

研究報告書

「他者と自己の戦略的行動モニタリングとその脳内情報表現」

研究期間：平成20年10月～平成24年3月

研究者：磯田 昌岐

1 研究のねらい

実社会において適切な意思決定や行動決定を行うためには、外界情報や自己の行動情報に加え、自己以外の動作主体である他者の行動情報も同時にモニターし、それを利用することが重要である。本研究は、このような自他行動のモニタリングと、他者の行動から自己の行動を導く脳内メカニズムを、霊長類を対象としたシステム神経科学的アプローチによって明らかにする。

2 研究成果

本研究の成果は次の3点に要約される。第一に、サルが他者の動作を正しくモニターし、それを自身の動作選択に利用できることを新たな行動課題を用いて証明した。第二に、自己と他者の動作を区別して表現する神経細胞を前頭葉内側領域から同定した。自己の動作を表現する細胞は同領域腹側部に有意に多く、他者の動作を表現する細胞は同領域背側部に有意に多かった。第三に、他者の誤った動作に特異的に応答する細胞を前頭葉内側領域から同定した。同領域背側部の神経細胞は他者の動作エラーの検出過程に、腹側部の神経細胞は他者の動作エラーをもとに自己の動作を決定する過程にそれぞれ関与することが示唆された。以上より、前頭葉内側領域の背側部と腹側部は、自他の動作区別や他者の行動モニタリングの過程において異なる役割を担っていると結論付けた。

(1) 霊長類サルを用いた実験パラダイムの開発と行動解析

まず、2頭のニホンザルを同時に用いて次のようなタスクを開発した(図1)。2頭のサルを60センチメートル四方のテーブルを挟んで向かい合わせに座らせ、それぞれのサルの前には3つのボタンを配置した。一方のサル(アクター)がスタートボタンを押すと試行が開始され、左右のターゲットボタンがそれぞれ緑色と黄色に点灯するので、アクターはそのどちらかを選ぶ。それが正しい選択であった場合には2頭のサルは報酬(ジュース)を与えられ、それが間違いであった場合にはどちらのサルも報酬が得られない(図1A)。一方のサルがこれを2試行繰り返した後、もう一方のサルがアクターとして同様に2試行繰り返す(アクター役は2試行毎に交替する)。正解は少なくとも5試行同じ色が続くが、それ以降は不規則に他方の色に変更されるため、サルはその変更がいつ起こるのかを予測できない(図1B)。

この役割交替課題においてサルが高い確率で報酬を得るためには、相手の動作をよく観察し、いまはどの色が正解なのか、あるいは正解の色(ルール)が切り替わったのかどうかを判断する必要がある。行動解析の結果、報酬を得られなかった原因が相手の誤った選択にあるのか、あるいはルールの切り替わりにあるのかを、サルは相手の動作情報から正しく識別し、その情報を次の自身の動作選択に生かすことができることが明らかとなった(図1C,D)。

