

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 27 日現在

機関番号：32639

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23243077

研究課題名(和文) 熟慮的判断のための神経基盤の研究

研究課題名(英文) Research on neural basis for deliberate decision

研究代表者

坂上 雅道 (Sakagami, Masamichi)

玉川大学・脳科学研究所・教授

研究者番号：10225782

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 37,300,000円、(間接経費) 11,190,000円

研究成果の概要(和文)：思考の基礎過程を調べるために、独自開発の推論課題(Pan et al., 2008)を使い、サルの脳の推論機能について調べた。その結果、単一ニューロン活動記録から、前頭前野外側部のニューロンは推移的推論機能を反映した活動を見せたが、大脳基底核線条体にはそのような活動が見られなかった(Pan et al., 2014)。前頭前野外側部の推移的推論機能は、カテゴリカルな処理と密接な関係があることが示された(Pan & Sakagami, 2012)。さらに、多電極同時記録による局所場電位解析から、前頭前野外側部から線条体への情報伝達が、正しい課題遂行に重要な役割を果たしていることが示唆された。

研究成果の概要(英文)：Have made research on inference function in monkey brains by using our originally developed inference tasks (Pan et al., 2008) for study of basic process of thinking. As the result, 1) in single unit recording, neurons in lateral prefrontal cortex showed activity of transitive inference function, while basal ganglia (striatum) showed no such activities, 2) it was suggested that transitive inference function in lateral prefrontal cortex was closely related to categorical process (Pan & Sakagami, 2012), and 3) it was found by local field potential analysis with simultaneous multi-electrode recording that information transmission from the lateral prefrontal cortex to the striatum played an important role in performing the task appropriately.

研究分野：社会科学

科研費の分科・細目：心理学、実験心理学

キーワード：ドーパミンニューロン 認知的不協和 モデルベースvs.モデルフリー コスト-ベネフィット 意思決定

1. 研究開始当初の背景

思考を実現する神経系の研究は、1990年代以降、実証的な形で行われるようになった。それらを概観して、Daw et al. (2005)は、脳には少なくとも2つの異なる意思決定(思考)システム(モデルフリーシステムとモデルベースシステム)があると主張した。モデルフリーシステムは、条件付けやTD (Temporal Difference) 学習のように刺激や反応とその結果の関係をキャッシュしていく構造を持ち、直前の結果がすぐに学習に反映されるような柔軟なシステムではないが、確率的で素早い予測を可能にする。一方、モデルベースシステムとは、事象間の連合関係を樹形図状につなぎ合わせていったような構造を持ち、連合間の関係は状況に依存して分岐するので生体の行動選択に柔軟性を与える。さらに、このような事象間の連合の樹形図の構造は、特定の環境での生体の行動に関する内部モデルを形成することになり、行動決定に先立ってシミュレーションを可能にする。モデルベースシステムは、前頭前野を中心とする大脳皮質内の回路が重要な役割を果たしていると考えられており、意識的な意思決定とも密接な関係があると思われる。

2. 研究の目的

熟慮的判断(モデルベース型意思決定)が、前頭前野内のどのような神経回路の働きによって作り出されているかを理解するために、二ホンザルに推論課題を学習させ、その課題遂行中のニューロン活動を記録することにより、推移的推論機能を脳のどの領域が担っているか調べるとともに、それがどのようなメカニズムで可能となっているのかを明らかにすることを目的とした。加えて、脳の学習機能を支えるドーパミンニューロンが、高次認知機能にもかかわっていることを調べるために、コストベネフィット課題遂行中のサルのドーパミンニューロンからニューロン活動の記録を行い、価値情報の統合にかかわる神経メカニズムについても調べた。

