

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 4 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03173

研究課題名(和文) 計算論モデルと統計モデルの統合による行動データからの心的過程解明のための基盤構築

研究課題名(英文) Integration of computational and statistical models for elucidating mental processes from behavioral data

研究代表者

片平 健太郎 (Katahira, Kentaro)

名古屋大学・情報学研究科・准教授

研究者番号：60569218

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)：行動データや脳活動データの分析において、その背後にあるプロセスを表現した数理モデルを用いる計算論モデリングが近年盛んに行われている。しかしながらこれまで、用いられている計算論モデルが実際のデータのどのような特徴をとらえたものが十分理解されていなかった。本研究は統計モデルとの対応を検討しながら計算論モデルがとらえているデータの統計的性質を検討した。さらに、実際の行動データにそれらの枠組みを適用しながら、学習過程における行動の特徴を再検討した。その結果、従来報告されていた学習の性質や精神疾患に関連する脳活動の推定結果は、モデルの推定誤差や設定ミスによる影響を強く受けている可能性が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

行動の計算論モデリングは、人間やその他の動物の行動から内的なプロセスを推定することを可能にし、行動の理解や予測に貢献することが期待されている枠組みである。しかし、そこで用いられてきた計算論モデルは、そのプロセスは明確に定義されていても、それがどのように行動に現れるかが十分に理解されていなかった。本研究はモデルと行動データの性質の対応づけを可能にする枠組みを作り、それにより行動の理由の適切な理解と、それに基づく行動の予測を可能にすることに貢献するものである。本研究の成果には、人間理解への貢献という学術的意義と、行動予測という産業応用の基盤を作ったという社会的意義があるといえる。

研究成果の概要(英文)：Computational modeling has been widely used in the analysis of behavioral and brain activity data. This approach utilizes mathematical models that represent the processes underlying behavior. However, it has not been sufficiently understood what features of the actual data are captured by the computational models. In this study, we investigated the statistical properties of the data captured by computational models by examining the relation to traditional statistical models. In addition, we reconsidered the characteristics of behavior in the learning process by applying our framework to actual behavioral data. The results suggest that the properties of learning and brain activity associated with mental disorders, which have been previously reported, may be strongly influenced by estimation errors and misspecifications of the models.

研究分野：行動の計算論モデリング, 実験心理学

キーワード：計算論モデリング 強化学習モデル 統計モデル 選択行動 モデルベースfMRI

1. 研究開始当初の背景

近年、行動データや脳活動データなどの分析において、その背後にある心的過程・計算過程を表現した数理モデル（例えば強化学習モデル）を用いる計算論モデリングが頻繁に行われるようになってきている（Wilson & Collins, 2019）。計算論モデリングには例えば行動から背後にある計算プロセスを推定でき、また、それに対応した脳部位を同定するための説明変数（例えば報酬予測誤差、reward prediction error, 以下 RPE）が得られるという特長がある（図 1）。しかしながら、これまでの研究では、モデルの構造やモデルのパラメータがどのような行動や脳活動の特徴を反映しているか理解されないまま使われることが多く、分析結果が反映するものと研究者の理解に解離が生じている可能性があった。そのような状況においては、背景にあるメカニズムについて誤った解釈を導く可能性もあると考えられる。