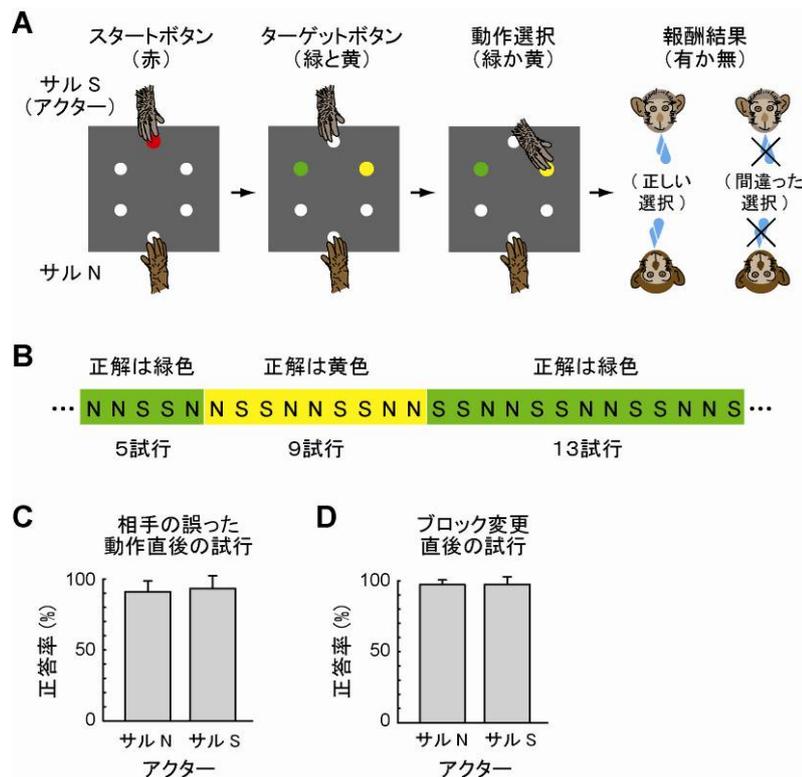


図1 役割交替課題とサルの行動解析

A 役割交替課題の1試行の推移を示す。2頭のサルSとNが向かい合って課題を行っており、この試行ではサルSがアクター役である。サルSが正しい色を選択すれば2頭とも報酬を得られるが、誤った選択をした場合、いずれのサルにも報酬が与えられない。**B** 役割交替課題では、5～17試行毎に報酬と連合するターゲットボタンの色が切替わる。NとSは各試行のアクター役を示す。ここでは、最初に緑色が5試行連続で正解であった後に黄色が正解となり(9試行)、その後再び緑色が正解となる例を示している。**C** 相手が誤った選択を行った直後の試行における自身の選択の正答率を示す。**D** 色一報酬連合のブロックが切り替わったために相手の選択結果が無報酬に終わったとき、その直後の試行で自身がアクターとなった場合の正答率を示す。

(2) 自己の動作と他者の動作の表現

役割交替課題遂行中のサルの前頭葉内側皮質に電極を挿入し、各神経細胞のスパイク活動を記録した。前頭葉内側皮質を、より背側に位置し、前補足運動野およびその前方領域を含む convexity region と、より腹側に位置し、帯状皮質運動野およびその前方領域を含む sulcus region に分類した。

両部位から3タイプの動作主関連細胞を見出した。第1のタイプは partner type と名付けた細胞で、他者の動作時に特異的に活動した(図2A,D)。第2のタイプは self type と名付けた細胞で、自己の動作時に特異的に活動した(図2B,E)。第3のタイプは mirror type と名付けた細胞で、他者の動作でも自己の動作でも区別なく活動した(図2C,F)。前頭葉内側皮質全体で見ると partner type が最も多く、全動作主関連細胞の46% (138/298)を占めた。次いで self type が34% (100/298)、mirror type が20% (60/298)であった。他方、各細胞タイプの頻度を convexity region と sulcus region で比較してみると、partner type は convexity region に有意に多く、self type は sulcus region に有意に多いことも明らかとなった。これらの細胞応答特異性は、眼球運動や上肢～体幹の筋活動といった末梢運動器官の運動パラメーターでは説明できなかった。

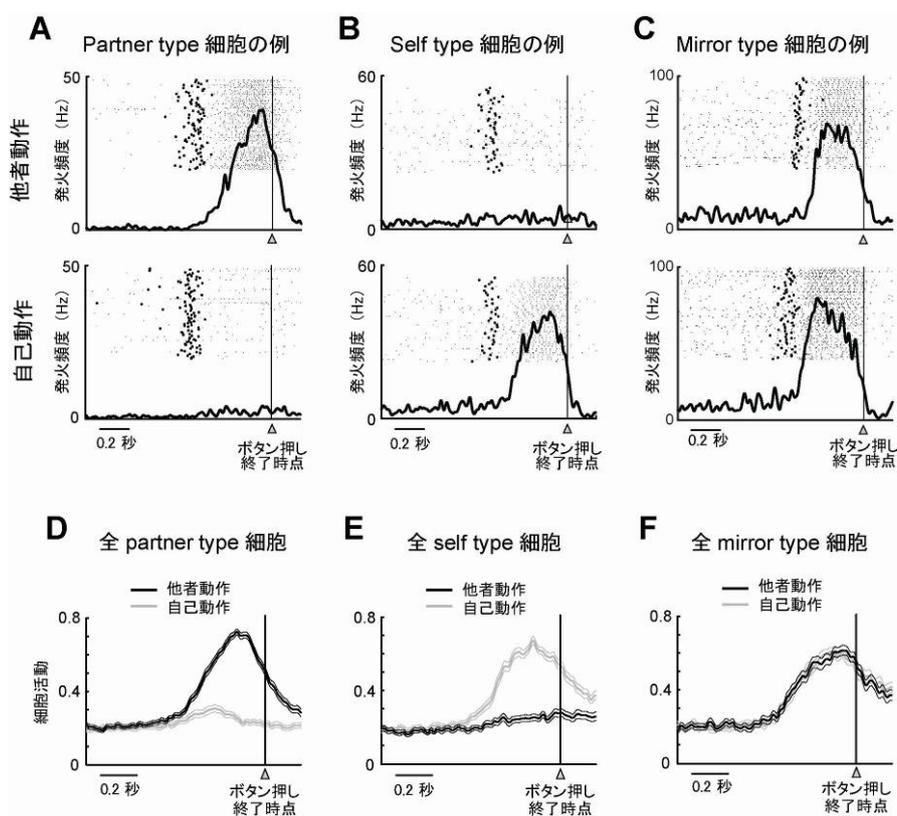


図2 動作主に関連した神経細胞の活動

各タイプの単一神経細胞の活動例を示す。Aはpartner type、Bはself type、Cはmirror typeの例である。小さい点は、各細胞のスパイク発火のタイミングを示し、大きい点はターゲットボタンがいつ点灯したかを示す。細胞活動は、アクターがボタンを押した時刻で揃えてある。D-F 各タイプのポピュレーション活動を示す。活動はアクターがボタンを押した時刻で揃えてある。

