン情報の相互作用によって自己組織化する神経回路を実験的に調べ、そのモデル構築と理論解析を通じて、その自己組織化原理を探る。本研究で行った生理実験は以下の2点である。

- (1)細胞レベルのトップダウンとボトムアップの相互作用
- (2)ネットワークレベルのトップダウンとボトムアップの相互作用

2. 研究の目的

(1) 細胞レベルのトップダウン情報とボトムアップ情報の相互作用

本研究は、記憶に関与する海馬神経回路の CA1 野におけるトップダウン入力(集中や随意行動時の注意などにより脳内に広範囲にわたって放出される内因性アセチルコリン)がボトムアップ(感覚入力)情報の統合に与える影響を解明することを目的とし、アセチルコリン放出時のスパイクタイミング依存性可塑性(STDP; Spike-timing dependent synaptic plasticity)をげっ歯類海馬により調べた。

(2) ネットワークレベルのトップダウン情報とボトムアップ情報の相互作用

はじめに、「モルモット聴覚野におけるボトムアップ・トップダウン情報の相互作用」を調べた。すなわち、モルモットの聴覚皮質において、聴覚によるボトムアップ情報と恐怖条件付けによる情動系のトップダウン情報がいかに相互作用するかを調べることを目的とした。さらに、聴覚刺激と両足電気刺激に加え視覚刺激による 2 次条件付けを行い、各皮質間の情報の連合を調べ、ネットワークレベルの情報統合を光計測法により明らかにした。

3. 研究の方法と成果

(1) 細胞レベルのトップダウン情報とボトムアップ情報の相互作用

(海馬 CA1 野におけるスパイクタイミング依存可塑性へのアセチルコリン効果)

<実験方法> (図 1 参照)

2~3 週齢の Wister Rat から抽出した海馬を厚さ 400 μm にスライスし、ACSF 溶液で 1 時間程度休ませた後、チャンバーに設置する。パッチクランプ法により CA1 領域 Pyramidal 層の細胞体にパッチ電極を挿入し、細胞内電位変化の記録とともに発火誘導する刺激を可能にする。また、EPSP を観測するために電気刺激用電極を Schaffer 側枝に挿入する。さらに、コリン作動性ニューロンを刺激し内在性アセチルコリンを放出させるため Oriens 層に電気刺激用電極を挿入する。刺激パターンは、Schaffer 側枝での EPSP 刺激に続くパッチ電極による発火刺激とのペアリングタイミングを $\Delta t=12\text{msec}$ として 5Hz で 16 秒間刺激を行う(STDP 誘起の protocol)。ペアリング刺激注入から 10 秒後にトップダウン入力として Oriens 層へ 40Hz を 0.5sec 間刺の刺激を行い、slow EPSP が観測できる状態にする。そしてこれら

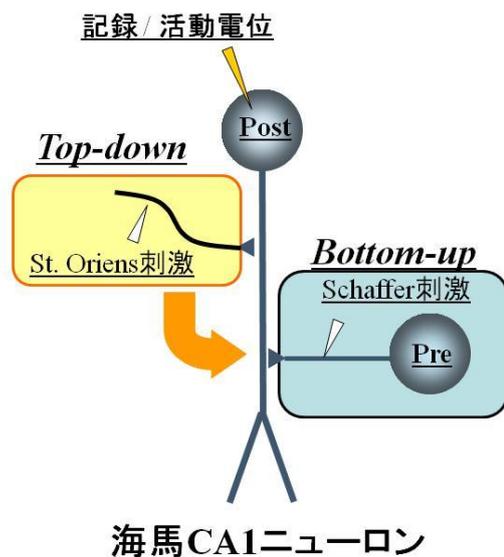


図1 実験方法(細胞レベル)

一連の刺激を入力する前 10 分間と後 30 分間をコントロール刺激(20 秒間隔)による EPSP 応答の傾斜で比較し, 変化率を算出する.

<結果と考察> (図 2 参照)

コリン作動性ニューロンへの刺激によるアセチルコリン放出が与える STDP への影響を調べた. 結果として, 長期増強(LTP; Long term potentiation)が促進され, 長期抑圧(LTD; Long term depression)の誘発は妨げられることを明らかにした. よって海馬 CA1 領域でトップダウン情報はボトムアップ情報と統合され, 効果的に作用することが示唆された.

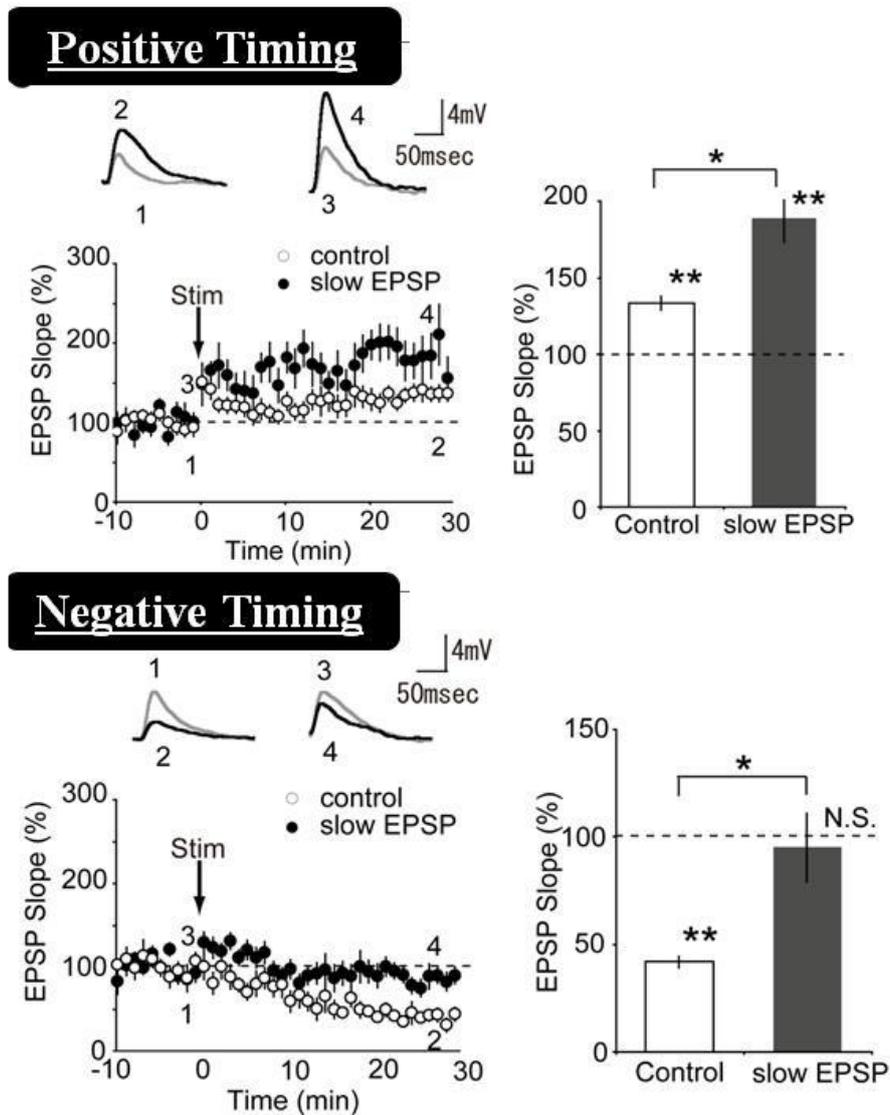


図 2 STDP 誘起へのアセチルコリンの影響

本研究で特出すべき点は、

- (i) より生理現象に近い条件で内因性アセチルコリンを作用させるために、上昇層に反復刺激を入力し、シナプスターミナルよりアセチルコリンを放出させ、slow EPSP を誘導してできるだけ自然に近い条件で実験をすることに成功したこと。これは従来のカルバコールなどを用いた薬理実験と比較すると、明らかに生理現象により近い条件下で行ったものである。
- (ii) STDP 誘導刺激を導入することで、LTP だけではなく LTD についてもアセチルコリンの効果を明らかにしたこと。本知見は、いまだ不明であった可塑性シナプスの長期増強・長期抑圧の両側面に対するアセチルコリンの影響を解明したものであり、その生理学的意義は大きい。
- (iii) エゼリンを投与することでアセチルコリンの濃度を定量的に変化させ、薬理学的実験による検証も行い、さらに NMDA チャネルの関与も NMDA の投与により調べている。さらに、細胞内へのカルシウムに着目した BCM モデル(Bienenstock et al 1982)における考察もなされ、そのシステムとしての妥当性の検討がなされた。
- (iv) またエゼリン投与と電気刺激の同時刺激、あるいは高濃度のエゼリン投与により、ボトムアップ入力による STDP への過剰アセチルコリンの影響も調べている。結果として過剰なアセチルコリンは、LTP・LTD ともに誘起が阻害されることを見出した。
- (v) 最後に、代謝型アセチルコリン受容体の阻害剤を用いて、上記の可塑性の修飾が代謝型アセチルコリン受容体の活性化によるものであることを明らかにした。

以上、本研究により内因性アセチルコリンの記憶神経回路における情報処理の影響が明らかになった。このことは、随意行動や注意などにおける脳内情報処理の生理現象を細胞レベルで見たことになり、今後はモデルの構築へとつながり、新しい世代の工学的な情報記憶装置の基盤および認知心理学の分野への重要な知見となりうる。

(2) ネットワークレベルのトップダウン情報とボトムアップ情報の相互作用

(恐怖条件づけにより聴覚野に生じる異なる感覚モダリティの統合)

<実験方法> (図 3, 図 4 参照)

モルモットに対して条件刺激(Conditioned Stimulus, CS)に純音、無条件刺激(Unconditioned Stimulus, US)に両足への電気刺激を用いる恐怖反応条件付けを行った。この恐怖条件付けにより聴覚野に生じる可塑的な変化について光計測法を用いた2つの実験により調べた。まず、純音と両足電気刺激による連合学習を行う前後で、条件付けに用いた CS 音(12 kHz)と条件付けに用いていない Non-CS 音(4,8,16 kHz)に対する聴覚野の応答変化について調べた。その結果、CS 音を提示した場合に限り、条件付け後に応答領域の増大が確認された。一方、音刺激ではなく、両足への電気刺激によっても、連合学習した音に関する情報が想起されるのではないかという観点から、音刺激を提示せず両足電気刺激だけを与えた場合の聴覚野応答を調べた(図3)。さらに聴覚刺激と両足電気刺激に加え視覚刺激による2次条件付けを行ない、条件付け学習による皮質間ネットワークの連合を調べる実験を行った(図4)。

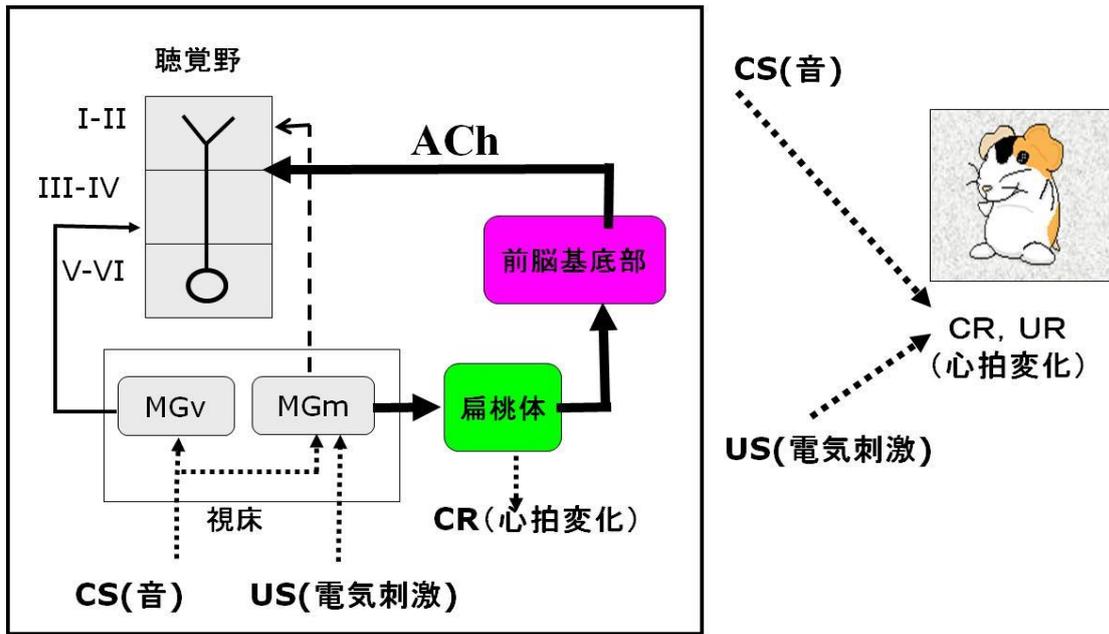


図3 実験方法1(ネットワークレベル)

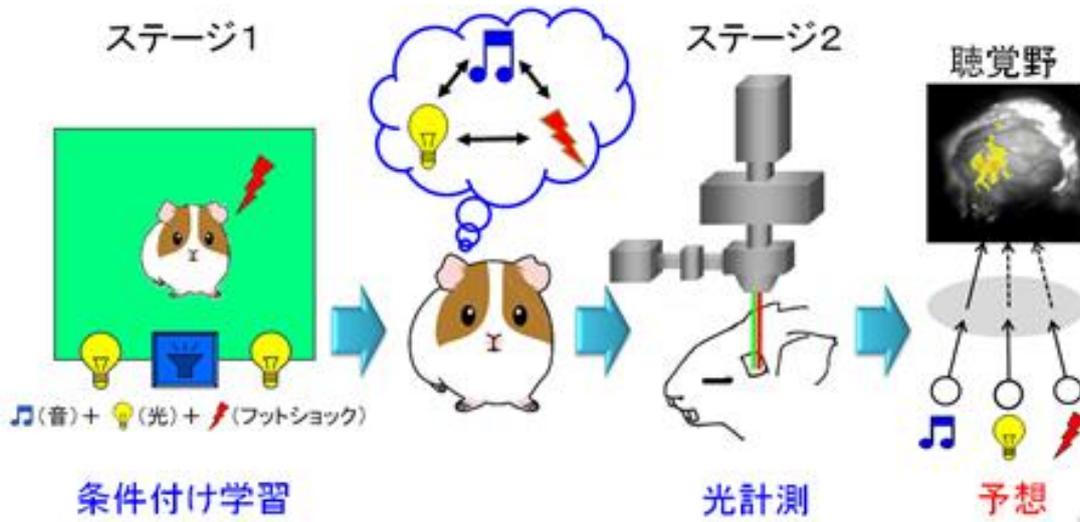


図4 実験方法2(ネットワークレベル)

<結果と考察> (図5,図6参照)

結果として、条件付け前には全く見られなかった両足電気刺激に対する聴覚野の応答が条件付け後に観測された(図5)。さらに、CS音と両足電気刺激に対する聴覚野応答領域には、相関が見られた。これらの結果は、恐怖条件刺激である電気刺激によるUS情報が、扁桃体、前脳基底部を経て聴覚野へアセチルコリンとGABAが放出される。また同時に聴覚皮質の1,2層へも直接投射がある。ここでCS音に対する聴覚入力により活性化した錐体細胞において、ボトムアップ入力とUS刺激によるトップダウン入力の連合により音刺激のみでも聴覚野に応答が起こるようになり、その結果、条件付けに使用した聴覚刺激の応答領域と音刺激の領域に相関がみられるものと考えられる。

さらに、聴覚刺激と両足電気刺激に加え視覚刺激による2次条件付けを行った(図4)。結果として、条件付け無しの個体では、フットショックに対して体性感覚野の応答のみであったが、2次条件付けした個体では、聴覚野と視覚野にも応答が見られた(図6)。これは、エピソード記憶のセルアセンブリを示すものであると考える。あるいは、触覚が見えたり、聞こえたりする事を示唆し、共感覚のメカニズムを神経レベルで実証する事に成功したとも考えられる。

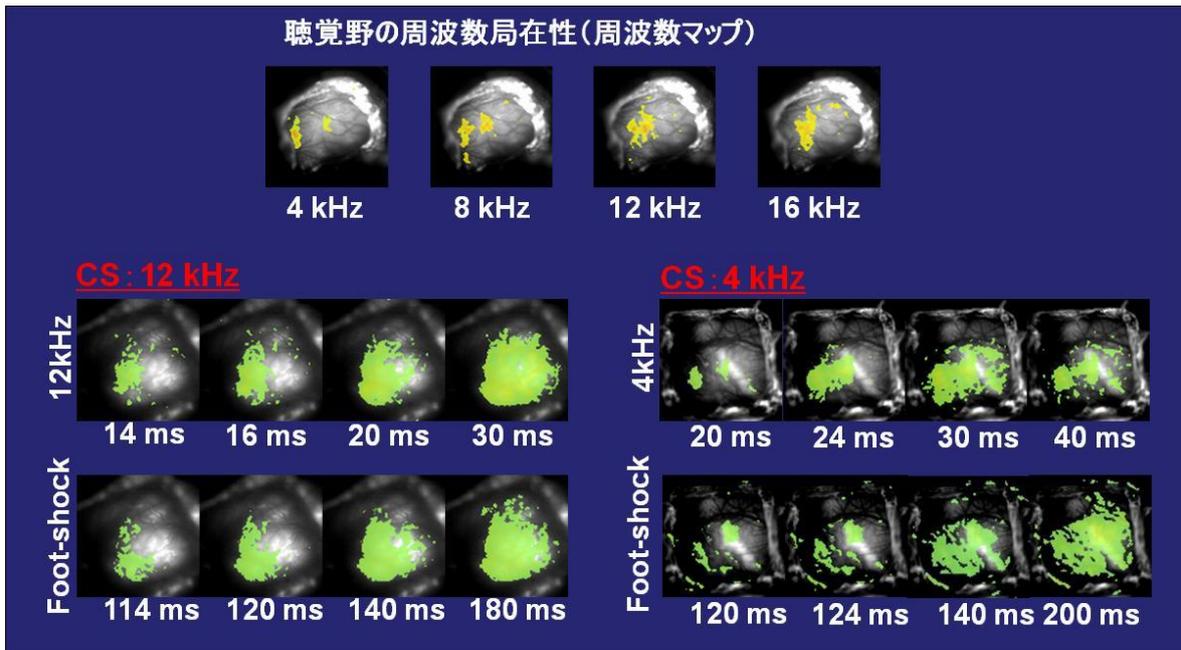


図5 聴覚皮質の応答変化

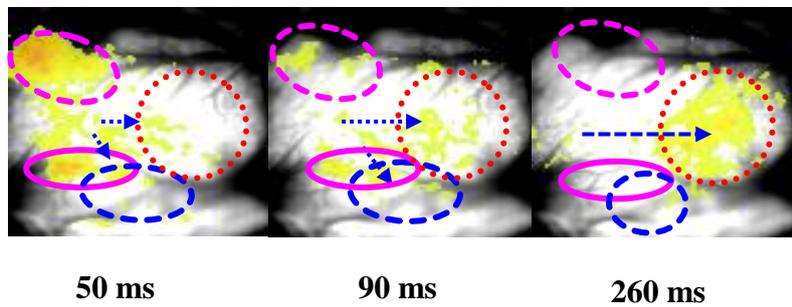


図6 聴覚, 視覚, 感覚皮質の応答変化

参考文献

- [1] Kamijo C.T., Hayakawa H., Fukushima Y., Kubota Y., Isomura Y., Tsukada M., and Aihara T. *Input integration around the dendritic branches in hippocampal dentate granule cells.* Cognitive Neurodynamics, 2014
- [2] Kondo M., Kitajima T., Fujii S., Tsukada M., and Aihara T. *Modulation of synaptic plasticity by the coactivation of spatially distinct synaptic inputs in rat hippocampal CA1 apical dendrites.* Brain Research, Vol. 1526, pp. 1-14, 2013
- [2] Samura T., Sakai Y., Hayashi H., and Aihara T. *Distance- and direction-dependent synaptic weight distributions for directional spike propagation in a recurrent network: Self-actuated shutdown of synaptic plasticity.* Lecture Notes in Computer Science, Vol. 8228, pp. 1-8, 2013
- [3] Ide Y., Takahashi M., Lauwereyns J., Sandner G., Tsukada M., and Aihara T. *Fear conditioning induces guinea pig auditory cortex activation by foot shock alone.* Cognitive Neurodynamics, Vol. 7, Issue 1, pp. 67-77, 2013
- [4] Aihara T., Sugisaki E., Fukushima Y., and Tsukada M. *Influence of the endogenous acetylcholin on STDP induction.* Advances in Cognitive Neurodynamics (III), pp. 387-392, 2013
- [5] Ide Y., Takahashi M., Lauwereyns J., Tsukada M., and Aihara T. *Integration of hetero inputs to guinea pig auditory cortex established by fear conditioning* Advances in Cognitive Neurodynamics (III), pp. 765-771, 2013
- [6] Samura T., Sato Y.D., Ikegaya Y., Hayashi H., and Aihara T. *Power-law scaling of synchronization robustly reproduced in the hippocampal CA3 slice culture model with small-world topology.* Lecture Notes in Computer Science, Vol. 7664, pp. 152-159, 2012
- [7] Fujiwara H., Sawa K., Takahashi M., Lauwereyns J., Tsukada M., and Aihara T. *Context and the renewal of conditioned taste aversion: The role of rat dorsal hippocampus examined by electrolytic lesion.* Cognitive Neurodynamics, Vol. 6, Num. 5, pp. 399-407, 2012
- [8] Yamazaki Y., Fujii S., Goto J., Sugihara T., Sugita M., Fujiwara H., Kaneko K., Aihara T., and Mikoshiba K. *Suppressive effect of preconditioning low-frequency stimulation on subsequent induction of long-term potentiation by high frequency stimulation in hippocampal CA3 neurons.* Brain Research, Vol. 1449, pp. 15-23, 2012

- [9]Yamazaki Y., Fujii S., Aihara T., and Mikoshiba K. *Activation of inositol 1, 4, 5-trisphosphate receptors during preconditioning low-frequency stimulation leads to reversal of long-term potentiation in hippocampal CA1 neurons.*Neuroscience, Vol. 207, pp. 1-11, 2012
- [10]Ide Y., Miyazaki T., Lauwereyns J., Sandner G., Tsukada M., and Aihara T. *Optical imaging of plastic changes induced by fear conditioning in the auditory cortex.* Cognitive Neurodynamics, Vol. 6, Issue 1, pp. 1-10, 2012
- [11] Yamaguchi Y, Sakai Y Reinforcement learning for discounted values often loses the goal in the application to animal learning. Neural networks : the official journal of the International Neural Network Society 35C 88-91, 2012
- [12]Sugisaki E., Fukushima Y., Tsukada M., and Aihara T. *Cholinergic modulation on spike timing-dependent plasticity in hippocampal CA1 network.* Neuroscience, Vol. 192, pp. 91-101, 2011
- [13]Yoneyama M., Fukushima Y., Tsukada M., and Aihara T. *Spatiotemporal characteristics of synaptic EPSP summation on the dendritic trees of hippocampal CA1 pyramidal neurons as revealed by laser uncaging stimulation.*Cognitive Neurodynamics, Vol. 5, pp. 333-342, 2011
- [14]Nishiyama M., Togashi K., Aihara T., and Hong K. *GABAergic activities control spike timing- and frequency-dependent long-term depression at hippocampal excitatory synapses.* Front. Syn. Neurosci., Vol. 2:22, pp. 1-15, 2010

過去の経験と現在の状況から展望的記憶を動的に形成する記憶メカニズムの解明

研究代表：京都産業大学コンピュータ理工学部・准教授 奥田次郎

概要

将来行うべき行動の予定を計画・記憶し、状況に応じて適切なタイミングで思い出して遂行する展望的記憶の認知脳機構について、脳内の複数神経システム間の動的な相互作用の観点から検討した。脳機能画像データの領野間相関の異時点間分析や脳波の周波数位相同期ネットワークの解析を通して、自己と他者の過去の行動の記憶から将来を展望して行動予定を計画、遂行する神経機構を同定し、複数の人間の間で行動の意味や意図を伝達し合うための記号コミュニケーションシステムの形成過程の解析へと応用した。

Abstract

We investigated neural communication mechanisms subserving human prospective memory that enables us to formulate, encode, maintain, remember and realize intentions of future action plans. We identified patterns of inter-temporal and inter-areal correlations of functional magnetic resonance imaging data and phase synchronization networks of electroencephalography data when human subjects remember one's own or other's past behavior to construct ideas about future plans. We further extended such neural mechanisms of individual person to analyses of person-to-person interactions for development of a new communication system that enabled transmission of intentions and sharing of behavioral meanings by using memories of past behaviors of self and others.

1. 研究開始当初の背景

我々の日常生活において、将来行うべき行動の予定を計画・記憶し、状況に応じて適切なタイミングで思い出して実行に移す能力は極めて重要である。このような、今後行うべき行動予定の遂行に必要な記憶過程を展望的記憶と呼び、過去に経験した出来事を思い出すタイプの古典的な記憶機能とは区別して研究が行われてきた。このような展望的記憶の能力は、人間特有の柔軟で創造的な社会活動を保障する一方、高齢者や認知症患者におけるその障害が社会的な問題となる。しかしながら、ヒトの脳がどのようにして未来の行動予定の記憶を形成し、その情報を状況に応じて適切に処理するかについては、それが現在の環境の知覚や認知判断、行動決定と遂行など複数の認知処理と関わり合いながら生起する複合的な過程であることから、全容の理解は遅れている。

申請者らが開拓し [1]、これまで行なってきた脳イメージング研究(総論は [2, 3] に発表)では、展望的記憶の要素的な認知過程を実験室内で模擬した行動課題を用いて、行動予定の記憶保持と想起・遂行の各過程で働く中核的な脳領域の活動特性が明らかとなっていた。これに対し、これら要素的な認知過程(あるいは単独脳領野の活動)同士を相互に繋いで、過去の経験や現在の状況を踏まえて行動予定を形成・記憶して遂行する一連の機能を実現させるような認知脳機構については検討が進んでいなかった。このことは主に、本新学術領域全体のテーマである複数システム間の動的な相互作用過程を記述・分析する理論および実験的枠組みの未成熟がボトルネックとなってい

る。

一方で実験計測技術の面では、脳波や機能的磁気共鳴画像 (fMRI) などによる脳計測データを用いて、脳全体の時空間活動パターンを複数神経ネットワーク間の機能的結合として解析する手法の研究が進んできた。本研究では、過去の経験や現在の環境文脈に応じた行動予定の記憶形成・想起・遂行という複合的な過程を対象に、複数神経ネットワーク間の脳内相互連携の成立機構を様々な脳計測手法を併用して明らかにしてゆくことで、本新学術領域研究への寄与を目指す。

2. 研究の目的

(1) 展望的記憶の脳内相互作用メカニズム

上記の背景に基づき、展望的記憶に関わる複数の認知過程の間の相互作用の様相を分析し、認知過程間の連携を成立させる脳メカニズムを検討することを目的とした。この目的のため、展望的記憶を構成する中核的な認知プロセスとして i) 現在の環境の知覚・判断, ii) 文脈依存的な記憶の形成と取り出し, iii) 未来の行動予定の計画立てと遂行の3つの過程に主に焦点をあて、それぞれの神経機構を個別に検討するとともに、それらが相互に干渉、協調、制御しあう様相を明らかにする。具体的には、各プロセスについて、fMRI の領野間活動相関や脳波の広域的周波数位相同期に着目し、神経活動の時空間結合パターンを同定する。これらの検討を通して、展望的記憶のプロセス間の相互連携過程における神経ネットワーク間の動的な相互作用機構を見出すことを目的とした。

(2) 個体間コミュニケーションへの応用

以上の本研究当初の目的に加え、研究期間の後半では、研究領域内での発展的な共同研究の試みとして、展望的記憶の神経機構の知見を、複数の個体(ヒト)が相互に情報を伝達し合いながら共通のコミュニケーションシステムを構築する過程の解析へと応用することを試みた。この検討は、本新学術領域 C01G3 班における行動研究・モデルシミュレーション研究との共同研究として実施した。

さらに派生的な研究目的として、ヒトの脳の活動と情報機器との間の相互コミュニケーション機構の実応用の可能性についても探った。

3. 研究の方法と成果

以上の目的を踏まえ、次の各項目についての研究を段階的に行った。

- (1) 展望的記憶の各認知プロセスに関わる神経システムの同定
- (2) 認知プロセス間の相互作用の解析
- (3) 展望的記憶過程が個体間コミュニケーションに果たす役割の検討
- (4) 脳活動と情報機器の直接連携の試み

これらの各項目について、得られた知見を以下にそれぞれまとめる。最後に、本研究全体を通して得た、記憶と展望を基にした人間のコミュニケーションシステム形成に関する仮説的モデルを提示する。

(1) 展望的記憶の各認知プロセスに関わる神経システム

研究目的に挙げた中核的な認知プロセスについて、関わる神経システムの同定を行った。主としてポジトロンCT (PET) やfMRIを用いた脳機能画像実験と、脳損傷や精神神経疾患などの臨床症例の症状解析から、各認知素過程に関わる脳内の機能モジュールの同定とその活動特性の分析を行った。さらに、同定された機能モジュール間の活動同士の関係性の検討を行い、各認知プロセスを実現する神経ネットワークの振る舞いを考察した。

記憶の素過程に関わる神経システムの検討では、文脈依存的な記憶の形成と取り出しに関連して、海馬を中心とした内側側頭葉の活動特性ならびに、内側側頭葉と他の大脳機能領野(前頭前野や後方感覚領野など)との間での活動の動的な関係性について幾つかの知見を得た [4-7]。具体的には、fMRIを用いて、視覚刺激の新奇性に対する海馬領域の反応が刺激に対する処理の文脈(知覚的な処理か意味的な処理か)に依存して変化すること [5]、海馬領域が記憶の人物文脈(記憶内容をどの人物から得たかという記憶の情報源)の想起に関連して活動すること [6] を明らかにした。人物文脈に関してはさらに、情報をどの人物に伝えたかという伝達先の記憶文脈の想起についても引き続き実験を行い、情報源の想起とは異なる海馬領域の活動を同定した。これら人物文脈の記憶については、(3)の個体間コミュニケーション過程の解析への応用に役立てることができた。また、時間的な文脈の記憶についても検討を行い、過去の複数の経験の間の時間間隔の記憶想起において、海馬領域(間隔が短いほど活動増加)と前脳基底部(長いほど活動増加)が異なる活動特性を示すことを見出した [7]。

記憶に関わる神経ネットワークの動的な特性に関する検討では、臨床症例のPET賦活研究から、前頭葉と海馬領域の間の動的な活動拮抗に関する貴重な知見を得ることができた [8]。強い心傷やストレスなどに応じてある一定の事柄に関する経験のみが思い出せなくなる解離性逆行性健忘症例において、思い出せない内容が呈示されたときには外側前頭前野の活動が亢進し、海馬領域の活動が低下していた。しかしながら、心理療法によってこの記憶障害が改善した後は、両領域の拮抗的な活動亢進・低下は消失した。これらの結果は、外側前頭葉の活動が海馬領域の活動を抑制することで、記憶の抑圧制御を行う動的な機序を示唆するものである。

また、環境の知覚過程とも関連する研究結果として、外部刺激の感覚受容時に生じる内側側頭葉と感覚特異皮質(色におけるV4野や動きにおけるV5野)の活動がその感覚経験の記憶を想起する際に再び現れることをPETを用いて明らかにした [9, 10]。本知見は、研究項目(2)のプロセス間(知覚と記憶想起)相互作用にも関わる成果である。さらに、刺激の知覚と判断に関する脳システムの活動特性の検討として、視覚刺激の知覚判断(線分の傾き方位判断)の正確性を組み込んだ強化学習時系列モデルをfMRIデータの解析に応用する方法を提案した [11]。この手法を用いた展望的記憶過程の解析の検討については今後の課題である。

行動予定の計画立てと遂行のプロセスに関しては、これまでの展望的記憶研究であまり検討されていなかった、行動予定の記憶形成に関わる神経システムの検討をまず行った。特定の視覚刺激(風景などの写真)に対して特別な身体運動(ジョイスティックの操作)を行う行動予定を計画し、これを記憶して後に実行させる課題中のfMRI計測を行った。その結果、行動予定を計画・記憶する際に前頭葉内側領域(前脳基底部周辺)、海馬領域、感覚-運動皮質が強く活動した場合に、後でその予定を正しく思い出して実行できる確率が高いことが明らかとなった [12]。この結果は、前頭葉-海

馬一感覚運動皮質から成る神経システムの活動が、将来の行動予定の強固な記憶を形成する過程に役割を果たすことを示すものである。

さらに、現在の認知活動の途中で特別な行動予定を思い出して遂行する過程に関する fMRI 研究を行い、内側前頭前野の活動が行動予定遂行タイミングの予測や複数の将来行動の間の注意の配分に応じて変化することを示した [13]。

これら一連の成果は、前頭葉－内側側頭葉－感覚皮質を結ぶ神経システムの動的な活動特性が記憶や将来計画・遂行の諸過程を制御することを示すものである。

(2) 認知プロセス間および脳システム間の相互作用

(1) で検討した各認知プロセスが複数関わった場合の相互連携や干渉のメカニズムを、行動データおよび脳機能モジュールの活動の動的な相互作用の観点から解析した。fMRI データの領域間活動相関を時間軸上に発展させた異時点間活動相関解析を試み、また脳波データの周波數位相同期ネットワークの解析を実施した。

研究項目 (1) で明らかとなった各認知プロセスに関わる神経システムの活動特性を繋いで、複数のプロセス間の相互連携の特徴を検討するためには、実験課題中の被験者の動的な行動変化と対応させた、複数神経領域間の活動同士の関係性の解析を行う必要がある。ここでは、脳機能領域間の動的な活動連携を明らかにするための解析方法の検討としてまず、fMRI データからの単一試行ごとの脳活動指標の推定と、その領域間相関解析への応用を考案、検証した。fMRI により計測される脳血液酸素化レベル (BOLD) 信号から神経スパイク活動の時系列をベイズ推定し、脳血行動態による時間遅れの無いリアルタイムの神経活動指標を求めた。この指標を用いて、被験者が注意を向ける視覚対象 (顔または文字) を特異的に処理する後方視覚領域 (顔領域および文字領域) の間での神経活動の強さの差を一試行ごとに同定し、この後方感覚領域内の活動拮抗と相関する脳領域を探索した。その結果、外側前頭前野の神経活動が試行ごとの感覚領域の活動拮抗の強さと相関し、さらに外側と内側の前頭前野の神経活動相関が強いほど被験者が素早く注意選択課題に回答できるようになる様子を捉えることが出来た [14]。この結果は、感覚入力の神経情報処理の拮抗状態に依存した自動的でボトムアップな注意・行動制御を可能にする、神経機能モジュール間の動的なネットワーク機構を明らかにしたものとと言える。

この領域間神経活動相関解析の手法をさらに時間軸上に発展させ、時間的な幅をもって複数の認知過程が相互に干渉しあう展望的記憶の脳内ネットワークの分析に応用した。すなわち、現在の環境刺激の処理を行いながら将来の行動予定に注意を払い、あらかじめ記憶しておいた特定の環境条件に応じて適切に予定行動を想起・実行する課題において、現在の刺激処理と未来の予定行動想起との間で動的に注意を制御する過程の脳メカニズムを検討した [13]。この課題の行動解析から、現在の環境刺激への応答速度が速いほど予定行動の想起・実行速度が遅くなるという、時間横断的な行動トレードオフ現象を明らかにし、このような自動的な行動調節を生じさせる動的な注意制御が、環境刺激への応答時と予定行動想起・実行時の間での異なる内側前頭葉領域間の時間横断的な神経活動相関の強さと関連することを見出した。

また、同様の神経活動相関解析手法を応用して、行動予定の計画・記銘時の神経ネットワークの異時点間相関が、予定行動の想起・遂行成績に及ぼす影響を分析した [12]。視覚刺激に対して行

動予定を計画・記録する課題において、視覚刺激の呈示と行動予定の計画立てのタイミングとの間に時間差を設け、刺激呈示時点と予定計画時点との間での脳領野間の活動相関が後の予定想起の成功・失敗を予測するか検討した。その結果、内側前頭葉－内側側頭葉－視覚皮質の間の異時点間活動相関が強い場合に、後の予定想起の成績が高いことが明らかとなった。

以上の研究成果はいずれも、脳の様々な機能領野の単独の活動のみならず、機能領野間での時間横断的な活動の関係性が、各認知プロセスを文脈依存的に統合して展望的記憶を適切に成立させるために重要な役割を果たすことを示すものと言える。

(3) 個人間コミュニケーションへの応用と2者脳波同時計測実験

以上に行ってきた展望的記憶の認知脳メカニズムの解析を、複数の人間の間でのコミュニケーションの実現過程の分析へと応用した。ここでは特に、研究成果(1)で示した、情報源(情報を誰から得たか)および情報伝達先(情報を誰に伝えたか)の記憶に関わる脳システムが分離するという知見を進展させ、2者間コミュニケーション課題において、他者から得た情報や自己が他者に伝えた情報の記憶に基づいて将来の行動を計画する過程の解析を試みた。このときの2者の脳活動同士の関係性を検討する目的で、同一課題を遂行中の2名の被験者の脳波を同時記録できるシステムを、2台の脳波アンプを連携させて構築した。

具体的には、2名の被験者が無意味な記号を組み合わせたメッセージを互いに交換することを通して両者の意思や意図を有効に伝達し得る人工言語システムを構築する課題 [15] において、「相手から得た情報の記憶」と「自己が発信した情報の記憶」を基にした被験者の課題行動の計画立ての戦略を、行動データを用いて分離する方法を開発した [16, 17]。これらの行動戦略に応じた頭表脳波パターンの特徴を、脳波パワーの時間一周波数特性や、異なる脳波チャンネル間での周波數位相同期のネットワーク構造の観点から解析した。その結果、自他の記憶情報に応じた行動の計画立てが、脳波の異なる空間部位(チャンネル)、潜時(課題中の時間帯)、周波数帯の活動に分離して表現されており、チャンネル間の位相同期ネットワークの構造も両行動戦略の間で異なるという知見を得た。さらに、2名の被験者の間で、同一の行動戦略に対応した同期ネットワークの類似度が高まっていた。このような共通ネットワークの発現が、2者間で共通の意思伝達システムの形成の一端を担うと考えられる。

(4) 脳波を用いた情報機器制御

本研究で検討した複数システム間の相互作用メカニズムの実社会応用の可能性の一つとして、脳活動と情報機器との間の直接的な連携機構の実装を試みた。携帯型脳波計から取得したユーザの脳波周波数成分データをサーバに送信して機械学習モデルにより分類し、学習モデルをユーザの行動と脳活動データから逐次的に更新することでモバイル情報端末のアプリケーション起動の最適制御を試みるシステムを構築した。このシステムの動作評価実験を行い、学習および分類アルゴリズムを様々な改良することで、脳活動による情報端末制御の正確性の向上を実現した [18, 19]。

(5) 展望的コミュニケーション仮説

本研究では、人間が記憶に基づいて将来を展望して行動予定を計画・記憶し、遂行する際の脳システム間の機能連携を様々に検討した。この検討を通して、記憶に基づく将来展望と予定形成・想起に関連して働く脳の内側領野(内側前頭葉, 内側側頭葉など)のネットワーク(「記憶=展望」システム)と、現在の環境に対する即時的な応答を担う外側の前頭前野-感覚運動領野ネットワーク(環境応答システム)との間の時空間的な活動相関や拮抗関係が次第に明らかとなってきた。これらは個人の脳内の複数システム間の関係についての知見であるが、本研究の成果全体を通して得た発展的なまとめとして、このメカニズムが個人間のコミュニケーションの成立に果たす役割についての仮説的な脳認知モデル(展望的コミュニケーション仮説, 下図1参照)を提唱した [3, 20-22].

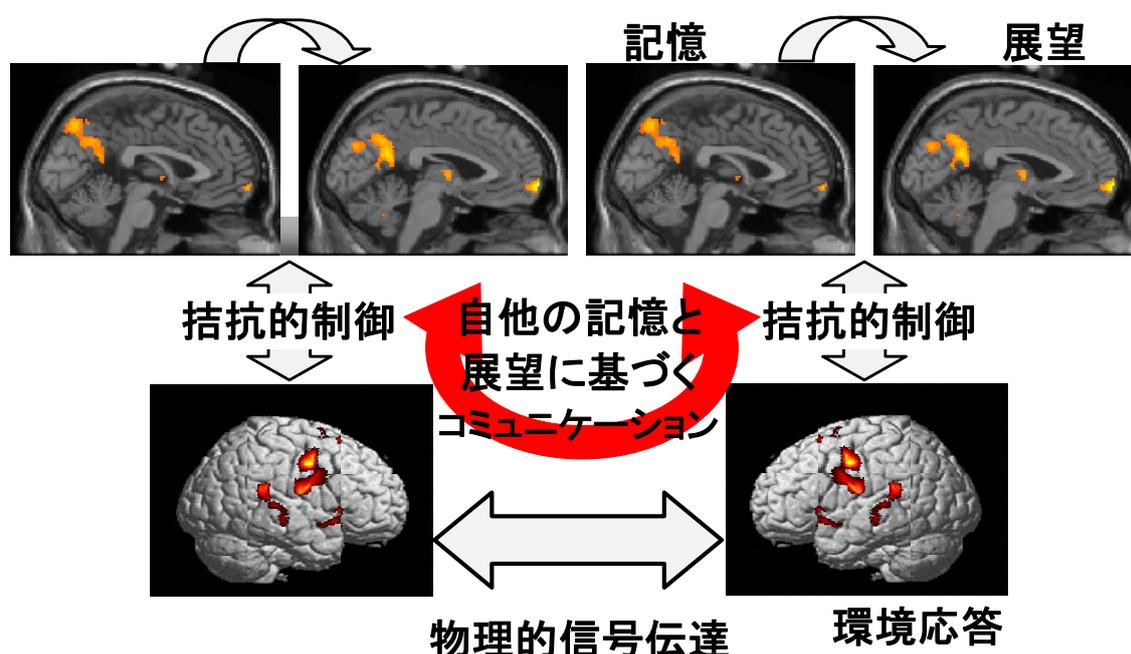


図1. 展望的コミュニケーション仮説の概念図

本モデルでは、各個人の脳内において、環境応答システムと記憶=展望システムとが拮抗的な制御関係を有しながら階層的に結合している。個人間コミュニケーションにおいて、音声や表情、身振りなどの物理的な信号は2者の環境応答システムを通じてやりとりされるが、この入出力には各自の記憶=展望システムが階層的に関わる。記憶=展望システムによって自己や他者の記憶情報から推測される将来展望の情報が提供されることで、自他や環境の文脈を適切に取り入れた柔軟な個人間コミュニケーションが成立し得るものと考えられる。このような仮説を支持する証拠の1つとして、本研究成果(3)で示した、個人間コミュニケーションシステム形成課題で他者の記憶に基づく行動戦略の脳波同期ネットワークが2個人間で類似した構造をとるようになる、という知見が挙げられる。しかしながら、この脳波ネットワークが実際に脳の内側領野から成る記憶=展望システムの活動を反映するかは明らかでなく、またどのようにして図1に示すような階層ネットワークが形成され、機能するかも現時点では不明である。これらの点を明らかにするため、さらに研究を進める必要がある。

参考文献

- [1] Jiro Okuda, Toshikatu Fujii, Atsushi Yamadori, Ryuta Kawashima, Takashi Tsukiura, Reiko Fukatsu, Kyoko Suzuki, Masatoshi Ito, Hiroshi Fukuda. Participation of the prefrontal cortices in prospective memory: evidence from a PET study in humans. *Neuroscience Letters* 査読有 253(2), 1998, 127-130
- [2] Jiro Okuda. From prospection to prospective memory: constructing, encoding, and remembering future plans. *Psychologia* 査読有 55(2), 2012, 146-160
- [3] 奥田 次郎, 藤井 俊勝. 展望する脳. In: 社会脳シリーズ1「社会脳科学の展望」(編: 苧坂 直行), 新曜社, 2012, pp.1-33
- [4] Nobuhito Abe, Toshikatsu Fujii, Maki Suzuki, Aya Ueno, Yayoi Shigemune, Shunji Mugikura, Shoki Takahashi, Etsuro Mori. Encoding- and retrieval-related brain activity underlying false recognition. *Neuroscience Research* 査読有 76(4), 2013, 240-250
- [5] Ryusaku Hashimoto, Nobuhito Abe, Aya Ueno, Toshikatsu Fujii, Shoki Takahashi, Etsuro Mori. Changing the criteria for old/new recognition judgments can modulate activity in the anterior hippocampus. *Hippocampus* 査読有 22(2), 2012, 141-148
- [6] Syunnji Mugikura, Nobuhito Abe, Maki Suzuki, Aya Ueno, Shuichi Higano, Shoki Takahashi, Toshikatsu Fujii. Hippocampal activation associated with successful external source monitoring. *Neuropsychologia* 査読有 48(6), 2010, 1543-1550
- [7] Maki Suzuki, Jiro Okuda, Aya Ueno, Yoshihiko Matsue, Toshikatsu Fujii. Neural correlates of the retrieval of temporal order memory. Presented at 42nd Annual Meeting of Society for Neuroscience (Neuroscience 2012), New Orleans, USA, Oct. 17, 2012
- [8] Hirokazu Kikuchi, Toshikatsu Fujii, Nobuhito Abe, Maki Suzuki, Masahito Takagi, Shunji Mugikura, Shoki Takahashi, Etsuro Mori. Memory repression: brain mechanisms underlying dissociative amnesia. *Journal of Cognitive Neuroscience* 査読有 22(3), 2010, 602-613
- [9] Aya Ueno, Jiro Okuda, Toshikatsu Fujii. Reactivation hypothesis in episodic memory: from the findings of neuroimaging studies. In: *Advances in Cognitive Neurodynamics (III)* (Ed: Yamaguchi Y), Springer, 2013, pp.781-786
- [10] Aya Ueno, Nobuhito Abe, Maki Suzuki, Yayoi Shigemune, Kazumi Hirayama, Etsuro Mori, Makoto Tashiro, Masatoshi Itoh, Toshikatsu Fujii. Reactivation of medial temporal lobe and human V5/MT+ during the retrieval of motion information: a PET study. *Brain Research* 査読有 1285, 2009, 127-134
- [11] Hiromasa Takemura, Kazuyuki Samejima, Ruffin Vogels, Masamichi Sakagami, Jiro Okuda. Stimulus-dependent adjustment of reward prediction error in the midbrain. *PloS ONE* 査読有 6(12), 2011, e28337
- [12] Jiro Okuda, Maki Suzuki, Toshikatsu Fujii. Correlated brain activations during formation of memory for future plans. In: *Advances in Cognitive Neurodynamics (III)* (Ed: Yamaguchi Y), Springer, 2013, pp.437-442

- [13] Jiro Okuda, Sam J Gilbert, Paul W Burgess, Chris D Frith, Jon S Simons. Looking to the future: automatic regulation of attention between current performance and future plans. *Neuropsychologia* 査読有 49(8), 2011, 2258-2271
- [14] Yosuke Morishima, Jiro Okuda, Katsuyuki Sakai. Reactive mechanism of cognitive control system. *Cerebral Cortex* 査読有 20(11), 2010, 2675-2683
- [15] Takeshi Konno, Junya Morita, Takashi Hashimoto. Symbol communication systems integrate implicit information in coordination tasks. In: *Advances in Cognitive Neurodynamics (III)* (Ed: Yamaguchi Y), Springer, 2013, pp.453-459
- [16] Jiro Okuda, Maki Suzuki, Takeshi Konno, Junya Morita, Takashi Hashimoto. Planning based on one's own past and other's past during a communication task. Presented at The 4th International Conference on Cognitive Neurodynamics (ICCN2013), Sigtuna, Sweden, Jun. 23-27, 2013
- [17] Jiro Okuda, Maki Suzuki, Takashi Hashimoto, Takeshi Konno, Junya Morita. Experimental approaches to mechanisms of memory-guided future planning. Presented at Dynamic Brain Forum 2012, Carmona, Spain, Sep. 3-6, 2012
- [18] 日高 智貴, 白石 優旗, 河合 由起子, 奥田 次郎. 脳波分析による意図および気分抽出に基づく制御システムの提案. The 6th Forum on Data Engineering and Information Management (deim2014) にて発表, 淡路夢舞台, 兵庫, Mar. 5, 2014(学生プレゼンテーション賞受賞)
- [19] 日高 智貴, 増谷 直人, 木下 裕輝, 白石 優旗, 河合 由起子, 奥田 次郎. 携帯型端末を用いた脳情報に基づく情報推薦システムの提案. The 5th Forum on Data Engineering and Information Management (deim2013) にて発表, 磐梯熱海, 福島, Mar. 5, 2013(学生プレゼンテーション賞, 優秀インタラクティブ賞受賞)
- [20] 奥田 次郎. 展望する脳-コミュニケーションの仕組みの理解に向けて-. 北陸先端科学技術大学院大学 知識科学研究科セミナー にて発表, 能美, 石川, Nov. 24, 2011
- [21] 奥田 次郎. 未来はどこからやって来る? -展望的な人間の脳情報処理と社会コミュニケーション-. 第 69 回 京都産業大学 市民講座 にて発表, 京都, Apr. 27, 2011
- [22] 奥田 次郎, 藤井 俊勝. 行動予定の脳機構. 包括脳ネットワーク 夏のワークショップ にて発表, 札幌, Jul. 27-30, 2010

脳内回路の引き込み協調による言語・非言語コミュニケーションの創発原理の解明

研究代表：京都大学情報学研究科・講師 水原啓暁

概要

脳内の異なる皮質間での情報伝達は、脳波などで観察可能な神経振動子の引き込み協調により実現されることが、記憶課題などを対象として示されてきた。本研究課題では、この神経振動子の引き込み協調により、言語・非言語コミュニケーションが実現されているものにとらえ、言語コミュニケーションの神経基盤を検証するために、文理解、音声コミュニケーション中の脳波計測を実施した。また、非言語コミュニケーション課題として、他者の状態推定を必要とする課題、および他者との協調を必要とする課題を用いた際の脳内の神経回路の動的な変調を検証するとともに、脳間において神経振動子の引き込み協調がコミュニケーションを実現していることを検証した。

Abstract

Neural synchrony is a crucial mechanism to dynamically communicate between cortices in the brain. The neural synchrony is usually observed as the EEG activity, and has been often elucidated in the term of mnemonic function. We used the scalp EEG recordings during a sentence comprehension task and a vocal communication task, in order to elucidate the underlying mechanism of the verbal communication in the current project. Here we assumed that the neural synchrony is the common mechanism to explain the verbal and non-verbal communications. For investigating the mechanism of non-verbal communication, the causal relationship analysis of fMRI was used to verify the dynamical modulation of the cortical networks caused by non-verbal interaction to others. We also elucidated the mechanism of the inter-personal communication emerges with the neural synchrony of EEGs from two brains.

1. 研究開始当初の背景

言語や非言語によるコミュニケーションにおいては、外界とのダイナミックな相互作用が重要であるとともに、ダイナミックに変化する外界の状況に応じた適切な神経回路網を、脳内で動的に形成する必要がある。乾(1998)は言語現象および神経心理学的知見並びにイメージング研究に基づき、言語コミュニケーションに関する脳内メカニズムの仮説「運動系列予測学習仮説」を提案している[1]。この仮説では、系列の予測学習および感覚と運動の順逆変換が重要な機能となる。後者は模倣学習と密接に関連している。ここでの模倣は、視覚情報から自己の運動情報への変換(見まね、ジェスチャーの理解)や聴覚情報から自己の運動情報(構音指令)への変換(聞きまね、復唱)が重要となる。つまり、他者の運動指令を予測しつつ模倣学習を進めるというダイナミックな情報の処理過程が、運動系列予測学習仮説である。乾らのグループでは長年にわたり、言語コミュニケーションにおける言語理解や、非言語コミュニケーションにおける他者の動作理解においては、運動系列の予測的模倣が重要であることを、脳機能イメージング手法や計算論モデルを用いることで明らかにしてきている(例えば

[2]). また、水原らの研究グループが研究開始当初までに行なってきた研究により、作業記憶中においては、複数の周波数にまたがる神経振動子の過渡的な同期が、脳内で分散表象された情報を統合していることが明らかにされている[3]. 理論的な観点から、複数の周波数での神経振動子で表象された情報の引き込み協調は、脳内の分散した部位で表象された情報の再活性化のタイミングを予測するためのものであると考えられる.

この脳内の現象と同様に、言語・非言語コミュニケーションにおいても神経振動子の引き込み協調により運動指令の予測を実現しているものと考えられる. 例えば、ヒトの言語コミュニケーションにおける発話は 4~8Hz と 30~50Hz の変調波から構成されており、これらの周波数は言語の音節(シラブル)および音素(フォニーム)の周波数と一致する. これらの発声の時間的な変調波は脳内の神経振動子のリズム(シータ波およびガンマ波)と一致しており、これらのシラブルおよびフォニームが、左右の聴覚皮質において別々に処理されていることが明らかにされている [4]. さらに、顔のジェスチャーや頭部の動きと周波数が一致しているプロソディ(発話のイントネーションやリズム: 1~3Hz, デルタ波)も、音声認識に重要であることが報告されている. 従来の研究により、話者の顔を見ることで音声コミュニケーションの理解が促進されることが知られており、音声を理解する際においても、構音にかかわる器官の活動が重要であることが指摘されている. つまり、これらのことは言語コミュニケーションにおいて、他者の運動指令予測が言語理解を促進していることを示唆している.

2. 研究の目的

本研究では、動作予測によるコミュニケーションの創発原理にかかわる以下の 2 つの課題に着目し研究を実施した.

- (1) 言語コミュニケーションにおける動作予測
- (2) 非言語コミュニケーションにおける動作予測

それぞれの研究課題にかかる詳細については、下記のとおりである.

(1) 言語コミュニケーションにおける動作予測

文理解を実施している際の脳ダイナミクスを明らかにするとともに、音声コミュニケーションにおいては、プロソディ検出による運動予測によりシラブル(シータ波)とフォニーム(ガンマ波)の動的な統合を実現していることを実験的に明らかにする.

1990 年頃より人間の言語処理の脳内メカニズムが徐々に明らかにされつつある. しかしながら、言語を高速でオンライン的に処理する脳内メカニズムなどは不明である. そこで本研究では言語の意味理解における動作予測の役割を説明できる脳神経科学的に妥当なモデルを提案した. ここでは、発達心理学・神経心理学・神経生理学・脳イメージング研究などのデータに基づき、文理解とその発達に関するモデルを考案することを目的とした. さらに言語理解課題遂行中の脳波計測を実施することで、この仮説を検証した.

また、音声言語コミュニケーション時の話者の動作予測に着目して、発話リズムの引き込み協調により、コミュニケーションが実現していることを検証した. この研究においては、音声コミュニケーションでは発話に含まれるリズムに、聴取者の脳活動が引き込み協調することで話者の動作予測を実現し、

そのコミュニケーションが促進されているとの仮説のもと、音声聴取課題遂行時の脳波計測を実施した。

(2) 非言語コミュニケーションにおける動作予測

コミュニケーションにおいて脳内の神経回路が動的に変化するかを検証するため、非言語コミュニケーション時の機能的MRI計測を実施した。本研究課題では他者の動作予測によりコミュニケーション時の神経回路が変調するものと想定している。そこで他者の行動を観察することによる状態推定により、神経回路の結合強度が変化することを示すために脳内の報酬系回路に着目し、他者が協力的な場合と非協力的な場合において、報酬を評価するための脳内回路の強度が動的に変化することを機能的MRIにより示した。

また、ジェスチャの動作模倣における他者の行動予測に関して研究を実施した。他者のジェスチャとして、タッピングの行動を行なっている映像を呈示した場合の動作模倣の脳活動と、遅延映像呈示を行なった際の脳活動とを比較することにより、他者の行動予測において活動する広範な皮質部位が、複数の神経振動子の引き込み協調により実現されていることを2者の脳波の同時計測により検証した。

3. 研究の方法と成果

(1) 言語コミュニケーションにおける動作予測

脳波計測を実施することで言語の意味理解における脳内情報統合メカニズムについて検討した。言語の意味理解においては、文章中の行為者、物体(目的語)、動詞を適切に繋げて一つの文章として認識する必要がある。行為者、物体、動詞は脳内ではそれぞれ頭頂葉、側頭葉、運動前野で表象されていることが知られている。これらの離れた部位で表象された情報を統合するためには、長連合線維による結合が必要となるが、単に解剖学的結合のみでは常に行為者、物体、動詞情報が統合されてしまい、適切な文理解は実現できない。そこで乾(2010)は行為者、物体、動詞情報の動的な統合を実現するメカニズムとして、神経活動の同期発火によるタイミング表現(temporal coding)を想定し、文理解においては動詞処理時において、これらの遠距離の脳部位をつなぐ脳波の位相同期が観察されると予見している(図1)[1]。

そこで本研究課題では文理解中の脳波計測を実施することで、脳波の位相同期により動的なネットワークを形成することで文理解を実現しているかを検証した。脳波計測に用いた実験では、動作動詞の理解に関係する脳波位相同期を検証するために、文を構成する主語・目的語・動詞を逐次的に呈示した(図2a)。ここで動詞について、「さわる」や「つぶす」などのように身体の動作を伴う「動作動詞」、「おこる」や「ねぎる」などのように身体の動作を伴わない「抽象動詞」、実際には動詞として存在しないが動詞様の無意味な「疑似単語」(例えば「ねだく」など)を用いることで、動作に関する文理解において、運動皮質を含む領域との動的な位相同期が発生するかを検証した。その結果、動作動詞提示800ミリ秒後付近において、疑似動詞提示の場合と比較してシータ帯域(4Hz)の脳波の位相同期が観察された(図2b)。この位相同期は抽象動詞を処理する際においても観察されるものの、動作動詞の処理においては運動前野付近を含む運動皮質付近の電極において、より多くの位相同

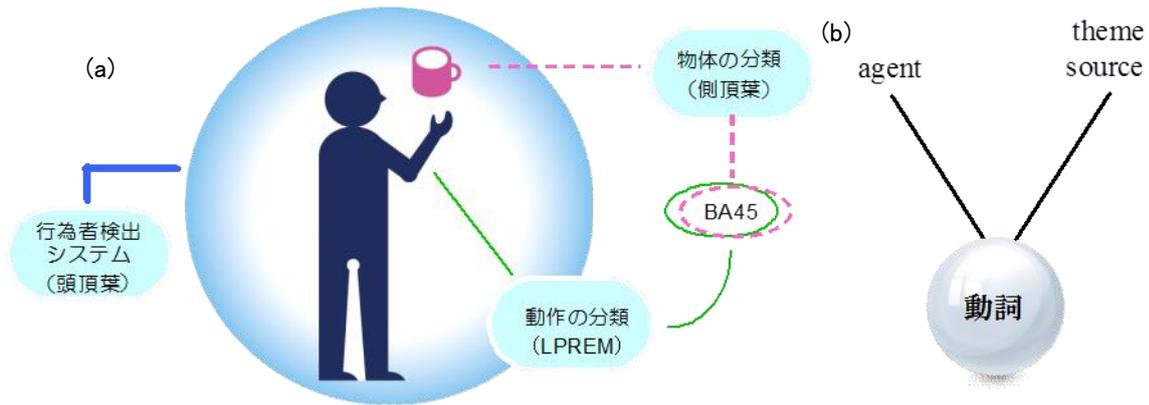


図 1 言語の意味理解における脳内情報統合モデル. (a)物体, 動作, 行為者の表象は分散した脳部位で実現. (b) 意味理解のために適切な行為者と物体を動詞が動的に結合する必要がある. (乾, 動物心理学研究 Vol. 60 (2010))

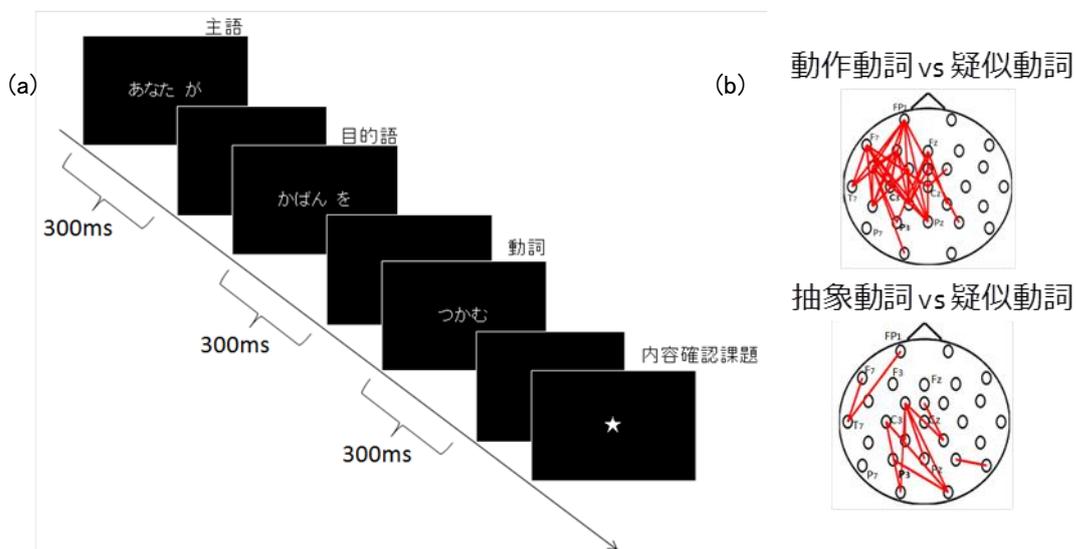


図 2 言語理解の脳波計測実験. (a)文理解の実験プロシージャ. (b)脳波解析結果. 位相同期指標(PLV)の条件間比較. 結果はシータ波(4Hz)の動詞提示 800ms 後の被験者間平均.

期が観察された. このことは, 乾(2010)の予見通り, 文理解においては動詞処理をするための運動皮質と, その他の情報を表象する脳部位との動的なネットワークが, 脳波の位相同期により実現されることを支持する結果である.

また, 言語コミュニケーションにおける運動予測の効果を検証するために, 音声聴取時の脳波計測実験を行った. 音声コミュニケーションにおいては話者の顔を見ることでその処理が促進されることが知られている[4]. この話者の顔の動きは, 音声を構成する重要なリズムであるプロソディと同期して発生する. このプロソディと同期した視覚情報のリズムに聴取者の脳波を引き込むことで, 音声情報の発生タイミングを予測し, これにより音声コミュニケーションが促進されると考えられている[4]. この仮説を検証するため, ノイズの重畳した単語読み上げの音声刺激を聴取中の脳波計測を実施した. 話者のプロソディのリズムに, 聴取者の脳波状態が引き込まれるかを位相同期指標(PLV)により検証したところ, 1~3Hz 付近の脳波活動が引き込み協調していることが明らかになった(図 3a). この周波数帯域はプロソディのリズムと一致する周波数であり, 音声コミュニケーションにおいては聴取者の脳波活動の位相が話者のプロソディのリズムに引き込み協調していることを示している.

この音声のプロソディは, その特定の位相において音声情報であるシラブル, フォニームと呼ばれ

るリズム成分が発生することが知られている。したがって、話者のプロソディに脳波が引き込み協調することで、音声の発生タイミングの予測を実現しているのであれば、音声と同様に、プロソディ周波数に引き込まれた脳波の特定の位相において、シラブルやフォニームに対応する脳波成分が発生するはずである。これを検証するために、位相-振幅協調解析を実施したところ、プロソディ周波数である 1.5Hz の脳波の特定の位相において、4Hz と 50Hz 付近の脳波の振幅が増大する結果を得た(図 3b)。これらの周波数帯域は、それぞれシラブル、フォニームの周波数と一致している。また、これらの振幅が増大するのは、ともにプロソディ周波数の谷の位相手前で同時に発生している。脳内ではシラブル、プロソディは別々の部位で処理されることが指摘されており[4]、これらの同期発生は、上述した文理解の際の同期発火と同様に、脳内での情報統合を意味しているであろう。この情報統合のために、プロソディ表現の位相を用いることで、音声コミュニケーションの理解が促進されているものと考えられる。

以上のように、言語コミュニケーションにおいては、脳波の引き込み協調による脳内の部位間のコミュニケーションを行うことで文理解を実現しているとともに、脳間のコミュニケーションにおいても文理解における脳内の現象と同様に、リズムの引き込み協調により、その言語によるコミュニケーションを実現しているものと言える。

(2) 非言語コミュニケーションにおける動作予測

言語コミュニケーションにおける研究課題では、リズムの引き込み協調について検証した。ただし、これらの研究課題では一方向的な刺激呈示における脳内での情報処理過程において、神経活動のリズムが重要な役割を果たしていることを示しているのみであり、脳間の双方向のコミュニケーションを想定した場合の脳内回路の動的形成を議論していない。そこで非言語コミュニケーションに関する研究項目においては、特に双方向の情報伝達がある状況を想定したときに、脳内の回路が動的に変化するか、さらには脳間の神経活動のリズムが引き込み協調するかに着目して研究を実施し

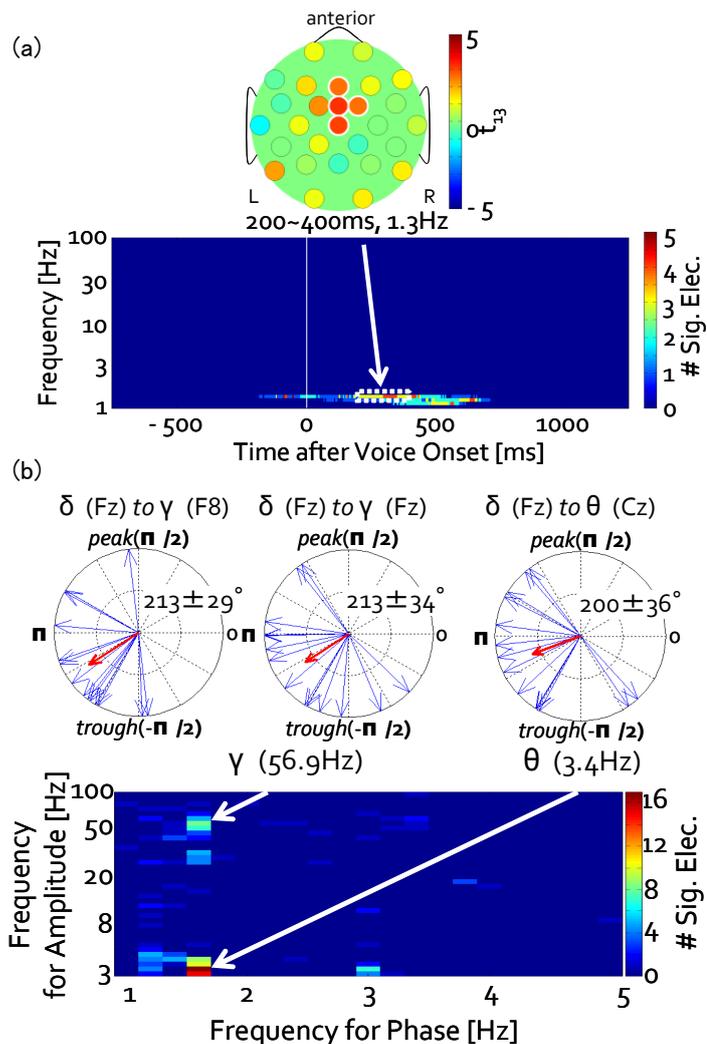


図 3 音声聴取課題遂行時の聴取者の脳波解析結果。(a)脳波位相同期解析(PLV)。(b)位相-振幅協調解析。

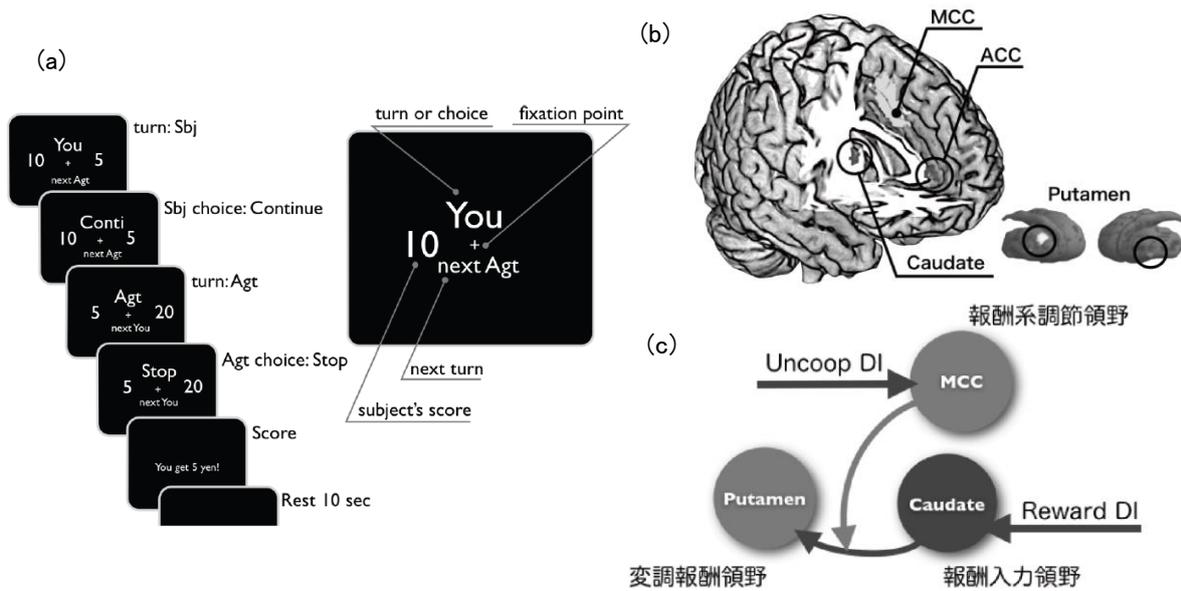


図 4 他者の状態推定に伴う脳内回路の動的変化。(a)実験課題と提示画面。(b)機能的 MRI の解析結果。(c)機能的 MRI の DCM 解析による脳領域間因果関係の推定結果。

た。

他者とのコミュニケーションによる脳内回路の動的変化の検証に関する研究では、他者の行動推定に基づく報酬系回路の変化を、機能的 MRI 計測に基づき検証した。この研究では、2人で交互に意思決定をすることで報酬金額を増やしていく実験課題を遂行中の被験者の機能的 MRI の計測を実施した(図 4a)。このときパートナーは被験者の報酬金額が最大となるように協力的に振る舞う場合と、自己の報酬金額が最大となるように利己的に振る舞う場合がある。被験者は、このパートナーの状態を推定しながら、自己の報酬金額が最大となるように意思決定を行う課題となっている。このときの脳活動を機能的 MRI 解析により同定したところ、報酬系や他者の状態推定に関わる脳領域の活動が認められた(図 4b)。そこで、この領域間の結合が他者の状態により変化するかを検証するために、領域間の有向結合性解析を DCM により実施した。その結果、他者が利己的に振る舞う場合において、その状態推定の結果が報酬系回路の有向結合性を促進することが明らかになった(図 4c)。このことは、他者とのコミュニケーションにおいて、その状況に応じて脳内の神経回路が動的に変化していることを示すものである。

上述のように他者からのフィードバックが存在する非言語コミュニケーションにおいて、脳内の回路の変調が起きていることが明らかになった。この脳内回路の変調にともない、脳間の神経回路の結合にも変化があるものと考え、非言語コミュニケーション中の2者の脳波の同時計測を実施した。この研究課題では、非言語コミュニケーション課題として、2者の手指運動のタッピングのタイミングを協調させる課題を用いた(図 5a)。ただし、被験者に呈示される手指運動は、必ずしもパートナーのものではなく、自身の手指運動がそのまま提示される場合もある。さらに本研究課題では、被験者自身の手指運動を 500 ミリ秒程度の遅延の後に呈示する条件を加えている。自身の運動情報が数百ミリ秒の遅延後に呈示された場合には、自身の運動にもかかわらず、自身の運動であると感じない現象、つまり自己主体感の喪失が発生することが知られている[5]。したがって、視覚情報の遅延フィードバックを用いた条件では、被験者の自己主体感を喪失させることで、真には他者とのコミュニケーションが存在しないが、被験者は他者とのコミュニケーションを実施する前段階の状況を疑似的に作り出す

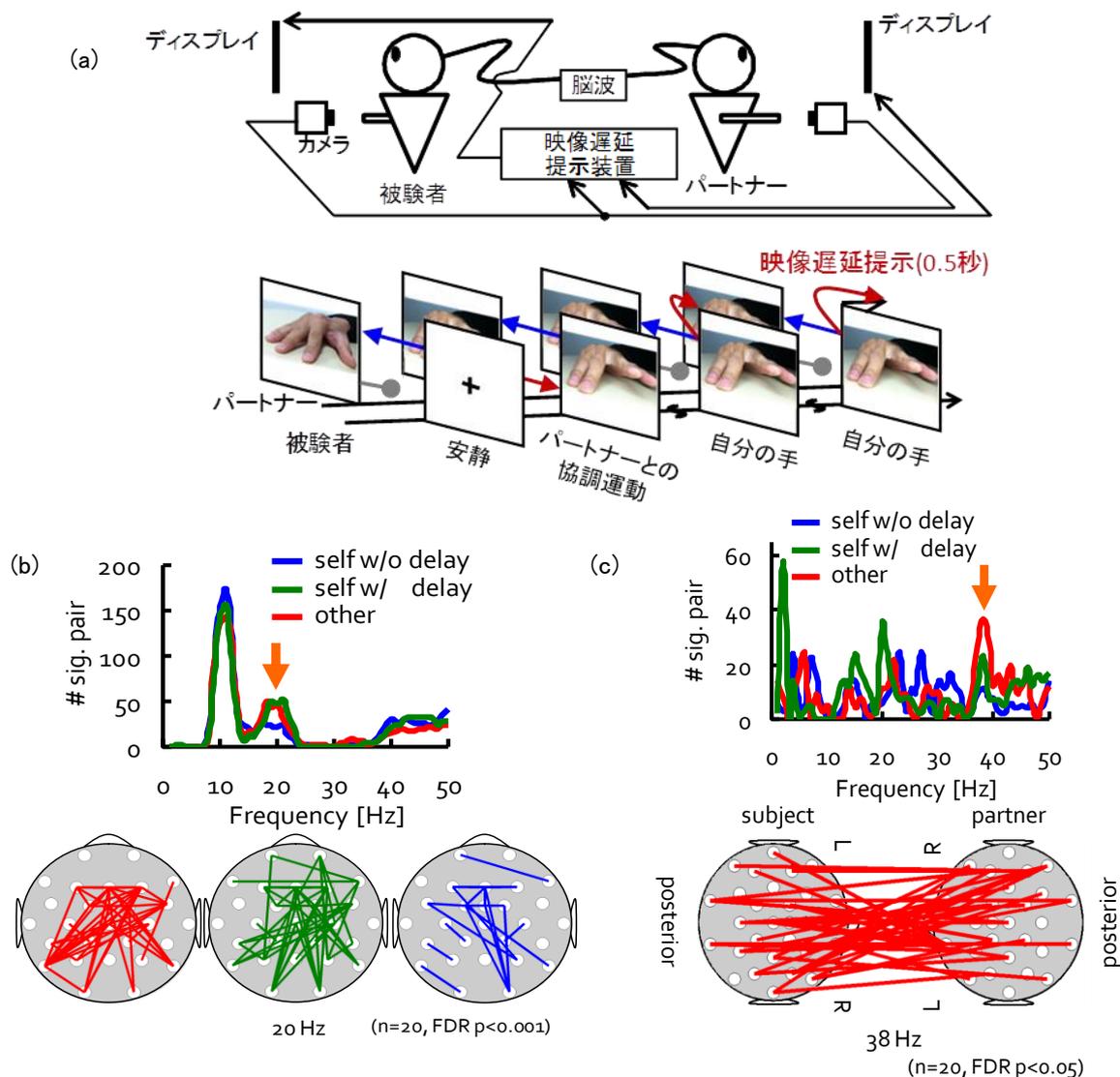


図 5 2 者の相互協調運動中の脳波計測. (a)実験セットアップと実験課題. (b)被験者の脳内の位相同期の崩壊. (c)脳間の位相同期の創発.

ものである。

これらの実験条件下での脳波を被験者およびパートナーの 2 者から同時に測定し、そのときの脳波位相同期指標の解析を実施した。その結果、真にコミュニケーションを実施する際においては、被験者の脳内の位相同期回路が崩壊することが明らかになった。この位相同期回路は自身の手指運動が表示されている場合には崩壊しない。ただし、自身の手指運動であるとしても、視覚情報の遅延フィードバック呈示した場合には、真のコミュニケーションの場合と同様に脳内の位相同期回路の崩壊が観察された(図 5b)。つまり、コミュニケーションにおいてはその前段階として自己主体感の喪失により脳内の神経活動の引き込み協調回路を崩壊させていることが考えられる。この脳内回路の崩壊の後に、脳間の神経活動の引き込み協調が、真のコミュニケーションが存在する場合においてのみ観察されている(図 5c)。これらの知見をまとめると、脳間のコミュニケーションにおいては、脳内の神経活動の位相同期により確立している神経回路を崩壊させることでコミュニケーションの準備を実現し、その後他者の脳内の神経回路と位相同期することでコミュニケーションが実現していることが考えられる。

以上の言語・非言語コミュニケーションの研究成果は、神経振動子の位相協調が、脳内および脳間のコミュニケーションに共通する基本原理であることを示している。脳内の皮質間の情報伝達は、神経振動子の位相同期により実現されている。さらに、この脳内の神経回路を崩壊させ、新たに脳間の神経振動子の位相同期を確立することで、脳間のコミュニケーションを実現している。この神経振動子の位相同期は、音声コミュニケーションのための振動子協調において観察されるように、情報伝達のための最適な位相状況を予測するための戦略であると考えられる。

参考文献

- [1] 乾(2010) 言語獲得 と理解の脳内メカニズム, 動物心理学研究 60: 59-72.
- [2] Ogawa K & Inui T (2007) Lateralization of posterior parietal cortex for internal monitoring of self-versus externally generated movements. *J Cogn Neurosci* 19, 1827-1835.
- [3] Mizuhara H & Yamaguchi Y (2011) Neuronal ensemble for visual working memory via interplay of slow and fast oscillations. *Eur J Neurosci* 33: 1925-1934.
- [4] Giraud AL, Kleinschmidt A, Poeppel D, Lund TE, Frackowiak RS & Laufs H (2007) Endogenous cortical rhythms determine cerebral specialization for speech perception and production. *Neuron* 56: 1127-1134.
- [5] Farrer C, Frey SH, Van Horn JD, Tunik E, Turk D, Inati S & Grafton ST (2008) The angular gyrus computes action awareness representations. *Cereb Cortex* 18: 254-261.

他者との相互作用を介した情報獲得メカニズムの解明

研究代表：京都大学霊長類研究所・教授 中村 克樹

概要

自己と他者の相互作用が、行動にどのように影響を持っているかを、特に相手の動作を介した情報獲得メカニズムに焦点を絞って研究を実施した。他者の動作の理解を実現する脳機能を、マカクザルを対象とした神経生理実験を中心として実施した。また、ヒトの乳幼児や障害児が他者の行動をどのように注目し理解しているかを行動学的に検討した。さらに、コミュニケーションに重要なリズムに注目し、ヒトを対象とした fMRI 実験を実施し、リズムの表象や記憶に関する脳領域を調べた。

Abstract

We are interested in how the self-other interaction affects one's behavior. In this project, we focused on neural mechanisms underlying acquiring information through others' action. We studied neuronal mechanisms related to understanding others' action on macaque monkeys. We also studied visual scanning patterns of typically developing infants and children with pervasive developmental disorder to understand how they differently view humans and objects. Furthermore, we studied neural mechanisms underlying representation and/or working memory of rhythm because rhythm is of great importance not only for music but also for language.

1. 研究開始当初の背景

(1) サルを対象とした動作理解や模倣に関連する神経機序の解明

ヒトを含めた多くの動物は、他の個体の示す動作からさまざまな情報を得ている。また、さまざまな動作は他個体の行動に影響を及ぼしている。こうした言語を直接介さない情報のやり取りは、ヒトとサルで共通している部分が多いと考えられる。こうした情報のやり取りの神経機序を明らかにすることが重要であると考えた。研究代表者は、申請時の所属機関において、霊長類実験施設の責任者であり、その施設に設置された高磁場 MRI 装置の管理者でもあった。そこでヒトに神経系の構造や機能が近いサルを対象とした、神経生理学的実験および機能的 MRI 実験を実施することを計画した。神経生理学的実験には、大学院生から指導していた研究員をポスドクとして雇用する計画を立てた。

(2) ヒト乳幼児や障害児を対象とした、視線計測を利用した動作理解の研究

ヒトの乳幼児が大人の行動をどのように理解し模倣するのか、理解し模倣することが新たな情報や技術の獲得に影響するのか、を明らかにすることは他者の行動を介した情報獲得の理解に重要なテーマであると考えた。これまで乳幼児の研究経験のある研究分担者および多くの乳幼児や障害児に携わってきた経験の豊富な連携研究者の協力のもと、動作理解や模倣に関する乳幼児や障害児を対象とした研究を実施する計画を立てた。

(3) ヒト成人を対象とした、機能的 MRI を用いた脳機能の研究

他者の動作理解や模倣を脳のどの領域が実現しているのかを明らかにすることは、このプロジェクトの中でも重要である。サルや乳幼児／障害児とことなり、さまざまな実験条件を持ち込めるヒト成人を対象とした研究では、さまざまな複雑な課題も実施できる。研究代表者は、前述のように高磁場 MRI の管理者でもあり、機能的 MRI 実験の実施が用意にできるため、この実験を計画した。

2. 研究の目的

(1) サルを対象とした動作理解や模倣に関連する神経機序の解明

この一番目の研究に関しては、大きく2つの状況変化があった。まず一つ目は、当初の所属には動物実験用の MRI 装置もあったので、動作の理解や模倣を学習したマカクザルを用いて、神経生理学的実験および機能的 MRI 実験により、どの脳領域が動作理解や模倣を実現しているのかを明らかにすることを目標とした。しかし、研究代表者が採択前に所属機関を京都大学に変わるようになった。そのため、サルを対象とした機能的 MRI 実験の実施が困難となった。二つ目は、ポスドクとして雇用し研究を中心に実施してもらう予定であった研究員が大学教員として採用されることとなった。そのため、研究計画を動作理解に絞り、また別の研究員をポスドクとして雇用し、サルを対象とした神経生理学的研究により、当初の目的の多くを達成するべく研究を推進した。

(2) ヒト乳幼児や障害児を対象とした、視線計測を利用した動作理解の研究

この研究実施体制は、予定通り立ち上げることができた。研究を進めていく途中で、乳幼児や障害児は自由に行動できる環境では質の高いデータを取得することが困難であると気づき、日常的に行っている母子の絵本読み聞かせの場面を実験場面として、落ち着いた状況で絵本の中の登場人物に対する視線の解析を行った。それを基に、定型発達児と広汎性発達障害児の視線計測に基づく動作理解の差異を検討することを目的とした。

(3) ヒト成人を対象とした、機能的 MRI を用いた脳機能の研究

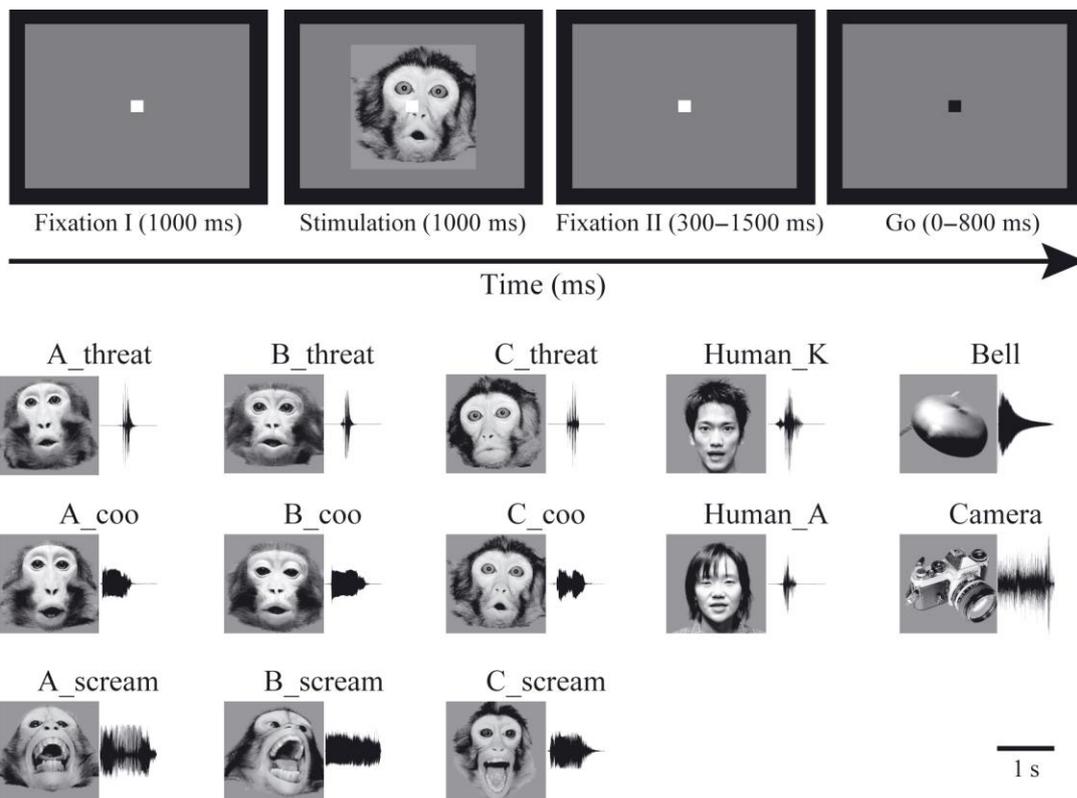
研究代表者が採択前に所属機関を京都大学に変わるようになったため、ヒトを対象とした機能的 MRI 実験の実施は急遽東北大学で実施することとした。このため、大学院生をプロジェクトに参加させ、研究を推進した。研究の目的は、これまであまり多くの研究者が取り組んでこなかったリズムに関することに焦点を絞った。リズムは音楽だけではなく、ヒトとヒトの会話や特定の方言などで非常に重要な役割を示すものである。このリズムが脳のどこで表象され、どこで記憶されているのかを明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法と成果

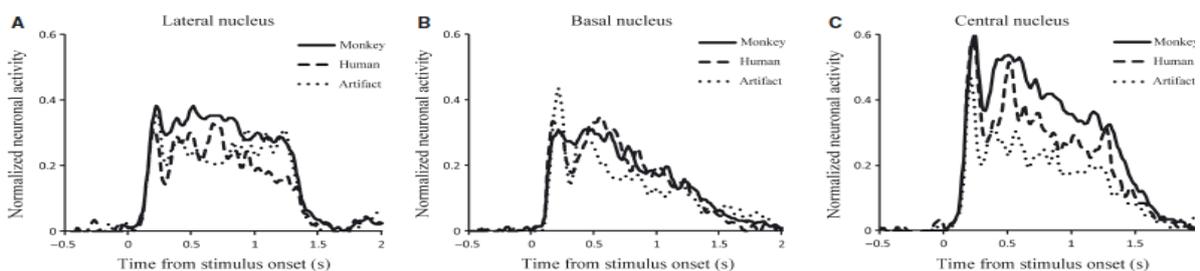
(1) サルを対象とした動作理解や模倣に関連する神経機序の解明

サルに注視課題を訓練し、サルが画面を見つめている間にさまざまな情動ビデオ刺激を与え、特に情動行動の制御に関与していると考えられる扁桃核からニューロン活動を記録解析した。扁桃核

のニューロンは、さまざまな情動刺激に対して、その情動行動の種類や情動行動を行っている個体の違いで応答を変化させること、特にスクリームと呼ばれる恐怖の情動表出に強く応答することなどが分かっていたが、今回の研究から、外側核や基底核といった亜核のニューロンと異なり扁桃核中心核のニューロン応答は、対象をカテゴリカルに扱っていることが明らかになった。こうした応答は、対象に対する適切な情動反応をとるために非常に有用であると考えられる。中心核は、情動反応を直接誘発させる脳領域へと出力を出している亜核であり、この考えを支持する。



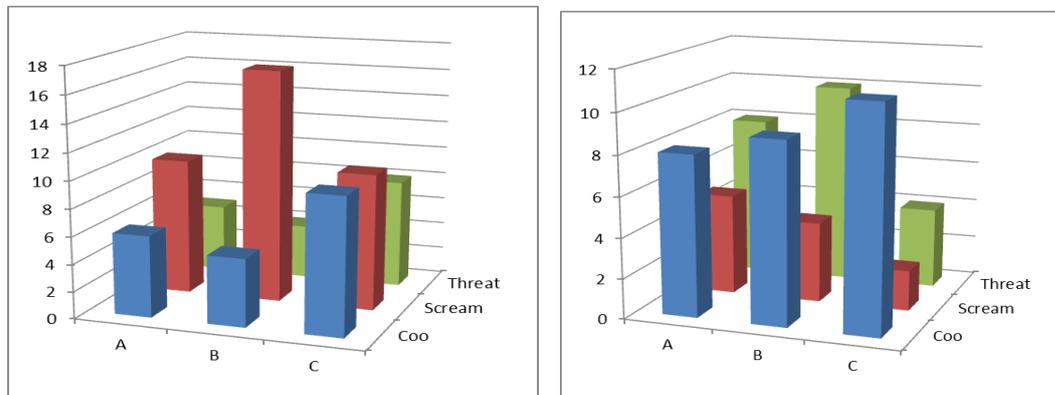
実験に用いた課題(上)と刺激として用いた13のビデオ刺激



外側核(A)や基底核(B)より中心核(C)のニューロンの持つ情報量が多い

次に動作理解に関与していると考えられる外側前頭前野のニューロンの応答性を記録解析した。扁桃核のニューロンは強い負情動を示すスクリームに反応するニューロンが多かったのに対し、前頭前野では多義的なクーに反応するニューロンが多く見られた。クーは、さまざまな場面でサルが仲間

とコミュニケーションをとるときに用いる典型的な鳴き声であり、扁桃核との機能差を示すものであると考えられる。2つの領域のニューロン応答の性質の差から、扁桃核は情動情報処理を担い、前頭前野はよりコミュニケーション機能を担っているという仮説を立てるに至った。本研究成果は論文として投稿中である。



各ニューロンのもっとも強い応答を引き起こした刺激の分布

扁桃核は多くのニューロンがスクリーム(赤)にもっとも強く応答し、
前頭前野ではクー(青)にもっとも強く応答している

今回の前頭前野と扁桃核の動作理解や機能の差の理解は、脳全体としての動作理解に関与する神経機序の理解を進めたと考えられる。

(2) ヒト乳幼児や障害児を対象とした、視線計測を利用した動作理解の研究

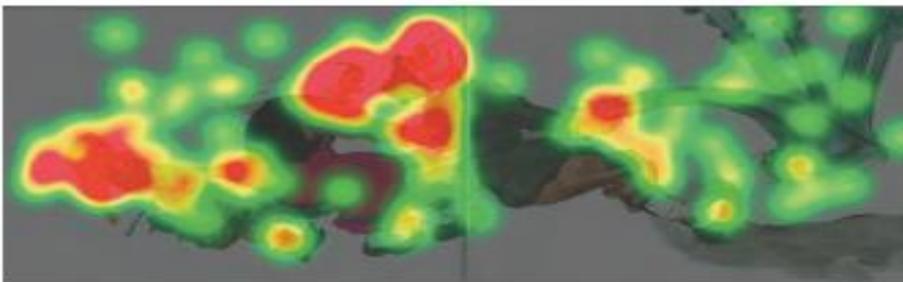
日常的にみられる母子による絵本の読み聞かせ場面における視線計測を実施し、乳幼児と障害児の探索の差異を検討した。視線計測には非侵襲的なアイトラッカーを用いた。絵本には広く日本人に読まれている「おおきなかぶ」を選んだ。いくつかの絵本を試したが、登場人物の動きが分かり易く描かれていて、もっとも一貫性のあるデータが得られたためである。定型発達と考えられる幼児19名と広汎性発達障害と診断された障害児17名のデータを解析した。あらかじめ、絵本から3つのページを選び出し、各々のページで関心領域を設定し、そこにどれだけの時間視線が入っていたかを解析した。関心領域としては、登場人物の顔・登場人物の手・登場人物の足・カブ・動物などである。結果、定型発達と考えられる幼児は、登場人物の顔に視線を集中させることが分かった。それに続き動作をイメージさせる手を多く見ていることが明らかになった。一方、広汎性発達障害児は、顔や手も見ているが、それ以外の領域も頻繁に見ていて、どちらかというと偏りが少ない見方をしていることが明らかになった。こうした注目する場所の差が、相手の動作の理解の差に結びついている可能性が示唆された。ただ、広汎性発達障害の子であっても、定型発達の子と差のない見方をすると、顔はほとんど見ないという子と大きく2つの群に分かれる可能性、地域による差の可能性も分かった。論文作成中である。

(3) ヒト成人を対象とした、機能的 MRI を用いた脳機能の研究

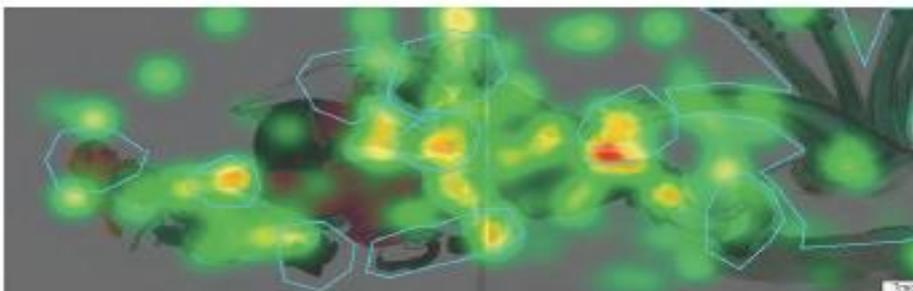
言語や音楽の基礎となるリズムの記憶に関連する脳機能画像研究を実施した。実験では、ある簡単なリズムを提示して、それを記憶し、再生するという課題を行ってもらった。リズムは聴覚的と視覚的に与え、感覚種に依存しない活動があるか否かを検討した。リズムそのものに関連する活動があるのであれば、刺激としてあたえる感覚種が視覚でも聴覚でも体性感覚でも変わらない活動を示すと



6 ページの関心領域

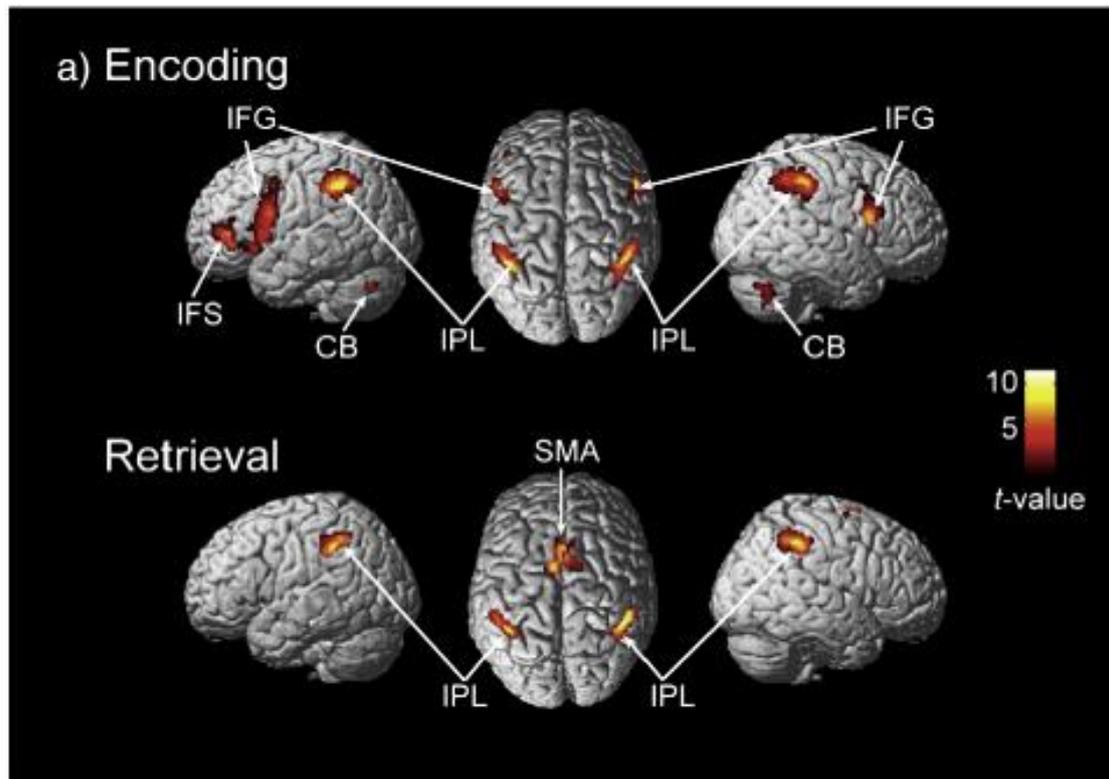


6 ページの絵に対する健常児の注視。人物の顔に視線が集中し赤くなっている。



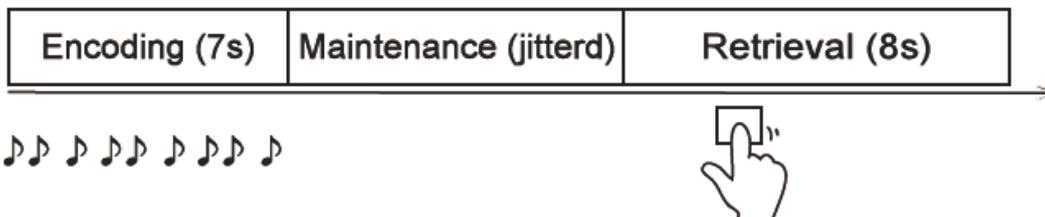
6 ページの絵に対する広汎性発達障害児の注視。人物の描かれているエリアを偏りなく見ている。

予測した。その結果、リズム情報の記憶に関連する領域として、リズムの記録時には下前頭葉・下前頭溝・下頭頂葉・小脳が賦活し、リズムの再生時には下頭頂葉と補足運動野が、視覚や聴覚によらず賦活した。これらの領域は、運動制御に関連すると考えられる脳領域である。このことは、リズムが一連の運動パターンとして記憶されていると解釈できる結果であった。私たちが、あるリズムを聞くと自然と体を動かしリズムを刻むという現象を考えるとリズムと運動の関連が理解できる。

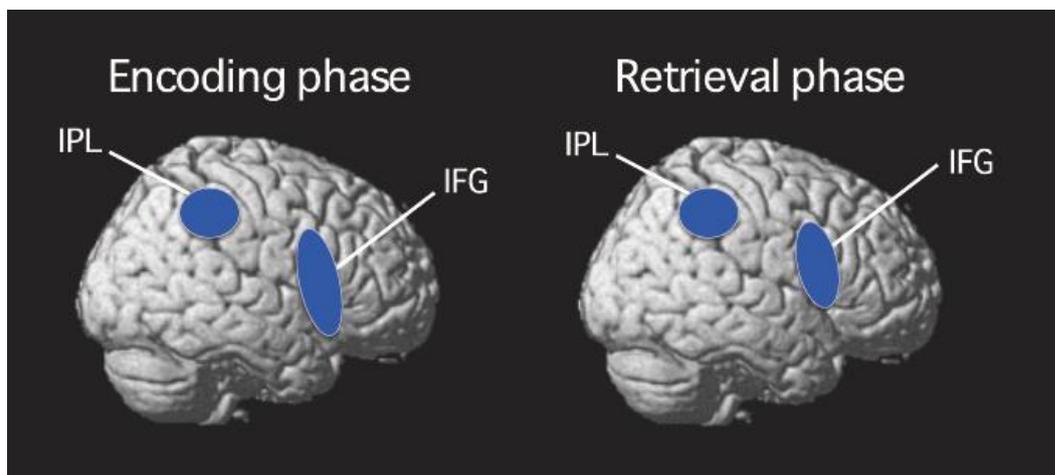


視覚情報や聴覚情報に依存しないリズムに関わる脳活動。リズムの記録(Encoding)の時には、下前頭葉(IFG)、下頭頂葉(IPL)、小脳(CB)などが、リズムの再生(Retrieval)の時には、下頭頂葉(IPL)と補足運動野(SMA)が賦活している。

次に、リズムの再現に関して、運動に依存するものだけであるのか、それとも運動そのものには依存しない要素があるのかを検討した。具体的には、リズムの表象には、時系列パターンとしての表象(運動そのものに依存しない)と運動系列パターンとしての表象があると仮定した。時系列としての表象であれば、体のどの部分を用いてリズムを再生しても変わらぬ活動を示し、運動系列としての表象であれば、用いる体の部分に依存して活動を変化させると予想した。この目的で、右手指・左手指・右足・口を効果器としてリズム課題を行ってもらい、脳活動を解析した。その結果、右半球の下頭頂葉と下前頭葉は、リズムの記録時にも再生時にも、効果器に依存しない賦活を示した。一方、左半球の下前頭葉や下頭頂葉や補足運動野は効果器に依存した賦活を示した。



4つの異なる効果器(右手指・左手指・右足・口)を用いたリズム課題
 9つの要素からなる音列を聞いて覚え, 各効果器で同じリズムを再生する
 図は右手指を用いたときの課題の流れを示す



効果器によらず賦活した右半球の下前頭葉(IFG)と下頭頂葉(IPL)

今回の結果から, 右半球の下前頭葉と下頭頂葉は, 運動の効果器によらない時系列パターンとしてリズムを表象している可能性が示唆された. 一方, 左半球の下前頭葉や下頭頂葉や補足運動野は運動系パターンとしてリズムを表象している可能性がある. 今後はこうしたリズム関連の領域が, 他者とのコミュニケーション等とどのように関連しているのかを解明することが重要である. 本研究成果は論文としてまとめている.