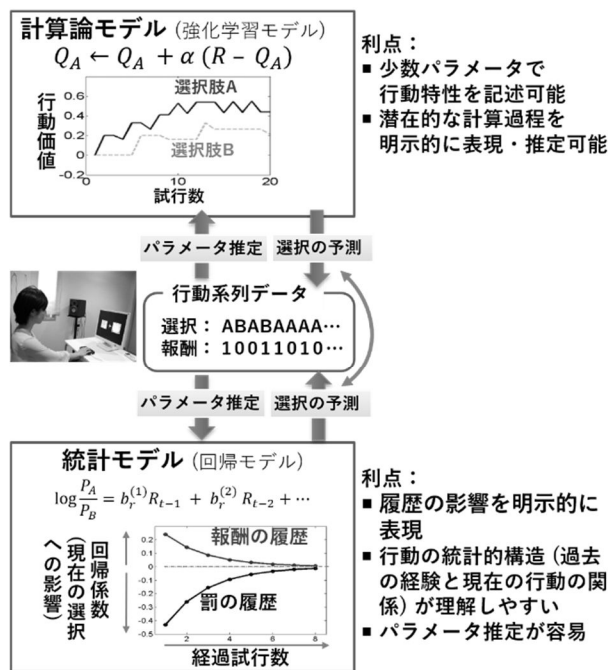


図1 研究背景の概略

- 利点:
- 少数パラメータで行動特性を記述可能
 - 潜在的な計算過程を明示的に表現・推定可能

- 利点:
- 履歴の影響を明示的に表現
 - 行動の統計的構造（過去の経験と現在の行動の関係）が理解しやすい
 - パラメータ推定が容易

一方、行動データ分析には過去の報酬や選択を説明変数とした回帰モデル等の統計モデルを用いた伝統的な分析手法も使われている（Lau & Glimcher, 2008）。統計モデルによる分析手法はデータの統計的構造を直接的に表現するため、その結果が理解しやすいという長所がある（図 1 下側）。計算論モデルと統計モデルは同じ選択データに対し適用可能でありながら、独立した分析手法として用いられていた。統計モデルと計算論モデルの関係が明らかになれば、計算論モデルのパラメータが反映している行動の特徴も理解することが容易になると考えられる。

特に近年の計算論モデリングによる研究では、正の RPE（望ましい結果）が得られた場合は負の RPE（期待以下の結果）が得られた場合より学習率（学習の程度を表すパラメータ）が大きくなるという報告がされている（例えば Palminteri et al., 2017）。しかし、そのような非対称な学習率が行動のどのような側面を反映したものは十分に理解されていなかった。

また、計算論モデリングを用いた脳活動の分析においては、例えば強化学習モデルを用いて推定された RPE に対応する活動を示す脳部位の探索が、機能的磁気共鳴画像法（functional magnetic resonance imaging, fMRI）により得られた脳画像を用いて行われている。そのようなアプローチをモデルベース fMRI と呼ぶ。モデルベース fMRI により、精神疾患に関連する脳機能の特徴も検討されている。代表的な研究では、健常者では RPE に対応した活動が見られる部位において、うつ病の患者はその活動が減弱していることなどが示されている（Kumar et al., 2008）。一方で、うつ病の患者でも RPE に対応した活動は減弱していないとする研究もあり（Rutledge et al., 2017）、研究結果は一貫していない。これらの一貫性の欠如は、使用されているモデルの設定や推定の誤差に起因している可能性も考えられる。

2. 研究の目的

本研究は、計算論モデルでとらえられるデータの統計的構造や、それがとらわれていないモ

デルを用いた場合の影響を解明することにより、計算論モデルにより真の行動の特徴をとらえ、さらにそれに対応する脳活動を探るための理論的基盤を構築することを目的とした。具体的には、前述のような学習率の非対称性がどのようにデータの統計的性質として現れるのか、実際の人間の行動がそのような特徴を有しているのかを明らかにすることを目的とした。また、モデルベース fMRI において患者群と健常者群の比較等においてモデルのパラメータ推定が及ぼす影響について明らかにすることも目的とした。

3. 研究の方法

(1) はじめに、これまで提案されてきた選択行動に関する計算論モデルである強化学習モデルと、伝統的な統計モデルであるロジスティック回帰モデル (以下、回帰モデル)、強化学習モデルから得られる脳活動の予測の関係を計算機シミュレーションや理論解析 (モデルの数学的な解析) により検討した。具体的には、確率的報酬学習課題 (図 2) における学習率非対称モデルの動作を計算機上でシミュレートした。この課題では、選択者 (モデル) は二つの選択肢から一つを選ぶ試行を繰り返す。各選択肢に



