

令和 3 年 6 月 15 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K07349

研究課題名（和文）他者の“裏をかく”神経基盤の解明：脳内他者行動モデルの構築とそれに基づく行動選択

研究課題名（英文）The neural basis of "outwitting others": behavioral selection based on simulating others in the brain

研究代表者

田中 慎吾（Tanaka, Shingo）

新潟大学・医歯学系・助教

研究者番号：30597951

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：他者の心を推測する能力「心の理論」には、複数の脳領域が関与しているが、自己とのインタラクションによって変化する他者の脳内推測過程や、脳内他者と周辺状況に応じた行動選択の神経基盤については未知である。本研究では、インタラクティブな実験課題を開発し、脳内他者を用いた戦略的な行動選択の神経生理学的基盤の解明を目指した。まずfMRIを用いて、ヒト被験者の脳活動を記録した。ヒト被験者の行動を計算論的行動モデルで説明し、そのパラメータと相関する脳活動を探索したところ、TPJや前頭前野において賦活がみられた。さらに、ニホンザルから神経活動を記録するためのECoG電極を開発し、ニホンザルの課題訓練を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、インタラクティブな実験課題を開発し、脳内他者を用いた戦略的な行動選択に関連する脳活動を明らかにした。この結果は、「心の理論」を用いた行動選択の神経基盤にアプローチできるといった点で学術的意義がある。さらに、この研究成果は「心の理論」の原理や存在意義の解明につながるとともに、自閉症などの社会的行動に対して困難を示す症例の原因解明や、治療法の確立、さらには人工知能への心の実装などにつながると考えている。

研究成果の概要（英文）：Although multiple brain areas are involved in “the theory of mind”, the ability to infer the mind of others, the neural process of inferring others which changes with interaction with the self, and the neural basis of action selection according to the inferred others in the brain and the surrounding situation is still unknown. In this study, we developed an interactive experimental task and aimed to elucidate the neurophysiological basis of strategic behavioral selection using simulated others in the brain. First, we performed fMRI experiments to record the brain activity of human subjects. We used a computational behavioral model to explain the behavior of human subjects and explored the brain activity that correlated with the parameters of the model, and found activation in the TPJ and prefrontal cortex. In addition, we developed ECoG electrodes to record neural activity from macaque macaques and trained them to perform the interactive task.

研究分野：神経科学

キーワード：心の理論 大脳皮質 ECoG ニホンザル fMRI

1. 研究開始当初の背景

他者の心を知ることは、ヒトのような社会的な相互作用を行う動物にとって、必須の能力となっている。この他者の心を推測する能力は「心の理論」と呼ばれているが、実際の社会的環境においては、他者の心を推測したうえで、周囲の状況に応じて、自己の行動を柔軟に変化させる必要がある。さらに、自己の行動に応じて、他者の心や行動も変化するため、相互作用によって時々刻々と変化していく他者の心、および行動を推測することが、社会的環境においては重要となる。しかしながら、他者との相互作用を検証する、これまでの研究のほとんどは、「心の理論」の有無や脳機能局在を、ヒトを被験者とした fMRI 研究で検証するものである。例えば、前頭前野内側部が他者の報酬をモニタしているという報告や、「心の理論」には頭頂側頭接合部や帯状回前部が重要であるという報告もあるが、これらの研究では社会性機能の脳内局在が示されているだけである。一方、他者の行動と関連する神経活動として、ミラーニューロンの存在が知られている。この細胞は、他者の運動と、自己の運動どちらにも応答することで、「心の理論」の実現に関与していると考えられているが、他者行動モデルに関与するという報告はない。また、Haroush らは、マカクザルの ACC ニューロンが、社会的な環境において他者の行動を予測することを報告している。しかしながら、他者の心と周辺状況に応じた行動選択や、経時的に変化する他者の心や行動の推測の神経メカニズムについてはいまだ未知のままである。

2. 研究の目的

ヒトを含め、多くの動物は、一つの報酬を他個体と奪い合うという状況に遭遇する。そのような場合、ただまっすぐ報酬に向かえばよいわけではなく、他個体の行動を推測し、その裏をかくように行動することで、より効率的に報酬を得ることができる。他個体の行動は、自己とのインタラクションによって経時的に変化するため、他個体の行動を予測するための他者行動モデルを脳内に構築することが重要となる。この他者行動モデルを用いて他個体の行動を予測することで、それに対応できる自らの行動を決定することができる。一方、他個体と協力することで、報酬を手に入れることができるような状況も存在するため、常に他個体の裏をかげばいいわけではなく、環境や状況に応じて、柔軟に戦略を変更する必要がある。このような、インタラクティブな状況における、他者行動モデルの脳内計算過程や、状況に応じた戦略的行動選択の神経メカニズムについて検証することは、「心の理論」を利用した行動選択の神経メカニズムにアプローチすることにつながる。しかしながら、このような神経メカニズムを検証する研究は、これまでほとんど行われていない。そこで本研究では、インタラクティブな実験課題として報酬争奪課題を開発し、比較的認知機能の発達した実験動物であるニホンザルを用いて、報酬争奪課題中の神経活動を長期間、侵襲的に記録することで、他者行動モデルの脳内計算過程や、戦略的な行動選択の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