参考文献

- [1] Kuraoka K, Nakamura K. Categorical representation of objects in the central nucleus of the monkey amygdala. *European Journal of Neuroscience*, 35: 1504-1512, 2012.
- [2] Konoike N, Kotozaki Y, Miyachi S, Miyauchi CM, Yomogida Y, Akimoto Y, Kuraoka K, Sugiura M, Kawashima R, Nakamura K. Rhythm information represented in the fronto-parieto-cerebellar motor system. *Neuroimage*, 63: 328-338, 2012.
- [3] 鴻池菜保, 中村克樹. 顔・表情 *Clinical Neuroscience*, 30: 902-905, 2012.
- [4] 中村克樹. コモンマーモセットを用いた霊長類研究の動向 *The Japanese Journal of Psychonomic Science*, 30: 79-85, 2011.

社会場面での人の役割分担の自律的発生メカニズムの解明

研究代表：玉川大学工学部・教授 大森隆司

概要

本研究では、コミュニケーションの認知計算論的なモデル化を目指して、他者の状態推定に基づく行動決定モデルを構築した。実験では、子どもとロボットの遊びにおいて子どもの興味をできるだけ長く保つことを目的に、子どもモデルを用いてその振る舞いから興味を推定し、それを維持する働きかけを行なった。また、より幅の広い子どもの特性を対象とするため、保育士が操縦するロボットによる遊び実験を行い、行動決定の知的情報処理と同時に興味による報酬修飾を含んだコミュニケーションモデルを構築した。

Abstract

In this study, we aim a construction of cognitive computational model of communication that make use of an estimated internal state of other. In our experiment, for a purpose of keeping an interest of child as long as possible, we made a robot to choose an action that elaborate the interest of the child based on an estimated mental state. Then, to enable a wider spread of child's characteristics, we tried a play experiment of children with a nursery nurse operated robot. Through the experimental result, we constructed a communication model that includes both of an intelligent information processing and a modulation of reward through the interest state.

1. 研究開始当初の背景

(1) コミュニケーションの認知計算論的側面からの解明

コミュニケーションは、表面的には言葉や身振りなどによる情報交換と理解できる。しかし本質的には、伝わった情報によって二人(複数)の参加者の心の中で変化が起こり、それがまた次の情報交換を促すというより心理的なプロセスである。その過程の理解がなければ、我々は他者の考えを理解することもできないし、自分の意図を伝えることもできない。

コミュニケーション場面での役割分担の発生とは、他者の意図推定に基づく行動予測と、その予測に合わせた自己の行動選択が、自己と他者の双方で行われた結果であると理解できる。その際、自己と他者が異なる行動を取ることでより効率的にタスクを解決できるなら、それが役割分担といえよう。その際、相互に相談することなく、あるいは誰かの指示を受けることなくその役割分担が創発したなら、それは自律的発生である。

他者の意図推定が可能になるには、自己と他者の間で行うタスクの実行過程についての理解の共有が必要である。それが状況に基づく他者の意図の推定を可能とする。しかし実際、どういうタスクにすると狙ったとおりの行動が生まれるのか、ということは明らかではない。本研究の一つの目標は、実験室的な課題ではなく、より現実的な場面でそれを行うことである。それに対応して考えたのが、ロボットと子どもの遊びである。ロボットを使うのは、コミュニケーションが明白なルールに従って実施されて他の要因が入り込まないことを保証するためである。また、子どもを対象とする理由は、行動実

験を行う場合にその心的過程が正直に出てくることが期待されるからである。このような想定で我々は、この研究計画を始めた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、対人インタラクション場面で我々が行う他者の意図の推定に基づく行動決定について、そのプロセスの認知科学的な解明と、それに対応する脳内情報処理過程のモデル化である。前述の通り我々は、場面としてロボットと子どもの遊びを選んだ。対象となる子どもは、心の理論が完成して他者の意図推定は行えるが、複雑な推論などは行わない6歳児(幼稚園年長)とした。

本研究では「他者モデル」を重要視する。「他者モデル」とは我々自身が理解する他者についての知識を集積したものである。対人場面では我々は、他者モデルに基づいて他者の行動を解釈し、その解釈と他者モデルに基づいて他者の行動を予測し、それに対応した自身の行動を決定する。その過程の理解こそが、自律的な役割分担の基礎になると考える。本研究ではそれが「子どもモデル」となり、研究の興味は子どもモデルとはどのような知識で、我々はそれを如何に用いて子どもに対する自身の振る舞いを決めていくかを明らかにすることである。

そのため本研究では、(1) 遊びの観察に基づく子どもモデルの構築、(2) 保育士の行動観察と遊び過程のモデル化、(3) 対人遊びロボットによる遊び実験、を行った。

一方で、この実験を通して、約3割の子どもで遊びが成立しにくいことが観察された。実験者の観察からは、それは子どもの特性であるように思われるが、それもまた子どもモデルのパラメータとして取り込んでいく必要がある。例えば「性格」は、子どもモデルの広い範囲の振る舞いに影響する重要な特性であり、ある種のメタパラメータであると考えられる。あるいは「興味」は、行動決定を支配する重要なパラメータであることは間違いない。これらのパラメータはコミュニケーション場面にどのように影響するかは経験的には明らかであるが、それをモデル的に記述して子どもモデルに取り込むことは、より広い範囲のコミュニケーションの理解に重要である。

3. 研究の方法と成果

(1) 遊びの観察に基づく子どもモデルの構築

本研究の予備的調査として、ゲームプログラムを組み込んだロボットと子どもの遊び実験を実施した。初対面のロボットと子どもが対一(研究者が傍にいて支援)で対話と遊びをして、その間の子どもの様子を観察した。最初はロボットが名前や年齢を質問してそれに子どもが応える形で進行し、途中からトランプゲーム(神経衰弱)で遊んだ。結果は失敗であった。最初は興味津々であった子どもが、会話の途中から次第によそ見をするようになり、ゲームも最後には「もうやりたくない」とまで言われた。

何が問題だったのだろうか？終了後に子どもにインタビューし、ビデオを見直したところ、多くの問題点が見つかった。例えば、ロボットは一方的に発話して子どもからの質問を無視した。ゲームプレイではコンピュータの論理的な判断で最適手を取って子ども相手に勝ってしまうなど、人間の成人であれば絶対にしないことを行っていた。通常の人との対話では、我々は相手の思っていることを推定し、相手の興味を引き付けてそれを維持する会話を行う。またゲームで自分が強いならば、相手と楽しく遊ぶことを意識してわざと負けることもある。この結果から我々は、本研究の目標を、対話や遊び

中の子どもの心的状態を推定してできるだけ長く遊ぶ行動決定をする方法の探索とした。そこで、経験のある保育士にお願いして、初対面の子どもと30分間遊んでもらい、その行動を観察した。

実験Ⅰ 保育士と子どもの遊び観察実験

保育士には子供を飽きさせずに遊ぶようお願いし、その遊びの様子を録画した。実験後には子どもの何をどのタイミングで見たかなど、各場面における行動戦略について、遊びの映像を見ながら回想してもらった。観察時間は30分で、5種類の遊びを行った。

この観察では、子どもにとっては実験場所や相手など初めてのものばかりで、子どもは最初はかなり緊張していた。しかし、保育士との会話や遊びを通して次第にその場の環境に慣れ、徐々に遊びを楽しむ様子が見られた。しかし、同じ遊びを続けると次第にその遊びに飽き、興味が他のものへと移っていき、別の遊びがはじまると、再びその遊びに対して楽しい、面白いという状態に戻るという、状態遷移が観察された(図1)。

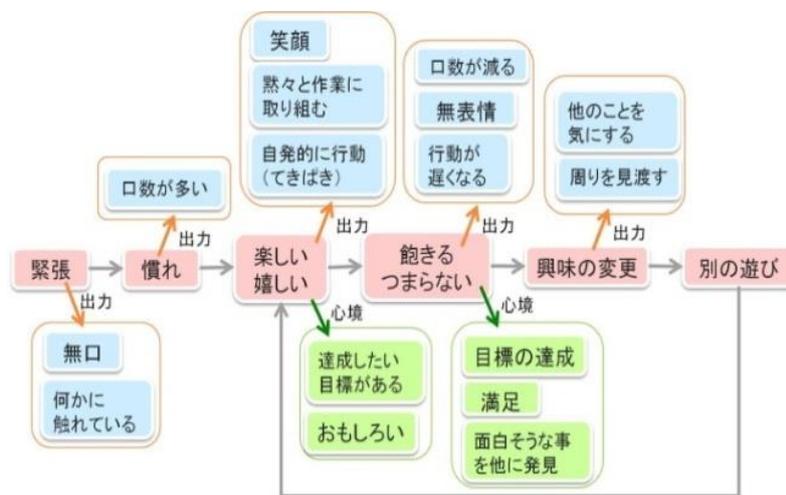


図1. 特徴的な子どもの振舞い

遊びの各状態で特徴的な振る舞いが観察された。例えば、「緊張」状態では口数が少なく手を後ろに組んでいたりと、何かをずっと握っているような行動があった。また、少し緊張が和らいだ「慣れ」状態では口数が次第に増え、「楽しい/嬉しい」状態では笑顔を見せたり、黙々と作業に打ち込んで話しかけても聞き流すなどの行動が観察された。一方、「飽きる/つまらない」状態では、「楽しい/嬉しい」状態と比

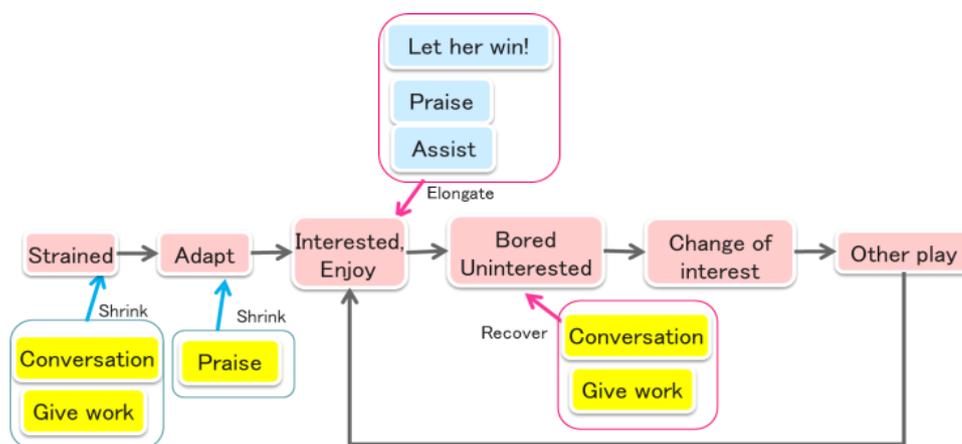


図2. 保育士の行動決定戦略

べて口数は減少し、無表情になり、周りを気にするなどの行動が多く見られた。

これらの心的状態は、例えば保育士は映像からでも安定的に推定可能であり、子供の状態記述として有効である可能性が高い。また、この状態は時間とともに自然に変化すると考えられるが、保育士はその時間変化を短縮あるいは延長させる行動を選択したと解釈でき、観察後の回想報告からも確認された。すなわち、保育士は遊びの時間全体を通じて子供の遊びに対する姿勢を推定し、遊び戦略を考えていた。その過程を図2に示す。

(2) 保育士の行動観察と遊び過程のモデル化

実験 I からの子どもの心的状態の遷移モデルとそれに対応する保育士の行動戦略をうけて、遊び相手のロボットの行動決定モデルを構築した(図3)。子どもには3つの内部状態があり、観測された子どもの行動指標から推定される。そしてその各状態に応じたロボットの行動選択の確率分布が規定されている。このモデルを用いて、5～6 歳の子供に対し遊び相手ロボットとの1対1の遊び実験IIを行った。

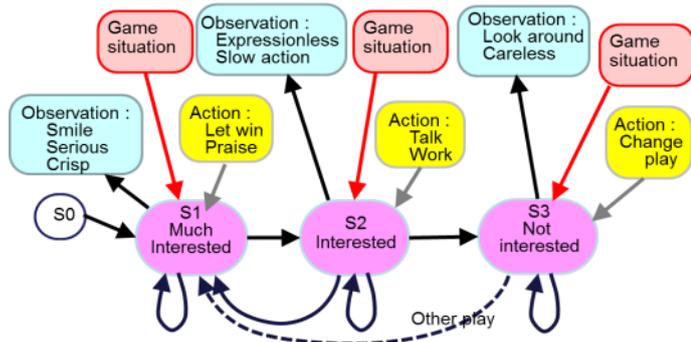


図3 子どもの心的状態に応じた行動決定モデル

実験II ロボットと子どもの遊び実験

参加した被験児は12名(平均5.85歳, SD 0.3, 男児7, 女児5)で、ロボットとは初見であった。一人は実験前にロボットに会うのを怖がって帰ったためデータから除外し、11人のデータを分析した。保護者には書面と口頭で説明して承諾を得た。ロボットは家庭用サービスロボット DiGORO を使用した(図4, 左側)。DiGORO は左右のアームと回転する腰、3本指のハンドを持ち、身体やおもちゃを使った遊びができる。また、カメラで表情認識



図4 ロボットと子どもの遊び場面

ができ、顔の左右と上下方向の角度、笑顔度を得られる。子供とできるだけ長く遊び続けるため、ロボットは図3のモデルに従い遊びや行動を切り替える。本実験では、認知度が高くほぼすべての子がルールを知っている神経衰弱、じゃんけん、絵本読みをゲームとして採用した。

実験では、子どもがロボットとテーブルを挟んで椅子に座り、ロボットと遊んだ。ロボットは自律的に動作するが、実験中は実験補助者が常に子どもに付き添った。実験は、子供が入室してから、対話による慣らし(5分)と遊び(25分)の後に退室という流れで行った。カードゲームではロボットがカードを指差し、実験補助者もしくは子どもがカードをめくった。神経衰弱とじゃんけんを状況に応じて切り替えた。対話中はロボットは顔追跡でアイコンタクトを行った。遊びの過程でロボットは、子供の表情や動きなどからロボットや遊びに対する興味の度合いを推定した。ロボットに取り付けたカメラで子どもを正面から録画したと同時に、Kinect で子どもの3次元動的動き情報も記録した。こうした記録映像

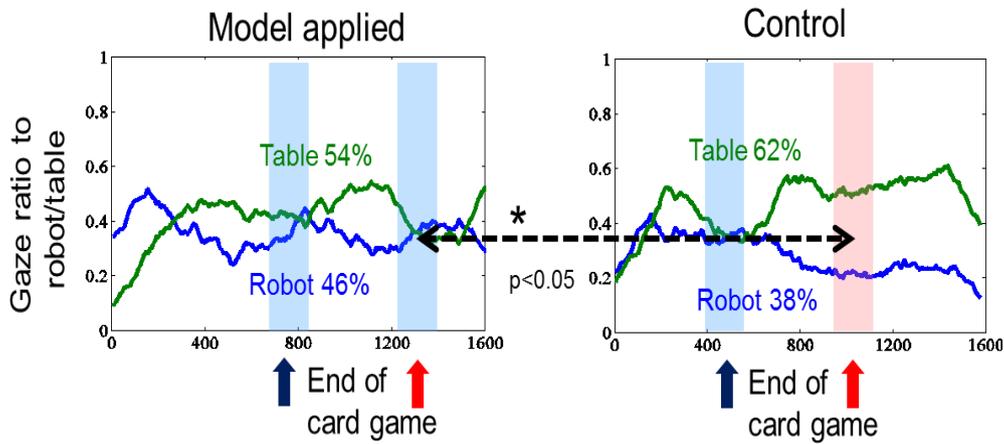


図5 ゲーム中に子どもが注視する対象の時間比

を遊びに関する質問項目の結果と共に解析することで、遊びの好みや性格と振る舞いを関連付けした。

本研究で提案する子どもモデルを意識したロボット行動決定の効果を評価したところ、子どもがロボットの顔を見る時間に違いが見られた。子どもはゲームが終わった瞬間、「次はどうする」という視線で相手の顔を注視する。二回目のゲームが終わったとき、本モデルで行動したロボットに対する顔の注視時間が、コントロールとして一様な確率で行動したロボットと比して有意に長かった。これより、子どもは本モデルで行動したロボットをより人間的という視点で見ているものと推測される。

遊びの後、子どもと保護者に聞き取り調査を行なった。保護者には対象児についての TS 式幼児・児童性格診断検査を実施した。この検査では、顕示性・神経質・情緒不安・自制力・依存性・退行性・攻撃性・社会性・家庭適応・学校適応・体質傾向の 11 項目、さらに、顕示性・神経質・情緒不安・自制力・依存性・退行性・攻撃性を総合した個人傾向、社会性・家庭適応・学校適応を総合した社会傾向の 2 項目がある。

遊びの好みについて因子分析を行ったところ、子どもにより好きな遊びに偏りがあった。その傾向と性格要素との関連を調べるために因子分析したところ、34 種類の遊びから 2 つの因子が抽出された。その内容から第一因子は「協調-競争性」、第二因子は「技能-創造性」と特徴づけられた。一方で、保育士は子供の行動から性格的傾向も推定していると考えられる。そこで性格的傾向と相関する特徴的な行動を探したところ、家庭適応のスコアと実験中に保護者に振り返って笑いかける・話しかける行動との間に相関があった。また遊びの創造性-競争性の特徴量は、絵本読み中の子供の視線方向の安定性との相関があった。

(3) 保育士の遊び戦略の解明

実験 II では、ロボットと 30 分間遊ぶことのできた子どもについては、ゲーム終了後にロボットの顔を長く見たことから、ロボットに親しみを感じていると推定できた。しかし子どものうち約 3 割は緊張などで遊ぶことができなかった。一方で保育士が遊ぶ場合は、ほぼ 100% の確率で遊ぶことができると思われる。これより、現状のロボット行動決定モデルはその適用範囲が狭く、多様な子どもには適用できないものと考えられる。そこで、非適応の子どもに対する働きかけの戦略を検討するため、保育士が操縦するロボットによる子どもとの遊び実験を行い、保育士の行動戦略を観察した。

実験Ⅲ 保育士が操縦するロボットと子どもの遊び実験

被験児は幼稚園年長児 39 名(男児 25 名, 女児 14 名, 平均年齢 5.26 歳, 範囲 5~6 歳)で. 実験は子ども達が通う幼稚園にて 12 日間に渡り 1 日 2~4 名に対して行った. 子どもと保護者はまず待機室にて説明を受け. 保護者はアンケートを記入した. 子どもは, 保育士が別室から遠隔操作をするロボットと遊び部屋で遊んだ. 実験には家庭用サービスロボット LiPRO(身長 105cm)を用い, 保育士は操作に慣れるため事前に十分な操作練習を行った.

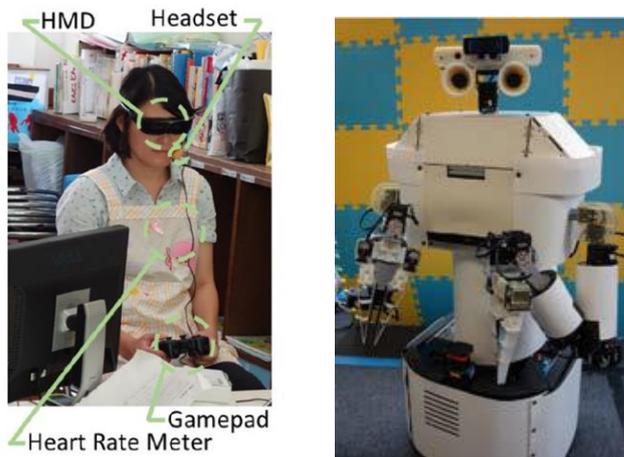


図6 保育士が操縦するロボットによる遊び.
保育士は HMD と操作パッドで操作し, 音声認識結果を再合成してロボットが発話する.

ロボットは, ノンバーバルな情報の伝達を避けるため, 保育士の声を一度認識したのちに音声合成して発話した. 遊びは移動と発話を用いる「かくれんぼ」と「かけっこ」の 2 つとした.

被験児には胸部に張り付ける形式の無線心拍計を取り付け, 心拍, 体表温度, 加速度(x,y,z 軸方向)を計測した. 心拍からはストレス指標 LF/HF 値を求めた. アンケート・生体指標・性格検査のうち, アンケート項目「できるだけロボットに近づきたくないと思っていた」とストレス指標の最大値に有意な正の相関($p < 0.05$), 「調査中の機嫌がよかった」とストレス指標の最小値に有意な負の相関($p < 0.05$)があった. 評価実験で各被験者の遊びをタグ付けし, 遊びの遷移確率を求めた. 図7はそのうち有意に確率が高いものを実線矢印で, それ以外で有意傾向であるものを点線で示した.

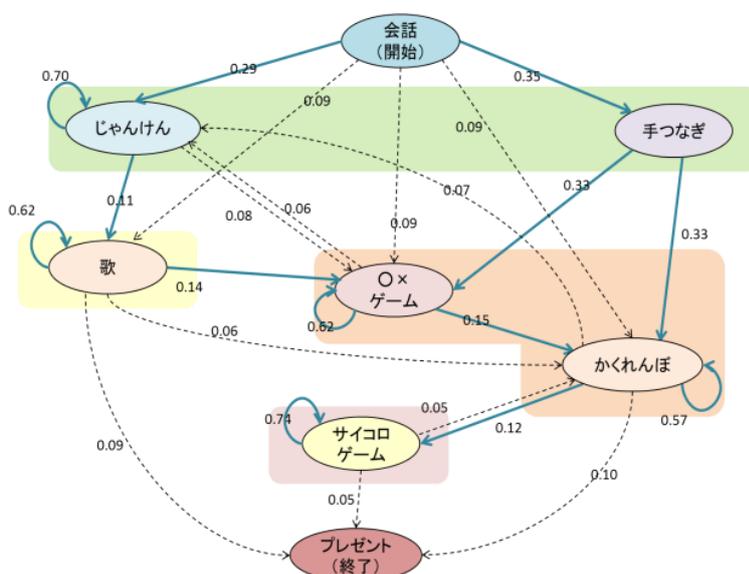


図6 保育士の遊び選択の状態遷移.

簡単な遊びから, 歌, かくれんぼと遷移し, 最後にサイコロゲームのように説明しないとできないほど複雑だが満足度の高いゲームへと変化している. また, 満足度が高いと判断されるときは同じ遊びを再度選択する傾向があり, より理性的な子供ほど同じ遊びを繰り返しでき, 衝動的な子供ほど同じ遊びを繰り返さずほかの遊びに移行していた. 遊びは保育士が選択していることから, 保育士はオンラインで満足度や性格を評価していると考えられる.

図7から, 保育士の遊び選択にはいくつかの戦略があることがわかる. 一つは, 子どもの緊張をほぐすための遊びの選択があるということで, じゃんけんのような誰でもできる

(4) 子どもの心的構えの制御モデルに向けて

ここまでの実験および分析から、コミュニケーション場面における他者の心的状態の推定の重要さと、その推定にもとづく他者の働きかけの重要性が明らかになった。実験Ⅱではロボットに對面する子どもの特性が幅広いことを示した。これは対ロボットに限らず一般的な人対人の場面にも当てはまるし、ロボットに接する成人や高齢者にも通ずるものと考えられる。また実験Ⅲでは、保育士は明らかに子どもの心的状態をオンラインで推定し、それに合わせて緊張をほぐす効果のある遊びを戦略的に選択していた。

脳の認知過程という観点からは、保育士の行動は以下のように解釈できる。まず保育士は長年の経験から子どもモデルを持っており、それを参照して子どもの観測からその心的状態を推定する。そして緊張の緩和と遊びへの興味の促進を評価関数として、子どもへの働きかけの効果を予測しつつその行動を選択している。この子どもモデルの獲得とその運用のノウハウの蓄積こそが、優れた保育士の技能であろう。ここで、働きかけの効果のあり方に注目したい。認知モデルでは一般に大脳皮質

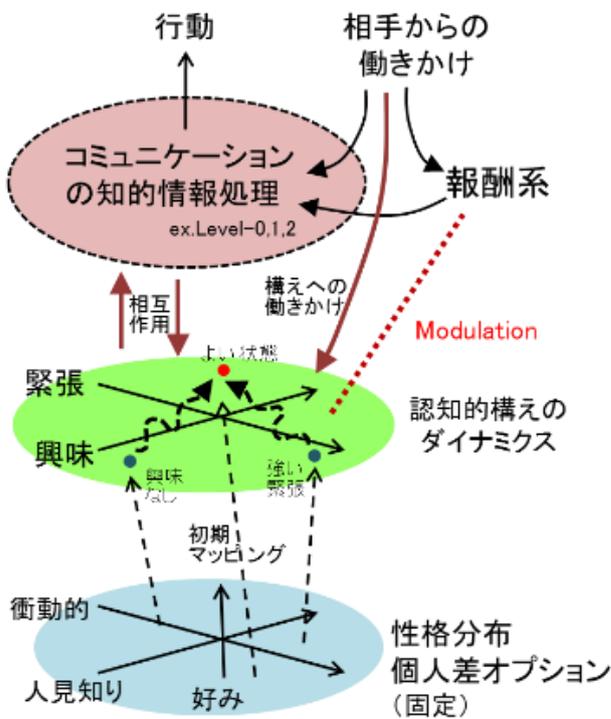


図8 感性層への働きかけと報酬系のモジュレーション

による知的情報処理の下に情動系があるとしている。しかし我々の観察では、働きかけは緊張・興味・関心といった感性的なレイヤーに対して効果を持っている。このレイヤーは知的処理でも情動系でもなく、その中間にあつて外部からの働きかけによって状態が変化し、しかもその状態は報酬系に作用して、例えば同じ入力に対しても評価を変えてしまうほどの影響力を持つと考えられる。そのイメージを図8に示す。

今後は、脳内における他者モデルの在りかの解明と、その部位の活動から他者モデルの運用による行動決定過程を明らかにする必要がある。その理解が、コミュニケーションという心的相互作用の本質的理解につながるものと考えられる。

参考文献

- [1] 横山絢美, 大森隆司: 協調課題における意図推定に基づく行動決定過程のモデル的解析, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol.J92-A, No.11, pp.734-742, Nov.2009
- [2] 長田悠吾, 石川 悟, 大森隆司, 森川幸治: 意図推定に基づく行動決定戦略の動的選択による協調行動の計算モデル化, 認知科学, Vol.17, No.2, pp.270-286, 2010
- [3] 高橋英之, 大森隆司: 社会認知における「社会的思い込み効果」の役割とその脳内メカニズム, 認知科学, Vol.18, No.1, pp.138-157, 2011
- [4] Kenichi Minoya, Takaya Arita and Takashi Omori : Autonomous Acquisition of Cooperative Behavior based on a Theory of Mind using Parallel Genetic Network Programming, Artificial Life and Robotics, Vol. 16, No. 2, pp. 157-161, 2011
- [5] Tomoaki Nakamura, Komei Sugiura, Takayuki Nagai, Naoto Iwahashi, Tomoki Toda, Hiroyuki Okada, Takashi Omori : Learning Novel Objects for Extended Mobile Manipulation, Journal of Intelligent & Robotic Systems, Vol.66, No.1-2, pp 187-204, 2012
- [6] 阿部香澄, 岩崎安希子, 中村友昭, 長井隆行, 横山絢美, 下斗米貴之, 岡田浩之, 大森隆司: 子供と遊ぶロボット: 心的状態の推定に基づいた行動決定モデルの適用, 日本ロボット学会誌, Vol.31, No.3, pp.263-274, 2013
- [7] Takahashi, H., Saito, C., Okada, H., Omori T., An investigation of social factors related to online mentalizing in a human-robot competitive game., Japanese Psychological Research, 55(2), 144-153, 2013
- [8] 高橋英之, 岡田浩之, 大森隆司, 金岡利知, 渡辺一郎: エージェントの擬人化の背景にある並列的な認知処理, 人工知能学会論文誌, Vol.28, No.2, pp.264-271, 2013
- [9] 岩崎安希子, 下斗米貴之, 阿部香澄, 中村友昭, 長井隆行, 大森隆司: 遊びロボットによる子どもの性格傾向の推定に関する研究, 日本感性工学会論文誌, Vol.12, No.1, pp.219-227, 2013.
- [10] Akiko Iwasaki, Takayuki Shimotomai, Kasumi Abe, Tomoaki Nakamura, Takayuki Nagai, Takashi Omori: Using Robots to Estimate Children's Personalities, Transactions of Japan Society of Kansei Engineering, Vol.12, No.1, Special Issue, pp.219-227, 2013.
- [11] Hideyuki Takahashi, Kazunori Terada, Tomoyo Morita, Shinsuke Suzuki, Tomoki Haji, Hideki Kojima, Masahiro Yoshikawa, Yoshio Matsumoto, Takashi Omori, Minoru Asada, Eiichi Naito : Different impressions of other agents obtained through social interaction uniquely modulate dorsal and ventral pathway activities in the social human brain, Cortex, Elsevier, inpress

言語的推論と連続ダイナミクスの相互作用による意味創造メカニズムの解明

研究代表：北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科・教授 橋本 敬

概要

記号コミュニケーションシステムの形成を調整ゲームを用いた言語進化実験により調べた。その形成過程には、共通基盤の構築、記号システムの共有、役割分担の形成の3段階があり、ターンテイクを適切に行うことで含意の伝達が実現されることがわかった。実験の分析と認知アーキテクチャを用いた解析より、多義性が少なく互いに類似した記号システムを作ることと役割反転模倣が、システムの形成要因として重要であることが示唆された。

Abstract

The formation of symbolic communication systems was studied by designing a language evolution experiment utilizing a coordination game. We show that three scaffolding stages exist in the formation process of symbolic communication systems. The three stages are building common ground, sharing a symbol system, and forming a role division. At the third stage, communicating connotations is realized by arranging an appropriate turn-taking. Analyzing the experiment and simulation with a cognitive architecture ACT-R suggests that making mutually similar symbol systems with low ambiguity and role-reversal imitation are important factor for achieving shared communication systems.

1. 研究開始当初の背景

(1) 動的・生成的コミュニケーション

記号コミュニケーションでは、記号による表現の生成とそれに対する意味づけが連鎖する。意味づけは環境や他者との相互作用を含む内的なプロセスであり、解釈の多義性や開放性により、コミュニケーションは単なる情報の伝達・共有ではなく、新しい表現や意味の創発が生じる。このような創造的コミュニケーションは談話研究、人類学、教育学などで質的な研究が行われているが、その動的・生成的プロセスの理解はまだ進んでいない。言語進化の研究では、コミュニケーション創発の数理的・計算論的研究が進められている[1]が、主に言語の構造化や語彙の共有が扱われ、構造や意味の生成発展を扱う研究は少ない。特に、記号が指し示す対象を意味としている場合が多く、人間のコミュニケーションのように指示対象だけでなく意図が共有できるような意味づけがほとんど扱われていない。

(2) 記号コミュニケーションシステム

人は記号によるコミュニケーションを可能にするシステム(記号コミュニケーションシステム)自体を創発させることができる。共通言語がない社会状況で生じるピジン語[2]、ホームサイン[3,4]や新しい手話言語の成立[5]はその例である。また、実験室実験で簡単なコミュニケーションシステムが成立し発展することも示された[6]。しかし、その創発プロセスとメカニズムについて詳細な知見は乏しい。

2. 研究の目的

(1) 記号コミュニケーションシステム生成プロセスとメカニズムの解明

人間のコミュニケーションでは、字義通りの意味だけではなく発話の意図のような言外の意味も伝えられる。本研究は、このような記号コミュニケーションシステムが相互作用を通じて生成されることを示し、そのプロセスとメカニズムを解明することを目的とする。

3. 研究の方法と成果

(1) 記号コミュニケーションシステムの生成実験

記号メッセージをやりとりして一種の調整課題を解く実験[7]を元に、定量的分析が行えるように改変した実験をデザインした[8]。調整課題とは、両者の行動を調整しないとお互い不利益となるような課題である。ここでは、4つの部屋があり両者が同じ部屋で会おうとするという調整課題を用いる。

この実験では、二人の被験者が異なる場所において、その間では互い相手の姿や表情が見えず音も聞こえない状況におかれる(図1)。したがって、日常的なコミュニケーション手段が制限される。唯一の通信手段はコンピュータ端末を用いたメッセージ交換である。メッセージには、■や▲といった6種類の図形(ブランクを含む)を用いるが、各図形がなにを意味するか、どのように使うかについては、事前になんら決められていない。

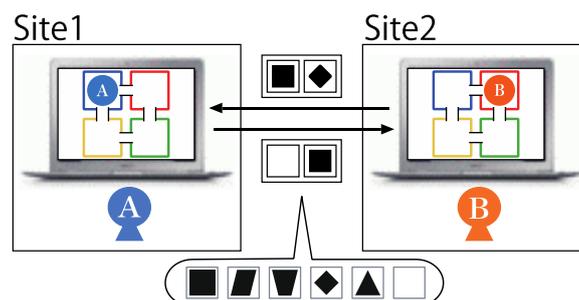


図1: 記号コミュニケーションシステム共創実験の環境

実験課題の手順を以下の通りである。1) 各実験参加者のエージェントが端末上の4つの部屋の異なる位置にランダムに配置される。相手の姿は表示されない。それぞれ縦か横への1回の移動(斜めには移動できない)、あるいは、そのまま留まるという行動により、相手と同じ部屋に行くことが課題の目的である。2) 参加者はこの移動の前に図形を2つ組み合わせて作成したメッセージを送信する。一方が送信したメッセージは他方の送信を待たずに直ちに相手側に表示される。3) 両者はメッセージを交換した後で部屋の移動を決定する。4) 両者が移動すると、自分と相手の移動前後の部屋および両者の送ったメッセージが表示される。両者の移動後の部屋があていば、得点を2点加算、違っていば1点減点する。ただし得点は0以下にはならない。この、初期配置、メッセージ作成と移動先決定、移動、結果表示の4ステップを1ラウンドとして、得点が0点から始めて50点に達するか、1時間が経過するまで繰り返す。これをトライアルセッションとする。

生成されたコミュニケーションシステムの性質を調べるために、トライアルセッションの後に、メッセージなし(T_{NM})、メッセージ同期交換(T_{SM})、メッセージ非同期交換(T_{AM})で調整課題を行う3種類の

テストを実施する。T_{SM}では、メッセージは両者が作成し終わってから相手側に表示される。T_{AM}はトライアルセッションと同じ条件である。T_{NM}では記号メッセージは使われないので、これとT_{SM}の間で課題目的の達成に差があれば、それは記号をうまく使ったコミュニケーションシステムを生成していることを意味する。また、T_{SM}とT_{AM}に差があれば、それはメッセージ送受信タイミングを利用する効果だと考えられる。

この実験課題にはいくつかの特徴がある。どの記号にどんな意味がつけられるかは相互作用を通じて決まってくるだけでなく、なにが意味になるかということもあらかじめ決まっていない。メッセージが部屋や移動方向を指し示すこともあれば、「あなたにまかせる」や「意味なし」といったことも表わし得る。メッセージは即座に相手に送られるので、送信タイミングを調整することができる。そして、移動結果やメッセージが各ラウンド後に表示されるため、ラウンドを経て行動や記号が学習され調整されていくだろう。また、メッセージをあらかじめ決められた図形から選び、行動を1回だけの移動に制限している。このような特徴から、この実験課題は、共有されたコミュニケーションシステムがない状態から、記号の意味や使い方が相互作用を通じて決まり共有されることで調整課題が解かれていく過程を観察し、さらに定量的に分析できるものになっている。

(2) コミュニケーションシステムの生成プロセス

大学院生 21 ペアを参加者として実験を実施した。トライアルセッションにおいて1時間以内に50点に達した14ペアを成功群、それ以外を失敗群とする。課題のパフォーマンスとして5ラウンド中の成功率の変化を観察した(図2)。総ラウンド数はペアごとに異なるため、図3では全体を0~1に正規化したものを横軸としている。また、各ペアの初期、真ん中、最終の各12ラウンドでのパフォーマンスの平均を図3に同時に示した。成功群では、パフォーマンスの変化は3段階で上昇しているようである。前中後期のパフォーマンス間には有意差があった。そして、この3期間のパフォーマンスの間には統計的に有意な相関が認められた。このことから、各段階は次の段階の足場となっていると考えられる。失敗群ではそのような明らかな傾向は見られなかった。

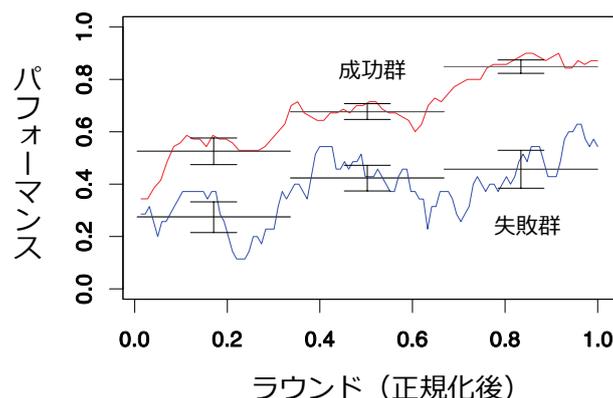


図2: 成功群と失敗群のパフォーマンスの変化。エラーバーは標準誤差。

トライアルセッションにおける成功群の3段階のパフォーマンス上昇の2, 3段階目は、それぞれメッセージ同期交換(T_{SM})、メッセージ非同期交換(T_{AM})のテストのパフォーマンスと同程度であった。このことから、コミュニケーションシステムが形成される過程に見られる各段階は、テストで測られてい

るものが反映されたものと考えられる。

この調整ゲームでは、いつも同じ部屋へ移動するという行動の傾向(規則性)が共有されているとある程度の確率で移動先を一致させられる。しかし、斜め移動が禁じられているため、たとえ相手がどこに移動しようとしているかが分かったとしても、自分がそこには移動できない状況が生じる。よって、行動傾向を共通の基盤とするだけでは完全には解けない。

T_{NM} に比べ T_{SM} でのパフォーマンスは有意に高かった。したがって成功群はメッセージを有効に使っていることがわかる。実際のメッセージや行動を分析すると、成功群は、記号メッセージがどの部屋を指し示すかを表す記号システムを作り、多くの場合共有している。これには、ある図形がどの部屋を指すかというセマンティクスや、記号の組み合わせ方というシンタックスが含まれる。

T_{AM} のパフォーマンスは T_{SM} よりも有意に高かった。このことから、メッセージ送受信タイミングが有効に使われているようである。斜め移動禁止の条件は、記号システムの共有でもこの課題を完全には解けないものになっている。成功群の多くは、メッセージを先に送るか後に送るか(先手か後手か)というターンテイクを利用して役割分担するという方法によりこの状況を解決するようになる。役割分担とは、先手は自身の現在位置を送信し、後手は相手と自分の位置を勘案して両者が行ける移動先を指示するというものである。この方法は、部屋を指し示すメッセージを送受信しつつ、それぞれのメッセージは現在地と行き先という異なることを伝えている。すなわち、記号メッセージが、部屋という記号システムで取り決められた枠内の字義通りの意味(denotation)と、現在地の宣言か行き先の指示かというメッセージの意図を表す言外の意味(connotation)の二重の意味を持つようになる。

以上から、記号メッセージが字義通りの意味だけでなく課題や状況に応じた言外の意味・意図を伝えられるコミュニケーションシステムができる過程には、まず行動の共通基盤という、記号を使うよりも前の慣習、いわば前記号的プラグマティクスの形成があり、続いて、記号システムというセマンティクスとシンタックスの共有、そして、ターンテイクを利用した役割分担によるプラグマティクスの構築という3つの段階があることが示唆される。

(3) コミュニケーションシステムの生成要因

この3つの段階が生じる要因を調べるため、トライアルセッション中の行動および作られている記号システムの性質を定量化し、各テストのパフォーマンスとの相関を分析した。移動がランダムに行われるのではなくできるだけ左上の部屋に移動するといったようにある部屋に行きやすい傾向を持つならば、相手もそこを目指すことで同じ部屋に行ける可能性は高まる。すなわち、記号を使用する前に慣習的行動としての共有基盤が形成可能である。移動行動の規則性に加えて、使用する記号にも何らかの傾向が見られるならば、その移動とよく使う記号を結びつけた記号関係を作りやすいだろう。また、ターンテイクを利用した役割分担を行っていることから、メッセージを送る時間は役割分担になんらかの関係を持つと考えられる。字義通りの意味に加えて言外の意味をひとつのメッセージで伝える場合、異なる状況で同じメッセージが使われることがある。その際に、記号システムが変動しているとか曖昧であると判断するのではなく、字義通りの意味とは別のレベルに相手が共有したい意味があることに気づくには、そもそも記号システムが一貫した曖昧さの低いものになっているべきである。以上の予想より、移動先の偏り、記号使用の偏り、メッセージ送信時間差、記号の曖昧さを分析対象とし、それぞれ指標を作って分析した(指標の詳細は[8,9]参照)。

図3にこれらの指標とテストのパフォーマンスとの相関を示す。記号の曖昧さはトライアルセッション

初期の 12 ラウンドの結果のみを出している。移動先および記号使用の偏りについては予想通りの結果となっている。成功群では初期から高いパフォーマンスを出しているということは、ある部屋へ移動しやすいという慣習的行動が共有基盤を形成し、その移動時によく使われる記号が結びつけられて、早くから記号関係ができるのだろう。そして、初期段階から曖昧さの低い記号システムを作っていること、すなわち、記号と行動の対応が初めから一貫していることが、記号システムによりゲームのパフォーマンスを上げられるという T_{SM} と相関することもリーズナブルである。一方、メッセージ送信タイミングはターンテイクによるパフォーマンス向上には寄与しない。むしろ、記号システムが作られていると、初期位置からどういうメッセージを送るべきかについて考える時間が短くなることから、 T_{SM} と逆相関するようになったと考えられる。曖昧さが T_{AM} と逆相関することも予想通りである。さらに、行動や記号使用の規則性といった行動の傾向はターンテイクによるパフォーマンス向上には寄与しないことから、言外の意味を伝えられるようになるには慣習的な行動とは異なるレベルのサブシステムがあることが示唆される。

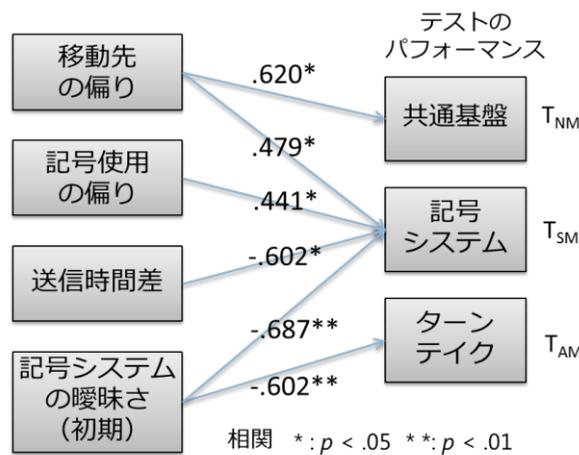


図3: 行動傾向とテストのパフォーマンスの相関

(4) コミュニケーションシステム生成のシミュレーション分析

この実験課題の認知モデリングを用いて、コミュニケーションシステムの生成に至る被験者の内部メカニズムの検討を行った[10]。ここでは ACT-R (Adaptive Control of Thought-Rational)[11]という統合認知アーキテクチャに基づいた計算モデルを用いる。統合認知アーキテクチャは、知覚、運動、記憶、思考などの基礎的な心理実験の結果に基づいて構成され、様々な人間の認知現象を統合的に説明することを試みるものである。

ACT-R は、人間の認知を複数の独立したモジュールにより構成されるものととらえる。中心的なモジュールは If-Then ルール(手続き知識)を格納するプロダクションモジュールであり、他の周辺的なモジュールを統合する。周辺的なモジュールは、一時的な情報の貯蔵場所(バッファ)をもち、入出力や宣言的知識の保持などの情報処理を行う。プロダクションモジュールは、各バッファの状態を条件とし、前件部が適合するルールを選択し発火させる。ルールの発火によりバッファは書き換えられ、新たな状態と合致するルールが探索される。

ACT-R は、シンボリックな学習とサブシンボリックな学習を統合するアーキテクチャでもある。2 種

類の学習を統合するという特徴は、前記号的なプラグマティクスの形成と記号システムの形成を含むコミュニケーションシステム生成過程のシミュレーションに適している。ルールに付された効用値を変化させる強化学習(サブシンボリックな学習), 過去のゴールバッファの状態を宣言的モジュールに蓄積する事例ベース学習, 新たなルールを生成するコンパイル学習(それぞれシンボリックな学習)を組み入れたモデルを構築することで、強化学習により慣行的行動が形成され、事例ベース学習により状況と記号を対応付ける記号システムが形成され、コンパイル学習により役割分担の円滑化が導かれると考えられる。

ACT-Rアーキテクチャ上で2体のエージェントが課題画面を介して相互作用する状況をモデル化する(図4, モデルの詳細は[10]参照)。エージェントの意思決定の方略として、事例利用と模倣という2種類の事例利用戦略の振る舞いを比較する。事例利用戦略では、現在のゴールバッファの状態に適合する過去の事例を用いる。模倣戦略では自身と相手を入れ換えた事例を用いる(役割反転模倣[12])。

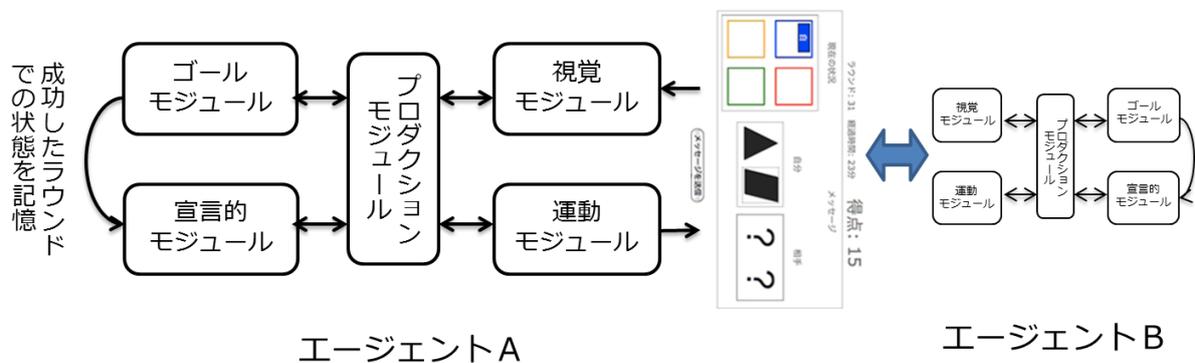


図4: ACT-Rによるモデルの概略

トライアルセッションのパフォーマンスについて、これら2つの意思決定方略、および、実験の成功群・失敗群の結果を比較した(図5)。役割反転模倣モデルが事例利用モデルよりも成功群の結果をよく再現する。特に中期・後期ではこの二者はほぼ一致する。興味深いことに、模倣方略の初期のパフォーマンスは失敗群と同じ程度である。成功群は初期段階から移動先・使用記号を偏らせることで共有基盤を形成でき、初期から課題に成功しやすい。対して、シミュレーションモデルは初期には行動ルールを持たないためランダムに行動する。たまたま成功した事例を蓄積し強化学習が進むことで、行動・記号の偏りが生じ、中期には成功群と変わらない程度に成功する。これは、行動・記号使用の偏りという共有基盤は、事前に組み込まれたものとして不可欠なわけではなく、成功事例を利用し強化学習により作ることができ、記号システムの形成にまで至れることを示唆する。

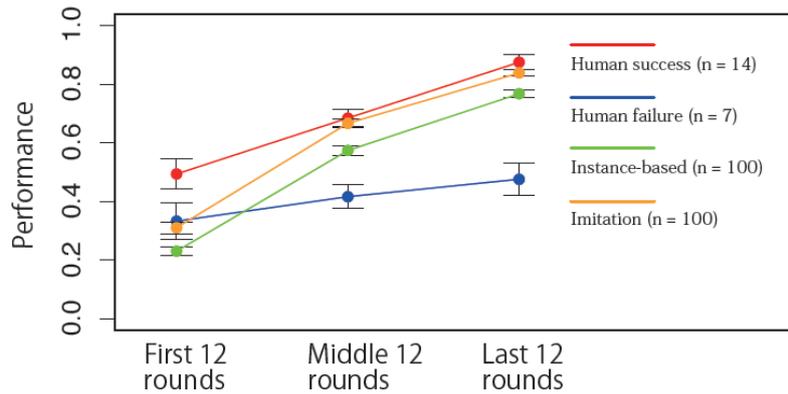


図5: 課題のパフォーマンスの推移. モデルの2つの戦略, および, 実験の成功群・失敗群について, 初期・中期・後期 12 ラウンドにおける平均・標準誤差

さらに, 記号システムの特徴を調べるため, ペア内での記号システムの類似度を指標化した(図6). 失敗群, 事例利用方略では類似度はまったく上昇しないのに対し, 成功群と模倣方略ではラウンドを経て上昇する. 成功群では初期から十分類似しており, 中期でさらに類似度が高まるが, 後期ではそれ以上上昇しない. これに対し, 模倣方略では, 初期は失敗群と同程度だが, 中期で成功群に迫り, そのまま上昇を続けて後期では成功群以上となっている. すなわち, 記号システムを作る段階までは模倣方略が使われていると見ることができるが, 役割分担を形成する段階では, 人間は異なる方略をとっている可能性が示唆される.

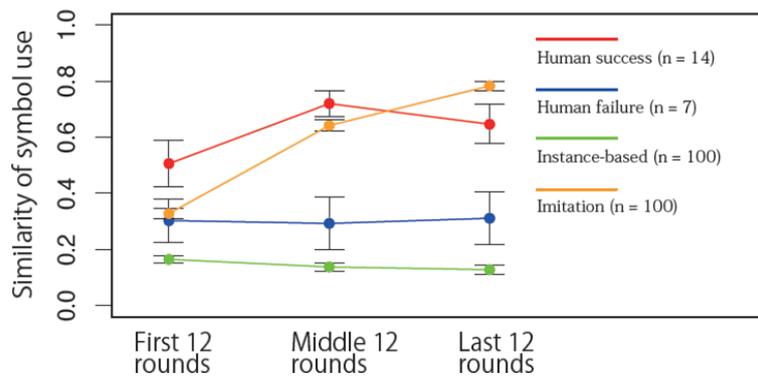


図6: 記号使用の類似度の推移. モデルの2つの戦略, および, 実験の成功群・失敗群について, 初期・中期・後期 12 ラウンドにおける平均を示す

(5) まとめ

本研究の実験課題では, 意味のない図形に意味をつけそれをを用いて調整課題という共通目的を達成するシステムを作る過程が見られる. この過程には, 共通基盤の形成, 記号システムの共有, 役割分担の構築という3つの段階があり, 各段階が次の段階を形成する礎となるようなブートストラップ的生成過程があった.

第1段階では, 用いる図形と移動先という行動をある程度規則的にすることで, その両者が記号関係にあるという解釈を可能にする. これを礎にして, 他の部分の記号関係を調整し, 第2段階の記号

システムができる。そして第3段階では、各メッセージが指し示す場所という字義通りの意味だけではなく、それを指し示すことによる話者の意図という言外の意味が伝えられるようになる。そして、この段階が役割分担によって担われる得ることが示された。

シミュレーション解析より、これらの過程において役割反転模倣、すなわち、「もし自分が相手だったらどうするか」を過去の相手の行動に基づいて予測して自身の行動を決めるという意思決定戦略が有効であることが分かった。曖昧さが低い記号システムを作り共有することが有効なのは、それによって字義通りの意味とは異なるレベルに相手が伝えようとしていることがあることに気づくことができ、相手と共有したものを礎にして、相手の役割を勘案して自分なりの役割を担えるからであろう。

参考文献

- [1] Cangelosi, A., & Parisi, D. (Eds.) (2002). *Simulating the Evolution of Language*. Springer.
- [2] Bickerton, D. (1981). *Roots of Language*. Ann Arbor.
- [3] Goldin-Meadow, S., & Feldman, H. (1977). Development of language-like communication without a language model. *Science*, 197, 401-403.
- [4] Goldin-Meadow, S., & Mylander, C. (1998). Spontaneous sign systems created by deaf children in two cultures. *Nature*, 391, 279-281.
- [5] Kegl, J. (1994). The Nicaraguan sign language project: An overview. *Signpost*, 7, 24-31.
- [6] Galantucci, B. (2009). Experimental semiotics: A new approach for studying communication as a form of joint action. *Topics in Cognitive Science*, 1, 393-410.
- [7] Galantucci, B. (2005). An experimental study of the emergence of human communication systems. *Cognitive Science*, 29(5), 737-767.
- [8] Konno, T., Morita J., & Hashimoto, T. (2013). Symbol communication systems integrate implicit information in coordination tasks. *Advances in Cognitive Neurodynamics* (III), Yoko Yamaguchi (Ed.), Springer, pp.453-460.
- [9] 金野武司・森田純哉・橋本敬 (2013). コミュニケーションシステムの形成過程に見る知識共創の基盤, 『知識共創』, 3, pp.III8-1—III8-10.
- [10] Morita, J., Konno, T., & Hashimoto, T. (2012). The role of imitation in generating a shared communication System, *Proceedings of the 34th Annual Meeting of the Cognitive Science Society (CogSci2012)*, N. Miyake et al. (Eds.), pp.779-784.
- [11] Anderson, J. R. (2007). *How Can the Human Mind Occur in the Physical Universe?* Oxford University Press.
- [12] Tomasello, M. (1999). *The Cultural Origins of Human Cognition*. Harvard University Press.

環境と神経モジュールの相互作用による実時間運動指令創成のメカニズム

研究代表：電気通信大学・教授 阪口 豊

概要

本研究では、脳が身体性の制約の下で運動指令を生成するメカニズムの解明にむけて理論と実験を組み合わせた研究を行なった。主たる成果は、①「間欠的制御」と呼ぶ運動指令生成の計算モデルを構築しヒトの振舞いを再現したこと、②単一試行脳波における位相跳躍の検出手法を開発し位相跳躍と運動生成の関係を明らかにしたこと、③描画課題中のサル眼球運動を解析し連続運動が複数分節に分解・実行されていることを示したこと、④運動遂行中に神経情報表現が動的に変化する様相を情報量解析により明らかにしたことである。

Abstract

We investigated the mechanism how our brain generates motor commands in real-time manner under the constraints of our body, neural system and environment by theoretical and experimental methods. Four primary results have been obtained. 1) We constructed a control model named "adaptive intermittent control" or "segmented control", and illustrated that the proposed model well explained the human behavior in a continuous motor task. 2) We developed a novel method which detected a phase shift/reset of stationary brain wave using a single-trial EEG data and, making use of this method, we found the relationship between the occurrence of phase shift in α -wave and reaction time of a simple reaction-time task. 3) We analyzed the relationship between saccadic eye movements and hand movements of monkeys performing a circle drawing task. The results suggested that the monkey performed a continuous drawing task with dividing it into multiple discrete segments. 4) We examined the temporal change in neural representation in monkey's parietal region using an information analysis technique, and clarified how information representation changed on the way of performing a visuomotor task.

1. 研究開始当初の背景

ヒトが外界環境の中で生きていくためには、行動決定や運動発現に関わる脳内情報処理を環境の物理的事象と同じ時間スケールで行なうことが本質的である。すなわち、日常生活で遭遇する事象や身体の機械的応答および脳の応答がいずれも概ね数十～数百ミリ秒の時間スケールで生じるため、これらは時間的に整合し、その結果意味のある行動が達成される。

このような「運動制御における身体性」に関する研究は、従来概念レベルの議論に留まり、そのメカニズムを具体的に議論するには至っていなかった。本研究課題は、計算理論と行動実験・生理実験の手法を組み合わせることにより、この問題について具体的に議論することをめざして立案したものである。

環境・身体と神経系の相互作用を介した運動制御の機序を探究するため、本研究では、連続的な運動課題を遂行する制御構造、そして、そのような制御構造が創成される過程に着目した。具体的には、運動課題を時間方向に分節し分節区間ごとに前向き制御を行なうことで、処理の遅い神経系と応答の遅い筋骨格系の下で連続的運動課題を遂行する制御原理(間欠的制御仮説)をコア概

念として、この仮説を実現する計算モデルを構築するとともに、時間分節や分節された運動指令生成に相関する脳活動を抽出することをめざした。

2. 研究の目的

(1) 間欠的制御の計算モデルと行動実験による検証

計算の遅い神経系と応答の遅い筋骨格系を用いて連続的な運動課題を実行するための制御構造として、連続的運動課題を時間方向に分節し、分節した各区間で前向き制御を行なう間欠的制御の原理を定式化する。また、その原理を計算モデルとして実装して数値実験によりその振舞いを調べるほか、同一の課題を行なうヒトの振舞いと対比してモデルがヒトの運動特徴を説明できるかどうかを検証する。また、ダイナミクス理論の観点から、実時間的な運動制御における脳と環境の相互作用の機序について検討を行なう。

(2) ヒト脳波の位相跳躍と運動生成との関係性

間欠的制御の妥当性を検証することを目的として、視覚運動変換課題実行中のヒト脳波活動を解析し、脳波活動の不連続性と運動生成の関係性を明らかにする。この目的を実現する手段として、単一試行脳波を解析して脳波の位相跳躍を抽出するアルゴリズムを開発する。

(3) サル描画課題における連続運動の分節化

間欠的制御の妥当性を検証することを目的として、サルを用いた行動実験および電気生理実験を行なう。行動実験では、腕の動きと眼球運動の動きの関係性を解析し、連続的な腕運動課題が分節されている様相を解析する。電気生理実験では、サルの運動領野に多点電極を埋め込んで同様の課題を行ない、運動分節に対応する神経活動の抽出をめざす。

(4) 視覚運動変換過程における神経情報表現の動的変化

感覚情報が運動情報に変換される過程での脳内の動的な情報処理の様相を明らかにすることを目的として、手操作課題中に頭頂連合野で観察された神経活動に対して情報量解析の手法を適用し、運動実行中に神経活動が表現する情報内容が変化の様子を解析する。

3. 研究の方法

(1) 間欠的制御の計算モデルと行動実験による検証

計算モデル研究では、感覚運動系における信号伝達遅れを陽に考慮した制御モデルを構成し、モデル予測制御の枠組みを参考にして間欠的制御のアルゴリズムを定式化した。このモデルは、運動を離散的区間に分節する際に、環境に関する予測の不確実性に基づいて分節長を適応的に定めるという特長を有する。行動実験では、運動する視覚的目標を指先で追従する運動を計測する実験環境を構築し、課題遂行中の運動特徴を解析した。この解析を効率的に行なうために、運動軌道から運動不連続点を自動的に抽出するソフトウェアを新たに開発した。そして、このソフトウェアを用いて同一課題を遂行するヒトと計算モデルの振舞いを解析し、両者を対比・検証した。

また、先行制御仮説との関連性を念頭において、周期的運動におけるリズムに着目してフィードフォワード制御要素とフィードバック制御要素の関係性を検討した。具体的には、視覚的目標追従課題で観測されたヒトの手の動きの先行性が発現する条件を、ミニマムダイナミクスモデルを用いて調査した。

(2) ヒト脳波の位相跳躍と運動生成との関係性

脳波を用いて運動生成過程を探るため、 α 波帯域の脳波の自発活動に注目し、 α 波帯域の自発活動の位相跳躍を単一試行の脳波データから検出する手法を開発した[1].

本手法では、サンプル点 k における脳波観測値 y_k の尤度関数はその時点の瞬時振幅 a_k 、瞬時位相 x_k とノイズ強度を表すハイパーパラメータに依存する正規分布で与え、その下で、 N 個のサンプル点での観測値から各時点での α 波の瞬時振幅、瞬時位相、および、位相の不連続性 $\{P_d\}$ 、振幅の不連続性 $\{P_a\}$ の生起確率を推定する。そのために、位相や振幅の変化の連続性を表す確率モデルを定義し、そして、この確率モデルと観測値に関する尤度関数に対してベイズの定理を適用すると瞬時振幅、瞬時位相に関する事後分布が得られるので、その分布に基づき二種最尤推定によりハイパーパラメータを推定する。さらに、その結果を用いて各時点の瞬時振幅、瞬時位相とともに不連続性の生起確率を求め、位相跳躍の有無を推定した。

開発した手法を単純反応時間課題（視覚刺激に対するボタン押し課題）遂行時の脳波データに適用し、運動生成と脳波の位相跳躍との関係を調べた。脳波は拡張 10-20 法に基づき 30 チャンネルで計測し、そのうち FC3, C3, CP3 を左領野、FC4, C4, CP4 を右領野、P3, Pz, P4 を頭頂領野、O1, O2, Oz を後頭領野と定め、各領野での位相跳躍の有無と反応時間の関係を検討した。

(3) サル描画課題における連続運動の分節化

CRT モニタ上で、カーソルを単一の標的を通過させる課題（ヒット課題：図 1B）とカーソルで円状曲線を自発的に描画する課題（図 1C）を実行できるように 2 頭のサルを訓練し、これらの課題遂行中の手先位置と視線位置を計測した。サルは頭部を固定された状態でモンキーチェアに座り、分担研究者が開発したロボティックマニピュランダムシステム (RANARM: 図 1A) のハンドルを操作することでモニタ上に表示されるカーソルを移動させる。また、視線位置計測システム (EyeLink: SR Research 社) により視線位置を推定し、モニタ座標上でのカーソル位置と視線位置の関係性を解析した。また、これらの運動を行なっている際の大脳皮質運動野の神経活動を計測し、その情報表現を解析した。

(4) 視覚運動変換過程における神経情報表現の動的変化

3 次元物体の手操作課題遂行中のサル頭頂 AIP 野の 99 個の神経細胞活動を解析し、細胞活動が表現する情報が課題遂行中に時間的に変化する様相を分析した。具体的には、50 ms 幅の時間ビンに含まれるスパイク数と 6 種類の対象物体との関係を相互情報量を用いて定量化し、その時間変化を追跡した。さらに、複数の情報量の時間変化パターンに対し非負行列分解 (NMF) の手法を適用し、その構造を分析した。そのうえで、これらの解析結果と AIP 野の五つの細胞タイプ (Vo, Vn, VMo, VMn, M) との関係を検討し、細胞活動の役割について考察した。

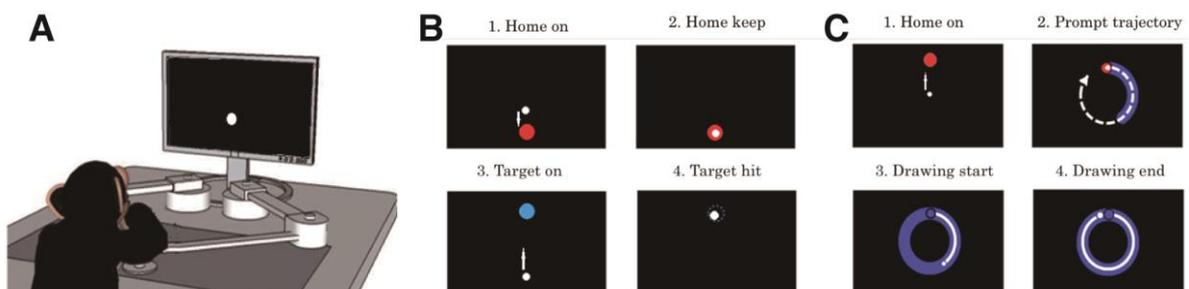


図 1: サルの実験環境と実験課題

4. 研究の成果

(1) 間欠的制御の計算モデルと行動実験による検証

計算モデルの研究では、モデル予測制御の枠組みを参考にして間欠的制御のモデルを構築し、そのアルゴリズムを定式化した。「制御信号を間欠的に加える」という意味での広義の間欠的制御は、フィードバック制御、フィードフォワード制御のいずれに対してもすでに提案されているが、本研究で構築したモデルは予測を土台として運動指令を計算し、また、予測の不確定性に基づいて分節区間長を決定する(予測が信頼できるときは分節長を長くして運動指令の設計頻度を下げる)点で特徴的で、これにより少ない計算コストで前向き運動制御を実現する。本方式の特性を検証するために、視覚的目標追従課題を例題として提案モデルの振舞いを調べ、同一課題を行なう他の制御モデルやヒトの振舞いと比較した。

図2左図は、正弦波状あるいは擬似ランダムに動く視標を追従するヒトの手先運動軌道の典型例を示したものである。この図から、目標の動きが連続的であっても運動軌道には不連続点が生じることがわかるが、この事実はヒトが時間的に一様な制御を行っていないことを示唆している。図2右図は、構築したモデルが同一課題を実行したときの運動軌道と運動指令パターン(縦の薄い線は分節位置)を示したものである。左右の図を比較すると、提案モデルの振舞いがヒトの振舞いと定性的に一致していることがわかる。他の制御モデルについても同様の比較を行なったところ、フィードバック制御を土台とするモデルは、間欠的制御の考え方を導入したものも含めヒトの振舞いを再現できなかったが、フィードフォワード制御を土台とする間欠的制御モデルは提案モデルと同様にヒトの振舞いを再現できた。この結果は、到達運動のような離散的・弾道的運動だけでなく、目標追従運動のような連続的運動においても脳がフィードフォワード制御を行っていることを示している [2]。

本研究では、ヒトや提案モデルの運動軌道に見られる不連続点を自動的に検出するソフトウェアを複素ウェーブレット解析の手法を用いて開発した[3]。図3はこのソフトウェアを用いて抽出した不連続点の時間間隔の頻度分布をヒト、提案モデルおよび他の2種類のフィードフォワード型間欠的制御モデルについてまとめたものである。いずれの分布も類似した形状を示しており、ヒトとこれらのモデルの特性が類似していることを示している。ただし、他の間欠的制御モデルの運動指令更新間隔が0.1 s程度であったのに対し、提案モデルでは運動指令更新単位である分節長が0.1 - 0.5 s程度の範囲で適応的に決定されていた。運動計画の

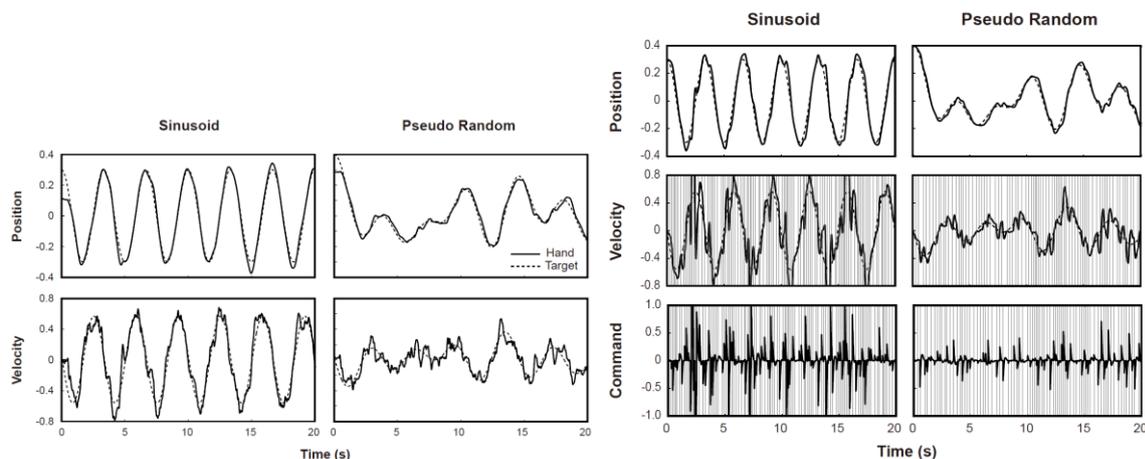


図2 視覚目標追従課題を実行するヒトと提案モデルの振舞い

計算コストは運動指令更新頻度に比例して増加することから、提案モデルは少ない計算コストで同等の制御性能を実現していることになる。

以上の比較・検討だけでは、現実の脳の中で提案モデルと同じメカニズムが働いていることを立証することはできないが、少なくとも脳が遅い感覚運動系の下で少ない計算コスト(認知コスト)で連続的運動課題を実現するモデルとしての有効性はあると考えている。脳波等により分節に対応する脳活動を抽出することが今後の課題である。

一方、視覚的目標追従課題における手の動きの先行性については、数値実験により先行性が発現する条件を調査した。目標が調和振動的に運動する条件では手の運動速度に目標運動の倍の周波数成分が現れることから、誤差修正項と目標速度項から構成されるミニマムモデルにこのリズム成分を付加したモデルを構築し、①誤差修正項が常に働く、②誤差修正項と速度項が相補的に働く、③誤差修正項と速度項が同時に働く、という3条件で数値実験を行った。その結果、運動先行性が発現するのは、手の動きに倍周波数のリズム成分が含まれ、かつ、誤差修正項(フィードバック成分)と速度項(フィードフォワード成分)が相補的に動作する場合であることが明らかになった[4]。

(2) ヒト脳波の位相跳躍と運動生成との関係性

本研究ではまず、 α 波帯域の自発活動の位相跳躍を単一試行データから検出できる手法の開発に成功した。図4は左領野 LA において各時刻において位相跳躍が検出された試行数の被験者間平均値を示したもので、時刻原点は視覚刺激提示時刻を表す。検出された位相跳躍数は刺激提示前に比べて刺激提示後に明確に増加していることから、提案手法により、単純反応時間課題に関連した位相跳躍を検出できていることがわかる[1]。

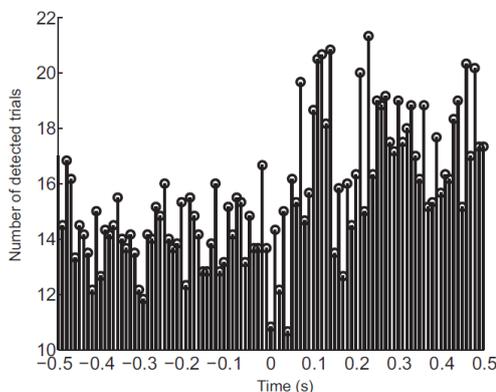


図4: LA で位相跳躍が検出された試行数の平均値

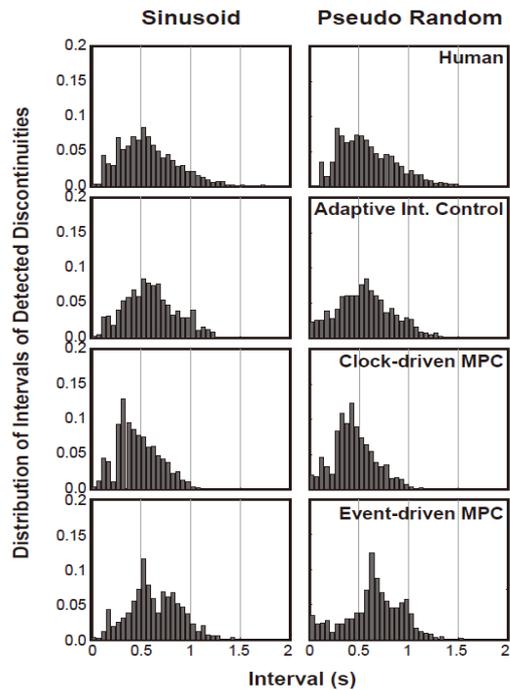


図3 運動指令の更新間隔の分布

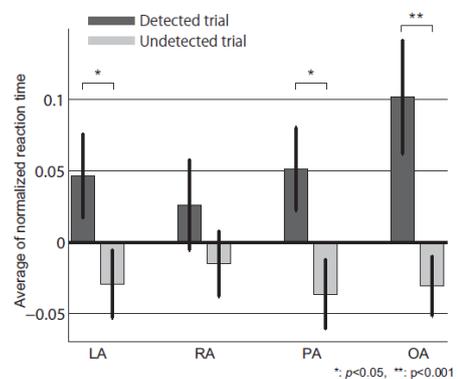


図5: 標準化した反応時間の平均値

この手法で得られた結果に基づいて、位相跳躍の有無と反応時間との関係を解析した。反応時間の分布が被験者間で異なっていたため、反応時間を標準化(Z-score 化)して異なる被験者のデータを統合し、解析を行なった。ボタン押し動作の直前 150 ms の時間区間に位相跳躍が検出されたか否かで試行を分類し、それぞれの標準化反応時間の平均値を計算したところ、左領野 LA, 頭頂領野 PA, 後頭領野 OA において位相跳躍が検出された試行では、検出されなかった試行に比べて反応時間が有意に長いことが明らかになった(図5)。

左領野 LA, 右領野 RA の頭頂付近における α 波帯域自発活動は主に運動及び体性感覚に関連する μ 波であり、頭頂領野 PA, 後頭領野 OA の後頭付近における α 波帯域自発活動は主に視覚に関連する α 波であることが知られている。本研究の結果は μ 波, α 波の位相跳躍が反応時間に影響することを示しているが、そのメカニズムを解明することが今後の課題である。

(3) サル描画課題における連続運動の分節化

ヒット課題での固視位置を分析した結果、標的近傍への固視(leading gaze fixation: LGF)とカーソル近傍への固視(catching gaze fixation: CGF)の2種類があることが明らかになった(図6A)。LGF はカーソルに対して視野角で 0.3 rad 程度先行した位置に生じることが多く、CGF はカーソルとほぼ同一位置でやや先行した位置に生じることが多かった(図6B)。

描画課題においても同様に 2 種類の固視が存在し、LGF に対応する固視はカーソルに対して視野角で 0.25 rad 程度先行した位置に、また、CGF はカーソルとほぼ同一位置に生じることが多かった(図6C)。興味深いことに、カーソルに先行する位置での固視点近傍では手先位置分散が極小値をとることがわかった。このことは、連続運動である描画課題においても実験動物が内的に経由点を設定し、分節化した運動制御を行っていることを示唆している。

大脳皮質運動野の神経活動解析では、ヒット課題遂行中のサル運動野の神経細胞の発火頻度は肩関節と肘関節各々の関節トルクと関節角速度の線形荷重和として良く近似することができ、これらの変数に対して平均して約 70 ms 先行していることが明らかになった [5]。この結果は、皮質運動野の神経細胞は関節トルクや関節角速度といった腕の未来の状態を脊髄に出力し、運動指令としていえることができる。このことは、腕の初期状態と目標位置を入力し推定した腕の状態に基づいて運動指令を生成する最適フィードバック制御と同様の制御を脳が行なっていると考えても無矛盾であることを意味している。

(4) 視覚運動変換過程における神経情報表現の動的変化

AIP 野の 99 個の神経細胞活動の情報量解析により以下のことが明らかになった [6]。

図 7 は個々の神経細胞の発火頻度に含まれる 6 種類の物体に関する情報量の時間変化を AIP 野の五つの細胞タイプに分けて表示したもの(情報量マップ)で、横軸は時間を表し、

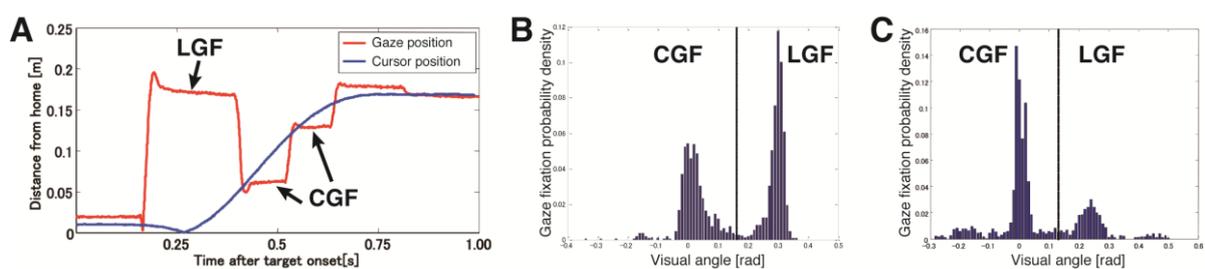


図6 ヒット課題, 描画課題における固視運動と固視点の分布

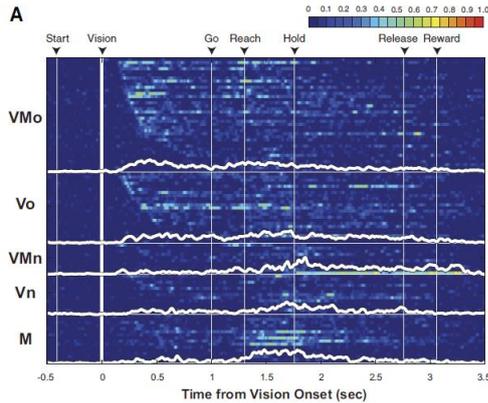


図 7 細胞ごとの情報量の時間変化

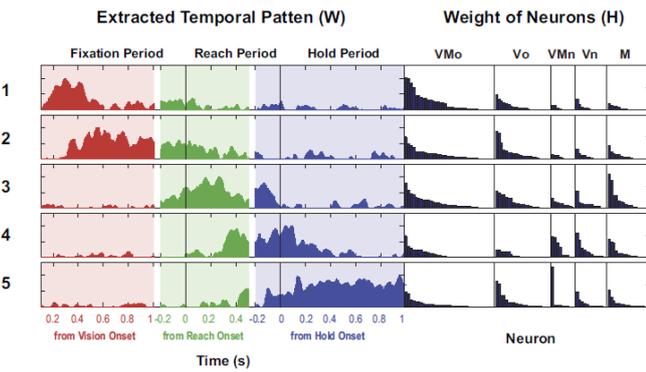


図 8 抽出された基本的な情報量時間変化パターン

原点は視覚情報が与えられる時刻 (Vision)を表す. 一方, 縦軸は細胞番号であり, 細胞はタイプごとに分類し, その中で情報量の立ち上がりが早い順に並べてある. この図より, 細胞タイプごとに情報量をもつ時間帯が異なることが読み取れるが, この結果は, 物体操作課題の遂行において各細胞タイプが果たす役割の違いを明確に示している.

図 8 は得られた情報量の時間変化データに対して非負行列分解の手法を適用して, 5 種類の情報量変化パターンを抽出した結果を示したものである. この結果は, 図 7 では一見複雑に見える情報量の時間変化も 5 種類の時間変化の組み合わせで記述できることを示している. 図 8 の各パターンを見ると, ①物体を視覚的に捉えた直後, ②視覚的に捉えたあと手を伸ばすまでのあいだ, ③手を伸ばしてつかむ運動を実行する際, ④物体をつかむ前後, ⑤物体をつかんだあとの時間, の各時間帯での情報保持成分を表しているがわかるが, このことは, これらの成分がそれぞれ①物体形状の視覚的解析, ②解析した形状情報の保持, ③物体の形状に合わせた運動実行, ④つかんだ物体の触覚的形状の理解, ⑤つかんだ物体の触覚的形状と視覚的形状の照合の役割に対応することを示唆している.

このほか, 本解析では以下の二つの興味深い知見を得た. 一つは課題遂行中に情報表現内容を変化させる細胞の存在である. 図 9 は, ある細胞に関して, 6 種類の物体から 2 種類ずつ取り出して 15 の対を作ったとき対ごとに 2 種類の物体を識別するための情報量の時間変化をまとめて表したものである. この図を見ると, 物体の視覚情報が与えられてから物体をつかむまで (Vision から Hold まで)のあいだはプレート(Pl)であるかどうかを区別する分類についての情報量が大きい, 物体をつかんでいるあいだ(Hold から Release まで)は立方体(Cu)であるかどうかを区別する分類についての情報量が大きい. この結果は, 同一の細胞が課題実行中に情報表現の内容を変化させることを明確に示している.

もう一つは, 同一の神経細胞において異なる分類に対する情報量の立ち上がり時刻が違うことである. 図 10 は VMo タイプの神経細胞について, 円環(Ring)であるか円筒(Cylinder)であるかを区別する情報量と, 円環であるか球(Sphere)であるかを区別する情報量の時間変化を示したものである. 左右の図を比較すると, 円環対球の情報量の立ち上がりは, 円環対円筒の情報量の立ち上がり時刻に比べて 100 ms 程度遅れていることが読み取れる. この結果は, 視覚的 shape の分析において, すべての視覚的特徴の処理が同時に進むのではなく, 特徴ごとに異なる時間特性をもって進むことを示唆している.