図2 確率的報酬学習課題

は報酬が与えられる確率が事前に割り当てられており、選択に応じて報酬の有無が決定される。シミュレーションにより得られた選択行動データに対し回帰モデルをフィットし、その回帰係数と強化学習モデルのパラメータの関係を調べた。強化学習モデルと回帰モデルで予測にずれがある場合はそれが計算論モデルのどのような性質によるものかを検討し、適宜モデルを修正しながら対応関係を理論的に検討した。特に、学習率の非対称性を反映するといえる統計的な特徴どのようなものかを検討した。

(2) 強化学習のパラメータである学習率はうつ病患者で小さくなるという報告がある。一方で、うつ病患者の RPE に対する脳活動をモデルベース fMRI で調べた研究の多くでは、健常者とうつ病患者で共通のパラメータが使われていた。このように学習率パラメータの真値に群間で違いがあった場合に、共通のパラメータを使うことは脳活動の推定にどのような影響をもたらすだろうか。その問題を計算機シミュレーションと理論解析を通して検討した。

4. 研究成果

(1) 学習率が非対称となるモデルで生成した選択データに対し、報酬履歴と選択履歴を説明変数として持つロジスティック回帰モデルを適用した結果、学習率の非対称性の効果は、主に選択履歴の効果として現れることがわかった (図 2)。具体的には、正の RPE に対する学習率 (報酬が出

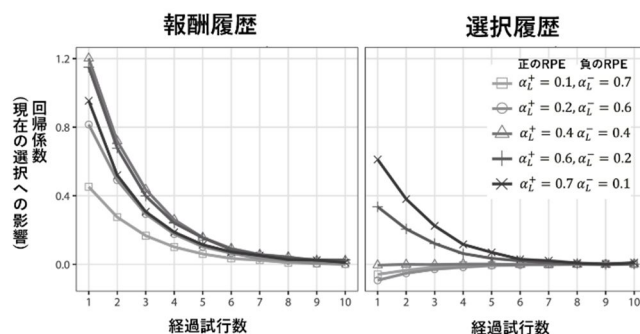


図3 非対称な学習モデルにおける選択履歴や報酬履歴の効果

たときの学習率) が負の RPE に対する学習率より高い場合 (図中、“×”, “+”) は、選択履歴の効果が正になる。これは、報酬が得られたときはその選択傾向を強め、報酬が得られなかったときはそこまで選択傾向を変えないということにより、同じ選択を繰り返す行動が生じるためである。逆に負の学習率が正の学習率より大きい場合は報酬が出なかった経験に対してより重きを置くことにより、選択を切り替える傾向が出る。

この結果は、逆に実際のヒトが同じ選択を繰り返す傾向（固執性）を有している場合、それを表現する要素が含まれていないモデルを適用すると、推定された学習率に非対称性が生じるといふバイアスが生じることを示唆する。本研究では、シミュレーションにより実際にそのようなバイアスが生じることを確認した。先行研究 (Palminteri et al., 2017) の結果は、この推定上のバイアスの影響を受けている可能性がある。

この可能性を検討するために、実際の選択行動データに対し、固執性を含むモデル、および固執性を含まないモデルを適用した。選択行動データとしては Palminteri et al. (2017)の公開データや、同様の実験課題を用いてオンラインで収集したデータを用いた。その結果、それらの選択行動データには非対称な学習率を持つモデルではなく選択の固執性のみを持つモデルが良く適合することを明らかにした。

さらに、モデルの詳細な分析の結果、学習率の非対称性は、現在の選択に及ぼす影響において、過去の報酬の間に交互作用を生じさせることが明らかになった。具体的にはこの交互作用とは、2 試行前の報酬の影響の強さは、1 試行前の報酬の有無によって変わる、というものである。この性質に着目して、学習率に非対称性があるか否かをデータからロジスティック回帰モデルをもとに検討する分析手法を提案した。この手法をオンライン実験で得たデータに適用したところ、そのような交互作用は認められなかった。その結果もまた、学習率の非対称性よりも同じ選択を繰り返す固執性の方がデータをよく説明するというを示唆している。