本研究では、インタラクティブな実験課題を新たに開発し、他者行動モデルとそれを用いた戦略的な行動選択の神経生理学的基盤の解明を目指す。まず fMRI を用いて、ヒト被験者の脳活動を記録し、他者行動モデルや戦略的行動選択に関与する脳領域を同定する。次に、ニホンザルの他者行動モデル関連領域にインプラントした多点 ECoG(Electrocorticogram)電極から記録した ECoG 信号から、戦略的行動関連信号を抽出するとともに、他者行動の予測強度を SLiR 法でデコードすることで、脳内における他者行動モデルの計算過程と戦略的行動選択の神経メカニズムの解明を目指す。

報酬争奪課題と協力課題 本研究では、インタラクティブ性を持つ報酬争奪課題と協力課題遂行中の神経活動を記録した。この課題は、それぞれ指示試行と選択試行から構成されていた(図 1,2)。ヒトを被験者とする実験では、コンピュータディスプレイ上に呈示された二枚のカードを用いて課題を行った(図 1)。被験者と対戦相手であるコンピュータは試行ごとにランダムに指示役と選択役に分かれた。被験者が選択役、対戦相手が指示役となる選択試行では、対戦相手が二つの選択肢のうち片方に指示を出すので、指示を

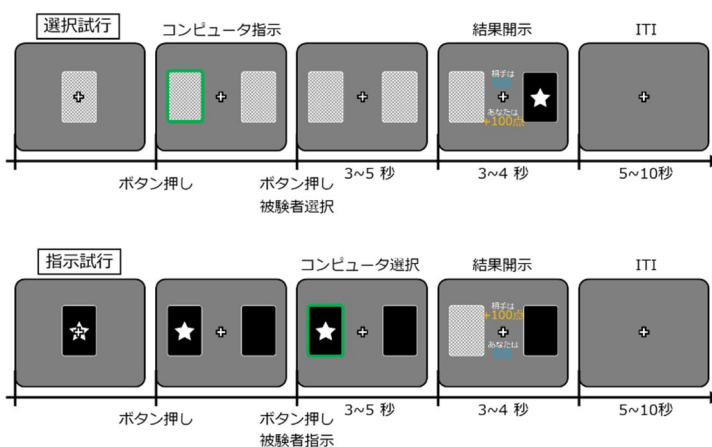


図 1: ヒトを被験者とする対戦協力課題 コンピュータディスプレイに呈示した二枚のカードを用いて課題を行った。

参考に被験者はどちらかの選択肢を選んだ。正解を選べば、選択役である被験者は報酬を得ることができた。一方、被験者が指示役、対戦相手が選択役となる指示試行では、まず被験者が対戦相手に対して指示を出した。その後、対戦相手が選択し正解を選べば、選択役である対戦相手が報酬を得た。この際、指示役の報酬は、対戦・協力条件によって変化させた。協力条件であれば、選択役が報酬を得ると、指示役も報酬を得たが、選択役が無報酬であれば、指示役も無報酬となった。一方、対戦条件では、選択役が報酬を得ると指示役は無報酬、選択役が無報酬であれば、指示役が報酬を得ることができた。2つの条件は数試行ごとに入れ替わるため、被験者は対戦相手の行動を推測したうえで、対戦・協力条件に応じて、適応的に行動を選択する必要があった。