このように、本研究では、すでに得られている電気生理学データに対して情報量解析の手法を適用することにより、視覚運動変換過程における情報処理の動的な変化について新たな知見を得ることができた。

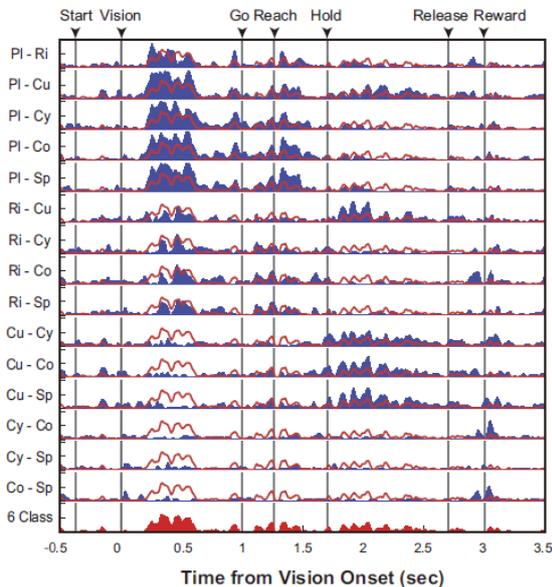


図 9 課題実行中に情報表現が変化する細胞

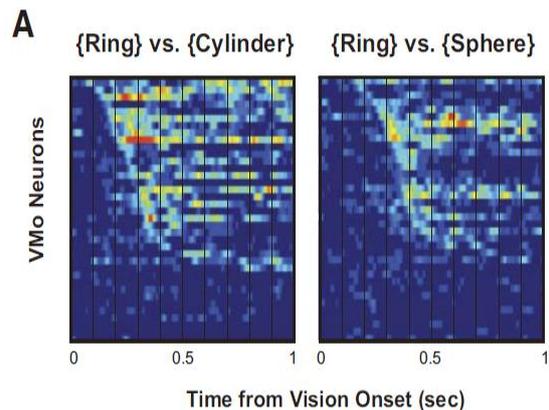


図 10 情報が立ち上がる時刻の分類間の違い

参考文献

- [1] Naruse, Y., Takiyama, K., Okada, M. & Umehara, H. Statistical method for detecting phase shifts in alpha rhythm from human electroencephalogram data. *Physical Review E*, 87, 042708, 2013.
- [2] Sakaguchi, Y., Tanaka, M. and Inoue, Y.: A computational model explaining intermittent motor behavior observed in continuous tracking task, ICCN2013 (4th International Conference on Cognitive Neurodynamics), DBF18, 2013.
- [3] Inoue, Y. & Sakaguchi, Y.: A wavelet-based method for extracting intermittent discontinuities observed in human motor behavior, *Neural Networks*, in press.
- [4] Ishida, F., Sawada, Y.: Complementarity between the feedforward and feedback mechanisms is necessary for anticipatory activity in hand tracking, *Proceedings of 2013 International Joint Conference on Awareness Science and Technology and Ubi-Media Computing*, 310–316, 2013.
- [5] Miyashita, E. & Sakaguchi, Y.: Suggestive Evidence for a forward model of the arm in the monkey motor cortex, *The 13th International Workshop on Advanced Motion Control*, 191–196, 2014.
- [6] Sakaguchi, Y., Ishida, F., Shimizu, T. and Murata, A.: Time course of information representation of macaque AIP neurons in hand manipulation task revealed by information analysis, *Journal of Neurophysiology*, 104/6, 3625–3643, 2010.

平成 22-23 年度
公 募 班

能動的触覚の数理モデルの設計と神経活動-触運動間コミュニケーションの解明

研究代表：電気通信大学・教授 柳田達雄

概要

複数システムからのヘテロな情報を統合し、柔軟な情報創成を可能とさせる総体システムとして能動的触覚がある。そこでは、接触する事により生じる皮膚感覚に手指の位置、動き、運動方向の感覚が加わり、その総体として認知が成立している。また、手指の動か仕方(触運動)により、認知までの正確さや早さが変わるため、触運動の制御も重要な要因である。このような能動的触覚システムが自己組織的に形成される事が脳の柔軟な情報創成を可能としていると考えられる。しかしながら、そのようなシステムの設計原理は解明されていない。本研究課題は触運動、刺激受容体、運動制御回路からなるヘテロなシステムの情報を統合して実際に触対象を検知する数理モデルを設計し、情報統合とアルゴリズム創成の数理機構の解明を目指す。

Abstract

Active touch is haptic sensation normally entails an active exploration of object surfaces over time. The system consists of many heterogeneous parts, i.e., receptor, sensory and motor neurons, and it is consider that performance of perception by active sensing is better than passive sensing. It is, however, that the mechanisms of such better performance are not clear. To do this, we construct a mathematical model of active sensorimotor system, and design neuronal network to sense object by using the Markov chain Monte Carlo technique. We extract an algorithm of the sensorimotor system by analyzing the dynamics of neural fire on the designed networks.

1. 研究開始当初の背景

(1) 動的な情報創成としての触覚

触対象を認知するための情報を得るために、触手を能動的に動かすことが重要であると考えられている。認知のために触対象に応じた運動を内部(神経回路網)でいかに生成しているか、また学習した神経回路網の構造とロジック・触運動との関係性を解明することが重要な課題と考えられる。さらに、触受容器部・神経部・触運動からなるヘテロなシステムの情報統合の数理的機構の解明は多様なコミュニケーション様式の創成の基礎付けを与える。

(2) 能動的触覚の数理モデルのデザイン

能動的触運動を通して触対象の情報を得るためには、それまでに得られた情報からフィードバックにより触運動を制御することが必要であり、ニューラルネットの学習を通して触運動の制御する大規模な数理モデルの構築が必須となる。さらに、興奮性神経回路網の一般的な学習方法はないため、統計物理学・統計学などで用いられているマルコフ連鎖モンテカルロ法(パラレルテンパリング法)の神経回路網への方法論と解析手法の確立が重要と考えられる。

2. 研究の目的

(1) 機能力学系としての能動的触覚モデルのデザイン

能動的触覚の数理モデルを構成する設計手法の確立、およびモデルの解析からコミュニケーション

ンの解明が本研究課題の主目的である。マルコフ連鎖モンテカルロ法による大規模な能動的触覚モデルの学習が可能である事を示し、自律的な触運動により触対象の物理特性を検知しうる数理モデルの提示を目的とする。マルコフ連鎖モンテカルロ法により神経回路の結合網を学習させ、その構造と生成される発火ダイナミクス・触運動と検知アルゴリズムの関係を解明する。

(2) 能動的触覚の数理モデル

ニューラル・ネットワーク、ここでは興奮性セルオートマトンを内包し対象を能動的に検知する触覚モデル間の相互作用から創出されるコミュニケーションの構造を解明する。このモデルはマクロモデルでありながらも先に述べたようにニューラル・ネットワークを内包しているため、行動とニューロン発火の相関を解析する事が可能であるため、コミュニケーションと脳内モデルの関係性を詳細に調べる事が可能であり、ミクロなニューロン発火状態から記号化された行動が創出される数理構造の解明を主目的とする。

3. 研究の方法と成果

(1) 能動的触覚のモデリングとマルコフ連鎖モンテカルロ法による学習方法の確立

モデルは触受容器部、神経回路部、触運動生成部のシステムから構成される。触受容器は触運動によって生成された物理刺激を受容し神経回路網へ伝達する。神経回路網はその情報を処理し触運動制御の信号を創成し触対象を検知する。また、これらのシステムのフィードバックにより神経回路網が学習され、より検知精度のよいシステムとなる。モデリングの方針としては触受容器および神経回路網のニューロンとして興奮性 CA を用いた。触運動部は制御ニューロンの発火頻度に応じた力学的な力が生成されて、受容器部全体をニュートン力学に従い動かす大規模数理モデルを提示した。また、マルコフ連鎖モンテカルロ法による学習が可能であることを示し、その有効性を示した。

(2) 回路構造と触運動モードとの関係性

神経回路網をマルコフ連鎖モンテカルロ法により設計し、対象を検知する機能をもつ能動的触覚システムを構築して触対象検知する複数の触運動モードが生成されることを示した。また、比較的小規模な神経回路網と発火のダイナミクスを解析して触対象検知のアルゴリズム及びロジックとの対応を明らかにした。さらに、マルコフ連鎖モンテカルロ法による学習過程を詳細に解析することにより、検知するダイナミクスやアルゴリズムの形成過程を明らかにした。

参考文献

- [1] J. J. Gibson, Observations on active touch, Psychol. Rev. 69, 477-491 (1962)
- [2] Tatsuo Yanagita and Alexander S. Mikhailov, Design of easily synchronizable oscillator networks using Monte Carlo Optimization method, Physical Review E. 81, 056204-1054 (2010)
- [3] T. Konishi and T. Yanagita, Slow relaxation to equipartition in spring-chain systems, Journal of Statistical Mechanics, 9,P09001-P09010(2010)
- [4] Tatsuo Yanagita, Design and Dynamics of Active-touch Sensory Model, Advances in Cognitive Neurodynamics (III) (2012)
- [5] T. Yanagita and Alexander S. Mikhailov, Design of oscillator networks with enhanced synchronization tolerance against noise, Physical Review E, 85, 056206 (2012)

多様なダイナミクスを学び、理解し、生み出す学習理論

研究代表：九州工業大学大学院生命体工学研究科・教授 古川徹生

概要

本研究の目的は、複数の異なるダイナミクスにより生成された時系列データを学習することを通して、それらに共通するルールを発見・理解し、さらにそのルールを用いて新たな時系列を生み出す学習理論、すなわちマルチシステム学習のアルゴリズムと学習原理を見出すことである。本研究ではマルチシステム学習が連立テンソル方程式として記述できること、高階自己組織化マップ(高階 SOM)を組み合わせて使うことで解けることを示した。

Abstract

The purpose of this work is to establish the learning theory of multi-dynamical system learning (MDSL), which enables to learn a set of time-series data generated by a class of dynamical systems, and to obtain the general rule governing the systems, and to create new systems by applying the obtained general rule. We found that the task of MDSL is described by a pair of tensor equations, which can be solved by a pair of higher-rank of the self-organizing maps.

1. 研究開始当初の背景

(1) マルチダイナミクス学習の学習原理を求めて

本研究の背景には、脳を模倣したアルゴリズムを用いてロボットに多様な運動パターンを学習させ、環境とロボット、あるいは人間とロボットとのダイナミックなインタラクションの中で適切な行動発現を行う研究の発展がある。谷らは1個のリカレントネットを使って多数のダイナミクスを学習し、ロボットの行動生成や見まね行動、行動の引き込みなどを実現した[1]。一方、SONY のインテリジェンス=ダイナミクスグループは、モジュラーネットと自己組織化マップ (Self-Organizing Map: SOM) を融合してヒューマノイドのシエマ獲得の研究を行った[2]。また Wolpert らのモジュラーネット (MOSAIC) によるマルチダイナミクス学習はこれらの先鞭をつけた研究である[3]。一方で古典的ニューラルネットを用いたこれらの手法には限界があり、うまく学習するかどうかは学習課題の持つ構造に依存することもわかってきた [4]。そこで本研究では、マルチダイナミクス学習の学習原理を明確にし、より普遍的な理論体系とアルゴリズムを得ることをめざした。

(2) 多様体やテンソルを用いた学習原理の解明

こうしたニューラルネットによる脳型知能の研究が進むのと並行して、ニューラルネットの学習原理は情報幾何や確率論的機械学習の観点から理論的に解き明かされるようになってきた。したがってロボットをニューラルネットワークで動かして見せるだけでなく、理論的な観点から脳型の学習原理を解き明かすことが可能になってきた。また Furukawa は SOM を多様体学習による潜在変数推定アルゴリズムとして位置づけ、SOM を階層化した高階 SOM を提案した[5]。高階 SOM では階層性を持つデータ構造をテンソルにより表現した。これらをふまえて階層的な学習原理を理論化することが本研究のもうひとつの背景である。

2. 研究の目的

(1) マルチシステム学習の理論化

本研究ではマルチシステムを学ぶこととはどういうことかを明らかにすることを第一の目的とした。すなわち同じクラスに属する複数のシステムから生成されたデータ集合を学ぶこと(学び)を通して、それらシステム間に共通する普遍的なルールや法則を発見し(理解し)、さらに発見したルールに従う未知のシステムを生成する(生み出す)学習原理の理論化とアルゴリズムの発見である。単に学習できるアルゴリズムを発見的に作るだけでなく、アルゴリズムを支える普遍的な原理を発見し、理論的に記述することをめざした。これはメタ学習、知識の転移、法則の発見などにつながる基礎研究となる。

(2) 潜在変数と非線形写像の同時推定問題の理論基盤

マルチシステム学習は階層的な学習を行う必要があるが、各階層を構成するサブアルゴリズムもまた明快な理論と原理に基づく必要がある。本研究では各階層を連続潜在変数と非線形写像の同時推定問題として記述する。その代表的アルゴリズムがSOMである。そこでSOMの学習原理を明らかにすることを通して、マルチシステム学習の数学的原理とアルゴリズムを明らかにし、さらに脳・神経系での実装の3点をつなげることをめざす。これが本研究の第二の目的である。

3. 研究の方法と成果

(1) マルチシステム学習の理論化

第一に行うことは、マルチシステム学習とはそもそも何を学習し、何を推定するタスクなのかを明確にすることである。マルチシステム学習の抱える非自明な難しさは、それがヘテロドメインな写像集合を扱わなければならないという点にある。一般にホモドメインな写像集合に対しては距離の定義された関数空間を定義できるため、システムの学習とはその関数空間内における位置推定に他ならない。そしてマルチシステム学習は関数空間内の非線形多様体を推定するタスクとして定義できる。しかしながら現実の多くの課題(たとえばロボットの運動生成等)ではヘテロドメインな写像集合となるため、システムの集合が属する空間を容易に定義できないのである。そこで本研究では隠れマルコフモデルと同様に潜在状態空間を考え、潜在空間におけるホモドメインな写像集合として扱いつつ、かつ個々に異なる観測変換を受けることでヘテロドメインなシステム集合として観測されるとした。

本研究では以下のように問題設定の定式化を行った。時刻 t における潜在状態変数 z_t として、パラメータ ω で表されるシステムのダイナミクスが $z_{t+1}=f(z_t, \omega)+\varepsilon_t$ と表されるとし、また観測時系列 x_t はパラメータ θ で表される観測変換 $x_t = g(z_t, \theta) + \delta_t$ によって得られるとする(ε, δ はノイズ)。そして基底関数 $\psi_\alpha(\omega), \varphi(z)$ を適当に定めることで以下のテンソル方程式が得られる。

$$\begin{cases} z_{t+1} = W \times_1 \psi_\Omega(\omega) \times_2 \varphi(z_t) \\ x_t = V \times_1 \psi_\Theta(\theta) \times_2 \varphi(z_t) \end{cases}$$

この方程式を解くには、(1) 観測データ系列 x_t から V, θ, z_t の三重推定問題を解き、(2) z_t から W, ω の二重推定問題を解く必要がある。また(1)は z に関するラベル情報が欠損した状況下でのテンソル解析に相当するため、通常のテンソル分解法を利用することができない。マルチシステム学習とはこのような五重推定問題であることを示すことができた[6]。

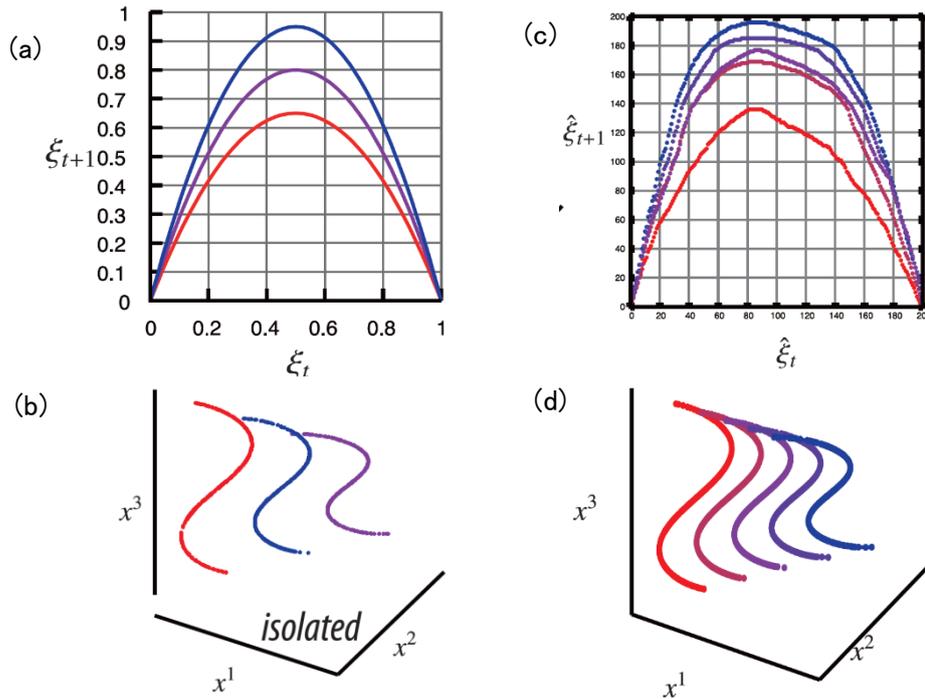


Fig.1 (a) データ生成に用いた潜在システム集合 (b) 観測データ (c) 観測データから推定・補間した潜在システム集合 (d) 補間により生成した観測データの予測分布

この方程式の解法として高階 SOM (SOM²) を 2 つ組み合わせ、各々 (1) および (2) の推定を実行させた。高階 SOM は下位の学習装置が獲得したモデル自体を上位の学習装置の学習データとするアルゴリズムであり、単なるカスケード的な情報処理とは異なる。人工的に生成した時系列データから高階 SOM を用いてシステムの推定および補間を行った結果を Fig.1 に示す[6,7]。

これらの研究を通して以下のことが結論付けられた。(1) ホモドメインのマルチシステム学習であれば、モジュラーネット等のニューラルネットで解くことができる。(2) ヘテロドメインのマルチシステム学習においては高階 SOM 型の階層情報処理が必要であり、それは下位学習装置の学習結果を抽象化(ベクトル化)して上位学習装置に与える必要がある。

(2) 位相保存写像の一般化学習理論

高階 SOM によるマルチシステム学習の理論体系を構築するには、その構成要素となる SOM の学習理論を作る必要がある。ベイズ的アプローチで SOM を理論化したものとして Generative Topographic Mapping (GTM) があるものの[9], SOM と比べて学習の安定度も悪く、またアルゴリズム導出上の仮定も多いため、本研究の目的としては不十分である。そこで SOM および GTM を代表例とする位相保存写像の学習理論の一般化を行った。

一般化理論のキーアイデアは「何が位相を保存させるか」という点である。本研究では現象の本質を支配する潜在変数にノイズが加わることで、潜在空間の位相に関する情報が観測データに伝えられるとした。この考えに立つことで、従来位相を保存させるために恣意的に導入していたアルゴリズムを一元的に理解できることが示された[10]。

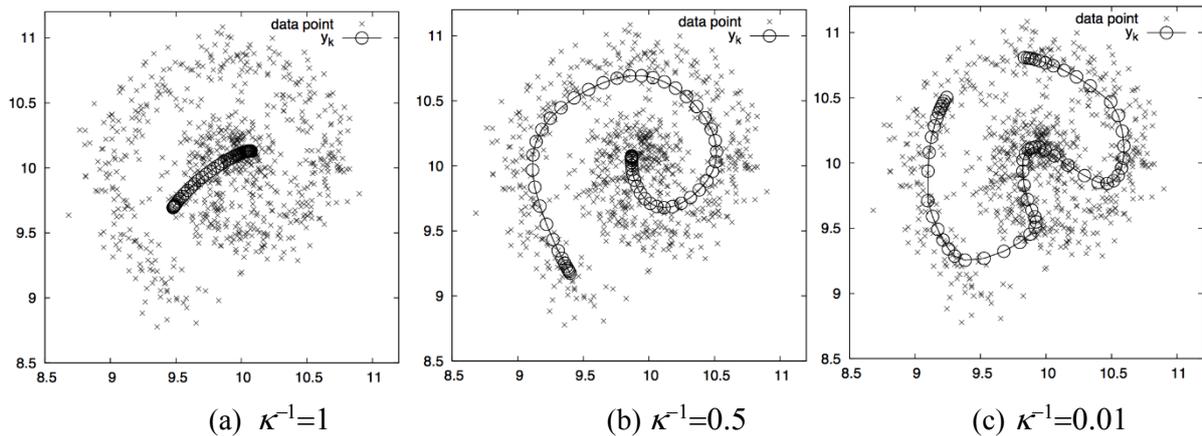


Fig.2 一般化した位相保存写像学習における競合因子 κ の効果. (1) 競合小: GTM に相当 (2) 競合中: 提案理論に基づき導出したアルゴリズム (3) 競合大: SOM に相当. 最適な学習アルゴリズムを理論的に導出できる.

さらに本研究をでは、ベイズ的にアルゴリズム導出した GTM よりもニューラルネットの SOM の方が安定した学習結果を示す原因を調べた. その結果, 位相保存写像学習の非正則性が学習プロセスに影響していることがわかった. その違いは 1 個の競合パラメータ κ で表現できることがわかり, GTM も SOM も一元的に理論化できること, また最適な競合パラメータ κ の値は両者の中間にあることが示された (Fig.2) [11].

今後はマルチシステム学習の理論と位相保存写像の一般化学習理論を融合し, 高次の知識獲得の学習原理を確立することが目標となる.

参考文献

- [1] J. Tani, et al., Neural Networks, Vol.17, 2004.
- [2] 藤田雅博, 下村秀樹(編), 「発達する知能」, シュプリンガー・ジャパン, 2008.
- [3] D. Wolpert, M. Kawato, Neural Networks, Vol.11, 1998.
- [4] T. Ohkubo et al, IEICE Trans. Inf. & Syst., Vol.E92-D, 2009.
- [5] T. Furukawa, Neural Networks, Vol.22, 2009.
- [6] T. Ohkubo, T. Furukawa, LNCS, Vol.6731, 2011.
- [7] S. Matsushita, et al, Proc. ICCN2011, 2011.
- [8] T. Furukawa, et al, Proc. SCIS-ISIS2012, 2012.
- [9] C.M. Bishop, et al, Neural Computation, Vol.10, 1998.
- [10] 古川徹生, IEICE Technical Report, NC Vol.111, No.241, 2011.
- [11] 古川徹生, IEICE Technical Report, IBIS Vol.11, No.279, 2012.

フリッカ誘導脳波の解析による記憶の脳同期回路メカニズムの解明

研究代表： 公立ほこだて未来大学・准教授 佐藤直行

概要

うまく記憶ができているときには 4~8Hz の脳波が強まることが知られているが、その詳細な神経メカニズムは明らかでない。本研究では、記憶課題中に記憶関連周波数の視覚性点滅刺激(フリッカ)を与え、誘導脳波の伝播の解析することで、記憶に関わる脳同期回路を検討した。結果として、大域的な脳部位において、記憶依存性のフリッカ過渡応答脳波が存在することが明らかになった。これは記憶課題中に記憶関連部位が振動応答特性を変調していることを示唆する。

Abstract

Electroencephalogram (EEG) oscillation in theta band (4-8 Hz) is known to increase during memory encoding in relationship to subsequent successful recall. In this study, the memory related neural network was evaluated by using a short duration-photic flicker at theta frequency that probes memory-related EEG networks over cortical regions. Results showed that a memory-related transient component exists in the flicker-induced EEG over scalp surface. Additionally computational simulations showed that the oscillatory property in each region changes during successful memory encoding and it may induce self-organization of memory-related network over cortical regions.

1. 研究開始当初の背景

頭皮脳波研究では、うまく記憶ができるとき(後にきちんと思い出せる)、4~8Hz(シータ帯)の脳波が強くなることがわかっている。代表者らの脳波一機能的脳画像同時計測によれば、このような記憶関連のシータ波は、脳の複数の部位と関連があると考えられる[1]。しかし、脳波は 10^5 ヶものニューロンの集団電位であるうえ、記憶課題とは無関係な自発脳波が重畳されるため、脳波シータが記憶貯蔵の原因なのか、また別の要因による副次的産物なのかは明瞭ではない。これは頭皮脳波計測が抱える根本的な問題である。

脳波現象の中でも最も明瞭に得られる現象のひとつに、視覚性点滅刺激(フリッカ刺激)による誘導脳波現象がある。これは、ある周波数で光刺激を点滅すると、それに同期した同じ周波数帯の脳波パワが増大する現象で、自発脳波よりも強い強度で生じ得る。発生機序も明瞭で、輝度変化に依存した皮質内の神経発火がその発生源である。このため、フリッカ刺激は視覚入力がどのように伝搬・処理されるかを調べる目的で用いられてきた[2]。

本研究では、フリッカ誘導脳波を用いて、記憶関連の神経回路を調べる新しい実験手法を検討する。すなわち、フリッカ刺激により記憶関連周波数の脳波を誘導し、視覚野以外の脳波の引き込み特性を調べることで、記憶に関する周波数特異的なグローバルな脳の同期回路の同定を行うことを試みる。もし特定周波数の記憶関連の同期回路が脳内に存在するならば、その同期回路がフリッカ誘導脳波と引き込むことは非線形振動子の引き込みの数理から明らかであり、本研究ではこれを実験的に応用する。

2. 研究の目的

記憶に関する脳波の同期回路を抽出することを目的とした。記録中はシータ波の脳波が増大することが知られるが、これに関する同期回路のダイナミックな特性をフリッカ誘導脳波により実験的に明らかにする。加えて、実験で得た脳波の引き込み特性の変化から、脳波を数理的に理解するモデルを構築し、脳波の機能的意義を明確にすることを試みる。本研究は脳波を用いた新しい計測手法を提案するもので、これにより記憶支援システムなどの工学的な実現への展望も想定された。

3. 研究の方法と成果

本研究は、フリッカ誘導脳波を用いた記憶の同期回路の検出手法の確立のため、脳波計測実験と数理モデルによる検討を行った。成果として、国際雑誌論文1報、国内雑誌論文1報、国際会議論文1報がある。以下、その主要な結果の概要を示す。

(1) フリッカ誘導脳波のモデルによる検討(文献[3, 4])

フリッカ刺激に対する脳波の過渡応答が、脳波のどのような内因的特性と対応しうるのかを、数理モデルを用いて検討した。まず、誘導脳波の時系列がフリッカ入力に完全に従う場合(図1上)、脳波の周波数パワはフリッカの開始・停止に素早く応答する。一方、被験者実験で得られる誘導脳波は1~2秒の時間幅で滑らかな増強を示し、これと異なる。また、複数の自励振動要素がフリッカとの引き込みで位相が揃い振幅増大すると考えた場合(図1中)、誘導脳波はフリッカ開始にあわせて滑らかに増大するが、実験データとは異なり、フリッカ停止時にも滑らかな減少を示す。これら2つの混合メカニズムとして、神経振動子がフリッカ入力に応じて活性化、かつフリッカに引き込むモデルを考えた場合(図1下)、実験データと似た時間発展が得られた。実際の誘導脳波では、以上3つのメカニズムの成分が混合して生じると考えられるが、単一のモデルとして誘導脳波の引き込みの時間特性をもっともよく表すのは最後のモデルであり、以下のシミュレーションではこれを用いた。

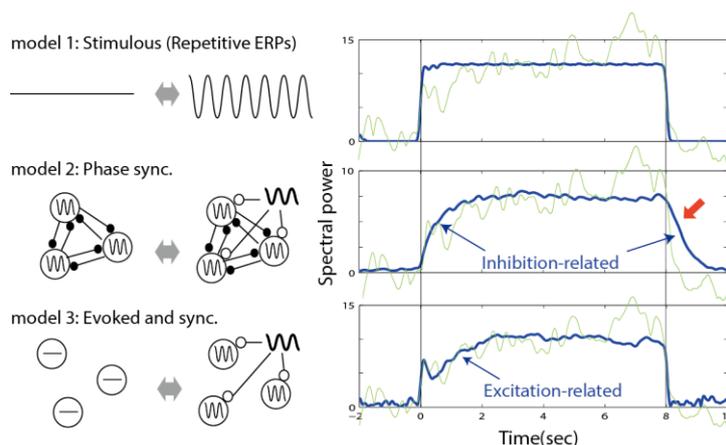


図1 フリッカ誘導脳波パワの時間発展の神経回路モデル。青はモデルの時間発展、緑は被験者実験データの時間発展を示す。(上図)フリッカ刺激従属モデル。(中図)位相同期モデル。(下図)興奮性+位相同期モデル。もっとも実験データに似た時間発展を示す。

視覚野から海馬までの投射構造をもとに 34 ヶの領野からなるネットワークを構成し、視覚野に生じるフリッカ誘導脳波と海馬を中心とした同期回路がどのように相互作用しうるのであるかを検討した。図 2 左にフリッカ入力を V1 野に与えたときの領野ネットワーク内のフリッカ誘導脳波の伝播の結果を示す。V1 野の誘導脳波が大きく、それに続く領野にもそれが伝播するが、その強度は急速に小さくなった。次に、海馬近傍部位の内嗅野(ER)のフリッカ入力刺激として与えた場合(図2中)(内因的なシータ波の増大を模擬)、誘導脳波は主に側頭葉内側部の領野(36 野, TF 野, TH 野など)に伝播し、視覚野への伝播はほとんどなかった。最後に、海馬を中心とした同期回路と視覚野のフリッカ誘導脳波の相互作用を調べるため、内嗅野と V1 野に同時にフリッカ入力を与えた(図2右)。結果では、V1 と海馬の中間部位(7a 野, 46 野, STPa 野など)において誘導脳波のパワは、個別にフリッカを与えた場合に比べて 50%以上もの増大が観測された。このような効果は、海馬と経路距離の近い 46 野の活動を頭皮上の F3 や F4 電極の脳波信号から検証できる可能性があると予測された。

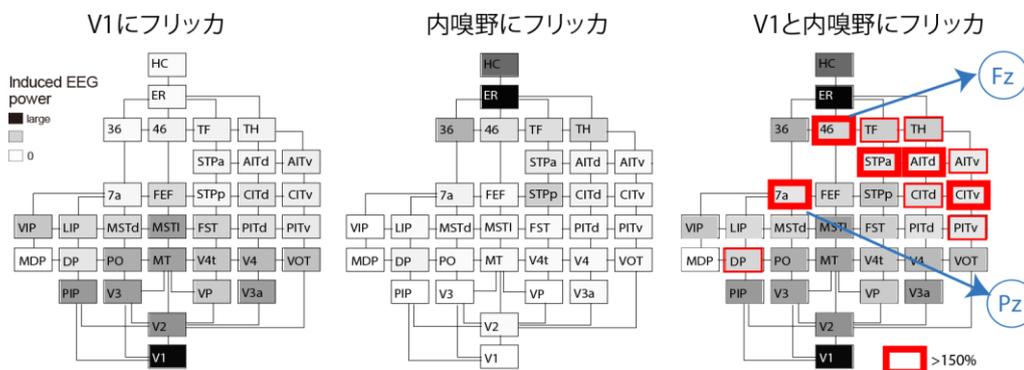


図 2 視覚野回路におけるフリッカ誘導脳波伝搬のシミュレーション結果。(左図)V1 にフリッカ入力を与えた場合。(中図)内嗅野(ER)にフリッカ入力を与えた場合(自発的なリズム増大を模擬)。(右図)V1 と内嗅野にフリッカ入力を与えた場合。他条件と比べて誘導脳波が大きい領野を太枠で示した。

(2) フリッカ誘導脳波を用いた記憶の同期回路の検出

記憶関連脳波周波数のフリッカ刺激への過渡応答を調べることで、記憶関連の脳波同期回路を検出することを試みた。脳波実験参加者はバーチャル空間内の複数の物体の位置を記憶し、直後に再認課題を行った。記録中の刺激は 7.1Hz で点滅する場合としない場合の 2とおりを計測した。結果として、点滅ありと無し条件の間では記憶成績に有意な差は見いだせなかった。これはフリッカ刺激が記憶処理そのものに影響を与えないことを意味する。フリッカ無し条件でうまく記憶できた場合とできない場合の脳波パワの差を比較すると、うまく記憶ができた場合に前頭部の 7.1-8.5Hz の脳波パワが増大することがわかった。これは従来の知見と合致する。フリッカ刺激に対する脳波の時間発展を調べると、うまく記憶ができた場合にはフリッカ停止後の脳波パワが有意に小さくなることがわかった(図3左上)。残念ながら、先のモデル予見された前頭部・頭頂部のパワの有意な増大は見出せなかった。また、うまく記憶ができた場合には、フリッカ停止後に脳波の位相が速やかにばらつくことがわかった(図3左下)。

さらに、このような記憶依存の過渡応答の変化がどのようなメカニズムで生じ得るかを数理モデルにより検討した。ここで、最も単純な現象の記述として、ある脳部位における脳波時系列を 2階微分

方程式を用いて表した。うまく記憶ができる場合にのみ持続的なリズムが内因的に存在したと仮定すると(図3右“外部振動入力”モデル), 実験結果と類似した結果は得られなかった。一方, うまく記憶ができた場合に脳波発生部位の時定数が小さくなったと仮定すると(“応答特性変調”モデル), 実験結果に類似して, フリッカ入力停止後の過渡応答が生じ得ることが明らかになった。この変調のメカニズムの詳細は明らかではないが, 前節のモデルとの対応によれば, 抑制入力の増大が時定数減少と対応することがわかっている。

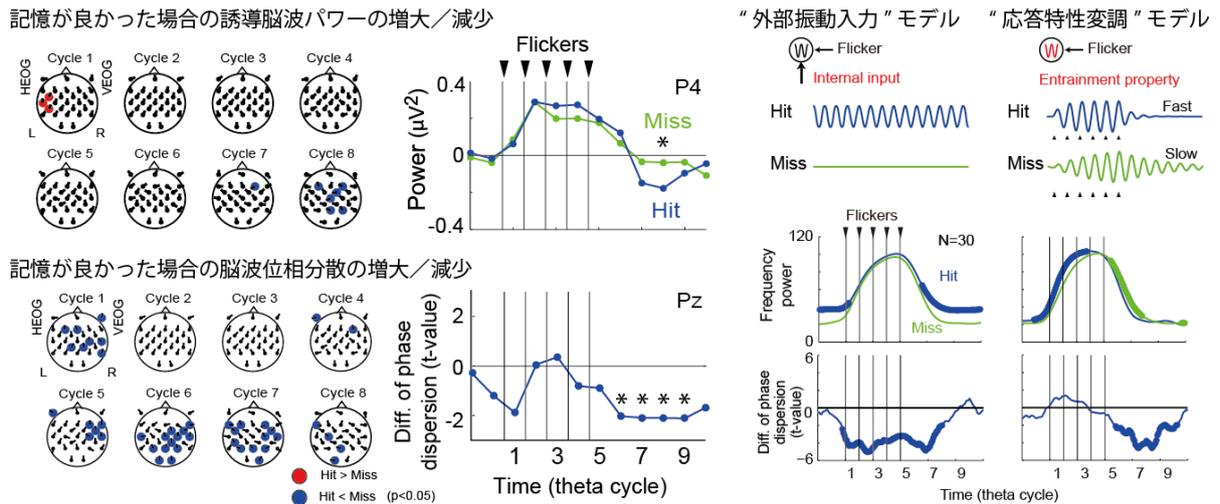


図3 記憶依存のフリッカ誘導脳波と説明モデル。(右上)記憶が良かった場合の記録中のフリッカ誘導脳波パワーの増大と減少。(右下)記憶が良かった場合の記録中のフリッカ誘導脳波の位相分散の減少。(左)“外部振動入力”モデルと“応答特性変調”モデル。後者のモデルがよりよく実験結果を説明できる。

参考文献

- [1] Sato, N., Ozaki, T. J., Someya, Y., Anami, K., Ogawa, S., Mizuhara, H., & Yamaguchi, Y. (2010). Subsequent memory-dependent EEG theta correlates to parahippocampal blood oxygenation level-dependent response. *NeuroReport*, 21, 168-172.
- [2] Muller, M. M., Teder-Salejarvi, W., & Hillyard, S. A. (1998). The time course of cortical facilitation during cued shifts of spatial attention. *Nature Neuroscience*, 1, 631-634.
- [3] 佐藤直行, 脳波の大域回路モデルによる脳分散システムの理解, 脳波の大域回路モデルによる脳分散システムの理解. *日本神経回路学会誌*, 18(3), 119-128, 2011.
- [4] Sato, N. (2013) Modulation of cortico-hippocampal EEG synchronization with visual flicker: A theoretical study. (ed) T. Omori, et al. *Advances in Cognitive Neurodynamics (III)*, Springer.
- [5] Sato, N. (2013) Fast entrainment of human electroencephalogram to a theta-band photic flicker during successful memory encoding. *Front Hum Neurosci.*, doi: 10.3389/fnhum.2013.00208.

霊長類前頭前野におけるマルチシステムとしての情報処理機構

研究代表：東北大学大学院医学研究科生体システム生理学分野・助教 嶋啓節

概要

我々はニホンザルに主課題と割込課題からなる二重課題を訓練し、課題遂行中のサルの前頭前野(PFC)・背側運動前野(PMd)から神経細胞活動を記録した。その結果、PFCからは割込課題に選択的な細胞活動、PFC、PMd両方の領域から主課題と割込課題の関係性を表現した細胞活動を見出した。これらの結果は領域特異的な割込み処理機構の存在を示唆する。

Abstract

We trained Japanese monkeys to perform a dual-task consisting of a main-task and an interrupting task. We analyzed neuronal activity recorded in the prefrontal cortex (PFC) and dorsal premotor cortex (PMd) during performance of the dual-task. We found a group of PFC neurons whose activity was selective for the interrupting task. We also identified neuronal activity that represented the relationship between the main-task and the interrupting-task in both cortical areas. These results suggest area-specific neuronal mechanisms to cope with task-interruption.

1. 研究開始当初の背景

(1) 前頭前野から運動前野にかけて存在する複数の脳領域の階層的モデル

中央遂行機能を司る前頭前野は、細胞構築を異にする多数の領域の複合体である。しかし、個々の領域の細胞活動の特徴、役割、さらに異なる領域間の機能連関については殆ど解明されていなかった。最近 Koechlin ら[1]は、複数課題を並列的に処理しなければならない状況を実験的に作成し、前頭前野から運動前野にかけて存在する複数の領域を、階層的に順序付けられた実行システムとして捉える興味深い仮説を提唱した。Koechlin らの階層性モデルには検証すべき点が多々あるが、複数課題の並列処理を課することは、前頭前野・運動前野を構成する各領域の特徴を抽出し、これらの領域の機能連関を考察する上で優れた実験デザインであると考えられる。はたして前頭前野・運動前野は、複数課題の並列処理にどのように関与しているのだろうか。

(2) 複数課題の並列処理

我々は実生活において、複数課題を並列的に処理しなければならない場面にしばしば直面する。その処理においては、同時進行的に複数課題を解決するのではなく、現在進行中の課題(‘主課題’とする)を一旦棚上げし、割込んできた課題を主課題と独立に処理、しかる後に主課題に復帰するという戦略をとることが殆どである。この過程では、主課題から適切に割込課題に分岐し、割込課題中も主課題に関する情報を保持し、割込課題後に主課題を正しく行えることが決定的に重要である。

2. 研究の目的

上記の背景から、前頭前野・運動前野では、主課題を制御するシステムと、割込課題を制御するシステムが形成され、これらのシステムが互いに影響しあいながらも行動を正しく制御している可能

性が考えられる。本研究の目的は、動物が複数課題の並列処理を行っているときの前頭前野・運動前野の活動を電気生理学的手法で計測し、各領野の機能特殊性と、複数のシステムが統合的に働くための動作原理を解明することであった。

3. 研究の方法と成果

(1) 被験動物と行動課題

実験にはニホンザル 2 頭を用いた。課題はブロック単位で進行し、1 ブロックは主課題 5 試行、割込み課題 1 試行で構成した(図 1)。ブロック最初の 2 試行[主課題(視覚誘導)]では、図 2 に示した 4 種の動作(右/左腕の回内/回外)のうちいずれか 1 つを視覚指示信号(cue)で逐一指示し、1 試行あたり 2 つの動作を行わせた。次の 2 試行[主課題(割込前)]では、直前に行った 2 つの動作を記憶に基づき正しい順序で行わせた。次の試行[割込課題]では、主課題と独立して視覚刺激を与え、それに従って動作を行わせた。その後の 1 試行[主課題(割込後)]では、割込み前の主課題で行っていた 2 つの動作を記憶に基づいて再現することを求めた。このような一連の試行からなるブロック(図 3)を、主課題・割込み課題で行う動作の組み合わせを換えながら繰り返した(割込部分を除く課題の詳細は[2]を参照のこと)。

図 1 1 課題ブロックの流れ

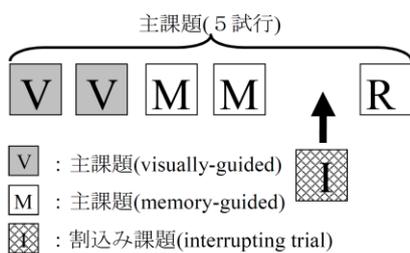
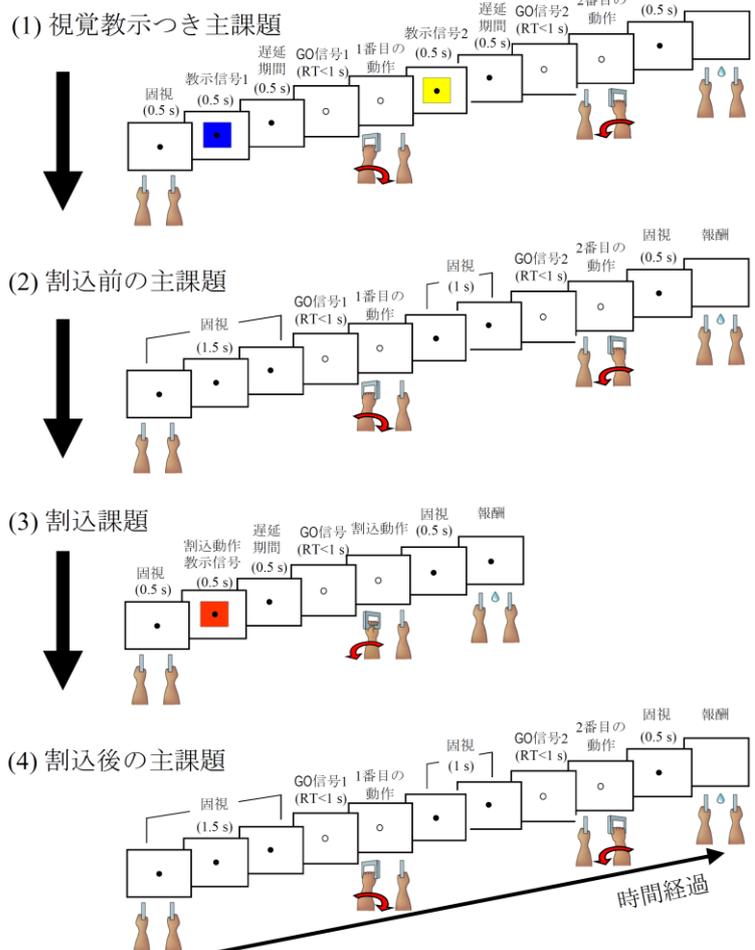


図 2 Cueと動作の関係

Cue	動作	arm	action
赤 ■		左腕	回外
青 ■		左腕	回内
黄 ■		右腕	回内
緑 ■		右腕	回外

図 3 課題ブロックの見本

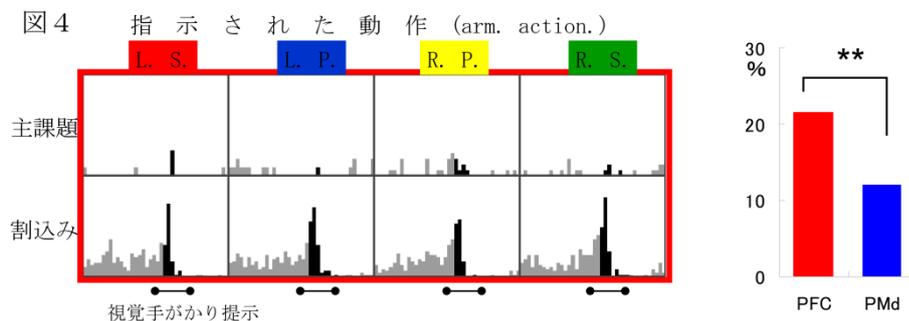


(2) 細胞活動の解析方法

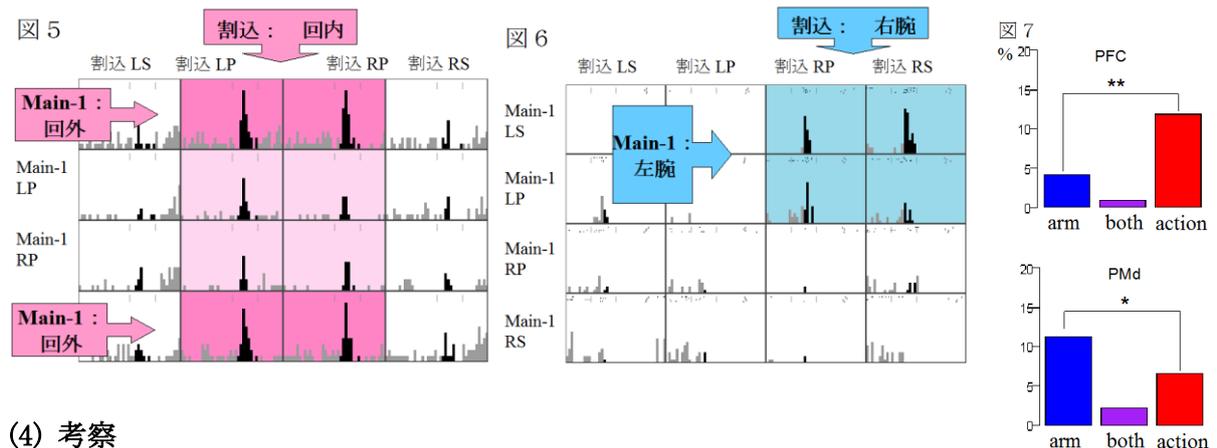
主課題及び割込課題を行っているときの活動を, (a)課題の種類(trial type), (b)左右いずれの腕で動作を行うか (arm), (c)動作が回内か回外か(action), に着目して多重回帰分析した. また, 割込課題中の活動を, (d)割込課題で行う動作の arm, action, (e)直前の主課題の1番目の動作(main-1)の arm, action, (f)割込課題とmain-1で用いるarmの一致不一致(図3), (g)割込課題とmain-1で行うactionの一致不一致, に着目して多重回帰分析した.

(3) 研究成果

2頭のサルは, 割込後の主課題を80%以上の正答率で行うことができた. PFCでは, 図4に示したごとく trial type のみに選択的で, arm や action 選択的でない細胞(例・図4左)の割合が PMd より有意に多かった(図4右)[3,4].



また, PFCでは, 割込課題の cue 提示期間に, 主課題1番目の action と割込課題で用いる action の一致・不一致を検出する細胞(例・図5)の割合が多かった(図7左). PMdでは, main-1で用いた arm と割込課題で用いる arm の一致・不一致に選択的な細胞(例・図6)の割合が多かった(図7右). すなわち, 主課題と割込課題との関係性が, PFCでは主として action に基づき, PMdでは arm に基づいて表現されていた[3,4].

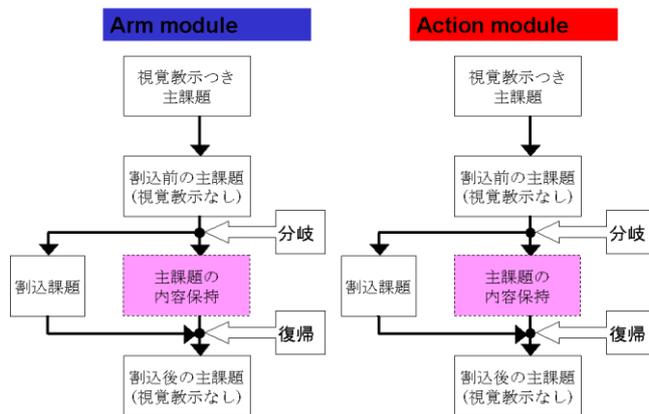


(4) 考察

サルの非常に高い正答率(80%以上, 全くランダムに順序動作を行った時の chance level の正答率が 6.75%であることを考慮すると遥かに高い)は, サルの脳が, 二重課題を遂行するのに必要な, 「主課題から適切に割込課題に分岐, 割込課題中も主課題に関する情報を保持し, 主課題に正しく復帰」という行動制御を的確に行っていることを示す.

今回観察された細胞活動は, このような行動制御をする上でどのように役に立っているのだろうか.

図8 割込み課題処理に関与する2つのモジュール



主課題と割込課題では、前者は順序動作を記憶して繰り返し行い、後者は視覚刺激に応じた動作を即時に行うのみで記憶をしないという意味で、行動の文脈が異なる。従って、主課題と割込課題それぞれを遂行するにあたって動員されるシステムは異なると考えられる。PFCのtrial type 選択的な活動(図4)は、主課題を制御するシステムの活動を一時的に抑制し、割込課題を行うためのシステムに制御を渡す役割を果たしている

考えられる。このような trial type 選択的な細胞の割合はPFCの方がPMdよりも高く、PFCが具体的な運動の制御を超え、課題の文脈により依存した、抽象的なレベルでの行動制御を行うことを示唆している。割込課題のcue提示中に、main-1と割込課題のarmの一致・不一致、actionの一致・不一致に関連した活動を見出したことは、図8の如く、主課題から割込課題へ分岐する際の行動制御が、arm及びactionという動作の属性に基づいた別々のモジュールで行われることを示唆している。このような活動は、割込課題の最中であっても、主課題で行う順序動作の一部を割込課題で行う動作との関係性に基づいて表現し、主課題の内容を間接的な形で保持しているとも考えられる。

まとめると、二重課題の遂行において、PFCはPMdに比べ、主課題から割込課題への切り替えという、抽象的なレベルの行動制御により深く関与する。課題の切り替えに伴う動作そのものの制御に関しては、PFCとPMdはオーバーラップを示しつつも、PFCはactionの制御により強く関与し、PMdはarmの制御により強く関与すると言える。本研究課題は二重課題を用いてPFCとPMdの機能的差異の一端を明らかにした。今後の課題は、割込課題中に持続して主課題の内容を保持することを可能にする神経機構を探索すること、及び、割込課題から主課題への復帰過程を特徴づける神経活動を解析し、脳領域別に比較し、前頭葉の各領域間の機能分担についての理解を更に深めることである。

参考文献

- [1] Koechlin E, Summerfield C. (2007) An information theoretical approach to prefrontal executive function. Trends Cogn Sci. 11:229-35.
- [2] Nakajima T, Hosaka R, Tsuda I, Tanji J, Mushiake H. (2013) Two-dimensional representation of action and arm-use sequences in the pre-supplementary and supplementary motor areas, J Neurosci. 33(39): 15533-15544
- [3] 中島敏, 嶋啓節, 宮崎淳, 虫明元, 順序動作課題と割込課題からなる二重課題を制御する神経機構, 日本神経回路学会誌, Vol.18, 2011, pp. 129-134
- [4] Miyazaki A, Nakajima T, Shima K, Mushiake H. (2013) Neuronal activity in the prefrontal cortex during performance of a dual task consisting of a main- and an interrupting-task. in Advances in Cognitive Neurodynamics (III): Proceedings of the Third International Conference on Cognitive Neurodynamics - 2011, pp. 795-802, eds. Y. Yamaguchi

行動指令の動的生成機構としての前頭葉興奮性・抑制性神経細胞の機能分化と相互作用

研究代表：東北大学電気通信研究所・助教 坂本一寛

概要

行動の柔軟性は、背後にある脳・神経回路の動的柔軟さに起因する。我々は、以前の研究で経路探索課題遂行中のサル前頭前野には発火頻度で符号化している状態が動的に遷移する神経細胞が存在することを示した。本研究では、これらを興奮性細胞と抑制性細胞とに分類しそれらの性質と相互作用を検討した。また、神経回路の柔軟な分岐の前兆としての発火ゆらぎの上昇を発見した。更に、自らの性質を動的に変化させる神経回路モデルを構築した。

Abstract

Flexibility with regard to behavior is attributable to the flexibility of underlying neural circuits in the brain. In our previous studies, we had found a neuron type that shows shifts in representation by firing rate in the lateral prefrontal cortex (LPFC) of monkeys performing a path-planning task. Here we classified these neurons into putative pyramidal neurons and interneurons and examined their functional properties and interactions. We also identified increases in the firing variability of these neurons as an emergent property of bifurcations of the underlying networks. Based on these results, we proposed a dynamically reorganizable attractor network model.

1. 研究開始当初の背景

日常環境は、思いがけない出来事の連続である。このような環境下で、目的を達成するための行動計画を立てるには、それを担う神経基盤にも動的な柔軟さが必要とされる。一方、従来の神経生理学では、“神経細胞は発火頻度で情報を符号化しており、符号化された情報は不変である”という暗黙の前提がいまだ存在している観がある。しかしながら、この暗黙前提を打破し、その背後にある柔軟で動的な脳・神経系のあり方を示さなければ、変化の大きい環境に適応する脳・神経機構の解明は進まない。

大脳皮質の前頭前野では様々な知覚情報が統合されるが、一方で、高次運動野へ豊富な出力を送る。この解剖構造と対応するように、ヒト前頭前野損傷患者では、行動計画の策定等、知覚情報に基づく一連の行動の組織化能力が損なわれていることが知られている[1]。

研究代表・坂本は、経路探索課題(図1)と呼ばれる課題遂行中のサル大脳皮質前頭前野の神経細胞活動の記録・解析に取り組んできた。解析の結果、ある細胞群では行動計画

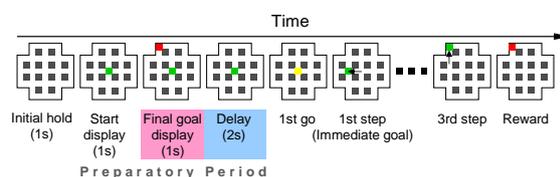


図 1. 経路探索課題. サルは眼前画面の格子状経路内でカーソルを動かし、それが Final Goal に到達すると報酬が与えられる。行動計画期間中、まず Final Goal が提示され、その後の遅延期間 (Delay) では 1 秒後に経路の一部がブロックされることがある。この後、Go signal が与えられ、1 回の Go signal で格子の 1 辺だけカーソルを進めることができる。

期間に発火頻度で符号化された情報が最終目標 (Final Goal, カーソルの最終到達位置) (図2A-C) から具体的な行動目標 (Immediate Goal, 1手目にどちらに動かすか) へと遷移すること等を示した[2]. これらの結果は, 前頭前野の一部の細胞では, ある情報を発火頻度で符号化している状態が動的に遷移することを示唆している. しかしながら, その背景となる神経機構, 特に, 興奮性細胞と抑制性細胞とからなる神経回路がどのような動的特性を示すかについては, 明らかとなっていない.

2. 研究の目的

そこで本研究では, 経路探索課題遂行中のサル大脳皮質前頭前野の神経細胞活動を興奮性細胞と抑制性細胞とに分類し, それらの性質と相互作用を解析した[3-5]. 更に, 発火ゆらぎに着目し, 発火ゆらぎが, その背後の神経回路の柔軟で動的な分岐の前兆とみなせるかどうかを詳細に検討した[6-8]. また, これらの結果をもとに, 自らの性質を柔軟かつ動的に変化させる神経回路モデルを構築した[9,10].

3. 研究の方法と成果

(1) 興奮性細胞と抑制性細胞の機能分化と相互作用

経路探索課題遂行中のニホンザルの外側前頭前野(2頭2半球)より微小電極を用い単一細胞活動を記録した. 各細胞の発火頻度のゴール選択性 (Final Goal 選択性, Immediate Goal 選択性) を, 回帰分析を用いて 100ms 刻みで評価した. 活動を記録した 887 個の神経細胞のうち 148 個が, 行動計画期間中, Final Goal 選択性から Immediate Goal 選択性へと状態を変化させた. スパイク発火の波形で区別された興奮性細胞と抑制性細胞は, それぞれ 110 個, 38 個得られた.

興奮性細胞は持続的に FinalGoal 選択性を示した後, Immediate Goal 選択性へと突如遷移するが(図3A), 抑制性細胞では FinalGoal 選択性が一旦低下した後, Immediate Goal 選択性へと遷移することが見て取れた(図3B). 興奮性細胞は他の領野へと長距離投射する一方, 抑制性細胞は主に近隣の細胞に投射する. 従って, 興奮性細胞は他の領野の細胞

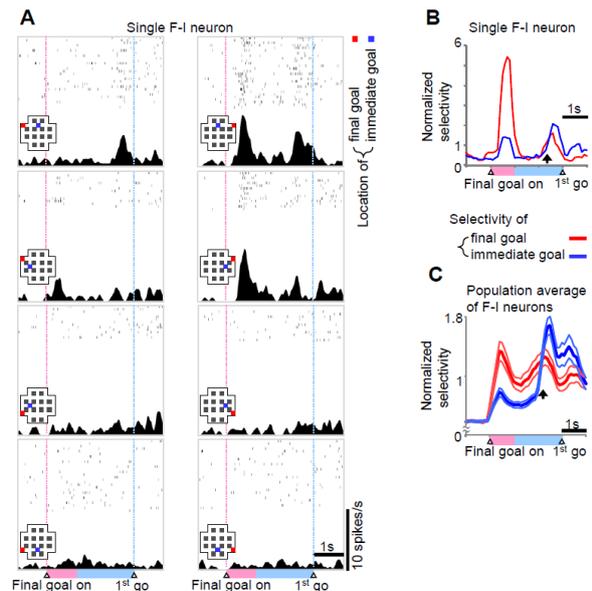


図2 発火頻度により符号化する情報が Final Goal から Immediate Goal へと変化する細胞群. A. 代表的な細胞活動例. Final Goal 位置と Immediate Goal 位置ごとに活動を示した. B. A の細胞を選択性の程度の変化で示した. C. 148 個の平均.

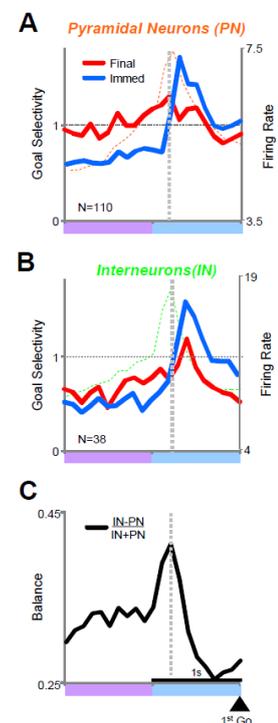


図3. ゴール選択性の遷移する興奮性細胞(A)と抑制性細胞(B). C. 抑制性細胞の興奮性細胞に対する相対発火頻度の時間変化.

胞に対し前頭前野の“公式見解”を表現し続ける一方、抑制性細胞は局所神経回路内部で情報表現の状態遷移に向けて複雑な処理を担っているのかもしれない。また予備的結果では、興奮性細胞と抑制性細胞の活動バランスの一過性の変化も、細胞の情報表現の遷移と関わっていることが示唆されている(図3C)。

(2) 神経回路分岐の前兆としての発火ゆらぎの上昇

では、この選択性の変化の背後には、前頭前野の神経回路の分岐が存在するのだろうか？ 選択性の変化の前にゆらぎの増大が見られたら、それは分岐の有力な証拠となる。発火ゆらぎの評価は、発火頻度の増減に影響されない最新の指標、LvR, lv, IR, SI を用いて評価した[11-14]。図4に示した通り、これら全ての指標で、選択性の変化に先立ち、発火ゆらぎの上昇が見られた(図4A-D)。また、この上昇は、興奮性細胞か抑制性細胞かによらず見出された(図4E,F)。

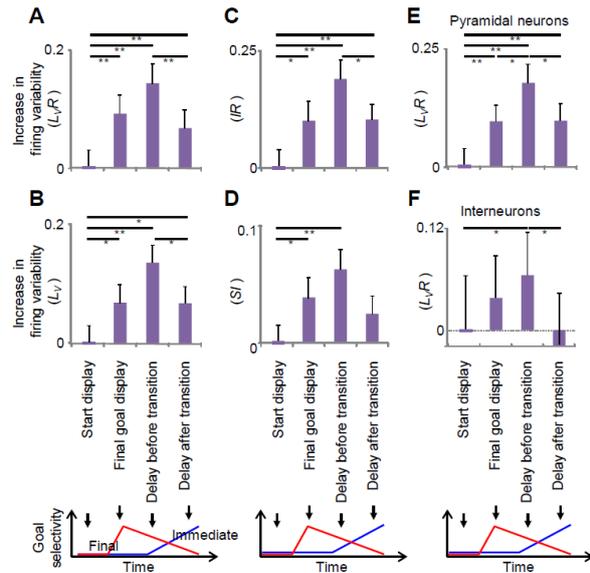


図 4. 発火の選択性の変化に先行して発火ゆらぎが上昇する。A. LvR. B. lv. C. IR. D. SI. E. 興奮性細胞. F. 抑制性細胞.

(3) 自らの性質を動的に変化させる神経回路～シナプス短期可塑性によるアトラクタ再構成～

前頭前野細胞の情報表現の遷移を、神経回路のアトラクタ構造の再構成により数理モデル化した(図5)。古典的な神経回路モデルでは、アトラクタ構造は変わらず、初期値や外乱によって系は異なる状態をとる。一方、アトラクタ再構成モデルでは、シナプスの短期可塑性によって回路への入力に応じアトラクタ構造が変化(分岐)し、それに従い回路自身も別の状態に遷移する。短期可塑性には、促進と抑制があり、促進では細胞の発火が続くとその細胞からのシナプス伝達効率がその期間上昇し、抑制では低下する。シナプスの短期可塑性には神経調節物質等の関与も示唆されており、様々な時空間活動パターンを生成する神経回路を構成する上でカギとなると思われる。

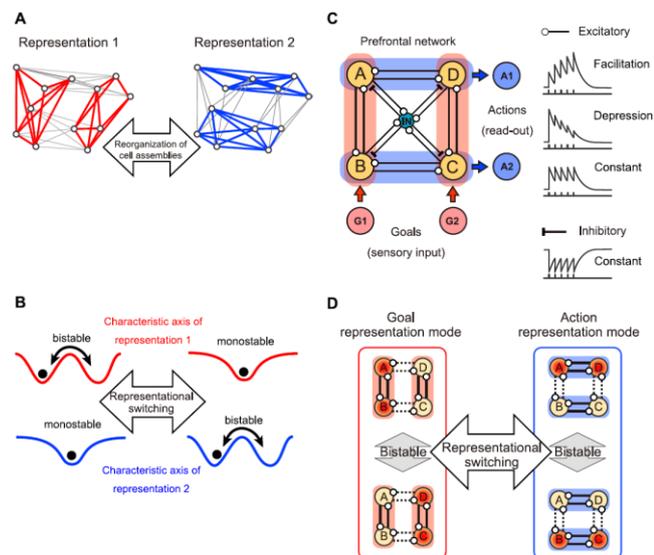


図 5. シナプス短期可塑性によるアトラクタ再構成。A. 1つの神経回路が異なる種類の情報を表現する必要がある。B. シナプス短期可塑性とモデルの概要。C. 回路を異なる方向に同時に分岐させたい。D. 短期可塑性を用いたらそれを実現可能。

参考文献

- [1] 丹治順. 1999: 脳と運動-アクションを実行させる脳. 共立出版.
- [2] Sakamoto, K., Mushiake, H., Saito, N., Aihara, K., Yano, M., Tanji, J. 2008: Discharge synchrony during the transition of behavioral-goal representations encoded by discharge rates of prefrontal neurons. *Cereb. Cortex*, vol. 18, pp. 2036-2045.
- [3] Sakamoto, K., Yoshida, S., Mushiake, H., Saito, N., Aihara, K., Tanji, J. 2007: Transition of goal representation of excitatory and inhibitory neurons in the primate prefrontal cortex. IEICE Technical Report, NC2007-39, pp. 37-38.
- [4] Sakamoto, K., Saito, N., Yoshida, S., Katori, Y., Tanji, J., Aihara, K., Mushiake, H. 2012: Time-development of excitation-inhibition balance in the prefrontal cortex during a path-planning task. *Neurosci. Res.*, vol. 74, Sppl .
- [5] Sakamoto K, Saito N, Yoshida S, Mushiake H. 2013: Excitation-inhibition balance of the prefrontal neurons in the execution period of a path-planning task. The 4th International Conference on Cognitive Neurodynamics.
- [6] Sakamoto, K., Katori, Y., Aihara, K., Mushiake, H. 2011: Changes in firing variability depend on network resilience. The 21th Annual Conference of the Japanese Neural Network Society, P2-45.
- [7] Sakamoto K, Katori Y, Saito N, Yoshida S, Aihara K, Mushiake H. 2013: Increased firing irregularity as an emergent property of neural-state transition in monkey prefrontal cortex. *PlosONE*, vol.8, e80906.
- [8] Sakamoto, K., Katori, Y., Saito, N., Tanji, J., Aihara, K., Mushiake, H. 2010: The modulation of firing variability can be used to access the dynamical state in neuronal networks. *J. Physiol. Sci.*, vol. 60, sppl 1, P191.
- [9] Katori, Y., Sakamoto, K., Mushiake, H., Aihara, K. 2010: Transition of information representation in a multi-stable attractor model of the prefrontal cortex. *Neurosci. Res.*, vol.68, sppl 1 e324.
- [10] Katori, Y., Sakamoto, K., Saito, N., Tanji, J., Mushiake, H., Aihara, K. 2011: Representational switching by dynamical reorganization of attractor structure in a network model of the prefrontal cortex. *PLoS Comput. Biol.*, vol. 7, e1002266.
- [11] Shinomoto, S., Kim, H., Shimokawa, T., Matsuno, N., Funahashi, S., et al. 2009: Relating neuronal firing patterns to functional differentiation of cerebral cortex. *PLoS Comput. Biol.*, vol.5, e1000433.
- [12] Shinomoto, S., Shima, K., Tanji, J. 2003: Differences in spiking patterns among cortical neurons. *Neural Comput.*, vol.15, pp.2823-2842.
- [13] Davies, R.M., Gerstein, G.L., Baker, S.N. 2006: Measurement of time-dependent changes in the irregularity of neural spiking. *J. Neurophysiol.*, vol.96, pp.906-918.
- [14] Miura, K., Okada, M., Amari, S. 2006: Estimating spiking irregularities under changing environments. *Neural Comput.*, vol.18, pp.2359-2386.

アダルトニューロジェネシスによるヘテロ脳回路の動的アSEMBル

研究代表： 東京大学 大学院新領域創成科学研究科・准教授 久恒辰博

概要

大人でも海馬では新しくニューロンが生まれ、新しく回路ができています。この新しい回路は自己組織的に既存回路に組み込まれることにより、空間記憶の形成に寄与する。また、この新しい回路の形成を既存回路の活動は制御している。本研究では、自立的な新生ニューロン回路がどのような仕組みによってヘテロ脳回路の中に動的にアSEMBルされていくかについて、生理学的な解析を行った。

Abstract

New neurons are generating at the dentate gyrus of the hippocampus even in the adult mammals and are integrated autonomously into the hippocampal circuit to contribute to the memory function. The activity of hippocampal circuit regulates the formation of new circuit generated by new neurons. We studied by physiological analyses how new neuron-related new circuit is integrated into the hippocampal circuit.

1. 研究開始当初の背景

(1) アダルトニューロジェネシスの動的アSEMBルにおけるアセチルコリンの機能

成体になっても、海馬では、新しくニューロンが生まれ、新しく神経回路ができています。この新しい神経回路は、神経活動による動的制御を受け、海馬回路内に組み込まれていく。さらに、この新生ニューロンは、コミュニケーションに欠かすことのできないエピソード記憶の形成・維持に深く寄与することがわかってきた。コミュニケーションを理解するうえで、アダルトニューロジェネシスを介した研究は新しい研究の切り口を提供できる可能性がある。本研究では、トップダウンシグナルであるアセチルコリン神経系の活動を介した新生ニューロンの組み込み過程を明らかにすると共に、新生ニューロンを含む海馬回路の動的アSEMBルの様式を調べていく。

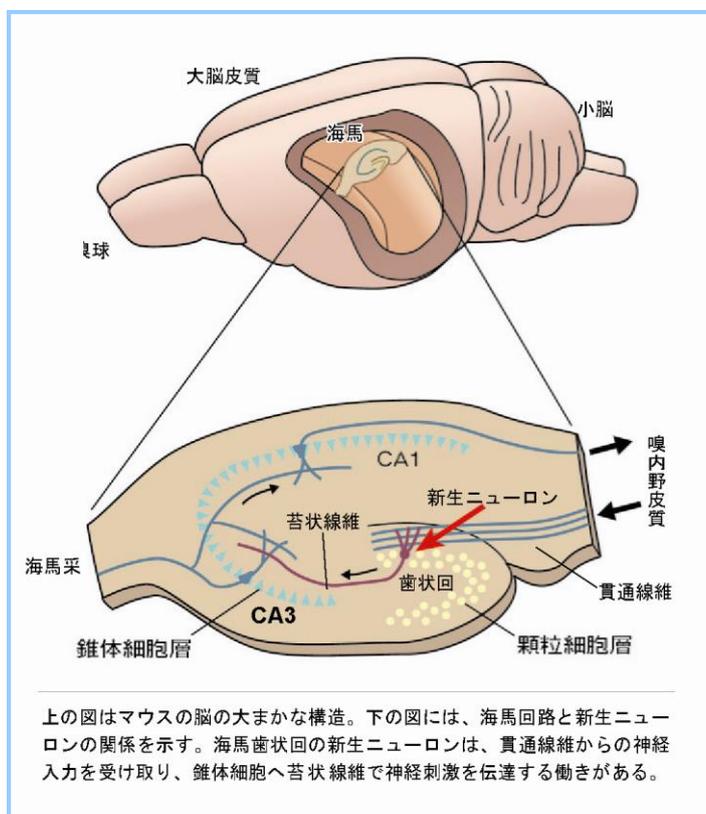
(2) アダルトニューロジェネシスの動的アSEMBルを解析する生理学研究法

海馬新生ニューロンは、成体の海馬歯状回において、神経幹細胞より生涯にわたり新しく生まれている。このニューロン新生は、脳梗塞後に増強することがわかってきた。脳梗塞後には、海馬脳波が増強することが知られていた。そこで、脳梗塞後のニューロン新生増強における海馬脳波の役割について、研究を行うことにした。また、チャンネルロドプシン分子の光刺激による脳回路活動解析法である「Optogenetics」を導入し、fMRI 解析により海馬回路の活動性を評価する方法を開発し、アダルトニューロジェネシスの動的アSEMBルに関する研究を行う。海馬新生ニューロン回路の解析を通じて自立的な脳回路形成に及ぼすトップダウンシグナルの影響を明らかにし、ヘテロ複雑システムへの理解へと繋げていく。

2. 研究の目的

(1) アダルトニューロジェネシスの動的アセンブルにおけるアセチルコリンの機能

アセチルコリン神経系のはたらきにより、ニューロン新生の過程が賦活化されていることを中心に解析を行う。海馬新生ニューロン回路は、空間記憶を司る海馬-嗅内野皮質-大脳新皮質ループに加え、情動コントロールを担う海馬-中隔野-扁桃体回路にもアセンブルすることで、時間経過に伴う空間嫌悪学習の成立に寄与する。右図に、海馬新生ニューロンを介した新生海馬回路を示した。嗅内野皮質からの入力刺激を貫通線維で受け取り、CA3 連想記憶ネットワークに向け、神経信号を苔状線維として出力する。この一連の過程をトップダウンシグナルとしてアセチルコリン系神経が制御している。そこで、本研究では、海馬新生ニューロン回路の解析を通じて自立的な脳回路形成に及ぼすトップダウンシグナルの影響を調べ、このモデル化を行い、ヘテロ複雑システムの理解を深める。



(2) 生理学解析法を用いたアダルトニューロジェネシスの動的アセンブルの解析

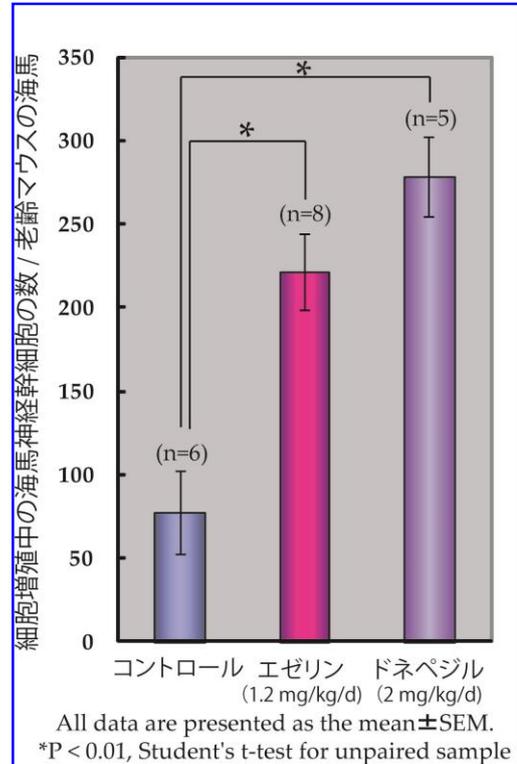
新生ニューロンの組み込みにおける脳梗塞の関与を調べるために、マウスの中大脳動脈閉塞モデルを使用する。脳梗塞後の海馬では、軽度な組織障害(炎症反応)がおり、神経回路が過興奮状態になり、組織中に放出されるグルタミン酸やATPの濃度が高まっていることが推定された。そこで、マウスの中大脳梗塞閉塞モデルを用い、回路の活動性については海馬深部脳波解析を行う。具体的には、マウスの海馬から脳波を導出する方法を確立する。脳梗塞手術の3日後に分裂細胞を標識するBrdUを投与し、4日後に脳を取り出した後、免疫染色により細胞分裂中の神経幹細胞の数を計測する。

また、新生ニューロンの海馬回路におけるはたらきを調べるために、optogenetics-fMRI法の開発を行う。Tg ratのdentate gyrus(DG)に非磁性のカニューレを通して光ファイバーを挿入し、MRI装置内で青色レーザーにより光刺激を行う。この際、動物は α -chloralose(50mg/kg)の腹腔投与により麻酔し、光刺激の有無によるBOLD信号の変化を4.7Tesla小動物用MRI(Varian)を用いて導出する。これらのMRIデータを脳機能解析ソフトであるSPM5を用いて統計学的に解析し、それらの集団解析を行う方法を確立する。

3. 研究の方法と成果

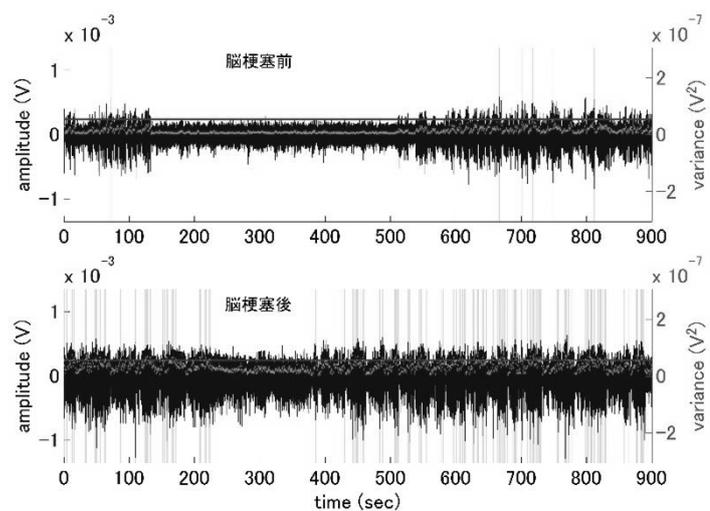
(1) アダルトニューロジェネシスの動的アSEMBルにおけるアセチルコリンの役割

本研究において、老齢マウスにおいて、運動によるニューロン新生の亢進は中隔野のアセチルコリン神経のはたらきに依存していること、さらに、アセチルコリンエステラーゼ阻害剤の投与によってニューロン新生が高まることを明らかにした (*Hippocampus, 2011*). 神経幹細胞は、運動や学習時の海馬シータ波によって活性化するが、この脳波は中隔野アセチルコリンニューロンにより誘起されていることが知られていた. そこで、①アセチルコリンによって神経幹細胞は活性化できるのか、②中隔野にあるアセチルコリンニューロンを選択的に破壊すると運動時のニューロン新生賦活化が起こらなくなるのか、③逆にアセチルコリンエステラーゼ阻害剤によってアセチルコリンの働きを高めるとニューロン新生が増強されるか、の3点について解析を行った. 老齢マウスに候補薬剤としてエゼリン (最初に見つかったアセチルコリンエステラーゼ阻害剤) ならびに認知症の治療のために処方されているドネペジルを投与し実験を行い、どちらの薬剤でも老齢マウス (生後18ヶ月以上) の神経幹細胞を増殖促進させる作用があることが見出された. (右図参照: *Hippocampus, 2011* において公表).



(2) 生理学解析法を用いたアダルトニューロジェネシスの動的アSEMBルの解明

脳梗塞 (MCAO) 後の海馬において、脳回路中に放出されるグルタミン酸の量が増加し、脳回路が興奮状態となり脳波活動が亢進していることが推定された. 実験では、マウスの海馬に記録電極を刺入し、術後の回復を待って、まず通常状態の海馬脳波を取得した (図の上段). 次に、記録用電極が刺さった状態で、中大脳動脈閉塞手術を実施し、この脳梗塞後3日目の脳波を取得した (図の下段). この図から、脳梗塞後には顕著な脳波活動の上昇が見られることが判った. この脳波活動の上昇により神経幹細胞の増殖が亢進していることが認められた.



また、動物として optogenetics-fMRI 解析にも適した ChR2 を組み込んだトランスジェニック (Tg) ラットを使用し、新生ニューロンのはたらきを調べるために、ガンマ線照射 (10Gy) によって新生ニュー

ロンを除去した遺伝子組み換えラットを準備し、行動試験と組織染色を行った。これらの結果を放射線未照射のコントロール Tg ラットの結果と比較した。新生ニューロンを除去するために rat の脳にガンマ線を固定線源である ^{137}Cs を用いて 10Gy の強度で照射した。ガンマ線照射 6 週間後のラットを用いて神経新生阻害による空間記憶機能の変化を、ラットのコミュニケーション能力を調べる一つの行動試験で文脈恐怖条件付け記憶試験(Contextual Fear Conditioning Test)を用いて評価した。その結果、放射線未照射のコントロールと比較して、記憶能力が統計学的な有意差を持って低下していることが認められた。一方で、ガンマ線照射1週間後のラットではコントロールと比較して行動学的な変化は見られなかった。そこで、ガンマ線照射 6 週間後のラットを用い、海馬回路の活動における新生ニューロン除去の影響を optogenetics-fMRI を用いて解析した。その結果、CA3 領域において有意な活性変化が観察された。本研究の結果から、アダルトニューロジェネシスが海馬回路を介した動物コミュニケーションの機構に深く寄与していることを示された。そして、アダルトニューロジェネシスを介した海馬へテロ脳回路の動的アセンブル機構を明らかにしていくことは、コミュニケーションの脳内機構を理解していく一つの切り口になり得ることが示唆できた。

参考文献

- [1] Itou Y; Nochi R; Kuribayashi H; Saito Y; Hisatsune T “Cholinergic activation of hippocampal neural stem cells in aged dentate gyrus” *Hippocampus*, 21, 446-459 (2011)
- [2] Hisatsune T; Ide Y; Nochi R “Activity-dependent regulation of the early phase of adult hippocampal neurogenesis” in T. Seki et al. (eds.), *Neurogenesis in the Adult Brain*, Springer p. 217-236. (2011)
- [3] Abe Y; Sekino M; Terazono Y; Ohsaki H; Fukazawa Y; Sakai S; Yawo H; Hisatsune T “Opto-fMRI analysis for exploring the functional connectivity of the hippocampal formation in rats” *Neuroscience Research*, 74,248-255 (2012)
- [4] Nochi R, Kato T, Kaneko J; Itou Y; Kuribayashi H; Fukuda S; Terazono Y; Matani A; Kanatani S; Nakajima K; Hisatsune T “Involvement of mGluR5-signaling in activity-related proliferation of adult hippocampal neural stem cells” *Eur. J. Neurosci.*, 36, 2273-2283 (2012)
- [5] Abe Y; Sekino M; Fukazawa Y; Yawo H; Ohsaki H; Hisatsune T “Functional analysis of the hippocampus using opto-fMRI” in the post-conference proceeding of ICCN2011 Niseko (June 9-13, 2011; The 3rd International Conference on Cognitive Neurodynamics) “Advances in Cognitive Neurodynamics (III)” Springer p.803-807 (2013)
- [6] Nochi R, Kaneko J, Okada N, Terazono Y, Matani A, Hisatsune T “Diazepam treatment blocks the elevation of hippocampal activity and the accelerated proliferation of hippocampal neural stem cell after focal cerebral ischemia in mice” *Journal of Neuroscience Research*, 91, 1429-1439 (2013)

樹状突起における脳内ヘテロ情報の統合メカニズムの解明

研究代表: 東京大学大学院新領域創成科学研究科・助教 大森敏明

概要

近年の生理実験により、樹状突起が、これまで考えられてきた以上に多彩な情報処理を担うことが示され、実験生理学者の間で注目を集めている。本研究では、樹状突起上の情報統合に注目することにより、入力情報におけるヘテロ性と樹状突起膜特性が示すヘテロ性がどのように相互作用するかを理論的に明らかにする。実験データを元に、樹状突起上の膜特性分布を推定する統計学的手法を構築し、ヘテロ情報が樹状突起においてどのように統合されるかを理論解析により究明する。

Abstract

Recent experimental findings such as dendritic spikes, back-propagating action potentials along dendrite suggest that the dendrite contributes more to neural computation than previously thought. In this study, we investigate how the dendritic information integration is realized under the heterogeneity in both the input information and dendritic membrane properties. We develop a method to estimate the spatial distribution of membrane properties over the dendrite from experimental data. Furthermore, we investigate how the heterogeneous information is integrated over the dendrite by using theoretical analysis.

1. 研究開始当初の背景

近年の生理実験により、樹状突起が、これまで考えられてきた以上に多彩な情報処理を担うことが示され、実験生理学者の間で注目を集めている。図1に示すように、海馬 CA1 錐体細胞では、樹状突起上の応答特性を定める膜特性の一つである膜抵抗が空間的に区画化されており、この膜抵抗の区画化が、樹状突起に投射する異なる入力情報の区画化と対応することが強く示唆されている。従って、脳における異なる入力情報の統合様式に、樹状突起膜特性のヘテロ性が強く影響を及ぼしている可能性が非常に高い。しかしながら、その重要性にも関わらず、樹状突起における入力情報のヘテロ性と樹状突起膜特性とのヘテロ性の間の関係は明らかにされていない。更に、直接測定の困難性により、膜特性が樹状突起上でどのように分布しているかも、依然、不明のままである。

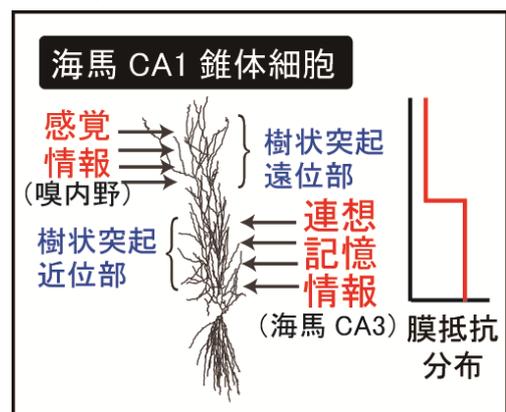


図1: 樹状突起入力へのヘテロ性と膜特性のヘテロ性

2. 研究の目的

本研究では、樹状突起上の情報統合に注目することにより、入力情報におけるヘテロ性と樹状突起膜特性が示すヘテロ性がどのように相互作用するかを理論的に明らかにする。樹状突起上の膜特性分布を推定する統計学的手法を構築し、ヘテロ情報が樹状突起においてどのように統合されるかを理論解析により究明する。

3. 研究の方法と成果

本研究課題の2年間において、我々は、樹状突起におけるヘテロ情報の統合メカニズムの解明を目的として、これまでに、(1)樹状突起における膜特性のヘテロ性を推定する統計学的推定法を構築するとともに、(2)膜特性のヘテロ性が樹状突起におけるヘテロ情報の統合メカニズムに与える影響に関する理論研究を遂行した。

(1) 樹状突起における膜特性のヘテロ性の推定を実現するための統計学的推定法の構築

膜特性のヘテロ性を抽出するための統計学的枠組みを構成するために、樹状突起の膜電位ダイナミクスが従う偏微分方程式であるケーブル方程式をベイズ統計学の枠組みに取り入れた推定アルゴリズムを構築した [図2]。まず、樹状突起が分布定数型回路であることを考慮して、ベイズ統計学に基づいて、部分的に観測される膜電位データから樹状突起全体の膜電位分布を推定する分布定数型カルマンフィルタを導出した[図3]。さらに、膜特性の空間分布推定を実現するために、EM アルゴリズムを導入し、部分的に観測される膜電位データから樹状突起全体の膜特性の空間分布と膜電位の空間分布を同時に推定する理論的枠組みを構築した。

本研究で構築した膜特性分布の統計的推定法の有効性を検証するために、NEURON シミュレータを用いて得られるデータに対して提案法を適用した。部分的に観測されるノイズを重畳され

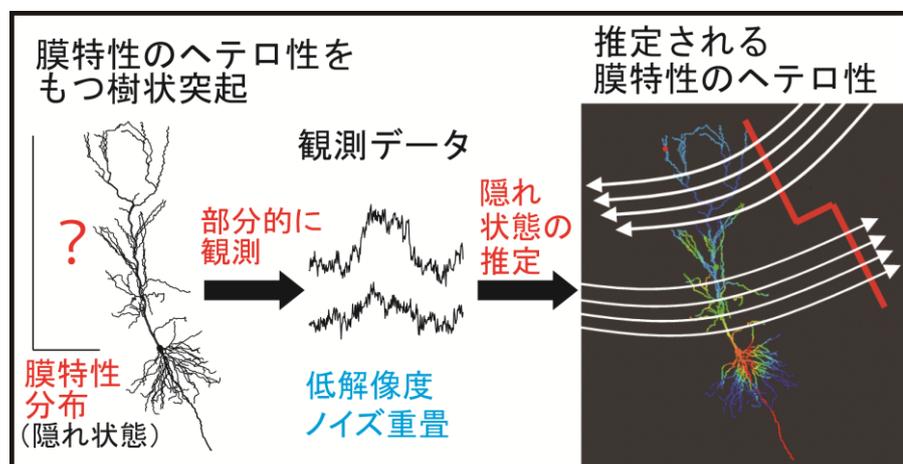


図2: 膜特性のヘテロ性を推定するための統計学的手法の構築

た膜電位データに基づいて、膜特性分布を推定したところ、空間分解能が低い場合においても、膜特性の空間分布が良く推定されることが示された。この結果より、我々の提案する統計的推定手法が、樹状突起における膜特性分布の推定に有効であることが確認された。

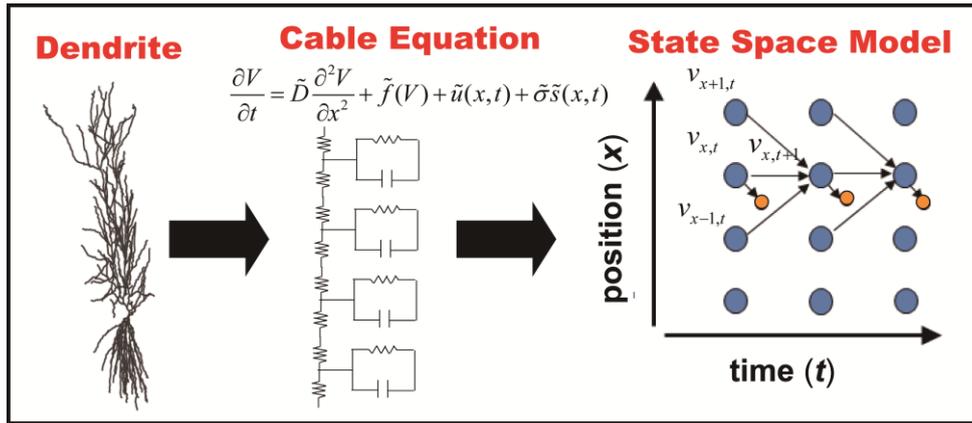


図3: 樹状突起の膜電位分布と膜特性分布の同時推定を実現する
分布定数型カルマンフィルタ

(2) 膜特性のヘテロ性が樹状突起上ヘテロ情報の統合メカニズムに与える影響に関する理論研究

膜特性のヘテロ性が神経情報処理に与える影響を明らかにするために、樹状突起の数理モデルを用いた理論研究を行った。

まず、ケーブル方程式を用いた理論解析により、膜特性のヘテロ性と細胞内信号伝播の関係を解析的に導出し、膜特性のヘテロ性が細胞内信号伝播を向上する役割を持つことを示した。

次に、マルチコンパートメントモデルを用いた数値実験により、樹状突起上での信号伝播が膜特性のヘテロ性により向上することを示唆する結果を得た[図4]。特に、樹状突起遠位部のみに入力

が与えられる状況を想定し、樹状突起スパイクが細胞体発火を生じさせるかどうかを究明した。膜特性が均一に分布する場合には、樹状突起遠位部への入力のみでは細胞体発火が得られない

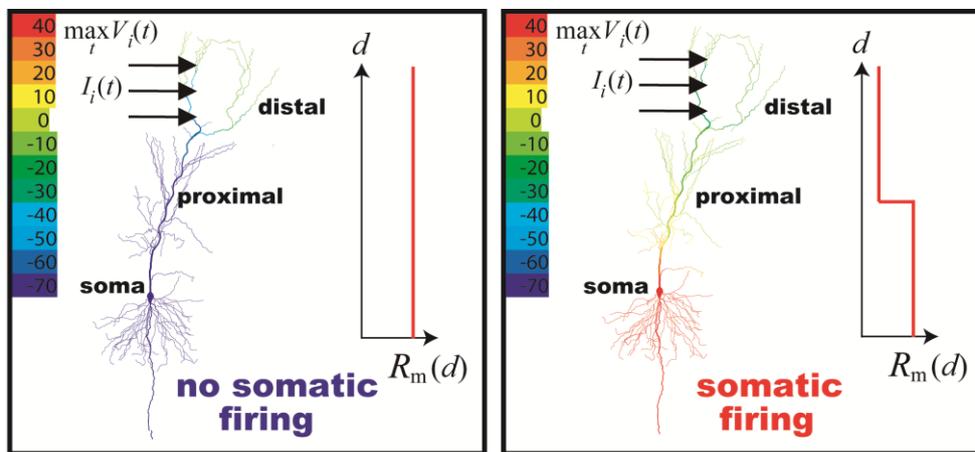


図4: 膜特性のヘテロ性が樹状突起上信号伝播に与える影響

左: 膜特性が均一に分布する場合、

右: 膜特性のヘテロ性が存在し、不均一に分布する場合。

状況において、膜特性のヘテロ性を導入することにより、細胞体発火が生じることが示された。さらに、閾値下の信号であるシナプス後電位の伝播も、膜特性のヘテロ性により向上することが確認された。

これらの理論研究の結果は、樹状突起における膜特性のヘテロ性が、樹状突起におけるヘテロ情報の統合様式に重要な役割を担っていることを示唆する。

参考文献

- [1] Toshiaki Omori, Toru Aonishi, and Masato Okada, “Switch of Encoding Characteristics in Single Neurons by Subthreshold and Suprathreshold Stimuli” *Physical Review E* (2010).
- [2] Takamasa Tsunoda, Toshiaki Omori, Hiroyoshi Miyakawa, Masato Okada, and Toru Aonishi, “Estimation of Intracellular Calcium Ion Concentration by Nonlinear State Space Modeling and Expectation–Maximization Algorithm for Parameter Estimation” *Journal of the Physical Society of Japan* (2010).
- [3] Takamasa Tsunoda, Yoshiaki Oda, Toshiaki Omori, Masato Okada, Masashi Inoue, Hiroyoshi Miyakawa, and Toru Aonishi, “Statistical Calibration Method for Physiological Ca²⁺ Fluorescence Signals” *Australian Journal of Intelligent Information Processing Systems* (2010).
- [4] 大森敏明, 岡田真人, 「海馬システムの数理モデル」, *Clinical Neuroscience* (2011).
- [5] Keisuke Ota, Toshiaki Omori, Shigeo Watanabe, Hiroyoshi Miyakawa, Masato Okada, and Toru Aonishi, “Measurement of Infinitesimal Phase Response Curves from Noisy Real Neurons” *Physical Review E* (2011).
- [6] Munenori Iida, Toshiaki Omori, Toru Aonishi, and Masato Okada, “Nonlinear Effect on Phase Response Curve of Neuron Model” *Proceedings of 18th International Conference on Neural Information Processing* (2011).
- [7] Takamasa Tsunoda, Yoshiaki Oda, Toshiaki Omori, Masashi Inoue, Hiroyoshi Miyakawa, Masato Okada, and Toru Aonishi, “Estimation of Dendritic Spatiotemporal Calcium Dynamics by Nonlinear State Space Modeling” *Proceedings of 18th International Conference on Neural Information Processing* (2011).
- [8] 飯田宗徳, 大森敏明, 青西亨, 岡田真人, 「脳情報処理の理解に向けて:神経細胞モデルによる数理的アプローチ」, 情報処理学会論文誌「情報処理」(2011).
- [9] 関口智樹, 大森敏明, 岡田真人, 「Slow Feature Analysis における観測ノイズの影響」, 情報処理学会論文誌 数理モデル化と応用 (2012).
- [10] Jun Kitazono, Toshiaki Omori, Toshiaki Aonishi, and Masato Okada, “Estimating Membrane Resistance over Dendrite Using Markov Random Field” *IPSJ Transaction on Mathematical Modeling and Its Applications* (2012).
- [11] 佐藤直行, 大森敏明, 我妻広明, 「海馬の理論研究:ニューロンから行動まで」, 電子情報通信学会情報・システムソサイエティ誌 (2012).
- [12] Toshiaki Omori, Toru Aonishi, and Masato Okada, “Statistical Estimation of Non-Uniform Distribution of Dendritic Membrane Properties” *Advances in Cognitive Neurodynamics* (2013).