3. 研究の方法

推移的推論課題

我々が独自に開発した推論課題を(Pan et al., 2008)サルに学習させた。この課題では、6つの視覚刺激を2つのグループにわけ、まず、それぞれの関係を学習させる(A1、B1、C1によるグループとA2、B2、C2のグループ)。次に、C1とC2を使ってグループとジュース報酬の関係を教え、A1、A2、B1、B2と報酬との関係を推測させる。ただ、固定した数の刺激を繰り返し使用すると、単に逆転学習を習得するだけかもしれない。そこで、新たな刺激(たとえば、N1とN2)を導入し、特定の刺激(たとえば、B1とB2)との関係だけを教えることにより、C刺激により指示さ

れたグループと報酬の関係を、新しい刺激から、サルが推測できるかどうかを調べる実験も行った(C1->報酬、N1->B1、B1はC1と同じグループ、よってN1->報酬?)。行動的には、たとえ新しい刺激でも、サルは初めてその刺激が報酬予測実験で使われた場合でも報酬予測を行っていることが分かった。その後、推論課題遂行中のサル前頭前野腹外側部と大脳基底核線条体ニューロンから、単一ニューロン活動を記録し、解析を行った。

コストベネフィット課題

サルに、2つのタイプの試行からなる課題を学習させた。異なるタイプの試行であることを示す手がかり刺激(条件刺激)が呈示された後、一定の遅延期間を経て、報酬を示す刺激(報酬刺激)が呈示され、実際の報酬がそれに続く。コスト有条件では、それを示す条件刺激が呈示された後、サルは画面中心に呈示された固視点を、遅延期間中、見つめ続けなければならない。コスト無条件では、同じ長さの遅延期間中、眼を自由に動かすことができた。この課題遂行中のサル、中脳黒質網様部から、単一ニューロン活動を記録解析した。

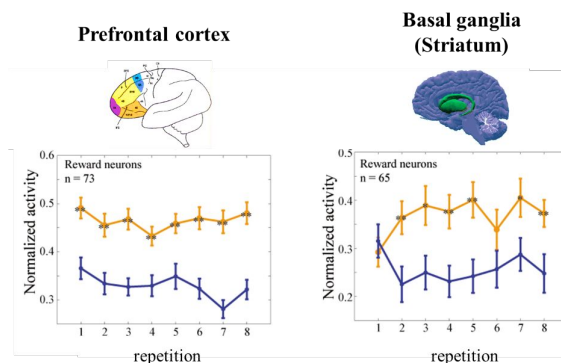
4. 研究成果

推移的推論課題

サルのそれぞれの刺激に対する反応時間や正答率によって報酬予測を間接的に知ることができるが、サルは直接の経験なしに刺激と報酬の関係が推論できることがわかった。前頭前野外側部のニューロンも行動同様、直接経験なしに報酬を予測する活動を示した。このことは、前頭前野ニューロンが、C刺激と報酬の関係とC刺激とグループ(カテゴリー)の関係を結びつけることにより、直接経験していないA刺激やB刺激と報酬の関係を推論していることを示している。さらに、B刺激だけを使って新しい刺激とグループの関係を教えた場合でも、同様の手続きで、サル自身の行動と前頭前野ニューロンが新しい刺激と報酬の関係を推論できることもわかった。詳しい解析の結果、前頭前野ニューロンは、刺激をカテゴリー化してコードし、そのカテゴリー情報と意味の情報(この場合、報酬情報)を結びつけることによって報酬予測(価値の生成)を行っていることがわかった。このような報酬予測(価値の生成)機能が、大脳基底核ニューロンのものとどう違うかを知るために、推論課題遂行中のサルの尾状核と前頭前野からニューロン活動の同時記録も行った。その結果、多くの尾状核ニューロンが報酬予測的応答を見せたが、C刺激を使った学習試行直後の推論試行では、最初の1試行目だけは報酬の予測ができなかった。2試行目からは前頭前野ニューロン同様報酬予測的活動が見られたが、1試行目の経験が使えるためこの予測的活動は推論によるものとは言いにくい。一方、サル自身の行動と前頭前野ニューロンでは1試行目から報酬予

