

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 3 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22300124

研究課題名(和文) オブジェクト操作と動作のカテゴリー化の脳内表現

研究課題名(英文) neural representation of action categories and object manipulations

研究代表者

虫明 元 (MUSHIAKE, Hajime)

東北大学・医学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80219849

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円、(間接経費) 4,080,000円

研究成果の概要(和文)：研究目標は動作のカテゴリーや認知に必要なカテゴリー表現が、関連領域でどのように表現されるかを解明することである。実験には、開発中のマルチ電極記録システムをもちいて神経回路の動態を明らかにする。二ホンザルに両手順序操作課題を訓練して、多数の順序動作を記憶も基づいて行う課題学習させた。補足運動野、前補足運動野に加えて運動前野、一次運動野から記録を行った。両手順序の情報は、効果器の順序と運動種の順序でグループ符号化されていた。これらのグループ符号化は、個別に順序を符号化するより効率的であることを理論的にも確認した。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study is how categorical information of multiple actions or operations in higher-ordered motor areas by recoding neural activities from behaving monkeys. We examined neuronal activity in the supplementary and pre-supplementary motor areas of monkeys to investigate how the nervous system deals with the coding 16 motor sequences resulting from multiple actions involving bilateral use of the arms. We first found in both areas that this behavioral demand resulted in attribute-based representation of individual motor acts, reflecting functional (action) or anatomical (right/left arm) attributes. Actions were frequently represented according to a body-axis centered reference frame (supination or pronation) irrespective of the arm to be used. We propose that the two-dimensional attribute-based sequence representation provides a robust and efficient means of processing multiple behavioral sequences.

研究分野：神経科学

科研費の分科・細目：神経・筋肉生理学

キーワード：運動野 両手動作 細胞活動

## 1. 研究開始当初の背景

動作のカテゴリー化に関しては、申請者と研究室の嶋らとの共著論文で Nature(2007)で明らかにしたように、一次運動野、補足運動野、前頭前野での階層的な表現が明らかになった。一方では、Friedman と Miller たちは、Science(2001)で知覚の上でネコとイヌの形態認知のカテゴリーが前頭前野の細胞レベルで表現されていることを報告している。しかし、この研究では、動作や形態のカテゴリー情報がさらに認知的な目標達成に用いられた課題ではなかった。一方で、代表者は迷路課題を用いた研究から、前頭前野における目標表現が動的に変化すること、将来の操作が前もって予測的に細胞活動として表現されていることを見出した (Mushiake et al Neuron 2006)。また数の認知には、基本的に他の属性が異なっても数としての共通性を認識することで、カテゴリーとしては極めて抽象性の高い情報表現である。動作数としては、沢村と助教の嶋らが報告した Nature 2002 に報告した。また視覚オブジェクト数としては、Nieder( Science. 2002, 2006)らの結果が、それぞれ前頭前野、頭頂連合野、に数表現に関わる神経機構があることが判明している。これらの背景から、本研究提案では、多数の両手順序動作が必要となる課題をサルに訓練して、その順序動作のカテゴリー符号化の神経表現を解明する。運動前野、補足運動野を含めて、情報表現の階層性と動的な側面を明らかにする。

## 2. 研究の目的

本研究計画では、認知的な目標達成のために行う操作とそのための動作に関して、目標、操作と動作の階層的なカテゴリー情報が、前頭前野、高次運動野、頭頂連合野において、どのように表現されまた変化する

かを、細胞活動、局所回路のレベルの神経機構として解明する。そのために、両手順序操作課題をサルに訓練し、課題遂行中に脳から多数同時細胞活動記録を行い、大脳皮質における細胞レベルの情報表現と、多数の細胞活動で表現されるポピュレーションレベルの表現を定量的に解明する。

## 3. 研究の方法

日本サルに両手順序操作課題を訓練して操作カテゴリーの中枢メカニズムを明らかにする。内側、高次運動野(背側運動前野、腹側運動前野、前補足運動野)、頭頂連合野から記録する。多数の細胞の同時記録により、皮質局所回路内での動作カテゴリー細胞、操作関連細胞の機能的連関を明らかにする。また複数の領域から記録することで、領域間での機能的違いと情報処理の流れを解明する。