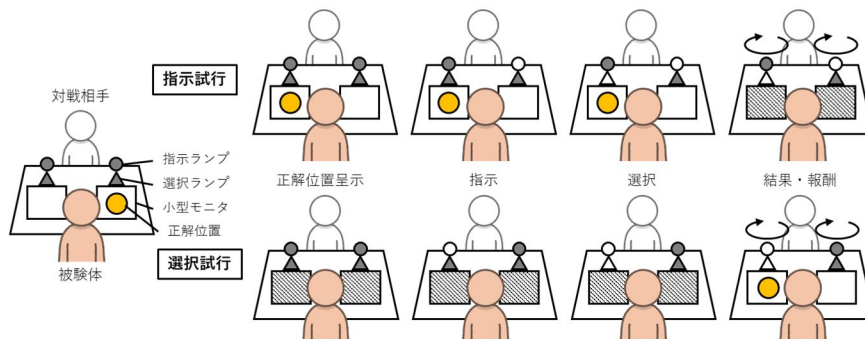


図2：サルを被検体とする対戦協力課題 サルと対戦相手との間に設置した小型モニタとLED ランプを利用することで、正解位置と課題状況を教示した。

二ホンザルを被験体とする場合は(図2)、実験者が対戦相手となり、実際に対面した状態で課題を行った。また、コンピュータディスプレイではなく、被検体と対戦相手との間に設置した小型モニタとLED ライトを利用することで、正解位置と課題状況を教示した。

本課題において、対戦相手の行動は正直度と呼ぶパラメータを持つ行動モデルによって決定し、ヒトが対戦相手となる場合は、その行動モデルの通りに行動を行った。正直度が高いほど正解に対して指示を出し、被験者の指示を信じる確率が高くなるが、正直度が低ければ、逆の傾向となる。対戦相手の正直度は、対戦相手の行動と結果に応じて試行ごとに増減させた。そのため、被験者は、対戦相手の行動と結果をもとに、次の試行における対戦相手の行動をシミュレートし、対戦・協力条件に応じて行動を選択する必要があった。対戦条件においては、対戦相手の行動を予測し、その裏をかくように行動することが、被験者の報酬につながる。一方、協力条件では、対戦相手の行動を予測し、その行動に合致するように選択することが被験者の報酬につながった。

fMRI 実験 上記の課題を行っている際のヒト被験者の脳活動を、fMRI 実験によって計測した。玉川大学の学生41人(男性21人、女性20人)を被験者とした(20-23歳、平均:21.0±0.96)。事前に、口頭及び書面にてインフォームドコンセントを得た。この研究は新潟大学における人を対象とする研究等倫理審査委員会および玉川大学における人を対象とする研究に関する倫理審査委員会による承認を受けて行った。fMRI 実験では3T Trio Tim スキャナーと12チャンネルヘッドコイル(Siemens)を使用した。fMRI 画像の解析では、SPM12を利用したGLM解析を行った。

ECoG 電極の設計 本研究では、長期間にわたり、安定して神経活動を記録するために、ECoG電極を使用する。この電極は、数十μmの厚さのシート状の電極であり、大脳皮質表面に多チャンネルの電極を設置することで、電極点周辺のシナプス電位に由来する電位変化(皮質脳波)を、広範囲に長期間安定して記録することができる。本研究では、このECoG電極を、fMRI 実験で同定したヒト戦略関連領域、信頼関連領域および他者行動モデル領域に対応する二ホンザルの脳領野にインプラントできるように、対象領域に最適となるような形状を設計し、開発した。

4. 研究成果

(1) ヒト被験者を対象とする実験

計算論的行動モデルの構築

報酬争奪課題と協力課題中の被験者の得点率の平均は57.83%であり、この値はチャンスレベルである50%より有意に大きかった。このことから、被験者はルールを理解して課題を遂行していたと考えられた。被験者がとっている戦略を推測するため、ランダムに行動を決定するモデル、自己の行動と報酬の履歴をもとに次の行動を決定する強化学習モデル、対戦相手の行動を強化学習モデルによってシミュレートし、それをもとに自身の次の行動を決定するモデルを作成した。まず、これらの行動モデルがこの課題においてどの程度得点できるか確認するために、シミュレーションを行った。その結果、対戦相手の行動をシミュレートする行動モデルが、他のモデルより多くの得点を獲得できることが分かった。さらに、モデル中の学習率パラメータ(ある行動の結果が次の行動に与える影響の程

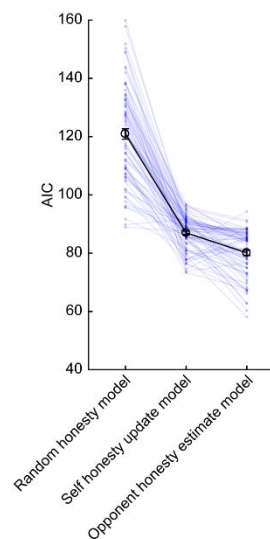


図3：ヒト被験者の行動を説明する計算論モデルの検証

度)や逆温度パラメータ(探索的行動を行わない傾向)が大きいほど得点が高くなる傾向があった。次に、これらの行動モデルを被験者の行動に近似し、最適なパラメータ(学習率、逆温度)を推定するとともに、どの行動モデルが被験者の行動を説明できるか検証した。その結果、対戦相手の行動をシミュレートする行動モデルが被験者の行動を最もよく説明できた(図3)。また、この行動モデルを用いて行動を説明できた被験者ほど高得点を獲得しており、シミュレーションの結果と同様、学習率や逆温度が大きい被験者ほど高得点を獲得していた。

