

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：15401

研究種目：学術変革領域研究(B)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H05170

研究課題名（和文）新自由エネルギー原理の確立

研究課題名（英文）Establishment of new free energy principle

研究代表者

本田 直樹 (Honda, Naoki)

広島大学・統合生命科学研究科(理)・教授

研究者番号：30515581

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 29,400,000円

研究成果の概要（和文）：人間や動物は報酬を合理的に獲得するだけでなく、好奇心によって環境を探索することもある。しかし、このような好奇心に基づく非合理的な行動原理は良くわかっていない。本研究では、自由エネルギー原理に基づき、好奇心の程度に応じた非合理的な行動を記述する新しいモデルを提案した。このモデルに基づき、行動データから認識のあいまいさや好奇心の時間的変化を解読する機械学習法を提案した。これを実際のラットの行動データに適用したところ、ラットはより確実な選択肢に固執する保守的な選択を反映して負の好奇心を持つこと、認識のあいまいさによって好奇心のレベルが上昇することがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、行動データから認識のあいまいさや報酬と好奇心との葛藤を定量的に解読する機械学習法を開発した。本手法により、これまで定量的に評価することができなかった心の揺れやあいまいな認知を数値化することが可能となるため、神経活動データと統合することで、どの脳部位がどういった神経活動パターンを示すとき心の葛藤が解消されるのかなどを研究することが可能となる。また、精神疾患や認知症における意思決定の歪みを定量的に評価することが可能となるため、将来的な医学応用も期待される。

研究成果の概要（英文）：Humans and animals not only acquire rewards rationally, but also explore their environment through curiosity. However, the principle of curiosity-driven irrational behavior is not well understood. In this study, based on the free energy principle, we proposed a new model which describes irrational behavior based on the degree of curiosity. Based on this model, we developed a machine learning method to decipher the temporal changes in recognition ambiguity and curiosity from behavioral data. Applying this to actual rat behavioral data, we found that rats have negative curiosity reflecting conservative choices to stick to more certain alternatives, and that the level of curiosity increases with cognitive ambiguity.

研究分野：データ駆動生物学

キーワード：葛藤 自由エネルギー原理 好奇心 報酬 機械学習

## 1. 研究開始当初の背景

我々は一体何を基準に認識・意思決定を行っているのだろうか?この解明に向けて、これまで数理系の研究者たちによって、ベイズ脳仮説や強化学習、それらを統合した自由エネルギー原理などが提案され、認識・意思決定の指導原理としての役目を果たしてきた。ここで注意すべきなのが、全ての理論において、最適性・合理性が仮定されていることである。これは、理論としては当たり前の原則のように思える。しかし、最適原理に従って学習を行った場合、学習後の環境が変化すると、改めて価値関数を塗り替えなければならない。こうした最適化のアプローチは、環境変化に対して脆弱である。

変化する環境に対して、我々ヒトや動物はとても興味深い戦略を立てている。一般的に、脳は素晴らしい計算能力を持つとされている。しかし、実際には、脳が持つ計算資源には限りがある。脳が完全な合理性を達成することは原理的に困難であり、このことを限定合理性と呼ぶ。ヒトや動物は、初めから自らの能力の限界を知り、対峙する環境に対して適時、最適化を行っている。環境が変化し、予測誤差が発生すると行動を切り替えることで、環境の変化に応じた適応戦略を身に付けている。つまり、ヒトや動物は、複数の葛藤した目的をバランスさせ、予測のあいまいさや誤差に応じて、最適化の目標を切り替えている。

## 2. 研究の目的

そこで本研究では、自由エネルギー原理を拡張することで、限定合理性を考慮した新自由エネルギー原理を確立する。この新しい理論を基にして、「動物の知覚・行動の時系列データ」から脳内情報処理の内部変数(予測に対する自信・好奇心・葛藤・リスク指向)の挙動を機械学習によって推定する逆自由エネルギー原理法を開発する。