(2) 前述のように、うつ病患者の健常者のモデルベース fMRI による脳活動の比較においては、学習率などの強化学習パラメータは全参加者で共通であると仮定して分析が行われることが多い。一方、うつ病の患者は学習率が健常者よりも小さくなることが報告されている。そのような学習率の違いを無視してモデルベース fMRI を行った場合に、RPE に対応する脳活動の推定にどのような影響があるかをシミュレーションにより検討した。その結果、真の学習率に差があるグループ間で共通の学習率を用いた場合は、RPE を反映する程度の推定値は学習率が低いグループ（うつ病の患者）が小さくなるというバイアスが生じることがわかった。このバイアスにより、実際は RPE が脳活動に反映される程度は患者と健常者で違いがなくとも、患者の方が RPE 反応が減弱していると結論づけられることになりうる。

また、強化学習モデルで選択行動を分析した研究では、選択していない行動についても価値が減衰していくとする忘却効果ありのモデルが行動をよりよく説明することが示されている (Toyama et al., 2019)。その一方、モデルベース fMRI による研究はほとんどが忘却効果のない（選択された行動の価値はそのまま変化しない）モデルが用いられていた。さらに、その忘却効果は、抑うつ傾向が高い個人ほど大きいという報告もある (Toyama et al., 2019)。そこで、忘却率にうつ病患者と健常者で差がある状況において忘却過程が含まれていないモデルを用いるというモデル誤設定がもたらす影響もシミュレーションで検討した。その結果、ここでもうつ病の患者は RPE に対応する脳活動が過小評価されるというバイアスが生じることがわかった。

本研究の結果は、真の計算プロセスに群間差、または個人差があるときに、それらを適切にモデルに含めないと、そのモデルより得られた脳活動の推定値にはバイアスが生じ、実際には差がないにも関わらず差があるような結果が得られる可能性があることを示している。

以上の一連の成果は、これまでの計算論モデリングを通して得られてきた知見に見直しを迫るとともに、よりの確かな計算過程をとらえるための枠組みを提示したものと見える。

<引用文献>

Wilson, R. C., & Collins, A. G. (2019). Ten simple rules for the computational modeling of behavioral data. *eLife*, 8, e49547.