測的活動が見られた(図1)。したがって、前頭前野と尾状核では異なるメカニズムで報酬予測を行っていると言える。直接の経験なしに過去に経験した連合情報を組み合わせる新しい関係が推論できる前頭前野ニューロンはモデルベースの処理を可能にし、直接経験に依存して報酬予測を行う尾状核ニューロンはモデルフリー的な処理の特徴を持っていることがわかった。この成果は、European Journal of Neuroscience 誌に2012年、Journal of Neuroscience 誌に2014年発表した。さらに、前頭前野側部と大脳基底核の間の活動の相互作用についての論文を準備している。

図1 推移的推論課題における前頭前野側部ニューロン集団(左)と大脳基底核ニューロン集団(右)の応答。黄色は大報酬刺激、青は小報酬刺激に対する応答を示す。



A->B & B->C → A->C

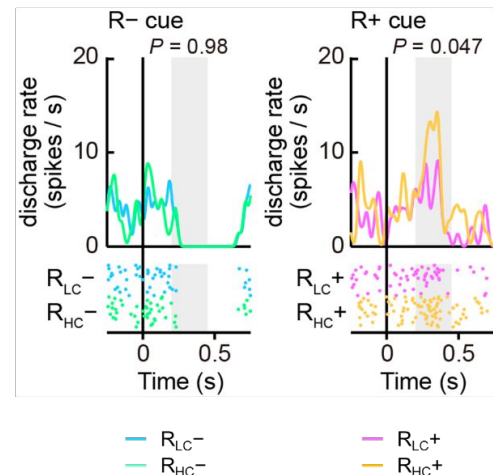
コスト-ベネフィット課題

同じ量の報酬を得る場合、サルは、コスト無条件に比べ、コスト有条件を嫌うことが分かった。この時、黒質網様部のドーパミンニューロンから単一ニューロン活動の記録を行ったが、条件刺激に対する応答は、コスト有条件刺激に比べ、コスト無刺激に対する応答のほうが、大きかった。このことは、これまで予測される報酬の大きさに従った報酬予測誤差応答をすると考えられていたドーパミンニューロンが、コストの情報も組み入れて、コスト-ベネフィットを統合して応答することを示している。また、報酬刺激の呈示に対しては、同じ量の報酬であっても、コスト有試行での応答のほうが、コスト無試行での応答より大きいことが分かった(図2)。このことは、条件(コスト)刺激呈示による報酬期待が、コスト有試行のほうがコスト無試行より、低く設定されたため、同じ量の報酬を指示する報酬刺激に対して、コスト有試行で報酬予測誤差が相対的に大きくなったことを反映していると考えられる。実際、学習実験でも、コスト有試行での学習のほうがコスト無試行でのそれより早く進むということもわかった。この成果は、2013年の Society for Neuroscience で発表され、現在国際誌へ

の発表の準備中である。

図2 ドーパミンニューロンの応答例。報酬刺激に対する応答(右)は、コスト有試行での応答(R_{HC}+; 黄色)のほうがコスト無試行での応答(R_{LC}+; 紫色)より優位に大きい。

Example neuronal response to Reward cues



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14件)

Pan X, Fan H, Sawa K, Tsuda I, Tsukada M, Sakagami M, Reward inference by primate prefrontal and striatal neurons, J. Neurosci., 査読有, 34, 2014, 1380-1396

小口峰樹、田中慎吾、Xiaochuan Pan、坂上雅道、前頭前野におけるカテゴリー形成、月刊 臨床神経科学、査読無、32, 2014, 62-66

Ma C, Pan X, Wang R, Sakagami M, Estimating causal interaction between prefrontal cortex and striatum by transfer entropy, Cognitive neurodynamics, 査読有、7, 2013, 253-261