fMRI 画像解析

課題中の被験者の脳活動を計測し、課題状況や行動モデルのパラメータに関連した脳活動を示す脳領域を探索した。まず、他者のシミュレートした脳内他者に関連する活動を調べたところ、他者の正直さと負に相関する活動が、側頭頭頂接合部(TPJ)と後帯状皮質にみられた。つまり、他者が正直な行動をとる可能性が低いと被験者が推測する程、側頭頭頂接合部(TPJ)と後帯状皮質が強く賦活することを示している。これらの脳領域は心の理論に関与することが知られており、ここで得られた結果はそれらの知見と一致していた。次に、自己の行動と関連する脳活動を調べたところ、被験者の正直さと負に相関する活動が、TPJと下前頭回弁蓋部にみられた。つまり、被験者が正直ではない行動をとる傾向が高いほど、TPJと下前頭回弁蓋部が強く賦活していたことを示している。下前頭回弁蓋部は行動制御に関与する領域であり、TPJは他者意図の推定に関与する領域である。本課題では、自己の行動決定には他者意図に関する情報を利用することから、このような領域が活動したのだと考えられた。さらに、対戦状態と協力状態が切り替わる際には、TPJと前頭前野の複数領域、尾状核が賦活していた。TPJは自他の関係、前頭前野は注意や文脈変化の際に活動することが知られているため、対戦状態と協力状態の変化に応じて活動していたのだと推測された。

上記の解析によって同定された脳領域間の相互作用を解析することで、社会的環境における戦略的な行動選択における情報統合のプロセスを検証できると考えている。

(2)ニホンザルを対象とする実験

実験システムの構築と課題訓練

報酬争奪課題と協力課題を遂行中のニホンザルから、神経活動を記録するための実験システムを構築した。本課題を遂行するには、被検体であるニホンザルはLEDランプで指示される指示や選択の意味を理解する必要がある。そのため、まず、二頭のニホンザルに対して課題を遂行するための訓練を施してきた。しかしながら、2019年度にニホンザル二頭の体調が突如悪化し、死亡してしまった。そのため、新たに二頭のニホンザルについて訓練を開始した。

ECoG 電極の設計と開発

ヒトを被験者としたfMRI実験によって、報酬争奪課題と協力課題の遂行には広範囲にわたる前頭前野やTPJが重要な役割を果たすことが分かった。前頭前野内側部、前頭前野外側部、側頭頭頂接合部に適したECoG電極を設計し、開発した。今後、訓練を終えたニホンザルに電極をインプラントし、神経活動を記録する計画である。

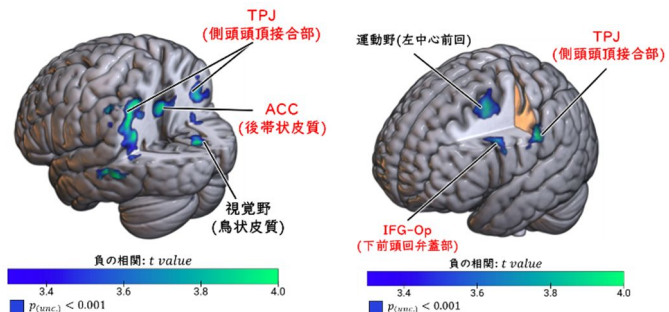


図4：他者正直度と負に相関する活動を示す領域

図5：自己正直度と負に相関する活動を示す領域

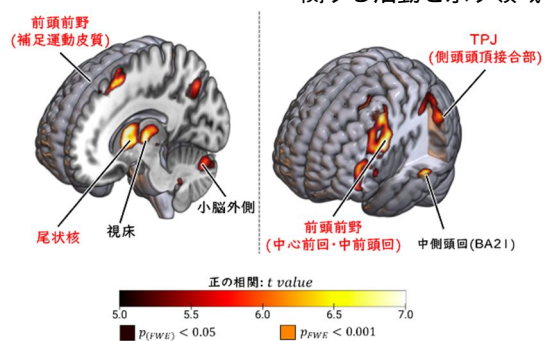


図6：状態遷移によって賦活する脳領域

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	川崎 圭祐 (Keisuke Kawasaki) (60511178)	新潟大学・医歯学系・准教授 (13101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関