## 4. 研究成果

補足運動野、前補足運動野に加えて運動前野、一次運動野から、多点記録、LFPの記録を行った。補足運動野、前補足運動野では細胞活動に関しては、両手順序の情報、効果器の順序と運動種の順序でグループ符号化されていた。順序動作を符号化に関して二つのタイプの符号化細胞が見出された。一つは個別符号化と呼ばれる戦略で、全ての順序動作をそれぞれ記憶し16通りから1通りを選ぶ。もう一つはグループ符号化と呼ばれる戦略で、右手か左手かを選ぶ左右の手の順序を記憶するグループと、回内か回外か動作内容の順序を記憶するグループに細胞を分けて組み合わせ一つの運動を決定する。結果としてはどちらの符号化についても行う細胞は存在した。しかしその比率には圧倒的な差が存在し、多くの細胞はグループ符号化を行っていたことが分かった。個別符号化の細胞は以前に研究した少数の順序動作では顕著見出されたが、順序の長さ種類とともに指数関

数的に増える順序動作の組み合わせに対して限界が生じることが指摘されていた。これに対してグループ符号化では、符号化に関してロバストであった。またグループ符号化は一つの順序が複数のカテゴリーに分類して構築されていた。新たな順序動作を行う場合も、あらかじめ存在した細胞群を使い回し、増大する動作の組み合わせに対応していることが示唆された。このようにグループ符号化は個別符号化の抱える「組み合わせ数の爆発」と呼ばれる欠点を軽減するための利点が数多く存在することが、理論的なモデルを構築することで確認することができた。

## 5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 11 件)

1 虫明 元 岩田潤一(2014) 認知的運動制御システム 総合リハビリテーション 43:7-12 査読無し

<http://medicalfinder.jp/ejournal/top-03869822-42-1.html?ss=%E8%99%AB%E6%98%8E>

2 Sumito Okuyama, Jun-ichi Iwata, Jun Tanji, and Hajime Mushiake (2013).Goal-oriented, flexible numerical operations by monkeys Animal Cognition, 16(3):509-18 doi: 10.1007/s10071-012-0592-9. 査読有り

3 Junichi Iwata, Keisetsu Shima, Jun Tanji, and Hajime Mushiake (2013).Neurons in the cingulate motor area signal context-based and outcome-based selection of volitional action. Experimental Brain Res. 229:407-17 doi: 10.1007/s00221-013-3442-3. Epub 2013 Mar 2.査読有り

4 Yoshiya Matsuzaka, Tetsuya Akiyama, Hajime Mushiake (2013).Participation of neurons in multiple sectors of medial frontal cortex undergoes dynamic alterations depending on the demand for volitional control of action. Experimental Brain Res. 229:395-405doi: 10.1007/s00221-013-3454-z.査読有り

5 Nakajima, T. ,Hosaka, R. Tsuda, I.,

Tanji, J. and Mushiake, H. (2013)Two-dimensional representation of action and arm sequences in the pre-supplementary and supplementary motor areas J Neurosci. 33:15533-15544. doi: 10.1523/JNEUROSCI.0855-13.2013. 査読有り

6 Kazuhiro Sakamoto, Yuichi Katori, Naohiro Saito Shun Yoshida, Kazuyuki Aihara and Hajime Mushiake(2013) Increased firing irregularity as an emergent property of neural-state transition in monkey prefrontal cortex PlosOne 8(12):e80906. doi: 10.1371/journal.pone.0080906. 査読有り

7 Shin-ichiro Osawa, Masaki Iwasaki, Ryosuke Hosaka, Yoshiya Matsuzaka, Hiroshi Tomita, Toru Ishizuka, Eriko Sugano,Eiichi Okumura, Hiromu Yawo, Nobukazu Nakasato, Teiji Tominaga, Hajime Mushiake(2013) Optogenetically induced Seizure and the Longitudinal Hippocampal Network. PLoS One 10;8(4):e60928. doi: 10.1371/journal.pone.0060928. 査読有り

8 坂本一寛、虫明元(2013):「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, pp.37-41,査読無し  
<https://www.jstage.jst.go.jp/browse/jnns-char/ja/>

9 Matsuzaka Y, Akiyama T, Tanji J, Mushiake H.Neuronal activity in the primate dorsomedial prefrontal cortex contributes to strategic selection of response tactics. Proc Natl Acad Sci U S A. 2012 Feb 27 109(12):4633-8. doi: 10.1073/pnas.1119971109. 7 査読有り