Watanabe N, Sakagami M, Haruno M, Reward prediction error signal enhanced by striatum-amygdala interaction explains the acceleration of probabilistic reward learning by emotion, J. Neurosci., 査読有、33, 2013, 4487-4493

坂上雅道、予測と意思決定の神経科学 意思決定にかかわる二つの神経回路、生体の科学、査読無、64, 2013, 301-306

Ito T, Wu DA, Marutani T, Yamamoto M, Suzuki H, Shimojo S, Matsuda T, Changing the mind? Not really -- activity and connectivity in the caudate correlates with changes of choice., Soc Cogn Affect Neurosci., 査読有、2013, Epub ahead of print

土師知己、松田哲也、リアルタイム fMRI によるニューロフィードバックの基礎とその応用、精神科、査読無、22、2013、375-381

Pan X、Category representation and generalization in the prefrontal cortex、Eur J Neurosci.、査読有、35、2012、1083-1091

Yotsumoto Y、Performance Dip in Motor Response Induced by Task-Irrelevant Weaker Coherent Visual Motion Signals、Cereb Cortex、査読有、22、2012、1887-1893

坂上雅道、線条体と前頭前野における価値の表象、Brain Nerve、査読無、64、2012、891-901

Yamada M, Camerer CF, Fujie S, Kato M, Matsuda T, Takano H, Ito H, Suhara T, Takahashi H, Neural circuits in the brain that are activated when mitigating criminal sentences.、Nature Communications、査読有、3、2012、759

Takemura H, Samejima K, Vogels R, Sakagami M & Okuda J, Stimulus-dependent adjustment of reward-prediction error in the midbrain、PLoS ONE、査読有、6、2011、e28337

Murai C, Tanaka M & Sakagami M、Physical Intuitions about Support Relations in Monkeys (Macaca Fuscata)、Developmental Psychobiology、2011、査読有、53、732-737

Hsu DF, Ito T, Schweikert C, Matsuda T, Shimojo S、Combinational Fusion Analysis in Brain Informatics: Gender Variation in Facial Attractiveness Judgment、Brain Informatics Lecture Note in Computer Science、査読有、2011、2-20

〔学会発表〕(計 27 件)

Shingo Tanaka, John P O'Doherty and Masamichi Sakagami、The enhancement of the reward prediction error signal in the midbrain dopamine neuron by the cost paid for the reward、第 91 回日本生理学会大会、2014 年 3 月 16-18 日、鹿児島大学(鹿児島県鹿児島市)

Shingo Tanaka, John P O'Doherty and Masamichi Sakagami、The Enhancement of the reward value by the cost paid for the reward、Symposium on Human Cognitive Neuroscience: Neural Dynamics of Internal Switching、2014 年 1 月 23 日、九州大学(福岡県福岡市)

坂上雅道、Reward inference by prefrontal and striatal neurons、Symposium on Human Cognitive Neuroscience: Neural Dynamics of Internal Switching、2014 年 1 月 23 日、九州大学(福岡県福岡市)

Shingo Tanaka, John P O'Doherty and Masamichi Sakagami、The enhancement of the reward prediction error signal in the midbrain dopamine neuron by the cost paid for the reward、Society for

Neuroscience 43rd Annual Meeting 2013、2013 年 11 月 9-13 日、San Diego Convention Center (USA)

Masamichi Sakagami、The enhancement of the reward prediction error signal in the midbrain dopamine neuron by the cost paid for the reward、Mini-Symposium on Neural Mechanisms of Value and Decision-Making、2013 年 11 月 13-18 日、Caltech (USA)

Hongwei Fan, Xiaochuan Pan, M. Sakagami、Monkey lateral prefrontal cortical neurons represent functional category of visual stimuli、Int'l symposium on Prediction and Decision Making、2013 年 10 月 13-14 日、京都大学(京都府京都市)

Shingo Tanaka, John P O'Doherty and Masamichi Sakagami、The effect of cost on the reward prediction error signal in midbrain dopamine neurons、第 36 回日本神経科学大会、2013 年 6 月 20-23 日、国立京都国際会館(京都府京都市)