神経回路網におけるカオスに基いた脳内通信の原型モデル

研究代表：岡山大学自然科学研究科・教授 奈良重俊

概要

(1)リカレント型神経回路網モデルに意図的パターンの周期的連鎖から成るサイクルアトラクタを複数個埋め込み、結合数を全結合から少数結合に減少させてカオスのダイナミクスを導入した。カオス存在下で遠く離れた二点間の無相関を評価したうえで、ある少数個の神経群に定まった外部入力を与え、それから空間的に離れた神経との相関を評価してカオス中で輸送される信号の伝播特性を調べ、それが脳内通信と類似の特性を持っていることを示した。(2)そうした送信形態が同時に2チャンネル設けることが可能であることを示した。(3)これらを工学的に再構成する目的をもって、非線形光電子デバイス結合系を考案し、それによる通信機能に関する計算機実験として、動的自己電気光学効果素子(略称をDSEEDと言い申請者が考案したモデル)の示すパルス発振を得て、擬似神経細胞モデルを提案した。そして二状態モデルと同様の計算機実験とその数値解析による研究を行い、二値神経細胞ネットワークと同様な計算機実験を試みて成功裡の結果を得た。

Abstract

To show a functional role of chaos in brain, a heuristic model to consider mechanisms of intra-brain communications is proposed. The key idea is to use chaos in firing pattern dynamics of artificial neuron networks as propagation medium of pulse signals. The two networks consisting of two-state neuron model, and pseudo-neuron device model using opto-electronic technology, respectively are employed to evaluate signal transport characteristics by calculating correlation functions between sending elements and receiving elements of pulse signals. The results show similar properties with those observed in brain and simultaneous two channel signal transfers are successfully obtained.

1. 研究開始当初の背景

(1) 脳科学における脳機能研究の現状

現在の高度な電子技術を用いた実験手段の発展に伴って脳神経系の活動状態に関して時空間同時多点計測を行い、そのリアルタイムデータを得ることが可能になっている。それらは厳密な周期的運動でもなく、ランダムデータでもない膨大なデータ群であり、そこから脳機能の原理に関してどんな自然科学的知見が得られるかに関しては百家争鳴の状況にある。

その中で現象論的に特に注目を集めているのは、Brain Computer (または Machine) Interface (略称 BC(M)I) と呼ばれる手法の世界的な隆盛である。現代の発達した情報技術(IT)を駆使して、機能発現中の脳神経活動を計測し、その時空間信号を機械やデバイス制御に用いて被験者や実験動物が思考するのみで機械やデバイスを駆動制御できるようにするという技術である(“Actions from Thoughts”, M.A.L. Nicolelis, Nature, 409, pp. 403-407 (2001))。そこでは脳神経活動における情報処理や制御の機構にはあまり立ち入らずにその信号のみを利用する立場が見える。そうした成果は逆に脳機能や生体の卓越した機能性のメカニズムの解明が依然として極めて困難であることを再確認させるものである。

(2) 脳機能研究に関する新たな手法の萌芽と発展

先に述べた現状の一方で、神経科学・神経生物学の発展に伴い多くの実験的かつ理論的知見が得られて来た歴史において、脳内にもカオスが発見されたことは大きな驚きであった。理論的には国内では例えば Tsuda らの研究を含め海外でも先駆的研究はいくつかあったが、実験的にそれが観測されたことは大きなインパクトを与えるものであった。それとともに、たとえば通常は非周期的に興奮(発火)している神経回路網において、脳が機能を実現している際の現象として、解剖学的にも脳の機能地図的に言っても離れた領野間の神経が同期的な発火現象を示すことが発見された(C. M. Gray et al., *Nature*, 338, pp. 334-337 (1989) 以来、多数の実験がある)。

こうした新現象に対して発見論的なモデルによるアプローチや複雑系数理学からのアプローチを行い脳機能のからくりを迫る研究が起きている。科研費・新学術領域研究中の当該領域提案:「ヘテロ複雑システムによるコミュニケーション理解のための神経機構の解明」はその大きな柱となる研究領域である。本研究課題の代表者は同様な立場に基づいて、神経回路網モデルにおけるカオスの機能的な側面とその分析や不良設定問題の求解などの研究を積み上げて来た(S. Nara, *Chaos*, 13, pp. 1110-1121 (2003), S. Nara et al., *Biological Cybernetics*, 99, pp. 185-196 (2008))。

このような「動的観点から脳の高度機能に関する計算機実験を行う研究、またその数理科学的分析研究とハードウェア製作による実験的研究」は、世界的に見て急増しつつある。ヨーロッパ・アメリカには活動的なグループが散見され、最近ワークショップなども頻繁に開かれて急速に注目を集めつつある。

2. 研究の目的

前節に述べた現状を背景に新たなアイデアに基づき、特に「カオスを含む複雑なダイナミクスを通信媒体として用いた複数離点間同時多チャンネル通信の計算機実験とそれに基づく脳内コミュニケーション機能へのアプローチ、および脳機能型擬似神経デバイス(Brainmorphic Device)の試作と動作実験」を重要な目的とする。次に各目的課題について述べる。

(1) 脳内コミュニケーション機能の卓越性に関する動的機構の解明

本研究代表者らはカオスや新発見としての同期現象と脳機能との関連が話題となる動向に一石を投ずる研究としてこれまでに積み上げて来た研究に基づき、比較的単純な要素(二状態神経細胞(セル)モデル)の多数結合系(神経回路網モデルやセルオートマトン系)においてこれも比較的単純な時間発展ルール(神経興奮の更新ルールやセルオートマトンの状態更新ルール)によって生じる引き込み現象やカオスを含む複雑なダイナミクスについて、それを不良設定問題求解や逆問題解決に応用してカオスの有用性・有効性を示してきた(Y. Suemitsu and S. Nara, *Neural Computation*, 16 pp. 1943-1957 (2004), T. Miura, T. Tanaka, Y. Suemitsu and S. Nara, *Physics Letters A*, 346, pp. 296-304 (2005))。例えばカオスの記憶ダイナミクスを用いた記憶の検索や記憶の合成、神経回路網をより単純化したセルオートマトンのルールダイナミクスの生み出すカオスを含む複雑なダイナミクスによる音声・音楽信号や画像の完全再現可能な圧縮記述機能とその分析、更には制御系への応用として準階層型神経回路網のカオスを用いた迷路求解などがある。更にそうした機能性がモデルの詳細にはよらないことをも示し、カオスの機能的汎用性・普遍性を主

張してきた(R. Takada, D. Munetaka, S. Kobayashi, Y. Suemitsu, and S. Nara, Cog. Neurodynamics, 1, pp. 189-202 (2007)).

これら研究の現状や研究歴を背景として、本研究期間内における新たな研究目的として
○神経回路網のカオスを用いた多点間の同時多チャンネル情報伝達に関する計算機機能実験とその動的機構の解明、およびそれをもとにした脳内コミュニケーション機能へのアプローチを掲げる。

(2) 疑似神経細胞の提案およびそのネットワークによる脳内通信機構の工学的再構成

上記研究をハードウェアにより再現することは、経験的科学的における帰納と演繹による法則の発見と実験による裏付けという点から重要な事柄である。本研究課題の代表者らは、非線形光電子デバイスを用いた能動素子結合系(脳機能型疑似神経デバイス)の作製をも理論的に提案し(Y. Ohkawa, T. Yamamoto, T. Nagaya, and S. Nara, Applied Physics Letters, 86, pp. 111107--111110 (2005))その動作解析も示した(T. Yamamoto, Y. Ohkawa, T. Kitamoto, T. Nagaya and S. Nara, Int. J. of Bif. and Chaos, 16, pp. 3717-3725 (2006)). 提案した上記疑似神経デバイス結合系はパルス発振疑似神経回路網として同期現象のこうした研究を行うのに適したモデル系である。したがって
○非線形光電子デバイスによる疑似神経(回路網)の試作とその評価およびそれを用いた離点間同時多チャンネル通信及び離点間同期現象の計算機実験、更にそれらに関する実際のハードウェア試作とその動作実験と理論との比較という目的を掲げる。

3. 研究の方法と成果

(1) 二状態神経細胞モデルとそのネットワークについて

計算機機能実験については次のような方法を用いた。また成果についても記載した。

- (a) リカレント型神経回路網モデルによる通信機能に関する計算機実験として、 $N = 400$ 個の二値(±1)神経細胞をリカレント型で状態更新させる神経回路網モデルを作る。そのシナプス結合行列(400行 400列)として1 サイクル 15 パターン周期を埋め込んだシナプス結合行列を決める。このアトラクターパターンとしては、左上隅と右下隅に $3 \times 3 = 9$ 個の興奮した(+1)神経細胞ブロックが存在するパターンを作り、それ以外の部分にはランダムビットパターンを貼り付け、400 個の神経興奮パターンの 15 ステップ周期のサイクルアトラクターを採用する。
- (b) このシナプス結合行列につき、各神経について r ($\ll N$) 個しか入力結合がない(これを少数結合と呼ぶ)として残りはゼロとしたシナプス結合行列を採用して状態更新を行う。そうすると 400 個の神経の状態はカオス的となり、400 次元の超立方体上を遍歴する状態変化が得られる。
- (c) その状態において、神経細胞間の相関関数を評価する
- (d) 左上隅に送信神経細胞を設定してある周期的な十分に強い入力を加え、送信神経細胞と他の神経細胞(受信神経細胞や中間位置の細胞など)との相関関数を評価する

得られた成果を次に掲げる。

- (i) 外部から信号を印可しない状態において、どの細胞のペアを取って相関関数を求めても意味のある相関は存在しないことが示された。特に自己相関関数についてはその時間依存性

- が冪関数的になっており、発生しているカオスが力学的要素を残していることを示している。
- (ii) 送信部分として決めてあった9個の神経細胞に適切に選んだ強さと周期を持つ信号を外部から印可しながら状態更新を続け、そのもとでの相関関数を評価した。
 - (iii) その結果、送信神経細胞と受信神経細胞との相関がほぼ1に近い値になっているのに対して、中間的な位置に存在している神経細胞との相関はいずれも 0.1 以下となっており、このことから「送信信号がいったんカオス中に散って表面上は見えなくなるが、時空間的に離れた点において再びその信号が発現していることを発見した。これは脳波実験や fMRI 実験とも合致する現象である」ことを示した。
 - (iv) 国際会議:The 3rd International Conference on Cognitive Neurodynamics (ICCN'11)において上記成果を発表した。また国際会議:The 9th International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics (ICNAAM 2011)においてミニシンポジウムを提案し、論文募集・研究発表等を行い、研究課題に関する研究交流や進展を図った。

(2) 光半導体技術を用いた疑似神経細胞モデルとそのネットワークについて

計算機実験およびハードウェア素子試作についての方法と成果は次のとおりである。

- (a) 非線形光電子デバイス結合系による通信機能に関する計算機実験として、動的自己電気光学効果素子(略称を DSEED と言い申請者が考案したモデル)の示すパルス発振を疑似神経細胞モデルのハードウェア素子とみなし、二状態モデルと同様の計算機による信号伝達の機能実験の研究を行った。
- (b) 疑似神経細胞素子のネットワークに関しての計算機実験の結果を用いて、二値神経細胞ネットワークと同様な相関関数による評価を行った。
- (c) 疑似神経細胞素子として提案した非線形光電子デバイス(動的自己電気光学効果素子: Dynamic-Self-Electro-optic-Effect-Device; 略称 DSEED)においてパルス発振を得るため連携研究者との共同研究を行い、既提案・発表済みのデバイス研究での共同研究者であり、本研究課題での研究協力者である徳田教授(岡山県立大)の素子作製に関する助言を含め、半導体薄膜作製は井須教授(徳島大)、電極設置等プロセス技術を駆使したデバイス作製は溝口教授(大阪府立大)に協力を依頼し、できた素子に対する帰還電子回路の設計およびレーザー照射実験と光起因電流の測定等、パルス発振実験は福嶋准教授(岡山県立大)、という役割と担当で疑似神経細胞ハードウェアの作製と発振実験を行った。得られた成果を次に掲げる。
 - (i) 素子間の結合形態において、現実の脳にも観測される「small world」的結合をとり、それによって発生するカオスの場合について信号伝達の計算機実験を行い、二状態神経における少数結合数の場合と同様の結果を得た。
 - (ii) 疑似神経細胞素子としての DSEED 素子が完成したが、40個ほどの素子中、残念ながら発振状態を示す素子はなかった。
 - (iii) 計算機機能実験について、結果を国際会議:The 3rd International Conference on Cognitive Neurodynamics (ICCN'11)において発表した。

参考文献は本文中に掲載, 下記は成果としての発表文献

- [1] R. Yoshinaka, M. Kawashima, Y. Takamura, H. Yamaguchi, N. Miyahara, K. Nabeta, Y. Lee & S. Nara, Adaptive Control of Robot Systems with Simple Rules Using Chaotic Dynamics in Quasi-layered Neural Networks, *Studies in Computational Intelligence*, Vol. 399, pp. 287--305 (2011), K. Madani, A. D. Correia, A. Rosa & J. Filipe (Eds.), Springer Verlag, 2011
- [2] K. Soma, R. Mori, R. Sato & S. Nara, A Heuristic Approach to Intra-Brain Communications Using Chaos in a Recurrent Neural Network Model, Proc. of Int. Conf. on Numerical Analysis and Applied Mathematics, Volume A, pp. 1354-1357 (2011) CD-ROM
- [3] Y. Arai, R. Mori, F. Aoto & S. Nara, A Heuristic Model of Intra-Brain Communications Using Chaos in Artificial Neuron Systems, Proc. of The 3rd International Conference on Cognitive Neurodynamics (ICCN 2011), To be published by Springer Verlag
- [4] そのほか, 学会発表 17 件, うち招待講演 1 件

蛍光イメージング法による鳥海馬神経回路解析

研究代表：慶應義塾大学理工学部・教授 岡浩太郎

概要

メスキカチョウ海馬領域はさえずりの識別に関係しているのかを明らかにするために、神経活動依存的に蛍光変化する pH インディケータを用いたイメージング技術と神経回路を包括的に調べることが可能なマルチカラーゴルジ染色法を併用して調べた。その結果、鳥海馬領域にはさえずりに応答する神経領域が存在することが明らかになった。また局所神経回路の調査から、メスキカチョウの海馬に特異的に存在する神経細胞の存在やさえずりに関わる海馬神経応答とセロトニンとの関係を明らかにすることができた。

Abstract

In songbirds, while the hippocampal formation (HF) relates to spatial memory, the relationship between the HF and song recognition has been still unknown. To reveal the functional relationship between the HF and song recognition, we observed the neuronal activities when female zebra finches were exposed to various song stimuli by *in vivo* pH imaging. We found that the specific sub-areas in HF respond to songs. We also found the specific neurons with characteristic morphology localized in HF, especially in female zebra finch by using multi-color Golgi staining method. Furthermore, the location of neurons activated by songs could be related to the axon terminals containing a neurotransmitter, serotonin. These results suggest that song information is delivered to the HF by serotonergic neuron projection, and the HF deals it by the particular way of neuronal activities according to the sound information.

1. 研究開始当初の背景

鳥海馬は脳表に位置し、空間学習などに関与していることが知られている。また鳥海馬領域と他の脳領域との投射関係を調べた研究から、この領域が哺乳類脳の花馬領域と相同な関係にあることが解剖学的にも明らかにされてきた。最近、さえずりのどの音声成分が識別に使われているのかについて行動実験から明らかにする研究が行われており、さえずりのピッチ、感覚、音圧のそれぞれが要素として識別されていることが明らかになってきた。これらの要素が聴覚野で分析されているものと思われる。しかしながらさえずりとして識別しているさらに高次の脳領域がどこなのかは不明である。

我々の研究グループではメスキカチョウの花馬領域に着目し、さえずりがこの領域の神経活動を高めていることを明らかにしてきた。しかしながら鳥海馬領域がさえずりの識別や連想記憶に関係しているのかは明らかでない。また生理学の立場から見ると脳表に位置する鳥海馬は、哺乳類の花馬が脳深部に位置するのと比較して、電気生理学手法やイメージング手法を適用するのに適した研究試料であると思われる。しかしながらそのような研究の例は少ない。

(1) pH イメージングによる海馬機能解析

神経活動を捉える方法としては電気生理学的な手法が広く用いられてきている。しかしながら海馬のどの領域でさえずりに関わる神経活動が行われているのかが明らかでない段階での電極を用いた

応答領域の探索には限界がある。本研究では神経活動に応じて蛍光が変化する蛍光色素を用いたイメージング手法により、さえずりに関わる海馬神経応答領域を明らかにすることを試みる。蛍光イメージングには膜電位感受性色素を用いる方法、神経活動に応じた細胞内カルシウム濃度変化を検出する方法などが考えられるが、我々は予備的な検討から神経活動に応じた神経細胞内 pH の低下を蛍光色素ニュートラルレッドで可視化する方法を本研究に用いることとした。

(2) マルチカラーイメージングによる個別神経細胞の形態観察

神経局所回路を調べる上でゴルジ染色法は細胞微細形態を明らかにする有効な手法であるが、単色での染色は神経接続の詳細を調べるのには適当ではなかった。そこでマルチカラーゴルジ法により、海馬神経細胞の形態やシナプス接続を明らかにすることを本研究では行うこととした。マルチカラーゴルジ法では、金粒子を脂溶性蛍光色素でコーティングし gene gun によりこれを脳標本に打ち込むことにより、バイチャンスで神経細胞形態を明らかにすることができる。細胞形態は定量的に形態情報を取得するために、ソフトウェア(ニューロルシダ)によりデジタル化するとともに、応答部位毎にデータベースとして取りまとめる。これにより、高次聴覚野と海馬体における応答神経細胞の形態情報を網羅的に調べることができる。

2. 研究の目的

高等脊椎動物における海馬の機能については電気生理学的研究、光学イメージング法等利用して回路レベルで詳細に調べられている。一方鳥海馬に関しては従来空間認知などの役割を持つことが知られているものの、海馬領域機能を包括的に調べる試みは行われていない。そこで下記のような手法を用いて鳥海馬機能を明らかにすることを試みた。

(1) pH イメージングによる海馬機能解析

さえずりを認識する過程でおきる海馬領域での神経活動を、神経活動に応じて細胞質が酸性化することに着目し、pH インディケータであるニュートラルレッドをメスキカチョウの腹腔内に注入することにより可視化することを試みた。

(2) マルチカラーイメージングによる個別神経細胞の形態観察

金粒子に脂溶性蛍光色素を塗付し、遺伝子銃でキンカチョウ脳標本に打ち込むことにより、神経細胞形態と神経線維投射をマルチカラーイメージングにより調べた。

3. 研究の方法と成果

(1) pH イメージングによる海馬機能解析

脳表を露出させ、直接染色する方法から、腹腔内にニュートラルレッドを注入する手法に変更したところ、安定して海馬領域を染色できることがわかった。またキンカチョウのさえずり以外に、白色ノイズ、別の鳥の地鳴きなどを聞かせたときの神経活動を調べたところ、さえずりで強く応答する部位を蛍光イメージとして捉えることに成功した(図1)。またこの pH 応答がさえずりを聞いたことによる神経活動であることを調べるために、耳石除去した鳥についてもイメージングを行ったが、海馬での神経活動は検出できなかった。これらの結果はさえずり情報処理を pH イメージングとして直接捉えることができることを示している。

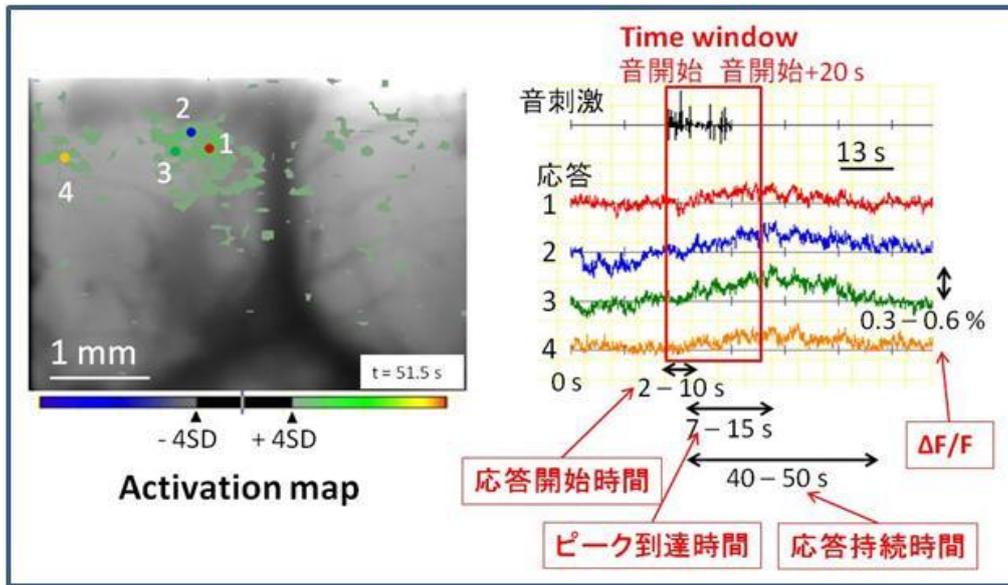


図1 さえずり刺激に伴うキンカチョウ海馬神経活動

現在このさえずりに応答する海馬領域から電極を刺入し、電気生理学的な解析を進めているが、さえずりに応答する神経細胞の細胞外記録に成功している。

(2) マルチカラーイメージングによる個別神経細胞の形態観察

メスキカチョウ脳 sagittal セクションについてのデータ取得は終了し、オス・メス双方での coronal セクションで同様な調査を進めた(図 2)。オス鳥で知られている海馬内サブリジョンを参考にして、オス鳥メス鳥の脳神経細胞について調べたところ、メス鳥だけに特異的な神経細胞(Oval neuron と命名した)を見出した。この神経細胞は大きな細胞体と短い神経線維が主たる特徴であり、海馬の脳表面に近い特定の部位にのみ局在していることがわかった。また海馬領域内の神経線維投射には、オスとメスとで差異が無いことがわかった。

現在この解析方法をさらに進め、抗体染色法(神経活動に応じて発現する最初期遺伝子 *zenk* の産物をイメージングすることにより神経細胞応答を調べることができる)とこのマルチカラーゴルジ染色を同じ標本に対して行えるように実験を改良した。これにより、神経形態とその神経細胞がさえずり情報処理に関わっているのかを明らかにすることが可能となった。さらに神経伝達物質セロトニンと最初期遺伝子産物との同時イメージングを行うことにより、さえずりに関わる神経活動は、脳深部神経核からのセロトニン作動性神経細胞の活動により引き起こされているという新発見を得ることができた。

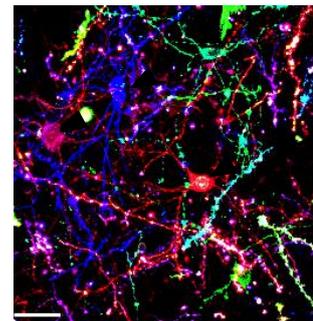


図2 マルチカラーゴルジ染色による神経回路の可視化例

参考文献

- [1] *In vivo* pH imaging of auditory stimulation-induced neural activity in female zebra finch, F.TAKAYAMA, H.HORITA, K.OKA, 170.3, SFN2010, San Diego, 2010.11.14.
- [2] Repeated evolution of activity-dependent motordriven *dusp1* expression in song nuclei of vocal learning birds, H.HORITA, M.KOBAYASHI, K.OKA, E.D.JARVIS, K.WADA, 411.11, SFN2010, San Diego, 2010.11.15.
- [3] Neuronal cytoarchitecture of hippocampal formation in female zebra finch, M.YAMAMOTO, F.TAKAYAMA, K.HOTTA, K.OKA, 774.12, SFN2010, San Diego, 2010.11.17.
- [4] Neuronal distribution of hippocampal formation in female zebra finch by multicolor-imaging, M.YAMAMOTO, F.TAKAYAMA, K.HOTTA, K.OKA, Poster 23, The 16th Takeda Science Foundation Symposium on Bioscience, Tokyo, 2010. 12.1
- [5] pH イメージング法を用いた音刺激に伴うメスキカチヨウ海馬体神経活動のリアルタイム計測, 高山文博, 堀田耕司, 岡浩太郎, 学術集会要旨集 P172, 第 19 回日本バイオイメージング学会学術集会, 横浜, 2011.9.11.
- [6] メスキカチヨウ海馬体における神経細胞構築のマルチカラーイメージングによる解析, 山本真千子, 高山文博, 堀田耕司, 岡浩太郎, 学術集会要旨集 P176 第 19 回日本バイオイメージング学会学術集会, 横浜, 2011.9.11.
- [7] 日本バイオイメージング学会 ベストイメージ・ニコン賞受賞
「メスキカチヨウ海馬体における神経細胞構築のマルチカラーイメージングによる解析」, 山本真千子, 高山文博, 堀田耕司, 岡浩太郎
- [8] Singing-related activity in anterior forebrain of male zebra finches reflects courtship motivation for target females. Iwasaki M, Poulsen TM, Oka K, Hessler NA. PLoS One. 2013; 8(11): e81725.
- [9] Specialized motor-driven *dusp1* expression in the song systems of multiple lineages of vocal learning birds. Horita H, Kobayashi M, Liu WC, Oka K, Jarvis ED, Wada K. PLoS One. 2012; 7(8): e42173.

情報探索と利用の神経機構

研究代表：玉川大学脳科学研究所・准教授 鮫島 和行

概要

複数の属性をもつ2つの刺激から1つを選択する課題における意思決定の探索行動と報酬最大化行動の強化学習モデルを作成し、複数属性を組み合わせた図形そのものの学習よりも、それぞれの属性ごとの価値を学習することによって行動選択がより説明されることを示した。未知商品を選択する傾向の強い個人は、強化学習によって説明される、4本腕山賊課題の行動を説明する探索性を制御するパラメータより低い(すなわち探索性の強いヒトである)傾向があることが確かめられた。

Abstract

In this study, we proposed a reinforcement learning model account for choice behavior including exploration during a choice task among stimuli with multiple properties. In the animal experiment, the action-value model with action-value for each color or shapes explained monkey's choice behaviors better than the action-value model with the action-value for each object. Also, we conducted an experiment with human choice behavior, especially similar to the consumer behavior. In the "bottled-water" choice task, we found that people who tended to choose novel brand water tended to explore in a reward-based choice task.

1. 研究開始当初の背景

不確実であり常に変化する自然環境において、過去の情報をもとに予測を形成することによって適応的に行動を決定する神経機能は、我々が自然環境で生き残るために欠かせない情報処理能力の1つである。これまでの強化学習に代表される機械学習の枠組みによって、ヒトを含む動物の意思決定機能を説明し、その枠組みでの解の1つであるアルゴリズムに使われる変数の神経相関を求めることによって、脳機能の機構的な理解を得るアプローチがとられてきている。強化学習において、外界からの情報を得ようとする行動に対応する探索行動と、過去の情報に基づいて報酬を最大化しようとする行動選択とのバランスを調整する脳神経機構について、動物を使った神経生理学的研究とヒトの脳機能イメージング研究が行われてきた。

(1) 大脳基底核神経回路の強化学習仮説

大脳基底核は、文字通り大脳皮質の基底部に存在する神経核群であり、入力をほぼ大脳皮質の全領域から受け取り、その出力は、脳幹を介して運動出力につながるだけでなく、視床を介して大脳皮質に戻るループ結合を持つ。また、大脳基底核の一部であり、中脳に存在する腹側被蓋野および、黒質緻密部に存在するドーパミン細胞は、報酬が得られたときに活動する。しかし、古典的条件づけをおこなうと、条件刺激に対して活動を強めるようになり、無条件刺激に対しては逆に反応しなくなるという特性を持つ。この特性は、あたかも条件刺激によって予測できない状態から、報酬が予測できる状態への遷移が確認されたときに生じる誤差や、すでに予測できるさいに予測どおり無条件刺激が来ても誤差が生じない事と符号することから、ドーパミン細胞活動およびその投射先である線条体

におけるドーパミン濃度が報酬予測誤差信号を表現する。大脳基底核、特に線条体において報酬予測誤差信号は、刺激にたいする報酬予測(刺激価値や状態価値)や、もしくは行動準備に対する報酬予測(行動価値)の学習に寄与する。実際、刺激によって予測される報酬量予測や、運動選択準備中における特定の報酬量予測に相関する神経活動が、サルを用いた単一神経細胞活動として報告されている。

しかし、古典的条件づけの条件刺激に対する反応や、道具条件づけのオペラント行動直前に対する反応のみではなく、刺激によって運動の準備が行われる前に、刺激の属性の中から特定の刺激情報にのみ特化して作業記憶に保持するような認知的な操作に対する報酬予測はこれまで報告されていない。実際の行動を具体的に決めることができなくても、もしこういう事態が生じた場合にはこうしようと決めることができるのも、ヒトを含む動物の意思決定の特徴であり、作業記憶や注意を認知的に操作し、直後の情報に備える「思考」を構成する重要な要素であると言える。

(2) 強化学習における探索とヒト脳活動

脳が強化学習実行するための神経回路として、大脳皮質から大脳基底核を含む大きなループ回路が強化学習の機能を担うというモデルによって基底核の機能が説明されてきた。一方で、強化学習には常に探索と報酬最大化のジレンマという問題がつきまとう。外界の不確実性は、自ら行動をおこすこと、その結果を知ることによってのみ解消されてゆく。内界にもつ外界のモデルの確実性に基づいて、最大となる報酬をもたらす行動をとらなければならない一方で、まだ未知の行動や、十分にサンプルされていない行動をとらなければ、将来報酬を最大化する行動を取る事は出来ない。このジレンマを解くためには、戦略的に情報の少ない行動を積極的に取ることで最適な行動を無駄なく行う事ができる。Daw は、4 本腕バンディット課題を用いて、ヒトの選択行動および強化による学習の変化が行われる際の脳活動を計測した(Daw et al 2006)。4つの選択肢から1つを選ぶことによって、それぞれの刺激に対応づけられている確率的な報酬を得る。被験者はその報酬をより多く獲得する選択を行う。それぞれの確率は時間とともに変動するため、1つの選択肢を選び続けるよりも、他の選択肢を選んだ方がよくなる場合もあり得る。このため、過去に得られた報酬に基づく価値のみに依存して行動を選択するのではなく、選択されていない行動を積極的に選択することで、変化を検出する必要がある。変化の検出には、その上位のモデルである報酬予測の変化スピード(volatility)の変数に基づいて非選択行動への情報価値を報酬価値に加算して選択するモデルなどが提案されている。Volatility やその学習信号の情報と相関する脳活動が内側前頭前野から報告されている。また、このようなモデルに基づいて、過去に得られた報酬に基づく価値では説明の出来ない行動選択を行う際には、前頭極の脳活動が、探索を行わない場合に比べて高いことが報告されている。このように、報酬予測のみに基づく意思決定に加えて、報酬予測のみではなく、探索に価値を置く選択には、大脳皮質、特に前頭極をふくむ前頭前野が重要な役割を果たすのではないかとこれまでの研究で示唆されている。

2. 研究の目的

(1) ニホンザルを用いた意思決定課題の学習と神経活動

大脳基底核の入力部に位置する線条体において、これまで刺激に基づく報酬予測(Cromwell & Schultz 2003)や、指示された行動に基づく報酬予測(Kawagoe et al 1998)、行動選択肢の報酬予測

(Samejima et al 2005) などが報告されている。複数の選択肢に基づいて、行動を選択する過程に、大脳皮質ばかりではなく、大脳基底核が関与すること、特に癖のような自動的な一連の行動をトリガーするような行動選択肢に関しての選択に関わる可能性が指摘されている。実際、中脳ドーパミンニューロンの異常によって、線条体の活動が異常をきたすパーキンソン病において、運動の開始や、一連の運動の実行が遅くなるなどの運動疾患が報告されている。また、大脳皮質から大脳基底核、視床を介して大脳皮質に戻る大脳皮質-大脳基底核ループ神経回路には、運動野からのループや眼球運動のループの他に前頭前野をふくむ連合野のループが存在する。このような解剖学的構造は、大脳基底核が運動の開始や選択ばかりではなく、視線の制御や注意、さらには作業記憶の操作などの認知的な操作に対する意思決定に関与することが考えられる。そこで、本研究では、大脳基底核の入力部である線条体、特に前頭前野からのループ回路が集中して存在する吻側の線条体において単一神経細胞記録を行動中のニホンザルから行い、その情報の性質を検討することで、認知的操作に対する意思決定や価値の計算が線条体で行われるかどうかを検証した。

(2) ヒトの購買行動を模した意思決定課題による探索傾向

2-(2)で指摘したように、報酬に基づく意思決定において、探索は学習に欠かすことの出来ない非常に重要な要素であり、我々の日常生活においても、常に探索による情報獲得は行われていると考えられる。近年、脳活動データをマーケティングなどの商品選択の予測情報として使う可能性に関する研究が行われるようになったが、適切な心理学的手続きや、脳活動の計測を行った論文として発表されていることは少ない。ブランド情報にもとづいて人々が商品を選択する際に、テレビCMや、様々なキャンペーンによって接触機会が増えたブランドを選択するためにつかわれる脳領域の報告がされている。しかし、古くから文化として確立されたコココーラのようなブランドとはことなり、新しく現れるブランドが受け入れられるかどうか、本来のマーケティングの予測には重要であると考えられる。新規ブランドの選択傾向は従来のマーケティングでは質問紙調査や模擬店舗、新規展開モデル店舗などの売り上げなどから予測されることが多いが、その顧客の性質について詳細に調べられることはなかった。本研究では、特に報酬に基づく意思決定における探索行動と、マーケティングなどで調査される複数の商品から1つの商品を選択する過程の類似性に注目し、同一被験者に2つの課題を行った際の行動傾向について調査を行う。その目的は「新規商品を選択する傾向は、生物学的に報酬に基づく意思決定を行う際により探索傾向と相関する」という仮説を検証することである。

3. 研究の方法と成果

(1) 認知的意思決定と強化学習モデル

複数の属性(色や形)を持つ図形を2種類提示し、その2つから1つを選択させる課題を遂行中のサルは線条体神経活動を記録した。このとき、色を4種類、形を4種類用意し、その組み合わせによる16種類の図形から2つをランダムに選択して提示し、選択させる。サルが選択した図形の色または形に応じて異なる量の報酬が得られるように課題を設定した。あるブロックでは、形に報酬が関連づけられ、別のブロックでは色に関連づけられる。ただし、そのブロックにおいて、どの色(または形)が多く報酬が得られるのかについては、毎回ランダムに変動する。すなわち、毎ブロックにおいて、サルはどちらの図形の色(または形)に報酬が関連しているか、またどちらの色(または形)を選択すればより多くの報酬が得られるのかは試行錯誤によって学習しなければならない強化学習課題に鳴

っている。このとき、それぞれの色(・形)に対して価値を学習し、どの形(・色)であるのかを無視して学習する、という学習方法をとれば、4種類の価値を少ないサンプルで学習することになるため、16種類の図形全て独立に学習するよりも、簡単に学習する事が出来る。そのような刺激の属性に対する価値の学習が起きることを、行動学的な解析によって明らかにした。サルは、そのブロックできわめて少ない試行しか経験していない図形であっても、過去に同じ色での報酬を経験していれば、より適切に選択出来ることをしめした。また、その行動選択は、色一価値、形一価値を学習して、その組み合わせによって図形の価値を学習するアルゴリズムでよく説明されることを示した。

次に、線条体の神経活動において、選択した図形の色(または形)にのみその発火頻度を変化させ、形(または色)の情報を表現しないような、神経活動を見いだした。脳の情報コーディングとして、特に視覚に関係する領域の神経活動では、色のみや形のみに変化を見いだす神経活動が報告されている。これらの情報を意思決定に反映させるときにこれらの神経活動が使われる可能性を示唆している。

(2) 強化学習課題における探索と新規商品選択

新規商品選択と強化学習の探索行動は同様の行動であるのか、また、それらの個人差は相関するのかどうかを検証するために、同一被験者集団に対してラベルのついたミネラルウォーターを選択してもらった課題と、4本腕山賊課題(Daw et al 2006)の両方を行っていただき、その行動傾向を強化学習モデルによって解析した。その結果、4本腕山賊課題の行動選択として、過去に得られた報酬履歴に比してより情報の少ない行動選択を行っていた被験者は、ミネラルウォーター選択課題においても、自らの知識として知らないブランドの商品を選択する傾向が高いことがわかった。このことは、個人差として、日常生活の中でも新しい商品を発見したときに、その商品を購入する層を、強化学習課題のような単純な学習コンテキストにおける探索パラメータによって、統計的に同定出来ることを示唆する。

参考文献

- [1] McClure SM, Li J, Tomlin D, Cypert KS, Montague LM, Montague PR, Neural Correlates of Behavioral Preference for Culturally Familiar Drinks, 44(2), 379-387 2004
- [2] Daw ND, O'Doherty JP, Dayan P, Seymour B, Dolan RJ, Cortical substrates for exploratory decisions in humans, Nature 441, 876-879, 2006.
- [3] Samejima, K., Ueda Y., Doya, K., Kimura, M. (2005). Representation of action-specific reward values in the striatum. Science, 310, 1337-40.
- [3] Nonomura S., Kato YX, Doya K, Tanji J and Samejima K, The neural activities in the rostral-striatum during the cognitive decision making, 第 21 回日本神経回路学会, 大会論文集 P1-14.

大脳皮質FSバスケット細胞から錐体細胞への抑制シナプス支配の機能的解析

研究代表：生理学研究所・准教授 窪田芳之

概要

ラットの大脳皮質 FS バスケット細胞から5層の錐体細胞への抑制性シナプス結合の解析を行った。錐体細胞の細胞体にシナプス結合している FS 細胞は IPSC が大きく、樹状突起のみにシナプス結合するものは IPSC が小さい事がわかった。さらに、細胞体から $40\mu\text{m}$ より遠くのみ神経支配する FS バスケット細胞は、錐体細胞から IPSC は検出できないことを認めた。その結合部分がシナプスを形成している事は、電子顕微鏡観察で確認した。これは、抑制性信号は $40\mu\text{m}$ よりは遠くに伝導しない事を示唆している。

Abstract

Inhibitory synapses are distributed widely on various parts of a pyramidal cell, but we do not know how far the inhibitory post synaptic current (IPSC) can be conducted from the generating site. To answer this question, we performed paired recordings of an FS and a pyramidal cell to measure the IPSC amplitude at the pyramidal cell soma, followed by LM/EM 3D reconstruction of the pairs to reveal synaptic location and junction structure. The number of contact sites made by an FS cell onto a pyramidal cell was 6–14 (10 pairs). Larger IPSCs were induced in pyramidal cells receiving somatic contacts (3 pairs; peak current, 14 - 90 pA). On the other hand, pyramidal cells with FS cell contacts only in dendrites had smaller IPSCs (5 pairs; peak, 6-12 pA). In the latter, the IPSC size was inversely correlated with the distance from soma to the most proximal contact. The IPSC was not observed in pairs that the most proximal contact located further than $40\mu\text{m}$ from soma (2 pairs), suggesting IPSCs hardly conduct more than $40\mu\text{m}$.

1. 研究開始当初の背景

大脳新皮質には、基本的な単位である局所神経回路(図1)が多数存在し、それらの活動が基となって、高次脳機能が具現する事がこれまでの研究で明らかである。例えば、2種類のバスケット細胞 (palvalbumin 陽性のFS バスケット細胞とCCK 陽性の大型バスケット細胞)の機能的な違いをあきらかにした一連の研究や(*Nature Neurosci*, 8: 1319 (2005), *Nature Neurosci*, 9: 807 (2006), *Nature Neurosci*, 10: 1128 (2007)), はじめてMartinotti 細胞の抑制性シナプ

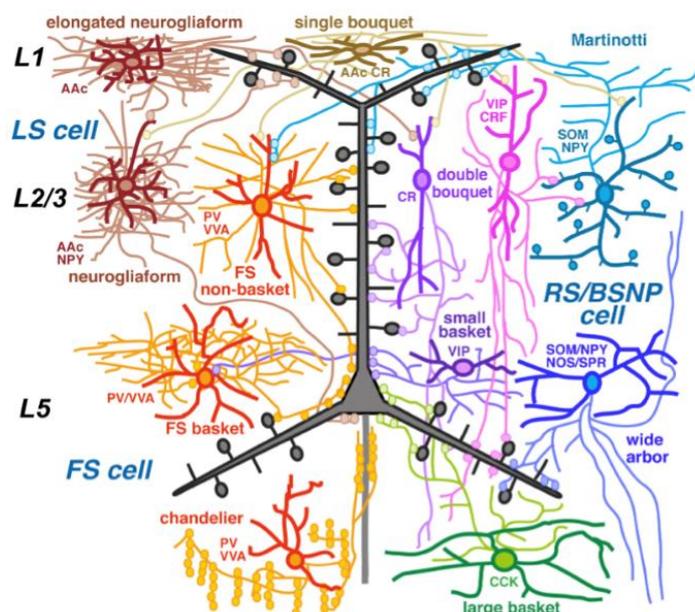


図1 大脳皮質局所神経回路

スの機能的なメカニズムを明らかにした研究等 (Neuron 53: 735 (2007)), 有用な研究が, 近年多く報告されている. とは言え, その回路がどのような配線構造をとるのか, どのような動作原理で機能するのか, 未だ理解されるには至っていない. その大きな理由として, 大脳皮質を構成する神経細胞の種類は20~30種類以上とかなり多く, 他の領域との入出力も豊富であることから, 非常に複雑な神経回路が構築されており, その複雑さ故に, 局所回路の動作原理が解明されるには, まだ数多くの課題が残されている. 現在, この研究領域で欠落しているデータは, 皮質の神経回路がどのようなwiringの集大成であるのか全くわかっていない事である. それを明らかにする上で, 最優先すべき課題として, 大脳皮質を構成する神経細胞の種類を特定し, それらで構成される局所神経回路の構築を, 解剖学および機能的に詳細に研究する事があげられる. 数多くの神経回路構造の中で, 本研究では, まず, 抑制性シナプスの機能に着目し解析したい. 具体的には, 皮質抑制性細胞の代表格であるFSバスケット細胞の抑制性神経終末が, 錐体細胞にコンタクトする位置やそのPSDの面積と, ターゲットの錐体細胞に起きるIPSCの大きさとの相関を解析する. そして, その解析結果を基に, シミュレーション解析を加える事で, 実際にどのようなメカニズムが隠されているのかを明らかにしたい.

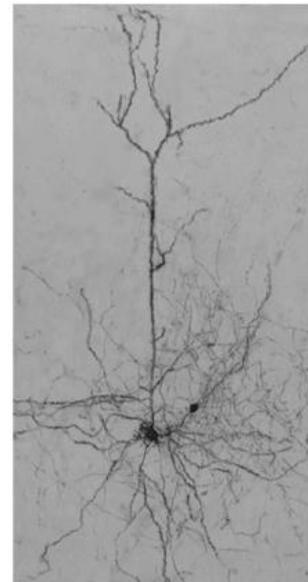


図2 ペア電気記録した皮質5層の錐体細胞(左)とFSバスケット細胞(右)

2. 研究の目的

大脳新皮質には, 基本的な単位である局所神経回路が多数存在し, それらの活動が基となって, 高次脳機能が具現する事がこれまでの研究で明らかである. その回路がどのような配線構造をとるのか, どのような動作原理で機能するのか理解されるには至っていない. 本研究では, その構成要素の中の抑制性シナプスの機能に関する解析を行う. 具体的には, 錐体細胞に対するFSバスケット細胞の抑制性シナプスの位置やそのPSDの面積と, ターゲットの錐体細胞に起きるIPSCの大きさとの相関を注意深く詳細に解析する. そして, その解析結果を基にシミュレーション解析を加える事で, 実際に皮質の抑制性シナプス機能にどのようなメカニズムが隠されているのかを解析したい. これまで, 抑制性シナプスの機能に関しては, その詳細はまだよく知られていない. 本研究は, 抑制性シナプスの機能的な理解を飛躍的に進めるデータを提供する.

3. 研究の方法と成果

(1) 方法

本研究では, まず予備実験の一貫として, ホールセル記録でバイオサイチンを注入した非錐体細胞をDAB反応で染色し, 電子顕微鏡用に組織処理した. その非錐体細胞の樹状突起の立体走行をNeuroLuciaで解析した上で, 電子顕微鏡で観察し, 連続切片の画像からそれらの樹状突起のセグメントを3次元再構築した. その樹状突起セグメントの細胞体からの距離, 断面積, 周囲長等を計測し樹状突起の形態的特性を解析した. その実験で連続電子顕微鏡切片画像からの樹状突起の3次元再構築法を確立した上で次の段階として下記の3つの実験を体系立てて行った. (実験A)皮質スラ

イスを使ったペアレコーディング実験で、ラットの頭頂皮質のスライスを使って、錐体細胞とFSバスケット細胞のペアレコーディング電気生理実験を行い、FSバスケット細胞から錐体細胞へのIPSCの記録を既に9例取得した。また、電気生理実験の後、固定液で組織固定し、ABC液で反応してからDAB処理し、記録細胞を染色し、電子顕微鏡観察用に樹脂に包埋した。(実験B)ペアレコーディング記録細胞のシナプス結合部位を、電顕を使って詳細に観察し、シナプス結合部分の面積を測定した。実験AとBから、シナプス結合単位面積あたりのIPSCの電荷量(Q)を算出した。(実験C)「Neuron」を使ったシミュレーション解析により、実際に、実験Aのペアレコーディング電気生理実験で得られたペア細胞の形態や、実験Bで測定したシナプス結合サイトの面積等の情報を正確に反映したそれぞれのペア細胞を神経細胞のシミュレーション解析ソフト「Neuron」に再現した。そして、実験Bで算出したシナプス結合単位面積あたりのIPSCの値を各シナプスに当てはめて、錐体細胞の細胞体に認められるIPSCを解析した。

(2) 成果1 FS細胞から錐体細胞への抑制の様式

錐体細胞の細胞体から40 μ mより遠くにシナプス入力するFSバスケット細胞の抑制性シナプスによるIPSCは細胞体では検出できない事がわかった(図3)。また、そのシナプス結合部分を電子顕微鏡で観察し、シナプス結合を一部で確認したが、細胞体付近ではシナプス結合は比較的大きな面積であったが、細胞体から遠くにあるシナプスは小さい面積での結合が認められた。今後、解析事例を増やしてデータを堅固なものに仕上げたいと考えている。

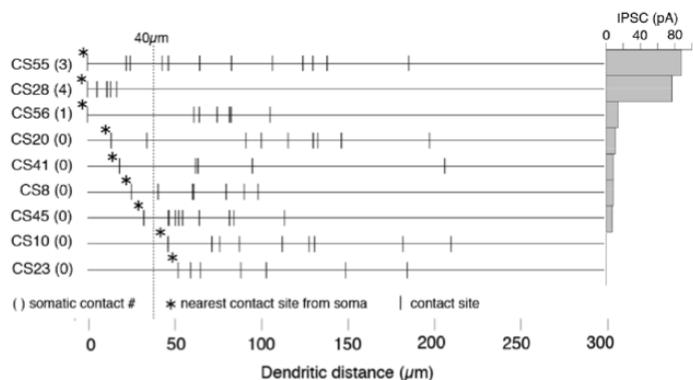


図3 FS細胞から錐体細胞へのIPSCとシナプスの位置の関係

(3) 成果2

樹状突起の形態の普遍原理

電子顕微鏡連続切片3次元再構成法を使って、4種類の形態が違う大脳新皮質介在ニューロン(非錐体細胞)の樹状突起の形を詳細に解析したところ、4種類の細胞に共通する3つの原理が明らかになった。一つ目は、樹状突起の太さは、その樹状突起が長ければ長い程太い、つまり、遠くの信号を伝える樹状突起はより太くより信号を伝えやすくなっている(図4)。樹状突起に入る信号の大き

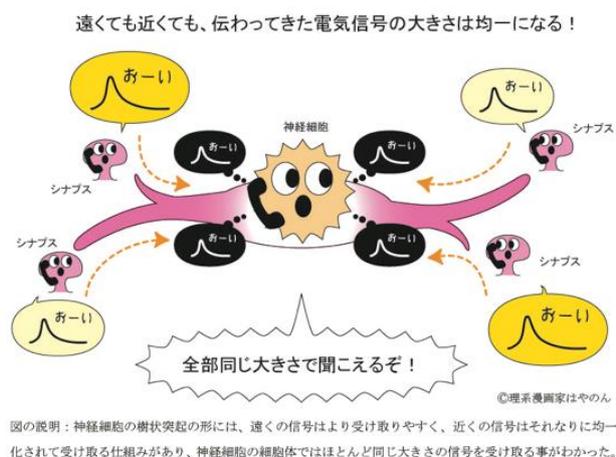


図4 樹状突起の太さの法則が示す機能的な意義

が均一化されて細胞体で受け取れるように工夫されているわけである。二つ目は、樹状突起の分岐点では、分岐前の断面積と分岐後の断面積の合計が一致している事である。三つ目の原理として、樹状突起の断面は、細胞体に近い太い部分ほど、より扁平な楕円形である事がわかった。

参考文献

- [1] Kubota Y, Karube F, Nomura M, Gullledge AT, Mochizuki A, Schertel A and Kawaguchi Y
Conserved properties of dendritic trees in four cortical interneuron subtypes
Scientific Reports, 2011, vol 1, 89,
- [2] Morishima M, Morita K, Kubota Y, Kawaguchi Y
Highly Differentiated Projection-Specific Cortical Subnetworks
J. Neuroscience, 2011, 31(28):10380-10391
- [3] Chen JL, Lin WC, Cha JW, So PT, Kubota Y and Nedivi E
Structural basis for the role of inhibition in facilitating adult brain plasticity
Nature Neuroscience, 2011, 14, 587-594
- [4] Kubota Y, Shigematsu N, Karube F, Sekigawa A, Kato S, Yamaguchi N, Hirai Y, Morishima M,
Kawaguchi Y
Selective Coexpression of Multiple Chemical Markers Defines Discrete Populations of Neocortical
GABAergic Neurons
Cerebral Cortex, 2011, 21(8) 1803-1817

行動開始に伴う海馬と大脳皮質のマルチニューロン活動遷移

研究代表: 玉川大学脳科学研究所・教授 磯村宜和

概要

本研究では、行動発現の際に大脳皮質の運動野や海馬における神経細胞の集団活動の遷移状態をマルチユニット記録法により理解することを目指した。頭部を拘束したラットに前肢の運動課題を効率よく訓練し、運動発現中に大脳皮質運動野の細胞活動をマルチユニット記録法や傍細胞記録法により解析して、皮質内回路における運動情報の処理過程を考証する独自の研究手法を開発した。また、海馬における同期的オシレーション現象に GABA 作動性の介在細胞が関与することも解明した。

Abstract

In this study, we aimed to examine multineuronal activity in association with motor behavior in the motor cortex and hippocampus of the task-performing rats. To address this issue, we established a new experimental approach to examine motor information processing in the cerebral cortex, using multiunit (and juxtacellular) recordings from head-fixed rats performing a forelimb movement task. Also we showed the cellular mechanism of synchronous oscillations through GABAergic transmissions by hippocampal interneurons.

1. 研究開始当初の背景

(1) 脳活動の測定に適したラットの行動実験

従来、頭部固定状態でラットなどのげっ歯類に前肢を使ったレバー押し課題を学習させることは、数か月以上の期間を要して大変困難であるとされてきた。しかし、行動中のラットの脳活動を電気生理学的に記録するためには、ラットが頭部を固定された状態で効率よく行動課題を学習できる行動実験系を確立することが不可欠である。そこで、従来の発想を転換した新しい行動実験系の開発が望まれていた。

(2) 行動中のラットにおける大脳皮質の神経活動

これまでに、頭部拘束下のラットが前肢の自発性(内発性)運動を発現中に大脳皮質の運動野の細胞活動をマルチニューロン記録法や傍細胞(ジャクスタセルラー)記録法により解析して、皮質内回路における運動情報の処理過程を考証する研究を進めてきた[1]。運動野では、2層から6層までのすべての皮質層において、興奮性の錐体細胞は運動の保持、準備、開始、実行の各局面で多様に発火活動が上昇するが、主要な抑制性の介在細胞であるバスケット細胞などは運動の実行時に活動が上昇する。

このように、運動中に運動野の神経細胞が活動するのは当然ではあるが、この運動課題は一定時間の静止後に特定の行動をとれば報酬を獲得できるオペラント学習課題でもあるため、海馬においては思考(注意)に関連するシータ波や報酬に関連するリップル波が観察されることが期待される。し

かしながら、海馬では運動の準備、開始、実行の局面にそれぞれ対応する集団活動の遷移状態や他領域との相互作用を見出す試みはほとんどなされていなかった。

(3) 海馬における同期的オシレーション活動の仕組み

海馬ではシータ波、ガンマ波、リップル、てんかんなどの同期的オシレーション活動が頻繁に観察される。ところが、その詳細なメカニズムは様々かつ複雑であり、十分に解明されたとは言えなかった。研究代表者らは、ラットの海馬のスライス標本をもちいて、てんかん発作様の後発射活動の発現機構を調べてきたが[2]、特に細胞間同期における介在細胞の役割についてはあまり理解が進んでいなかった。

2. 研究の目的

(1) 高効率な頭部固定ラットの行動実験の確立

頭部固定条件下において、ラットが前肢を使ったレバー押し行動課題を効率よくオペラント学習するために、レバー部(オペランダム)と報酬(強化子)の供給部(スパウト)を合一化した「スパウトレバー(spout-lever)」を考案した。本研究では、このスパウトレバーを活用した行動実験系を導入し、その有効性を評価した。

(2) 運動発現に関連する運動野活動の解析

上記のように、前肢を使ったレバー押し行動を評価する行動実験系を利用して、前肢の運動を発現中に大脳皮質の運動野や海馬からマルチニューロン記録と局所フィールド電位記録を試みて、運動発現に関する神経細胞活動の詳細を解析することを目指した。

(3) 海馬における発作様後発射の同期的発火に関与する介在細胞の同定

さらに、ラットの海馬スライスにおいて、高頻度電気刺激により誘発される同期的オシレーション活動(発作様後発射)の発生中に、海馬CA1領域の錐体細胞のグルタミン酸作動性伝達と介在細胞のGABA作動性伝達がどのような挙動を示すかを電気生理学および形態学的に解析した。

3. 研究の方法と成果

(1) スパウトレバー行動実験装置の開発

頭部を固定したラットに前肢を使ったスパウトレバー操作課題をオペラント学習させて、前肢の巧緻運動(skilled movement)の遂行を評価した[3]。このスパウトレバー行動実験装置をもちいると、頭部を固定されたラットは、聴覚刺激に応答して(外発性運動開始)右の前肢でスパウトレバーを引く操作をわずか数日以内で学習することができた。この外発性運動開始の行動中のラットでは、一次運動野からの安定したインビボ・ホールセル記録が可能であり、実際に運動に関連した運動野細胞の膜電位変化を観察できた。次に、すでに外発性運動開始を学習し終えたラットをもちいて、聴覚刺激がなく自らのタイミングで(自発的に)スパウトレバーを操作する内発性運動開始の試行もランダム

に混ぜて遂行させたところ、ラットは遅滞なく外発性、内発性運動開始ともに遂行することができた。さらに、別の聴覚刺激ではレバーを保持して応答しない試行も学習させたところ、約半数のラットが1日程度で遂行することが可能になった (Go/No-go 弁別課題)。このように、スパウトレバーをもちいた前肢の行動課題は頭部固定ラットの学習の過程を評価する効率的な行動実験系であることを示すことができた[3]。

(2) 運動発現中のガンマ活動とシータ活動のカップリング

運動の発現には、運動の準備と実行の過程が進むことが不可欠である。しかしながら、この各過程に応じた一次運動野における神経細胞の集団的活動については不明な点が多い。そこで、頭部を固定したラットを使って、報酬指向的な前肢の運動を発現させたときの運動野の神経細胞の発火活動、ガンマ波活動、シータ波活動の間の関係を調べた[4]。まず、運動の保持・準備の過程では、局所フィールド電位上にも発火活動にも 40Hz 程度の遅いガンマ波活動が観察された。運動の実行の過程では、80Hz 程度の早いガンマ波活動が観察された。興味深いことに、これら2種類の異なるガンマ波活動は、より緩徐なシータ波活動と異なる位相でカップリングしていることが見出された。運動野の浅層の神経細胞は、このシータ波活動とほぼ同様の位相で発火するが、深層の神経細胞は様々な位相で発火することも示された。これらの結果は、運動野における2種類の異なるガンマ波活動とシータ波活動のカップリングの動的変化が運動の保持・準備と実行に機能的な関与をしていることを示唆している。また、このような同期的オシレーション活動のクロスカップリングは大脳皮質のコーディングに関わる一般的性質である可能性も考えられる[4]。

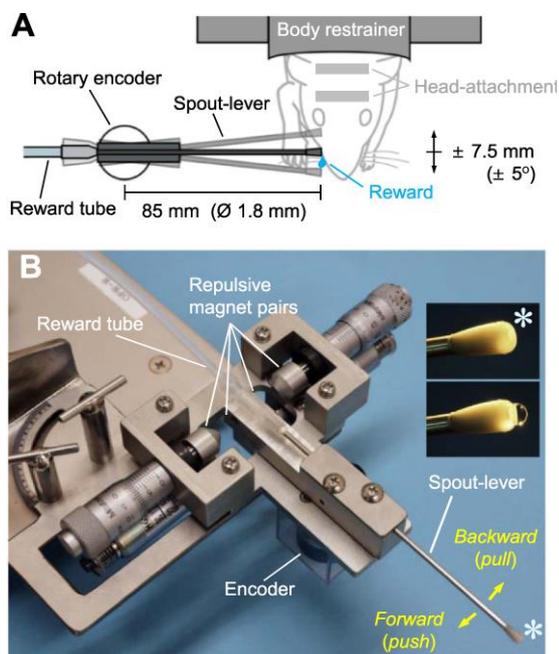
(3) 成熟海馬の fast-spiking(FS)介在細胞によるてんかん発作様前駆活動

海馬では様々な種類の正常あるいは異常な同期的オシレーション活動が観察される。特に、海馬スライス標本にみられるてんかん様発作活動の実験モデルの多くでは、錐体細胞のグルタミン酸伝達がリズム生成と同期的発火に重要であると考えられてきた。しかしながら、グルタミン酸伝達が作動しない状態で、介在細胞がてんかん様発作活動を駆動する可能性があるかどうかは未知であった。そこで我々は、グルタミン酸受容体の拮抗薬の存在下で、ラットの海馬CA1スライス標本に高頻度電気刺激を与えたところ、錐体細胞にも介在細胞にもてんかん様発作の前駆活動 (prototypic seizure activity) と称すべき同期的発火活動を観察することができた [5]。この前駆活動は、GABA(A)受容体の拮抗薬やギャップ結合の阻害薬の投与で消失したが、代謝型グルタミン酸受容体や GABA(B)受容体の拮抗薬では影響を受けなかった。グラミシジン穿孔パッチクランプ記録や電位固定記録を使って、錐体細胞では前駆活動の周期ごとに「興奮性」GABA伝達を直接受けていることが示された。記録した細胞を形態学的に同定したところ、前駆活動の各周期で発火活動がみられた介在細胞のサブタイプは、ほとんどが海馬の錐体細胞層 s.pyramidale や上昇層 s.oriens に分布するバスケット細胞やシャンデリア細胞などの fast-spiking(FS)介在細胞であった。一方、O-LM 細胞やその他の介在細胞サブタイプは、前駆活動の駆動に本質的な寄与はないようであった。このような興奮性GABA伝達が駆動するてんかん発作様前駆活動は、生後3週目以降に観察することが可能となり、未熟な介在細胞による脱分極性GABA伝達による可能性は否定された。これらの結果は、FS 介在細胞から構成されるネットワーク単体でも興奮性GABA伝達(とギャップ結合)を介して電気

誘発性のもんかん様発作の同期的オシレーション活動を生成することが可能であることを示している。

参考文献

- [1] Isomura Y, Harukuni R, Takekawa T, Aizawa H, Fukai T (2009) Microcircuitry coordination of cortical motor information in self-initiation of voluntary movements. *Nature Neurosci* 12: 1586-1593.
- [2] Isomura Y, Fujiwara-Tsukamoto Y, Takada M (2008) A network mechanism underlying hippocampal seizure-like synchronous oscillations. *Neurosci Res* 61: 227-233.
- [3] Kimura R, Saiki A, Fujiwara-Tsukamoto Y, Ohkubo F, Kitamura K, Matsuzaki M, Sakai Y, Isomura Y (2012) Reinforcing operandum: rapid and reliable learning of skilled forelimb movements by head-fixed rodents. *J Neurophysiol* 108: 1781-1792.
- [4] Igarashi J, Isomura Y, Arai K, Harukuni R, Fukai T (2013) A $\theta - \gamma$ Oscillation code for neuronal coordination during motor behavior. *J Neurosci* 33: 18515-18530.
- [5] Fujiwara-Tsukamoto Y, Isomura Y, Imanishi M, Ninomiya T, Tsukada M, Yanagawa Y, Fukai T, Takada M (2010) Prototypic seizure activity driven by mature hippocampal fast-spiking interneurons. *J Neurosci* 30: 13679-13689.



【図】 スパウトレバー行動実験装置

- A) スパウトレバーと頭部固定ラットの空間位置関係
- B) 実際のスパウトレバー部(研究業績[3]より)

時系列信号によるコミュニケーションを司る神経情報表現の解明

研究代表者： 北海道大学大学院情報科学研究科・准教授 西川淳

概要

複雑な時系列信号によるコミュニケーションを司る神経メカニズムを解明するため、ジュウシマツの脳神経核 HVC から多数のニューロン活動を同時に計測し、脳内情報の流れや情報表現を可視化した。隠れマルコフモデルと変分ベイズ法を用いたニューロン間相互作用の時間ダイナミクスの新しい可視化法を提案し、歌刺激の系列に応じた状態遷移ダイナミクスを抽出した。音要素のランダム切り換え刺激に対する聴覚応答を計測し、その神経活動に少なくとも3つ前までの状態依存性を見出した。以上の結果は、音要素の時系列情報が HVC 局所回路内における多数のニューロン活動の時空間パターンによって階層的に表現されていることを示している。

Abstract

To understand the neural mechanism of vocal communication with complex sequential acoustic signals, we focused on the brain nucleus HVC in the Bengalese finch. We conducted multi-channel recording from HVC using a high-density silicon probe, and visualized local interaction and information coding in the microcircuit. We also proposed new method to extract state transition dynamics responded to song sequence using hidden Markov models and variational Bayesian estimation. Furthermore, we analyzed neural responses to random switching sequence of song elements, and revealed that the neural responses encoded sequences of multiple syllables (3 or more), suggestive of population coding of the hierarchical dependency according to song sequences.

1. 研究開始当初の背景

小鳥の一種であるジュウシマツの脳には、さえずり(歌)の生成・学習・認知に特化して発達した神経回路が存在しており、歌制御系と呼ばれている。中でも、HVC(皮質相同部位)、Area X(基底核相同部位)、LMAN(皮質相同部位)という神経核では特定の音要素系列に対して選択的に応答するニューロンが見つかり、時系列情報処理を主に担っていると考えられている[1,2]。しかしながら、各神経核の役割分担に関する知見が得られている一方で、単一の神経核内における時系列信号の情報表現やその処理メカニズムに関しては、その技術的困難さからほとんど分かっていなかった。

2. 研究の目的

本研究では特に HVC に注目し、微小領域に記録点を多数集めることのできる高密度シリコン電極(図 1A)を用いて、当該神経核内から多数のニューロン活動を同時に記録し、神経核内の情報の流れやその情報表現を可視化する解析方法を適用することにより、複雑な時系列信号によるコミュニケーションを司る神経メカニズムを解明することを目的とする。

3. 研究の方法と成果

(1) HVC 局所回路における相互相関解析

同時記録された全てのニューロンペアに対して相互相関解析を行い、統計的に有意な機能的結合を見出したペアを方向付きの矢印で結ぶことにより、自発活動における機能的ネットワークを抽出した(図1B). 同様に、自分の歌を順再生した際の聴覚応答における機能的ネットワーク(図1C)と逆再生した際の聴覚応答における機能的ネットワーク(図1D)を抽出したところ、生物学的に重要な聴覚刺激(自分の歌)に対する聴覚応答において機能的結合の数(リンク数)が有意に減少した. これは、HVC 内のニューロン集団が普段は同期しており、生物学的に重要な刺激が入ってきた時に選択的に非同期な状態へ遷移することを意味している.

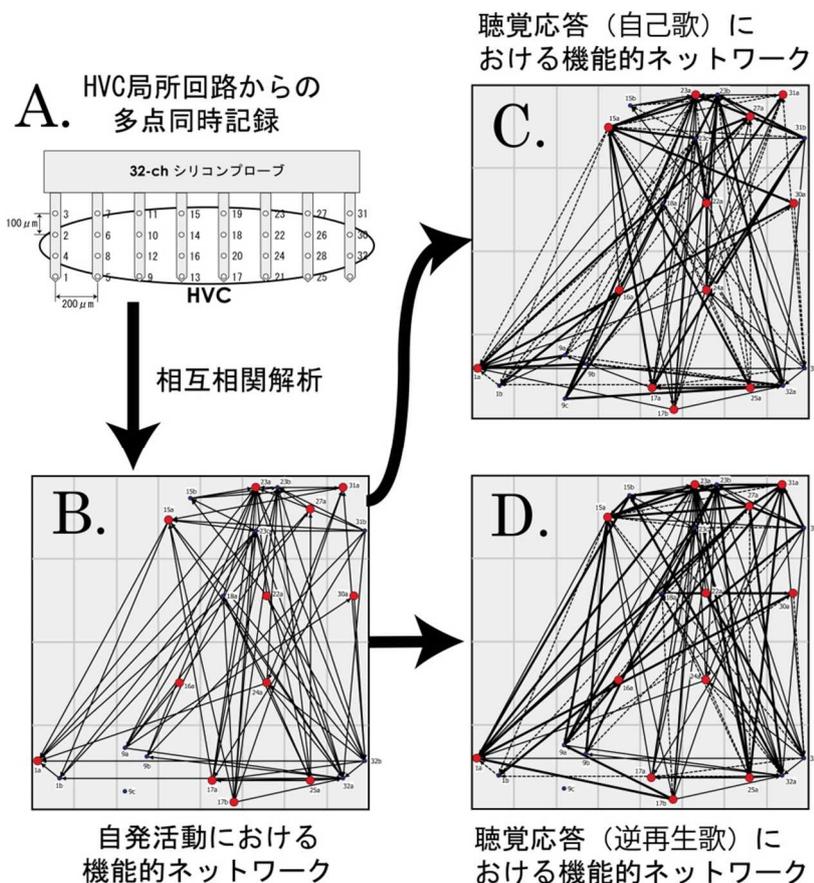


図1: ジュウシマツ HVC 局所回路内における機能的ネットワーク. A. HVCに刺入された32-chシリコンプローブの模式図. B. 刺激のない自発的な神経活動データから抽出された機能的ネットワーク. C. 自己歌(被験体の歌)に対する聴覚応答の神経活動データから抽出された機能的ネットワーク. D. 逆再生歌(自己歌を逆再生した音刺激)に対する聴覚応答から抽出された機能的ネットワーク. Bのネットワークを基準として、音刺激によって新たな結合が生じた場合に太い実線矢印を、既存の結合が消滅した場合には点線矢印で示した.

(2) 隠れマルコフモデルと変分ベイズ法による状態遷移ダイナミクスの抽出

上記の解析では、歌系列に応じた相関の時間ダイナミクスはつぶされてしまっているため、さらに、時間方向の状態遷移過程の抽出を行うための新しい手法を独自に開発した[3]. 具体的には、相関を考慮したポアソンスパイクモデルを考え、そのパラメータがマルコフ的に状態変化していくと仮定した. これを隠れマルコフモデルとして定式化し、確定的アニーリングを応用した変分ベイズ法を用いてメタパラメータの推定を行った. 提案手法を上記データに適用したところ、歌刺激の系列に応じた時間方向の状態遷移ダイナミクスの抽出に成功した(図2).

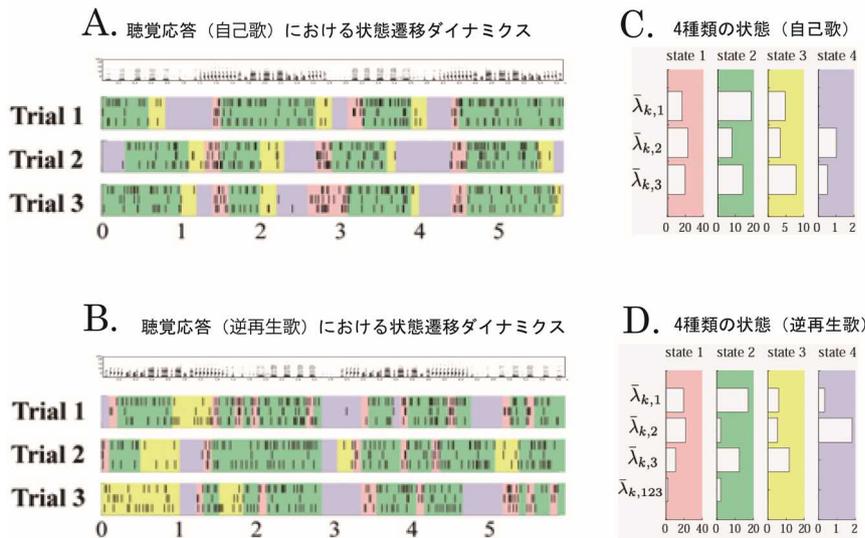


図2: 新しく提案した隠れマルコフモデルと変分ベイズ法を用いた多ニューロン活動の状態遷移ダイナミクス抽出の例. 自己歌に回答する神経活動(A), その活動パターン(B), 逆再生歌に回答する神経活動(C), そのパターン(D)を示している.

(3) in vivo におけるカントールコーディングの実験的検証

さらに、歌に含まれる音要素系列の神経情報表現を深い階層まで明らかにするために、音要素のランダム切り換え刺激を呈示した際の聴覚応答を計測した。音要素系列ごとに各ニューロンの平均発火率の時間変化を調べたところ、それぞれのニューロン活動には、少なくとも3つ前までの状態依存性が見出された(図3)。これは、理論家から提案されている時系列情報の動的コーディングであるカントールコーディングの必要条件の一つを満たしていることを示しており、今後の in vivo によるカントールコーディングの実験的検証へと繋がる重要な知見と言える[4]。

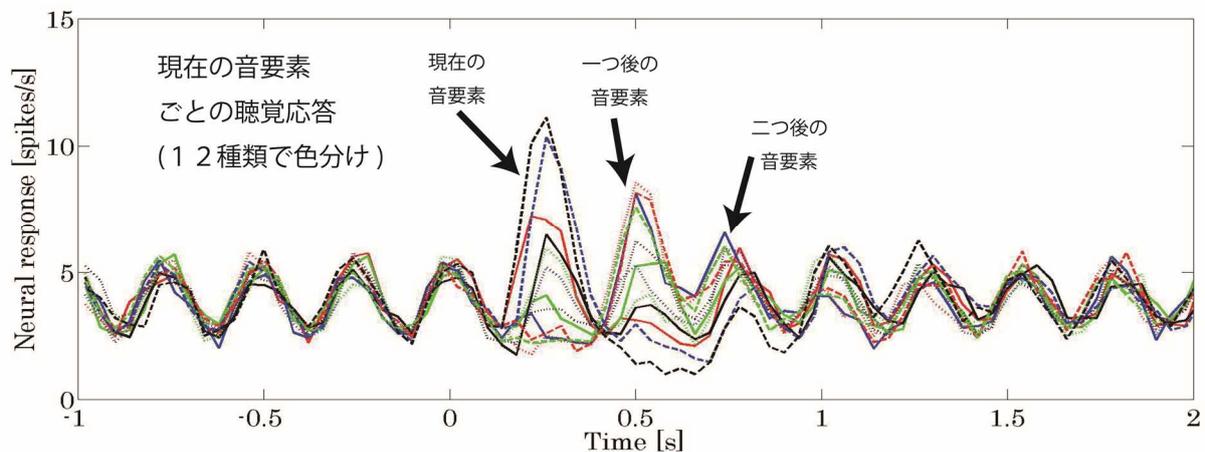


図3: ランダム切り換え刺激に対するHVCの単一ニューロン応答を音要素系列ごとに色分けした平均発火率の時間変動. 少なくとも3つ前までの状態依存性を有することが分かった.

次に、単一ニューロンの活動だけではなく、同時記録された多ニューロンの活動パターンに見られる状態依存性を解析するために主成分分析を施し、それぞれの系列への神経応答のパターンがどの程度オーバーラップするか調べた。その結果、多数のニューロン活動を用いても、各系列に対応

するクラスター間の分離が良くならないことが分かった。個々のニューロン活動を詳しく解析したところ、同時記録されたニューロンが非常に同期的であることが原因の一つとなっていることが分かった。

4. まとめと今後の展望

本研究では、複雑な時系列信号を用いたコミュニケーション司るジュウシマツの脳神経核 HVC に注目し、当該局所回路から多点高密度電極を用いて多数のニューロン活動を計測した。相互相関解析でニューロン間の相互作用を可視化したところ、生物学的に意味のある音刺激選択的に活動が非同期化することが分かった。また、時間方向の状態遷移ダイナミクスを抽出する新手法を提案し、同データに適用した。さらに、ランダム切り換え刺激を提示した際の聴覚応答を多点計測し、少なくとも3つ前までの状態依存性を発見した。

しかしながら、多ニューロン活動データを用いても、各音要素系列に対応するクラスター間の分離は改善しなかった。これは、同時記録されたニューロンの同期性が非常に強かったため、実効的な次元をかせぐことが出来なかったからであると考えられる。以上の結果から、ジュウシマツにおける時系列情報表現は HVC に限局するのではなく、他の脳領域と一体となって表現されていることが示唆された。例えば、RA, Area X, LMAN といった他の関連する脳領域からも同時に神経活動を計測することで、クラスター間の分離が良くなることが期待される。もしそういった結果が得られるのであれば、時系列信号の情報はジュウシマツにおいていくつかの脳領域で分散的に表現されているということが明らかになるだろう。

参考文献

- [1] R.H. Hahnloser, A.A. Kozhevnikov, and M.S. Fee, “An ultra-sparse code underlies the generation of neural sequences in a songbird,” *Nature*, Vol. **419**, No. 6902, pp. 65–70, (2002).
- [2] J. Nishikawa, M. Okada, and K. Okanoya, “Population coding of song element sequence in the Bengalese finch HVC,” *Eur. J. Neurosci.*, Vol. **27**, No. 12, pp. 3273–3283, (2008).
- [3] K. Katahira, J. Nishikawa, K. Okanoya, and M. Okada, “Extracting state transition dynamics from multiple spike trains using hidden Markov models with correlated Poisson distribution,” *Neural Comput.*, Vol. **22**, No. 9, pp. 2369–2389, (2010).
- [4] J. Nishikawa and K. Okanoya, “Cantor coding of song sequence in the Bengalese finch HVC,” *Advances in Cognitive Neurodynamics (III)*, Y. Yamaguchi (ed.), Springer, pp. 629–634, (2012).

バイオロジカルモーションの幾何学と脳内鑄型:刻印付け手順による研究

研究代表: 北海道大学・大学院理学研究院・教授 松島俊也

概要

バイオロジカルモーション(生物的運動BM)とは、身体の主要な関節点を捉えた単純な動画から、生き生きとした動物の姿が知覚されるという現象である。孵化直後のヒヨコを対象として、BM 選好性の発達過程を刻印付けとの関連に着目して調べた。その結果、孵化直後BM選好性は潜在しているが、刻印付けによって誘導発現することがわかった。さらに刻印付けの学習感受性期が甲状腺ホルモンによって制御されていることを見出した。

Abstract

Biological motion (BM) refers to a visual perception in which vivid image of animals is perceived based on a simple motion picture that depicts only a limited number of joints in terms of light points. Using domestic chicks as subject, we studied developmental processes of BM preference particular in its linkage to imprinting. We found that BM preference is innate but latent in chicks, and is induced through the course of imprinting. Furthermore, we found that the sensitive period of memory formation is controlled by thyroid hormone.

1. 研究開始当初の背景

(1) 生物的運動の知覚とその生得性

孵化直後のニワトリ雛(ヒヨコ)が生物的運動(BM)に対する選好性を備える、という発見はイタリアの心理学者 Vallortigara et al. (2005) [1]によるものである。BMという高度に社会的な視覚刺激に対する知覚能力[2]を、鳥という動物が備え、しかも生後の経験なく備えていることを示すものであり、社会関係を認知する機構の発達と起源に関して、重要な問題提起となった。

しかし、その結果は必ずしも再現性のあるものではなかった。遺伝的背景や実験的手続きのわずかな違いによって大きく結果が分散する傾向があった。さらに、ヒヨコには古くから知られている刷り込み(インプリンティング)[3]という現象があり、孵化後のわずかな時間でも、同時に孵化した他個体との接触を通してその視覚的特徴を学習し、よってBM選好性が生じる、という可能性が排除できなかった。つまり、BM選好性が速やかな刷り込み学習によって後天的に獲得された可能性があった。

さらに、生物的運動の持つ、幾何学的な諸特徴の中で、何が生物学的に重要な要素であるのか、この点についても網羅的な解析が不足していた。本研究では、刷り込み学習の機構の理解を深めることを通して、BM選好性の発達にとって必要かつ十分な生物学的条件を明らかにすることが、第一の目標とした。第二の目標は、BM選好性をもたらす光点動画の幾何学的特徴を、動物の示す行動から明らかにすることである。

(2) 社会採餌, 競争, 選択衝動性

古典的な最適採餌理論の下では, 採餌決定は餌報酬の期待利潤率によって一意に決まる[4], と考えられてきた. 利潤率とは, 得られる餌のエネルギー利得 e を投資した処理時間の総和 h で割った商, e/h である. つまり, e の大きな餌 (文字通り, 量が大きな餌) も h の小さな餌 (速やかに得られる, 近い餌) も, 利潤率が等しければ等価となる. 最適採餌理論は採餌決定を定性的によく説明するため, 行動生態学の規範的理論のひとつと見なされてきた. この枠組みの中では, 量を優先するか, 近さを優先するか, という問いは成り立たず, 異時点間選択における選択は無作為に等しいと想定されてきた.

しかし, 実際の動物は集団の中で採餌する. その結果, しばしば, きわめて厳しい餌資源をめぐる競争に投げ込まれる. 社会採餌[5]の下では, 妥当な採餌者は生産者 producer と搾取者 scrounger という二つの頻度依存的戦術に分化し, 二者が与える利潤率の等価点で均衡すると考えられている. 我々は既にヒヨコを対象として, 競争採餌 (社会採餌) の影響について検討してきた. その結果, 社会採餌の下では異時点間選択に影響を与え, 競争下で採餌を学習した個体は, 選択衝動性を高め, 「より近い餌」への選好性を高めていくことがわかった. 競争は忍耐を妥当に奪うのである.

競争的他者とは何だろうか. 孵化直後のヒヨコは, 採餌を競合する他者をいかなる視覚の手がかりによって知覚し, その結果, 脳内の報酬予期の神経表象はいかなる変化を強いられるのか. 本研究の第三の目標は他者知覚の神経機構を, 行動上の帰結と結びつけて明らかにすることである.

2. 研究の目的

(1) 刷り込み学習と感受性期の機構

刷り込み学習を, 古典的な範疇, つまり色に対する選好性の獲得を指標として定量化する. この色選好性は従来孵化後 1-3 日の間に暴露された対象の色によって形成され, その後 4 日を超えた経験は学習の対象にならないとされてきた. この学習感受性期を司る神経機構を明らかにする.

(2) 生物的運動に対する選好性の発達過程

刷り込み学習による色選好性の獲得は, 視覚刺激が運動することによって強められることが知られていた. 生物的運動 (BM) の知覚を与える視覚刺激に曝す学習過程が, BM 選好性を引き起こすか, その過程は刺激特異的であって色選好性の獲得と同様であるか, を行動学的に検討する.

(3) 報酬価値の神経表象に対する競争的他者による修飾作用

大脳線条体腹内側部・側坐核のニューロンは, 報酬と連合した視覚刺激の提示に対して一過的なバースト活動を示し, その発火頻度は予期される報酬の量, あるいは近さに応じて高まることが知られていた. 競争的他者の有無が, この予期報酬の表象を修飾するか, 自由行動下のヒヨコを用いた神経生理学的研究に基づいて検討する.

3. 研究の方法と成果

(1) 甲状腺ホルモンは刷り込み学習を強化するのみならず、孵化後の学習能を誘導することによって学習感受性期を制御している。[6]

網羅的なマイクロアレー解析によって刷り込み学習によって発現量が上昇する遺伝子群を解析した結果、数十個の候補遺伝子が見いだされた。その一つ *Dio2* は甲状腺が分泌する T4 (チロキシン) から 1 ヨード分子を取り去り、活性型の T3 (トリヨードチロニン) に変換する酵素である。In situ hybridization 法により *Dio2* 遺伝子を強く発現する組織を検討した結果、大脳背側部の IMM 領域を含む広範囲にわたり、血管内皮細胞が陽性であることが判明した。刷り込みは血管における T3 合成を高めることによって、脳内の T3 濃度を一過的に高めていたのである。なお、甲状腺の T4 合成も、孵化日前後をピークとして、孵化後は急速に低下することもわかった。

そこで、脳内に直接 T3 を投与することによってその濃度を人為的に高めたところ、孵化直後のヒヨコにおいて刷り込み学習を強化するのみならず、孵化後 4 日齢以後の(つまり、学習感受性期が閉鎖した後の)ヒヨコにおいても刷り込み学習を成立させることが判明した。さらに、孵化直後のヒヨコに暗黒下にて T3 を脳内投与する(あるいは全身投与する)ことによって、4 日齢における刷り込み学習の成績が向上することが判明した。実際、孵化直後の刷り込み学習の成立は、孵化 4 日後の新しい色選好性の獲得を促進させるため、学習感受性期は閉鎖していないことがわかった。

従来、学習感受性期は、孵化後の時間経過とともに避けがたく閉鎖すると考えられてきた。しかし、その是非を直接に検討することはなかった。感受性期の概念が執拗に我々の理解を拘束していただけだったのである。その背景には、刷り込みを特殊な学習のひとつと見なす枠組みがあり、我々の理解を束縛していたのである。

本研究の結果、刷り込みは、色選好性の獲得という学習の要素と、その後の学習能の誘導というメタ学習の要素と、その二つが同時に進行する過程であることが判明した。しかも、両者ともに脳内の血管系が学習のダイナミクスを統制する重要な要因として関与することが判明した。

(2) 光点動画は、それ自身が BM 性を持つか否かによらず、BM 選好性を誘導する。[7]

孵化直後のヒヨコに、BM 性をもつ光点動画と、類似しているが BM 性を持たない(自由に動く関節点を表現しない)光点動画と、その二者択一テストを実施した所、先行研究の結果に反した結果が得られた。まったくのナイーブなヒヨコは BM 選好性を示さないのである。そこで、様々な性質の光点動画を作成して、数時間にわたり刷り込みと同様の手順によって暴露し、その後に BM 選好性を体系的に調べた。その結果、振り子のように単純な光点動画であっても、あるいは光点同士の幾何学的な配置の拘束の無い、ランダムに動き回る光点の集合からなる動画であっても、良い。動画に曝されたヒヨコは、特に雄の場合、BM 選好性を獲得していた。

すなわち、孵化後のヒヨコが示す BM 選好性は、生得的にそなわった特性であって、学習によって獲得されるものではない。しかし、BM 選好性が行動の上に発現するためには、視覚経験、特に動画に暴露される必要があるのである。つまり、これは発生学における誘導現象と同様である。行動特性は内発的・生得的であるが、非特異的な刺激に曝される必要があり、その刺激は行動特性を教示的に方向付けはしない。単に許容的に誘導するのみである。

さらに、BM 性を備えた光点動画が、その色特徴をより強く記憶させ、記憶形成に対して促進的に

働くか、検討した。その結果、被験者であるヒヨコの運動量の多寡に応じて、その作用が異なるという複雑な結果となった。刷り込みの過程で長い距離を追随歩行する個体では影響が認められないものの、追随歩行運動量の小さな個体では明確な促進作用が見いだされた。この機序と適応的意義については、現在も未解決であり、検討中の課題である。

(2) 競争的他者の視覚的提示は内側線条体・側坐核ニューロンの手がかり提示期における一過的興奮性応答を選択的に抑制する。[8]

自由歩行下のヒヨコの脳にマイクロドライブを装着した可動式多電極を慢性的に植え込み、単一ニューロン活動の記録解析を行った。特定の色手がかりを与え、ついでみ動作をオペラントとして要求し、遅延報酬として粒数(量)と遅延時間(近さ)を統制した餌報酬を与える課題を習得させ、その後のヒヨコの行動と神経活動を検討した。

内側線条体と側坐核より神経活動を導出した。この領域は、局所的な破壊によって、選択衝動性を高め、より近い餌に対する選好性が高まることが判明している。さらに神経活動の解析に関する先行研究によって、この部位のニューロンは、(1)餌報酬と連合した視覚刺激の提示に対して(手がかり期)、(2)餌報酬の供与の直前に(遅延期)、(3)餌報酬の提示に対して(報酬期)、3期にわたる興奮性の活動を示すことがわかっていた。特に、(1)手がかり期の活動は、その後に得られる報酬の有無・量・時間的な近さに応じて活動を高めること、有無を符号化するもの、量を符号化するもの、近さを符号化するものが、この領域に分散的に表現されていることが判明していた。

競争的他者が同時に採餌を行う状況を競争条件として、単独で採餌する条件と比較を行った。その結果、競争は手がかり期の活動を抑制するものの、遅延期および報酬期の活動には有意な作用を示さなかった。競争は視覚的手がかりから報酬を予期する過程に介入し、これを減弱する。この予期の減弱が、選択衝動性に対して因果的な関係を持つか、これが今後の検討課題である。

以上の結果は、同種他個体の知覚が学習によらず、生得的な過程によって発現する事、発現の過程は学習(経験による特異的な選択性の獲得)を必ずしも必要とせず、むしろ発生現象における許容的誘導現象と同様のものと見なしうることを意味する。さらに、他個体の存在は脳内の報酬系に直接に介入し、経済的意思決定に適応的な認知バイアスを生成する。その機構を理解するためには、比較認知科学・行動生態学・神経経済学・生化学という学問領域の統合的運用が必要となる。真の総合化のためには、なお多くのピースが欠けており、全体像の把握にはまだ遠い。

参考文献

- [1] Vallortigara G., Regolin L., Marconato F. (2005), Visually inexperienced hicks exhibit spontaneous preference for biological motion patterns. *PLoS Biology* 3:1312-1316
- [2] Johansson G. (1973), Visual perception of biological motion and a model for its analysis. *Perception & Psychophysics* 14:201-211
- [3] Horn G. (2004), Pathways of the past: the imprint of memory. *Nature Review Neuroscience* 5:108-120.

- [4] Charnov E.L. (1976), Optimal foraging: the marginal value theorem, *Theoretical Population Biology* 9:129–136.
- [5] Giraldeau L.-A., Caraco T. (2000), Social foraging theory. New Jersey: *Princeton University Press*.
- [6] Yamaguchi, S., Aoki, N., Kitajima, T., Iikubo, E., Katagiri, S., Matsushima, T., Homma, K.J. (2012), Thyroid hormone determines the start of the sensitive period of imprinting and primes later learning. *Nature Communications* (3:1081 | DOI: 10.1038/ncomms2088).
- [7] Miura, M., Matsushima, T. (2012), Preference for biological motion in domestic chicks: sex-dependent effect of early visual experience. *Animal Cognition* 15: 871–879.
- [8] Amita H., Matsushima T. (2014), Competitor suppresses neuronal representation of food reward in the nucleus accumbens/medial striatum of domestic chicks. *Behavioural Brain Research* 268: 139–149.

未知環境とのコミュニケーションによる意義情報の抽出と新たな知識の生成過程

研究代表：京都大学・准教授 小川 正

概要

未知問題を解決するためには、「試行錯誤的な探索行動」と「知識にもとづいた解決」の両方の方略を適切に用いる必要がある。2種類の方略の適切な制御を司っている神経機構を明らかにするため、「試行錯誤を伴う視覚探索課題」をサルに遂行させ、前頭皮質（運動前野背側部）からニューロン活動を調べた。前頭野ニューロンは、解決行動が失敗した場合の原因特定と、失敗原因に依存した次試行での方略決定において重要な役割を担っていることが示唆された。

Abstract

When encountering a novel problem, individuals explore a solution by testing the effects of potentially relevant options (exploration). Once identifying an appropriate option, they repeatedly choose the option by exploiting their knowledge (exploitation). To address the neuronal mechanisms underlying a switching between these strategies, we recorded single-unit activity from the dorsal premotor cortex (PMd) while monkeys performed a trial-and-error visual search task. We found that PMd neurons determined whether the erroneous trials were derived from the subject (endogenously induced error) or due to changes in the relevant color (exogenously induced error), and then determine whether the search strategy should be switched based on the factor that led to erroneous trials, suggesting that PMd neurons play a key role in integrating neuronal signals for switching exploratory/exploitative strategy into the internal neural representation of current strategy state to control strategy-guided behavior.

