

令和 6 年 6 月 24 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K07258

研究課題名（和文）対戦・協力関係における適応的行動選択を実現する神経ネットワークの解明と操作

研究課題名（英文）Investigation and manipulation of neural networks for adaptive decision making in competitive and cooperative interactions

研究代表者

田中 慎吾（Shingo, Tanaka）

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） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：次々に変化する社会環境の中で他個体に対する自身の行動を選択する際には、他者の行動をシミュレートする脳領域と、環境・文脈に応じた適応的行動選択に関連する脳領域を含む神経ネットワークにおける、情報のやり取りが重要であると推察されるが、その詳細ははまだ未解明である。本研究では、インタラクティブな実験課題遂行中のニホンザルの行動データを解析することで、他者シミュレーションを利用した意思決定プロセスについて検証するとともに、前頭前野からECoG信号を記録し、脳内他者シミュレーションを利用した適応的行動選択に関連する脳活動を同定した。

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中の行動データと神経活動を記録・解析することで、脳内他者を用いた適応的行動選択の意思決定プロセスと、それ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ことを考えている。

研究成果の概要（英文）：In selecting one's own behavior toward other individuals in a rapidly changing social environment, it is important to communicate information in a neural network that includes the brain regions that simulate the behavior of others and the brain regions that are involved in adaptive behavior selection according to the environment and context. However, the details of this network remain to be clarified. In the present study, we examined the decision-making process using a simulated other by analyzing behavioral data of a macaque monkey during an interactive experimental task. Furthermore, we recorded ECoG signals from the prefrontal cortex and identified brain activities related to adaptive behavior selection using a simulated other in the brain.

研究分野：神経生理学

キーワード：心の理論 計算論的行動モデル 前頭前野 ニホンザル 皮質脳波 ECoG

1. 研究開始当初の背景

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、その裏をかくことで、より効率的に報酬を得ることができる。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けばいいわけではない。つまり、社会的な環境においては、脳内で他個体の行動をシミュレートするとともに、自分のとるべき行動をその時の環境や他者との関係などの文脈に合わせて適応的に選択する必要がある(図1)。



図1:対戦・協力関係における行動選択

脳内で他者の行動をシミュレートする能力は、「心の理論」と呼ばれ、ヒトのような社会的相互作用を行う動物にとって重要な能力となっている。脳内において、自己と他者の行動と関連する活動を示す神経細胞として最初期に報告されたミラーニューロンは、自身の運動のみならず、他者の同様の運動に対しても活動を示すことで、「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(Rizzolatti, 1996; Gallese, 1996; Rizzolatti, 2004)。また、前頭前野の複数領域が社会的な環境における他者の行動や他者の行動エラー、自己と他者が獲得する報酬などに関連した活動を示すことが報告されている(Haroush, 2015; Chang, 2013; Yoshida, 2012; Noritake, 2018)。しかしながら、本申請課題のように、脳内他者シミュレーションに注目するような神経生理学的研究は行われていない。一方、ヒトを被験者としたfMRI研究に目を向けると、「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報告されている(Frith, 2003; Schaafsma, 2015)。さらに、インタラクティブな状況においては、前頭前野内側部が他者の報酬をモニタしており、他者の行動をもとに自己の行動を更新するのに重要であること、また他者の行動を深く予測する際には、前頭前野外側部が重要であると報告されている(Suzuki, 2012; Hampton, 2008; Yoshida, 2010)。fMRI研究によって、他者の行動に依存した神経活動の変化や社会性機能の脳内局在が示される一方、インタラクティブな環境において、適応的な行動選択に「他者の心」がどのように利用されているのか、という点については不明な部分が多い。

2. 研究の目的

次々に変化する社会環境の中で他個体に対する自身の行動を選択する際には、他者の行動をシミュレートする脳領域と、適応的行動選択に関連する脳領域を含む神経ネットワークにおいて、情報がやり取りされると推察されるが、その詳細はいまだ未解明である。そこで、脳内他者シミュレーションを利用した適応的行動選択を実現する神経メカニズムを明らかにすることを、本研究の核心をなす「問い」とする。そのために、本研究では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、インタラクティブな実験課題遂行中の神経活動を ECoG (electrocorticogram: 皮質脳波) 電極を用いて長期間・高時空間解像度で記録する。これにより、他者の行動をシミュレートする脳領域と適応的行動選択に関連する脳領域の間における情報伝達様式について検証するとともに、その脳領域の神経活動および領域間で伝達される信号を電気刺激や化学遺伝学的手法によって操作し、他の脳領域や動物の行動への影響を検証することで、脳内他者シミュレーションを利用した適応的行動選択に対する神経ネットワークの因果的機能を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

対戦協力課題

本研究では、インタラクティブ性を持つ対戦協力課題遂行中のニホンザルの神経活動を記録する。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る(図2)。この課題において、被験体であるニホンザルと、対戦相手であるヒトもしくは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