- Lau, B., & Glimcher, P. W. (2008). Value representations in the primate striatum during matching behavior. *Neuron*, 58(3), 451-463.
- Kumar, P., Waiter, G., Ahearn, T., Milders, M., Reid, I., & Steele, J. D. (2008). Abnormal temporal difference reward-learning signals in major depression. *Brain*, 131(8), 2084-2093.
- Palminteri, S., Lefebvre, G., Kilford, E. J., & Blakemore, S. J. (2017). Confirmation bias in human reinforcement learning: Evidence from counterfactual feedback processing. *PLoS Computational Biology*, 13(8), e1005684.
- Rutledge, R. B., Moutoussis, M., Smittenaar, P., Zeidman, P., Taylor, T., Hrynkiewicz, L., ... & Dolan, R. J. (2017). Association of neural and emotional impacts of reward prediction errors with major depression. *JAMA Psychiatry*, 74(8), 790-797.
- Toyama, A., Katahira, K., & Ohira, H. (2019). Reinforcement learning with parsimonious computation and a forgetting process. *Frontiers in Human Neuroscience*, 13, 153.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 Sugawara Michiyo, Katahira Kentaro	4. 巻 11
2. 論文標題 Dissociation between asymmetric value updating and perseverance in human reinforcement learning	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 3574
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-020-80593-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Katahira Kentaro, Toyama Asako	4. 巻 17
2. 論文標題 Revisiting the importance of model fitting for model-based fMRI: It does matter in computational psychiatry	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 PLOS Computational Biology	6. 最初と最後の頁 e1008738
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1371/journal.pcbi.1008738	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Zhu Jianhong, Hashimoto Junya, Katahira Kentaro, Hirakawa Makoto, Nakao Takashi	4. 巻 16
2. 論文標題 Computational modeling of choice-induced preference change: A Reinforcement-Learning-based approach	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 PLOS ONE	6. 最初と最後の頁 e0244434
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1371/journal.pone.0244434	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 菅原 通代、片平 健太郎	4. 巻 38
2. 論文標題 強化学習における認知バイアスと固執性 選択行動を決めているのは過去の“選択の結果”か“選択そのもの”か？	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 基礎心理学研究	6. 最初と最後の頁 48～55
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.14947/psychono.38.5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Katahira Kentaro, Kunisato Yoshihiko, Okimura Tsukasa, Yamashita Yuichi	4. 巻 96
2. 論文標題 Retrospective surprise: A computational component for active inference	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Mathematical Psychology	6. 最初と最後の頁 102347 ~ 102347
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jmp.2020.102347	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Oba Takeyuki, Katahira Kentaro, Ohira Hideki	4. 巻 10
2. 論文標題 The Effect of Reduced Learning Ability on Avoidance in Psychopathy: A Computational Approach	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Frontiers in Psychology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fpsyg.2019.02432	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Katahira Kentaro	4. 巻 87
2. 論文標題 The statistical structures of reinforcement learning with asymmetric value updates	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Mathematical Psychology	6. 最初と最後の頁 31 ~ 45
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jmp.2018.09.002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Toyama Asako, Katahira Kentaro, Ohira Hideki	4. 巻 91
2. 論文標題 Biases in estimating the balance between model-free and model-based learning systems due to model misspecification	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Mathematical Psychology	6. 最初と最後の頁 88 ~ 102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jmp.2019.03.007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Toyama Asako, Katahira Kentaro, Ohira Hideki	4. 巻 13
2. 論文標題 Reinforcement learning with parsimonious computation and a forgetting process	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Frontiers in Human Neuroscience	6. 最初と最後の頁 153
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fnhum.2019.00153	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計5件(うち招待講演 1件/うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Sugawara, M. & Katahira, K.
2. 発表標題 Validation of cognitive bias represented by reinforcement learning with asymmetric value updates
3. 学会等名 The Multi-disciplinary Conference on Reinforcement Learning and Decision Making (RLDM2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toyama, A., Katahira, K., & Ohira, H.
2. 発表標題 Forgetting Process in Model-Free and Model-Based Reinforcement Learning
3. 学会等名 The Multi-disciplinary Conference on Reinforcement Learning and Decision Making (RLDM2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Oshima, S. & Katahira, K.
2. 発表標題 Pseudo-Learning Rate Modulation by the Forgetting of Action Value when Environmental Volatility Changes
3. 学会等名 The Multi-disciplinary Conference on Reinforcement Learning and Decision Making (RLDM2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Oba, T., Katahira, K., & Ohira, H.
2. 発表標題 The learning mechanism of shaping risk preference and relations with psychopathic traits
3. 学会等名 The Multi-disciplinary Conference on Reinforcement Learning and Decision Making (RLDM2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 片平 健太郎
2. 発表標題 行動データの計算論モデリング 統計モデリングとの関係および注意点
3. 学会等名 京都大学MACS (数理と他分野との融合促進のための教育プログラム) セミナー (招待講演)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 片平健太郎	4. 発行年 2018年
2. 出版社 株式会社オーム社	5. 総ページ数 224
3. 書名 行動データの計算論モデリング	

1. 著者名 国里 愛彦、片平 健太郎、沖村 宰、山下 祐一	4. 発行年 2019年
2. 出版社 勁草書房	5. 総ページ数 328
3. 書名 計算論的精神医学	

〔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	中尾 敬 (Nakao Takashi) (40432702)	広島大学・人間社会科学研究科(教)・准教授 (15401)	

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