1. 研究開始当初の背景

ヒトや動物は未知の環境下にあっても、「環境との試行錯誤的な相互作用を行なう」ことによって、生存するための「新しい知識を確立する」ことができる。例えば、初めて遭遇した未知の森で、さまざまな色の木の実を食べたとき、「赤色の実は美味しかったが、他の色の実は不味かった」という試行錯誤的な経験を繰り返せば、最終的には「赤い色→美味しい」という新たな知識を獲得して、最初から赤い色の木の実を探すようになるだろう(図1)。

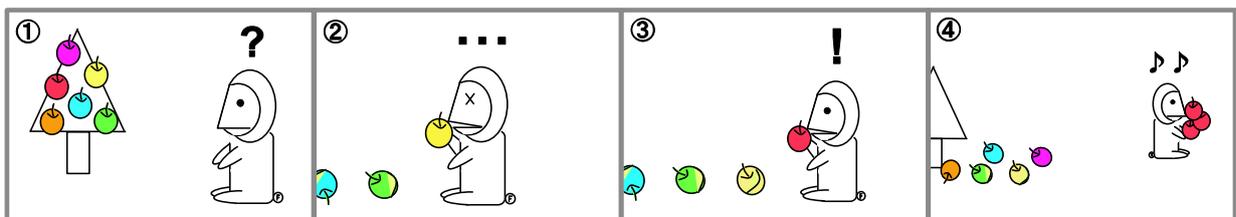


図1 未知問題に対処するための「試行錯誤による探索」と「知識による解決」

このような柔軟な適応行動は、「環境との試行錯誤的な相互作用(刺激情報—行動選択—結果)から、意義のある感覚情報を環境から見出す過程」から、「意義のある情報が何であるかを知識として確立し、試行錯誤なしに解決行動を行う過程」への遷移と見なせる。最も知的・創造的な脳活動は後半過程ではなく、環境との試行錯誤的コミュニケーションを行う前半過程にあると考えられるが、その神経機構の理解は十分に進んでいない。

環境から与えられる有意義な刺激情報を行動に結び付ける学習には、前頭連合野(特に外側部)の働きが重要であることが破壊実験から知られている(e.g. Buckley et al. Science, 2009)。しかしながら、先行研究ではそのような学習が十分に進んだ後でのニューロン活動のみが調べられ、試行錯誤によって新しい知識を確立している状況下でのニューロン活動は調べられていなかった(e.g. Hoshi et al. Nature, 2000; Sakagami & Niki, Exp Brain Res. 1994)。また、刺激と行動を結びつけるルールが明示的に教えられず、試行錯誤的な選択行動が要求される「ウイスコンシン・カード分類課題」をサルに遂行させた先行研究が存在するが、それらの研究では課題ルールが2種類に減らされていたため、1回の失敗試行で正しい課題ルールを推定することができ、試行錯誤が必要とされる行動課題にはなっていなかった(Mansouri et al. J Neurosci. 2006; Kamigaki et al. Neuron, 2009)。

2. 研究の目的

上述したように、未知問題の解決にあたっては、「試行錯誤による探索」と「知識による解決」という2つの異なる方略を適切に使い分けなければならない。本研究では、このような方略の使い分け(遷移)を適切に制御する神経機構を前頭皮質に求め、単一ニューロン活動のレベルでシステムの理解を目指すことを目的とする。

具体的な目的として、問題解決のための試行錯誤を積極的に必要とする「試行錯誤を伴った視覚探索課題」を実験動物(ニホンザル)に遂行させて前頭皮質から単一ニューロン活動を記録する。課題では目標刺激を選ぶための探索ルール(全部で6種類ある)を明示的に教示しないため、サルは試行錯誤的な行動とそれに対する結果から目標刺激を決めているルールを自分自身の力で見出すことが要求される。「ルールが未知であるため試行錯誤による探索が必要な期間」と「ルールが既知となり知識による解決が可能な期間」で前頭皮質のニューロン活動がどのように変化するのか明らかにし、未知問題に対処するための神経機構を明らかにすることを試みる。

3. 研究の方法と成果

(1) 「試行錯誤を伴った視覚探索課題」における行動データ

図2に実験で用いた行動課題を示す。この課題では、各試行は注視点の呈示により始まり、6色の刺激から成る刺激アレイの呈示後、注視点の消灯を合図にサルは刺激アレイの中から目標刺激を選択しなければならない(図2A)。重要なポイントは、6色のうち1色が目標色となるが、目標色は明示的には教示されず、成功試行の場合は報酬(ジュース)と高音ビーブ音が、失敗試行の場合は低音ビーブ音のみがフィードバックとして与えられる。このため、サルはフィードバックによって、目標色をを試行錯誤的に見出すことが求められる(図2B)。目標色を決定するルールは、20~40回の成功試行後に教示なく変更される。図3に、実際の実験で得られた行動データを示す。目標色が更新されるとサルは試行錯誤で色々な刺激職を選ぶが(trial and error [TE] phase)、偶然に目標色を選択

して成功試行となると、その後は高い成功率で目標色を正しく選択している (knowledge-based [KB] phase).

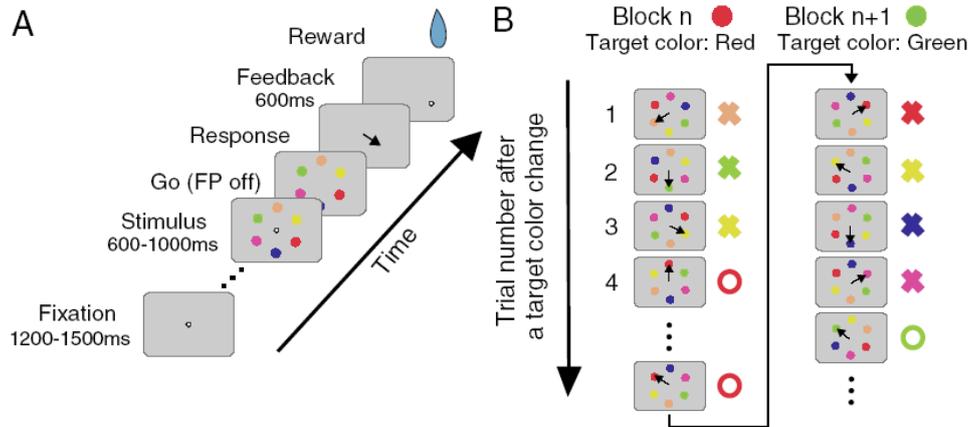


図2 試行錯誤を伴った視覚探索課題

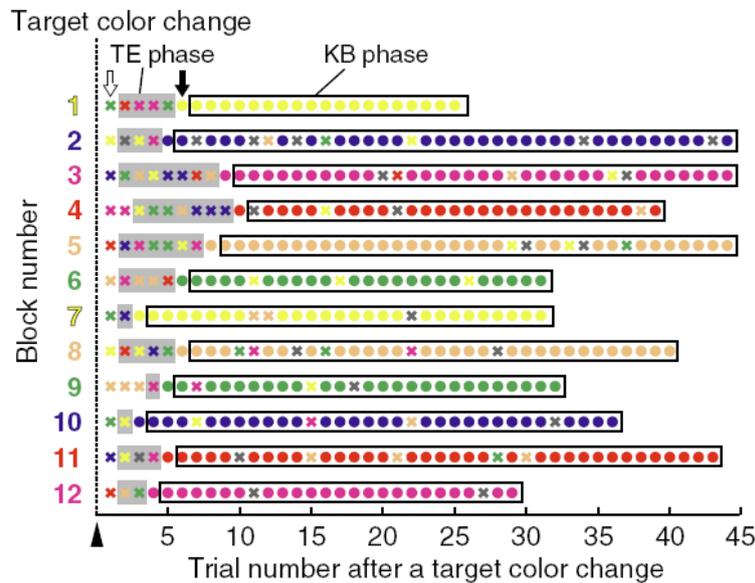


図3 「試行錯誤を伴った視覚探索課題」で得られた行動データ

(3) 前頭野皮質におけるニューロン活動

「試行錯誤を伴った視覚探索課題」を遂行中のサル前頭野皮質 (運動前野背側部) からニューロン活動を記録した。図4に代表的な活動を示した2つのニューロン例を挙げる。最初の例は (cell_1), 試行錯誤による探索期間 (TE phase, 青線) と、知識による解決期間 ([KB phase, 赤線) で活動を変化させるニューロンであり、活動強度の差異は注視開始後から徐々に増大し、サッカード眼球運動で直前で最大となる。このようなニューロン活動は、色刺激を選ぶための方略状態を表現している可能性が考えられる。

次の例では (cell_2), 目標色が変更されたために生じる不可避の失敗試行において、サッカード眼球運動後に一過性の大きな活動が生じている (オレンジ線)。しかしながら、同じ失敗試行であっても試行錯誤期間では生じておらず (青線), 失敗試行の要因による違いを区別している。このことか

ら、観察された一過性の大きな活動は予期しない失敗(すなわち、環境変動による目標色変化)を検出していると推測され、次試行における方略の切替え(「知識による解決」から「試行錯誤による探索」への遷移)に貢献していると考えられる。

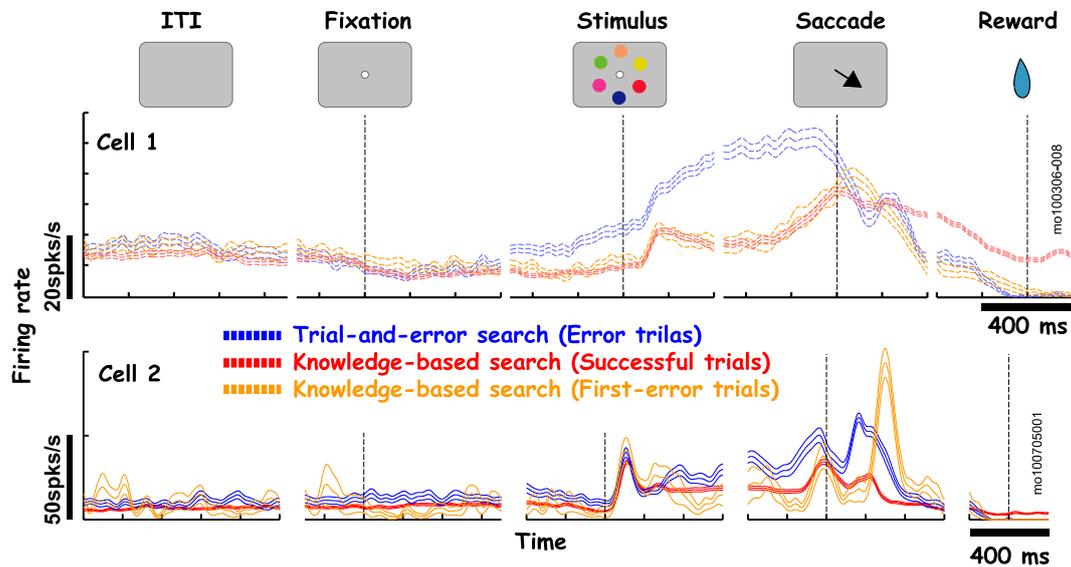


図4 前頭皮質(運動前野背側部)から記録されたニューロン活動の例

このように運動前野背側部のニューロン活動は、「現在使用するべき方略の種類」と「方略を切替えるべきタイミング」を表現している可能性が考えられた。これらの情報表現が存在すると、未知問題に対処するために、2種類の方略を適切に切替えるための制御系を構築することが可能になる。図5は、そのような制御系を状態遷移図で表したものである。

本研究で得られた結果から、未知の問題状況に対処するために「試行錯誤による探索」と「知識による解決」を適切に制御するために必要な情報が運動前野背側部を含む神経ネットワークによって表現されていること、及び、それらの情報表現が簡単な状態遷移図で設計される(すなわち、実際の神経ネットワークで実装可能な)制御系によって生起できることが示された。



図5 「試行錯誤による問題解決」過程を制御するための状態遷移図

参考文献

- [1] Fujimoto A, Nishida S, and Ogawa T*. Dynamic alternation of primate response properties during trial-and-error knowledge updating. *Robotics and Autonomous Systems*, 60: 747-753, 2012.
- [2] Fujimoto A, Nishida S, and Ogawa T*, Saccade Dynamics in Error Trials During Visual Search, In: *Advances in Cognitive Neurodynamics (III)*, Springer Dordrecht, 575-581 2013.

下垂体後葉ホルモンによるコミュニケーション促進機構

研究代表: 自治医科大学医学部・教授 尾仲達史

概要

下垂体後葉ホルモンであるオキシトシンを産生するニューロンは、主に視床下部に存在し、その他、分界条床核にも存在する。このオキシトシンの脳における機能として、社会的な行動を促進する作用があることが提唱されている。本研究は、社会行動をしているときに視床下部のオキシトシン産生ニューロンが活性化されていることを見出した。また、RF 関連ペプチドがオキシトシン放出を促進させることを示唆した。

Abstract

Oxytocin-, a neurohypophysial hormone-, synthesizing neurons are localized in the hypothalamic paraventricular and supraoptic nuclei, and in the bed nucleus of stria terminalis. Oxytocin is proposed to play an important role in the control of social behavior. In this study, we showed that social stimuli activated oxytocin-synthesizing neurons in the hypothalamus and suggested that RFamide related peptides facilitate oxytocin release.

1. 研究開始当初の背景

(1) シナプスの細胞接着因子 CADM1 の社会的行動における役割

社会的コミュニケーションに障害がある自閉症スペクトラム障害の患者では、他個体を区別して認知するための記憶、すなわち、社会記憶が低下している。一方、CADM1 分子は、シナプスの細胞接着因子であり、シナプスの機能に重要な働きをしていると考えられている。また、一部の自閉症スペクトラム障害の患者において CADM1 の遺伝子変異があると報告されている。しかし、社会的な行動、社会記憶における CADM1 の役割は不明であった。

(2) バゾプレシン産生ニューロン、オキシトシン産生ニューロンと社会的な刺激

下垂体後葉ホルモンであるバゾプレシンとオキシトシンを産生するニューロンは、主に視床下部に存在し、その他、分界条床核、嗅球に存在することが知られている。このバゾプレシンとオキシトシンの脳における機能として、社会的行動を促進する作用があることが提唱されている。バゾプレシンあるいはオキシトシンを外来性に投与すると社会的行動が促進される。逆に、バゾプレシン受容体遺伝子欠損動物とオキシトシン受容体遺伝子欠損動物は、社会的行動が障害されている。例えば、オキシトシン受容体を欠損した動物は社会記憶が低下していることが示されている。また、必ずしも一致した結果は得られていないものの、自閉症スペクトラム障害とオキシトシン受容体の遺伝子多型との間に関連性があることが報告されていた。しかし、バゾプレシンとオキシトシンの社会行動促進作用に関わる神経機構には不明な点が多い。特に、社会的行動をしているときに本当にバゾプレシン産生ニューロンとオキシトシン産生ニューロンが活性化されているのか、活性化される場合、どういう機序で活性化されるのかについて不明であった。

2. 研究の目的

(1) シナプスの細胞接着因子 CADM1 の社会的行動における役割

シナプス細胞接着因子 CADM1 の遺伝子変異が、自閉症スペクトラム障害の患者で報告されている。そこで、CADM1 を欠損しているマウスの社会的行動を検討することで、CADM1 が正常な社会的行動を行うことに必須であるのかどうかを明らかにすることを目的とした。一方、情動行動は、社会的行動と相互に作用していることが知られている。そこで、Cadm1 遺伝子欠損動物の情動行動についても明らかにすることを目的とした。また、自閉症スペクトラム障害において運動機能が障害されていることも報告されている。そこで、Cadm1 遺伝子欠損動物の運動機能についても検討を行った。

(2) バゾプレシン産生ニューロン、オキシトシン産生ニューロンと社会的な刺激

下垂体後葉ホルモンであるバゾプレシン、あるいは、オキシトシンを投与すると社会的行動が促進されることが示されている。しかし、内因性のバゾプレシン、あるいは、オキシトシンが社会的行動に関与しているかは必ずしも明らかではなかった。そこで、本研究では社会的な刺激により下垂体後葉ホルモン産生ニューロンが活性化されるかどうかを明らかにし、さらに、社会的な刺激がどういう神経回路で下垂体後葉ホルモン産生ニューロンを活性化させるのかを明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法と成果

(1) シナプスの細胞接着因子 CADM1 の社会的行動における役割

Cadm1 遺伝子欠損マウスの社会的行動と情動行動を計測し、野生型動物の行動と比較した。社会的行動は、ホームケージにおける2匹の動物の接触時間、新しいケージにおける2匹の動物間の社会的な行動の観察、チューブテスト、攻撃性テスト、社会記憶テストを用いて定量化した。情動行動は、高架十字迷路テスト、明暗箱テスト、オープンフィールドテストを用いて定量化した。さらに、運動学習テストとしてロタロッドテストを行った。その結果、CADM1 欠損動物においては野生型動物と比較して、攻撃性が高く、resident-intruder テストにおける攻撃行動が多く観察された。新しいケージに2個体を入れると、CADM1 欠損動物では他個体を追跡する行動と闘争している行動が野生型動物と比較して増加していた。さらに、ホームケージに2匹にしておいたときの互いに接触している時間を測定したところ、2匹が接触している時間が短かった。また、一度会ったことのある他個体を識別する記憶である社会記憶が低下していた。これらのデータは、CADM1 分子が社会的行動を行うのに重要な働きをしていることを示している。さらに、CADM1 欠損マウスは高架十字迷路におけるオープンアームの滞在時間が少なく、明暗箱テストにおける明所の滞在時間が減少しており、オープンフィールドテストにおける中央滞在時間が短かった。これらのデータは、CADM1 がいないと不安行動が増加することを示している。さらに、CADM1 欠損動物においては、ロタロッドテストにおける運動学習が著明に低下していた。また、CADM1 欠損動物は、歩幅が広く特徴的な歩行を示した。しかし、嗅覚テスト、握力、尾逃避テスト、ホットプレートテスト、尾懸垂テストにおいては野生型動物と有意な差は観察されなかった。これらのデータは、シナプスの細胞接着因子の CADM1 が社会的行動のみならず、情動行動、運動学習にも重要な働きをしていることを示している。今後、CADM1 欠損が社会的行動と情動行動の異常をもたらす機構を、脳部位を含め詳細な検討を行う必要がある。

(2) バゾプレシン産生ニューロン, オキシトシン産生ニューロンと社会的な刺激

バゾプレシン産生ニューロンとオキシトシン産生ニューロンは主に視床下部室傍核, 視索上核, 分界条床核に存在する. これらのうちどのニューロンが社会的行動の促進に働いているかは明らかではない. そこで, 社会的な刺激により, これらのニューロンが活性化されるかどうかを検討した. 社会的刺激としては同種個体への暴露を用いた. ニューロンの活動は Fos タンパク質の発現を指標として検討した. その結果, 社会的刺激により視床下部と分界条床核のオキシトシン産生ニューロンが活性化されることが明らかとなった. 今後, これらのニューロンの働きについて, 阻害実験を行うことで検討する必要がある.

社会的な刺激をくわえると, 下垂体後葉ホルモン産生ニューロン以外にも, 内側扁桃体の細胞が活性化されることが Fos タンパク質の発現検討実験により明らかとなっている. 社会的刺激により活性化される内側扁桃体のニューロンが, 下垂体後葉ホルモン産生ニューロンが局在する領域に投射しているかどうかを検討した. 逆行性トレーサーを下垂体後葉ホルモン産生ニューロンが局在する視索上核に微量投与し, 視索上核に投射しているニューロンを同定した. 社会的刺激により, 視索上核に投射していると考えられる内側扁桃体のニューロンの一部が活性化された. 今後, これらのニューロンの活性化の定量を行う必要がある. さらに, これらの部位の活動を阻害する実験を行うことで生理的機能を明らかにしていく必要がある.

さらに, 局所のバゾプレシン産生ニューロンの働きを明らかにする目的で, バゾプレシン遺伝子のプロモーターにジフテリア毒素受容体遺伝子を組み込んだコンストラクトを導入したトランスジェニックラットのラインを作成した. この動物を利用することで, 局所のバゾプレシン産生ニューロンを成熟後に破壊することができる. 実際, この遺伝子改変ラットの嗅球にジフテリア毒素を注入することにより, バゾプレシン産生ニューロンの免疫組織化学的染色性が低下した. この嗅球にジフテリア毒素を局所投与した動物においては, 社会記憶の成績が低下している. これらのデータは, 嗅球におけるバゾプレシン産生ニューロンが社会記憶に対して促進的に働いていることを示唆している.

また, 同様に, オキシトシン産生ニューロンを時間空間的に制御して破壊することを目的に, オキシトシン遺伝子のプロモーターにジフテリア毒素受容体遺伝子を組み込んだコンストラクトを導入したトランスジェニックラットのラインの作成に着手した. この遺伝子改変動物の脳内局所にジフテリア毒素を投与することにより, 局所のオキシトシン産生ニューロンを時期特異的に破壊することが出来ると期待される. これらの遺伝子改変動物は, 今後, 社会的行動を担うバゾプレシン産生ニューロンあるいはオキシトシン産生ニューロンを同定するための有用なツールとなる可能性がある.

最期に, 下垂体後葉ホルモン産生ニューロンを活性化する方法について検討を行った. RFamideペプチドに属するRF関連ペプチドが, オキシトシン放出を促進することを見出した. 今後, 外来性に薬物を投与することでオキシトシン放出を促進させて社会行動が促進されるかどうかをさらに検討する必要がある.

本研究により, 社会的刺激を受けることで下垂体後葉ホルモン産生ニューロンが活性化されることが分かった. 我々は既に, オキシトシンに不安緩解作用と社会記憶促進作用があることを報告している. 従って, 正常動物においては, 社会的刺激を受けることにより, オキシトシン産生ニューロンが活性化され, 不安が減少し, 社会的な記憶が促進される可能性が考えられる. 社会的行動が障害されている個体において, オキシトシン産生細胞を活性化させることで, 社会的行動を回復させることが

できるのか, 今後, 明らかにしていく必要がある.

参考文献

- [1] Takayanagi Y, Fujita E, Yu Z, Yamagata T, Momoi MY, Momoi T, Onaka T. Impairment of social and emotional behaviors in *Cadm1*-knockout mice. *Biochem Biophys Res Commun*, 396: 703-708, 2010.
- [2] Takayanagi Y, Onaka T. Roles of prolactin-releasing peptide and RFamide related peptides in the control of stress and food intake. *FEBS J*, 277: 4998-5005, 2010.
- [3] Kaewwongse M, Takayanagi Y, Onaka T. Effects of RFRP-1 and RFRP-3 on oxytocin release and anxiety-related behaviour in rats. *J Neuroendocrinol*, 23: 20-27, 2011.
- [4] Tobin V, Schwab Y, Lelos N, Onaka T, Pittman QJ, Ludwig M: Expression of exocytosis proteins in rat supraoptic nucleus neurons. *J Neuroendocrinol*, 24: 629-641, 2012.
- [5] Onaka T, Takayanagi Y, Yoshida M: Roles of oxytocin neurones in the control of stress, energy metabolism, and social behaviour" *J Neuroendocrinol*, 24: 587-598, 2012.
- [6] Wang Y, Takayanagi Y, Onaka T. Effects of medial amygdala lesions upon social behavior in mice. In Y Yamaguchi (ed) *Advances in Cognitive Neurodynamics (III)* p753-757, 2013.
- [7] 尾仲達史:オキシトシンに関する最近の話題, *ホルモンと臨床*, 59: 431-437, 2011.
- [8]尾仲達史, 高柳友紀, 吉田匡秀: オキシトシンとストレス緩和作用, *Clinical Neuroscience*, 30: 212-215, 2012.

社会的欲求の生成と変容の脳内機構

研究代表：玉川大学脳科学研究所・教授 松元健二

概要

ストップウォッチを5秒で止めるという、自発的に取り組むことのできるストップウォッチ課題を用いて、内発的動機づけを外発的動機づけが低減させるという現象(アンダーマイニング効果)の神経基盤を明らかにした。また、内発的動機づけに関係した脳部位の活動を、ストップウォッチ課題を他者と競争して行う条件とそうでない条件とで比較し、社会的文脈によって動機づけが変容する神経メカニズムを明らかにする可能性を示した。

Abstract

I found the neural basis of undermining effect (i.e. intrinsic motivation is undermined by extrinsic motivation) by investigating brain activity during performing a stopwatch task which required participants to press the button at 5 s after the stopwatch started. Then, I compared the activity in the intrinsic motivation related regions between performing the stopwatch task under competitive and non-competitive conditions, suggesting a neural mechanism to modulate motivation on the basis of social context.

1. 研究開始当初の背景

(1) 内発的動機づけと外発的動機づけの相互作用

人類は、他者と協調し、社会を形成することにより、一個人ではなし得ない高度な文明を形成し、今日の隆盛を築いている。社会的知性こそ、人間を人間たらしめた最も重要な知性とも言える。この社会的知性への脳科学的なアプローチが近年、非常に注目されている[1]。社会的な刺激や状況の認知的処理に、脳の特定部位が重要な役割を果たしていることが、次々と明らかになってきたからだ。例えば、帯状皮質前部は、物理的刺激による体の痛みの知覚に関与することが知られていたが、仲間はずれという社会的な状況におかれて感じる“心の痛み”にも関与することが明らかになった[2]。また、線条体は、ジュースやお金のような、一次的／二次的報酬による喜びだけでなく、他人からの褒め言葉による社会的な喜びの情報処理過程にも関与することが最近、明らかになった[3]。これらの知見は、社会的な情報と非社会的な情報とが共通の神経基盤を持つことを示した。しかし、ヒトや大型類人猿など社会性の高い高等哺乳類ほど前頭前野が大きく発達している[4]ことから、社会的な情報には、非社会的な情報以上の内容が付加されていると考える方が自然である。

心理学者の Maslow は、多くの社会的成功者へのインタビューに基づき、他者から認められたいという社会的欲求は、衣食住など物質的な欲求が満たされてはじめて生じるという「欲求の階層性」(図1)を見出した[5]。このことは、社会的欲求は、物質的欲求とは質的に異なることを示唆している。社会を回すための協調行動は、物質的欲求のみでは起こらず、社会的欲求が生じ

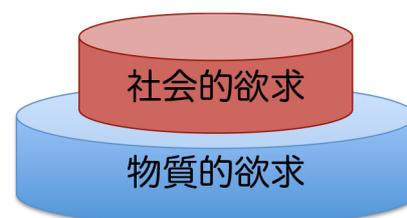


図1

て初めて起こる(図2). したがって, 本研究領域が目指す「協調や協同の出現のメカニズム」を解明するためには, 社会的欲求を物質的欲求から区別し, その生成機構を知る必要がある. しかし, 社会的欲求が脳内でのように生成されるのかについては, ほとんど分かっていない.

物質的欲求は, 物理的な外的環境との相互作用の場において行動をガイドするのに対し, 社会的欲求は, 対人コミュニケーションの場において行動をガイドすると考えられる. 応募者はこれまで, 報酬獲得を目的とした行動の選択[6]と選択した行動の正否の評価[7]に, 前頭前野内側部が重要な役割を果たしていることを, サルの単一ニューロン活動記録によって明らかにしてきた. これらの成果は, 物質的欲求を満たすための物理的な外界との相互作用において, 前頭前野内側部が本質的な役割を果たしていることを示唆して

いる. 一方, サルよりも前頭前野が前方に大きく発達したヒトでは, 他人の心の推定に前頭前野内側部の前方部分が重要な役割を果たしていることが, 脳機能イメージング研究で明らかになっている[8]. このことは, ヒト前頭前野内側部の前部は, 社会的欲求を満たすための対人コミュニケーションに重要な役割を果たしている可能性を示唆する.

社会的欲求の脳内機構を解明するためには, 非社会的欲求の脳内機構との比較が必須である. 社会的欲求も非社会的欲求も, 内発的な動機に基づく欲求と外発的な動機に基づく欲求とがあると考えられるが, 内発的動機の脳内機構については全く未知である. そこでまず非社会的欲求に焦点を絞り, 内発的と外発的の動機とを区別し, それらがどのように脳内で相互作用しているかについて調べた.

(2) 社会的文脈の動機づけへの影響

内発的と外発的の動機とを区別し, それらがどのように脳内で相互作用しているかについて調べた結果, 外発的な金銭報酬が内発的動機を低下させる際, 前頭前野と線条体前部とを含む皮質-基底核ループが重要な役割を果たしていることが明らかになった[9]. 内発的動機の神経基盤を調べるのに適していることが明らかとなったストップウォッチ課題に, 社会的な影響を調べられるように変更を加えて用いることにより, 社会的文脈が動機づけに影響を与える神経機構を明らかにする必要がある.

2. 研究の目的

(1) 内発的動機づけと外発的動機づけの相互作用

内発的動機と外発的動機とが相互作用する心理現象として, 外発的報酬の期待が, 内発的動機を低下させるという「アンダーマイニング効果」が知られている. 自発的に楽しむことのできる課題を導入し, 外発的な金銭報酬の期待によって内発的動機を変化させたときの行動を計測すると共に, その際の脳活動の変化を機能的磁気共鳴画像撮影法(fMRI)を用いて明らかにすること.

(2) 社会的文脈の動機づけへの影響

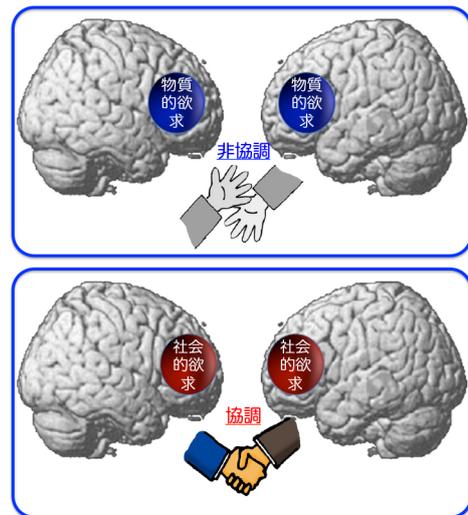


図2

社会的文脈の違いが、内発的動機にどのように影響するかを調べるため、ストップウォッチ課題の得点を他者との間で競う競争群と、他者とは関係なく自分の記録更新を目指す非競争群で、動機づけに関わる前頭葉や線条体の課題遂行中の活動変化を fMRI を用いて計測し、群間での違いを明らかにすること。

3. 研究の方法と成果

(1) 内発的動機づけと外発的動機づけの相互作用

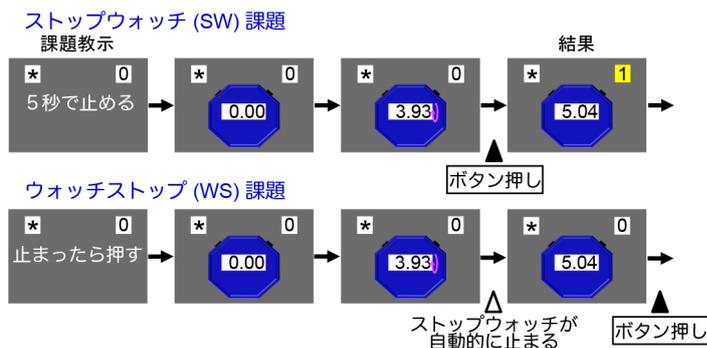


図3

を押し課題 (WS 課題) (図3) とを30試行ずつランダムな順序で行って貰い、課題遂行中の脳活動を計測した (第1セッション). 第1セッション直後に、待合室で、報酬群には約束通り、成績に応じた金銭報酬を与えた. 対照群にも、報酬群の誰か一人と同額の金銭報酬を、成績とは無関係に与えた. 続く休憩時間3分間に、SW 課題と WS 課題を自由に選んで行うことができるようにしておくことにより、各課題に対する内発的動機の行動指標を得た. 第2セッションでは両群とも、金銭報酬の追加はないことを明示的に伝えた上で、第1セッションと同様に SW 課題と WS 課題を30試行ずつランダムな順序で行って貰い、脳活動を計測した.

図4に示すように、第1セッションでは、報酬群、対照群とも、SW 課題の開始を示す手がかりが呈示された際に、WS 課題のときと比べて、有意に高い活動が前頭前野背外側部で見られた. また、SW 課題で成功した際に、失敗したときと比べて有意に高い活動が、線条体前部で見られた. 金銭報酬を貰った直後の3分間の自由時間に、対照群は、実験に用いた課題を自発的に頻繁に行ったのに対し、報酬群は、同じ自由時間に、この課題を自発的に行うことはほとんどなく、その回数は対照群に比べて有意に少なかった. このことは、

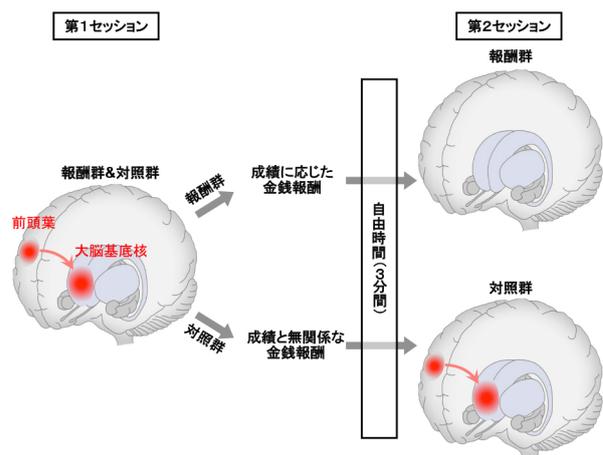


図4

報酬群では、第1セッションおよびその直後の成績に応じた金銭報酬によって、SW 課題に対する内発的動機が対照群に比べて低下した (アンダーマイニング効果) ことを示している. 第2セッションでは、対照群では第1セッションと同様の脳活動が前頭前野外側部および線条体前部で見られたが、

報酬群では、そのような脳活動が消失した(図4)。これらの結果は、外発的な金銭報酬が内発的動機を低下させるアンダーマイニング効果には、前頭前野と線条体前部とを含む皮質—基底核ループが重要な役割を果たしていることを示唆している。この成果は、米国の科学雑誌 PNAS に掲載された [9]。

(2) 社会的文脈の動機づけへの影響

大学生男女 43 名の実験参加者を、非競争群(N=15)、競争群(N=14)、コントロール群(N=14)の3群に分け、内発的動機の神経基盤を調べるのに適していることが昨年度明らかになったストップウォッチ課題を2セッションずつ行って貰い、その際の脳活動を fMRI により計測した。競争群では、他者の得点を超えるように教示、非競争群では、自分自身の得点を超えるように教示、そしてコントロール群では、そのような超えるべき得点を教示せず、ストップウォッチ課題を行って貰った。

質問紙による内発的動機づけのスコアは、非競争群、競争群共にコントロール群よりも有意に高かったが、競争群のみにおいて、内発的動機づけスコアと有能感との間に有意な正の相関が見られ、他の2群においては、そのような有意な相関は見られなかった。腹側淡蒼球／腹側線条体における成功 vs.失敗の脳活動コントラストは、内発的動機づけスコアと同様に、有能感の行動指標との間に有意な正の相関が競争群のみにおいて見られた。また、前頭前野外側部におけるストップウォッチ課題 vs.コントロール課題の脳活動コントラストも、内発的動機づけスコアと同様に、有能感の行動指標との間に有意な正の相関が競争群のみにおいて見られた。

これらの結果は、昨年度までの研究成果と併せて考えると、前頭前野と線条体とを含む皮質—基底核ループが、内発的動機づけの、社会的な文脈による変容にも関与していることを示唆している。

参考文献

- [1] Adolphs R (2009) The social brain: neural basis of social knowledge. *Annu Rev Psychol* 60:693-716.
- [2] Eisenberger NI, Lieberman MD, & Williams KD (2003) Does rejection hurt? An FMRI study of social exclusion. *Science* 302(5643):290-292.
- [3] Izuma K, Saito DN, & Sadato N (2008) Processing of social and monetary rewards in the human striatum. *Neuron* 58(2):284-294.
- [4] Dunbar RI (1998) The social brain hypothesis. *Evolutionary Anthropology* 6(5):178-190.
- [5] Maslow AH (1970) *Motivation and personality* (Harper & Row, New York) 2d Ed pp xxx, 369.
- [6] Matsumoto K, Suzuki W, & Tanaka K (2003) Neuronal correlates of goal-based motor selection in the prefrontal cortex. *Science* 301(5630):229-232.
- [7] Matsumoto M, Matsumoto K, Abe H, & Tanaka K (2007) Medial prefrontal cell activity signaling prediction errors of action values. *Nat Neurosci* 10(5):647-656.
- [8] Amodio DM & Frith CD (2006) Meeting of minds: the medial frontal cortex and social cognition. *Nat Rev Neurosci* 7(4):268-277.
- [9] Murayama K, Matsumoto M, Izuma K, & Matsumoto K (2010) Neural basis of the undermining effect of monetary reward on intrinsic motivation. *Proc Natl Acad Sci U S A* 107(49):20911-20916.

教師である父や配偶個体を前にした小鳥の歌学習行動の変容と脳内ドーパミン濃度の変化

研究代表：静岡理工科大学総合情報学部・准教授 奥村 哲

概要

ジュウシマツのオスはメスに対して固有な囀り行動を示す。音声行動には他に地鳴きという一音節からなる短い発声もある。囀りと地鳴きはどちらも配偶者選択など他者とのコミュニケーションにおいて重要な役割を担っており、音声行動には一定の行動文脈が存在すると考えられる。本研究では小鳥にとって重要な音声コミュニケーションを可能とする基礎能力として 1. 行動文脈の判断, 2. 時間感覚の学習, 3. 順序学習 の3つに注目し、これらの能力の有無や詳細について記録するとともにその脳内機序の解明を目指した。

Abstract

The matured male Bengalese finches display unique song behavior to the female birds. These song and call behaviors are thought to have an important role in their communication including mating behavior and these vocalizations seems to be emitted in context specific manner. In this study, we recorded and analyzed vocal behavior of this species to elucidate the brain mechanism that underlies context dependent vocal behavior. In addition, we also evaluated whether this species possess ability of learning time sense and that of sequence learning.

1. 研究開始当初の背景

(1) 地鳴きのバリエーションと発声文脈

鳴禽類の音声行動は短い地鳴きと長い囀り(歌)に大別される。従来歌行動については、オスが直接メスに向かって囀る directed song (DS)と、メスに向かわない undirected song (US)の2種類があり、それらは一見類似しているが、脳内では異なる神経機構が働いている事が詳しく調べられてきた。一方、実際に複数の小鳥間で自発的に行われる音声コミュニケーション行動は大多数が地鳴き(call)であるが、地鳴きの行動文脈についての先行研究は少ない。

(2) 音声コミュニケーションに関わる時間情報の制御系の検討

小鳥が、一定の音素列によって構成される歌を発声しコミュニケーションに活用するためには、歌に固有なリズムや時間情報の制御系(振動子, CPG など)や評価系が脳内に存在するはずである。また、実際の音声コミュニケーション行動の大多数を占める地鳴きについては、1羽が鳴くと直ちに他の個体が鳴き返しを行うが、この連鎖が続く場合(いわゆる「間」が良い場合)と続かない場合(「間」が悪い場合)で鳴き返しまでの時間間隔が異なる可能性がある。そもそも小鳥に時間についての感覚がそもそもあるのかどうか? その時間感覚は後天的に学習したり変化させたりできるものかどうか? またその脳内機序については先行研究が乏しい。

(3) 文法規則学習の基盤となる順序規則の学習はより一般的な順序規則学習と関連するか?

ジュウシマツなどの鳴禽類の歌に、一定の順序規則が存在することや、その発達過程、生成メカニズムについては、これまで多くの研究が行われてきた。しかし、この順序学習能力が、歌行動にあ

る文法に特化した能力であるのか？あるいはその他の順序学習にも活用しうるより一般的な能力なのかどうかについては鳴禽類を用いた研究は多くはなかった。

2. 研究の目的

本研究では、上記に示した3テーマについて詳細に動物行動や学習能力についてまず記載した上で、その過程で確立させる訓練ノウハウなどを活用しつつ、それらの神経基盤を検討することを目的とした。とくに上記(1)～(3)についての脳内責任部位の候補は、AFP(前方脳経路)などDAの投射を受けるところが多いことが、予備的な組織化学的検索でも確かめられたので、哺乳類においても学習やモチベーションとの関係が示されているDAの関与について検討することを目的とした。

(1) 小鳥の文脈依存的な音声コミュニケーション行動の記録と解析

鳴禽類の音声行動には短い地鳴きと長い囀り(歌)があるが、ほとんどの先行研究は主に囀り行動を扱っていた。しかし、実際に複数の個体間で自発的に発せられる音声行動は大多数が地鳴きである。特に courtship call は、相手の call を聞くと、ほぼ例外なく返事として返される。つまり文字通り挨拶として交わされており、小鳥の音声コミュニケーションの基本であるといえる。本研究の最終目標は、音声コミュニケーションの行動文脈や状況による変化を可能にする脳内機序を明らかにすることである。そこで、まず様々な自発的な音声行動を記録し観察した。具体的には地鳴きに何種類のバリエーションが存在するのか？また複数の種類の音声かどのような行動文脈で発せられているのか？について検討した。

(2) 音声コミュニケーションに関わる時間感覚の学習能力の検討

複数の音素を文法規則に従って並べた歌を囀るジュウシマツは、優れた順序や時間の学習能力をもつと考えられる。そこでまず時間感覚に着目し、7羽のトリに時間学習課題を行わせた。一度成立した時間感覚を新たなものに更新することが容易かどうかにも注目した。

(3) 一般的な順序規則の学習能力の検討

ジュウシマツの歌は複数の7～10種の歌要素(音素)によって構成され、ヒナは歌の各音素の順序やタイミングを幼少期に覚えた親の囀りと自分の囀りを比較することで学習していく。本研究では小鳥が歌に限らないより一般的な順序規則の学習能力や弁別能力を持つかどうかを調べるために、小鳥にオペラント学習をさせ検討した。この実験ではその後に予定する神経行動学的実験に備えて小鳥に適した訓練パラメーターを求めることも目的とした。

3. 研究の方法と成果

(1) 文脈依存的な音声コミュニケーション行動の記録と解析

[方法] 囀りと地鳴きの音声行動が他個体との関わりにおいてどのように修飾されているのかを解析した。より具体的には、そもそもトリにどのようなコミュニケーションのバリエーションがどのような頻度存在しているのかを明らかにし、それらがどのような刺激によって修飾されているのかを検討した。呈示刺激としては、オスもしくはメスが地鳴きを行っている最中の、もしくは発声行動を伴わない30分の動画を用意し、非呈示の30分間と交代で、毎日合計9時間にわたって繰り返して呈示した。その際の全音声行動を記録し、呈示条件ごとの囀りと地鳴きの発声数をカウントするとともに、地鳴きについては、さらにフォルマントや音圧などの音響学的特徴を解析した。

[結果] 他個体の地鳴きに対しては、小鳥は主に囀りではなく地鳴きを返す事が明らかになったが、同時に一個体の地鳴きには5~7種の音声バリエーションが存在し、小鳥はそれらの音声バリエーションを状況依存的に使い

分けていることが明らかになった。以下はその例(一個体)である。囀りの頻度については動画・音声の非呈示中のUSが最も多く、次いで音声なしの動画呈示中、音声ありのメスの動画呈示中の順に少なくなった。特に、呈示するメス動画に音声に伴った場合には、オスは地鳴きを積極的に返すために、歌の割合が減少した。一方、地鳴きについてはオスの動画呈示時よりメスの呈示時のほうが一度の発声継続時間は長くなり、頻度も増加した。また地鳴きはフォルマント分析によって複数のクラスターに分類でき、呈示状況依存的にそれらの割合に変化がみられた。例えば図においてクラスターBに分類された地鳴きは動画呈示なし条件では全く発声されず、雄呈示でよく発せられた。反対にクラスターFの地鳴きは雄提示条件ではあまり発声されず、呈示なしではよく発せられた。

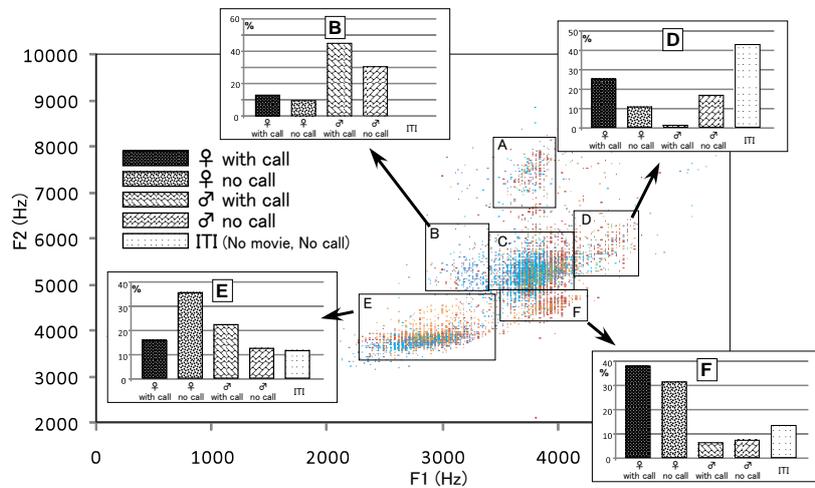


Figure : F1-F2 plot of calls

The 8557 calls plotted here were emitted by Bird 1 in the first 5 min of each of 5 conditions (movies of females with and without calls, movies of males with and without calls, ITI: The total analyzed duration of each condition was 135 min). A-F are the call clusters. The inset histograms show the conditions under which the calls in these clusters were produced.

(2) 音声コミュニケーションに関わる時間感覚の学習課題

[方法] 7羽のジュウシマツを1羽毎に防音箱に隔離し、オペラント条件付けによる順序学習と止まり木Aで数秒間待機する時間学習を行った。時間学習課題では約2秒待機の学習成立後、待機時間を約2.0秒から3.0秒へと徐々に伸ばしていった。時間学習では、いきなり3秒待機を学習させるのは困難であったために細かく4段階に目標を分割した。データについては測定した記録から標準偏差を計算し平均より4SD逸脱した数を外して解析した。

[結果] 時間学習では訓練期間の長さには差が出たが、全個体で待機時間を延ばすことが出来た(図1:♂足環左黄の結果を例示)。全課題を通して各課題の学習には個体毎に得意不得意があり、実験期間中に目標の時間まで延長することができたのは、7羽のうち5羽であった。

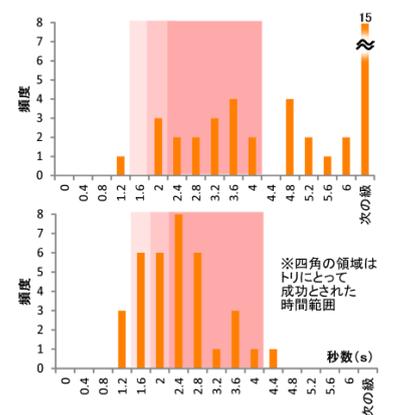


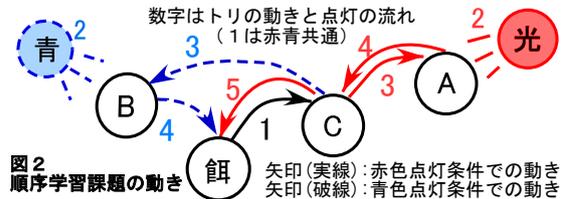
図1 ♂足環左黄(実験4)ヒストグラム(2日目(上)と6日目(下))

(3) 一般的な順序規則の学習能力のオペラント学習課題

[方法] 馴化を完了させたトリを防音箱に1羽ずつ隔離し、オペラント条件づけによって図に示したような順序学習を行った(図2)。この実験では、その後の展開も考えて視聴覚刺激を弁別して異なる順序を出させる弁別学習も兼ねて行った。弁別学習では、まず赤と青のLEDの点灯を用いた光

の色弁別課題を行った。止まり木 C に止まったら赤か青いいずれかの LED を点灯させ、赤色 LED なら止まり木 A, 青なら B に移動すれば、餌が与えられる実験である。この実験が出来た個体には、この実験手順の赤い光と同時にジュウシマツの鳴き声を、青い光と同時にブザー音を流す視聴覚連合課題を行わせた。さらにこの視聴覚同時刺激の実験と音刺激のみの実験を数回ずつ繰り返し行うことで、音弁別の学習を試みた。各実験の様子は動画記録し、1 試行にかかった時間、課題の成否の数などを記録した。

[結果] 順序学習については個体差や実験歴による差はあるものの、ほとんどの個体で目標の成績を達成できた。弁別学習では、音単独刺激の弁別は、光単独刺激の弁別より今回の方法では困難であった。弁別を伴わない単純な順序課題については、初めて実験を経験する個体であっても初日からケージ内をよく動き回り、4 日目には学習を成立させた。



まとめと展望

本研究では小鳥の音声コミュニケーションである囀りと地鳴きの両方について相手の有無や状況に対応した変化を確認した。また、ビデオを用いた動画呈示が実際に雄の行動の文脈を変化させることを証明した。今後は雄の求愛行動に対して、雌がどのような応答を示すのかを明確にすることで、ジュウシマツの雌雄間の音声コミュニケーションの理解を深めていきたい。また、既に方法について確立した自由行動下で可能なマイクロダイアリス法を用いて、ジュウシマツの歌神経核の DA レベルを連続測定し、その行動文脈、特に他個体(父親・配偶対象のメス)との関わりや、歌文法の学習との関わりについても検討していきたい。それによって脳内 DA 濃度が、他個体との関わりとどのような関連を持ちながら変動し、歌行動の「やる気」や「学習能率」をどのように変化させているのかを考察する計画である。本研究の成果は、究極的には常に社会的文脈や他個体との相互作用の中におかれているヒトの言語能力の発達の研究にも貢献することを期待している。

参考文献

- [1] Osada, M. and Okumura, T. Context based call variation in the male Bengalese finch (*Lonchura striata* var. *domestica*) 2013 pp.657-63 In T. Omori (Ed.), *Advances in Cognitive Neurodynamics* (III). Heidelberg: Springer
- [2] Yamashita, Y*, Okumura, T*, Okanoya, K and Tani J (*equally contributed). Cooperation of deterministic dynamics and random noise in production of complex syntactical avian song sequences: a neural network model *Frontiers in Computational Neuroscience* 2011 5 18(1)-12 10.3389/frncom.2011.00018
- [3] Tobar, Y, Okumura, T, Tani, J and Okanoya, K. A direct neuronal connection between the telencephalic nucleus robustus arcopallialis and the nucleus nervi hypoglossi, pars tracheosyringalis in Bengalese finches (*Lonchura striata* var. *domestica*) *Neurosci Res* 2011 71 361-368 10.1016/j.neures.2011.09.002
- [4] 奥村 哲, 山下 祐一, 岡ノ谷 一夫, 谷 淳 実験モデルとしての鳴禽類の歌制御システム 日本神経回路学会誌 201118(3) p.135-146

他者の身体的内部状態推定に基づくシンボルと感覚運動情報の融合コミュニケーション

研究代表：国立情報学研究所・准教授 稲邑哲也

概要

人間とロボット間の身体動作と言語表現の融合コミュニケーションの構成論の理解に向け、人間に対して動作コーチングするロボットを題材として、動作の提示方法と言語表現の選択方法に関する研究を進めた。効率的なコーチを行うためには、手本となる動作のみを提示するだけではなく、動作を学ぶ初心者が行う動作と見本動作の差を考慮し、必要となる修正箇所を強調して伝えるデフォルト動作が有効であり、その強調の度合いを簡単なパラメータで制御可能な動作生成モデルを構築した。また、初心者の動作の習熟度に対して、用いるべき強調の度合いを調査し、実際の被験者実験を通じて、効率的なコーチングを実施するための諸条件を明らかにした。

Abstract

Towards understanding of integrated communication between robots and human, which uses both of motion demonstration and verbal expression, we focused on a robotic coaching system. It can improve humans' learning performance of motions by intelligent usage of emphatic motions and adverbial expressions according to user reactions. In robotics, however, method to control both the motions and the expressions and how to bind them had not been adequately discussed from an engineering point of view. In this research, we aim to propose a communication model which controls and binds emphatic motions and adverbial expressions based on mirror neuron oriented model. In the model, variety of motion patterns and verbal expressions are connected and can be expressed as static points in a phase space. We show the feasibility of the proposing method through experiments of actual sport coaching tasks for beginners.

1. 研究開始当初の背景

ミラーニューロンは、他者の身体運動を観察し、状況に応じて自己の運動を生成する脳の部位としてロボティクスや神経生理学等の幅広い分野で注目されている。近年、自己他者間の運動模倣や感覚運動情報の表現モデルを通じてミラーニューロンの理解が試みられてきたが、単なる感覚運動情報の変換や模倣だけでなく、他者との社会的関係性を築く上でも重要な器官であるとも考えられている。すなわち、コミュニケーションの成立の問題と感覚運動情報の自己他者投影機能の間を融合するメカニズムの理解と応用が求められている。従来までに本研究の研究代表者は、ミラーニューロンに発想を得て、感覚運動情報の関係性を抽象化し、他者行動の模倣や不確実な状況における行動誘発、他者の感覚情報の推定に関する応用例を示してきた。しかしながら、提案してきた手法ではシンボルとして抽象化された感覚運動情報を用いた二者間の対話に関しては深く切り込めていなかった。実現した対話は、感覚運動情報の抽象化を行うロボットとそのユーザの間だけであり、関節にかかる負荷について言及する単純なコミュニケーションのみを対象としていた。そこで本研究で

は、他者の感覚情報の推定という技術に基づいた自己他者間のマッピング機能を用いることで、感覚運動情報の模倣だけでなく、シンボルコミュニケーションを成立させる事が可能なミラーニューロンの工学モデルを実現し、神経機構の理解を目指すこととした。

ATR の E.Oztop や近畿大の村田らは、ミラーニューロンの計算理論モデルを構築しているが、模倣行動や身体図式表現に着目しているのみでコミュニケーションへの応用に踏み込んではいない。OIST の銅谷らは MOSAIC と呼ばれる動作模倣モデルを提案しているが、前者と同様にコミュニケーションへの応用についての考察がなされていない。京都大学の尾形らは RNN を用いて他者と自己の間のコミュニケーションの計算論モデルを提案しているが、自己他者間の感覚運動マッピング機能とコミュニケーション機能の関係性について言及していない。本研究はミラーニューロンが持つと考えられる二つの機能 1)他者と自己の感覚運動マッピング、2)他者との円滑なコミュニケーションの成立、を融合すべく、シンボルと感覚運動情報の相互変換という工学的技術を用いて構成論的に理解する点が従来研究との差である。

2. 研究の目的

本研究では、自己と他者の感覚運動情報のマッピングに基づいて円滑なコミュニケーションを実現する対話機構の解明のために、(1)身体感覚運動パターンとシンボルの相互変換モデルの逐次修正、(2)観測不可能な他者の感覚情報と自己の感覚情報のマッピングとその同期シンボル化、(3)コミュニケーション成立のためのシンボルと運動提示の選択機構、の3つのサブシステムからなるモデルを提案する。このモデルを用いて、コミュニケーションが成立するために必要となる条件のうち、他者の感覚の推定が果たす役割を明確にする。

最終的に感覚運動統合型ヒューマノイドロボットを評価のプラットフォームとして、その実用性を実証する。具体的にはテニスのスイング動作などを対象とするスポーツコーチングの状況に着目し、人間と人間・人間とロボットのペアで互いに相手に動作スキルを伝達するために用いられる動作提示と言語的表現の使用戦略について、提案したモデルを適用する。

3. 研究の方法と成果

(1) 動作の強調と言語対話によるスポーツコーチング対話モデルの構築

シンボルと感覚運動情報の統合による対話では、言語表現から身体運動の生成・修正を行うプロセスと、身体運動を言語表現で説明するプロセスの統合を可能とする計算モデルが必要となる。そのため、研究代表者が従来までに開発してきたミメシスモデルを利用し、ある二つの動作の間の差異を位相空間上のベクトルとして表現し、そのベクトルと言語的な表現を相互変換する手法を提案した。具体的にこの手法の有効性を確認するために、身体運動と言語表現の双方を用いてロボットが人間に

対して動作の教示を行い、スポーツの初心者であるユーザをコーチングするというタスクに応用した。ロボットエージェントが行う手本動作を見習ってユーザが動作を行い、その動作に含まれる手本とは異なる動作成分を位相空間上のベクトルに変換し、そのベクトルの長さを「もっと」や「ちょっと」という修正度合いを表す言語表現の生成に対応させた。さらにユーザに対して再び動作を提示する際に、異なっていた動作成分を矯正するように動作を強調し、その強調の度合いをベクトルの長さに対応させる手法をとった。これにより、「もっとこのような動作をして下さい」と表現をしながらロボットが実演によって教示をするというプロセスが可能となった。12名の被験者実験を通じて、動作の強調による実演と言語表現を統合させる教示の場合に、ユーザが手本動作を習得する速度がもっとも速くなることを明らかにした。

また一方で、関節角度情報による身体運動のみならず、関節トルクや床反力等の感覚情報についても言語化をしてコーチングに利用することを狙うため、身体運動パターンから感覚パターンを想起するモデルを上記のコーチングの手法に統合する手法を考案し、その実装を進めた。さらに、実際のヒューマノイドロボットがコーチングを行うための実験装置の開発・準備を進めた。

(2) 人間のコーチング行為に見られる動作提示と言語使用のモデル化と対話

初年度の H22 年度では、スポーツの初心者に対して、どのような身体の実行し、どのような感覚を得れば、良いスポーツ運動が実現できるのか、ということコーチングするロボットシステムを題材として研究を推進した。時系列の感覚運動情報を位相空間上の静止点として配置し、動作を強調して提示する際には 2 つの動作に対応する 2 点の内分点・外分点を計算し、運動を再生することで自然なコーチングコミュニケーションが実現可能であることを確認した。最終年度の H23 年度では、この要素技術を発展させ、他者に動作を伝達するというコミュニケーションにおける、動作の強調の度合いの決定問題、「もっと」や「ちょっと」という言語的な注意表現の選択問題に対して、その選択戦略の理解とモデル化を目指した。

具体的には、昨年度までとは立場を逆にし、ロボットエージェントをスポーツの初心者、人間の被験者をコーチとし、ロボットエージェントに対して強調動作提示と言語的注意表現を用いたコーチをする課題を被験者に与え、そのコーチングの挙動を観察・分析した。その結果、目的の手本動作と、初心者が行った動作との位相空間上の距離が大きければ大きいほど、コーチが用いる強調動作の強調度合いが大きくなり、その関係は線形に比例する傾向が認められた。また、使用された言語的注意表現についても、位相空間上の距離と「もっと」や「ちょっと」という度合いの表現に強い相関が認められた。この結果により、人間が行っているコーチングスキルを位相空間上の距離という簡単なパラメータで表現することが効果的であることが示唆され、そのモデルをロボットに実装することで、強調動作の提示と言語的注意表現を用いた自然なコーチングロボットの実現が可能であることを示した。

参考文献(発表論文・招待講演)

- [1] 奥野敬丞, 稲邑哲也: “動作コーチングロボットにおけるデフォルメ動作と注意的言語表現のスカラーパラメータによる統合手法” 計測自動制御学会論文集, Vol.48, No.7, pp.406-412, 2012, 査読有.
- [2] Keisuke Okuno and Tetsunari Inamura: “Motion Coaching with Emphatic Motions and Adverbial Expressions for Human beings by Robotic System—Method for Controlling Motions and Expressions with Sole Parameter—” The Proc.of IEEE/RSJ Int’l Conf.on Intelligent Robots and Systems. pp.3381-3386, 2011, 査読有.
- [3] Tetsunari Inamura and Keisuke Okuno: “Robotic Motion Coach : Effect of Motion Emphasis and Verbal Expression for Imitation Learning” Proc.of the 3rd International Conference on Cognitive Neurodynamics. (2011), 査読有
- [4] Tetsunari Inamura: “Behavior Recognition and Demonstration for Human-Robot Cooperation” Dagstuhl Seminar on Plan Recognition (No.11141). (20110407). Dagstuhl, (招待講演)
- [5] 奥野敬丞, 稲邑哲也: “デフォルメ動作と注意的言語表現を用いて人間の動作をコーチングするロボットシステムの研究” 2011 年度人工知能学会全国大会. (20110603). 盛岡
- [6] 稲邑哲也, 奥野敬丞: “デフォルメ動作提示と言語表現の統合によるコーチングロボット” 「ロボット共生社会実現に向けたロボットの知能発達」に関する先導的研究開発委員会. (20111105). 大阪(招待講演)
- [7] 稲邑哲也, 奥野敬丞: “感覚運動情報のシンボル化と強調動作提示法に基づくコーチングロボット” 信学技法 HIP2010-82. pp.17-22, 2011
- [8] 奥野敬丞, 稲邑哲也: “デフォルメ動作と言語注意を使用したロボットシステムによる動作コーチングの研究—ミメシスモデルによるコーチングの定量的・定性的評価の実現—” 第16回ロボティクスシンポジウム予稿集. pp.430-435, 2011, 査読有
- [9] Keisuke Okuno and Tetsunari Inamura: “A Research on Motion Coaching for Human Beings by a Robotics System that uses Emphatic Motion and Verbal Attention—Qualitative and Quantitative Evaluation by Applying the Mimesis Model—” Workshop on Humanoid Robots Learning from Human Interaction. (20101207). Nashville, USA
- [10] 稲邑哲也: “感覚運動情報のシンボル化と強調動作提示法に基づくコーチングロボット” 電子情報通信学会ヒューマン情報処理研究会. (20110221). 沖縄国際大学(招待講演)
- [11] 奥野敬丞, 稲邑哲也: “デフォルメ動作と言語注意を用いたロボットシステムによる動作コーチングの研究—ミラーニューロンシステムの工学的モデルを用いた評価と教示—” 脳と心のメカニズム第11回冬のワークショップ. (20110113). ルスツリゾート
- [12] 奥野敬丞, 稲邑哲也: “ミメシスモデルを用いたデフォルメ動作提示と言語コミュニケーションによって人間をコーチするロボットシステムの研究” 第28回日本ロボット学会学術講演会. (20100924). 名古屋工業大学
- [13] 稲邑哲也, 奥野敬丞: “原始シンボル表現を用いた動作のデフォルメ提示による動作コーチング” 2010 年度人工知能学会全国大会. (20100609).

マカクザル半側空間無視モデルを用いた空間および身体認知機構の解明

研究代表：生理学研究所・発達生理学研究室・助教・吉田 正俊

概要

半側空間無視とは主に右大脳半球の損傷によって引き起こされる、損傷と反対側の空間の感覚刺激に対する反応が欠如・低下する現象のことを指す。本研究はマカクザルによる半側空間無視の動物モデルの確立を最大の目的とした。頭頂連合野と前頭連合野とを離断するために右上縦束を切断した。術後の行動観察により、動物は空間無視、消去、身体無視の症状を持っていることが明らかになった。以上の結果は上縦束切断が半側空間無視の動物モデル作成のために有効であることを示している。

Abstract

Spatial hemineglect is a symptom in which brain damage in patients abolish or reduce their response to the sensory stimuli in the contralateral side to the damage. The main objective of the current study is to establish an animal model of spatial hemineglect. We transected the superior longitudinal fasciculus II to dissociate the prefrontal cortex and the posterior parietal cortex in macaque monkeys. The behavior of the monkey exhibited symptoms of spatial neglect, extinction and personal neglect. These results suggest that the transection of the superior longitudinal fasciculus II is a promising method to establish an animal model of spatial hemineglect.

1. 研究開始当初の背景

(1) 半側空間無視とはなにか

半側空間無視とは主に右大脳半球の損傷によって引き起こされる、損傷と反対側の空間の感覚刺激(視覚, 聴覚, 体性感覚)に対する反応が欠如・低下する現象のことを指し, 感覚障害(同名半盲など)や運動障害(片麻痺など)によっては説明できない認知的障害である。半側空間無視とは「自分の体とその周りの世界が半分なくなる」ということであり, 「空間, 身体, 病態の認知への気づきの障害」であって, 環境世界の中に位置する自己とはなにかという問題を明らかにするための鍵となる。

半側空間無視は右半球での脳卒中の慢性期で 40%の患者で見られるという報告もあり, 高次脳機能障害の中では非常に多く見られる障害である。患者は日常生活においては人や物との接触, 交通事故などの深刻な問題を起こしうるが治療法は確立していない。以上のことから, 半側空間無視の発現機序の解明のために研究を進めていくことは非常に重要であると言える。

(2) 半側空間無視の原因部位についてのこれまでの知見

半側空間無視の原因部位は近年までは頭頂葉と側頭葉とのあいだに位置する temporo-parietal junction (TPJ)付近であると考えられてきたが, Karnath et.al. (2001)¹によって原因部位が superior temporal gyrus (STG)であることが提唱されて論争が起こった。彼らの報告は急性期の患者のデータに基づくものであり, 慢性期の患者のデータに基づいた Doricchi and Tomaiuolo (2003)²では原因部位は頭頂連合野と前頭連合野とを繋ぐ白質である上縦束 superior longitudinal fasciculus の一部で

ある SLFII であると結論づけられた。SLFII は TPJ や STG からの情報を前頭連合野に運ぶ線維であって、これまでの知見とも整合的である。より直接的な証拠は Thiebaut de Schotten et.al. (2005)³によって得られた。この報告では、覚醒下での開頭手術中の SLFII への電気刺激によって半側空間無視様の行動が誘発された。半側空間無視の患者の脳活動を fMRI で記録した He et.al. (2007)⁴は、TPJ などの頭頂-側頭連合野と middle frontal gyrus (MFG)などの前頭連合野との間の機能的結合 (functional connectivity)が低下していることを報告した。以上の知見から、半側空間無視は脳のある部分の障害というよりは、頭頂-側頭連合野と前頭連合野とのあいだでの情報伝達の機能不全であり、脳内ネットワークの病であると考えられるようになってきた。

(3) 半側空間無視の動物モデル

半側空間無視の動物モデルは主にマカクザルを用いて作成されてきた。マカクザルは視覚および運動機能がヒトに類似しており、認知機能が発達していることから、高次脳機能障害である半側空間無視の動物モデルとしてはネコ、ラットなどよりも優ると考えられる。これまでのマカクザルの半側空間無視のモデルとしては、頭頂連合野と前頭連合野のどちらかまたは両方の損傷を作成したものがあがるが、その障害は非常に短期的であり一週間程度で機能回復するという点でヒトでの半側空間無視を再現することには成功してこなかった。ムシモルなどの薬物注入による試みもあるが、視覚的消去症状 (visual extinction) を引き起こすことには成功しているが、半側空間無視の症状を引き起こすことは出来ない。また、薬物注入や光学的方法などの可逆的方法は慢性期の病態モデルの確立のために使うよりはその後の機能解明の段階で使う方が適している。

ただひとつの成功例が Gaffan and Hornak (1997)⁵であり、マカクザルの SLFII を含む白質の切除によって、少なくとも一ヶ月以上持続する無視症状を引き起こすことに成功した。なお、頭頂連合野と前頭連合野のどちらかまたは両方に損傷を作成した例ではこのような長期的障害が起こらないことも彼らは同時に報告している。この報告は前述の半側空間無視の原因部位に関する 2003 年以降の知見と整合的であるが、これまでに同グループからは続報が出ていないうえに、他の研究グループからもこの実験モデルを再現した報告は出ていない。

2. 研究の目的

(1) 半側空間無視の動物モデルの作成

これらのことを踏まえて、本研究ではマカクザルの頭頂連合野と前頭連合野とを繋ぐ神経線維である上縦束を切断してその無視症状をさまざまな行動課題で評価することによって、半側空間無視の動物モデルを確立することを最大の目標とする。

(2) 視覚顕著性の計算論モデルの拡張

これまでに Laurent Itti らによって開発されてきた視覚的顕著性 (saliency) のニューラルネットワークモデルを拡張することによって、脳内ネットワークと環境との相互作用のニューラルネットワークモデルを作成する。それによって半側空間無視の動物モデルにおける行動評価法を確立する。

3. 研究の方法と成果

(1) 脳損傷の作製法の確立

マカクザルの頭頂連合野と前頭連合野とを繋ぐ神経線維である上縦束(SLF)を切断することで無視症状を引き起こすことを目指した。この術式の確立のために、まずサル脳ホルマリン固定標本(n = 2)を用いて、上縦束の切断のパイロット実験を行った。Inferior parietal lobule および intraparietal sulcus(IPS)の ventral bank をピンセットで取り除いた上で、その下にある上縦束を含む白質を露出させた。この白質にアプローチするために必要な深さと角度を確認した上で、さらにピンセットで白質を離断した。そのあとで離断した面で冠状断に脳を切断して、ただしく上縦束を切断できていることを確認した。

ひきつづいて、一頭のニホンザルで脳損傷手術を行った。手術はイソフルレンによる全身麻酔下で行い、上縦束の同定には脳溝などの位置を指標とした。あらかじめ撮影した核磁気共鳴画像に基づいて頭蓋骨を切除した。Intraparietal sulcus (IPS) の吻側部の灰白質を吸引除去して IPS の fundus を露出させることによって SLFII の白質を同定した上で、これを電気メスによって切断し、側脳室に至るまで切断を進めた。手術終了後に還流固定を行い、組織切片を作成して損傷部位の同定を行った。その結果、意図した通りに上縦束に相当する部分の白質が切除されていることを確認した。以上の予備的実験の結果については the Third International Conference on Cognitive Neurodynamics において発表を行った⁶。

ひきつづいて、もう一頭のニホンザルで脳損傷手術を行った。手術は上記の実験と同様にして行い、術後の回復を待って行動評価を行った。

(2) 損傷手術後の行動評価

上記動物で手術終了後に行動観察を行った。動物モデルは術後 1 日後には回復した。顕著な運動麻痺などは起こっていないことから、手術は運動機能そのものへの直接的な影響はないことが推測される。また、刺激が一つである場合にはそれを目で追い、顔を向けることができることを確認した。このことは視野欠損及び眼球運動系の障害がないことを示している。ところが刺激を左右同時に提示したときには損傷と同側の刺激を常に選ぶ。つまり、無視症状に伴う「消去」の現象が見られることを確認した。また、目立たないように損傷側に刺激を提示した場合にはそれを無視した。つまり、空間無視の症状が見られた。また、損傷対側の身体に触れられても反応しない、といった身体無視の症状も見られた。以上のことから、半側空間無視の動物モデルを確立することに成功したと考えられる。

(3) 視覚顕著性の計算論モデルを用いた行動評価法の確立

行動評価法のひとつとして、ビデオクリップを観察中の実験動物の眼球運動を計測して、視覚的顕著性(サリエンシー)の計算論的モデルを応用することによって、無視症状の行動評価を行うための実験系を確立した。南カリフォルニア大学の Laurent Itti との共同研究によって、視覚的顕著性(サリエンシー)の計算論的モデルを開発した。第一次視覚野を損傷させたマカクザル盲視モデルでこの方法を応用して有用性を確認した⁷。具体的には、ムービークリップ視聴中のサルの眼球運動を記録して、ムービーフレームごとに計算論的モデルから得られるサリエンシー値が高いところに眼球運

動が向けられているかどうかを検証した。その結果、盲視モデルにおいては、見えないはずの視野の提示された刺激のサリエンシーの高いところに向けられていることを見いだした。このことは第一次視覚野損傷後にもサリエンシーという視覚情報を利用可能であることを示唆している。

またさらに、視覚的顕著性(サリエンシー)の計算論的モデルとしてより生物学的に妥当なものを確立するために、皮質下の脳部位である上丘の神経ネットワークモデルを作成した。上丘は眼球運動や注意に関わる部位であり、近年では視覚的顕著性(サリエンシー)にも関わっていることが提唱されている。甘利による神経場モデルに基づいて上丘の神経ネットワークモデルを作成し、上丘にどのように視覚的顕著性(サリエンシー)が表象されるか、そしてそれが微小電気刺激によってどのように影響を受けるかについてシミュレーションを行った⁸。その結果、上丘への微小電気刺激が、半側空間無視のような注意障害において失われた視覚的注意の情報を再建するための神経補綴システムとして構築可能であることが示唆された。

参考文献

1. Karnath, H. O., Ferber, S. & Himmelbach, M. Spatial awareness is a function of the temporal not the posterior parietal lobe. *Nature* 411, 950-953 (2001).
2. Doricchi, F. & Tomaiuolo, F. The anatomy of neglect without hemianopia: a key role for parietal-frontal disconnection? *Neuroreport* 14, 2239-2243 (2003).
3. Thiebaut de Schotten, M. *et al.* Direct evidence for a parietal-frontal pathway subserving spatial awareness in humans. *Science* 309, 2226-2228 (2005).
4. He, B. J. *et al.* Breakdown of Functional Connectivity in Frontoparietal Networks Underlies Behavioral Deficits in Spatial Neglect. *Neuron* 53, 905-918 (2007).
5. Gaffan, D. & Hornak, J. Visual neglect in the monkey. Representation and disconnection. *Brain* 120 (Pt 9), 1647-1657 (1997).
6. Yoshida, M. in *Advances in Cognitive Neurodynamics (III) Proceedings of the Third International Conference on Cognitive Neurodynamics - 2011* (Yamaguchi, Y.) 711-715 (Springer, 2013). doi:10.1007/978-94-007-4792-0_94
7. Yoshida, M. *et al.* Residual attention guidance in blindsight monkeys watching complex natural scenes. *Current Biology* 22, 1429-1434 (2012).
8. Yoshida, M. & Veale, R. Saliency-guided neural prosthesis for visual attention: design and simulation. *Neuroscience Research* 78, 90-94 (2014).

無意識的同調行動における脳内統合過程の解明

研究代表: (独) 理化学研究所 BSI 適応知性研究チーム・研究員 長坂泰勇

概要

社会において適応的な行動をとるためには、他者との協調動作が不可欠である。しかしこれを意識的に行うには社会はあまりにも速く変化しすぎている。むしろ意識にのぼらない脳機能によってこれらが処理されていると推測することは想像に難くない。そこで本研究では「無意識的な同調行動」あるいは「動作の引き込み」に焦点を当て研究を進める。本研究のねらいは、社会的状況下にある無意識的な行動を比較認知科学、脳神経科学の俎上にあげることで、現実の社会適応行動に必要とされる、無意識的脳機能を明らかにする。

Abstract

In social environment, one has to coordinate his or her actions with another in order to establish smooth joint actions. However, in some cases, the coordination has to be achieved rapidly, where intentional coordination might be unsuitable or impossible, and spontaneous coordination might take place. To understand brain mechanisms for the synchronization in details, studies in animal model are required. However, little is known about spontaneous synchronization in animals. This project aims to examine spontaneous behavioral synchronization between two monkeys in social bonds. Furthermore, the project explores neural mechanisms for establishing the synchronization.

1. 研究開始当初の背景

(1) 無意識的同期・動作の引き込みとは

動作の引き込みとは、たとえば二人の向かい合ったヒトがその場で足踏みを要求される場合、足踏み開始後 30 秒程で、両者の足踏みの歩調が「無意識的かつ無自覚に」同期する現象のことをさす。またこの場合には、足踏みを意図的に「合わせないように」教示した場合でも、歩調が同期してしまうことが報告されている¹。さらに隣り合ってロッキングチェアに座っている二人のヒトのイスの揺れも時間経過と共に同期することが報告されており、揺れを規定するロッキングチェアの物理的特性が各々で異なっても、ヒトは無意識的にチェアの揺れを同期させてしまう²。

(2) 学術的背景

上の2つの例では、実験課題中の行動の同期には何ら適応的意味は存在しないと考えられる。しかし昆虫、魚類や鳥類の集団的な移動行動、蛍の集団的な発光などでは同期的な行動が散見され、ヒト以外の生物においては適応的な意味が存在する³。すなわちヒトにおける他者の行動理解や模倣の基盤となるもっとも原初的な処理系が系統発生的に維持されており、それがたとえば上記2例の「無」適応的な行動過程に反映されているのではないかと推測することができる。実際、前頭葉に障害をもつ患者、自閉症やアスペルガー症候群、アルツハイマーあるいは統合失調症などの症状には、しばしば反響言語(echolalia)や反響動作(echopraxia)が報告されている^{3,4}。これは患者が相手の発した言葉を意味の理解を伴わずに反復したり、相手の動作を無意識的に模倣したりする症状である。近年の脳神経科学の知見によれば、ミラーニューロンのような模倣を促進するような脳内システムに

対する抑制が働かないために、このような症状が生じると考えられており、潜在的な適応システムを仮定した上の推測と一致する。これまで意識的な模倣行動や同調行動を扱った研究は多数行われているが、無意識的な行動に焦点を当てた研究は上記の例を含めてもごく少数である。またヒト以外の動物を対象とし、行動(比較認知心理学)と脳(脳神経科学)の両面から検討する試みはこれまでほとんど見られず、現在でも未開拓の領域である。無意識的な脳内過程を理解し、無意識と意識の統合過程を明らかにすることは、社会を構築するために必要な意識的な認知過程を理解する上で必要な課題である。

2. 研究の目的

(1) 行動学的検討および神経科学的検討

本研究計画では主に2つの課題を時系列的に行うことを計画している。ひとつは(1)動作の引込み現象を生じさせる個体を含めた環境変数の検討である。ここでは主に動作の引込み現象に必要とされる環境条件の検討を行うために、個別に訓練した数組のサルを用いてどのような条件が引込み現象を引き起こすのかを検討する。この課題によって引込み現象を引き起こす時間的条件や空間的制約を明らかにし、後続する課題のための基礎的なデータを記録するとともに、データ解析法を確立する。課題(2)では、課題1で明らかとなった条件について、その条件と関連性の高い脳領域の活動を多次元生体情報記録法によって記録し、脳内での時空間的な処理について検討する。

(2) 研究課題の意義

本研究によって無意識的な同期現象を生じさせる脳機能を明らかにし、模倣行動等の意識的な同期現象の機序解明につなげることが本研究課題の最終目標である。これにより本領域で目標の一つとされている自閉症への応用の他に、上で述べた脳障害によるさまざまな症状への応用が期待される。また経済行動に及ぼす無意識的な同調効果、さらには無意識そのもの自体への理解の促進も期待され、基礎的な脳理解から応用面までその意義は大きいといえる。

3. 研究の方法と成果

(1) 研究方法

ニホンザルにおける動作の引込み 比較認知科学的検討
頭部、胸部、上肢を自由に動かせるようサルをチェアに固定し、ニホンザルに動作の引き込み現象を生起させ、その現象が起こる際の環境的要因、時間的変化を明らかにする。前方に設置したライト付きボタンを交互に押すように訓練した(図1-Solo)。各個体が1試行あたり30回程度ボタンを交互に連続して押すようになったところで、その個体のベースライン記録を数セッションに分けて行う。ベースライン記録では、サルの左右の手首、肘、肩の計6カ所にマーカーをつけ、モーションキャプチャによってボタン押し課題中の動作を記録した。さらに同時に、課題遂行中の個体を正面からビデオ撮影し記録した。複数個体のベースライン記録が終了した時点で、各個体を向い合わせ

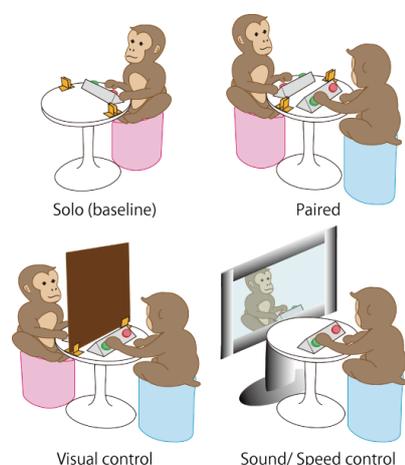


図1: 実験条件

に座らせて、ボタン押し課題を遂行させ、動作の引き込み現象を観察した(図 1-Paired). なお実験中の両個体には上で述べたようにモーションキャプチャによって個体の運動を記録したが、同時に所属研究室で開発されたサル用ヘッドフリーアイトラッカーを使用し、サルが試行中にどこを見ていたのか、その視線も同時に記録した。

動作の引き込み現象が観察された後に、複数の条件を設けて課題を繰り返す。条件として実際に他個体間同士で試行を行う条件、個体の間に衝立てを置き、互いに他個体の行動が観察できない条件(図 1-Visual control), 他個体がボタン押しを遂行している状況を撮影したビデオクリップを実物大に投影する条件(図 1-Sound/Speed control)を用いた。なお申請者が以前に行った研究から、モニター上に投影された同種サルを観察しているサルが、実際のサルを観察している場合と同様な行動変容を生じることが確認されている^{4,5}。

(2) 成果

同期現象の生起 向い合った2頭のサル(M1, M2)がボタンを押した時間について、すべての組み合わせの相対時間を算出し、ヒストグラムを作成した。また各サルのボタン押しの速さに対応したランダムノイズ(jitter)をデータに加え、上と同様なヒストグラムを作成し、2つのヒストグラムの差分を計算した。結果は図2A に示される通りであるが、どのペアのサルでも相対時間が0のときにピークを示し、その大きさはランダムノイズを加えたものよりも有意に大きかった。すなわち2頭のサルのボタン押しが同期していたことと、この結果はランダムな現象でないことが示された。

速度変化 同期現象を解析する過程で、向い合った2頭のサルのボタン押しの速さが条件に応じて変化することも明らかになった。図 2B は Solo 条件と Paired 条件のサルのボタン押しの速さを示している。Baseline の速さと比較すると、どの条件でも速さが有意に変化していることが示された。単純な同期が生じているならば、相手のボタン押しと同じ速さで行われるはずであるが、実際にはそのように変化してはいない。すなわち互いに速さを変化させていることが示唆される。

視覚・聴覚情報の影響 モニター上に提示されたボタン押しするサルに対面させ、同課題を行った。聴覚(A)・視覚(V)・視聴覚(AV)条件において、サルのボタン押しのスピードに違いは見られなかったが(図3)、同期現象を上と同様に解析したところ、同期の頻度はAV>V>Aとなった。したがって、同期現象の生起には視覚と聴覚の両方が必要であることが示唆された。

まとめ 以上に示すように、ヒト以外の霊長類でも無意識的な同期現象が観察された。ここで重要な点は、向い合う他個体とボタン押し動作を同期させるということをサルには全く訓練していないという点と、サルにとって他個

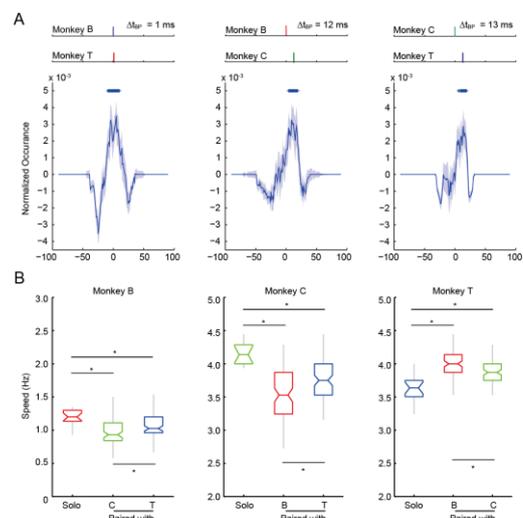


図 2: A)同期解析, B)速度解析

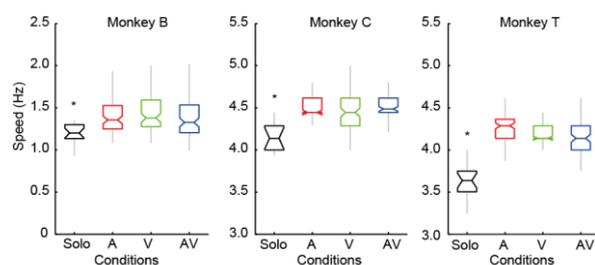


図 3: 視聴覚条件間による速さの比較

体と同期したボタン押しを行うことは、この場面においてはまったく無意味な行動であるという点である。そのような全く無意味な行動であっても同期することは、驚くべき発見であった。さらにそれは互いが行動を変化させることで成立し、さらに視・聴覚情報のどちらも同期に必要なことが示された。これは神経科学的な検討を行う上で、基礎的かつ重要な結果である。一方で、当初目的としていた神経科学的計測および考察には至ることができなかった。本研究からどのような条件が同期の生起に必要なのかは明らかになったので、同様な実験パラダイムにより脳科学的実験を推進する。

参考文献

- [1] M Honma, T Kumada, Y Osada, and M Nagai, ‘The synchronized stepping –Automatic imitation behavior between persons–’, *The Japanese Journal of Psychonomic Science*, 27 (2008), pp. 127–128.
- [2] MJ Richardson, KL Marsh, RW Isenhower, JR Goodman, and RC Schmidt, ‘Rocking together: dynamics of intentional and unintentional interpersonal coordination.’, *Hum Mov Sci*, 26 (2007), pp. 867–891.
- [3] Luria A R The frontal lobes and the regulation of behavior. In Pribram KL, Luria AR (eds): *Psychophysiology of the Frontal Lobes*. New York, Academic, 1973, pp 3–28
- [4] F Lhermitte, B Pillon, and M Serdaru, ‘Human autonomy and the frontal lobes. Part I: Imitation and utilization behavior: a neuropsychological study of 75 patients.’, *Ann Neurol*, 19 (1986), pp. 326–334.
- [5] SH Strogatz, and I Stewart, ‘Coupled oscillators and biological synchronization.’, *Sci Am*, 269 (1993), pp. 102–109.
- [6] Nagasaka, Y., Notoya, T., Iriki, N., and Fujii, N. (2008a) Amygdala, anterior cingulate, and orbital frontal cortices activity in Japanese macaques while watching emotional expressions with social context. Society for Neuroscience 2008, Washington DC, USA, Nov. 2008
- [7] Nagasaka, Y., Notoya, T., Iriki, N., and Fujii, N. (2008b) Amygdala activity in Japanese macaques while watching emotional expressions with social context. The 31st Annual Meeting of the Japanese Neuroscience Society, Tokyo, JAPAN, Jul. 2008
- [8] V Gallese, L Fadiga, L Fogassi, and G Rizzolatti, ‘Action recognition in the premotor cortex.’, *Brain*, 119 (1996), pp. 593–609.

高次認知過程を伴う協調行為の生成に関するその動的メカニズムの構成論的理解

研究代表：理化学研究所脳科学総合研究センター 谷 淳

概要

本研究においては、認知エージェントが他者と協調行為を生成するにおいて、他者の行為を、その予測可能性を推定しながら、予測しつつ自己の行為を意図的に生成していくことが重要であると考え、それに対応する動的神経モデルを提案し、その作動を他者との協調行為の学習に関するロボット実験を行うことにより、評価した。実験の結果、提案するモデルを搭載したロボットは、他者の行為に関して予測できる部分と予測できない部分を推測しながら、協調行為を意図的に生成しうることが判明した。また予測されない他者の行為を知覚した場合、その予測誤差信号を用いて自己の意図を他者のそれに合わせるように変更していくことが可能であることを示した。

Abstract

The current study assumes that estimating predictability of own prediction is an essential meta-level cognitive capability which is required for generating social interactive behaviors with other individuals. In order to generate cooperative behaviors with others, the subject attempts to anticipate the behavior of the others by acquiring the predictive models of them. However, the behaviors of the others are often unpredictable because they possess free wills to generate own independent actions. Therefore, acquiring complete predictive models for others seems to be intractable. In this situation, we proposed a novel dynamic neural network model which can learn to predict next step sensory values with their means and variances. The robotic learning experiments utilizing this model demonstrated that the robot can interact with others proactively by developing the meta-level cognitive capability of estimating own predictability via learning of the past interaction experiences.

1. 研究開始当初の背景

個体間の相互作用、協調行為のシステム構成論的研究は現在までに、身体的な力の相互作用レベルから言語コミュニケーションのレベルを含む多様なレベルの問題において、人工知能的な記号的な記述を用いた手法、神経回路の学習に基づく手法、ロボット工学的な手法など多様な手法での研究が行われてきた。そのような研究文脈において、より高次の認知作用が要求される協調行動生成に関する構成論的な研究は、ロボット工学及び人工知能の分野でよりトップダウン的な手法を用いて研究されてきた。しかしこのような研究は工学的に機械に協調作業をさせる方法を与えることはできるが、人はいかに他人と協調行為を自律的に発現させるのかという問いに答えることはできないであろう。人間の認知行動は、トップダウンの意図を持ち、内部モデルを用い行為の結果の予測を常に行い、そして予測と現実の誤差を常にフィードバックして意図及びゴール自身をオンラインで変更していくといった複雑な認知過程を含むものであり、複数個体間での協調行為においても同様のプロセスの存在が推察される。筆者は今回このような知見を基にして、2個体ロボットの相互作用実

験を行うことにより、人間などが協調行為を開始する際に、どのようなメカニズムにて、互いの意図を読みあいそれらを揃えていくことができるのか理解できると考え、本研究を行った[1].

2. 研究の目的

本研究の目的は、他者との協調行為の生成のためのメカニズムを理解することであり、そのための認知神経科学的なモデルを提案し、その作動をロボット実験を通して検証する。他者との協調の問題において、他者は常に協調する意図があると仮定することはできない。なぜなら、他者は、「自由意志」をもって自分からは予測もつかない行為を生成する可能性があつてこそ、他者であるからである。他者は、時には個人として勝手な振る舞いをし、また別の時には社会的な要請から相手に合わせた協調的な振る舞いをすると想定される。最近の「心の理論」に関する心理学的な研究においては、人間は他者の行為を自分の行為との関係から予測するような内部モデルを獲得していると考えられている。そのような内部モデルを獲得するときの問題になるのは、自由意志をもって勝手に振舞う側面を持つ他者の全ての振る舞いを内部予測することは不可能だということである。そこで必要となるのは、注意の制御のメカニズムであると筆者らは考える。相手が勝手な振る舞いをしている間は自然に相手への注意が低くなる一方、相手が協調的な行為を始めようとしたときには、注意のレベルが上がるというモデルを想定する。さてここで一つ仮定をおく。相手との協調的行為は学習によって獲得され、その学習が進むことによって相手の振る舞いの予測精度は上がる一方、相手が非協調的な自分勝手な行為をしている部分については予測学習は進まず、予測誤差は減らないと考える。このとき、その予測誤算の絶対値、つまり予測の分散をも予測できたとしたら、その予測の分散の予測を持って注意の度合いを制御できよう。つまり相手の振る舞いが予測できると予測する場合は(協調的な状況)、相手の振る舞いに注意し、逆の場合は無視するのである。ここで予測の分散の予測とは、メタレベルでの自分と相手の関係のモニタリングであり、心の理論を構成する際の重要な要素となる。

3. 研究の方法と成果

本研究において、図1Aに示すような動的神経回路モデルを提案した。本モデルの特徴は、(1)生成予測モデルであること、(2)時定数の異なる神経ユニット群により構成され、それによって時間方向の階層性が学習を経て獲得できること、(3)入力時系列の予測をその各時点での平均値と分散をもって学習表現できる、などが挙げられる。本モデルは複数個の時系列を対象として学習する場合において、以下に示す尤度関数Lを最大化する方向に、神経回路内部の結合重みと各時系列を再生するための、各上位レベル内部状態初期値(図1AにおけるIS)を決定していく。

$$L_{\text{reg}} = \prod_{t'=t-W}^t \prod_{i \in I_0} \frac{1}{\sqrt{2\pi v_{t',i}^{(s)}}} \exp\left(-\frac{(y_{t',i}^{(s)} - \hat{y}_{t',i}^{(s)})^2}{2v_{t',i}^{(s)}}\right)$$

本式において、 $\mathbf{y}_{t,i}$ は各時間tでの予測出力、 $\overline{\mathbf{y}}_{t,i}$ は教示時系列、 $\mathbf{v}_{t,i}$ は予測分散をしめしている。学習を終えた神経回路モデルは、与えられた内部神経ユニットの初期値(IS)から、上位レベルの遅い時定数の神経活動ダイナミクスに駆動され、上位レベルから下位レベルへのトップダウンの情報流れをもって、知覚入力の予測をその各時間の平均と分散をもって実時間で行っていく。本モデル

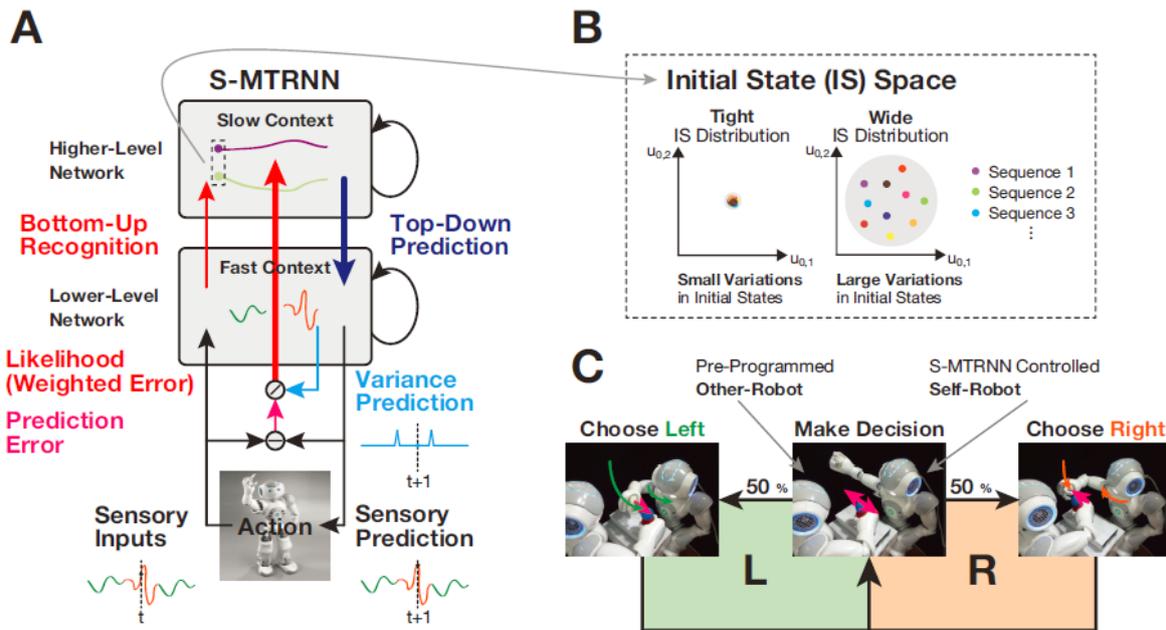


図1. 本研究で用いられた, A: 神経回路モデル, B: 内部初期値 IS の設定条件, C: ロボットによる協調行為学習タスク

が後述するロボット実験に利用される場合, 予測される知覚入力とは簡略化された視覚信号と, アームの各ジョイントのエンコーダ角度信号となる. この両者の信号は visuo-proprioceptive (VP)信号と呼ばれる, 複数次元ベクターの時系列となる. 上位階層の各時点での内部活動値は, 近未来における対象への作用のしかたの意図を表している. この時, 予測に誤差が生じた場合, 現時点での意図を体現する上位階層の内部活動値は, その生じた誤差を最小化する方向に, 変化させていく. これは, 主体のトップダウンの予測に対して, その予測誤差を逆伝搬させることにより, ボトムアップ的に現在の意図を変更させるものである. この時, 一つ重要なことは, 予測される分散が大きいほど, 逆伝搬される誤差は小さくなることである. つまり, 予測の精度が悪いと推定される状況においては, 誤差が生じてでもそれは重要視されないということである.