れる。サルが選択役、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、指示を参考に、サルはどちらかの選択肢を選ぶ。正解を選べば、選択役であるサルは報酬を得ることができる。一方、サルが指示役、対戦相手が選択役となる指示試行では、まずサルが対戦相手に対して指示を出す。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る。この際、指示役の報酬は、対戦・協力条件によって変化する。協力条件であれば、選択役が報酬を得ると、指示役も報酬を得るが、選択役が無報酬であれば、指示役も無報酬となる。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る。2つの条件は数試行ごとに入れ替わるため、サル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る。

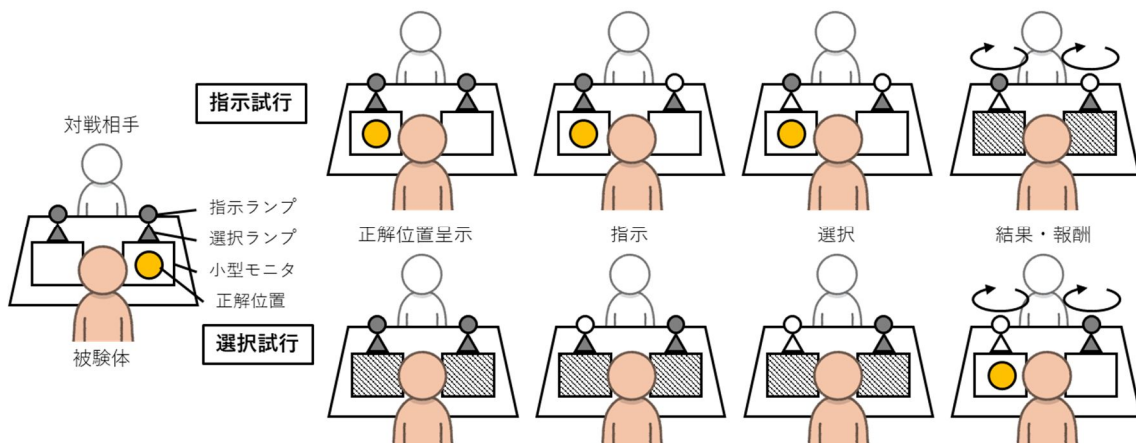


図 2: 対戦協力課題 サルと対戦相手との間に設置した小型モニタと LED ランプを利用することで、正解位置と課題状況を教示する。

本課題において、対戦相手の行動は Trust 値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う。Trust 値が高いほど正解に対して指示を出し、サルの指示を信じる確率が高くなるが、Trust 値が低ければ、逆の傾向となる。対戦相手の Trust 値は、対戦相手の行動と結果に応じて試行ごとに増減する。そのため、サルは、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る。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、サルの報酬につながる。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サルの報酬につながる。この課題中の被検体や対戦相手の行動と報酬履歴をもとに、被験体の行動を説明する計算論的行動モデルを構築する。

一日に実験において、200 試行を 1 セッションとして、6 セッションの課題を行った。6 セッションのうち半分はコンピュータを、残り半分はヒトを対戦相手として行った。コンピュータおよびヒトを相手とするセッションは交互に行った。3 人のヒトが対戦相手として実験に参加し、それぞれの Trust 値の変動率を 25, 35, 45% と設定した。コンピュータが相手となるときも、これらの変動率を採用した。

ECoG 電極の開発とインプラント

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である前頭前野外側部と前頭前野内側部に対応するニホンザルの脳領野にインプラントできるよう、最適となるような形状を設計・開発した(図 3)。開発した ECoG 電極は、ニホンザルの前頭前野に無菌的にインプラントし、回復を待って対戦協力課題を再開した。

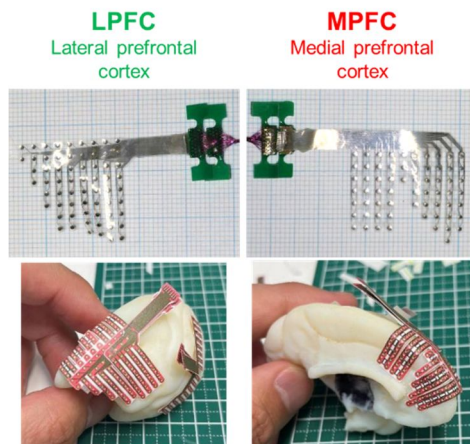


図 3: ECoG 電極

電気生理学実験

インプラントした ECoG 信号を用いて、対戦協力課題を行っている際の、ニホンザル大脳皮質の ECoG 信号を記録した。ECoG 信号をウェーブレット変換することで、5 つの周波数ドメイン (δ , θ , α , β , γ) におけるパワーと位相を計算し、これらの特徴量を解析対象とした。得られた特徴量に対して、課題条件を因子とする ANOVA を行い、課題条件に応じて変化する特徴量の分布について検証した。