10 中島 敏, 宮崎 淳, 嶋 啓節, 虫明元(2011)「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」 英文タイトル: Neuronal Mechanism Controlling a Dual-Task Consisting of a Sequential Motor Task and an Interrupting Task 日本神経回路学会誌 Vol. 18, No. 3 pp.129-134 総説査読無し  
<https://www.jstage.jst.go.jp/browse/jnns-char/ja/>

11 Yuichi Katori, Kazuhiro Sakamoto, Naohiro Saito, Jun Tanji, Hajime Mushiake, Kazuyuki Aihara Representational Switching by Dynamical Reorganization of Attractor Structure in a Network Model of the

Prefrontal Cortex PLoS  
Computational Biology 2011 7(11)  
1-17 doi: 10.1371/journal.pcbi.1002266.  
査読有り

〔学会発表〕(計 27 件)

1 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, July 18, 2013, Okazaki, Japan

2 Haruka Arisawa, Ryosuke Hosaka, Keisetsu Shima, Toshi Nakajima and Hajime Mushiake Cue-Dependent Modulation of Beta-Synchrony in Primates' Medial Motor Areas The 4th International Conference on Cognitive Neurodynamics 23-27 June 2013 6/25 Sigtuna, Sweden

3 Ryosuke Hosaka, Toshi Nakajima, Kazuyuki Aihara, Yoko Yamaguchi, and Hajime Mushiake Laterality of Gamma-Oscillations in Monkey Medial Motor Cortex The 4th International Conference on Cognitive Neurodynamics 23-27 June 2013 6/25 Sigtuna, Sweden

4 Kazuhiro Sakamoto, Naohiro Saito, Shun Yoshida and Hajime Mushiake Excitation-inhibition balance of prefrontal neurons during the execution of a path-planning task The 4th International Conference on Cognitive Neurodynamics 23-27 June 2013 6/25 Sigtuna, Sweden

5 Norihiko Kawaguchi, Kazuhiro Sakamoto, Naohiro Saito, Yoshito Furusawa, Jun Tanji, Masashi Aoki, Hajime Mushiake Neuro2013 6/20-23 Kyoto 補足眼野で生成される予測誤差は探索戸知識利用の切り替えを引き起こす 日本神経科学学会大会(京都、国立京都国際会館) 2013年6月22日

6 Toshi Nakajima, Ryosuke Hosaka, Jun Tanji and Hajime Mushiake "Modular representation of multiple motor sequences based on action and effector use in the medial motor areas" 米国神経科学学会 (Neuroscience 2012, New Orleans, USA) ポスター発表 2012年10月14日 (187.19/PP19)

7 Ryosuke Hosaka, Toshi Nakajima, Kazuyuki Aihara, Yoko Yamaguchi and Hajime Mushiake "Modulation of LFP beta oscillation while updating motor plan in primate medial motor areas" 米国神経科

学学会 (Neuroscience 2012, New Orleans, USA) ポスター発表 2012年10月14日 (382.5/YY1)

8 松坂 義哉 齋藤 雄太郎 虫明 元 エンコード・実行時で異なるニューロン群が反応タクティクスとアクションをコードする Separate population of prefrontal neurons represent forthcoming tactics and action at the time of encoding and execution 日本神経科学会 2012/09/18 名古屋

9 坂本 一寛 齋藤 尚宏 吉田 隼 香取 勇一 丹治 順 合原 一幸 虫明 元 経路探索課題中の前頭前野興奮性 - 抑制性バランスの時間発展 Time-development of excitation-inhibition balance in the prefrontal cortex during a path-planning task 日本神経科学会 2012/09/18 11:00 - 12:00 名古屋

10 川口 典彦 坂本 一寛 古沢 義人 丹治 順 青木 正志 虫明 元 視覚探索課題中の行動評価における補足眼野の役割 The role of the supplementary eye field in evaluating outcomes during an oculomotor search task 2012/09/18 11:00 日本神経科学会 名古屋

11 Sakamoto K, Kawaguchi N, Mushiake H. Is advance planning of sequential movements reflected in the behavior of monkeys? The 22th Annual Conference of the Japanese Neural Network Society P3-19 (2012/9/13) 日本神経回路学会 名古屋