本モデルを用い, ロボットによる他者との協調行為の生成学習の実験を行った(図1C). 本実験設定において「他者ロボット」は物体を右または左方向に毎回ランダムに選択し動かす. この動作は実験者の作った簡易なプログラムによって生成される. 一方, 提案する神経回路モデルによって制御される「主体ロボット」は, 他者ロボットが動かす物体の動きに合わせて, 自分の腕を左右同じ方向に動かせるように, 繰り返し学習していく. 学習は経験した複数の VP 時系列を再構成できるように執り行っていく. しかしここで, この VP 時系列は, 他者ロボットがランダムに左または右に物体を動かすことにより獲得されるため, 次にどちらの方向に物体を動かすかの分岐点では, 予測は不可能であることに留意したい. 学習は, 二つの異なる条件を想定し, 執り行われた(図1B). 第一の条件では, 各時系列に対応する複数の内部初期値(IS)の分散が小さくなるように設定され, 第二の条件では, それが大きくなるように設定され, 学習は行われた. 各条件において学習した場合での, 神経回路の forward dynamics により心的イメージとして再構成された, 特定の時系列の様子を図2に示す. 両条件での学習再構成したようすについて, 第一の条件で学習した場合, VP時系列は, 繰り返し再構成した場合, 初期値に敏感なかたちで同一の時系列が繰り返し生成される(図2A).

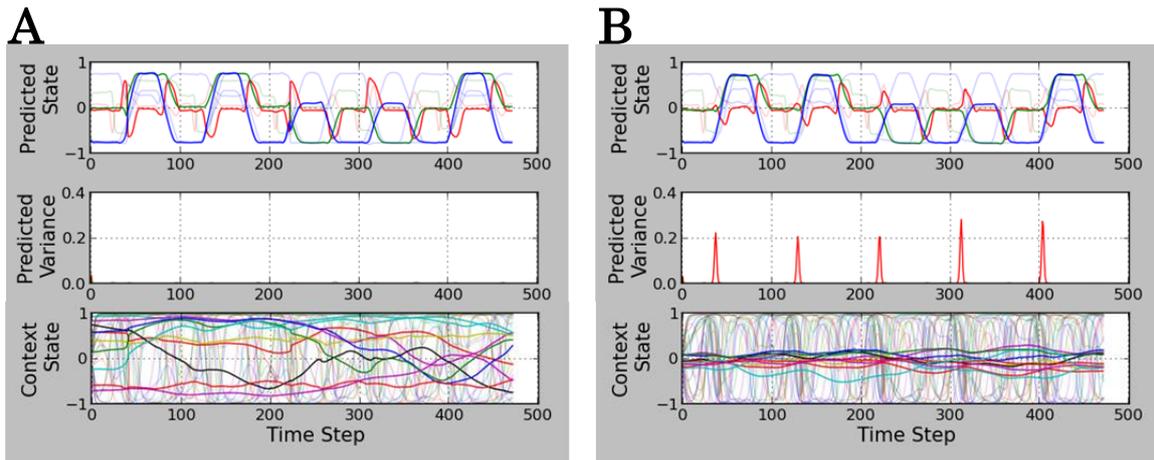


図2 二つの異なる学習条件にて学習し再構成された VP 時系列

この時分散の予測は全ての時間ステップにおいて、0に近い値を示している。それに対し、第二の条件で学習した場合、VP時系列は与えた初期値に関係なく、分岐点において左右の方向のどちらかにランダムに物体が移動されるようすを、生成する(図2B)。このとき、分散は分岐点で大きな値を取ると予想されている。以上の結果は、初期値に敏感に多様な時系列を学習した場合、各時系列は決定論的に学習され、一方初期値に依存せずに学習した場合、それらは確率的ダイナミクスとして学習されることを示している。さらに興味深い観測として、内部神経活動のようすは、両者において大きく異なる点が挙げられる。決定論的な学習が為された場合、内部神経活動は、各分岐点において、次の相手の行為を予測するような表現が取られている。一方確率的な学習が為された場合、各分岐点でのそれらの表現は同じである。このことは、前者は予測的なダイナミクスを構成し、後者は非予測的なそれを構成していると言える。

これら両者の学習された神経回路を用いて、ロボットの協調行為生成の実験をしたところ、そのようすは大きく異なった。決定論的な学習が為された神経回路を用いたケースでは、予測が外れた場合、誤差信号が逆伝搬され、内部状態が急激に変更され、相手の行為に合わせて行為の補正が急激に行われる。この時に誤差伝搬をしないようにモデルを変更すると、内部状態は変更されず、相手の行為に合わせて自己の行為を生成していくことはできないことが判明した。一方、確率的な学習が為された場合、誤差逆伝搬を利用した内部状態の修正をしなくても、相手の行為に合わせて自己の行為を生成していくことは十分にできた。以上の結果は、決定論的な学習がなされた場合、トップダウンの意図の作用が強くなり、予測が裏切られた場合、誤差逆伝搬を利用したボトムアップの作用を持って、両者の相互作用の結果として、意図を変更していくことになる。一方、確率的な学習がなされた場合は、意図的なトップダウンの作用は形成されず、行為は知覚の単なる反射として生成されるのみとなる。本研究結果においては、協調的行為を生成する場合において、他者の生成する自由な行為の根底に決定論的な因果を読み取るか、単に確率的だと捉えるかによって、主体の行為の生成の仕方が変わってくる可能性が示唆されていると言えるであろう。

参考文献

[1] J. Namikawa*, R. Nishimoto., H. Arie, J. Tani: "Synthetic approach to understanding meta-level cognition of predictability in generating cooperative behavior", ICCN2011, Japan, June, 2011.

個体間コミュニケーションとしてのサルの競争行動とそれを支える脳活動

公益財団法人東京都医学総合研究所・特任研究員 渡辺正孝

概要

サルは他のサルと、あるいはコンピューターと競争して、あるいは競争相手なしでビデオゲームをした。サルは競争があるときに、ないときと比べてより早くかつ正確に反応した。前頭連合野外側部のニューロンは競争条件と非競争条件では異なった活動を示し、勝ち負けを捉える働きをしていることがわかった。さらに相手がサルかコンピューターかで前頭連合野ニューロンは異なった活動を示した。前頭連合野ニューロンは競争における成果をモニターし、勝利に導くようサルを動機づけしていると考えられる。

Abstract

In this study, monkeys played a video game, either competing with another monkey or the computer, or playing alone without a rival. Monkeys performed more quickly and more accurately in the competitive than in the noncompetitive games. Neurons in the lateral prefrontal cortex showed differential activity between the competitive and noncompetitive games showing winning- and losing-related activity. Furthermore, activities of prefrontal neurons differed depending on whether the competition was between monkeys or between the monkey and computer. These neurons may play an important role in both monitoring the outcome of competition and motivating the monkeys to increase their chances of winning.

1. 研究開始当初の背景

(1) 生物における競争の意味

競争は生物に重要な意味を持っている。自然界において動物は、エサや水、配偶者といった限られた資源を他個体と競い合って獲得しなければならない。競争において勝つことは、その生物の適応性や生存確率と子孫を残す確率を高めてくれる一方、負けることは生存競争に敗れることを意味する。

(2) 競争における報酬

一方、競争は生物の認知・情動に影響を及ぼすことが知られている。われわれはたとえ同じ報酬であっても、一人でゲームに勝ってもらう場合より、他者と競い合って勝ち取ってもらう場合の方がうれしく感じる。逆に、一人でゲームに負けて報酬がもらえないときよりも、競争に負けて報酬がもらえないときのほうが強いフラストレーションを感じる。競争場面では勝ったり、負けたりした時に「うれしい」「くやしい」といったさまざまな情動が喚起される。しかし、これまで情動をテーマにした脳研究のほとんどは食物や水などの生理的報酬に対する脳活動を調べるといったレベルの研究に止まっていた。

2. 研究の目的

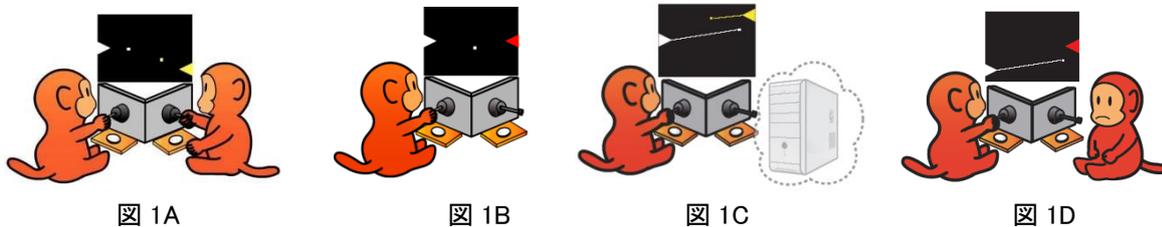
サルに競争ゲームをさせて行動と脳活動を調べる

本研究では、2頭のサルに競争的ゲームを行わせ、一方が勝てば必ずもう一方は負け、一試合ごとに勝ち・負けが変化するような事態で、競争相手の存在やその行動がもう一頭のサルの行動やニューロン活動にどのような影響を与えるのかを詳しく調べることにより、コミュニケーション行動としての競争の脳メカニズムを調べた。脳活動としては認知と動機づけの統合に重要な役割を果たしている部位である前頭連合野の外側部の活動に特に注目した。実験では、この脳部位で競争における勝ちや負けに関係した活動が見られるかどうか、またそうした活動が見られた場合、競争がサル対サルの場合とサルがコンピューターを相手に競争する場合で、あるいはサルが競争相手として存在している場合と単に物理的に存在しているだけの条件で、活動に違いが見られるかどうかを調べた(文献1)。

3. 研究の方法と成果

(1) サルにおけるシューティングゲーム

まず2頭のサルがコンピューターディスプレイ上でお互いが弾を打ち合う、という対戦型シューティングゲームを訓練した(図 1A)。早く標的に弾を当てたサルは報酬が与えられ、敗れたサルには報酬は与えられなかった。また、相手は存在せず、1頭のサルだけが、標的に弾を当てるとある確率で報酬が与えられる、というゲームも行わせた(図 1B)。その他に、相手はサルではなく、コンピューターが相手として打ち返してくる(図 1C)、あるいは相手のサルはいるが打ち返してくることはない(単にその場にいるだけ)(図 1D)、というさまざまな条件でサルにゲームをさせ、標的に正しく当てる割合(勝率)や、どれだけ早く標的にあてるのか、などの行動面について詳しく分析した。



行動的には、競争があるゲームにおいて、ないゲームに比べサルが標的に弾を当てる命中率が高くなるとともに、当てるまでの時間も短くなった(図2)。人は、スポーツやオークションといった他者と競争する場面では、熱くなって大いにやる気を出すすが、サルも競争条件ではよりゲームに熱中し、やる気を出していたと考えられる。

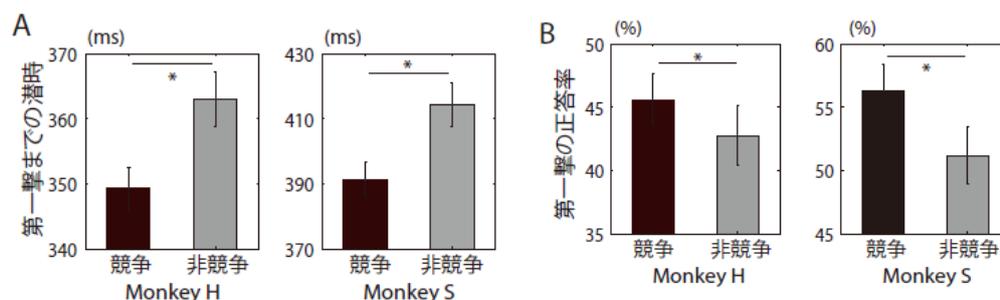


図2: 二頭のサル(H, S)の競争条件と非競争条件における第一撃までの潜時(A)と第一撃の正当率(B)。

(2) 勝ち負けに関係した前頭連合野ニューロン

ニューロン活動は前頭連合野の外側部から記録した。ニューロン活動の分析では、競争の有無、相手はサルかコンピューターか、相手は競争相手か単にだけか、という様々な条件で比較した。このゲームを行っているサルの前頭連合野外側部のあるニューロンは、同じ報酬でも、競争で勝って得たときには競争なしに弾を当てて得たときより、大きな活動変化を示した(図3A)。また別のニューロンは、競争で負けて報酬が得られなかったときには、競争のない条件で報酬が得られなかったときより大きな活動変化を示した(図3B)。

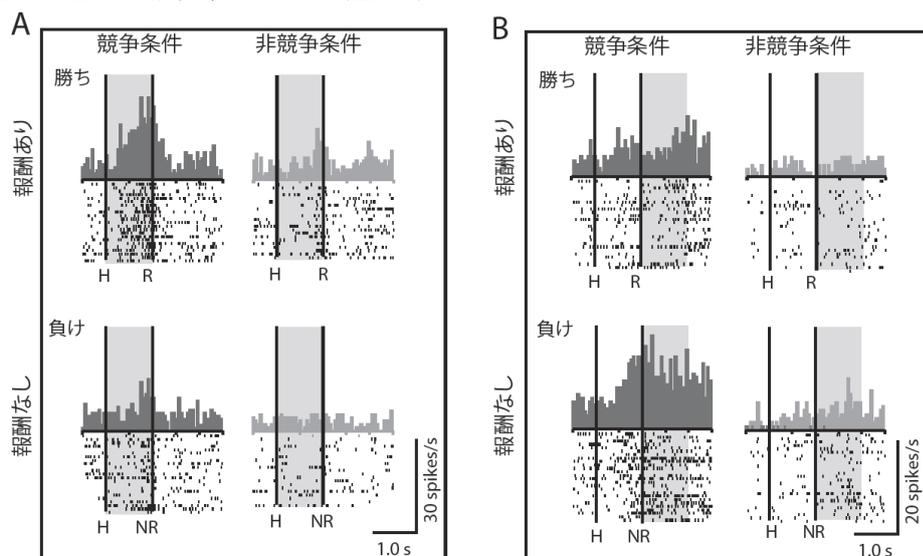


図3: 競争条件と競争がない条件でゲームをしたときのサル前頭連合野ニューロンの活動。Aは同じジュース報酬でも競争条件で勝ってもらったときに非競争条件でもらったときより大きな活動を示したニューロンの例。Bは同じくジュース報酬を得られない場合でも、競争で負けてもらえなかったときに、非競争条件でもらえなかったときより大きな活動を示したニューロンの例。A、Bどちらの図においても、ニューロン活動はヒストグラム(上)とラスタ(下)で示す。ラスタ表示の各列は各試行を、各点はニューロンの発火活動を示す。Hは弾が標的に当たった時点を、Rはジュースが与えられる(NRは与えられない)時点を示す。ヒストグラムはラスタを加算したものである。影をつけた部分は競争条件と非競争条件でニューロン活動に最も大きな違いが見られた期間を示す。

(3) 競争相手の違いを反映した前頭連合野ニューロン

競争条件ではすぐ近くに競争相手のサルがいるのに対し、非競争条件では競争相手は存在しない。この実験で見出された「競争条件では非競争条件におけるより、報酬応答や無報酬応答が増強した」という結果は、競争そのものによるのではなく、すぐ近くに別のサルがいる、という要因が働いた結果である可能性も考えられた。そこで私たちは、競争はなくて、すぐ近くに別のサルがいる(競争相手ではないサルがいる)という条件でも前頭連合野外側部のニューロン活動を記録した。その結果、非競争条件下で競争相手ではない別のサルが近くにいるかいないかということによりニューロン応答に差は見られなかった。つまり、競争条件における報酬・無報酬応答の増強には、近くに別のサルがいることではなく、「競争」相手がいることが重要であることが明らかになった。

人のfMRI(機能的磁気共鳴画像)研究では、被験者が実際の人と競争するときには、コンピューターを相手に競争するときより、前頭連合野で活動性が増すことが知られている(文献2)。おもしろいことに、私たちが見出した勝ち負けに関わる前頭連合野ニューロンも、サルがサルと競争するとき、コンピューターと競争するときより大きな活動変化を示した。

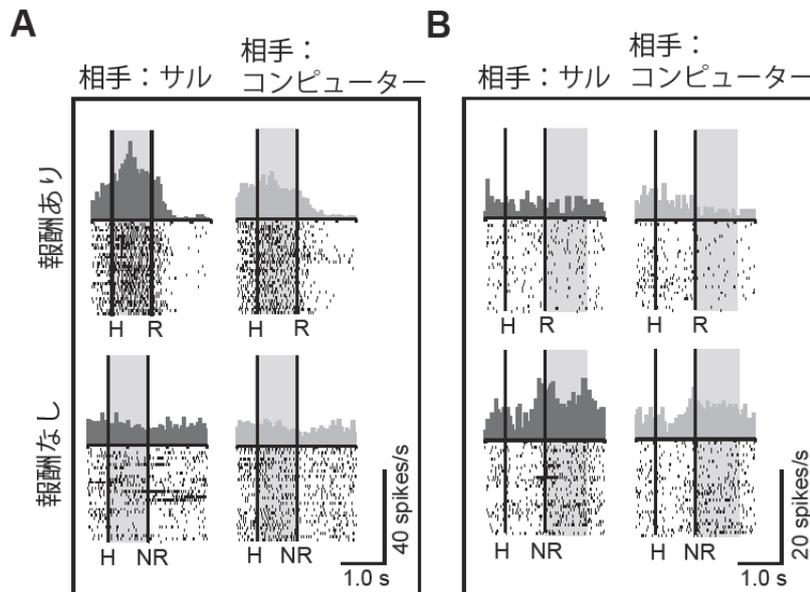


図4: 競争相手がサルかコンピューターかにより異なった活動を示したサル前頭連合野ニューロンの例。Aは勝って報酬を得たときに、相手がコンピューターの時よりサルの時により大きな活動を示したニューロンの例。Bは負けて報酬が得られなかったときに、やはり相手がサルの時により大きな活動を示したニューロンの例。影をつけた部分は競争相手の違い(サルかコンピューターか)によりニューロン活動に最も大きな違いが見られた期間を示す。

競争で勝てばうれしく、負ければ悔しく感じるが、前頭連合野ニューロンは、こうしたうれしい、悔しいという気持ちも反映しながら、競争結果を正しく捉え、それ以後の競争行動をより適切なものにするという役割を持つと考えられる。逆に言えば、競争での勝ち負けを正しく捉え、それを後の行動に生かせるような能力を持つ生物が進化的に有利な立場にあったのではないかと考えられる(文献1)。

参考文献

- [1] Hosokawa, T., Watanabe, M. (2012) Prefrontal neurons represent winning and losing during competitive video shooting games between monkeys *Journal of Neuroscience* 32(22):7662-7671
- [2] McCabe K, Houser D, Ryan L, Smith V, Trouard T (2001) A functional imaging study of cooperation in two-person reciprocal exchange. *Proc Natl Acad Sci U S A* 98:11832-11835.

平成 24-25 年度
公 募 班

Hodge 分解によるヘテロ・大域的な脳活動の遍歴検出

研究代表：東北大学大学院情報科学研究科・助教 三浦佳二

概要

本研究では Hodge-小平分解の神経科学への応用を目指した。1つ目の研究では、形を変えて時間発展するニューラルネットワークを Hodge-小平分解によりデータ解析し、ネットワークの結合強度の時間変化を支配する学習則が STDP 則である時に、ループが多くでき、Hebb 則である時にはループができにくいことを解明した。2つ目の研究では、脳が Hodge 分解を行う仮説の下で、触れた指などの大きさや形状に依らずに、正しくタッチ回数を数えられる触覚のニューラルネットワークモデルを提案した。

Abstract

We applied the Hodge-Kodaira decomposition in the context of neuroscience. In the first study, we analyzed evolving neural networks by using the Hodge-Kodaira decomposition. We found that the networks have more loops for the STDP learning rule and less loops for the Hebbian rule. In the second study, we proposed and implemented a neural network model of a tactile sensor network, which can count correctly the number of touches irrespective of the shapes and sizes of the touches.

1. 研究開始当初の背景

(1) ネットワーク解析手法

従来、複雑ネットワーク研究でネットワークを解析する際に、サマリーとして用いられてきた指標は、一様性を仮定した局所的なものであった。例えば、「次数分布」(=1つの頂点から伸びる枝の数の確率分布)などの統計的平均描像でかつ局所的に数えられる情報を使ったものが典型的であった。このような指標を用いるということは、実質的に、ネットワークを「木構造」としてツリー近似を行っていることと等価である。しかしながら、このようなツリー近似を行うと、ウイルスがネットワーク上で蔓延するかどうかのシミュレーションを行った場合に、間違えてしまうことが知られているなど、大域的なループ構造を考慮しないことによる欠点が指摘されてきた(Wangら,2003)。大域構造を捉えるには、現代幾何学におけるトポロジーの分野から数学的道具立てを持ち込む必要があるように思われた。そこで、本研究においては、ヘテロで大域的な情報を得ることを目指し、Hodge-小平分解を使ったネットワークの解析(Jiangら,2011)を行うこととした。

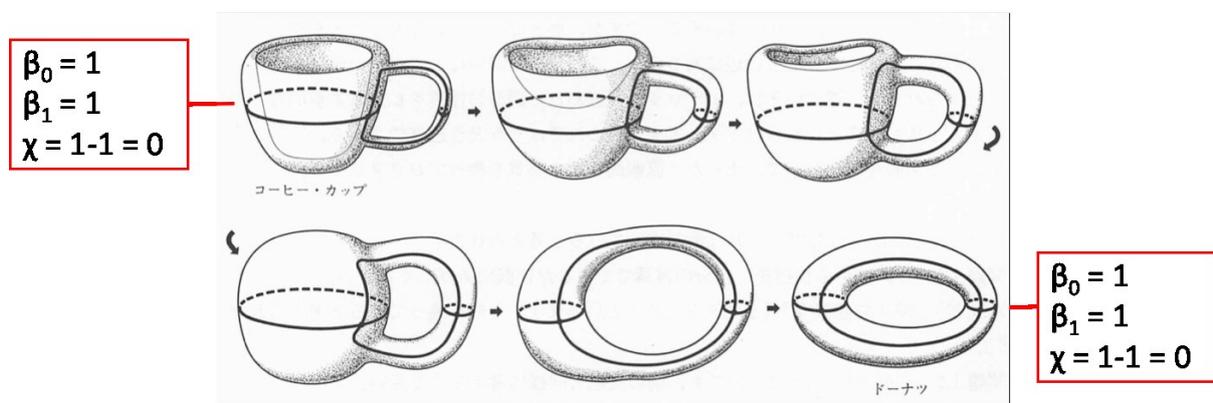
(2) 脳のモデル

個々の感覚ニューロンへの刺激を統合して、外界の1つの対象から来る刺激として認識することは、脳の偉大な機能である。例えば、視界の中に見えるおはじきの数を、おはじきの大きさや形に依存せずに数えることや、あるいは、触覚において、皮膚を叩いた指などの大きさや形に依存せずに、タッチ回数を正確に数えることは、必ずしも容易に実現できる機能ではない。従来、脳に学んだロボットビジョンやタッチパネルとしてこれらの機能を実現する際には、パーセプトロンのような層を積み重ねたニューラルネットワークが多く使われてきた。パーセプトロンも回転に対する不変性を部分的には実現するなど、パターン認識において一定の成果を挙げってきたが、本質的にアナログ計算であ

ることから、離散的な数え上げを行う100%精度保証のあるアルゴリズムとはなり得ない。そこで、ニューロン間のスマートなコミュニケーションを通して、完全な不変性を実現するアルゴリズムが期待されていた。本研究においては、トポロジカルな不変量(おはじきの数, タッチ回数)を大きさや形に依存せず数えるために、数学のトポロジー分野の方法を用いることとした。なお、トポロジーという数学分野は、不変量として例えば、

- $\beta_0 =$ かたまりの数
- $\beta_1 =$ 穴の数
- $\chi = \beta_0 - \beta_1$

があり、それらの値が、コーヒーカップからドーナツまで連続的に変形していても不変であることを教えてくれる(次の図を参照)。

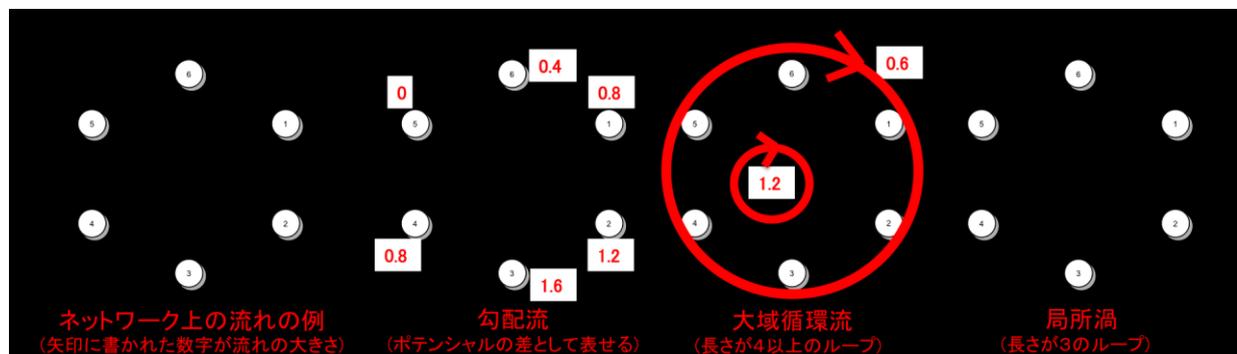


“トポロジー: 柔らかい幾何学” written by 瀬山士郎

2. 研究の目的

(1) ネットワーク解析における Hodge-小平分解

Hodge-小平分解を応用することで、脳内の再帰的な情報の流れを検出し、その情報処理としての機能を解釈することが本研究課題の大きな目的であった。Hodge-小平分解は、(向き付き)ネットワークとして表される流れのデータが与えられた時に、それを3つの流れ「勾配流」「大域循環流」「局所渦」へと分解する(次の図を参照)。

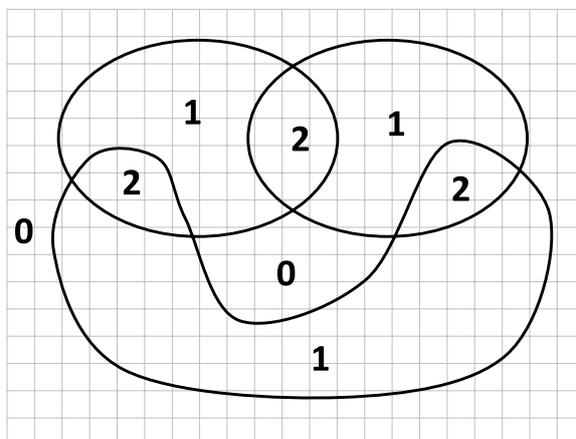


本研究においては、ベンチマークとして、ネットワークの形が時間発展するニューラルネットワークをシミュレーションしたデータに対してHodge-小平分解を行うことで、これまでに知られていた分岐図

(時間発展のタイプをパラメタ毎に分類したものを)再現する情報が得られるかどうか、そして得られるとすれば、カオスを見せるパラメタ領域をさらに細分化できるのかどうか、を調べることが目的であった。

(2) 触覚の Hodge 分解モデル

2つ目の研究においては、1つ目の研究におけるような Hodge-小平分解のデータ解析への応用だけでなく、脳のモデルを考えて、脳の触覚系が Hodge-小平分解のアルゴリズムを利用して、不変量を取り出しているという仮説を提案することが目的であった。数学のトポロジー分野のアイデア(特に Euler 解析)を援用することで、タッチする指などの大きさや形に依存せずに、タッチ回数を正確に数えられる触覚系のモデルを提案することを目的とした。右上の図の場合は「3回」が正答となる。

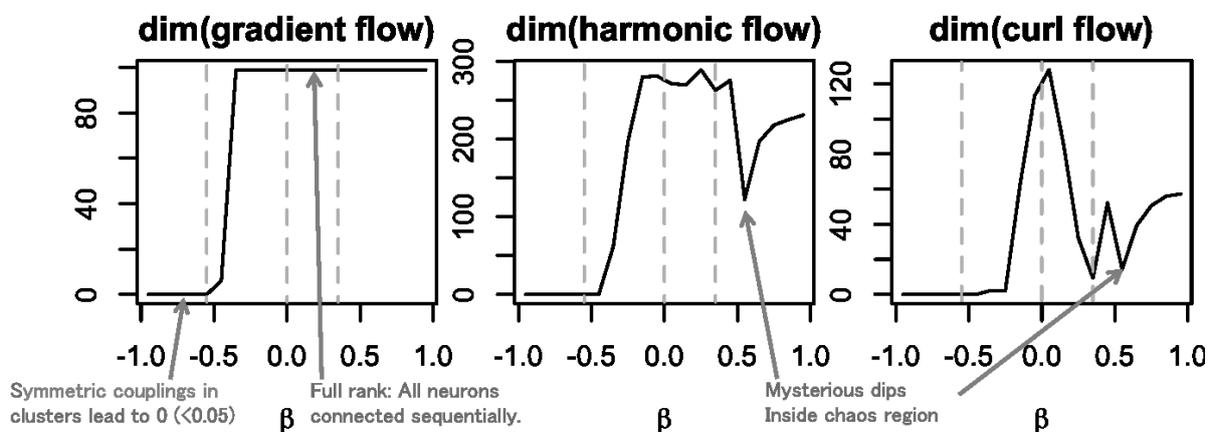


3. 研究の方法と成果

(1) ネットワーク解析における Hodge-小平分解

Hodge-小平分解を青木・青柳らによる時間変化するネットワークモデルの構造解析に応用した。特に、本手法によってはじめて得られるトポロジー不変量に着目した。例えば、大域循環流 (harmonic flow) の自由度はネットワーク中の大域的なループの数に対応し、勾配流 (gradient flow) の自由度は連結成分数(かたまりの数)を反映する不変量となっている。

その結果、ネットワークの結合の時間変化を支配する学習則 (β の値で制御される) が STDP 則 ($\beta \sim 0$, 発火の因果を学習してパスをつくりやすい) である時に、ループが多くでき、Hebb 則 ($\beta < -0.5$, 対称結合をつくりやすい) である時には大域的なループができにくいことを解明した(次の図も参照)。



さらに、ネットワークの不変量である大域ループの数が、従来知られていたこのモデルの分岐図 (Aoki & Aoyagi 2009, 2011) を反映するだけでなく、これまでカオス領域としてひとくりにされていたパラメタ領域 (Anti-Hebb 則, $\beta > 0.3$) をさらに細かく特徴づけることを可能とすることを発見した。

(2) 触覚の Hodge 分解モデル

数学のトポロジーの分野において導かれた (連続変形において保存する) 不変量を活用することで、2次元タッチパネル上の指の形や位置に全く影響を受けず、タッチ回数を正しく数える並列アルゴリズムを提案した。なお具体的には、Euler 解析 (Ghrist ら 2010) を使うことで、形の変化に対するタッチ回数の不変性を実現した。0,1 のみをとる白黒画像に対しておはじきの数を数えるのが (既出の記号における) β_0 であるとするれば、Euler 積分とは、複数回のタッチを考慮するために、整数値 (1,2,3,...) をとる画像に対して拡張して定義された χ (既出の記号を参照) に相当する。その積分が、次の図のような分解を許す性質を持つために、タッチ回数を正しく数えられるというカラクリになっている。

$$\chi\left(\begin{array}{|c|} \hline \text{1} \quad \text{2} \quad \text{1} \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline 0 \\ \hline \end{array}\right) = 2\chi\left(\begin{array}{|c|} \hline \text{1} \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline 0 \\ \hline \end{array}\right) = 2$$

提案したアルゴリズムは、リカレントニューラルネットワークの形で電子回路として実装された。2次元平面上に並べられたセンサーネットワークとしてのニューロンは、近傍のニューロンと互いにコミュニケーションをとって相互作用しながら、自らの状態を時間発展させていく。そして、時間発展後の終状態が不変量としてのタッチ回数を反映したものとなっている。我々は具体例で、タッチ回数を正しく数えられることを確かめた。

以上の意味でアルゴリズムは並列化されており、特に画素数が増えた時に、計算時間を短縮できるメリットがある。なお、具体的な実装は MATLAB/Simulink 上でシミュレーションとして行ったが、Hardware Description Language (HDL) を生成できているため、例えば SPICE 上で再現することが可能となっている。

参考文献

- [1] K. Miura and T. Aoki, Hodge-Kodaira Decomposition of Evolving Neural Networks, (submitted).
- [2] K. Miura and K. Nakada, Neural implementation of shape-invariant touch counter based on Euler calculus, (submitted).

インターネットの構造をもとにした脳のモデルの提案と コミュニケーションの実験

研究代表： 東京大学大学院総合文化研究科・教授 池上高志

概要

大きく分けて3つの業績がある。

1)ウェブの興奮場異質性の発見. Twitter システムを用いて, ウェブが自己組織化するゆらぎとバースト的応答の関係を明らかにした. 2) Cave and Court Computation という新しい並列計算システムの実験を行い, そのダイナミクスを議論した. 3) 知覚交差実験. 仮想空間の上で, 人の被験者に指刺激の知覚交差実験(仮想空間で相手に出会うと刺激が来る)を行い, それに伴う身体性および意識上の変化を報告してもらった. これらの結果を統一的に見たものを, Hadoop 的な脳のモデルを議論している.

Abstract

First, we analyzed the Web, Twitter dynamics on the Web, to reveal its “excitability” analogous to neural assembly. Second, we actually built and analyzed a concurrent computing system, a cave-court system. Third, we have conducted a simple “psychological” experiment between two human subjects, which we call perceptual crossing. We found that the emergence of turn-taking behavior and co-awareness of each other while detecting the other partner. Juxtaposition of these unrelated topics conceives a new brain architecture which we name a Hadoop brain.

1. 研究開始当初の背景

この 10 年近くにコンピュータが速くなり, デバイスが進化したおかげで, どの分野でも巨大なデータが扱えるようになってきた. しかし, この莫大なデータをもとにどのような科学的理解を構築したらいいのか, という大きな問題を逆に突きつけている. それは生物学, 心理学, 社会学全般で起こっている問題である. たとえば, 64 個の細胞が 16000 個に分割されるまでを細かくデータを取得し分析した仕事(Keller et al., Science 322 14 November 2008, vol. 322, 1065)や, ライフログの研究(たとえば Deb Roy が自分の子供の成長を 3 年間に渡って自宅に添えつけたカメラとマイクで記憶. Deb Roy et al. The Human SpeechHome Project. Twenty-eighth Annual Meeting of the Cognitive Science Society. 6 page 2006)はそれを典型的に表すものである. これは脳科学においても同様で, 理化学研究所の藤井直敬の猿から長時間に渡って神経活動のデータをとり, それを 4 年生の安部と池上(研究代表者)が解析した際も, どうやって莫大なデータの豊穡さを失わずに理論を考えていくかが, 大きな問題であった. 脳の巨大なデータの問題に関しては, Izekivich らの巨大な神経細胞ネットワークを数だけを 100 億に近づけ, そのパターンを解析するというアプローチがなされている. 池上は, この大規模データの問題に関し, 人工知能学会の年会全国大会において特別セッションを東京大学・知の構造化センターの岡瑞起氏(本プロジェクトの連携研修者)とオーガナイズ(2011 年 6 月)し, コンピュータサイエンスや物理工学の分野から専門の研究者を招いて, 問題を喚起し議論をした. 一方, この問題を解決する鍵がグーグルのアーキテクチャーにあり, それが次にあるように今回のプロジェクト提案の

動機となっている。

1) 計算アーキテクチャーとしての脳。 連続時間再帰ネットワーク(CTRN)のモデルを使った高次の脳機能、意識、コミュニケーションを語るのにはモデルは、上にあげた現在のインターネットの複雑さと巨大さを扱うのには限界がある。一方Googleは、MapReduce, Google File System, BigTable, PageRank, Google Crawlersなどを開発し、巨大なインターネットサービスを維持している。それは、高速に整合的に莫大なデータを扱うためであるが、それはまさに実際の脳が直面している問題である。脳は巨大な神経細胞のネットワークであり、つねに変化している。さまざまな記憶構造をもち、外部からの刺激がなくても自律的にダイナミクスを組織することのできるシステムである。このシステムのモデル化をするのに、Googleの開発した上記 5 つのアルゴリズムとアイデアをベースに脳の新しいモデルを考えよう、というのが本提案の動機となっている。

2) コミュニケーションする脳。 脳の働きを考える上での最小単位は 2 から考えないといけない、という主張は池上が以前からしているものである(例えば、池上高志「2 つの脳から始める」数理科学別冊 2003 年 6 月)。つまり脳はコミュニケーションするためのシステムであり、単独の脳をいくら調べても、脳の中を流れる情報の構造をつかむのは難しい。それはインターネットのアーキテクチャーが、どういう情報をどこへどのくらい迅速に整合的に流すか、ということで決まっているのに似ている。この数年に、イギリスのサセックス大学のグループ、フランスの Lenay のグループ、それに阪大の飯塚博幸や現在うちの研究室の PD である Tom Froese らによって勢力的にすすめられている、感覚交差の実験がある。そこでこの感覚交差の実験システムを組み立て、新しい脳のモデルの構築と、新しい感覚交差の実験を提案するものである。

2. 研究の目的

1) インターネットのデータを記憶という観点から解析。 脳の新しいモデルで中心的なターゲットは、エピソード記憶とデフォルトモードである。しかし、ここでは実際の脳を用いて解析する訳ではない。まずインターネットのデータを用いて脳以外の複雑ネットワークシステムの中に見いだされる、エピソード記憶とデフォルトモードの時間的な構造を、大規模データを解析することで明らかにする。

2) 次にGoogleのアーキテクチャーを使って、脳のミニマルモデルを実装してみせる。 このモデルの実装にあたっては、池上が挑戦的基盤研究でおこなった Mind Time Machine (MTM) の構成をベースにする。具体的には、MapReduce の Map にあたる部分と Reduce に当たる部分を書き表し実装する。このモデルの力学系としての性質を研究する。

3) 感覚交差の実験システムを使って、3人の被験者間の実験を行い、その結果からエピソード記憶やデフォルトモードという観点から議論する。 この実験は、もともとは触覚センサーを用いて、相手が人か物体かを識別する実験であった。今回のプロジェクトでは多数の被験者の実験を通して、どの触覚のパターンが個人の認証になるか、それに付随する意識の変化・同期性、行動の進化を解析する。

これらの結果をまとめて、脳の新しいモデル、Hadoop 型の脳に関して議論する。

3. 研究の方法と成果

大きく分けて3つの業績がある。

1)ウェブの興奮場異質性の発見. Twitter システムを用いて, Twitter に含まれる名詞に注目して時系列を2年間に渡って収集し, その解析をいろいろと行った. そこから主に2つの注目すべき結果を得ることが出来た.

i)ウェブの Default Mode 状態の発見. ウェブにおける default mode network(DMN)に相当するものを, Twitter の時系列間の移送エントロピーを用いて定義した. ウェブにおける DMN とは, 時間スケールに依存した, ほかの時系列に対して情報の source になるうる時系列群として観測できた[1].

ii) ウェブにおける興奮性媒質の発見. Twitter の中で, ツイートの量のゆらぎとバースト的応答の関係を見出した. 特に外因性のバースト的応答が生じる前には, ゆらぎもまた大きくなることを発見した. この応答の種類が変化する, ゆらぎの大きさに関する閾値が自己組織化される. 内因性のバーストでは逆にこのような閾値は見つからない[2].

2) Cave and Court Computation という新しい並列計算システムの実験を行った. 並列化したプロセスに同じファイルへの書き込みを同時的に許し(Cave 相), そのあとで一斉に書き込まれたデータの矛盾を解消する(Court 相). この計算プロセスを走らせる計算コアの数を増やしていくと, プロセス間の部分同期やその崩壊過程が観察できる. この, コアの数と計算のスループットの関係を解析し, そこには最適なコア数があること, それにともなって各コアの実行処理件数のダイナミクスが相変化するなどを見出した. これは筑波大学の情報システム系の加藤和彦研究室との共同研究となった[3].

3)知覚交差実験. 仮想空間の上で, 人の被験者に指刺激の知覚交差実験(仮想空間で相手に出会うと刺激が来る)を行い, どれが探している相手かを見つけ出す実験を行い, それに伴う身体性および意識上の変化を報告してもらった. その結果, ターンテーク(交互に指を動かす)が出現すること, 相手の実在性を相互に高く意識した時 (これは, 言葉により報告してもらおうが, その実在性の実感の程度を Perceptual Awareness Scale(PAS)として5段階で表示する国際的に認められた基準)に相手の同定率も跳ね上がることを発見した[4].

1)–3)の結果を統一的に見ること, Hadoop 型(大規模データを高速で処理するためのシステム)の脳のモデルの原理を最初の構想どおりにまとめている[5]. その要旨は, 量的にも質的にも大量の情報の流れにさらされたシステムが, 自己組織的に見せる記憶の作り方と, 計算のフレームワークである. これを Massive Data Flows と呼び, 2014 年に WebSci の国際会議(Indiana,23/June) のワークショップにおいて, 議論する予定である. また日本人工知能学会において, 特集号を組んでいる. ICAART では, position paper を発表した[6].

参考文献

- [1] Mizuki Oka, Takashi Ikegami: Exploring Default Mode and Information Flow on the Web, PLoS ONE 8(4): e60398. doi:10.1371/journal.pone.0060398, 2013.
- [2] Mizuki Oka, Yasuhiro Hashimoto, Takashi Ikegami, Fluctuation and Burst Response in Social Media, The 2nd International Web Observatory Workshop WOW2014 at WWW 2014, to be presented, Korea, April, 2014.
- [3] Mizuki Oka, Takashi Ikegami, Alex Woodward, Yiqing Zhu, Kazuhiko Kato: Cooperation, Congestion and Chaos in Concurrent Computation. Advances in Artificial Life, ECAL 2013: Proceedings of the Twelfth European Conference on the Synthesis and Simulation of Living Systems, pp. 498-504. MIT Press, 2014.
- [4] Tom Froese, Hiroyuki Iizuka and Takashi Ikegami: Embodied social interaction constitutes social cognition in pairs of humans: A minimalist virtual reality experiment , Scientific Report. Vol. 4, No. 3672, 2014.
- [5] Takashi Ikegami, A Design for Living Technology: Experiments with the Mind Time Machine. Artificial Life, Vol. 19, No. 3(4), pp. 387-400 2013.
- [6] Takashi Ikegami, Mizuki Oka, ,Massive Data Flows: Self-organization of energy, material, and information flows, 6th International Conference on Agents and Artificial Intelligence ICAART 2014, pp. 237 - 242, Angers, France, March, 2014.

意思決定ダイナミクスの階層性と不安定性を理解するための基礎理論の構築

研究代表： お茶の水女子大学人間文化創成科学研究科・准教授 郡宏

概要

本研究では、不安定性を内包する振動子系の縮約理論と結合系の解析に取り組み、大自由度ヘテロ系の複雑なダイナミクスを理解するための基盤理論を構築した。主な成果は 2 つある。1つは振動子ネットワークの粗視化記述理論であり、これによって実効的に低自由度のダイナミクスを発展方程式のレベルで顕在化させることができる。もう 1 つは、ノイズがあるときに現れる新しい不安定性の発見である。相互作用強度を強くすると、逆に同期が壊れることが一般的に起こることが示された。これらの理論は大自由度ヘテロ系を理解するための基礎理論としての活用が期待される。

Abstract

In this project, we deal with networks of oscillators with internal instability to construct a basic theory for understanding complex dynamics in heterogeneous systems with large degrees of freedom. There are two main results. One is on a coarse-grained description of oscillator networks. With this method, we may highlight a small number of effective modes in complex dynamics. The other is on the discovery of novel instability arising in coupled noisy oscillators. We show that strong coupling between oscillators generally destroys synchrony. We expect that these theories will be applied to systems with large degrees of freedom.

1. 研究開始当初の背景

コミュニケーションによる意思決定の背後には階層的な構造がある。つまり、各々の意思決定は神経細胞ネットワークなどの大自由度ヘテロ系が作り出す、ネットワークには実効的なモジュール構造があると考えられ、複数の部分集団の結合系と見なせるだろう。意思決定のような複雑なダイナミクスには、カオスに代表されるような不安定性が決定的な役割を果たしていると考えられる。

コミュニケーションは、各々の意思決定のダイナミクスが相互作用した、階層的な多体系のダイナミクスであり、各階層のダイナミクスを理解することがコミュニケーションの理解に肝要だと考えられる。各々の意思は、ヒトの場合は脳という大自由度の系によって生成される。より下等な脳を持たない生物でも、多数の感覚器の構成する複雑な結合系が「意思」を決定していると考えられる。どちらの場合も各々の意思の生成実体は大自由度でヘテロな構造を持つ系である。そのような系が、外界の情報と接触したり、あるいは他者と相互作用したりするとき複雑なダイナミクスが生成される。

しかし、外部入力や相互作用による各々の応答がある程度決定論的であることを考えると、意思決定の背後には実効的に小自由度の協同ダイナミクスがあると考えられる。このような見方は、本領域の代表である津田一郎氏らによって提唱されている考え方にそぐう。各々の意思の状態はある程度自発的に遷移したり、弱い相互作用によっても変化しうるものであるという仮定に基づくと、この秩序状態は完全な安定状態ではなく、弱い不安定性をもった準安定状態であると考えべきである。

我々はこれまで、振動子ネットワークの秩序化や秩序状態の遷移現象、また外部入力に対する応答特性などについて理論的な研究を行ってきた。これまでの研究のほとんどで、動的素子としてリミットサイクル振動子を考え、その相互作用、ノイズ、外力は個々の動的素子の安定性を損なわない程度の強度であると仮定して理論を構築してきた。つまり安定解の近傍で適用できる手法を活用した理論である。しかし、コミュニケーション理解のためには、本質的に不安定性が関わっている系のダイナミクスを理解する必要があると考えた。

2. 研究の目的

このような背景のもと、本研究では具体的には次の2つに大別される研究を行った。

(1) 大自由度ヘテロ系が生成する協同ダイナミクスを記述する縮約方程式の導出理論の構築

複数の遅いモードが混在している状況を仮定し、それらの遅いモードの従う運動方程式を系統的に記述する手法を確立する。協同ダイナミクスのメカニズムを理解するための基盤理論を作ることが目的である。

(2) 不安定性を内包する動的素子の結合系の一般的な振る舞いの探索

意思決定の背後には実効的に小自由度なカオス的な振る舞いがあると仮定し、モジュール間や各個人間のダイナミクスを不安定性を内包するユニットの結合系として捉える。不安定性を持つ系では、秩序状態の安定性が一般的にデリケートな条件であることを示し、秩序形成に至るためのコミュニケーションに求められる条件を明らかにすることが目的である。

3. 研究の方法と成果

(1) 大自由度ヘテロ系の縮約方程式の導出理論の構築

神経細胞ネットワークのような階層構造をもつ大自由度ヘテロ結合系への応用を念頭に結合振動子系の粗視化(縮約)理論を構築した。具体的にはネットワーク上の結合振動子系を記述する位相方程式(図1)に対して、重要な少数の変数(運動モード)を構成し、それらの変数のみで閉じた粗視化方程式を導出する一般的な手法を提案した。

本手法は以下の手順を踏む:(i)位相ロック解の周りで位相方程式を線形化し、固有値問題を解く。(ii)得られた固有ベクトルの情報を利用した非線形座標変換(図2)を行う。(iii)重要でない運動モードをゼロとおく。これにより少数の重要な運動モードの時間発展を記述する粗視化方程式を導出することが可能となる。本手法は結合振動子系一般に適用でき、また少数の自由度が支配的となるダイナミクスを簡潔に記述する手法として有用である。

このような少数の運動モードが決定的に重要となる現象に分岐現象がある。中心多様体縮約は力学系の標準形を決定し、分岐点近傍の局所的なダイナミクスを普遍的に記述する枠組みとして知られている。一方、本手法は、粗くではあるが、しかし大域的な構造をも簡潔に記述することが可能

であり、中心多様体縮約にはない利点をもっている。

本手法は、(1)サドルノード分岐を起こすランダムネットワーク上のダイナミクス(図3)、(2)大域結合系におけるクラスタリング状態のホップ分岐、(3)モジュラー構造をもつネットワーク上の分岐、などの例に適用できることが確認された。このように、複雑かつ多彩なネットワーク上の振動子ダイナミクスに適用可能な本手法は、意思決定ダイナミクスなどの階層構造が重要であると考えられる現象に対して、少数の重要な変数を抜き出す一般的な数理手法としての応用が期待される。以上の成果をまとめた論文は現在投稿中である(プレプリント番号:arXiv:1311.0917)。

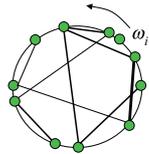


図1:ネットワーク上の結合振動子系

$$\dot{\phi}_i = \omega_i + \sum_{j=1}^N \Gamma_{ij}(\phi_i - \phi_j)$$

$$R^{(l)} = \sum_{i=1}^N v_i^{(l)} e^{i(\phi_i - \phi_i^0)}$$

図2:新たに提案した非線形座標変換. この変換後, 重要でない運動モードを0とおいて粗視化方程式を導く

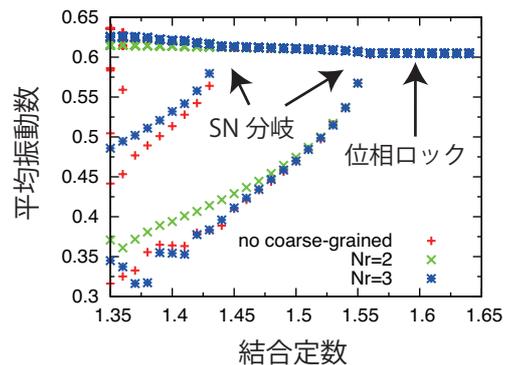
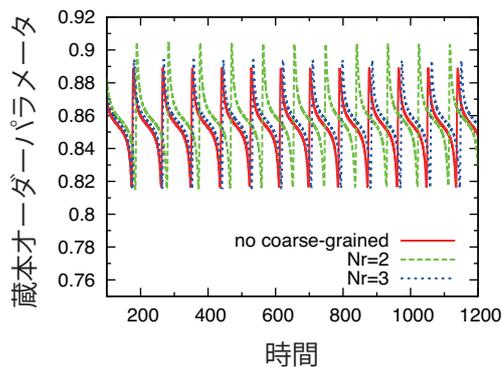


図3:ランダムネットワーク上の30振動子系を運動モード数2,3で近似(粗視化)(a)位相ロック解がサドルノード(SN)分岐を起こした後の蔵本オーダーパラメータの典型的な時系列.(b)各振動子の平均振動数の分岐図.3モードでは2回目のSN分岐まで記述できる.

(2) ノイズのある結合振動子系のリエントラント転移

神経細胞ネットワークにはモジュール構造があると考えられる。つまり、ネットワークは複数の部分集団の結合系と見なせ、集団の秩序だった振る舞いが脳における情報処理に関与していると期待されている。神経細胞ネットワークがコミュニケーションなどによる外的影響に素早く反応するためには、強い相互作用が必要である。しかし強い相互作用はシステムの安定性に悪影響を与える可能性がある。この問題に取り組むために、相互作用する振動子群の同期状態とノイズの関わりを詳しく調べた。その結果、強すぎる相互作用は逆にノイズの効果を強め、同期状態をより崩壊させやすくなることを発見した(図4)。この現象を解明するために、次の位相振動子モデルを解析した。

$$\dot{\phi} = \omega + KZ(\phi)\{h(\Omega t) - h(\phi)\} + \xi(t)$$

まず数値解析を行い、位相振動子モデルでも現象を再現することを確認した。ついで、対応するFokker-Planck 方程式を解析し、その次元解析を通して、位相スリップを起こす結合強度 K とノイズ強度 D のスケーリング則

$$D \sim \omega^{\frac{4}{3}} K^{-\frac{1}{3}}.$$

を導くことに成功した。さらにまたこの現象が起こるモデルのクラスを特定し、ゆるやかな条件下で起こる一般的な現象であることを突き止めた。素早い応答を得るためには相互作用が強いほうがいいが、これは同時に秩序状態の不安定性も増大させることが明らかになった。この研究は現在投稿準備中である。

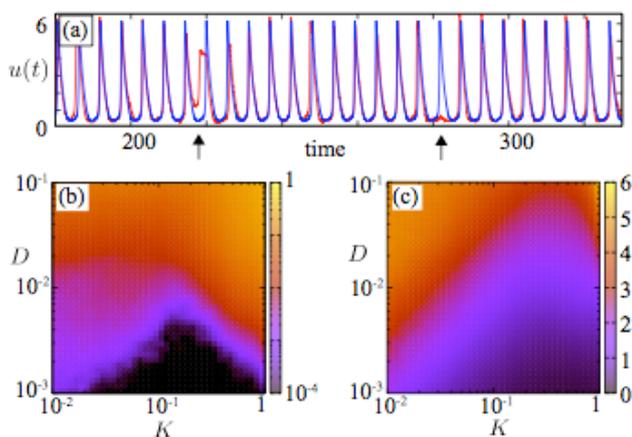


図 4: 相互作用するリミットサイクル振動子の位相スリップ。1つの振動子が、もう一方の振動子から一方向性結合を受けている。(a)時系列。矢印で示したところでスリップが起きている。(b)スリップ頻度。縦軸はノイズ強度、横軸は相互作用強度。黒い領域は長時間安定に同期が起こる。黄色い領域ではほとんど時間で同期が起きない。相互作用が大きくなると、ノイズの効果が強まりスリップ頻度が大きくなることが発見された。(c)2つの振動子の時系列の差の自乗平均。(a)から分かる通り、大きな K でスリップが起きているところでは、時系列のコヒーレンスは高い。

異なる集団間のコミュニケーションが生み出す内部ダイナミクスの変化

研究代表：香川大学教育学部・准教授 青木高明

概要

本課題の目的は、シナプス可塑性によるネットワークダイナミクスの理解である。神経ネットワークでは、可塑性によって細胞間の相互作用関係が時間と共に変化していく。このような結合力学系の理解を目指して、リズム振動子集団におけるネットワーク可塑性を数理モデルとして定式化した。結果として、自発的な神経細胞集団の形成とネットワーク構造化が生じることを発見し、そのメカニズムを力学系の視点から解析した。

Abstract

In this work, we investigated the organization of a recurrent network under ongoing synaptic plasticity using a model of neural oscillators coupled by dynamical synapses, where the coupling weights dynamically change depending on the relative timings between the oscillators. We found that the system exhibits several types of self-organizations of the neurons and synaptic connections. We analyzed the organization process in the viewpoint of the deterministic dynamical system.

1. 研究開始当初の背景

神経系は、シナプス結合という可塑性を持つ結合部によって繋がったネットワーク型システムであり、神経活動に依存して、動的に内部のネットワーク構造を変化させる。このような一種のやわらかいネットワークが、学習や記憶といった外部環境への適応やコミュニケーションを支える脳内神経機構の基盤となっている。他者とのコミュニケーションを通じて、我々の脳内ネットワークはどのように変化して行くのか、シナプス可塑性という神経基盤がもつ機能性の理解が求められている。

シングルシナプスレベルにおける可塑性の研究は多くの進捗が見られ、例えばシナプス前細胞とシナプス後細胞との間の発火タイミングが、可塑性を決定しているということが分かってきている [1,2]。このような神経細胞の発火タイミングに依存した可塑性は、Spike-timing-dependent plasticity (STDP)と呼ばれて、その背後に存在する分子機構などについても研究が進められている。

しかし実際に神経細胞は一つ一つがバラバラではなく、ネットワークを形成して機能している。そのため可塑性を理解するためには、ネットワークレベルでの可塑性の効果を解明する必要があるが未解明な点が多い。STDPに基づき、どのようなネットワーク構造が形成されるのか。またそのときのネットワーク構造はどのような機能性を有しているのか。これまで数理解析、数値シミュレーション等をベースに多くの理論研究がこのテーマを扱ってきた。しかし、フィードフォワードネットワークのようなケースを除いて [3]、一般にリカレント結合があるケースについては、未だはっきりした結論は出ていない。例えば、自発的に同期発火クラスターの形成が見られるという報告がある一方で、発火順序関係を保持するフィードフォワードネットワークが形成されるという報告もある [4-15]。

この問題には二つの困難がある。一つはシステムが非常に込み入っている点である。神経細胞モデル自体が通常非線形方程式で記述され、それらが多数集まり、複雑なネットワークを形成している。またシナプス可塑性を組み込む必要がある。これらの諸要因から、一般に数理解析は難しく、また数

値シミュレーションにしても、数十から数百のモデルパラメータを調整する必要があるため、系統的な調査が困難になっている。もう一つの困難はさらに本質的な問題である。それは、シナプス可塑性によって、システム内の相互作用関係が時間と共に変化していく事である。従来のシステム理論や統計力学などにおいては、相互作用関係は不変であり、与えられた相互作用関係から如何に集団としての振る舞いが生じるかという点が議論されてきた。しかしながら、本課題が対象とする系では、相互作用関係自体が、集団として振る舞いと共に変化していく。このため、従来の結合力学系理論から一歩進んだ議論が必要となってくる。

2. 研究の目的

(1) シナプス可塑性に関するネットワークレベルでの解明

本課題の目的は、シナプス可塑性に関するネットワークレベルでの解明である。具体的には、リカレントネットワークの場合において、神経発火活動に依存してシナプス結合が変化していくとき、結果として、どのような回路構造が形成されるのか。また、そのときの神経細胞集団の発火活動にはどのような集団的挙動が生じるのか。これを解明することが目的である。

3. 研究の方法と成果

(1) リズム振動子集団におけるネットワーク可塑性

研究背景に述べた考察では問題点として、解析の対象となるシステムが非常に込み入っていることを挙げた。その点を解決するため、対象となる系について、そのエッセンスを保持しつつも簡略化を行う必要がある。我々は、位相縮約法に注目した。位相縮約法とは、リズム振動の力学系に対して、位相という1変数での閉じた記述への逡減を行う方法である。このような振動子の集団運動については多くの先行研究が有り、周期発火する神経細胞について、その位相縮約法による同期現象の解析も行われてきた。さらに、シングルシナプスレベルの可塑性の研究から、シナプス可塑性が神経細胞の発火率だけではなく、発火タイミングに応じて、変化することが分かっている。対象となる系のエッセンスとして、発火タイミングを表現しつつ、系統的に自由度の高い非線形力学系を位相という一変数へ逡減することが可能である事から、本課題では周期発火する神経細胞集団に対して、位相縮約法を適用した。そして、シナプス可塑性によって、如何なるネットワーク構造が形成されるかを調べた [16,17]。

研究成果についての概略を述べる。文献[16]では、位相縮約法によって導出される位相結合関数が最低次モードのみである単純なケースに限定して解析を行った。また、STDP によるシナプス可塑性をモデル化し、コントロールパラメータを導入することで、学習関数がヘブ的なケースや反ヘブ的なケース、皮質神経細胞等で確認されているような発火順序関係を保持するようなケースなどを統一的に記述し、全パラメータ領域に対して網羅的に系の定常解を数値的、また解析的に調査した。結果として、ヘブ的学習のケースでは、神経細胞集団は2つの同期発火する集団(クラスター)へと収束するようにネットワーク構造が形成されることが分かった。また STDP のように時間順序関係があるケースでは発火シーケンスを保持するようなフィードフォワードネットワークが自発的に形成される。また反ヘブ的な学習規則の時には、システムはカオスの挙動と示す事が分かった。

また文献[17]では、文献[16]の成果をベースに、ネットワーク可塑性に基づく系の自己組織化につ

いて詳細に調べた。一般に神経系においては、工学的な素子と比較して、素子毎のバラツキが大きい。位相振動子集団においては、それらは一般に振動数のバラツキとして記述することができる。そのため、リズム振動子集団に発火周期にバラツキがあるケースについて調査を行い、文献[16]の結果が同様に成立することを確認した。また、位相縮約法によって導出される位相結合関数が最低次のモードのみではなく、微少な高次モードを含む場合についても、同様の結果である事を確認している。さらに、文献[16]では2つの同期発火クラスタが形成されることを示したが、ある条件下(2種類の解が双安定)では、初期条件によっては、さらに多くの個数の同期発火クラスタが形成されうること示し、それを数値シミュレーションで実証した。

次に上記の結果とニューロンの発火特性、例えばレギュラースパイキングニューロンやファストスパイキングニューロンなどの発火特性との関係を調べるため、これらの神経細胞についてコンダクタンススペースのニューロンモデルを取り上げ、その位相縮約を行った。それにより、求められる位相結合関数に基づき、シナプス可塑性によるネットワークの形成過程を調査した。位相結合関数が最小フーリエモードのみからなる場合と、コンダクタンススペースニューロンモデルからの縮約から導出される場合とを比較すると、多くの現象は最小フーリエモードのみでの結果から予想される範囲内に収まることが分かったが、一部それでは説明できない現象も発見された。その原因を調査した結果、従来の位相振動子系研究では、あまり注目されていない位相結合関数の定数項部分が、シナプス可塑性のネットワークにおいて、重要な役割を持つことが分かった。位相結合関数の定数項部分は、一般に素子の自然振動数への寄与として扱うことができる。そのため、従来研究においては特にその効果を取り上げて議論する必要はなかった。しかし可塑性によるネットワーク変化が生じる系においては、この定数項を含む項はシナプス結合強度の変化に応じて、その大きさを変化させる。すなわち、ネットワーク構造の変化と共に、位相結合関数の定数項部の寄与による振動数の変化が起こることになる。これにより、例えば同一の振動数をもつ振動子集団からでも、シナプス可塑性によるネットワーク構造変化の結果として、振動数の異なる周期振動をもつヘテロ振動子集団が自発的に形成されうること示している。我々は、数値シミュレーションを通して、実際にそのような現象が起こることを示し、さらに限定的ながら解析計算によって振動数の異なる同期発火クラスタへの転移メカニズムについて解析を行った [18]。

(2) リソースの拡散による輸送とネットワーク可塑性

前節では、リズム振動子集団におけるネットワーク可塑性を取り上げた。神経系において、リズム現象は多岐にわたって観察されるが、一方でリズム現象に留まらず広いクラスの力学系について、ネットワーク可塑性の解明を進めていく必要があることも確かである。そのため次のステップとして、ネットワーク上の拡散過程を考える。これは神経集団のマクロな活動度やカルシウムイオンなどの物質濃度等が、ネットワーク上に繋がった回路上を伝播していく過程をモデル化している。そのようなネットワーク上の物理量をリソースとして考え、リソースに応じてネットワーク構造が可塑的に変化する状況を考えて。すなわち、ネットワーク上のランダムウォーク過程を考えると共に、ランダムウォークによって輸送されるリソース量に応じて、ネットワークの結合強度がヘブ学習的に適応的に調整される力学系を想定した。これは非常に単純な力学系であるが、結合強度が変化する力学系自体には未解明な点が多い。そのためこのようなトイモデルの解析をベースに、今後の詳細な数理モデル研究の足

がかりにすることを目的としている。

このモデルの解析から二つのことが明らかになった [19]. 1 点目は適切なパラメータにて, この力学系は平衡状態としてリソース分布が冪分布に収束する. 現実のネットワークなどにおいても, ウェブアクセスの分布や人口分布などがジップ則という冪分布に従うことが知られており, この結果はそれと整合する. また同時に結合強度やノードあたりの強度(ノードストレングス)についても, 冪分布になる. ノードストレングスはネットワークの次数(ノードあたりの結合数)を重み付きネットワークに対して拡張した概念で有り, ノードストレングスが冪分布になることは, 平衡状態として得られるネットワークがスケールフリーネットワークとなっていることを意味している. 2 点目として, 各ノードあたりのリソース量は, 分布としては定常な冪分布に収束している一方で, ミクロスコピックに個別変化を観察すると, 時間と共に変化し続けている. このようなマイクロレベルでの継続的变化とマクロレベルでの分布の定常性は, 人口分布や空港網ネットワークなどの現実のネットワークでも確認されている. このモデルは完全に決定論的力学系でありながらも, このような現象が観察できることは, ネットワーク可塑性をもつ力学系について興味深い結果である. また決定論的力学系であるため, この系の平衡状態に対応するアトラクターについて, その性質をリャプノフ解析によって調べた. その結果, この力学系は多安定系であり, 多くの固定点や周期解と共にカオス解を持つことが分かった. さらにネットワークのサイズが大きくなるにつれて, ほとんどの初期状態においてカオス状態に留まることが確認された.

参考文献

- [1] G. Q. Bi and M. M. Poo, *J. Neurosci.* 18, 10464 (1998).
- [2] H. Markram, J. Lubke, M. Frotscher, and B. Sakmann, *Science* 275, 213 (1997).
- [3] S. Song, K. D. Miller, L. F. Abbott, *Nat. Neurosci.*, 3, 919 (2000).
- [4] M. Gilson et al., *Biol. Cybern.* 101, 411 (2009).
- [5] D. H. Zanette, A. S. Mikhailov, *Europhys. Lett.* 65, 465 (2004).
- [6] K. D. Harris et al., *Nature* 424, 552 (2003).
- [7] J. Karbowski, G. B. Ermentrout, *Phys. Rev. E* 65, 031902 (2002).
- [8] Y. L. Maistrenko et al., *Phys. Rev. E* 75, 066207 (2007).
- [10] P. Seliger, S. C. Young, L. S. Tsimring, *Phys. Rev. E* 65, 041906 (2002).
- [11] E. M. Izhikevich, J. A. Gally, G. M. Edelman, *Cereb. Cortex* 14, 933 (2004).
- [12] N. Masuda, H. Kori, *J. Comput. Neurosci.* 22, 327 (2007).
- [13] A. Morrison, A. Aertsen, M. Diesmann, *Neural Comput.* 19, 1437 (2007).
- [14] S. Song, L. F. Abbott, *Neuron* 32, 339 (2001).
- [15] H. Cateau, K. Kitano, T. Fukai, *Phys. Rev. E* 77, 051909 (2008).
- [16] T. Aoki and T. Aoyagi, *Phys. Rev. Lett.* 102, 034101 (2009).
- [17] T. Aoki and T. Aoyagi, *Phys. Rev. E* 84, 066109 (2011).
- [18] T. Aoki, *Neural Networks* (in press).
- [19] T. Aoki and T. Aoyagi, *Phys. Rev. Lett.* 109, 208702 (2012).

ヘテロな振動数の振動子群を用いた脳の高機能情報処理能力の解明

研究代表：九州大学マス・フォア・インダストリ研究所・准教授 手老篤史

概要

人間の脳が持つ高度な情報処理能力は我々にとって最も身近であるが、複雑で重要な問題である。脳内では θ 波や α 波と呼ばれるヘテロな振動数の脳波が測定されており、これらがお互いに影響し合って情報処理を行っている。一方でアメーバやゾウリムシといった単細胞生物も内部にヘテロな周期の振動現象を持ち、それらの共振現象を利用する事によって原始的な知性というものが存在することが近年わかってきた。本研究課題はボトムアップ(原始的知性からの知性)とトップダウン(実際にタスクを行わせた時の脳の活動状況の測定結果の数理モデル化・解析)の2つの方面から人間の脳についての解明を行うものである。

Abstract

Although we have long been familiar with the advanced processing capabilities of the human brain, complicated issues remain. Heterogeneous frequencies in the EEG band, known as θ waves and α waves have been recorded within the brain, and these waves are understood to influence each other in processing information. Further, in recent years, it has come to be understood that unicellular organisms such as the amoeba or paramecium also experience periodic heterogeneous oscillation phenomena and that these primitive life forms exhibit intelligence by making use of resonance phenomena. This research has adopted a two-pronged bottom-up (intelligence from primitive intelligence) and top-down (mathematical modeling and analysis of measurement results regarding human-brain activity when carrying out tasks) method to clarify the processing capabilities of the human brain.

1. 研究開始当初の背景

人類は現在では高度な文明を築き、理論的な思考や情緒に満ちた感性などの素晴らしい知性を持ち合わせている。だが40億年前生物は存在しておらず、知性もまた存在してはいなかった。このような長い年月の中で生命という現象が発生・進化し、知性という現象もまた発生・進化した。それでは原始的な知性という現象はどのように発生し、現在の人類の知性まで進化したのだろうか。本研究ではボトムアップからのアプローチとして単細胞の持つ知性を研究し、トップダウンとして人間の情報処理メカニズムを数理モデルを用いて解明する。

2. 研究の目的

まず生物の代謝ネットワーク等生命現象がある程度複雑になった時にそこにヘテロな周期を持つ振動子が出現する。これらの振動子に外部から刺激が入ると一時的に位相が揃えられるが、結合がそこまで強くない場合にお互いの位相は同期せず、脱同期する。このときに脱同期する速度に2つのタイムスケールが存在すると、そのような振動子群は記憶・想起現象を起こすことがわかっている。[2] 本申請課題はこのようなヘテロな周期の振動子群のもつ記憶・想起現象に着目することにより、

単細胞や高等生物における自発的な知的制御メカニズムの生成を解明することを目的とする。

3. 研究の方法と成果

(1) 単細胞生物の知性の解明

単細胞生物の知的な制御メカニズムとして、北海道大学の中垣俊之らと共にテトラヒメナの容器記憶現象に対する研究を推進・発表した[5]。以下のテトラヒメナの観察結果は北海道大学中垣俊之・國田樹によるものである。テトラヒメナを小さな円形容器内で 30 分程度泳がせ、その後、大きな容器に移すと次のような4つの挙動を示す。(a) 小さな円運動、(b) 曲線上の運動と小さな円運動、(c) 短い距離の直線運動と急な方向転換、(d) 長い距離の直線運動である。特に(a)の円運動の大きさは容器のサイズの1.3倍となることが実験結果よりわかった。

この現象に対して、我々は研究室の学生である山口達也君と共に数理モデルを構築した。(図1)

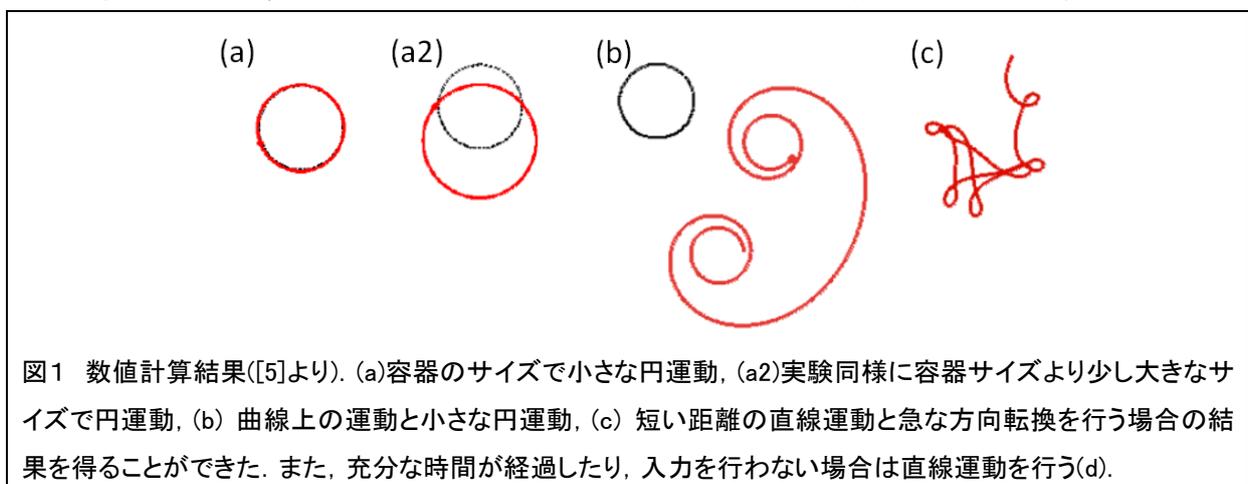


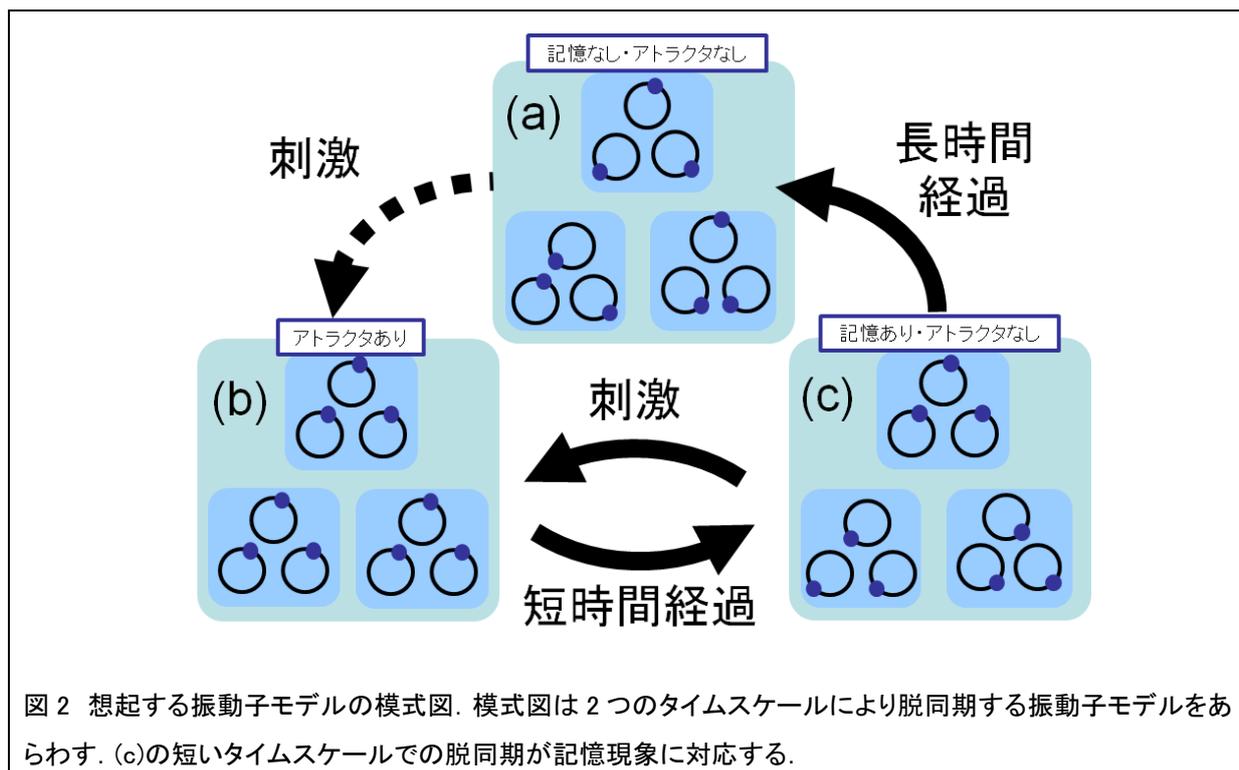
図1 数値計算結果([5]より)。(a)容器のサイズで小さな円運動、(a2)実験同様に容器サイズより少し大きなサイズで円運動、(b) 曲線上の運動と小さな円運動、(c) 短い距離の直線運動と急な方向転換を行う場合の結果を得ることができた。また、十分な時間が経過したり、入力を行わない場合は直線運動を行う(d)。

これらのことから単純な内部状態の仮定だけで容器サイズを記憶するなどの知的な行動が可能であることがわかった。すなわち、生物の進化と共に代謝が複雑になり、それにより自発的に知性が創発されるということができるだろう。

(2) 高等生物における原始的な知性の解明

記憶現象はシナプスの可塑性に保持されているという考えが一般的である。しかし、短期記憶と長期記憶では異なる部位で記憶が保持されており、また運動の記憶もシナプスを超えて移動するという報告がある[1]。このことから、記憶を保持するメカニズムは1つであるとは限らない。また、これまで周期的な運動に対して、アトラクタを形成することにより運動を「学習」する理論が構築されてきた。だが、一般に我々が周期的な運動を学習したからといって、平常時に手足を動かし続けようとするのではない。このことからこれまでの多くの研究ではアドホックなスイッチング機構を制御することにより、運動の切り替えを行ってきた。

ここではシナプスの可塑性やアドホックな切り替え機構がなくとも記憶現象が創発できることを目的として数理モデルを構築した。特にここでは Tanaka らのアトラクタを形成する振動子群のメカニズム[4]と真正粘菌の記憶モデル[2]を組み合わせることにより、複数の位相差を記憶する数理モデルを構築した。特に刺激を受けた振動子群の2つの時間スケールでの脱同期が下図のような振る舞いをし、短いタイムスケールでの脱同期がアトラクタを持たない記憶現象の保持を行うとした。



ここでは高等生物内に見られる原始的・自発的な行動制御を解明するために四脚動物の歩容遷移現象を題材として研究活動を行った. その結果, 1, 運動による神経振動子の選択的な引き込み 2, 運動の上達の再現 3, 脳などからの単純な制御による行動の選択が可能であることを示し, 発表した[6].

(3) 人間の情報処理と知性の解明

本申請課題では脳内の各部位における各振動数の脳波の相互作用に焦点を当てながら脳内の情報処理のメカニズムを解明した. 特に数理モデルを構築することにより脳内の情報処理や脳機能の成り立ちを解明することを目的とした. 本申請課題では本領域 B01G1 班山口陽子氏らのグループの川崎真弘氏が行った実験結果の数理モデル化を行った. これは視覚経路と聴覚経路では脳の活動部位や脳波の位相差が異なるという実験結果である. これらの数理モデルを構築することにより上で述べた原始的な知性と高度な情報処理が可能な脳で何が異なるのかの根本を模索した. 例えば脳波は δ 波・ θ 波・ α 波・・・と 2 倍の振動数ごとに特徴的な性質を持っている. このような機能が情報処理能力にどのように影響するのかを解析した.

我々はこれまでに AF3, P5, Pz における電位に着目した数理モデルを構築し数値計算を行ってきた(Ver.1 モデル)が, それに加えて AF3 と P5, AF3 と Pz の双方向でやり取りされる情報に関する数理モデル(Ver.2 モデル)の構築も行った. これにより, 実験にて測定された両 WMT 時の AF3 の位相差がどのようにして脳内の情報振り分けを担っているのかを再現することが可能となった.

参考文献

[1] Shutoh F, Ohki M, Kitazawa S, Itohara S, Nagao S.: Memory trace of motor learning shifts transsynaptically from cerebellar cortex to nuclei for consolidation. *Neuroscience* 139, 767-777 (2006).

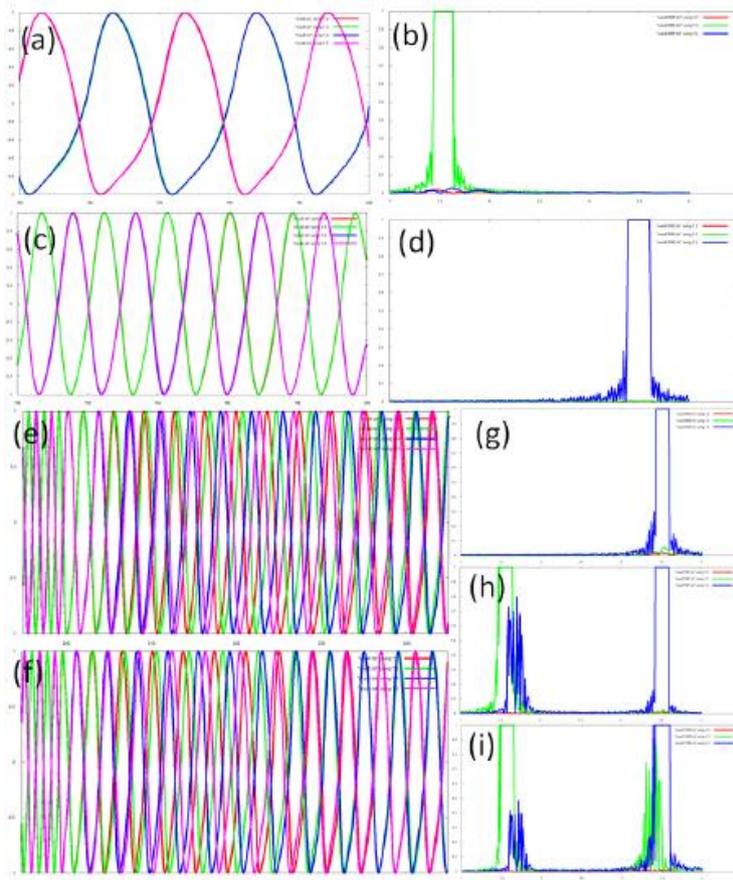


図3 [6]より. 四脚動物の歩容遷移現象における神経振動子の自発的な形成. 身体的な性質により行動が選択され(図(a)はトロット, 図(c)はバウンド), その行動・振動数に対応した CPG が同期する(図(b,d). また, バウンド→トロット→バウンドと反復させることにより, CPG が同期し(図 g,h,i)その結果, 一度目のバウンドよりも2度目のバウンドへの遷移が早くなる(図 e,f).

[2] Amoebae anticipate periodic events.

Physical Review Letters American Physical Society 2008/1/11 Vol. 100, 018101. T. Saigusa, A. Tero, T. Nakagaki, Y. Kuramoto

[3] Protoplasmic computing to memorize and recall periodic environmental events. Proceedings in Information and Communications Technology Springer Japan 2008/12/18, Volume 1, p 213-221. A. Tero, T. Saigusa, T. Nakagaki,

[4] Multistable Attractors in a Network of Phase Oscillators with Three-Body Interactions. PhysRevLett.106.224101, (2011) Takuma Tanaka, Toshio Aoyagi.

[5] テトラヒメナの容器記憶現象に対する数理モデル, 2013 年応用数学合同研究集会資料 p.212-217 (2013) 山口 達也, 手老 篤史, 秋山 正和, 國田 樹, 中垣 俊之

[6] 四脚動物の自発的な歩容遷移を再現する結合振動子モデル, 2013 年応用数学合同研究集会資料 p.218-223 (2013) 杉山 貴昭, 秋山 正和, 手老 篤史

多様なダイナミクスを学び、理解し、生み出す学習理論の新展開

研究代表：九州工業大学大学院生命体工学研究科・教授 古川徹生

概要

本研究の目的は多様なダイナミクスを学習するマルチシステム学習のアルゴリズムを発展させ、コミュニケーション理解や解析に利用可能なアルゴリズムを開発することである。開発したアルゴリズムは非線形テンソル解析を行う自己組織化マップ (Self-Organizing Map: SOM), すなわち Tensor SOM である。われわれは Tensor SOM を社内 E-mail トラフィックデータの解析や、サル の皮質脳波 (ECoG) の解析に応用した。また Tensor SOM をさらに発展させ、観察者の視点という概念を導入し、自己理解や自己言及につながる学習理論の発展基盤を作った。

Abstract

The purpose of this work is to develop a nonlinear tensorial analysis method based on the multi-system learning theory, which can be applied to communication understanding in social situation. The algorithm we developed is called Tensor SOM, which enables us to analyze and visualize relational data. To examine the ability of the Tensor SOM, we applied the Tensor SOM to analysis of e-mail traffic data and ECoG data. Furthermore, the concept of viewpoint is introduced to Tensor SOM, and it is expected to be a foundation of the learning theory for self-understanding and self-reference.

1. 研究開始当初の背景

(1) マルチシステム学習に基づくインタラクション理解

マルチシステム学習は、多数のシステム集合から得られた観測データの学習を通じて(学び)、それらシステム間の関係性を見出すとともに、システム集合に共通する普遍的ルールを見出し(理解し)、さらに得られた普遍ルールを用いて新たなシステムを生成する(生み出す)学習タスクである。われわれはマルチシステム学習がテンソル方程式による多重推定問題であることを見出し、その方程式を解くアルゴリズムを提案した[1,2,3]。このようなマルチシステム学習は多様な運動パターンの学習に必要となる。一方、コミュニティを構成するメンバー集合を観察し、各メンバーの特性とメンバー間の関係性を理解するというのもマルチシステム学習の一種とみなすことができる。そこでマルチシステム学習の理論を元にコミュニティ解析法のための学習アルゴリズムを開発し、コミュニケーション解析に応用しようと言うのが本研究の目的である。

(2) 観察者の「視点」の導入とインタラクションを通じた自己理解・自己言及

観察者自身もコミュニティメンバーである状況を考えると、この課題設定はさらに興味深い状況へ発展できる。それは観察者自身もコミュニティメンバーとインタラクションを持ちつつメンバー同士の相互関係を理解する状況である。この状況においては、コミュニティ内における観察者自身の位置を理解するということが可能になり、インタラクションを通じた自己理解・自己言及の生成について扱える課題設定となる。しばしば「脳を考える脳」という言葉で表されるように、自己理解や自己言及は知

能の重要な側面のひとつである。そこで本研究では「観察者が自己の観察視点を推定することはできるか」という問題提起に置き換えて、コミュニケーションを通じた自己理解の問題に取り組む。

2. 研究の目的

(1) テンソル SOM によるインタラクション解析

本研究の第一の目的は、マルチシステム学習の理論を応用した非線形テンソル解析アルゴリズム、すなわち Tensor SOM を開発し、コミュニケーション解析に応用することである。通常の自己組織化マップ (SOM) ではベクトルデータ集合をマップとして可視化するが、Tensor SOM では関係データと呼ばれるテンソルデータを扱う。本研究では下記のデータを用いた (1) ユーザーの商品に対する好みを評価したレーティングデータ (2) 社内における社員間のメールトラフィックデータ (3) サルの映像を見たサルの皮質脳波記録である。

(2) 観察者の視点推定と自己理解・自己言及

第一の目的をさらに発展させ、コミュニティにおけるメンバーの視点推定や自己理解・自己言及の学習モデルの基盤を作るのが第二の目的である。ここで用いるキーアイデアは2つある。第一は「観察者の視点」という概念を導入し、観察者ごとの視点推定を行うものである。第二は学習機械の集合を学習するメタ学習機械である。学習機械が学習によってどのようなモデルを生成するかは、その学習機械の経験、すなわち学んだデータに依存する。そこで学習機械が生成したモデルの集合を学習するメタ学習機械を用意することで、それぞれの学習機械が学んだ経験の違いをメタ学習機械はモデル化することができるはずである。これはマルチシステム学習で用いた階層的学習の拡張とみなせる。さらにこの状況は興味深い問題提起ができる。すなわち「メタ学習機械は、自分自身の学習結果をデータとみなして学習できるだろうか？」という問題である。これらの課題を通じて、マルチシステム学習の延長としてのコミュニケーション理解、自己理解、自己言及の問題に取り組む。

3. 研究の方法と成果

(1) テンソル SOM によるインタラクション解析

マルチシステム学習で用いた高階 SOM を元に、関係データを解析・可視化する Tensor SOM を開発した。通常の SOM は N 個の解析対象から得られた N 個のデータベクトル $\{\mathbf{x}_i\} (i=1, \dots, N)$ を解析・可視化するのに対し、Tensor SOM の場合は複数の解析対象群があり、その組み合わせに対してデータベクトルが対応する場合に用いることができる。たとえば N 人の顧客が M 個の商品を評価した NM 個のデータベクトル $\{\mathbf{x}_{nm}\}$ を用いることで、顧客に関する自己組織化マップと商品に関する自己組織化マップを同時に生成し、かつ両者の関係も含めて可視化することができる[4,5,6]。

Fig.1 は Enron 社における社員間の E-mail トラフィックを Tensor SOM で可視化した結果である。その結果、社員の業務上の役割に対応したマップを得ることができた。このマップはメールトラフィックのみから求めたものであり、メール内容も利用すればより精度の高いマップを作ることができる[7]。Fig.3 はサル ECoG データを Tensor SOM で解析した例であり、この場合は視覚刺激内容、電極チャネル、信号周波数の 3 つのマップが同時に得られる。

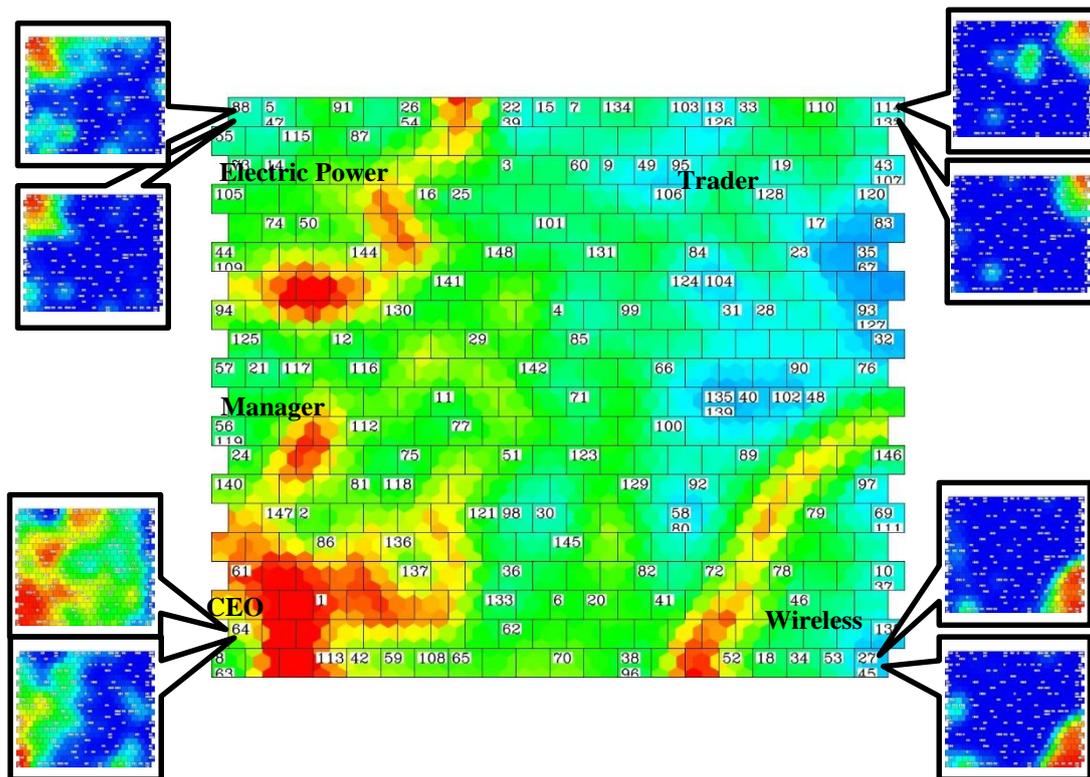


Fig.1 (a) Tensor SOM による社内 E-mail トラフィック解析結果. 数字は社員 ID を表し, 赤色はクラスター境界を示す. また小さく示した図は, 上段が送信, 下段が受信トラフィックを表す.