松田哲也、科学技術の将来ビジョンについて、第 90 回日本生理学会大会学術・研究委員会企画フォーラム、2013 年 3 月、東京

Masamichi Sakagami、The effect of cost on the reward prediction error signal in the midbrain dopamine neuron、Reward and Decision-making on Risk and Aversion、2013 年 3 月 7 日、Hawaii (USA)

Masamichi Sakagami、Reward inference by prefrontal and striatal neurons in primate、人間とどうぶつの「意思決定・論理・認知」を探る-神経科学から哲学まで-国際・学際シンポジウム Decision Making, Logic and Cognition、2013 年 2 月 27 日、慶應義塾大学(東京都)

T. Ito, T. Matsuda, S. Shimojo、The Shorthanded Brain - Functional connectivity across Anterior Putamen in Top-notch Expertise of Stenography-、Neuroscience 2012, SfN's 42nd Annual Meeting、2012 年 10 月 13-17 日、New Orleans (USA)

Masamichi Sakagami、Reward inference by Primate Prefrontal and Striatal Neurons、Annual Conference on Neuroeconomics、2012 年 9 月 29 日、Key Biscayne (USA)

坂上雅道、予測と創造-モデルベース的意思決定プロセスの基礎-、第 76 回日本心理学会大会、2012 年 9 月 13 日、専修大学(神奈川県)

Masamichi Sakagami、Reward inference by primate prefrontal and striatal neurons、Dynamics Brain Forum、2012 年 9 月 4 日、Carmona (Spain)

松田哲也、精神疾患における脳機能障害の定量化と脳活動の制御、精神医学セミナー、2012 年 6 月 7 日、九州大学(福岡県)

坂上雅道、Multiple neural circuits in value-based decision-making、Gaze Bias Learning II-Linking neuroscience, computational modeling, and cognitive development、2012年3月12日、玉川大学（東京都）

Takehito Ito, Toshiyuki Marutani, Manami Yamamoto, Hidenori Suzuki, Shinsuke Shimojo, Tetsuya Matsuda、Neural Basis of Changing Face Preference Decision by Gaze Manipulation、Neuroscience 2011, SfN's 41st Annual Meeting、2011年11月12-16日、Washington D.C. (USA)

T. Ito, T. Matsuda, S. Shimojo、The Shorthanded Brain - Functional connectivity across Anterior Putamen in Top-notch Expertise of Stenography-、35th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society、2011年9月18-21日、名古屋

坂上雅道、判断にかかわる2つの神経回路、日本心理学会第75回大会シンポジウム「心の先端研究の現在と未来」、2011年9月17日、日本大学文理学部（東京都）

Takehito Ito, Toshiyuki Marutani, Manami Yamamoto, Hidenori Suzuki, Shinsuke Shimojo, Tetsuya Matsuda、Neural Basis of Changing Face Preference Decision by Gaze Manipulation、HBM 2011, 17th Annual Meeting of the Organization on Human Brain Mapping、2011年6月26-30日、Quebec City. (Canada)

〔図書〕(計3件)

苧阪直行(編) 坂上雅道(4章執筆)、新曜社、社会脳シリーズ5 報酬を期待する脳 ニューロエコノミクスの新展開、2014、158 (58-112)

藤永保(監修) 坂上雅道(部分執筆)、平凡社、最新心理学事典、2013、870(部分執筆)

G.R. ファンデンボス(監修) 坂上雅道(部分訳)、培風館、APA 心理学大辞典 APA Dictionary of Psychology、2013、1041(部分訳)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坂上 雅道 (SAKAGAMI, Masamichi)
玉川大学・脳科学研究所・教授
研究者番号：10225782

(2) 研究分担者

松田 哲也 (MATSUDA, Tetsuya)
玉川大学・脳科学研究所・准教授