(3) 他者の動作エラーの処理と利用

前頭葉内側皮質において、他者の動作の過ちに対して特異的に応答する細胞を同定した。これらの細胞は他者が正しい動作選択を行った場合には有意な活動上昇を示さず、他者が誤った動作選択を行った場合のみ有意な活動上昇を示した。これら一群の細胞を partner-type 細胞と名付けた。Partner-error 細胞は convexity region にも(41/264, 16%)、sulcus region にも(56/288, 19%)存在し、それらの出現頻度に有意差は見られなかった。

Partner-error 細胞の応答特性をさらに解析した。特に、他者がアクターとして選択ミスを犯し、その直後の試行で自身がアクターとなった場合に着目した。他者の選択エラーに対する神経活動を、その直後の試行において自身が正しく動作を選択できた場合(Ec)と選択できなかった場合(Ee)に分けて解析した結果、他者が正しい選択を行った場合の活動に比べ、convexity region の細胞はEcでもEeでも有意な活動上昇を示したのに対し、sulcus region ではEcにおいてのみ有意な活動上昇を示した。以上の結果から、convexity region の partner-error 細胞は他者の動作エラーの検出過程に関与し、sulcus region の細胞は他者の動作エラーをもとに自己の動作を決定する過程に関与していると考えた。

3 今後の展開

今後、いくつかの展開が予想される。第一に、自他の動作情報処理の神経薬理学的メカニズムの解明である。第二に、解析対象部位を前頭葉内側皮質領域以外に広げることである。社会的認知機能に重要な脳部位として、他にも側頭頭頂連合野、腹内側前頭前野、扁桃体などが知られている。いわゆる社会脳ネットワークとしての機能を解明することが重要となる。第三に、着目する自他情報のドメインを動作以外に広げることである。例えば、行動発現に影響を及ぼす情動ドメインに焦点をあて、その神経基盤を社会的行動制御の観点から研究してゆくことが重要となる。

4 自己評価

上記の研究成果により当初の研究目標は概ね達成できたと考えている。すなわち、他者の動作情報の処理や、他者の動作情報を利用した自己の行動制御過程に関与する神経活動を前頭葉内側皮質領域において同定することができた。これらの成功の背景には、適切に制御された行動パラダイムをサルを対象として構築できたこと、そして、熱意ある大学院生を研究協力者として得ることができたことがあった。本研究成果の第一報は2011年に発表できた。領域終了までに、さらに何篇かの論文発表を行いたい。

5 研究総括の見解

社会生活を送る中で、人は自己の行動とともに他者の行動(その意図を含め)を随時モニターし、それらを自己の行動企画に活用する。本研究ではサルをモデルとし、2頭のサルに自他関係が関わる巧みな課題を課し、大脳前頭葉神経活動を記録することにより、新しい知見を得た。その結果に基づき、戦略的自他行動モニタリングの文脈で重要な提案を行った。脳情報解読型BMI の実際的適用に当たり、社会的文脈の組み込みは重要な課題であり、本研究の結果はその解決に向けて重要な寄与をなすとともに、神経経済学など応用脳科学分野の発展に大きく貢献すると考えられる。

6 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. Yoshida K, Saito N, Iriki A & Isoda M. Representation of others' action by neurons in monkey medial frontal cortex. *Current Biology* 21: 249-253 (2011).

(2) 特許出願

なし

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物等)

主要な学会発表

1. Isoda M, Yako K & Iriki A. Neuronal basis of socially oriented performance monitoring. I. Design of a behavioral paradigm for monkeys. *Soc Neurosci Abst* #578.9 (2009).
2. Yako K, Iriki A, Saito N & Isoda M. Neuronal basis of socially oriented performance monitoring. II. Agent-related neuronal activity in the medial frontal cortex. *Soc Neurosci*

Abst #578.10 (2009).

3. Yoshida K, Saito N, Iriki A & Isoda M. Learning from other's error and the role of the medial frontal cortex in monkeys. Soc Neurosci Abst # 805.22 (2010).
4. Isoda M, Yoshida K, Saito N & Iriki A. Representation of self and other actions in the medial frontal cortex. The 33rd Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society (2010).
5. Isoda M. Monitoring other's action in the monkey medial frontal cortex. Symposium on "Others in the self: recent advances in social neuroscience." The 34th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society (2011).

受賞

日本神経科学学会奨励賞 (2009 年)

著作物等

磯田昌岐 & 吉田今日子. 前頭葉における自己と他者の動作表現. Clinical Neuroscience 29: 900-904 (2011).