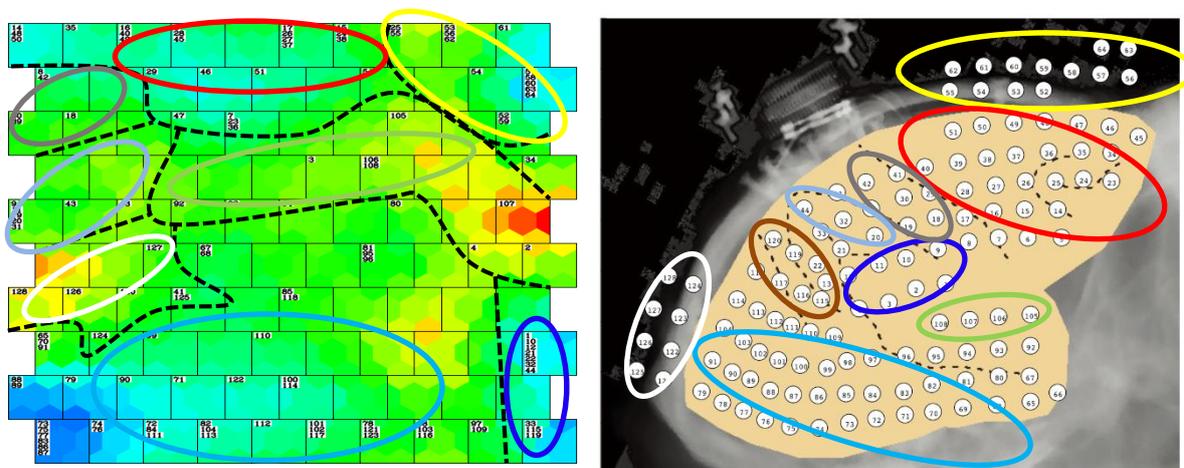


Fig.2 Tensor SOM によるサル ECoG データの解析結果のうち, 電極 Ch に関するマップ. ECoG の電極配置と対応のあるマップを得ることができた. この他に脳波の周波数のマップ, サルに与えた視覚刺激のマップも得られる(本報告書では割愛).

(2) 観察者の視点推定と自己理解・自己言及

複数の観測者から得た観測データを元に, 各観測者の視点を推定する潜在視点推定法を開発した. これはコンピュータグラフィックスで3次元再構築やカメラ位置を推定する因子分解法と高階 SOM を組み合わせたアルゴリズムとなっている. Fig.3は商品に対するユーザーの評価ベクトルを元に, 各

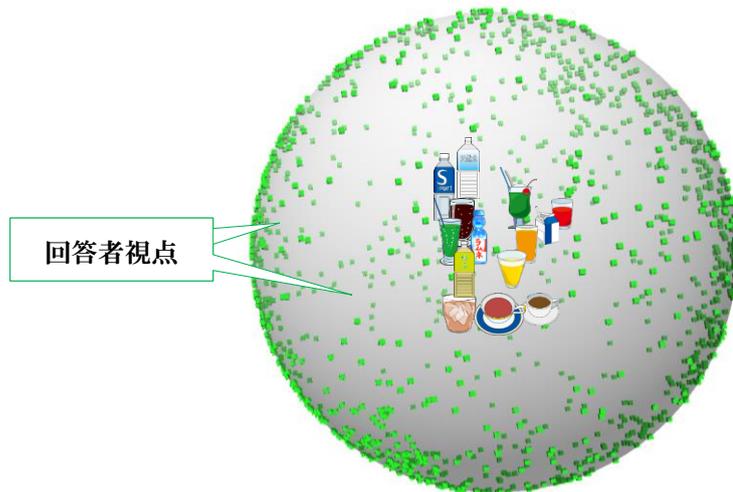


Fig.3 潜在視点推定法による計算結果. 商品への評価データから各回答者の視点を求めた.

ユーザーが商品を見る「視点」を推定した結果である. 商品は 3 次元に配置され, 各ユーザーは特定の一方向からのみ商品を見たと仮定する. したがって類似の評価をするユーザーの視点は単位球上の似た場所に対応付けられる.

さらにわれわれは学習機械の集合を学習するメタ学習機械を設計し, メタ学習機械自身に自分自身を学習させる実験も行った. マルチシステム学習は, 下位の学習装置が個々のシステムをモデル化した結果を上位の学習装置がメタモデルにするものであるため, このアルゴリズムに手を加えて上位学習装置が自分自身も学習できるようにした[8,9]. 形式的ではあるが自己言及的アルゴリズムを実現することができた. このようなアルゴリズムの意味するところや学習の安定性, 実応用的な価値については今後の研究に委ねる.

参考文献

- [1] T. Ohkubo, T. Furukawa, LNCS, Vol.6731, 2011.
- [2] S. Matsushita, et al, Proc. ICCN2011, 2011.
- [3] T. Furukawa, et al, Proc. SCIS-ISIS2012, 2012.
- [4] 岩崎亘, et al, IEICE Technical Report, NC Vol.111, No.419, 2012.
- [5] 岩崎亘, 古川徹生, IEICE Technical Report, NC Vol.112, No.227. 2012.
- [6] 伊達洋祐, et al, IEICE Technical Report, NC Vol.113, No.500, 2014.
- [7] 橋本晃二, 古川徹生, IEICE Technical Report, NC Vol.112, No.390, 2012.
- [8] H. Ishibashi, et al, Proc. JNNS 2011, 2011.
- [9] 石橋英朗, 古川徹生, IEICE Technical Report, NC Vol.111, No.483, 2012.

先行同期の獲得がもたらす未来の認識:生命の持つ主体性への力学系アプローチ

研究代表: 鹿児島大学理工学研究科・准教授 末谷大道

概要

生命が持つ重要な機能として「予測」や「先読み」の能力がある. 本研究では予測を実現させる力学的な機構として Voss が提案した anticipating synchronization(AS)に注目し, 力学系のダイナミクスの観点から予測に関する研究を行った. 特に, AS と統計的な推論に基づく時系列予測モデルをハイブリッドに組み合わせたモデルを提案し, 予測器と予測対象の間に結合があるときにゲインの大きさと同期(=予測)誤差の関係など同期-非同期ダイナミクスとしての予測の性質について議論した.

Abstract

The act of “prediction” or “anticipation” is one of important abilities of life systems. In this study, we focus on anticipating synchronization (AS), proposed by Voss in 2000, as a dynamical mechanism to achieve prediction, and we study the performance of prediction to chaotic dynamics from the viewpoint of synchronization properties. Particularly, we propose a hybrid model of AS and a time series prediction model based on conventional statistical inference, and investigate the relationship between the prediction performance and the coupling gain between the hybrid model and a chaotic system to be predicted, and the synchronization error.

1. 研究開始当初の背景

生命の持つ主体性の現れの一つとして, 自分の身体を含む環境の変化に対する「予測」・「先読み」の能力があげられる[1]. 例えば, 約24時間で変化する環境の日周変化を予測する概日リズムは原始的な細胞から持つ能力である. 真性粘菌に忌避的な刺激を一定の時間間隔で与えると忌避的の刺激を与えなくてもその周期を予期するようになるといった報告[2]もある. 感覚運動系では信号伝達の際に数百ミリ秒の遅延が生じることから, それを補償するための予測機構(内部モデル)が存在している. さらに, ターゲットへの追従運動の実験では, 時間遅れの補償のみならずターゲットよりも時間的に先行して身体を制御するという proactive control という現象も報告されている[3]. また, 個体間のコミュニケーションにおいても我々は常に相手がどのような返答をするか予測しながら自らの言語や行為を発している. このように, 生物は予測能力を獲得することによって環境で起きている非定常な変化を積極的に取り込んで自らの変化に活かしている.

一方, 非線形動力学の分野では時間遅れを持つ一方向結合振動子系において anticipating synchronization(AS)と呼ばれる現象が知られている[4]. この系では, 時刻 t でのスレーブ系 Y の状態が τ ステップ先のマスター系 X の状態に一致する空間: $x(t+\tau)=y(t)$ が不変な部分空間として存在し, 結合強度(ゲイン)や遅れ時間などのパラメタを調整することでそれが安定となる. ここでもし力学系が周期的であるならば, それはただの位相同期であるがカオス力学系であっても実現し得る. よって生命が動的な環境を認知する仕組みとして AS を利用すれば物理的な時間の経過に合わせて環境の未来を先読みできるようになる.

Rosen は系自身及びその周りの環境の未来を予測する能力を備え、その予測に応じて自身のルールを改変する系を予期的システム(anticipatory systems)と呼び、生命の本質を表す概念であると考えた[1]。さらに、Dubois はモデルによる予測(近似的な未来の状態)ではなく、偏微分方程式において境界条件が定められた場合のように「真の未来の状態」が参照できる系を strong anticipation を持つ系と呼び、一方、モデルによって予測を行う系を weak anticipation を持つ系と呼んだ[5]。同期同期(AS)を持つ系は、もしその同期状態が安定であれば X に関する真の未来の状態 $x(t+\tau)$ が現在の Y の状態 $y(t)$ として参照できることから strong anticipation を持つ系であり、一方、内部モデルを用いた予測を行う系は weak anticipation を持つ系ということになる。この strong anticipation と weak anticipation の概念に基づいた予測機構が数理モデルとして具体的にどのように構成し得るか探求することは、生命における時間概念を明らかにする上で重要な役割を果たすと考えられる。

2. 研究の目的

(1) strong anticipation と weak anticipation のハイブリッドモデルの構築

Voss らはカスケード状の結合系において AS が発生することによって通常のカオス系の予測時間の限界である最大 Lyapunov 指数の逆数のオーダーを超えて最下流の被駆動系が駆動系の未来の状態に同期しえることを実証した[6]。しかし、後に Politi らは時間遅れ項の存在によってこの AS 状態は摂動に対して不安定(移流不安定性)であることを明らかにし[7]、AS による長時間の予測には限界があることが分かった。そこで、この時間遅れ項の問題を解決するために通常の時系列予測モデルと AS 系をハイブリッドに組み合わせたモデルを構成し時系列する。時系列予測として、Jaeger らが提案した echo state 型の神経回路[8]を用いて駆動系の τ だけ未来の状態を予測し(通常の時系列予測)、これを AS 系の駆動項として用いることで時間遅れ項の存在に伴う系の無限次元性を回避する。このモデルの予測能力や力学系としての性質を調べる。

(2) 結合カオス系としての粒子フィルタの性質

カルマンフィルタを非線形・非ガウス系に拡張する手法の一つとして、多数の粒子を用いて確率分布を直接表現し、シミュレータの時間発展の後ベイズの定理に基づいて粒子をリサンプリングする粒子フィルタ(particle filter)が知られている。通常粒子フィルタは「次元の呪い」、すなわち次元が大きくなると共に粒子の多数が観測から離れサンプリングの重みが統計的に不安定になることが知られている。van Leeuwen はこの次元の呪いを回避するために、観測量を通じて真のプロセスとシミュレータとの間に直接の結合を考え粒子を観測量付近に集めるという proposal density というアプローチを提案している[9]。これは、通常粒子フィルタが Rosen の分類によれば weak anticipation の範疇に入るのに対して strong anticipation の概念を導入したことになる。そこでこの proposal density のアプローチを結合カオス系と捉えフィルタリングの能力をカオス同期の観点から解析を行う。

3. 研究の方法と成果

(1) strong anticipation と weak anticipation のハイブリッドモデルの構築

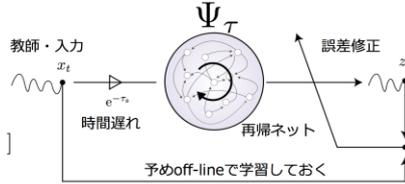
本研究では、以下の4つのカスケードモデル(1:AS モデル, 2:echo state ネットワーク(ESN)による統計的時系列予測モデル, 3:AS と ESN を組み合わせたモデル)を考え(図1)、レスラー系やロー

レンツ系の予測を行った。

1. Delay-Differential Equations(SA)

$$\begin{cases} \dot{x}_0 = f(x_0), \\ \dot{x}_n = f(x_n) + R \cdot \tanh\left(\frac{C_{n,n-1}^{(1)}}{R}\right) \\ C_{n,n-1}^{(1)} = K \cdot [x_{n-1}(t) - x_n(t - \tau)] \end{cases}$$

2. Echo-state Network (WA)



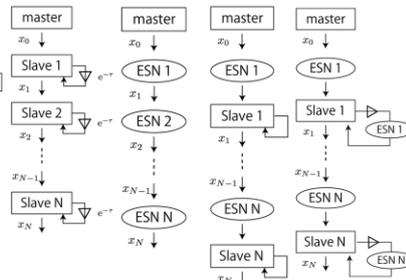
3. Combination of SA & WS

$$\begin{aligned} C_{n,n-1}^{(3)} &= K \cdot [\Psi_\tau(x_{n-1}(t)) - x_n(t)] \\ C_{n,n-1}^{(3')} &= K \cdot [\Psi_\tau(x_{n-1}(t)) - \Psi_\tau(x_n(t - \tau))] \end{aligned}$$

- 3-1 : AS状態は不変部分空間でない (Ψ が完全なら不変)
- 3-2 : AS状態は不変部分空間となる

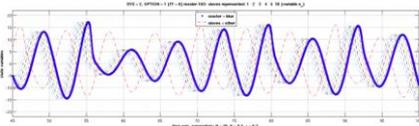
図 1:カスケードモデル

Cascade Systems



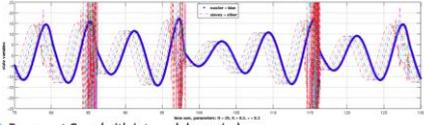
Time Series (f: Rössler dynamics)

1. Anticipated Synchronization System

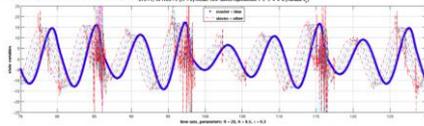


2. Weak Anticipation by Neural Networks

- Feed-Forward Case (without internal dynamics)

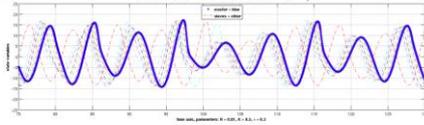


- Recurrent Case (with internal dynamics)



3. Combination of Strong and Weak Anticipations (Recurrent NN)

- 3-1



- 3-2

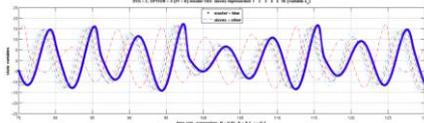


図 2:時系列の様子

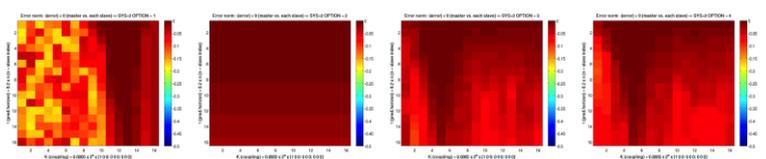
AS に比べハイブリッドモデルの場合はゲインが小さくても誤差を小さくすることが出来、またノイズに対するロバストネスも ESN の場合よりも高いことが分かり、ハイブリッドモデルが strong anticipation と weak anticipation の双方の利点を活かしていることが分かった。

の大きさをパラメタにも依存するが)間欠的に異常な振る舞いが見られる。それに対してハイブリッドな系ではそのような異常な振る舞いは消えている。

そこで、カスケードの深さを縦方向にゲインの大きさを横軸にとって予測誤差を色として表示した相図を比較したのが図3である(ESN の場合、ゲインパラメタはないため横軸に意味はない。また、ここでは赤い色ほど誤差が小さい)。

Phase Diagrams of Anticipation Performance

- Noiseless Case



- Noisy Case (master系と1st slaveの間に与える、 $\xi \sim U([-2.5, 2.5])$)

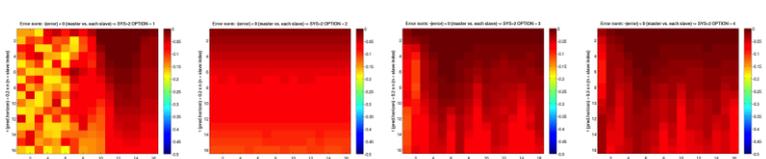


図 3:相図

(2) 結合カオス系としての粒子フィルタの性質

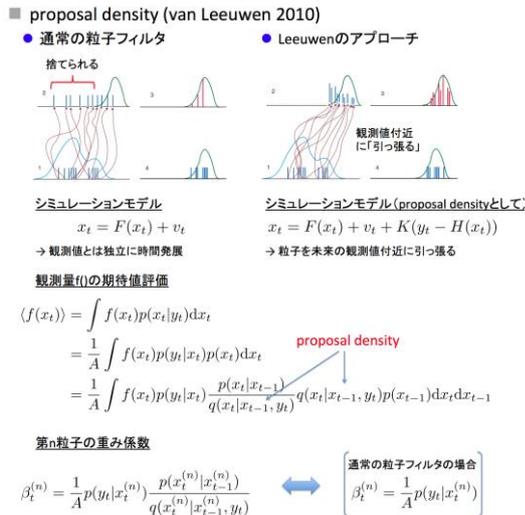


図 4: proposal density

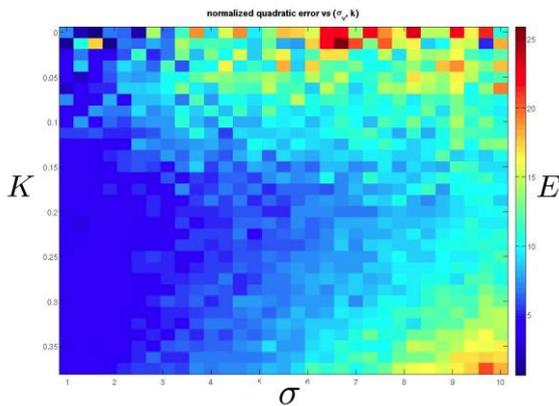


図 5: 相図

van Leeuwen のアプローチ (proposal density) を図4に示す. 通常の粒子フィルタでは観測値に従って定まる確立分布の尤度に従って粒子をサンプルし直す, 観測値から離れすぎた粒子はリサンプルに使われず捨てられる. proposal density アプローチでは観測とシミュレータの間に (時間発展法則としての) 結合を直接設け, proposal density に従って重み係数を修正する. このアプローチをローレンツカオスに適用した結果が図5である. これは横軸を観測ノイズ (それだけ観測値が真のプロセスからずれているか) の大きさ, 縦軸をシミュレータと真のプロセスとの間の結合ゲインとしたときのフィルタリング誤差を色として表示 (青い色ほど小さい) したものである. 観測ノイズが大きくないときはゲインの大きさに関わらず誤差は小さいが観測ノイズが大きくなるにつれて最適なゲインが存在する. これは観測ノイズが大きいつきは観測量に近づけすぎると真のプロセスからの乖離が大きくなることを意味し結合カオス系としての性質が反映されていることが分かる.

※ D. Rodriguez 氏の助力を得て数値シミュレーションを行った. 同氏に感謝する.

参考文献

- [1] R. Rosen, Anticipatory Systems, Springer (2012).
- [2] T. Saigusa et al., Phys. Rev. Lett. Vol.100, 018101 (2008).
- [3] F. Ishida and Y. Sawada, Phys. Rev. Lett. Vol.93, 168105 (2004).
- [4] H. Voss, Phys. Rev. E Vol.61,5115 (2000).
- [5] D.M. Dubois, Lec. Note in Comp. Sci. Vol.2684, 110 (2003).
- [6] H. Voss, Phys. Rev. Lett. Vol.87, 014102 (2001).
- [7] C. Mendoza, Phys. Rev. E Vol.69,047202 (2004).
- [8] H. Jaeger et al., Neural. Networks, Vol.20, 287 (2007).
- [9] P.J. van Leeuwen, Q. J. R. Meteorol. Sci.Vol.136, 1991 (2010).

神経投射構造の導入による脳波の長距離同期メカニズムの解明

研究代表： 公立ほこだて未来大学・准教授 佐藤直行

概要

認知機能と関連して現れる脳波の長距離同期現象は、脳領野間の情報伝達メカニズムの理解にとって重要な現象である。本研究では、ニューロンの領野間投射に空間構造を導入することで、各領野におけるニューロン群の反応選択性を設計し、ニューロン活動と脳波を関連づけることを試みた。計算機シミュレーションの結果として、ニューロンの空間活動パターンが局所脳波の同期として表れうることを明らかにした。

Abstract

Long-range electroencephalogram (EEG) synchronization phenomenon is one of clues for understanding the neuronal integration processes of distributed cortical information, while it is still unclear how neuronal activities are reflected in EEG signals. In this study, under a hypothesis of spatially organized connections between cortical areas, the relationship between neural activity and EEG was evaluated by using computer simulations. Results showed that the inter-areal consistency of spatial pattern of neural activities is linearly correlated to EEG coherence of those areas.

1. 研究開始当初の背景

認知機能と関連して現れる脳波の長距離同期現象は、脳領野間の情報伝達メカニズムの理解にとって重要な現象である。脳波は約 10^5 程度のニューロンの集団電位であり、ニューロン情報処理との関連は必ずしも明らかでない。個々のニューロンは刺激選択的に活動するが、脳波はそれら活動の空間的総和であり、“脳波が同期する”という事象がどのようなニューロン活動状態と対応するのかを明らかにすることが重要な課題である。近年、全脳神経回路のシミュレーションが盛んに行われつつあり、ニューロン活動と脳波の関係が明らかにされつつあるが[1]、これら回路はニューロンレベルの詳細な結合構造を持たず、ニューロン情報処理と脳波同期との関連は未だ明らかにはなっていない。

代表者は平成22年度新学術公募研究(「フリッカ誘導脳波の解析による記憶の脳同期回路メカニズムの解明」)において非線形振動子を用いた視覚35領野の脳波同期回路を提案し[2]、脳波の同期回路の性質を検討した。また、代表者は大脳皮質-海馬の神経投射の理論研究を行っており[3]、“神経投射の空間構造”がニューロンの情報処理と脳波の橋渡しとなり得ることが想定された。研究開始の時点で、予備的な計算機実験として、視覚野の投射の簡略化モデルである”部分拡大変換”が、領野毎に質的に異なる反応選択性を生成しうることは確認していた。

2. 研究の目的

本研究は、ニューロンの領野間投射にある一定の空間構造を導入することで、各領野におけるニューロン群の反応選択性を設計し、ニューロン活動と脳波を関連づけることを考えた。そして多数の領野からなる全脳モデルを構成し、各領野間における情報伝達性と脳波の長距離同期との関連を

数値計算により評価する。これより、ニューロン集団コードの情報伝達と脳波同期との関連を明らかにすることを目的とした。さらに、モデル検証のための脳波計測実験を行い、モデルの生理学的妥当性を評価する。これは、質的に異なるニューロン群が多領野回路においていかに情報伝達するかを明らかにするもので、当該領域の推進に貢献できると考えた。

3. 研究の方法と成果

神経投射の空間構造を仮定したニューロン活動と局所脳波に関わる計算機シミュレーションを行った。成果として、国際雑誌論文1報(投稿中)、国際会議論文3報を発表した。以下に主要な成果の概要を示す。

(1) 多様な領野経路を生む空間投射構造の検討 (文献[4])

領野間ニューロン投射に空間構造を仮定し、それぞれの場合に得られるニューロン投射経路の多様性を検討した。各領野を 16×16 ユニットとし、1 ユニットは連結する他の領野の 3×3 ユニットに投射することとした(結合確率 0.5)。8 領野回路で、トポグラフィック結合(図1左)、セグメントありトポグラフィック結合、拡大・縮小を含むトポグラフィック結合の3種類の結合を検討した。結果として、拡大・縮小を含む結合の場合において、他の結合方式では得られないような多様な組み合わせ投射経路を構成しうることを示した。この場合、求心性投射経路と遠心性投射経路のすべての組み合わせが各領野に番地付けされることがわかった。また、実際の神経回路の場合にはセグメント分割がある程度重畳することが考えられるが、50%程度の重畳がある場合でも経路の多様性が保持され得ることも示された。これらの結果は、複数の領野の組み合わせを成すユニットレベルの投射経路を確実に得るために、拡大・縮小を含むトポグラフィック結合が有効であることを意味する。

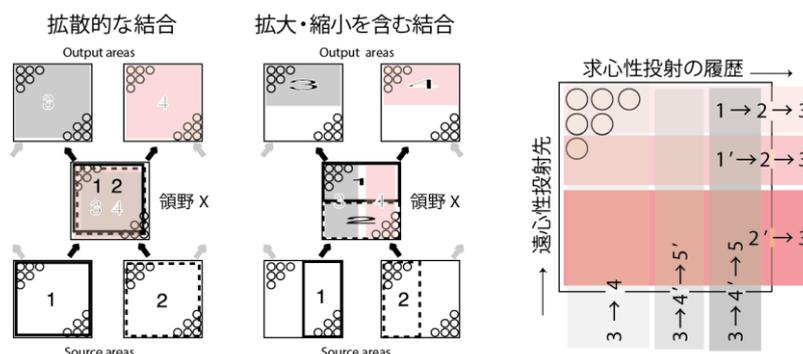


図1 空間投射構造とニューロン投射経路の関連。(左図)全領野にわたり拡散的なトポグラフィック結合がある場合。(中図)トポグラフィック投射に拡大・縮小を含む場合。(右図)拡大・縮小を含む結合で得られる求心性・遠心性経路の組み合わせに関する領野内マッピング。

(2) スパイク投射経路の大域連続性に対する脳波同期の寄与 (文献[5])

神経発火の伝搬が脳波同期によって促進されることが提案されているが[6]、その一方、神経発火が脳波を形作るという側面もある。このように神経発火と脳波が相互に促進しあう場合に、両者の関係がどうなるかについては、これまで議論されてこなかった。本研究では、神経発火ユニット(Leaky integrate-and fire ニューロンモデル)と脳波生成ユニット(位相振動子)の組み合わせたモジュールが多層回路を成した場合に、どのような伝搬パターンが生じるかを検討した。入力発火ユニットに

与えられるが、発火により脳波振動が駆動され、さらに発火活動を修飾するとした。各層は 3 モジュールより成り、発火ユニット、脳波ユニットはそれぞれ、層内では相互抑制、層間では相互興奮するとした。図2左の5層回路において、1層と5層の各1ユニットに入力を与えた場合、投射経路は多義的であるが、モデルでは連結する層を貫く一連の伝搬経路が生じる。入力印加直後は、図2中では、拡散的な伝搬が起こるが、脳波数振動ののち、経路を成すモジュールだけが活性化することが示されている。このとき、スパイクと脳波のそれぞれは1層と 5 層のユニット間で同期した(図2中下)。さらに、脳波からの修飾の強さを小さくすると、複数の局所同期回路が生じることがわかった。このことは、脳波によって大域的なスパイク伝搬が誘導されたことを示唆する。これが可能となったメカニズムとして、図2右に示すとおり、各層の同期は準安定的で、ごく少数の発火活動による脳波誘発により、脳波同期として維持される発火と伝搬経路が容易に組み変わるためと考えられた。このような発火と脳波の関連は、脳波の長距離同期現象と多領野情報統合を考える上で重要と考えられる。

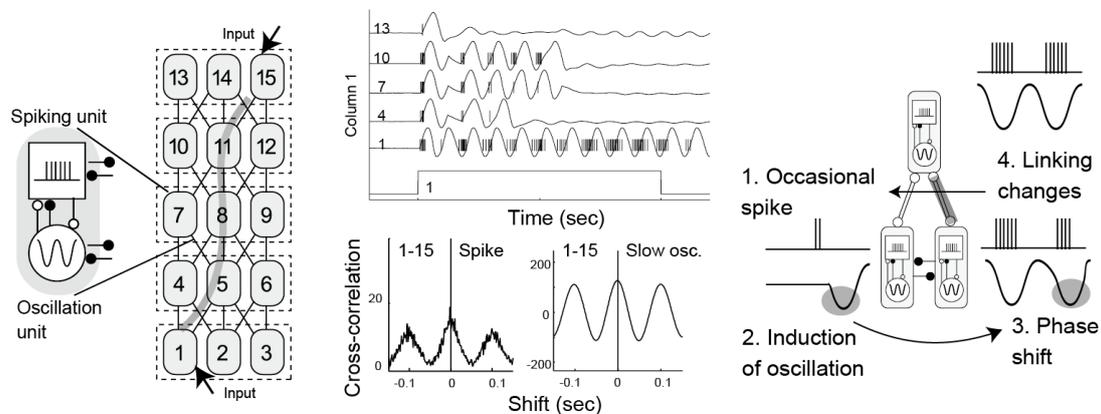


図2 スパイク投射経路の大域性に対する脳波同期の寄与。(左図)5層ネットワーク。(中上図)スパイク活動と脳波活動の時間発展。(中下図)1層と5層のユニット間のスパイク活動と脳波の時間相関。(右図)大域的な経路を生成する想定メカニズム。

(3) 神経活動の空間パターンの伝搬と脳波同期の関連: 計算機シミュレーション研究 (文献[7])

大脳情報処理において、神経活動の時間パターンの伝搬に加え、空間パターン伝搬が本質的に重要と考えられている。そこで、スパイク活動の空間パターンの伝搬と脳波同期の関連を検討した。モデルは2領野、各2クラスタ(計、興奮性細胞 4000 ヶ、抑制性細胞 1000 ヶ)から成り(図3左上)、単一クラスタのパラメータについては、MazzoniらのV1 集団電位モデル([8], leaky integrate-and-fireモデル, ランダム疎結合, 結合確率 0.2)を流用した。結果によれば、クラスタ間の側抑制のため、もっとも強い入力を受けたクラスタの神経活動が局所脳波(LFP)として現れることがわかった。この性質は2領野回路の場合も同様であった(図3左下)。2領野回路で、空間パターンの伝搬を阻害するため、領域2にバイアス入力を加えた場合を含めても、発火活動の空間パターンの整合度は、LFPのコヒーレンスを線形の関係にあることが明らかになった(図3右)。この結果は、脳波同期が皮質情報処理と関連することを示し、脳波現象の意味を考える上で重要な結果である。さらに、2クラスタのうちの1つに 10Hz 入力を与えた場合、その入力他方より大きい入力だった場合のみ、10Hz の脳波同期が表れることも明らかになった。これは、脳波長距離同期現象が、特定の周波数で活動する局所クラスタの活動の伝搬の有無として説明され得ることを示す。

ただし、実際の皮質回路は上記モデルよりもより複雑な収斂・発散を含む結合構造をもち、必ずしも上記メカニズムが対応するかどうかには疑問が残る。今後、結合投射の詳細構造が比較的明らかな V1 野-MT 野などを用いて、領野間の脳波同期度と情報伝達の関連を検討する。さらに、ヒト被験者脳波計測実験により、モデルで予見される刺激—脳波同期の対応を検証する。

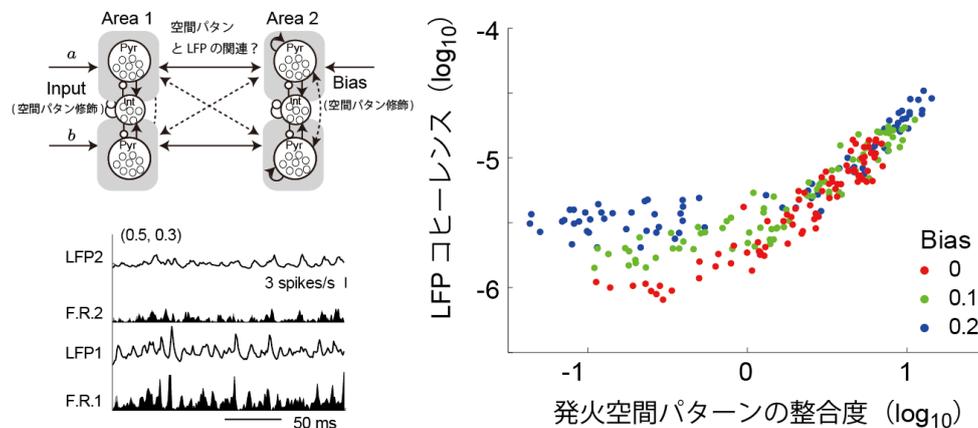


図3 神経活動空間パターンの伝搬と脳波同期の関連. (右上図)2領野回路. (右下図)各領野の瞬間発火頻度と局所脳波(入力(a,b)=(0.5,0.3)). (左図)2領野の空間活動パターンの整合度と脳波同期の関係. 各点は異なる入力(a,b)を表す.

参考文献

- [1] Izhikevich, E. M., & Edelman, G. M. (2008). Large-scale model of mammalian thalamocortical systems. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 105, 3593-3598.
- [2] Sato, N. (2013) Modulation of cortico-hippocampal EEG synchronization with visual flicker: A theoretical study. (ed) T. Omori, *Advances in Cognitive Neurodynamics (III)*, Springer.
- [3] Sato, N. (2011) A theoretical model for locking of spatial phase of grid cells based on Hough transform of visual scenes. Program No. 539.07. 2011 Neuroscience Meeting Planner. Washington, DC: Society for Neuroscience 2011. Online.
- [4] Sao, N. (2012) Variety of cortical pathways formed by topographic neural projection: A computational study. *Lecture Notes in Computer Science, Lecture Notes in Computer Science Volume 7664*, pp 176-183.
- [5] Naoyuki Sato (2013) A computational model of cortical pathways formed with electroencephalogram synchronization. Naoyuki Sato, 4 pages, Springer (Proceedings of The International Conference on Cognitive Neurodynamics, 23-27 June 2013, Sweden) (to be published)
- [6] Fries, P. (2005). A mechanism for cognitive dynamics: neuronal communication through neuronal coherence. *Trends in Cognitive Sciences*, 9, 474-480.
- [7] Naoyuki Sato (2014) Spatial consistency of neural firing regulates long-range local field potential synchronization: a computational study, *Neural Networks* (submitted)
- [8] Mazzone, A., Panzeri, S., Logothetis, N. K., & Brunel, N. (2008). Encoding of naturalistic stimuli by local field potential spectra in networks of excitatory and inhibitory neurons. *PLoS Computational Biology*, 4, e1000239.

主課題と割込課題からなる二重課題の遂行に関与する内側・外側高次運動野の機能連関

研究代表：東北大学大学院医学研究科生体システム生理学分野・
非常勤講師 嶋 啓節

概要

我々は行動制御に関与する高次運動野の機能連関を調べるべく、主課題と割込課題からなる二重課題を遂行中のサルに補足・前補足運動野(SMA・preSMA)、背側・腹側運動前野(PMd・PMv)から局所電位を記録し、(1)SMA, preSMA の β , γ 振動のパワーは運動計画の保持, 更新に伴い変化すること, (2)領域間の β 振動の位相差は課題に応じ変化すること, (3)割込前の preSMA, PMd 間のコヒーレンスが、割込後の主課題の成否を予測しうることを見出した。

Abstract

To investigate the functional coupling of the higher motor areas concerning behavioral control, we recorded local field potentials from the supplementary motor area (SMA), presupplementary motor area (preSMA), dorsal and ventral premotor area (PMd and PMv) of Japanese monkeys while they were performing a dual-task consisting of a main-task and an interrupting task. We found that (1) the beta- and gamma oscillatory power varied in relation to the maintenance and updating of motor plan; (2) the inter-area difference of beta phase exhibited task-dependent modulation; and (3) the coherence between the preSMA and PMd observed before interruptions could predict the performance of the main task after the interruptions.

1. 研究開始当初の背景

我々は実生活において、複数課題を並列的に処理しなければならない場面にしばしば直面する。その処理においては、現在進行中であった行動(主課題と呼ぶ)を一旦棚上げして外界からの割込み事象(割込課題と呼ぶ)に対応し、しかる後に主課題の残余部分を解決することがほとんどである。申請者らは平成 22-23 年にかけて、記憶誘導性の順序動作課題を主課題とし、これに視覚誘導性の動作が割込む形の二重課題をサルにトレーニングし、課題遂行中の前頭前野(PFC)と背側運動前野(PMd)の細胞活動を記録した[1]。その結果、PFC, PMd の細胞活動が、主課題から割込み課題への分岐を反映することを見出した。過去の研究から、内側高次運動野(補足・前補足運動野-SMA・preSMA)は、内的に動作をトリガーしたり、記憶に基づいて複数の動作を順序良く行うのに重要であることが示されている[2]。一方、外側高次運動野(背側・腹側運動前野-PMd・PMv)は、視覚情報から動作をガイドする働きが知られ、外的にトリガーされて動作を行うのに重要と考えられている[3]。

2. 研究の目的

これらの背景から、上記のような二重課題の遂行中には、内側高次運動野が主課題の遂行に主たる役割を果たし、外側高次運動野は割込み課題への対応を主に担うと予想された。また、主課題

から割込み課題への分岐時及び、主課題への復帰時に、内側領野と外側領野が、互いのコミュニケーションをダイナミックに変化させつつ、二重課題全体を正しく遂行するために働くことが期待された。本計画で我々は、複数課題の並列処理に関わる内側・外側高次運動野の協調原理を解明することを目標とした。このための基礎的な知見を得るべく、課題条件に応じた局所電位(LFP)のパワーの変化、両側大脳半球間のLFPの位相差、SMAとpreSMAの間のLFPの位相差の変化をも解析した。

3. 研究の方法と成果

(1) 被験動物と行動課題

実験にはニホンザル2頭を用いた。課題はブロック単位で進行し、1ブロックは主課題5試行、割込み課題1試行で構成した(図1)。ブロック最初の2試行[主課題(視覚誘導)]では、図2に示した4種の動作(右/左腕の回内/回外)のうちいずれか1つを視覚指示信号(cue)で逐一指示し、1試行あたり2つの動作を行わせた。次の2試行[主課題(割込前)]では、直前に行った2つの動作を記憶に基づき正しい順序で行わせた。次の試行[割込課題]では、主課題と独立して視覚刺激を与え、それに従って動作を行わせた。その後の1試行[主課題(割込後)]では、割込み前の主課題で行っていた2つの動作を記憶に基づいて再現することを求めた。このような一連の試行からなるブロック(図3)を、主課題・割込み課題で行う動作の組み合わせを換えながら繰り返した。

図1 1課題ブロックの流れ

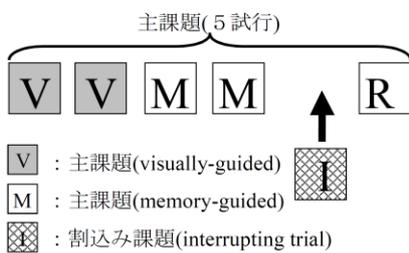
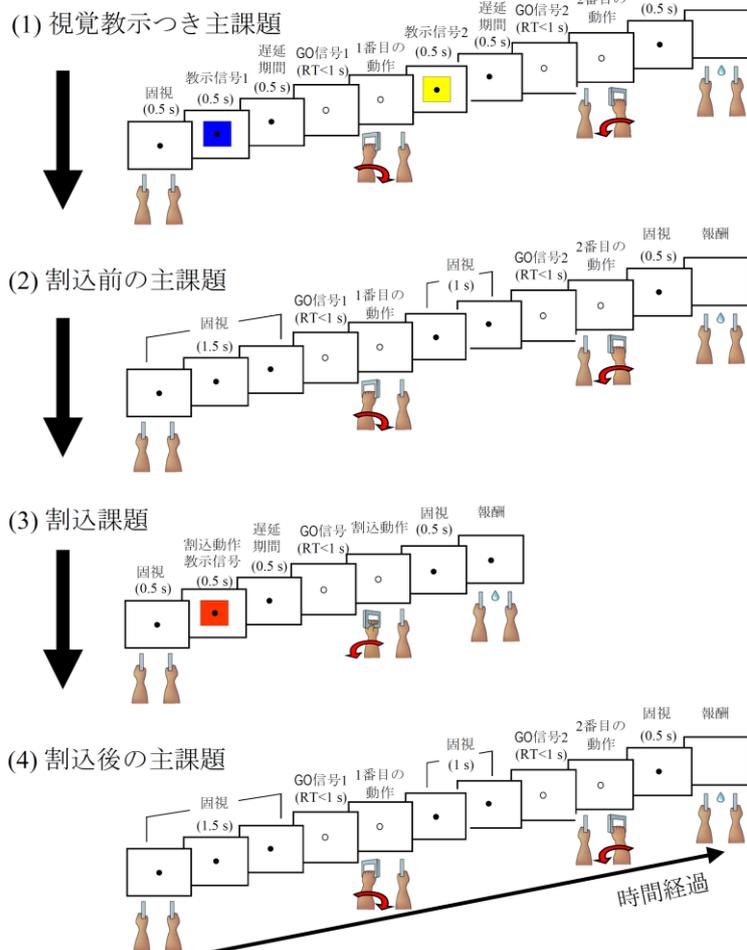


図2 Cueと動作の関係

Cue	動作	arm	action
赤		左腕	回外
青		左腕	回内
黄		右腕	回内
緑		右腕	回外

図3 課題ブロックの見本

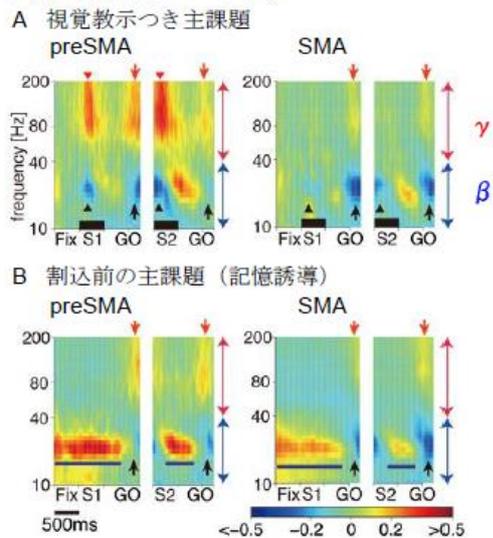


(2) LFP の記録部位と解析

サルが主課題及び割込課題を行っているとき、(1)SMA または pre-SMA から LFP をエルジロイ単点電極で記録し、課題条件に応じたパワーの変化を解析した。(2)同一半球の SMA と pre-SMA それぞれに単点電極を刺入、LFP を同時記録し、位相差を計算した。(3)両側半球の SMA または pre-SMA から同時記録し、位相差を計算した。(4)同一半球の preSMA(または SMA)と、PMd から LFP を同時記録し、割込み直前における領野間のコヒーレンスを計算した。

(3) 研究成果

図4 課題条件によるLFPのパワーの変化 (時間-周波数プロット)



2頭のサルは、割込後の主課題を80%以上(chance levelは6.75%)の正答率で行うことができた。課題条件に応じたLFPの帯域別パワーの変化を図4に示す。動作をcueに基づいて行っているとき(図4A), preSMAでは γ 振動のパワーがcue提示と運動開始に一致して一過性に増強した(赤三角と赤矢印)。 β 振動は同時期に減弱した(黒三角と黒矢印)。記憶済みの動作を繰り返し行っている試行(図4B)では、preSMA, SMA両方において運動準備期に β 振動が持続的に増強した(黒水平棒)。これより、 β 振動は直後に行うべき運動の計画を保持し、 γ 振動は運動の計画を更新するのに関与すると考えられる。

また、各試行開始時に、pre-SMAの位相がSMAに

図5 課題開始後にpreSMAの位相はSMAに比べて相対的に進む

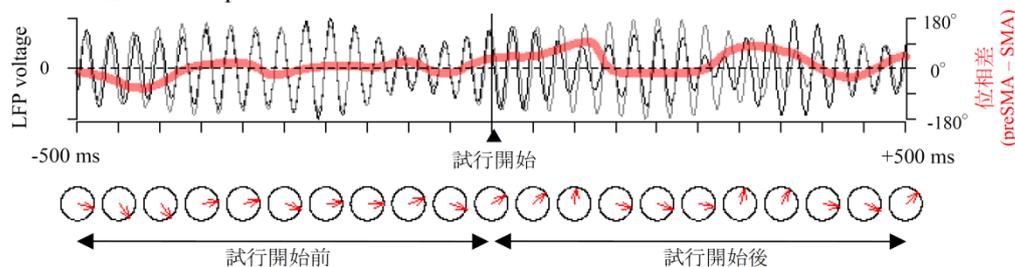


図6 両側半球preSMAの位相差は直後に使用する腕によって変化する

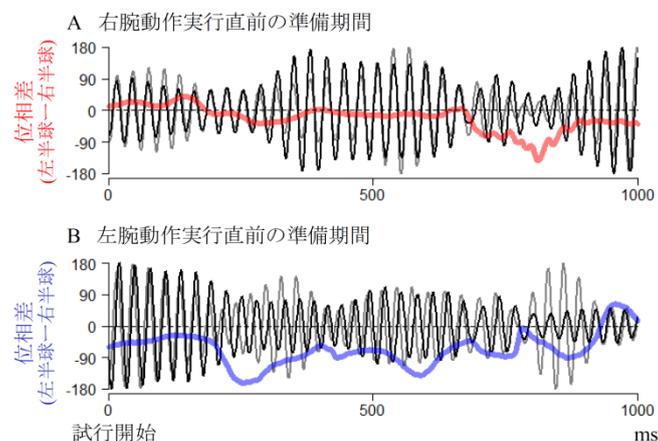
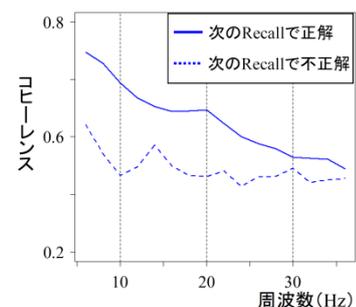


図7 割込課題開始前のpreSMA-PMd間のコヒーレンスは、割込後の主課題(Recall)の成否を予測する



比べて相対的に進むことが明らかになった[4]. 図5は, SMAを基準としたときのpre-SMAの位相を, 試行開始前後で連続的にプロットしたものである. 試行開始時刻を挟んで, pre-SMAの位相がSMAよりも進んでいることが見て取れる. この現象は, 試行毎にpre-SMAとSMAとの機能的結合状態がリセットされていることを示唆する.

両側SMAまたはpreSMAからの同時記録では, 半球間の位相差が, 直後の動作に用いる腕が右手か左手かによって変化することが明らかになった[5]. 図6は, 左半球の位相を, 右半球の位相を基準にして測定した時, その位相は, 反対側(右手・図6A)の運動を準備している時のほうが, 同側(左手・図6B)の運動を準備している時よりも進むことを示している. この現象は, 脳梁を介した半球間抑制の方向が, これから用いようとする効果器のlateralityによって変化し, 効果器の適切な選択に寄与していることを示唆する.

最後に, 一側preSMAとPmdのLFPを割込課題前後で同時記録した結果について述べる. 割込課題開始時の各周波数帯域のコヒーレンスを, その後の試行で主課題の順序動作を正しく想起し実行できたか否かに基づいて二分した. すると, 割込課題開始前のコヒーレンスは, 割込課題そのものの成否とは別に, 割込終了後の施行の成否を予測することが明らかになった. この結果は一頭のサルについて得られたもので, 更に詳細な検討が必要であるが, 二重課題制御に関与する内側・外側高次運動野の機能的連関が動的に変化することを反映している可能性がある.

参考文献

- [1] Miyazaki A, Nakajima T, Shima K, Mushiake H. (2013) Neuronal activity in the prefrontal cortex during performance of a dual task consisting of a main- and an interrupting-task. in *Advances in Cognitive Neurodynamics (III): Proceedings of the Third International Conference on Cognitive Neurodynamics - 2011*, pp. 795-802, eds. Y. Yamaguchi
- [2] Nakajima T, Hosaka R, Tsuda I, Tanji J, Mushiake H. (2013) Two-dimensional representation of action and arm-use sequences in the pre-supplementary and supplementary motor areas, *J Neurosci.* 33(39): 15533-15544
- [3] Hoshi E, Tanji J. (2007) Distinctions between dorsal and ventral premotor areas: anatomical connectivity and functional properties, *Curr Opin Neurobiol.* 17:234-42.
- [4] Arisawa H, Hosaka R, Shima K, Nakajima T, Mushiake H. (2013) Cue-dependent Modulation of Synchrony in Primates' Medial Motor Areas, *Proceedings of International Conference on Cognitive Neurodynamics*, Sigtuna, Sweden, June 23-27, 2013. In press
- [5] Nakajima T, Arisawa H, Hosaka R, Shima K and Mushiake H, *Soc Neurosci Abstr* 564.04/EEE26 (2013) The influence of arm-movement preparation on interhemispheric beta synchronization in the medial motor areas.

興奮性細胞・抑制性細胞神経回路の前頭葉領野間分業と動物-環境間の関係創発

研究代表：東北大学電気通信研究所・助教 坂本 一寛

概要

我々は日常、環境の中の様々な物体を操作している。その行動発現における前頭葉の神経回路の働きを解明するため、本研究では形操作課題遂行中のサル前頭葉の神経活動を、多重電極を用いて細胞活動とLFP(local field potential)の記録・解析を進めている。ここでは特に、前頭前野における電流源解析を行った。その結果、課題の特定の時期、局所神経回路の特定の部位に特徴的な興奮性入力および抑制性入力があるという予備的な結果が得られた。

Abstract

In our daily lives, we manipulate various kinds of objects. To investigate the neuronal mechanisms in the frontal lobe underlying such behavior, we are now recording and analyzing the unit activities and LFPs (local field potentials) from the frontal lobe of monkeys executing a shape manipulation task. Here, we show preliminary results of current source density analysis (CSD) in the prefrontal cortex. They exhibit task-phase dependent patterns of excitatory and inhibitory synaptic inputs within local circuits.

1. 研究開始当初の背景

我々は、時として環境からインスパイアされた行動をとることがある。例えば、見慣れない物体があったら触ったり転がしたりする。知恵の輪を外したり、もつれた糸を解いたりするには随分と頭を使う。

そのような行動の発現には様々な脳の領野が関わると思われるが、その中でも、前頭葉の外側前頭前野と背側運動前野は知覚情報や記憶情報をもとに行動を決定する上で重要であると考えられる[1]。これまでの研究から、外側前頭前野は行動計画の策定に[2]、背側運動前野は与えられた情報からとりうる行動の準備に[3,4]関わると予想されるが、それらがどう分業しつつ共同作業しているかは十分に解明されているとは言い難い。特に、行動を創発するには、興奮性細胞と抑制性細胞からなる局所神経回路で何が“創られているか”を解明していく必要がある。

2. 研究の目的

そこで本研究では、形操作課題という形の情報をもとに行動を計画することが要求される課題遂行中のサル外側前頭前野と背側運動前野から神経細胞活動とLFP(local field potential)を同時記録した。ここでは特に、多重電極を用いて記録・解析した外側前頭前野の局所神経回路の動態についての予備的な結果を示す[5-9]。

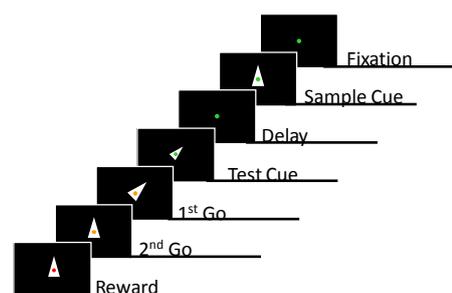


図1. 形操作課題

3. 研究の方法と成果

(1) 形操作課題とその成績

形操作課題(図1)では, 左右の手の回内・回外運動により, サンプル図形とサイズや向きが同じになるようにテスト図形を左右回転, 拡大・縮小することが要求される. 1回のGo信号ではどちらかの手の1つの運動のみが許される. 1回の運動で図形は左または右45度回転, または面積2倍に拡大または1/2倍に縮小される. 最短で2回の運動で正解になるが, 運動回数に制限はない.

訓練期間の最後10日間の行動を解析したところ, 2頭の正答率はそれぞれ90%, 99%で, そのうち, 最短手(2手)正解の割合は2頭とも89%であった. また, 非最短手の試行のうち, 1手目で間違っただ行動をした試行を解析したところ, 2手目で1手目の間違いを修正する行動は, 2頭でそれぞれ1.4%, 2.6%しか見られなかった. このことは, サルは課題の行動準備期に2手の行動を計画し, 実行期にはそれをそのまま実行していることを示唆している[5].

(2) 電流源解析による興奮・抑制シナプス入力の同定と神経発火

記録には200 μm 間隔で15個の記録点が並ぶ多重電極(U-probe; Plexon, Inc., Dallas, TX, USA, impedance, 0.3-1.3 MΩ at 1 kHz)を用いた. 試行間で平均したLFPから以下の式に従い標準的CSD(standard CSD, sCSD)を計算した[10]. n 目の記録点の電流源 $sCSD_n$ は以下で記述される:

$$sCSD_n = -\sigma [\phi(n+1) + \phi(n-1) - 2\phi(n)] / h^2,$$

σ は組織の電導度(0.3 S/m), $\phi(n)$ は n 番目の記録点で記録されたLFP, h は記録点間隔(200 μm)である. CSDの負の値(電流の流れ込み), 及び, 正の値(電流の湧き出し)は, それぞれ, 興奮性, 抑制性のシナプス入力を反映していると考えられている[11,12].

記録は, 腹外側前頭前野10か所より行った. 記録部位は, fMRI および事前に行った金属電極によるマッピングで, 膨隆部(convex)と溝(sulcus)(主溝: principal sulcus)に大別できた.

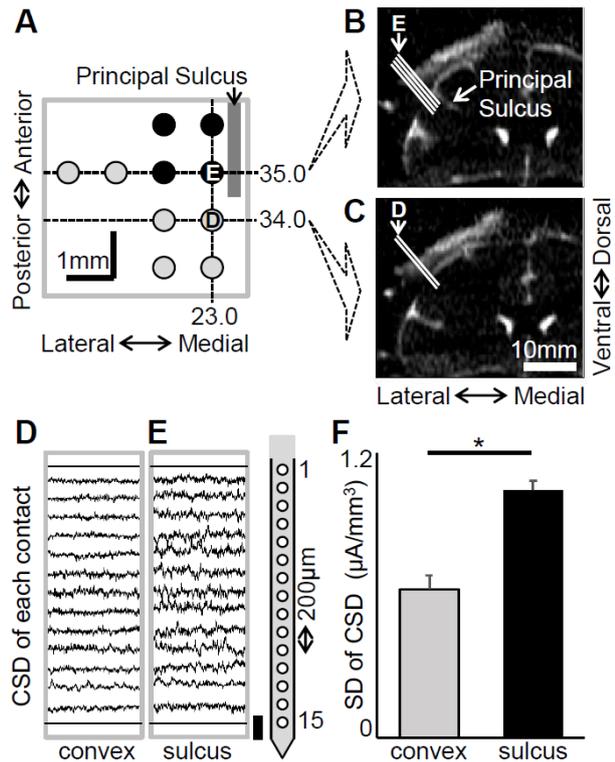


図2. 記録部位(腹外側前頭前野)とCSD ベースライン. A, B. 記録部位は膨隆部(convex, 灰色)と主溝(sulcus, 黒)に分類. C, D. サンプル刺激提示前のCSD ベースラインのばらつき.

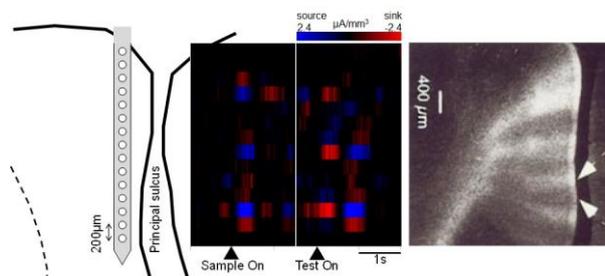


図3 前頭前野主溝内周期構造例. (左)電極刺入位置模式図. (中)Test 刺激オンセット時に電流の湧き出し(抑制性シナプス入力, 青)流れ込み(興奮性シナプス入力, 赤)が800 μmごとに見られる. (右)主溝内の解剖学的周期構造[14].

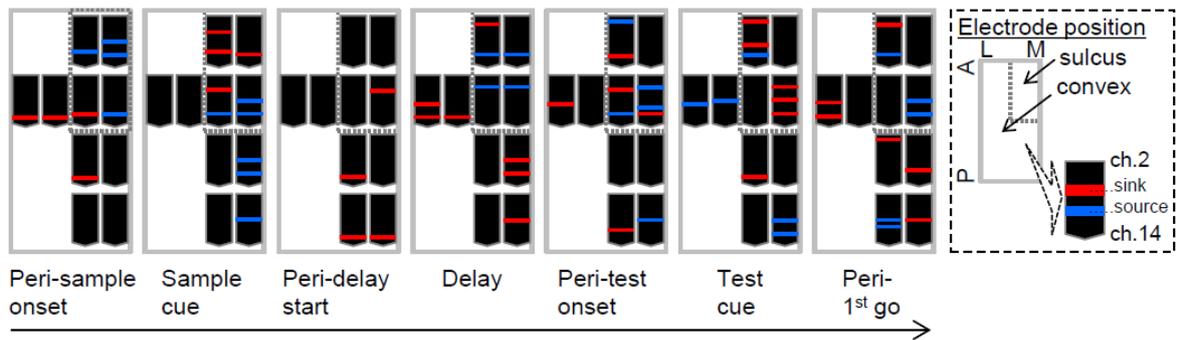


図4. 電流の流れ込み(赤)湧き出し(青)の課題依存性パターン

それを反映するように、サンプル刺激提示前の sCSD ベースラインは、膨隆部のほうが小さかった。膨隆部では電極が皮質層構造にほぼ垂直に、溝では水平に刺さっていると考えられる。sCSD ベースラインの違いは、皮質層構造の垂直方向の LFP の相関が水平方向より高いことを示唆している。

主溝に沿って刺入された多重電極から得られた sCSD のパターンを詳細に検討すると、サンプル刺激提示期には強い電流の湧き出しが $800 \mu\text{m}$ おきに、また、テスト刺激提示期には、同じ記録点で電流の流れ込みが観察された(図3)。このような空間的周期構造は、古くから解剖学的に示唆されていたカラム構造に相当すると考えられる。前頭前野においてこのような機能構造を電気生理学的に見出したのは、本研究が最初である。

sCSD の正負(電流の流れ込み、湧き出し)の課題依存性の変化を、全記録部位についてしめた(図4, 図2A の電極配置に対応)。各五角形の赤帯、青帯はそれぞれ、多重電極中の各記録点において、有意な流れ込みと湧き出しが見られた位置を示す。検定は、サンプル刺激提示前の機関のベースラインの値を用いてブートストラップ法で行った。膨隆部においては遅延期間中に電流の流れ込みが、主溝内においてはテスト刺激提示中に電流の流れ込みが、サンプル刺激オンセット付近に湧き出しが優勢であった。このことは、記録部位内の領野の違いを反映していると考えられる。

図5に、同一記録点における CSD と細胞活動の対応例を示した。形操作課題には、テスト刺激提示期にサンプル刺激が輪郭として提示されない記憶誘導性の場合と、提示される視覚誘導性の場合がある。この例では、記憶誘導性の場合には、抑制性のシナプス入力を示唆する強い電流の湧き出しが見られるが(図5A)、視覚誘導性の場合には、湧き出しが短時間で停止し、その瞬間、細胞活動の一過性の上昇が見られた(図5B)。CSD と細胞活動を照合すると、局所神経回路がどのような入力をもとにどのような出力を生成するかを明らかにすることができる。

sCSD は単純ではあるが、必ずしも真の電流源を忠実に再現しない。その問題を克服する逆 CSD(inverse CSD, iCSD)法[13]を実験データに sCSD を適用したところ、予想に反して、両者に高い一致が見られた。つまり、iCSD には見られないような山や谷は sCSD にはほとんど見られなかった[9]。このことは、少なくとも行動中のサル前頭前野において上の sCSD の結果は信頼できることを示している。

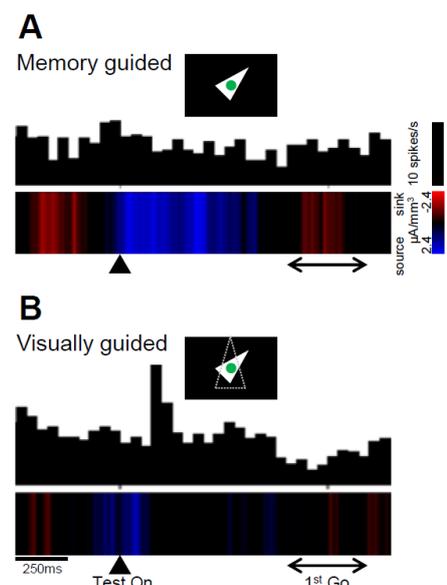


図5. CSD と細胞活動の対応例

参考文献

- [1] 丹治順. 1999: 脳と運動-アクションを実行させる脳. 共立出版.
- [2] Sakamoto, K., Mushiake, H., Saito, N., Aihara, K., Yano, M., Tanji, J. 2008: Discharge synchrony during the transition of behavioral-goal representations encoded by discharge rates of prefrontal neurons. *Cereb. Cortex*, vol. 18, pp. 2036-2045.
- [3] Cisek, P., Kalaska, J. F. 2002: Simultaneous encoding of multiple potential reach directions in dorsal premotor cortex. *J. Neurophysiol.*, vol.87, pp.1149-1154.
- [4] Toyoshima, M., Shibata, Y., Sakamoto, K., Saito, N., Tanji, J., Mushiake, H. 2011: Neuronal activity in the dorsal premotor cortex during a path-planning task. *Neurosci. Res.*, vol. 71, Sppl 250.
- [5] Sakamoto, K., Kawaguchi, N., Mushiake, H. 2012: Is advance planning of sequential movements reflected in the behavior of monkeys? *Ann. Jpn. Neural Netw. Soc.*, vol.22, 3-19.
- [6] Yagi, K., Sakamoto, K., Kawaguchi, N., Mushiake, H. 2014: Neuronal activity in the monkey frontal cortex during a novel shape-manipulation task. *J. Physiol. Sci.*, vol.64, sppl 1, S244.
- [7] Sakamoto, K., N. Kawaguchi, N., Yagi, K. Mushiake, H. 2014: Spatiotemporal patterns of current source density in the prefrontal cortex of a behaving monkey. *Neural Netw.*, (in submission).
- [8] Sakamoto, K., N. Kawaguchi, N., Yagi, K. Matsuzaka, Y., Katayama, N., Tanaka, T., Mushiake, H. 2014: Current sink and source patterns in the prefrontal cortex of a behaving monkey. *NOLTA* (in submission).
- [9] Sakamoto, K., N. Kawaguchi, N., Yagi, K. Katayama, N., Tanaka, T., Mushiake, H. 2014: Evaluation of Sink and Source Patterns in the Prefrontal Cortex of a Monkey. *Proc. Jpn. Soc. Med. Biol. Eng.*, vol.53 (in submission).
- [10] Nicholson, C., Freeman, J. A. 1975: Theory of current source density analysis and determination of conductivity tensor for anuran cerebellum. *J. Neurophysiol.*, vol.38, pp.356-368.
- [11] Einevoll, G. T., Kayser, C., Logothetis, N. K., Panzeri, S. 2013: Modelling and analysis of local field potentials for studying the function of cortical circuits. *Nat. Rev. Neurosci.*, vol.14, pp.770-785.
- [12] Lambert, N. A., Borroni, A. M., Grover, L. M., Teyler, T. J. 1991: Hyperpolarizing and depolarizing GABA_A receptor-mediated dendritic inhibition in area GA1 of the rat hippocampus. *J. Neurophysiol.*, vol.66, pp.1538-1548.
- [13] Pettersen, K. H., Devor, A., Ulbert, I., Dale, A. M., Einevoll, G. T. 2006: Current-source density estimation based on inversion of electrostatic forward solution: Effects of finite extent of neuronal activity and conductivity discontinuities. *J. Neurosci. Methods*, vol.154, pp.116-133.
- [14] Goldman-Rakic, P. S., Schwartz, M. L. 1982: Interdigitation of contralateral and ipsilateral columnar projections to frontal association cortex in primates. *Science*, vol.216, pp.755-757.

神経回路網のカオスを用いたヘテロ脳間及び脳内ヘテロコミュニケーションの原型モデル

研究代表：岡山大学・特命教授 奈良重俊

概要

(1)リカレント型神経回路網モデルに意図的パターンの周期的連鎖から成るサイクルアトラクタを複数個埋め込み、結合数を全結合から少数結合に減少させてカオスのダイナミクスを導入した。そのカオス中で信号の伝達を試み、輸送される信号の伝播特性を調べ、それが脳内ヘテロコミュニケーションと類似の特性を持っていることを示した。(2)そうした信号伝達形態が同時に3チャンネル設けることが可能であることを示した。(3)これらを工学的に再構成する目的をもって、非線形光電子デバイス結合系として提案した動的自己電気光学効果素子(略称をDSEEDと言い申請者が発案した擬似神経細胞モデル素子)のネットワークについて二状態モデルと同様の計算機実験とその数値解析による研究を行い、特に2チャンネル同時通信において双方向の信号伝達の実現を試みた。(4)このカオスを制御系に搭載した腕ロボット2体および自走ロボット2体を考案し、ハードウェア化した実機と計算機上に構成した模擬機と両者の場合について補足や邂逅などを志向する実験を行い、カオスを通じた行動の相互作用について「脳間ヘテロコミュニケーション」の観点からの研究を行った。

Abstract

Based on a heuristic idea and by computer experiment, we think that chaos introduced into a recurrent neural network model can enable “complex control with simple rule(s)” under ill-posed situations. As an example, we show that chaos introduced into a recurrent neural network model can enable simultaneous multichannel signal transfer as a metaphor of intra-brain communications, which are experimentally observed such as certain distant fields in brain indicate multi synchronizations or simultaneous multi activation of neurons associated with functioning. It should be noted that in intermediate regions between them, the physical channels of signal or information transfer are not observed, instead, only chaotic activities do exist. Moreover, we show behavioral interactions of two individual arm robots and/or roving robots driven by independent chaos implemented into each control system using recurrent neural networks. They give some insight into hetero-communications between brains.

1. 研究開始当初の背景

(1) 脳科学における脳機能研究の現状

現在の高度な電子技術を用いた実験手段の発展に伴って脳神経系の活動状態に関して時空間同時多点計測を行い、そのリアルタイムデータを得ることが可能になっている。それらは厳密な周期的運動でもなく、ランダムデータでもない膨大なデータ群であり、そこから脳機能の原理に関してどんな自然科学的知見が得られるかに関しては百家争鳴の状況にある。

その中で現象論的に特に注目を集めているのは、Brain Computer (または Machine) Interface (略称 BC(M)I) と呼ばれる手法の世界的な隆盛である。現代の発達した情報技術(IT)を駆使して、

機能発現中の脳神経活動を計測し、その時空間信号を機械やデバイス制御に用いて被験者や実験動物が思考するのみで機械やデバイスを駆動制御できるようにするという技術である(“Actions from Thoughts”, M.A.L. Nicolelis, Nature, 409, pp. 403-407 (2001)). ここでは脳神経活動における情報処理や制御の機構にはあまり立ち入らずにその信号のみを利用する立場が見える。そうした成果は逆に脳機能や生体の卓越した機能性のメカニズムの解明が依然として極めて困難であることを再確認させるものである。

(2) 脳機能研究に関する新たな手法の萌芽と発展 —前研究課題期間(2年間)を含めた見地から

先に述べた現状の一方で、神経科学・神経生物学の発展に伴い多くの実験的かつ理論的知見が得られて来た歴史において、脳内にもカオスが発見されたことは大きな驚きであった。理論的には国内では例えば Tsuda らの研究を含め海外でも先駆的研究はいくつかあったが、実験的にそれが観測されたことは大きなインパクトを与えるものであった。それとともに、たとえば通常は非周期的に興奮(発火)している神経回路網において、脳が機能を実現している際の現象として、解剖学的にも脳の機能地図的に言っても離れた領野間の神経が同期的な発火現象を示すことが発見された(C. M. Gray et al., Nature, 338, pp. 334-337 (1989) 以来、多数の実験がある)。

こうした新現象に対して発見論的なモデルによるアプローチや複雑系数理学からのアプローチを行い脳機能のからくりを迫る研究が起きている。科研費・新学術領域研究中の当該領域提案:「ヘテロ複雑システムによるコミュニケーション理解のための神経機構の解明」はその大きな柱となる研究領域である。本研究課題の代表者は同様な立場に基づいて、神経回路網モデルにおけるカオスの機能的な側面とその分析や不良設定問題の求解などの研究を積み上げて来た(S. Nara, Chaos, 13, pp. 1110-1121 (2003), S. Nara et al., Biological Cybernetics, 99, pp. 185-196 (2008))。

このような「動的観点から脳の高度機能に関する計算機実験を行う研究、またその数理科学的分析研究とハードウェア製作による実験的研究」は、世界的に見て急増しつつある。ヨーロッパ・アメリカには活動的なグループが散見され、最近ワークショップなども頻繁に開かれて急速に注目を集めつつある。

上掲の新学術領域研究に公募課題として採択された研究「神経回路網におけるカオスに基いた脳内通信の原型モデル」はこうした動向に一石を投じ、カオスが生体情報処理・生体制御などにおいて重要な役割を果たしているとの仮説に機能実験による検証を与えるものである。

2. 研究の目的

前節に述べた状況および前研究課題期間(2年間)を含めた現状を背景に新たなアイデアを加え、特に「カオスを含む複雑なダイナミクスを通信媒体として用いた複数離点間同時多チャンネル通信の計算機実験のさらなる進展とそれに基づく脳内ヘテロコミュニケーション機能へのアプローチ、および脳機能型擬似神経デバイス(Brainmorphic Device)ネットワークにおける双方向コミュニケーション実現」、「2体の自律ロボットに発生させた互いに独立なカオスを介しての両者の機能的相互作用とヘテロ脳間コミュニケーション機能へのアプローチ」を重要な目的とする。次に各目的課題について述べる。

(1) 脳内コミュニケーション機能の卓越性に関する動的機構の解明とその機能的展開

－前研究課題期間(2年間)を含めた見地から

本研究代表者らはカオスや新発見としての同期現象と脳機能との関連が話題となる動向に一石を投ずる研究としてこれまでに積み上げて来た研究に基づき、比較的単純な要素(二状態神経細胞モデル)の多数結合系においてこれも比較的単純な時間発展ルール(神経興奮の更新ルール)によって生じるカオスを含む複雑なダイナミクスについて、それを不良設定問題求解や逆問題解決に応用してカオスの有用性・有効性を示してきた(Y. Suemitsu and S. Nara, Neural Computation, 16 pp. 1943-1957 (2004)). 例えばカオス的記憶ダイナミクスを用いた記憶の検索や記憶の合成, 更には制御系への応用として準階層型神経回路網のカオスを用いた迷路求解などがある. 更にそうした機能性がモデルの詳細にはよらないことをも示し, カオスの機能的汎用性・普遍性を主張してきた(R. Takada, D. Munetaka, S. Kobayashi, Y. Suemitsu, and S. Nara, Cog. Neurodynamics, 1, pp. 189-202 (2007)).

これら研究の現状や研究歴を背景とした研究目的として

○神経回路網のカオスを用いた多点間の同時多チャンネル情報伝達に関する計算機機能実験とその動的機構の解明, およびそれをもとにした脳内コミュニケーション機能へのアプローチを掲げ, 新学術領域研究における公募課題として採択された. その2年間の研究期間における得られた成果の一つとして, リカレント型神経回路網において考案したカオスによる信号伝達機能実験について「適切に選んだ一部の神経に入力した送信信号がいったんカオス中に散って表面上は見えなくなるが, 時空間的に離れた点において再びその信号が発現していることを発見し, これは脳波実験や fMRI 実験とも合致する現象である」ことを示した. 本研究期間においてはその機能的展開を目的として

- (a) 前研究期間では未達成だった同時3チャンネル信号伝達を実現する
- (b) そうした現象を準階層型リカレントモデルに拡張して同様な現象を実現する
- (c) 2体の自律ロボットに発生させた互いに独立なカオスを介して両者が機能的相互作用を行う計算機実験と実際のハードウェア搭載実験, およびそれに基づくヘテロ脳間コミュニケーション機能へのアプローチを掲げる.

(2) 疑似神経細胞の提案およびそのネットワークによる脳内通信機構の工学的再構成

－前研究課題期間(2年間)を含めた見地から

計算機実験による研究をハードウェアにより再現することは, 経験的科学における帰納と演繹による法則の発見と実験による裏付けという点から重要な事柄である. 本研究課題の代表者らは, 非線形光電子デバイスを用いた能動素子結合系(脳機能型疑似神経デバイス)の作製をも理論的に提案し(Y. Ohkawa, T. Yamamoto, T. Nagaya, and S. Nara, Applied Physics Letters, 86, pp. 111107--111110 (2005))その動作解析も示した(T. Yamamoto, Y. Ohkawa, T. Kitamoto, T. Nagaya and S. Nara, Int. J. of Bif. and Chaos, 16, pp. 3717-3725 (2006)). 提案した上記疑似神経デバイス結合系はパルス発振疑似神経回路網として同期現象のこうした研究を行うのに適したモデル系である. したがって

○非線形光電子デバイスによる擬似神経(回路網)の試作とその評価およびそれを用いた離点間同時多チャンネル通信及び離点間同期現象の計算機実験, 更にそれらに関する実際のハードウェア試作とその動作実験と理論との比較

という目的を掲げ, 新学術領域における公募課題として採択を得た. その2年間の研究期間における得られた成果の一つとして, 「素子間の結合形態において, 現実の脳にも観測される「small world」的結合をとり, それによって発生するカオスの場合について信号伝達の計算機実験を行い, 二状態神経における少数結合数の場合と同様の結果を得た」, があげられる. 本研究期間においてはその機能的展開を目的として

○脳機能型擬似神経デバイス(Brainmorphic Device)ネットワークにおける双方向コミュニケーション実現

を掲げる.

3. 研究の方法と成果

(1) 二状態神経細胞モデルとそのネットワークについて

計算機機能実験については次のような方法を用い, また成果についても記載する.

○神経回路網モデルの構築とそのシナプス結合行列の作成の方法については省略するが, 新たなアイデアとしては, サイクルアトラクターを3個となるよう作成し, 同時3チャンネルの信号伝達を可能とするべく計算機実験を行った.

得られた成果を次に掲げる.

- (i) 適切に定めた神経細胞に入力した送信信号がいったんカオス中に散って表面上は見えなくなるが, 時空間的に離れた点において再びその信号が発現しているという現象について, そうした通信チャンネルを三系統設け, カオスを媒体として3点間同時信号伝達に成功した. さらに, 系の動的神経発火パターンを変化させるパラメータについて, 機能実現に関する最適化を行った.
- (ii) 上記(i)で用いた単一神経回路網モデルを2システム準備し, それらを独立した巡回ロボットに搭載し, 二者間の独立なカオスによる行動上の相互作用(追跡と逃走志向, 相互邂逅志向)を行う計算機機能実験に関し, 成功裡に結果を得た. さらにそれからの発展として「学習」の導入による展開を図って結果を得た.
- (iii) 上に行った場合を2体のアームロボットに搭載し, 目的物体を両者で取り合うという競争的な行動を行うという計算機実験を行い, 二者間の独立なカオスによる行動上の相互作用に関する研究を行い結果を得た.
- (iv) 国際会議:International Conference on Cognitive Neurodynamics (ICCN2013) において上記成果を発表した, また国際会議 Computability in Europe (CiE2013) に出席して情報収集を行った

(2) 光半導体技術を用いた擬似神経細胞モデルとそのネットワークについて

計算機実験についての方法は省略する. 得られた成果を次に掲げる.

- (i) 擬似神経デバイスネットワークにおいて, ランダム結合の方式を採用し, 適切に決定した送

信素子および受信素子において、双方向コミュニケーションを実現することに成功した。

(ii) 電子情報通信学会など国内の複数の学会で上記結果を発表した。

参考文献は本文中に掲載、下記は成果としての発表文献

[1] Ken-ichiro Soma, Ryota Mori, Shigetoshi Nara, Simultaneous Multichannel Communication Using Chaos in A Recurrent Neural Network, Proceedings of The 4th International Conference on Cognitive Neurodynamics 2013, to be published in 2014 by Springer Verlag

[2] S. Kuwada¹, T. Aota¹, K. Uehara, S. Hiraga, Y. Takamura, S. Nara, Behavioral Interactions of Two Individual Arm Robots Using Independent Chaos in Recurrent Neural Networks, Proceedings of The 4th International Conference on Cognitive Neurodynamics 2013, to be published in 2014 by Springer Verlag

[3]そのほか学会発表6件

Hippocampal mechanisms in rats for spatial coding of self and others

Johan Lauwereyns, Professor,
Graduate School of Systems Life Sciences,
Faculty of Arts and Science, Kyushu University

Overview

The progress in this project has been on two fronts in parallel. First, we have concentrated on a form of abstract coding for spatial alternation in hippocampal area CA1 of rats. This abstract coding provides insights into mechanisms of spatial processing that may be relevant for the spatial coding of self versus others. We found that hippocampal area CA1 performs a function of internal switching from external (sensory, context-dependent) input to internal processing (relating to memory retrieval). This internal switching is reflected in a shift from high gamma to low gamma as well as a shift in spike timing relative to the phases of the theta oscillation. Furthermore, this internal switching shows within-sessions dynamics that matches with the behavioral adaptation, suggesting that the internal switching is directly involved in the control of action. Second, we have conducted several behavioral studies with rats in an effort to design a good paradigm for neurophysiological recording on the topic of spatial coding of self versus others. We embarked on three separate behavioral studies, using different social manipulations, particularly relating to a) inequity aversion, b) cooperation, and c) observational learning. All three of these behavioral studies provided solid evidence of complex operant behavior in the rats; however, this behavior was not convincingly influenced by social factors. As such, the studies provided a large body of negative evidence that will be important in our understanding of the limitations of abstract coding in rats.

1. Background at the start of the research

(1) Combining two important concepts in neuroscience

The idea for this project was based on the combination of two very important topics in cognitive neuroscience, which had been treated separately. On the one hand, there is the vast amount of work on spatial coding in the hippocampus, suggesting that it contains a cognitive map of the world (cf., the work started by John O'Keefe more than three decades ago, and still flourishing in many international labs). On the other hand, many people have been interested in *the mirror system*, ever since Giacomo Rizzolatti and his colleagues encountered neurons that coded abstract representations of action (“called mirror neurons”), both when subjects perform an action and when

the same action is performed by another. Most of the former research has been conducted in rats. Most of the latter was done in humans and monkeys. The research on spatial coding in rat hippocampus has the advantage of very detailed experimental data, which give very rich opportunities for theoretical work and computational modeling. The work on the mirror system, however, is intrinsically connected to the topic of communication and hetero-systems, and offers very interesting phenomenological observations. The challenge is to combine the strengths of these two types of research in order to advance our understanding of mechanisms of communication and interactive hetero-systems. This was the goal of the present project. The rationale of the project was to create an analogue of a paradigm for mirror neurons that would be relevant for rat hippocampal coding.

(2) Empirical approach

This work would build on previous work done in our own lab, which has revealed an abstract code for spatial alternation in rat hippocampal CA1. This work made an important contribution to the study of spatial coding in the hippocampus, completely in the tradition of John O'Keefe's work. Our investigation showed that some of the spatial coding is quite abstract. In this sense, it raised the possibility of other types of abstract coding - particularly those identified by Giacomo Rizzolatti and colleagues with respect to the representation of actions by the self versus the other.

Thus, our hypothesis is that rat hippocampal spatial coding might support the transition from auto-coding (the rat's own spatial position) to hetero-coding (the spatial position of another rat). If the hippocampus truly maintains a cognitive map of the world, this should be the appropriate structure in the brain to find a convergence of auto- and hetero-coding of position.

2. Purpose of study

(1) Mapping mirror mechanisms in hippocampal circuits

The proposed research project aimed to investigate the spatial coding of self versus others in rat hippocampal circuits. Previous research on the cognitive map of the hippocampus has always focused on the spatial mapping of the individual ("SELF") relative to the world. However, if the cognitive map is truly a representation of the world, the neural mechanisms of coding should work equally well in tracking the movements of others. To be able to map the mirror mechanisms, we must first get a proper understanding of abstract spatial coding, that is, how the rodent brain achieves the translation from sensory spatial data to a cognitive map which may be used as a coordinate system to connect between various spatial codes, such as the spatial codes related to self versus others.

(2) Parallel behavioral and neurophysiological work

The core concept of this project was to advance our understanding of abstract spatial coding in the

hippocampus while at the same time working on behavioral paradigms that would be suitable to record mirror mechanisms. Thus, the project proceeded as a twofold undertaking, aiming to clear as much ground as possible in two years, toward the long-term goal of mapping the spatial version of the mirror system in rats. To this end, on the one hand, we studied the mechanisms of abstract coding in rat hippocampal area CA1, particularly during a one-second fixation, while the rats performed a delayed alternation task in a nose-poke paradigm. We focused particularly on the transition from immediate, sensory spatial coding to memory-based retrieval. On the other hand, we tested several behavioral paradigms and conducted an extensive literature review, in the search for a suitable paradigm to record neural mechanisms of a spatial mirror system in rats.

3. Outcomes

(1) Theta phase shift in spike timing and modulation of gamma oscillation: A dynamic code for spatial alternation during fixation in rat hippocampal area CA1 [1]

Though hippocampus is thought to perform various memory-related functions, little is known about the underlying dynamics of neural activity during a preparatory stage before a spatial choice. Here we focused on neural activity that reflects a memory-based code for spatial alternation, independent of current sensory and motor parameters. We recorded multiple single units and local field potentials in the stratum pyramidale of dorsal hippocampal area CA1 while rats performed a delayed spatial-alternation task. This task includes a one-second fixation in a nose-poke port between selecting alternating reward sites, and so provides time-locked enter-and-leave events. At the single-unit level, we concentrated on neurons that were specifically active during the one-second fixation period, when the rat was ready and waiting for a cue to pursue the task. These neurons showed selective activity as a function of the alternation sequence. We observed a marked shift in the phase timing of the neuronal spikes relative to the theta oscillation, from the theta peak at the beginning of fixation to the theta trough at the end of fixation. The gamma-band local field potential also changed during the fixation period: The high gamma power (60–90 Hz) decreased and the low gamma power (30–45 Hz) increased toward the end. These two gamma components were observed at different phases of the ongoing theta oscillation. Taken together our data suggested a switch in the type of information processing through the fixation period, from externally cued to internally generated.

(2) Within-sessions dynamics of theta-gamma coupling and high-frequency oscillations during spatial alternation in rat hippocampal area CA1 [2]

Theta-gamma coupling in the hippocampus is thought to be involved in cognitive processes. A large

body of research establishes that the hippocampus plays a crucial role in the organization and maintenance of episodic memory, and that sharp-wave ripples (SWR) contribute to memory consolidation processes. Here, we investigated how the local field potentials in the hippocampal CA1 area adapted along with rats' behavioral changes within a session during a spatial alternation task that included a 1-s fixation and a 1.5-s delay. We observed that, as the session progressed, the duration from fixation onset to nose-poking in the choice hole reduced as well as the number of premature responses during the delay. Parallel with the behavioral transitions, the power of high gamma during the delay period increased whereas that of low gamma decreased later in the session. Furthermore, the strength of theta-gamma modulation later in the session showed significant increase as compared to earlier in the session. Examining SWR during the reward period, we found that the number of SWR events decreased as well as the power in a wide frequency range during SWR events. In addition, the correlation between SWR and gamma oscillations just before SWR events was higher in the earlier trials than in the later trials. Our findings support the notion that the inputs from CA3 and entorhinal cortex play a critical role in memory consolidation as well as in cognitive processes. We suggest that SWR and the inputs from the two areas serve to stabilize the task behavior and neural activities.

(3) Spatial coding of self versus others in rats [3]

Previous research on the cognitive map of the hippocampus has focused on the spatial mapping of the individual ("self") relative to the world. However, if the cognitive map is truly a representation of the world, the neural mechanisms of coding should work efficiently also in tracking the movements of others. Here we presented a critical review of research toward characterizing the commonalities of spatial coding of self-movement versus movement-by-others. The objective was to search for the equivalent of the mirror system for spatial mapping in rats. Although several behavioral studies implicate a form of spatial tracking of conspecifics, it proves to be a challenging task to design relevant behavioral paradigms compatible with neurophysiological recording. We conducted three behavioral studies on social influences in the spatial choices of rats, focusing on observational learning, inequity aversion, and cooperation. All three behavioral studies provided negative results, without any evidence of social influences. On the basis of these null results, we argue that the role of social processing in rats may be misrepresented in the current literature in psychology and neuroscience. Several suggestions are made on how to incorporate the encountered limitations in future theoretical and empirical work.

References

- [1] Takahashi, M., Nishida, H., Redish, A.D., & Lauwereyns, J. (2014). Theta phase shift in spike timing and modulation of gamma oscillation: A dynamic code for spatial alternation during fixation in rat hippocampal area CA1. *Journal of Neurophysiology*, *111*, 1601–1614.
- [2] Nishida, H., Takahashi, M., & Lauwereyns, J. (in press). Within-sessions dynamics of theta-gamma coupling and high-frequency oscillations during spatial alternation in rat hippocampal area CA1. *Cognitive Neurodynamics*.
- [3] Kinoshita, J., Sakai, H., Zommaro, N. M., Nishida, H., Takahashi, M., & Lauwereyns, J. (in revision). Spatial coding of self versus others in rats. *Neural Networks*.

神経リズム中に誘導されるダイナミカルセルアセンブリの実験的検証

研究代表：九州工業大学・大学院生命体工学研究科・教授・夏目 季代久

概要

脳内海馬では、記憶の埋め込み過程に関わる θ 波が観察される。一方、てんかん波が生成する時は記憶障害が起こる。両波共に海馬スライスで誘導できる。本研究では θ 波及びてんかん波誘導中の神経発火時空間パターンを測定した。その結果、 θ 波の1周期内で、小規模な神経同期発火の伝搬現象が観察された。一方てんかん波中、同期神経発火集団は瞬時に形成され、その空間的範囲も大きかった。この事は θ 波中に誘導されるダイナミカルな神経同期発火時空間パターンにより、刺激を表象するセルアセンブリが海馬内に形成される可能性を示唆する。

Abstract

In hippocampus, theta wave which relates to the memory encoding is observed. Epileptic discharges induces amnesia. Both rhythms are induced in hippocampal slices. In the present study, the spatiotemporal pattern of the cell firing was measured. In the results, in a period of theta rhythm, the cell firing in a small population propagated in CA3 network from dentate gyrus to CA1. On the other hand, in the epileptic discharges, the cell firing in a larger population was immediately induced. The results suggest that the spatiotemporal pattern of cell firing which is induced in theta wave causes the cell assembly which represents the stimulus in hippocampus.