12 Katori Y, Sakamoto K, Mushiake H. Aihara K. Dynamical reorganization of attractor structure in neural network model with dynamic synapses. The 22th Annual Conference of the Japanese Neural Network Society P3-11 (2012/9/12) 日本神経回路学会 名古屋

13 虫明 元 動的システム脳科学の観点からー脳と心を結ぶ理論ー 文科省数理連携ワークショップ「数理連携10の根本問題の発掘」 2011年12月26日～29日 理化学研究所大河内記念ホール

14 Yoshiya Matsuzaka, Yuutaro Saito, Jun Tanji, Hajime Mushiake Roles of the medial frontal cortices in the selection, storage and retrieval of response tactics in a voluntary arm-reaching task 第34回神経科学会横浜 2011.9.17 Yokohama JAPAN

15 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 第 34 回神経科学会横浜 2011.9.17 Yokohama JAPAN

16 Sumito Okuyama, jun-ichi Iwata, Toshinobu Kuki, Jun Tanji, Hajime Mushiake  
Dynamic neural representation in the dorsal premotor cortex during numerical operations 第 34 回神経科学会横浜 2011.9.17 Yokohama JAPAN

17 Hajime Mushiake A new approach to the study of dynamics of neuronal circuits - Optically induced perturbation method-第 34 回神経科学会横浜 2011.9.16 Yokohama JAPAN

18 Masaya Toyoshima, Yusuke Shibata, Kazuhiro Sakamoto, Naohiro Saito, Jun Tanji, Hajime Mushiake Neuronal activity in the dorsal premotor cortex during a path-planning task 第 34 回神経科学会横浜 2011.9.16 Yokohama JAPAN

19 坂本一寛 川口 典彦 虫明 元 動作順序を事前に決めているか：形操作課題のサル行動解析 2012 年度 包括脳ネットワーク夏のワークショップ7月26日 名古屋

20 保坂亮介 中島敏 虫明 元 reciprocal activation of beta and gamma oscillations in primate medial motor areas 2012 年度 包括脳ネットワーク夏のワークショップ7月26日 名古屋

21 Hajime Mushiake, Keisetsu Shima, Kazuhiro Sakamoto, Yuichi Katori and Kazuyuki Aihara “Dynamic neuronal representation in the prefrontal cortex” The 3rd International Conference on Cognitive Neurodynamics ICCN2011 Hokaido,Japan 2011.6.9-13

22 Norihiko Kawaguchi, Kazuhiro Sakamoto, Yoshito Furusawa, Naohiro Saito, Jun Tanji and Hajime Mushiake “Dynamic information processing in the supplementary eye field of monkeys during hypothesis testing behavior” The 3rd International Conference on Cognitive Neurodynamics ICCN2011 Hokaido,Japan 2011.6.9-13

23 Kazuhiro Sakamoto, Katsutoshi Yamamoto, Naohiro Saito, Jun Tanji and Hajime Mushiake “Plan to execution through neuronal synchrony in the prefrontal cortex” The 3rd International Conference on Cognitive Neurodynamics ICCN2011

Hokaido,Japan 2011.6.9-13

24 Atsushi Miyazaki, Toshi Nakajima, Keisetsu Shima and 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 ICCN2011 Hokaido,Japan 2011.6.9-13

25 Hajime Mushiake, Yoshiya Matsuzaka, Toshi Nakajima and Jun Tanji “Recent progress in studies of the functions of medial frontal cortex.” Tohoku International Symposium on Multidisciplinary Neuroscience 2011.1.15 Sendai

26 Yoshiya Matsuzaka, Jun Tanji, Hajime Mushiake” Supervisory role of the primate medial prefrontal cortex in the selection of response tactics” Tohoku International Symposium on Multidisciplinary Neuroscience 2011.1.15 Sendai

27 Toshi Nakajima, Ryosuke Hosaka, Hajime Mushiake, Jun Tanji ” Neuronal activity in the medial motor areas reflects the sequencing of arm use and action in parallel during performance of a bimanual sequential motor task” Tohoku International Symposium on Multi-disciplinary Neuroscience 2011.1.15 Sendai

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕  
出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.neurophysiology.med.tohoku.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

虫明 元 (MUSHIAKE HAJIME)

東北大学・大学院医学系研究科・教授

研究者番号：80219849

(2) 研究分担者 ( )

研究者番号：

(3) 連携研究者 ( )

研究者番号：