4. 研究成果

課題中の行動データの解析

対戦相手がヒトである条件と対戦相手がコンピュータである条件、協力条件と対戦条件、指示役か選択役が切り替わる中で、Trust と Distrust を切り替えながら課題を行っていた(図 4)。報酬率は 68% とチャンスレベルである 50% より高くなっており、サルはランダムに選択しているわけではなく、ルールを理解して課題を遂行していたと考えられた。この課題中のサルの行動を説明するために、計算論的行動モデルを作成した。このモデルには、サル自身の行動と報酬をもとにした強化学習モデルをもとに、Trust 行動をとる確率(図 4 水色ライン)を計算するコンポーネントと、相手の行動と報酬をもとにした強化学習モデルによって相手が Trust 行動をとる確率(図 4 ピンクライン)をシミュレートし、課題条件と合わせてサル自身の Trust 行動をとる確率を計算するコンポーネントが含まれ、これらの出力に重みをかけて足し合わせることで、サルが Trust 行動をとる確率を計算するモデルとなっている。

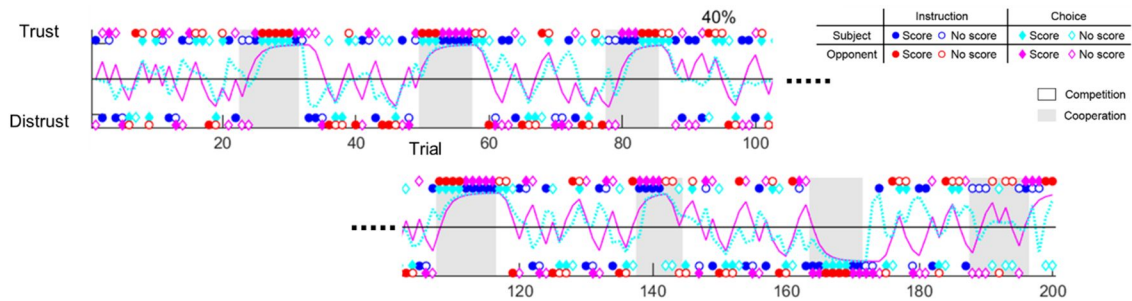


図 4: 対戦協力課題におけるサルの行動例

サルが行う対戦協力課題では、相手がヒトであるかコンピュータであるか、また相手の正直度の変更率も 3 段階に設定していた。これらの条件において、行動モデルに含まれるパラメータに差が生じるか検討したところ、ヒトが相手であるほうが、より他者シミュレーションコンポーネントに重きを置くこと、また、相手がよく行動を切り替える(Trust 値の変更率が大きい)ほど、他者シミュレーションコンポーネントの学習率が大きくなっていることが分かった(図 5)。つまり、サルは課題条件に合わせて、自身の行動を最適化できていることを意味していた。

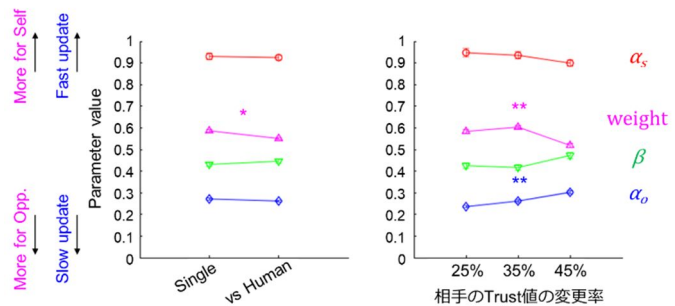


図 5: 行動モデルのパラメータ

電気生理学実験

対戦協力課題中の神経活動を計測するために、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・開発し、一頭のニホンザルの前頭前野にインプラントした。課題中の ECoG 信号を記録し、課題条件に関する情報の空間分

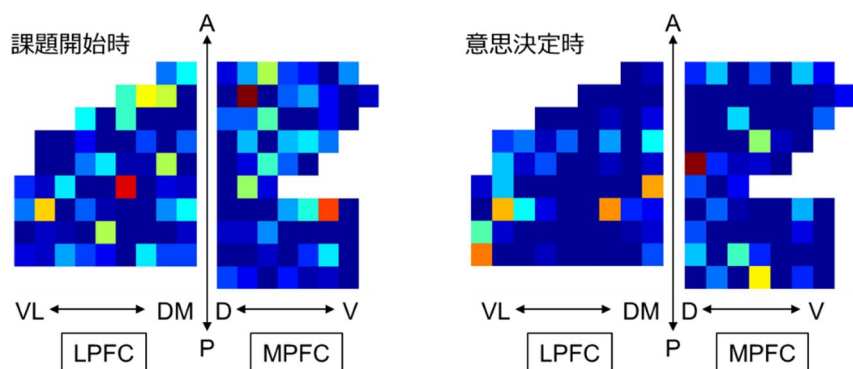


図 6: 前頭前野における課題関連情報の分布

布について検証した。その結果、課題開始時やサルの意思決定タイミングにおいて、前頭前野の広範囲における課題条件関連情報の分布が観察された(図 6)。

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 |
|---------|---------|
| | |