1. 研究開始当初の背景

(1) ダイナミカルセルアセンブリ

記憶学習の脳内表象として、複数の神経細胞集団の発火に関わるセルアセンブリ(CA)が考えられている。一般的にCAは時間的に一過的な発火が見られるだけであるが、1996年に、提案されたダイナミカルセルアセンブリ(DCA)は時空間パターンを持つ。しかし、まだ実験的にその存在は証明されていない。

(2) θ 波とてんかん波

海馬では θ 波が観察され、記憶が学習過程に関わっていると考えられている。特に、記憶の埋め込み過程に関わっている。記憶の埋め込みに関わっている神経基礎過程であるシナプス長期増強も観測される(参考文献[1])。一方、海馬はてんかん波の焦点としても有名であり、その波の発生源になり得る。てんかん波が生じる時は、記憶障害が起こる事が知られている。これら θ 波及びてんかん波は、それぞれアセチルコリン作動薬であるカルバコール、脱抑制薬であるピクロトキシンを投与する事で海馬スライスにおいても誘導できる。

2. 研究の目的

(1) 海馬で誘導されるダイナミカルセルアセンブリの検証

記憶が無いと相手の事も忘れてしまう。ヘテロ脳間コミュニケーションにとって記憶過程は重要な機能である。本研究は、このようなコミュニケーション神経情報学にとって必要なダイナミカルな記憶情報処理過程の解明を目的とする。以前に提案されたダイナミカルセルアセンブリ(DCA)は、記憶学習の脳内表象として時間構造を持つ。しかし、まだ実験的に証明されていない。脳内海馬では、記憶学習に関わっている θ 波、 β 波などの脳波が観察されている。私は、これらのリズム中、DCAとなる神経細胞同期発火の時空間パターンが自発的に誘導されると作業仮説を立て、その点を検証する事を目的とした。

3. 研究の方法と成果

海馬スライスにおける神経発火の時空間パターンをアルファメッドサイエンティフィック株式会社製の *in vitro* 多点平面電極システムを用いて測定した。多点平面電極はガラス基板上に 64 個の平面微小電極がパターン化されており、厚さ 450 μm の海馬スライスを直接電極上に載せてサンプリング周波数は 20 kHz で測定した。各電極位置における電位を測定し、Laplacian フィルターを用いた電流源密度(CSD)解析により、電流のシンク、ソースを計算し、ピクロキシン誘導てんかん波、及びカルバコール誘導 θ 波における神経発火の時空間パターンを測定した。

(1) てんかん波発生中の CSD パターン(参考文献[2], [3])

記憶が阻害されるてんかん波中、同期発火する神経細胞集団の空間的範囲は θ 波(後述)に比べ非常に広がった。またその形成も θ 波に比べて瞬時であった。

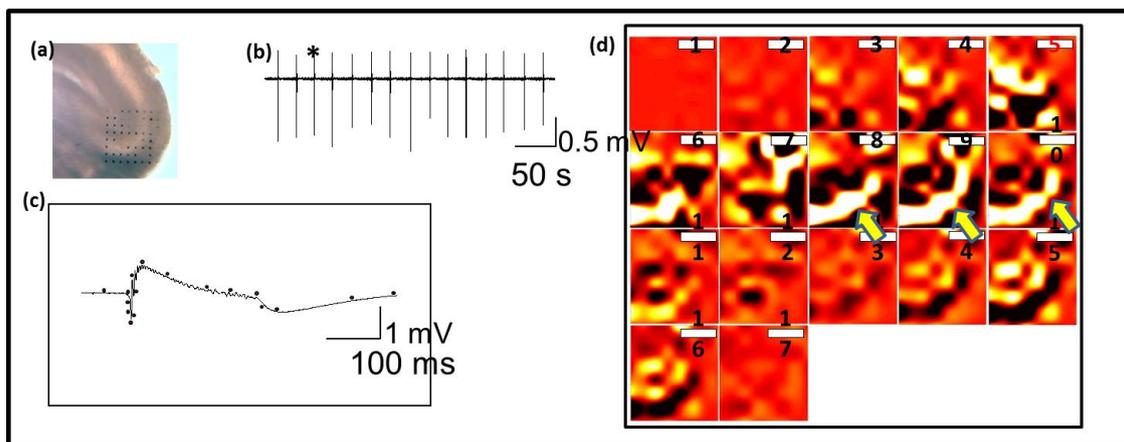


図 1: MED64 によるてんかん波中、神経発火時空間パターン測定結果。(a):海馬スライスとMEDプローブの位置関係。CA3 部位を中心にプローブを配置している。(b):てんかん波の電氣的波形。(c): (b)*部の拡大図。(d): (c)中の1波形におけるCSD解析の結果。右上番号は、(c)中の小丸部の時間に該当する。黒色はシンク、白色はソースを表す。ソースが細胞体層に沿って瞬時に誘導された(黄色矢印)。

(2) θ 波発生中の CSD パターン(参考文献[2], [3])

次に $30 \mu\text{M}$ カルバコールによって誘導される θ 波中の海馬神経発火の時空間パターンを測定した。その結果、 θ 波の 1 周期内で、神経同期発火小規模クラスターが伝搬する現象が観察された。この伝搬は安定しており、発生する θ 波中、常に観察できた。

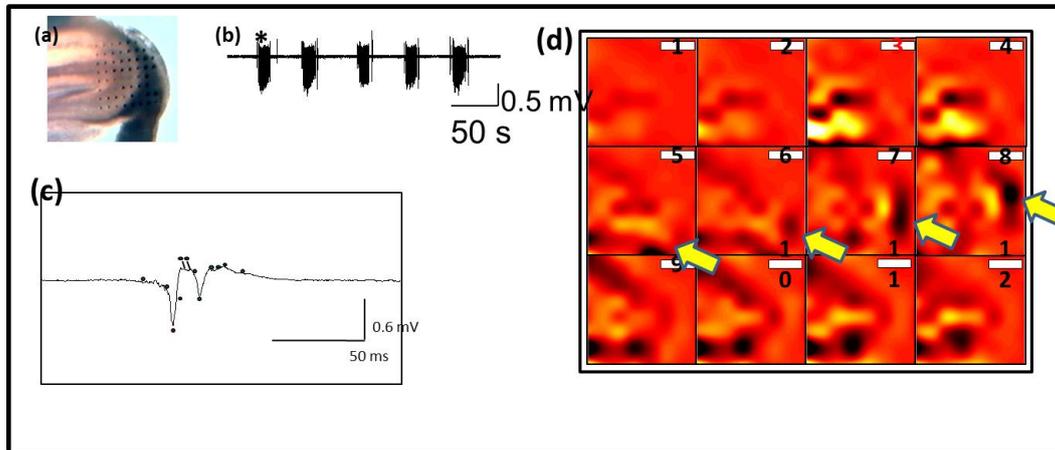


図2 :MED64 による θ 波中、神経発火時空間パターン測定結果。(a):海馬スライスとMEDプローブの位置関係。CA3 部位を中心にプローブを配置している。(b): θ 波全体図。(c): (b)* 部の拡大図。(d): (c)中の CSD 解析結果。右上の番号は、(c)中の小丸部の時間に該当するパターンである。小さなシンクが錐体細胞体層に沿って伝搬する様子が 5-8 の間で観察できた(黄色矢印)。

(2) てんかん波から θ 波に変化した時の CSD パターン(参考文献[2], [3])

てんかん波が発生しているスライスに、カルバコールを投与すると、てんかん波は抑制され、代わりに θ 波が誘導された。この時神経発火の時空間発火パターンを測定した所、てんかん波発生中は図 1 のような神経発火パターンであったが、 θ 波の誘導に伴い、図2のパターンに変化した(図 3)。

(3) 海馬 β 波中の CSD パターン

また θ 波の合間に β 波が起こる事を確認出来た(図4)。その β 波中に、数周期に渡る β 波の位相にロックして、類似の神経発火パターンが誘導されている事が確認出来た。この結果は、 β 波中にセルアセンブリが想起されている可能性が示唆される。

以上、本研究結果をまとめると、海馬スライスにおける θ 波中、神経同期発火の小集団の伝播現象が観察できた、てんかん波中、 θ 波よりも大きな同期発火集団の早い伝播が起こった。このような現象が1スライス内でも再現できた。 θ 波休止中に β 波が誘導され、周期的な神経発火パターンが誘導されていた。これらの結果から、この結果は、 β 波中にセルアセンブリが想起されている可能性を示唆するものである。

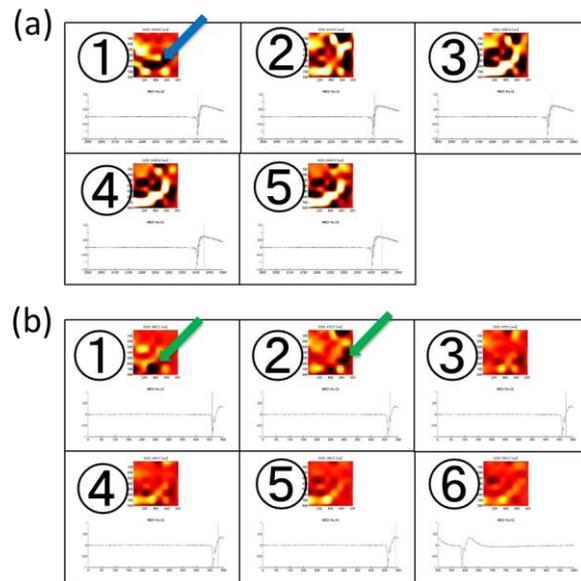


図3: てんかん波(a)が出ているスライスにカルバコールを投与すると, θ 波(b)に変化した. それに伴い, 神経発火パターンも変化した. ①→⑤, ⑥に時間は進んでいる.

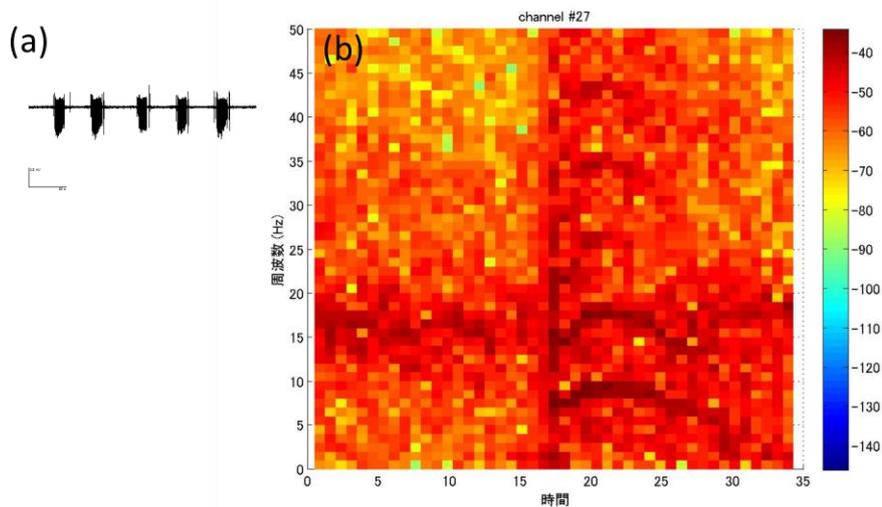


図4: θ 波休止中に β 振動が観察される. (a)カルバコールによって誘導される θ 波. (b)は(a)の波形を短時間FFT法で解析した結果. 横軸は時間(秒). 17-29秒の所で θ 波が誘導されている. それ以外の0-17, 30-35秒間では15-20Hzの β 波が誘導されている.

参考文献

- [1] Hiroki Nakatsuka, Kiyohisa Natsume, "Circadian rhythm modulates long-term potentiation induced at CA1 in rat hippocampal slices", Neurosci. Res. (2014) (doi: 10.1016/j.neures.2013.12.007).
- [2] Itsuki Kageyama, and Kiyohisa Natsume, "Carbachol-induced neuronal oscillation in rat hippocampal slices and temperature", ICCN2013 (2013) (Sweden).
- [3] Kageyama Itsuki, and Kiyohisa Natsume, "Experimental verification of dynamical cell assembly (DCA) with the nerve rhythm. - Is DCA characterized by a kind of the nerve rhythm?" Neuro2013 (2013) (Kyoto).

運動指令のトップダウン形成とボトムアップ形成を担う皮質回路機構

研究代表：玉川大学脳科学研究所・教授 磯村宜和

概要

本研究では、外界刺激により誘発される、あるいは自発的に開始する随意運動を担っている大脳皮質運動野の回路機構を調べるために、外発性/内発性運動課題または Go/No-go 弁別課題を遂行するラットの一次・二次運動野のマルチニューロン活動を記録解析し、両領域の神経活動の相違を詳細に解明した。また、一次運動野が投射する背外側線条体の直接路または間接路の投射細胞の活動を傍細胞記録法により調べて、運動情報と報酬情報の統合に対する直接路と間接路の役割を明らかにした。

Abstract

Previously, we have established a new experimental approach to examine microcircuit mechanisms of motor information processing in the motor cortex, using multiunit recordings in head-fixed rats performing a forelimb movement task. In the present study, we examined functional spike activity of multiple pyramidal cells and interneurons in the primary and secondary motor cortices during an external-/internal-trigger movement task or Go/No-go response task. In addition, we examined an integration of motor information with reward information in the direct-pathway and indirect-pathway neurons of the dorsolateral striatum of the behaving rats.

1. 研究開始当初の背景

(1) げっ歯類の運動発現を担う一次・二次運動野

ラットやマウスなどのげっ歯類では、運動発現を担う大脳皮質の運動野として一次運動野と二次運動野が同定されている。実際、両運動野ともに運動発現中に活動がみられ、皮質内微小刺激により体部位局在に応じた筋収縮も誘発される。しかしながら、げっ歯類の一次運動野と二次運動野は運動発現に対して異なる次元の機能を有するのか、すなわち霊長類の一次運動野、運動前野、補足運動野のように機能的な階層性をもつのか、については長い間議論が続いていた。

(2) 運動発現を担う線条体の直接路と間接路の役割

また、大脳皮質の運動野は、大脳基底核と協調して運動指令を生成し、随意運動を発現する。1990年、DeLongらは、大脳皮質-基底核ループの興奮性細胞と抑制性細胞の組み合わせから、線条体の直接路投射細胞(ドーパミン D1 受容体発現)の活動は大脳皮質を興奮させ、間接路投射細胞(D2 受容体発現)の活動は大脳皮質を抑制するという拮抗的なバランスによって、運動発現が制御されるという仮説を提唱した。この DeLong 仮説は広く信じられているが、個々の直接路細胞と間接路細胞が拮抗的な運動情報を伝えていることを実際に検証した研究は皆無であった。

2. 研究の目的

(1) 一次・二次運動野の機能的活動の比較

本研究では、まず頭部を固定されたラットが右の前肢を使ってスパウトレバーを適切に操作する外発性運動課題または Go/No-go 弁別課題を遂行している際に、一次運動野および二次運動野の多数の神経細胞の発火活動をマルチニューロン記録法により記録し、両運動野の神経細胞の基本的な発火特性や運動発現に関わる活動の時間経過、方向選好性、運動の目的による活動の変化などを比較することを目指した。さらに、別のラット群において外発性／内発性運動課題を遂行する際の両運動野の神経細胞の同期的発火の集団特性についても詳細に調べた。

(2) 背外側線条体の直接路と間接路の情報表現

また、ラットが報酬を期待できる状況で前肢の運動発現を遂行している際に、一次運動野の投射先であり大脳基底核の入り口にあたる線条体の背外側部において、D1 受容体を発現している直接路投射細胞とD2 受容体を発現している(D1 受容体非発現の)間接路投射細胞は、それぞれ運動情報や報酬情報をどのように表象しているのかを傍細胞記録法を使って明らかにすることを目指した。

3. 研究の方法と成果

(1) 一次・二次運動野の機能的活動と同期的発火活動の集団特性

まず、スパウトレバーを右前肢で操作(押す・保持する・引く)する頭部固定ラットにおいて、一次運動野および二次運動野の前肢領域における神経細胞の発火活動を定量的に調べた[1]。その結果、細胞のサブタイプ(regular-spiking(RS)か fast-spiking(FS)か)にかかわらず、発火頻度など基本的な発火特性のみならず、運動発現に対する機能的な活動の時間経過、活動増大、方向選好性などについても、実際上まったく相違は認められなかった。しかしながら、Go/No-go 弁別課題を遂行時に、そのレバー操作行動の目的が異なる状況(報酬を志向して行動を起こすオペラント的運動発現か、飲水動作としての完了行動的運動発現か)である場合に、一次運動野と比べて二次運動野の機能的活動がより大きく修飾を受けることが明らかとなった。このような同じ運動発現でも行動目的が異なる際には、運動野よりも高次の脳領域からのトップダウン情報が二次運動野の活動に適応的に影響している可能性がある。以上の実験結果は、前肢の随意運動を適切に制御するために、一次・二次運動野は基本的な運動情報を共通に処理するものの、二次運動野は目標志向行動として適応するための上位の内的情報を運動情報と統合する機能があるのかもしれないことを示唆している[1]。

次に、前肢のレバー操作による外発性／内発性運動課題を遂行中の頭部固定ラットにおいて、一次運動野および二次運動野からのマルチニューロン記録実験から得られた神経活動データを詳細に解析した[2]。その結果、両運動野とも、外発性運動発現にも内発性運動発現にも関与しているが、特に二次運動野では、外発性運動の発現時に活動が高まる細胞の割合が有意に多いことを明らかにした。また、これらの細胞の間には、相互相関図上で数ミリ秒以内の同期的発火を示す細胞ペアがおおよそ数%の頻度で観察されるが、これらの同期的発火を示す細胞ペアは、細胞サブタイプの違い、課題関連性の違い、運動発現に対する機能的活動の違いに対して(多少の差異の傾向はあるものの)細胞集団全体としては基本的に確率的な分布に近いものであった。すなわち、細胞ペア

の同期的発火は、細胞サブタイプや行動上の機能の組み合わせに高い特異性を有するものでなく、むしろもっと神経回路に一般的な性質であることが示唆された。さらに、そのような同期的発火が課題遂行とともに動的に変動するかどうかを調べたところ、細胞集団としてはやはり確率的な分布を示し、同期的発火の動的変動が積極的に大脳皮質の機能に関わっているとは結論できない所見を得た[2](投稿準備中)。

(2) 背外側線条体における直接路と間接路の運動情報と報酬情報

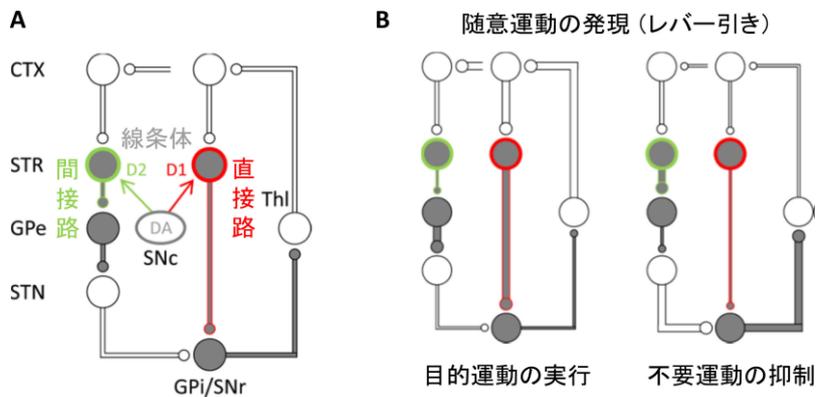
我々は、ラットに前肢でレバーを操作する行動課題を遂行させたときに、単一の線条体細胞の発火活動を傍細胞(ジャクスタセルラー)記録して解析し、さらに *in situ* ハイブリダイゼーション法を組み合わせ、その記録細胞が直接路細胞(D1 発現)か間接路細胞(D1 非発現)かを可視化同定する実験を試みた[3]。その結果、線条体細胞は、D1 受容体の発現の有無にかかわらず、運動の実行中に活動が増加するものもあれば、停止中に増加するものもあった。このことは、運動発現の制御は直接路と間接路の単純な拮抗的バランスによるものではなく、運動の各過程(おそらく準備、開始、実行など)に直接路と間接路がそれぞれ複雑かつ協調的に関与していることを示唆している。さらに、このような運動に関連する活動は、D1 受容体の発現にかかわらず、報酬予測により増加することが判明した。すなわち、線条体(運動系ループ)へは、黒質緻密部からのドーパミン入力以外の報酬情報が伝わっている可能性がある。今回の研究は、DeLong 仮説を完全否定するものではないが、大脳基底核は運動の「アクセルとブレーキ」に例えられるほど単純な拮抗関係の仕組みにはないことを示している[3]。

※本研究に関連する総説論文として文献[4] [5]を挙げる。また、本研究活動に付随して、動物行動実験装置に関する特許を出願した[6]。

参考文献

- [1] Saiki A, Kimura R, Samura T, Fujiwara-Tsukamoto Y, Sakai Y, Isomura Y (2014) Different modulation of common motor information in rat primary and secondary motor cortices. PLoS ONE (in press)
- [2] Kimura R, Saiki A, Fujiwara-Tsukamoto Y, Sakai Y, Isomura Y (2013) Cooperative multineuronal spike activities related to externally- and internally-initiated movements in rat primary and secondary motor cortices. Neuro2013 (The 36th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society) (Kyoto, June 20, 2013)
- [3] Isomura Y, Takekawa T, Harukuni R, Handa T, Aizawa H, Takada M, Fukai T (2013) Reward-modulated motor information in identified striatum neurons. J Neurosci 33: 10209-10220.
- [4] Tsubo Y, Isomura Y, Fukai T (2013) Neural dynamics and information representation in microcircuits of motor cortex. Front Neural Circuits 7: 85.
- [5] 磯村 宜和 (2013) ブレインサイエンス・レビュー2013(クバプロ, 廣川信隆編) 運動指令を形成する皮質内機能的回路の探索:9-26.

[6] 磯村 宜和 (2013) 「動物学習支援装置, 及び動物学習支援機能付き飼育ケージ」(特許出願 2013-205207; 2013 年 9 月 30 日, 代表発明者)



【図】 大脳基底核の直接路と間接路

A) 大脳皮質—大脳基底核回路の直接路と間接路の構成

B) 運動実行時, D1 発現細胞にも D1 非発現細胞にも活動の増加と抑制が生じる仕組み

(玉川大学脳科学研究所紀要第7号論文紹介ページより)

実環境におけるリスクと情報探索の神経機構

研究代表：玉川大学脳科学研究所・准教授 鮫島 和行

概要

自然界で生き残るために、戦略的な探索は、脳の基本的な機能の1つである。霊長類をつかった認知的な意思決定課題を用いて、複数選択肢の中から認知的に意思決定を行う際の吻側線条体の神経メカニズムを神経生理学的に明らかにした。さらに実験室内での意思決定よりも現実に近い商品選択などの意思決定を調べることにより、新規商品を選択する際の脳活動が、強化学習における探索行動と同様に前頭極の活動を高めることが明らかになった。

Abstract

Strategic exploration is the fundamental brain function to survive in the natural environment. We investigated neuronal property in the rostral striatum during a cognitive decision task, in which the monkeys cognitively choose one of visual stimuli among multiple alternatives. We also investigated human choice behavior and brain activity with functional MRI during an purchase choice task that is more natural situation in the experimental setup. We found that the unknown novel-products or brand choice were correlated in frontal pole activation, which was also activated in the explorative choice in reinforcement learning task.

1. 研究開始当初の背景

(1) 認知的意思決定と大脳基底核機能

大脳基底核の線条体は、報酬予測誤差をコードする中脳ドーパミンニューロンからの投射や、大脳皮質、特に前頭葉からの入力を強くうけており、様々な状況において将来得られる報酬を最大化する意思決定に関わるのではないかとというモデルが提案され、これまでその仮説を支持する実験結果が多数得られている。最終的な出力となる行動選択においては、マウスやラットなどの齧歯類における神経細胞活動記録や、光遺伝学等を駆使した、神経回路操作技術によって、行動選択肢毎に報酬予測をおこなういわゆる「行動価値」に相関するニューロンや、それらに相関するニューロンが直接路と間接路に分かれて存在し、空間的な行動選択に対して逆の効果を持つこと、報酬の予測が異なると、刺激の効果が変化する事などから、大脳基底核において報酬に基づく行動選択が行われていることがあきらかにされつつある。一方で、我々の「行動」は何かを手にとったり、どこかへと自らの脚をつかって異動したり、といった運動に関わるものだけではなく、一定の空間や属性・モダリティなどに注意を向けたり、その情報をリハーサルの様に作業記憶に保持したり、といったいわゆる運動には現れない「認知的」な行動も含まれる。大脳基底核ループ結合は、運動野を中心とした運動ループばかりではなく、眼球の制御に関わる眼球ループや、さらに背外側前頭前野や前帯状回皮質などと結合がつよい「連合ループ」が存在する。行動の意思決定に重要な線条体領域ばかりではなく、このような認知的な意思決定に関わる知見は増えつつある。作業記憶を操作する際や、将棋などの対戦相手の出方をシミュレートするような意思決定の際の fMRI などの脳活動非侵襲計測によって、線条体の重要性が指摘されている。

(2) 実世界における探索と脳活動

強化学習のような実験室において理想的な環境で一定の課題を解いている際の脳活動は、これまで多くの報告がある。特に、報酬予測誤差と相関する BOLD 信号が、大脳基底核、特に線条体に観測されることは、繰り返し検証されてきた。ジュース、におい、たべもの、異性の写真などの 1 次報酬に属するような刺激の予測を行わせた際の脳活動や、期待していたのに実際には得られなかった場合に活動が低下するなどの報酬予測誤差と類似の状況を作り出し、その脳活動が測られているばかりではなく、褒められることや、他者との相対的な報酬などにも相関が見られている。大脳基底核の神経回路が、報酬の予測とその予測に従った意思決定に重要な働きをすることは繰り返し報告がある。一方で、強化学習の要素のもう一つである予測が出来ないような選択を積極的にとることで学習を行う探索については、未だに未知のままである。外界の変化の測度 (volatility) によって、どのくらいの選択をおこなわなかったら、外界の曖昧性が拡大してゆくのかをモニターする変数と内側前頭前野の脳活動に相関があることや、過去の報酬量の積算や期待値から計算された報酬最大化する様な選択肢を、実はヒトは取らない場面もあること、そのときの脳活動計測を行うと、前頭極の脳活動が上昇していたことなどから、学習場面において探索を積極的に行うためには、目の前の報酬最大化だけではなく、自ら学習することそのものを予測に組み込んだ報酬最大化を行う機構が、前頭極を含む前頭前野のネットワークで行われているのではないかという仮説も提唱されている。

また、実世界の意思決定として、様々な株のトレーディングを模した状況における意思決定や、ニューロマーケティングと呼ばれる商品のブランド名やロゴなどの心理効果と脳活動計測が行われている。しかし、このようなニューロマーケティングの研究は、始まったばかりではあり、特に日本では通常のアンケートを中心とした言語報告や内観報告による印象調査などに依存したマーケティング手法が用いられているのみである。脳活動は、言語報告や内観報告とは矛盾する、現実の買い物の状況で無意識に選択する(させられる)状況を反映するのではないかという期待があるが、実際にそのような報告を科学的に行い、神経科学の一流誌に掲載をしている例は少ない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、実験室の状況で行われている意思決定に関する神経メカニズムが、実世界でも使われている事の科学的な証拠を得て、現実問題に適用可能な知見を得ることである。そのために、第 1 に動物実験によって、ヒトに近い認知的な意思決定の神経機構を大脳基底核において調べ、意思決定の神経メカニズムを明らかにすることを目的とする。第 2 に、ヒトの脳活動計測を、より現実状況に近い文脈での意思決定の場合と、動物実験で用いられているよくコントロールされた課題において行う。これによって、実験室での理想的な状況で行う意思決定が、実際の場面でどのような状況に対応するのか、またその対応のしかたの個人差はどの程度存在し、それらの対応関係から実世界における意思決定の計算機構を明らかにする。

(1) 認知的意思決定による行動と指示された行動

第 1 の動物実験によって、認知的な意思決定の神経機構を調べる研究は、2010-2011 年度の研究から引き続いて解析を行っている。これまでの研究によって、色と形の複数の属性を持つ 2 つの刺激から報酬予測に基づいて意思決定をおこなわせる課題において、運動を決定する事の出来ない

期間の吻側線条体における神経活動記録を行ってきた。この課題において、サルは自分の行動は決められないが、2つの刺激のうちどちらかを後の行動に用いるのかを決定することが要求される。線条体の神経活動の変化を解析したところ、色や形にのみ反応の変化があるような神経活動が計測された。これは色や形のみによって報酬を予測することで、効率よく学習を進めることができるようなアルゴリズムで説明される行動とよく一致する。これらの神経活動上の情報表現が、認知的な意思決定や認知的操作の価値を学習に関与するのならば、意思決定ではなく指示された行動を実行する過程や、単純な記憶課題時には、これらのニューロンは活動しないのであろうか？この疑問を解決するために、後の行動や報酬予測や記憶の負荷をコントロールした課題を動物に訓練して神経活動記録をあらためて行った結果を解析した。

(2) 探索を行う時の脳活動は、新商品を行う場合と同様の脳機構を使うか？

一方、ヒトを用いた実環境における意思決定課題における研究では、過去2年の研究によってミネラルウォーター課題行わせ行動傾向を検討してきた。この際、新規商品をより多く選択するヒトは、4本腕山賊課題においても、より探索を多く行う強化学習エージェントと同じような行動選択がなされると、推定された。個人毎の行動傾向は、学習事態においても、日常生活の購買行動においても、新規チャレンジをおこなうことは学習における新たな情報の收拾と同一傾向を示すことがしめされた。これまでに、強化学習をおこなわなければならない4本腕山賊課題において、行動選択肢の価値が高いにもかかわらず、最適な行動選択を選ばなかった際により高い脳活動を示した領域は前頭極であることが報告されている(Daw et al 2006)。そこで、本研究では、購買行動に類似した課題を遂行中の脳活動を、機能的MRIとして計測することで、実世界での意思決定に用いられる脳の状態と、学習事態における脳活動の類似性・相違性を検討する。

3. 研究の方法と成果

(1) 認知的な選択に特化した神経細胞活動を同定

複数の属性(色や形)を持つ図形を2種類提示し、その2つから1つを選択させる課題を遂行中のサルの線条体神経活動を記録した。このとき、色を4種類、形を4種類用意し、その組み合わせによる16種類の図形から2つをランダムに選択して提示し、選択させる。サルが選択した図形の色または形に応じて異なる量の報酬が得られるように課題を設定した。あるブロックでは、形に報酬が関連づけられ、別のブロックでは色に関連づけられる。ただし、そのブロックにおいて、どの色(または形)が多く報酬が得られるのかについては、毎回ランダムに変動する。すなわち、毎ブロックにおいて、サルはどちらの図形の色(または形)に報酬が関連しているか、またどちらの色(または形)を選択すればより多くの報酬が得られるのかは試行錯誤によって学習しなければならない強化学習課題になっている。(図 1A)

この課題とは別に、選択肢を2つ提示するのではなく、1つのみを提示することによって、1つの図形を記憶し、記憶した図形と同じ刺激が提示された際に反応をさせる、遅延記憶課題も同時に訓練した。この課題では、色4種類、形4種類から構成される16種類の図形において任意の1つが提示され、それに続いて2つの図形が提示される。1つは最初に提示された図形であるが、その順序はランダムに設定されるため、2番目の刺激において反応するか否かは、あらかじめ選択しておくことは

出来ない(図1B).

この2つの課題での吻側線条体から神経活動記録を行ったところ、認知的意思決定課題によりはっきりと強く活動するニューロンが多数見つかった。記憶課題に活動を高めるニューロンも存在したが、その数は認知的意思決定課題でより強く活動するニューロン数よりも少なく、また、その傾向は線条体の前方の内側にゆくほど顕著であった。

このことから、選択肢の色や形のみ情報を持つニューロンは、2つの選択肢を比較・選択する際により強く活動し、そうでないニューロンは意思決定ではなく、決定された対象への記憶や注意などの認知機構そのものに関わることが示唆された。(Nonomura et al 2013)

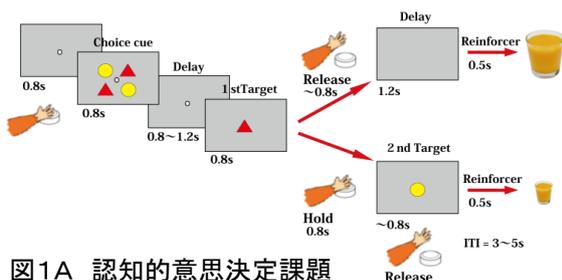


図1A 認知的意思決定課題

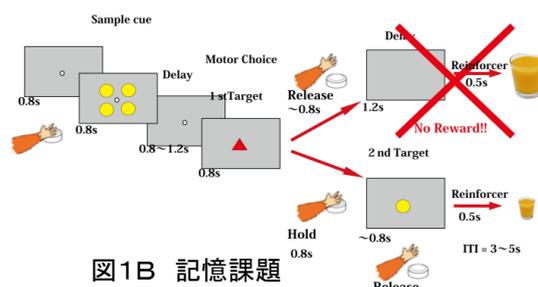


図1B 記憶課題

(2) 前頭極は、未知の商品を選択する時により強く活動する

同じ被験者群に、4本腕山賊課題(Daw et al 2006)とミネラルウォーター選択課題の両方を実施した。300試行の4本腕山賊問題において、それぞれの行動選択と報酬フィードバックによって各行動の行動価値が報酬予測誤差に基づいて学習されてゆくという強化学習モデルを当てはめ、その際に最大の行動価値をもつ行動ではなく、異なる行動を選択する割合を決める逆温度パラメータ β の推定を、最尤推定法によって求めた。また、ミネラルウォーター課題において、新規なブランドの選択割合(新規刺激は、被験者毎に事前のアンケートによって定義し、その結果に選ばれた刺激を4刺激のうち3,2,1個の割合でよく知っているブランド、中程度に知っているブランド、と一緒に提示することによって選択させた)のバイアスパラメータも同様に推定した。探索強度 β と新規ブランドバイアスの個人間相関を求めたところ、有意な負の相関がみられた。このことは、探索をよりするほど、新規ブランドを選択する割合が高いことが示唆される。この状況において、新規ブランドを選択した場合から既知ブランドを選択した時の脳活動の差分が、前頭極および下前頭回において有意差がみられた。このことは、前頭極および、下前頭回が、未知の商品に挑戦して新しい情報を得ようとすることをドライブしている可能性を示唆する。(Nomura et al 2013)

参考文献

- [1] Nonomura S, Kato YX, Doya K, Tanji J and Samejima K, The neural activities in the rostral-striatum during the cognitive decision making, Annual meeting of Society for neuroscience, 855.17/ 2013.
- [2] Nomura, I., Samejima, K., Ueda, K., Washida, Y., Okada, H. & Omori, T. (2013). Choosing unknown goods: fMRI study of product choice. Proceedings of Cognitive Neuroscience Society 2013 Annual Meeting, 178.

大脳皮質FSバスケット細胞から錐体細胞への抑制シナプス支配の機能的解析

研究代表：生理学研究所・准教授 窪田芳之

概要

ラットの大脳皮質 FS バスケット細胞から5層の錐体細胞への抑制性シナプス結合の解析を行った。その結果、FS バスケット細胞は、錐体細胞の細胞体、樹状突起、棘突起にシナプス結合していた。細胞体シナプスの面積は大きく、大きな IPSC で強力な抑制をする一方で、樹状突起シナプスの面積は小さく、小さな IPSC で局所的な抑制をしている。棘突起シナプスの面積は大変小さく、棘突起頭部のみ膜電位を大幅に下げている事がわかった。

Abstract

We found that terminals made by FS basket cell to cortical layer 5 pyramidal cell induced IPSCs of three distinct modalities. Somatic inhibitory synapses have a large junction area producing single-terminal somatic IPSCs of large conductance. The simultaneous activation of multiple somatic synapses effectively shunts integrated EPSPs and provides a global control of pyramidal cell firing. Small conductance synapses with a small junction area, hyperpolarize dendritic membrane locally so that even proximal dendritic synapses have only weak effects at the soma. Their role may be limited to intercepting local dendritic EPSPs and controlling integration of EPSPs from more distal dendrites. Inhibitory synapses onto dendritic spines have very small junction areas and post-synaptic spine shape results in an efficient veto of synaptic excitation limited to the spine they innervate. These results may reflect a general functional principle of cortical inhibition.

1. 研究開始当初の背景

大脳皮質は、我々ヒトの各種の活動(運動、思考、感情)を根本的に司っている場所である。そこには百億個もの神経細胞が存在し、一つの細胞あたり数万個のシナプス結合を介して信号をやり取りし、我々の各種の高次脳機能を作り上げている。神経細胞の概念を見つけた偉大なる研究者であるカハールが大脳皮質の神経細胞をこの世に紹介して100年以上経ったが、大脳皮質の局所神経回路は、いまだ未知の事だらけである。最近、研究機器が大幅に精度を上げた事により、少しの光

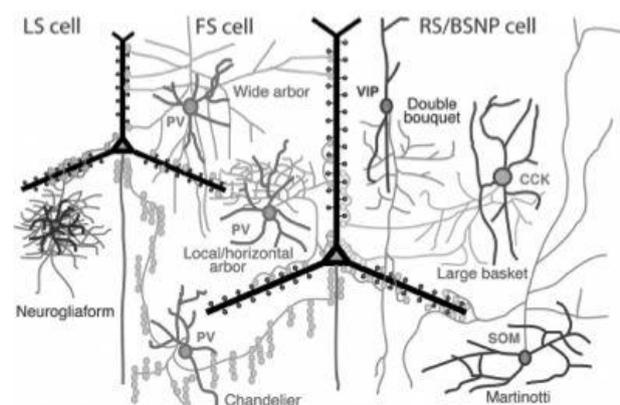


図1 大脳皮質局所神経回路の概略
錐体細胞と各種非錐体細胞

が見えて来た。そこでわかった事は、大脳皮質の局所神経回路は、かつて誰もが想像したよりもずっと複雑な事である(図1)。本研究では、このように無限に近い数のシナプス結合が非常に複雑な回

路を形成する中で、興奮性シナプスに比べ後塵を拝している抑制性神経終末の作用を機能的に解析したい。大脳皮質の細胞の8割は信号を次に伝える役割をもつ錐体細胞で、残りの2割はその錐体細胞の活動を、抑制作用で制御する非錐体細胞である。非錐体細胞の種類は少なくとも十種類以上あり、抑制をかけるターゲットの部位がそれぞれ形態的に異なっていることから、局所神経回路での機能的な役割が異なっている事が知られている(E. G. Jones, *Cereb Cortex* 3, 361 (1993), Y. Kawaguchi, Y. Kubota, *Cereb Cortex* 7, 476 (1997), H. Markram *et al.*, *Nature Reviews. Neuroscience* 5, 793 (2004))。申請者は、大脳皮質のFS basket細胞が錐体細胞に及ぼす抑制性作用を電気生理的、形態的手法を使って解析する内容の申請書を提出し、平成22-23年度に伝達創成機構の公募に採用され、研究を進めた。FS basket細胞と錐体細胞をペア電気記録解析し(図2)抑制性の信号の伝導特性を解析した。細胞体から40 μ m以上離れたら、細胞体ではIPSCは計測でき無かった事から、抑制性信号は40 μ m

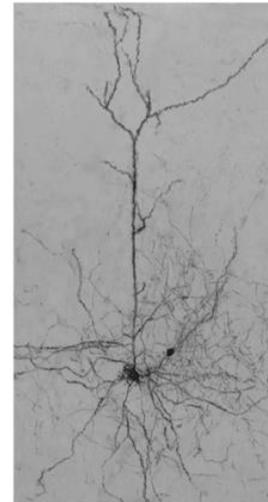


図2 ペア電気記録した皮質5層の錐体細胞(左)とFSバスケット細胞(右)

以上は伝搬されないという特性を持っている事が判明した。このペアを組織処理して電子顕微鏡で観察し、シナプス接着の有無と、シナプス接着面積を測定し、平成23年夏に報告した。

2. 研究の目的

大脳新皮質には、基本的な単位である局所神経回路が多数存在し、それらの活動が基となって、高次脳機能が具現する事がこれまでの研究で明らかである。その回路がどのような配線構造をとるのか、どのような動作原理で機能するのか理解されるには至っていない。本研究では、その構成要素の中の抑制性シナプスの機能に関する解析を行う。具体的には、錐体細胞に対するFSバスケット細胞の抑制性シナプスの位置やそのPSDの面積と、ターゲットの錐体細胞に起きるIPSCの大きさとの相関を注意深く詳細に解析する。そして、その解析結果を基にシミュレーション解析を加える事で、実際に皮質の抑制性シナプス機能にどのようなメカニズムが隠されているのかを解析したい。これまで、抑制性シナプスの機能に関しては、その詳細はまだよく知られていない。本研究は、抑制性シナプスの機能的な理解を飛躍的に進めるデータを提供する。

3. 研究の方法と成果

(1) 方法

本研究では、3つの実験を体系立てて行った。ただし、平成22-23年度の公募研究において、すでに実験Aは完了済みであるため、実験B、Cを本研究で遂行した。(実験A:完了済)皮質スライスを使ったペアコーディング実験で、ラットの前頭皮質のスライスを使って、錐体細胞とFSバスケット細胞のペアコーディング電気生理実験を行い、FSバスケット細胞から錐体細胞へのIPSCの記録を既に9例取得した。また、電気生理実験の後、固定液で組織固定し、ABC液で反応してからDAB処理し、記録細胞を染色し、電子顕微鏡観察用に樹脂に包埋した。(実験B)ペアコーディング記録細

胞のシナプス結合部位を、電顕を使って詳細に観察し、シナプス結合部分の面積を測定した。実験AとBから、シナプス結合単位面積あたりのIPSCの電荷量(Q)を算出した。この実験は、CS56ペア実験の細胞に関しては、平成23年度にすでに完了した。本研究期間中に、残りのペア記録実験に関して必要と思われるペアに関して実験Bを実施した。(実験C)「Neuron」を使ったシミュレーション解析により、実際に、実験Aのペアレコーディング電気生理実験で得られたペア細胞の形態や、実験Bで測定したシナプス結合サイトの面積等の情報を正確に反映したそれぞれのペア細胞を神経細胞のシミュレーション解析ソフト「Neuron」に再現した。そして、実験Bで算出したシナプス結合単位面積あたりのIPSCの値を各シナプスに当てはめて、錐体細胞の細胞体に認められるIPSCを解析した。この解析実験で細胞体から40ミクロン以上離れたシナプス結合のIPSCは、細胞体ではノイズレベルでしか観察されない事を確認した。

(2) 成果

FSバスケット細胞の神経終末が、錐体細胞の細胞体を神経支配するペアの錐体細胞のIPSC反応は概して大きく、IPSC反応がとても大きいペア(ピーク約85pA)と小さいペア(ピーク約15pA)があった。それらをEMで観察したところ、前者は錐体細胞の細胞体上に13個(シナプス面積総和3平方 μm)、細胞体近傍樹状突起に8個のシナプスを認めた一報、後者は細胞体上に4個のシナプス(シナプス面積総和1平方 μm)のみであった。シナプス面積の総和が、IPSCの大きさを決めている事が推測された。また、樹状突起のみを神経支配するペアのIPSP反応はとても小さい事がわかった。さらに、40 μm よりも以遠にシナプス入力するペアではIPSCは検出できなかった。シナプス結合をEM連続切片観察によって3次元再構築し、シナプスジャンクション面積を測定した。その結果、細胞体に接着するシナプスの面積は大きく、樹状突起上のシナプス面積は小さく、棘突起上のシナプス面積はさらに小さい事がわかった。モデル細胞を使ったシミュレーション解析の結果、樹状突起や棘突起上のシナプスの面積が小さいのでシナプスを流れる電流も小さく、IPSCが減衰してしまい遠くまで伝導しないということがわかった。

以上の結果から、FSバスケット細胞の抑制様式は3つの様相(細胞体の抑制、樹状突起の抑制、棘突起の抑制)を持ち、それぞれ異なった機能を持つ事がわかった。細胞体の抑制は最も強い抑制である。一方、樹状突起への抑制は小さく近傍のみに影響を与える。棘突起への抑制はとても小さく棘突起頭部のみを抑制する効果がある。

参考文献

- [1] Kubota Y
Untangling GABAergic wiring in the cortical microcircuit
Current Opinion in Neurobiology, 26, 7-14, 2014
- [2] Tricoire L, Kubota Y, Cauli B
Cortical NO interneurons: from embryogenesis to functions.
Front Neural Circuits. 7:105. 2014

[3] DeFelipe J, López-Cruz PL, Benavides-Piccione R, Bielza C, P Larrañaga, Anderson S, Burkhalter A, Cauli B, Fairén A, Feldmeyer D, Fishell G, Fitzpatrick D, Freund TF, González-Burgos G, Hestrin S, Hill S, Hof PR, Huang J, Jones EG, Kawaguchi Y, Kisvárdy Z, Kubota Y, Lewis DA, Marín O, Markram H, McBain CJ, Meyer HS, MonyerH, Nelson SB, Rockland K, Rossier J, Rubenstein JLR, Rudy B, Scanziani M, Shepherd GM, Sherwood CC, Staiger JF, Tamás G, Thomson A, Wang Y, YusteR & Ascoli GA

New insights into the classification and nomenclature of cortical GABAergic interneurons.

Nature Reviews Neuroscience, 14, 202-216, 2013

[4] Kubota Y, Nomura M, Karube F, and Kawaguchi Y

Functional Significance of Rall's Power of Three Halves Law in Cortical Nonpyramidal Cells

Advances in Cognitive Neurodynamics (III). 45-51, 2013

[5] Chen JL, Villa K, Lin WC, Cha JW, So PT, Kubota Y and Nedivi E

Clustered Dynamics of Inhibitory Synapses and Dendritic Spines in the Adult Neocortex

Neuron, 74, 361-373, 2012

[6] 窪田 芳之

遠くの信号は効率よく, 近くの信号はそれなりに

O plus E” 2012年3月号 : 191-192. 1枚の写真

アドコムメディア, 東京, 2012

発達障害者におけるコミュニケーション障害のメカニズム解明

研究代表: 京都大学医学部附属病院精神科神経科・助教 船曳康子

概要

自閉症者におけるコミュニケーション障害のメカニズムを探索した。自閉症者と対照者に対して、交互に等間隔でリズム打ちをするという協調タッピング課題、また視聴覚への注意配分課題を行った。自閉症者は急な変更への対応が困難で、感覚入力への注意調整の難しさも見出された。同時に、脳波や NIRS を用いて、課題中の脳機測定も行った。相手の行動が予測される直前に、自閉症群で前頭葉 θ 波の大きな振幅が検出され、その時に思考の負荷がかかっていることが示唆された。

Abstract

We investigated the mechanism of the difficulties in communication in autistic spectrum disorder (ASD). We conducted the alternate tapping task in which participants keep the tapping intervals the same each other, and the visual and auditory attention task. We found that individuals with ASD have difficulties in adapting to a sudden change and in attention modulation to sensory input. Also, we measured the cortical activities during the tasks using electroencephalogram and near-infrared spectroscopy. The amplitude of the theta wave in the frontal lobe was large in ASD right before the behavior of the partner.

1. 背景

(1) 2者間の交互コミュニケーション

発達障害者は、程度の差はあれコミュニケーションの障害を有することが多い。中でも自閉症スペクトラムでは診断に必須の項目となっているが、このコミュニケーションの障害とは曖昧な概念である。より一般的に言われる社会性の障害や実際の日常生活における困りも、このコミュニケーション障害の結果という解釈もできる。

そのコミュニケーションには、相手と「ま」を合わせる協調が必要となる。これまで、理化学研究所の共同研究メンバーが、協調タッピング課題時の脳波の同期性研究を健常者で行ってきた[1]。脳波の成分解析などを行い、自己タッピング直前に運動野の μ 派の振幅が減少し、これは2人の行動が同期している場合のみ、相手のタッピングを観測しているときにもみられていた。そこで、この手法を自閉症者のコミュニケーションに応用することとした。

(2) 自閉症者の感覚に対する反応について

自閉症者の乳児に最初に気づかれる特徴として、呼んでも振り向かない、という行動特性がある。このために難聴と間違えることもあるくらいの聴覚に対する鈍感さがある。一方で、掃除機等の音に対して耳塞ぎをするという聴覚過敏も自閉症の特徴として知られる。つまり、聴覚の過敏と鈍麻を併せ持つこととなる。この背景として、自閉症者には注意の転換が困難であることが知られる[2,3]。つまり、注意集中時には、音声処理に異常がないなら、注意の観点に着目して、教育・学習を行うことが有効であるという科学的裏付けとなりうる。

2. 目的

(1) 協調タッピング

上記、背景に基づき、自閉症者のコミュニケーションの困難なメカニズム解明の一端として、2者間の交互協調タッピング課題を応用した。自閉症者は、相手の行動に臨機応変に合わせていくことは困難であることが予想されるが、社会場面や日常生活場面では、複雑な要因が絡み合っていて、その要因を科学的・学問的に解明していくことは困難である。このため、単純なコミュニケーション課題の条件を少しずつ変えて設定することで、コミュニケーション障害の要因を詳細に解明していくことを目的とした。

(2) 感覚入力の反応

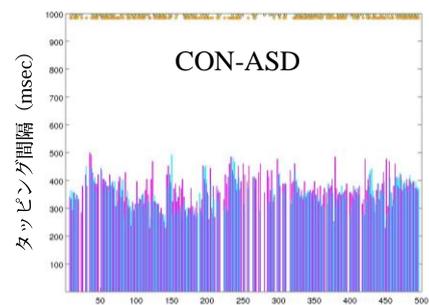
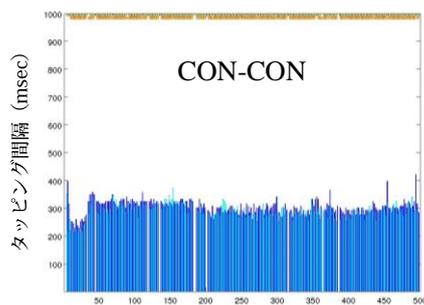
上記、背景2の通りの感覚に対する反応についての脳内処理機構を解明していくことを目的とした。注意という観点に着眼しているため、脳反応を解析する際にも、状態変化を経時的に捉えていく必要があり、脳波、NIRSを用いた。また、自閉症をはじめとする発達障害者は、個人差が大きく、診断の際にもグレーゾーンがあることも知られる。このため、2群間比較のみならず、詳細な行動特徴を捉えておいて、各要素別に解析していくことで、新たな知見が得られると考えた。

3. 方法と成果

(1) 協調タッピング課題

詳細は[5]に記載する通りだが、24名ずつの自閉症スペクトラム(ASD)者(29.17 ± 7.07歳;右利き20名,左利き3名,両利き1名;男性14名,女性10名)と定型発達(CON)者(24.45 ± 6.47歳;右利き21名,左利き3名;男性12名,女性12名)に、京都大学医学部附属病院医の倫理委員会承認の同意書記入の上、下記研究を行った。精神医学的診断は、DSM-IV-TRに従って行い、発達障害の特性評価はMSPA(Multi-dimensional scale for PDD and ADHD)[3]およびADOS(Autism Diagnostic Observation Schedule)[4]を用いて行った。両群は年齢、利き腕、男女比ともにほぼ同じであり、大きな差が見られなかった。またWAIS-IIIによる平均知能指数は定型発達群で111.00 ± 12.19(言語性:109.75 ± 13.71;動作性:110.04 ± 11.26)、ASD群で111.33 ± 11.21(言語性:113.96 ± 11.52;動作性:105.29 ± 12.26)であり、2群間に有意差は見られなかった(知能指数:F(1,46) = 0.010, P = 0.923;言語性:F(1, 46) = 1.270, P = 0.266;動作性:F(1, 46) = 1.870, P = 0.178)。それゆえ、両群では発達障害以外で異なる主な要因は認めなかった。

互いに知らない2者がペアとなるが、パーティションで仕切られたブースに着席(互いは見えない)。その2者が交互にボタン押しを行い、押し



たフィードバックは、イヤホンからの音で聞こえる。自分のタッピングと相手のタッピングは、「ド」と「ミ」の音で区別された。その「ド」と「ミ」の間隔ができるだけ一定となるように押すという課題である。

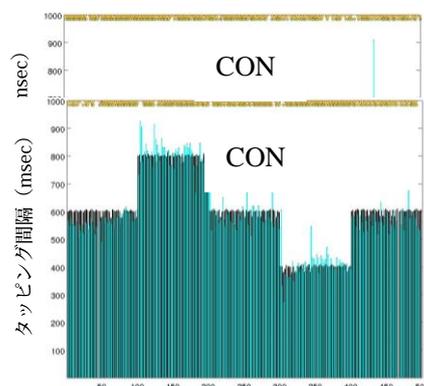
まず、2者で交互タッピングを行うと、CON-CONペアの方が、CON-ASDペアより、間隔の変動が少なかった。

次に、被験者に知らせることなく、PCが相手となるように設定した。必ず、等間隔で返してくる設定では、両群ともに成績がよかった。ところが、PCが急に間隔を変動させる条件において、CON群は適応していったが、

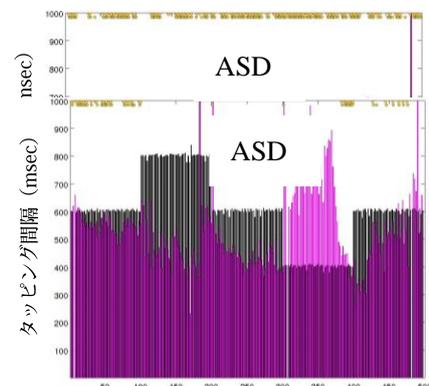
ASD群は急な変動

への対応が困難であった。

また、脳波に関しては、自分がタッピングを行う前後で運動野の α 波の減少が、他者がタッピングを行うのを観測する時に α



黒:PC, 緑:コントロール群, 紫:ASD群



タッピング回数

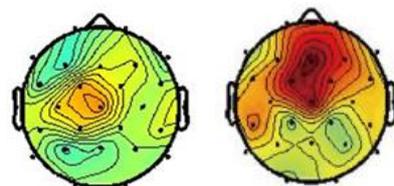
波の増加が観測された。興味深いことに、この α 波の増減は、PC一定条件では両群に差がないものの、PC変動条件では、ASD群に比べてCON群で大きい結果を示した。

更に、相手がタッピングする直前に、ASD群の前頭葉において、シータ波の大きな振幅が、みられた。前頭葉シータ波は認知的負荷に関連するとされている。自閉症者は、自然に他者の言動を汲み取ることが苦手なため、他人の行動を予測して考え対応しようとしていることが伺えた。

(2) 感覚入力に対する反応

詳細は[6]に記載する通りだが、ASD群11名(16.8±6.1歳)とCON群12名(14.2±3.8歳)に対して、同意を得た上で、下記の研究を行った。認知機能は、WAIS-IIIもしくはWISC-IIIによる測定にて、ASD群110.1±10.9、CON群102.9±13.6であり、2群間で統計上の有意差は認めなかった。

同じ大きさの音声30秒間ずつ(トーン、音声、有意味文、無意味文)を流し、聞く条件と無視する条件を作った。その際に、島津製のfNIRSを装着して、前頭葉、側頭葉における脳活動を測定した。更に、聞くことに集中したという指標に、有意味文について recall test



健常群

発達障害群

コミュニケーション中、相手の行動時の θ 波の振幅

を行った。

結果、聞いている時は聴覚野の活動がみられ、それは、群間で差がなかった。無視条件では、同じ大きさの同じ音声でも、NIRS で検出される聴覚野の活動はみられなくなった。これにも群間差はなかった。Recall test では、聞く条件では両群成績はよかったが、無視条件で ASD 群が有意に単語再生が多かった。

このように注意状態に応じて、脳活動は変化することが分かり、自閉症者は感覚処理自体には問題がなく、注意の統制レベルに困難を伴うことが示唆された。

この知見をもとに、更に、視聴覚融合課題を作成し、それぞれ注意状態別に、脳波 NIRS 同時測定にて、追加研究を行い、その解析を進めているところである。

これらの知見により、自閉症者の生活上の困りを理解し、それを軽減していくことを目指している。

謝辞

本研究は、科研費・新学術領域研究「伝達創生機構」(課題番号: 21120005 & 24120706)の補助により実施された。また、京都大学医学部附属病院精神科神経科の外来脳波室にて行われ、その円滑な研究遂行にご協力くださった当該スタッフの皆様、参加頂いた被験者の皆様に深謝致します。更に、脳波測定に協力していただいた水谷忠央さん、吉住美保さん、データの解析にご協力下さった山田陽平さん、被験者さん招集にご協力頂いた川岸久也先生、大下顕先生、上床輝久先生にも深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 川崎真弘, 北城圭一, 山口陽子. 人と人のタッピング同期に関連した 2 者間の脳波リズム同期. 信学技報. 112(176):73-78, 2012.
- [2] Ceponiene, R., Lepisto T., Shestakova, A., Vanhala, R., Alku, P., Näätänen, R., et al. Speech-sound-selective auditory impairment in children with autism: They can perceive but do not attend. The Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 100, 5567-5572, 2003.
- [3] Funabiki Y, Kawagishi H, Uwatoko T, Yoshimura S, Murai T. Development of a multi-dimensional scale for PDD and ADHD. *Res Dev Disabil.* 32(3):995-1003, 2011.
- [4] Lord, C, et al. Autism diagnostic observation schedule: a standardized observation of communicative and social behavior. 19: 185-212, 1989.
- [5] 川崎真弘, 北城圭一, 深尾憲二郎, 村井俊哉, 山口陽子, 船曳康子. 発達障害者のコミュニケーションにおけるリズム調整. 信学技報. 113:201-5, 2013.
- [6] Funabiki Y, Murai T, Toichi M. Cortical activation during attention to sound in autism spectrum disorders. *Res Dev Disabil.* 33: 518-524, 2012.

社会規範の価値表現とその認知的変容の神経基盤

研究代表：玉川大学脳科学研究所・教授 松元健二

概要

さまざまな社会規範と非社会的信念の評価課題およびその説得課題を用いて、説得による社会規範の変容に関与する脳部位を特定した。また、50%の確率で報酬が得られるトランプゲーム課題を2人で行って貰い、選択肢の数の平等性を操作することによって、社会規範の一つである「選択の機会の平等」を価値づける神経基盤を、「結果の平等」と明確に分離して明らかにした。

Abstract

Using tasks of evaluation and persuasion of social norms/non-social beliefs, we identified the brain regions that contribute to modulation of social norms. Also, we revealed the neural basis of valuating equality in choice opportunities dissociated from equality in outcomes, by operating the equality in choice opportunities between subjects and opponents in a two-person card-game task with fixed hit rate of 50%.

1. 研究開始当初の背景

(1) 社会規範の価値表現と説得による変容

私たちの社会生活は意思決定の連続である。社会における意思決定には、商品など、物の価値ばかりではなく、社会規範も非常に重要な意味を持つ。例えば私たちは、「電車の中での携帯電話はよくない」という社会規範を共有しており、多くの場合この規範に従った行動をとる。私たちは社会規範を内在化し、自らの価値観の一部として規範を守るからだ。実際私たちは、自ら従うべきと思っている社会規範に従っている他者に対して好感を持ち、従っていない他者を目にする、例えば自分が直接に迷惑と被っていないくても、その人に対して不満を抱く[1]。このことは、社会生活を送る人間の意思決定を説明する上で、コミュニティに共有されるさまざまな社会規範それぞれの価値を想定することが妥当であることを示している。この社会規範の価値は、コミュニケーションを通じて形成され、それがコミュニティの各メンバーの意思決定の基礎となり、そしてコミュニケーションを通じてダイナミックに変容する(図1)。しかし、社会規範の価値表現およびその変容の神経基盤を扱った研究はほとんどない。ごく最近になって、禁煙メッセージを読んでいるときに前頭前野内側部と楔前部の活動が高いほど、禁煙に成功しやすいということが報告された[2]が、禁煙は自身の健康にも利するものであり、少なくとも純粋な社会規範とは言い難い。したがって、社会規範の価値表現およびその認知的変容の神経基盤を解明することが重要である。

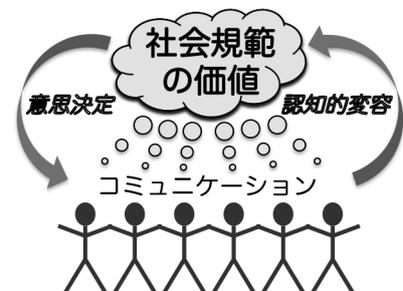


図1

(2) 「選択の機会とその平等」の価値表現

社会規範の中でも、人間社会における平等や公平性を考えるうえで、「機会の平等」は「結果の平等」と並ぶ重要な概念である。「結果の平等」に脳がどのように関わっているかについては近年の研

究により分かってきていた[3, 4]. しかし「機会の平等」に脳がどのように関わっているかについては何も分かっていなかった. 経済学理論[5, 6]によれば, 「機会の平等」は「人々の間での“選べる選択肢の数”の平等」として定義される. 「機会の平等」が脳内でどのように表現されているかを明らかにするためには, 経済学理論に基づいて「選べる選択肢の数の平等」に対する脳の反応を, 「結果の平等」とは区別したうえで検証する必要がある.

2. 研究の目的

(1) 社会規範の価値表現と説得による変容

本研究では, さまざまな社会規範を言語的に呈示し, それに対して自分がどれほどそう思っているかを被験者が評価しているときの脳活動を, 機能的磁気共鳴画像法(fMRI)を用いて計測することにより, 社会規範の価値が表現されている脳部位を特定する. また, その変容の神経基盤も明らかにする. 社会規範の価値を変容させる最も有効な手段の一つは, 言語的な説得である. 本研究では, 特定の社会規範について, それを強めるもしくは弱める説得メッセージを呈示している最中の脳活動を, fMRI を用いて計測し, これらの脳活動を非社会的な知識についての信念についての説得メッセージを呈示したときと比較することにより, 社会規範特異的な脳内プロセスであるかどうか明らかにする.

(2) 「選択の機会とその平等」の価値表現

社会規範のうち, 特に近代社会において重視されることの多い「選択の機会の平等」の価値表現がどのように脳内で表現されているかを, 「結果の平等」と区別して, 明らかにする. 価値表現を担う2つの脳領域である前頭前野腹内側部と線条体に着目した. 自分の選択肢の数, 相手の選択肢の数, そして自分と相手の選択肢の数の近さを独立に操作し, 自分と相手の選択肢の数を同時に呈示したときの前頭前野腹内側部と線条体の脳活動を fMRI を用いて計測することにより, それぞれの要因に依存して価値表現を変容させる部位を明らかにするのが目的である.

3. 研究の方法と成果

(1) 社会規範の価値表現と説得による変容

さまざまな社会規範および非社会的な知識の信念の言語的呈示刺激を作成し, 社会規範／非社会的信念評価課題(図2)を遂行中の脳活動を fMRI を用いて計測した.



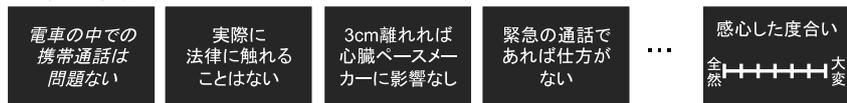
図2

画面上に社会規範もしくは非社会的な信念についての言語的呈示刺激が一つずつランダムな順に呈示され, これらについて自分がどれだけそう思うかの評価に対応するボタンを押して貰った. この課題遂行中の脳活動を, fMRI を用いて計測した.

次に社会規範／非社会的信念説得課題(図3)を行って貰い, 課題遂行中の脳活動を, fMRI を用いて計測した. この課題は, 社会規範ブロックと非社会的信念ブロック(およびコントロールブロック)とからなり, 社会規範ブロックでは, 最初に, ある社会規範を否定する(あるいは肯定する)メッセージが呈示されたのに続いて, その根拠となる事実に関するメッセージが連続的に呈示された. そして最後に, それらの説得メッセージにどれだけ感心したかを評定して貰う. 非社会的信念ブロックでは,

最初に、ある非社会的信念を否定する(あるいは肯定する)メッセージが呈示されたのに続いて、その根拠となる事実に関するメッセージが連続的に呈示された。そして最後に、それらの説得メッセージにどれ

社会規範／非社会的信念 説得課題
(社会規範ブロック)



(非社会的信念ブロック)

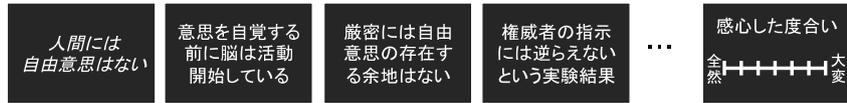


図3

だけ感心したかを評定して貰った。説得を加える社会規範および非社会的信念はそれぞれ、否定的説得を加える項目と肯定的説得を加える項目とを用意し、(社会規範 vs. 非社会的信念) × (否定的説得 vs. 肯定的説得) のファクトリアルデザインとした(図4A)。それぞれの条件のブロックは疑似ランダムな順で配列した(図4B)。否定的説得を加える項目と肯定的説得を加える項目は、被験者間でカウンターバランスをとり、説得メッセージの言語学的要因(文字数、単語数、親密度、格助詞数など)[7]の分布は、条件間で異ならないように統制した。

課題遂行中の脳活動を fMRI によって計測したところ、説得による規範の変化には、これまで説得一般への関与が示唆されてきた前頭前野の背外側部や内側部に加えて、側頭頭頂接合部や側頭極のような社会認知に関わる領域が必要とされることが明らかになった。また、説得の方向によっても必要とされる脳内ネットワーク

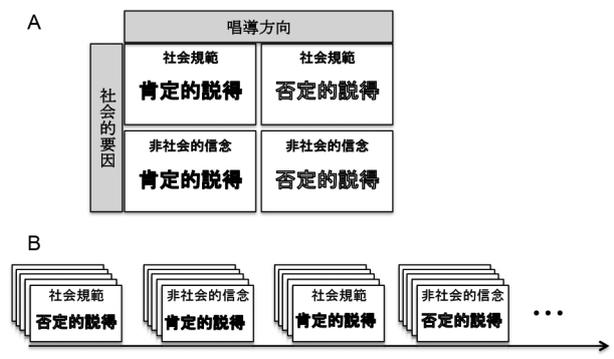


図4

が異なり、規範に否定的な態度が誘導される場合のみ左側の中側頭回および縁上回の関与が追加されていることが明らかになった。このうち縁上回は、説得によって変動する規範に対する態度の度合いそのものを表象していることも明らかになった。これらの成果をまとめて論文を執筆した(投稿中)。

(2) 「選択の機会とその平等」の価値表現

実験参加者(大学生男女 20 名)は、何枚かのトランプカードの中から 1 枚を選び、それが「アタリ」のキングだったら報酬(お金)をもらえるトランプゲーム課題(図5)に、もうひとりの相手プレイヤー(初対面の別の大学生)と同時に取り組んだ。このゲームでは、毎回4枚のカードが配られるが、4枚のどのカードからも自由に選べる条件に加えて、選べる選択枝が、実験者に指定された2枚もしくは1枚のカードに制限されている条件も存在した。実験参加者の選べる選択枝と相手の選べる選択枝は毎回、別々に指定したので、実験参加者の選べる選択枝の数は、相手より多かつ

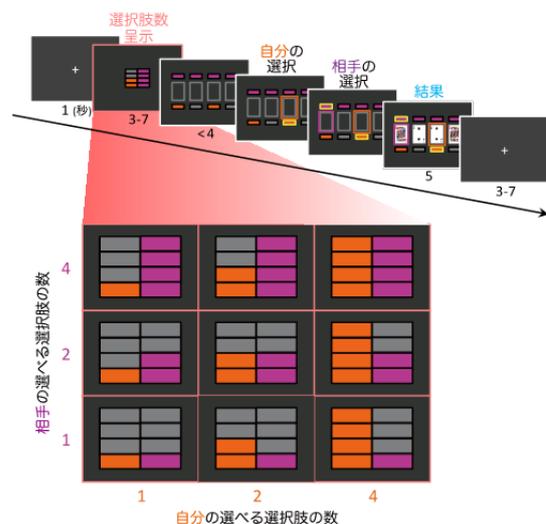


図5

たり、少なかったり、等しかったりした。常に、4枚のカードのうち半分の2枚が「アタリ」であったので、選べる選択肢の数によらず、報酬が得られる確率は常に一定の50%であり、実験参加者もこのことを十分理解していた。実験参加者には、このゲーム課題を磁気共鳴画像撮影装置(MRI)の中でおこなってもらい、課題に取り組んでいる最中の脳活動を測定した。ゲーム終了後、実験参加者は、自分と相手が選べる選択肢の数の組み合わせ(9通り)(図5)のそれぞれに対して、どのような感情(うれしかった、かなしかった、など)を抱いたかを評定した。

ゲーム終了後の感情評定の結果から、自分(実験参加者)と相手プレイヤーの選べる選択肢の数の差が小さく平等なほど、ポジティブな感情が高まることが確認された。これに対応して、脳活動解析の結果からは、金銭的報酬に対して反応する脳領域のうち前頭前野腹内側部は、自分と相手プレイヤーの選べる選択肢の数の差が小さく平等なほど、活動が高まることが分かった(図6左)。一方、金銭的報酬に対して反応するもうひとつの脳領域である線条体は、自分自身の選べる選択肢の数が多いほど活動が高まり、相手の選べる選択肢の数との平等性には無関係であることが分かった(図6右)。この成果は、米国の科学雑誌“The Journal of Neuroscience”に掲載された[8]。

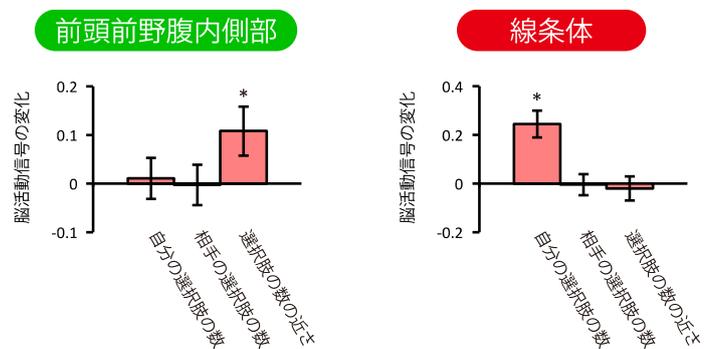


図6

参考文献

- [1] Jackson J (1966) A conceptual and measurement model for norms and roles. *Pacific sociological review* 9(1):35-47.
- [2] Chua HF, et al. (2011) Self-related neural response to tailored smoking-cessation messages predicts quitting. *Nat Neurosci* 14(4):426-427.
- [3] Sanfey AG, Rilling JK, Aronson JA, Nystrom LE, & Cohen JD (2003) The neural basis of economic decision-making in the Ultimatum Game. *Science* 300(5626):1755-1758.
- [4] Tricomi E, Rangel A, Camerer CF, & O'Doherty JP (2010) Neural evidence for inequality-averse social preferences. *Nature* 463(7284):1089-1091.
- [5] Pattanaik PK & Xu Y (1990) On ranking opportunity sets in terms of freedom of choice. *Recherches Economiques de Louvain* 56:383-390.
- [6] Kranich L (1996) Equitable opportunities: an axiomatic approach. *Journal of economic theory* 71:131-147.
- [7] Xu J, Kemeny S, Park G, Frattali C, & Braun A (2005) Language in context: emergent features of word, sentence, and narrative comprehension. *Neuroimage* 25(3):1002-1015.
- [8] Aoki R, et al. (2014) Social equality in the number of choice options is represented in the ventromedial prefrontal cortex. *J Neurosci* 34(18):6413-6421.

サル間同調行動における脳内統合過程の解明

研究代表: (独) 理化学研究所 BSI 適応知性研究チーム・研究員 長坂泰勇

概要

これまで意識的な模倣行動や同調行動を扱った研究は多数行われているが、無意図的な行動に焦点を当てた研究はごく少数である。またヒト以外の動物を対象とし、行動と脳の両面から検討する試みは現在でも未開拓である。無意図的な脳内過程を理解することは、社会を構築するために必要な意識的な認知過程を理解する上で必要な課題である。そのような課題に挑戦することが本研究課題の目標である。そのために複数ニホンザルの「無意図的な同調行動」に焦点を当て研究を進める。

Abstract

Interests on brain functions underlying social interactions are now broadly expanded in neuroscience and cognitive sciences. Some studies in perception and action in interpersonal coordination revealed that social interactions facilitated behavioral synchronization. While the synchronization is demonstrated through intentional attempts and unintentional changes in action, most studies only focused on intentional actions, and unintentional actions and those latent processes remain unclear. Furthermore, little is known about the behavioral synchronization in social animals, which is vital for understanding the developmental origins of the behavior. In this study, I examined an unintentional synchronization in behavior occurred in a social context in monkeys.

1. 研究開始当初の背景

(1) 学術的背景

社会において適応的な行動をとるためには、大変多くの情報処理が必要である。これらを意識的に行うには環境はあまりにも速く変化しすぎている。むしろ意識にのぼらない脳機能によってこれらが処理されていると推測することは想像に難くない。たとえば二人の向かい合ったヒトがその場で足踏みを要求される場合、両者の足踏みの歩調が「無意図的かつ無自覚に」同期する。またこの場合には、足踏みを意図的に「合わせないように」教示した場合でも、歩調が同期する¹。この例では、実験課題中の自発的な行動の同期には何ら適応的意味は存在しないと考えられる。しかし昆虫、魚類や鳥類の集団的な移動行動、蛍の集団的な発光などでは同期的な行動が散見され、ヒト以外の生物においては適応的な意味が存在する²。すなわちヒトにおける他者の行動理解や模倣の基盤となるもっとも原初的な処理系が系統発生的に維持されており、それがたとえばヒトの「無」適応的な行動過程に反映されているのではないかと推測することができる。これまで意識的な模倣行動や同調行動を扱った研究は多数行われているが³、無意識的な行動に焦点を当てた研究は上記の例を含めてもごく少数である。またヒト以外の動物を対象とし、行動(比較認知心理学)と脳(脳神経科学)の両面から検討する試みはこれまでほとんど見られず、現在でも未開拓の領域である。

(2) 本研究のねらい

近年筆者らは、ニホンザルの無意識的同期現象の研究に着手し、ヒト以外の霊長類でも無意識的な同期現象があることを明らかにした⁴。さらにそれは互いが行動を変化させることで成立し、さらに

視・聴覚情報のどちらも同期に必要なことが示された。そこで本研究では、このような無意識的な同期現象の脳内過程を明らかにすることを目的とした。

2. 研究の目的

本研究は以下の3つの課題を推進することにより達成される。すなわち「同期現象の神経科学的検討」、「ECoG 電極埋設位置の3次元位置推定」、実験環境をより高める技術「サル用代替現実呈示装置」の開発である。

(1) 同期現象の神経科学的検討

筆者らによる先行研究によって、行動実験パラダイムが確立されているので、本研究ではその実験課題遂行中の脳信号を 128-ch 皮質脳波計測法および多次元記録システム⁵によって記録する。これによって条件に伴って変化する多領域の脳活動を検討することができ、無意図的な同期が生じる際の空間的・時間的な脳の統合過程を明らかにする。

(2) ECoG 電極埋設位置の3次元位置推定

われわれのチームにおける ECoG 電極の埋設手技は、硬膜の一部を切開しその開口部から電極シートを脳と硬膜の間に滑り込ませるように行う。したがって術後に X 線などを使って電極が埋設された場所を推定する必要がある。この推定をより高精度にするため、数学モデルを用いて2つの X 線画像から電極位置を推定する技術を開発する。さらにこの技術を使うことで、これまで2次元の位置推定であったものを3次元位置で推定することが可能になる。

(3) サル用代替現実呈示装置 (mSR) の構築

これまでの動物の社会脳の研究では、実際の社会場面における脳活動の記録を行うか、あるいはあらかじめ用意した社会場面のビデオを提示して、その際の脳活動を記録するか、大きく分けて2つの方法があった。一方で実際の社会場面では、それぞれの社会イベントを統制して複数回生じさせることは不可能であるし、ビデオ提示では実験個体が本当にそれを現実として認識しているのかは明らかではない。そこでサル用の代替現実提示装置を構築し、実験個体に現実感のある社会イベントを提示する。

3. 研究の方法と成果

(1) 研究方法

同期現象の神経科学的検討 先行研究と同様に時空間的要因を検討するために、パートナーにビデオクリップを利用した条件を設定した。この Virtual Monkey (VM) 条件では、実際のサル(RM)がボタン押し課題を遂行しているビデオクリップを実際のサルの代りにパートナーとして使用した。またビデオの再生速度を任意に変化する条件を加えることによって、向い合った RM の行動の変化を解析する実験も行った。実験では、実験開始直後から VM が一定のスピードでボタン押しを開始する。RM は任意の時間でボタン押しを開始するが、RM が 15 回ボタンを押した時に、VM のボタン押しのスピードを増加させた。すなわち VM のスピードは始め遅く、次に速くなる。この課題を遂行中のサル脳の活動を記録した。なおサルにあらかじめ 128-ch ECoG 電極埋設手術を施し、電極は大脳片半球をほぼ覆い、また一部の電極は内壁面にも設置された。

ECoG 電極埋設位置の3次元位置推定 実際のサル脳の半球から鋳型を作り、その鋳型に樹脂

を流し込むことでモデルとなる脳を製作した。その後、実際に記録に使用している電極と同じ 128-ch ECoG 電極を脳モデル上に設置・固定した。この電極付脳モデルをまず CT によってスキャンし、電極位置の3次元位置を計測した。計測された位置は、後の推定の際の誤差を測定するための比較対象とした。同じモデルをデジタル X 線システムによって、複数の角度(0~90 度)から撮像した。同様に各角度における画像更正のため、金属小片 36 個を系統的に埋設したアクリル製キャリブレーションボックスを同じ撮影環境で X 線撮像した。Photogeometry 法⁶によって、2つのそれぞれ異なる角度から得られた脳モデルとキャリブレーションボックスの X 線画像から電極の3次元位置を推定し、その推定誤差を検討した。

サル用代替現実呈示装置(mSR)の構築 mSR はヘッドマウントディスプレイ(HMD)とそれに取り付けられたビデオカメラ、さらにこれらの機器を制御するためのコンピュータによって構成された。mSR には2つのモードがあり、それぞれを live-scene (LS)モード、recorded-scene (RS)モードとよぶ。live-scene モードでは、HMD 上のビデオカメラで取り込まれたライブ映像が HMD 内部の画面に表示される。他方、recorded-scene モードでは、あらかじめ同ビデオカメラで撮影した映像が画面に表示される。サルの頭部は緩やかに固定されているため、live-scene モードと recorded-scene モードでは、ほとんど同じ視野の映像が表示される。mSR の評価テストでは、recorded-scene モードにおいても live-scene モードと同様なサルの行動が観察されることを確認した。

(2) 成果

同期現象の神経科学的検討 脳活動計測では、vMonkey の速度変化を1回のみ、さらに速度増加条件のみについて検討した。128ch の ECoG 信号をチャンネルごとに時間-周波数解析を行った。現在データ解析途中であり、以下に preliminary なデータを報告する。本実験の課題では、さまざまな入力情報、運動情報が脳活動に関与する。たとえば運動野は運動の有無やその速度によって活動が変化し、また感覚領域では入力される視覚・聴覚情報の変化に敏感に反応する。したがって、検討項目以外の状況(行動)がすべてそろった条件での脳活動を比較対象とし、vMonkey の速度変化のみに伴う脳信号の変化を比較した。

解析の結果、複数の脳領域(前頭前野、運動野、視覚野、上側頭溝周辺、上側頭回吻側部)で有意な変化が認められた。またそのような変化は、vMonkey の速度変化から 1~2秒後に 70~80Hz の帯域で一過性の変化として生じていた。

ECoG 電極埋設位置の3次元位置推定 本研究では、他の研究者にも容易に2次元画像から3次元推定を可能にするために、MATLAB の toolbox として PLoT パッケージを開発した。このパッケージを用いて電極位置の推定と CT データとの誤差を評価したところ、128 個の電極中 95%以上の電極(122 個)を ± 1 mm の誤差で推定できることが示された。電極のサイズが直径 2mm で、電極間間隔も 2mm であることを考えると、実用に十分な精度であるといえる。さらに電極位置における誤差のバラツキ検討したところ、各軸(x, y, and z)での電極距離と誤差の相関はほとんど見られなかった。また実際に使用する際の実用性限界テストも行った。すなわち脳モデルに対する撮像角度の範囲とキャリブレーションポイントの数を検討した。その結果、すべての電極が重なりなく撮像された 65° から 85° (間隔5°)のデータでは撮像角度に関しては最小の 5° と最大の 20° に誤差の差は認められなかった。またキャリブレーションポイントについても、キャリブレーションポイントを減らしても(理論的には各軸に直行した表面が作ることのできる点数あれば)、推定誤差が一定に保てるのかを検討し

た。その結果、キャリブレーションポイントが8点であっても、36 点の時とくらべ誤差に差は認められなかった。

サル用代替現実呈示装置(mSR)の構築 mSR の評価テストでは、RS モードにおいても LS モードと同様なサルの行動が観察されることを検証した。mSR 装着直後は、LS モードにおいても mSR への適応が困難であった。ヒトではこのような環境にすぐに慣れることが示されているが、サルでこのような結果は予測されていなかった。そこでどのような要因により、馴化するのかをテストするためにさまざまな刺激を提示しながら訓練を行った。その結果、HMD 上にサル自身の手が映るようにサルの手をカメラ前面におき、その手にエサを触れさせ自身でそのエサを取るように仕向けることで、数分のうちに mSR 環境に順応した。すなわち視覚と運動における自身の表象形成を促すことにより、すぐに mSR への適応が観察された。なお別のサルでも、同様にはじめの段階では馴化は見られなかったが、この表象形成訓練を行うことで mSR 環境に馴化した。またその後の RS モードにおいても、サルが mSR による仮想空間を実際の現実空間と同様に経験していることが示された。すなわち実際にはサルの前方にエサは呈示されていないにもかかわらず、そのようなビデオ刺激を HMD 上に再生することで、あたかも前方にエサがあるかのようにエサをとるような動作を生じた。本研究により、比較認知研究における新しい方法論として mSR を利用できることが確認された。今後はこのシステムを同期現象研究に用いることで、より統制された実験環境での脳活動計測を目指す。

まとめ 一連の研究によって、サルにおける無意識的同期現象について神経科学的な検討を詳細に行うことが可能になった。今後は、神経活動データを蓄積しつつ、その他の2つの技術を積極的に活用して検討を進める。さらにその検討の際には、同期現象を生起させる責任脳部位の同定だけでなく、所属研究室で開発された脳活動のネットワーク解析法を利用することで、機能的ネットワークの同定や、その時間的遷移についても検討を進める予定である。

参考文献

- [1] Honma, M., Kumada, T., Osada, Y., & Nagai, M. (2008). The synchronized stepping –Automatic imitation behavior between persons–. *The Japanese Journal of Psychonomic Science*, 27, 127–128.
- [2] Strogatz, S. H., & Stewart, I. (1993). Coupled oscillators and biological synchronization. *Sci Am*, 269(6), 102–109.
- [3] Sebanz, N., Bekkering, H., & Knoblich, G. (2006). Joint action: bodies and minds moving together. *Trends Cogn Sci*, 10(2), 70–76.
- [4] Nagasaka, Y., Chao, Z. C., Hasegawa, N., Notoya, T., & Fujii, N. (2013). Spontaneous synchronization of arm motion between Japanese macaques. *Sci Rep*, 3, 1151.
- [5] Nagasaka, Y., Shimoda, K., & Fujii, N. (2011). Multidimensional Recording (MDR) and Data Sharing: An Ecological Open Research and Educational Platform for Neuroscience. *PLoS ONE*, 6(7), e22561.
- [6] Xu, G., & Zhang, Z. (1996). *Epipolar Geometry in Stereo, Motion and Object Recognition: A Unified Approach (Computational Imaging and Vision)* (1996 ed.). Springer.

リハビリテーションの治療者-患者間コミュニケーションの効果とその神経機構の解明

研究代表：社会医療法人 大道会 森之宮病院 神経リハビリテーション研究部
服部憲明

概要

脳卒中後のリハビリテーションでは、医療者と患者のコミュニケーションや適切なパフォーマンスのフィードバックが重要である。適切なフィードバックが患者の歩行機能回復を促進させるという報告もあるが、その背景となる神経科学的基盤、患者の心理学的特性の重要性については十分に検討されていない。我々は、回復期リハビリテーション病棟入院中の患者を対象に、心理学的特性を評価し、うつややる気、社会的スキルと入院日数、機能回復に関連があることを見出した。また、適切な器用さについてのフィードバック情報が、脳卒中患者の手指の運動課題の成績を向上させることを fMRI 同時測定の研究で明らかにした。さらに、これまでに、臨床で簡便に用いることができる歩行解析装置がなかったため、玉川大学の大森教授と共同で Microsoft 社の Kinect を用いた歩行解析システムを開発した。

Abstract

Communication between medical staff and patients and appropriate feedback on the patient's performance are important in the post-stroke rehabilitation. There is a recent report showing that appropriate feedback on gait promoted recovery of gait function in patients with stroke, however the neuroscientific mechanism behind the effect or the importance of the psychological characters of the patients have not been studied well. In this project, we found the significant relationship between the psychological characters including depression, apathy and social skill and the clinical features such as the length of the hospital stay and the functional recovery in the patients with stroke admitted for the post-acute (Kaifukuki) rehabilitation. In addition, we showed that appropriate feedback on the skill facilitated the improvement of paretic hand function in the study designed to obtaining the quantitative assessment of motor performance and the functional MRI data simultaneously. Furthermore, since there is no gait analysis system that can be used clinically with convenience so far, we have developed new gait analysis system by using Microsoft Kinect in collaboration with Professor Takashi Omori at Tamagawa University.

1. 研究開始当初の背景

(1) 患者の心理学的特性と臨床データの関連の検討

コミュニケーションのリハビリテーションにおける効用を検討する際に、患者の心理・性格特性を把握することは非常に重要であると考えられる。従来、心理・教育などの分野では、多くの心理・性格を評価する指標が提案されているが、脳卒中患者を想定して開発されたものは殆ど無く、これらの特性がリハビリテーションや機能回復に与える影響については十分な検討がおこなわれていない。

(2) 手指屈伸練習装置を用いた fMRI 研究

従来の脳卒中のリハビリテーションでは、技術的な側面に重点が置かれ、コミュニケーションやフィードバックをいかにうまく活用するかについては、十分に検討されてこなかった。しかし、近年、脳卒中患者を対象とした国際的多施設ランダム化比較試験で、毎日の歩行リハビリテーションに、歩行に要した時間をフィードバックして励ますことを加えることで、歩行機能の回復が促進されるという報告が出た[1]。しかし、効果促進をもたらした具体的なメカニズムについては、よくわかっていない。

(3) Kinect を用いた自動歩行解析システムの開発

歩行は日常生活の基本となる活動であり、歩行機能の回復は脳卒中のリハビリテーションの重要なテーマである。しかし、その評価や解析は、研究室で高価で大掛かりな 3 次元解析装置を用いるか、対照的に、歩行速度や歩幅の計測などの単純なものが主に用いられてきたように、歩行に関して、リハビリテーションの臨床で役立つような運動学的な情報を簡便に収集して、患者にフィードバックできるようなシステムは存在しなかった。

2. 研究の目的

(1) 患者の心理学的特性と臨床データの関連の検討

脳卒中のリハビリテーションや機能回復に関連する心理・性格特性を検討し、患者にも使用できるかという視点から評価バッテリーを選択し、実際に回復期リハビリテーション病棟に入院中の患者を対象として、データを収集し、心理・性格特性と機能回復の関連を明らかにする。

(2) 手指屈伸練習装置を用いた fMRI 研究

麻痺手による運動の器用さについてのフィードバック情報が、脳卒中患者の運動機能の向上に与える影響を逐次的に細かく検討し、更に、その神経科学的な基盤について、機能的磁気共鳴画像 (fMRI) を用いて明らかにする。

(3) Kinect を用いた自動歩行解析システムの開発

Microsoft 社の Kinect は、体表マーカーや複数のカメラを必要とせず、深部情報や関節位置情報の取得が可能であり、これを用いた低コストで簡便な 3 次元歩行解析システムを玉川大学大森隆司教授らと開発し、健常者で基本的な運動学的パラメータの計測と、利き足、非利き足でのそれらの違いを検討することでその有用性を検討する。

3. 研究の方法と成果

(1) 患者の心理学的特性と臨床データの関連の検討

方法: 行動特性については、自己効力感の一般性セルフ・エフィカシー尺度 (GSES)、不安については STAI 特性不安検査、うつについては、BDI-II ベック抑うつ質問票、意欲にはやる気スコア、

コミュニケーション能力には対人関係の社会的スキル評価尺度 (KISS-18) を採用した。脳卒中後の機能評価には、日常生活動作の代表的な評価法である Functional Independence Measure (FIM) を採用し、FIM の入退院時の変化量 (FIM gain)、1 日あたりの FIM gain (FIM efficacy) を求めた。対象は、2012 年 8 月 7 日～2014 年 2 月 27 日に当院回復期リハビリテーション病棟に入院した初発の脳卒中患者のうち、失語症、注意障害などの高次脳機能障害で心理アンケートが施行できない例、重度障害者 (気管切開、感染症) などを除外し、アンケートを施行し得た 114 名のうち、一般的な傾向をみるために、入院期間に関して、短い例、長い例、それぞれ 10% を除いた 92 名を解析対象とした。

結果および考察: 入院期間との関連では、やる気スコアが低い、すなわち、やる気がある人、BDI が低く、うつ傾向が低い人、また、Kiss が高く、社会的スキルが高い患者ほど入院期間が短い傾向にあった。機能回復との関連では、FIM efficacy と BDI に負の相関、FIM gain と Kiss に正の相関を認めた。脳卒中後にしばしば問題となるうつ症状に関して、掘り下げた解析を行ったところ、BDI の問 9: 自殺念慮について、評価 0-1 と 2-3 (自殺したいと思う) の 2 群で、FIM gain / efficacy に有意な差を認めなかった。その他の BDI の各下位項目と FIM gain / efficacy にも相関を認めなかった。以上のように、性格・心理特性は FIM で反映される障害の重症度そのものとは相関はなかったが、機能改善や入院期間とは相関がみられ、回復期リハビリテーション開始時より、これらの特性に配慮して、リハビリテーションや看護、ゴール設定、退院計画立案を進めていく必要があると考えられた。

これらの心理特性と機能回復の因果関係や病巣部位の影響、心理特性がどのように具体的にリハビリテーションという運動学習経験に関わってくるかなどについて、今後、臨床データを多面的に収集して評価していく必要がある。

(2) 手指屈伸練習装置を用いた fMRI 研究

対象は、回復期リハビリテーション病棟へ入院中の初回脳卒中患者 20 名。片麻痺を有するが、麻痺手指の集団屈伸運動が可能で、注意障害や認知症を合併していない患者を対象とした。

運動課題試行中に fMRI を撮像することが、今回の研究の大きなテーマであった。課題に伴う頭部などの動きをいかに抑えるかが、最大の技術的な課題であった。我々は、様々な課題条件を検討し、最終的には、上肢の動きを拘束しない小型の計測装置を作成し、運動課題は、大きさが連続的に変化するターゲットの円に、中心点を同じ位置に揃えた、麻痺手指の屈伸で自在に半径を変化させることのできる自分の円の大きさを合わせる課題とした。1 セッションには 20 秒間の軌跡追従課題が 20 秒の休息を挟んで 2 回含まれ、被験者は、セッション終了直後に、どれくらいうまく出来たかをフィードバックする群 (FB+群) 10 名とフィードバックしない群 (FB-群) 10 名に分けられた。fMRI 施行日の昼間に事前練習を行い、手指の巧緻性を評価し、fMRI における初回の課題の成績スコアが凡そ 50 になるように難易度を調整した (全く軌跡に追従できないとスコアは 0 となり、完全に追従できていればスコアは 100 となる)。同日の夕方に fMRI を撮像しながら、運動課題を 8 セッション施行した。それぞれの被験者の第 1 セッションのスコアを 1 とし、以後のセッションの成績は第 1 セッションのスコアとの比を求めた。そして、セッション毎に FB+群と FB-群の成績について、student の t 検定を用いて検討した (有意水準 $p < 0.05$)。

結果: FB+群は FB-群と比較し、第 3, 4, 6, 8 セッションで有意にスコアが向上した。また、翌日の

再評価で、両群とも、前日の最終施行とほぼ同じ成績であり、学習効果が持続していることが確認された。fMRI については、一部の症例を除き、動きによるアーチファクトが問題となることはなく、データを解析することができた。課題施行に伴う fMRI の賦活部位は、前頭葉、頭頂葉、後頭葉に認められたが、視覚野、運動野を除くと、FB+群、FB-群とも、共通して賦活する部位は見られず、個人差が大きかった。また、成績と相関する部位についても、運動前野、後部頭頂葉に見られた例もあれば、楔前部、あるいは、前部帯状回に見られた例もあるなど、個人差が大きく、一定した傾向は見られなかった。

考察:課題施行直後というタイミングで数値化されたパフォーマンスの結果をフィードバックすることが、脳卒中の麻痺手のリハビリテーションにも有効であることが示された。また、翌日にもその効果が残存することが明らかになった。一方、fMRI の結果が被検者毎に大きく異なっていたことから、本研究のような比較的単純な運動課題で、各被験者が一様に成績向上を認めたにも関わらず、課題に対する脳内処理部位については個人差が大きく、学習過程は多様であることが示唆された。これは、今回 fMRI を用いることで初めて明らかになった貴重な知見であった。今後、多様な賦活パターンが類型化できないか、ネットワークレベルでの共通の機序の有無などについて、更に解析を進めていきたい。

(3) Kinect を用いた自動歩行解析システムの開発

Kinect をセンサーとし、Yujin Robot 社の Kobuki を駆動部として、被験者の前方を 2.5m の距離を保って自走するようプログラミングした測定ロボットを作成した。対象は 27 名の健常者(平均年齢 30.7 歳, 利き足:右足 24 名, 左足 2 名, 両足 1 名)。被験者は約 20m の歩行を複数回行い、振動などによるノイズの混入の少ない 20 歩行周期分の関節位置情報のデータを用いて運動学的解析を行った。歩行周期は左足関節のスピードが最小となるタイミングを接地のタイミングとして切り出した。なお、測定ロボットの最大速度 (0.7m/sec) にスピードを合わせてゆっくり歩行するよう指示した。

結果及び考察:27 人の歩行を解析した結果、股関節や膝関節の 1 歩行周期における屈曲伸展の角度変化のパターンは、遅い歩行を運動学的に解析した先行研究と同様に、快適速度での歩行時のパターンと類似しており、また各個人内のデータのばらつきも少なく、安定して測定できていると考えられた。また、股関節の最大屈曲角は利き足、非利き足で有意な差を認め、本システムでは、利き足・非利き足の運動学的な違いをも捉えることができた。現状の技術的な限界として、Kinect の仕様上、サンプリングレートは 30Hz であった。また、四肢末梢の測定は不正確で、踵やつま先の接地タイミングなどは正確に求めることができなかった。今後は、台車の仕様変更(計測距離の延長、カーブでの計測、スピードアップなど)、Kinect センサーのバージョンアップによる測定精度の向上などのハードウェアの改良を計画している。

参考文献

[1] International randomized clinical trial, stroke inpatient rehabilitation with reinforcement of walking speed (SIRROWS), improves outcomes. Neurorehabil Neural Repair. 2010;24:235.