## 3. 研究の方法

### 心の葛藤を表現する新しいFEPの確立

従来のFEPを拡張することで、動物の認識および意思決定に最適性・合理性を仮定しない新しいFEPの理論を確立する。葛藤を伴う認識や意思決定を表現するため、従来のFEPに対して「時間的に変動するメタパラメータ」を導入する。認識とは外界の推定のことであり、時々刻々と得られる観測から推定を更新していく逐次ベイズ推定としてモデル化する。その際、観測と信念(これまで認識)どちらを優先するべきかの葛藤を学習効率の制御メタパラメータの変動として定式化する。

### 心の葛藤をデータ駆動的に解釈する機械学習法の開発

確立する新しい自由エネルギー原理をもとに、実験で取得される「動物の行動時系列データ」から心の葛藤を推定する機械学習法の開発を行う。具体的には、上で導入した葛藤を司るメタパラメータの変動を、動物行動データから推定するための機械学習法(逆自由エネルギー原理法)を開発する。まずは、逆自由エネルギー原理を用いて、観測に基づく外界への認識の更新から行動選択へと至るプロセスを記述する発展方程式を導出する。しかし、実際の動物行動における葛藤状態は未知である。そこで、動物の行動時系列データから葛藤を司るメタパラメータを推定するために、発展方程式を順モデルとした状態空間モデルを定式化する。粒子フィルタ法およびEMアルゴリズムによって、実際の行動データから葛藤を司るメタパラメータの変動の推定を行う。

## 4. 研究成果

### (1)行動タスク：スロットマシン課題

本研究では、報酬と好奇心との葛藤が生じる行動として、バンディット課題に注目した。この課題では、動物は目の前にある2つのバンディットのうちの一つを選び、その結果として確率的に報酬が得られる。また動物はバンディットの報酬確率を知らず、また報酬確率自体も時間的に変化する。この課題において、1つのバンディットを繰り返し選択すると、そのバンディットの報酬確率を正しく認識することができるようになる。しかし、もう片方のバンディットは選ばれていないため、その報酬確率の認識はどんどん曖昧になってしまう。そのため、あまり選ばれなかったバンディットに対して好奇心が湧き、報酬確率を知りたくなることが予想される。つまり、このバンディット課題を用いることで、「報酬に対する欲求」と「環境(報酬確率)を知りたいという好奇心」との葛藤を伴う行動データを取得することができるのである。

### (2)ReCUモデルの提唱

我々は自由エネルギー原理を拡張することで、心の揺れ・葛藤を伴う意思決定のモデルとして「Reward-Curiosity(ReCU)モデル」を構築した。ReCU モデルでは、それぞれのバンディットを選んだときに得られる“報酬”と“情報量”の期待値を見積もり、それらの重み付け和によって、どちらを選択すべきか決断する。報酬と好奇心との葛藤を記述するため、情報量に対する重みを「好奇心を調整するメタパラメータ」として導入したことが本モデルの特徴となっている。このモデルによって、動物が認識している報酬確率やその確信度(=自信)に基づいて、意思決定する様子をシミュレーションすることが可能になった。さらに、報酬や好奇心の度合いに応じて、以下の3つの異なる行動様式を表現することができる。

- ・報酬が大きいとき : 報酬に対する貪欲な行動
- ・好奇心が正に大きいとき : 不確実性を好む探索的な行動
- ・好奇心が負に大きいとき : 不確実性を嫌う保守的な行動

これらの結果から、好奇心は私たちヒトや動物の意思決定に大きな影響を及ぼし、しばしば非合理的な行動を引き起こすことが示された。

### (3)行動データから心の揺れ・葛藤を解読

次に、ReCU モデルに基づいて、行動データから心理状態の時間変化を読み解く手法「逆自由エネルギー原理法」を開発した。本手法では、目に見えない心理状態の時間変化をベイズ推定により読み解くため、粒子スモーカーと呼ばれる機械学習を用いた。本手法をラットのバンディット課題の行動データに適用したところ、ラットは真の報酬確率を完全に認識しているわけではないものの、報酬確率の増減は認識していることが明らかとなった。また、認識に対する自信は選択すればするほど増加し、逆に選択しないと減少することが分かった。

興味深いことに、ラットの好奇心の値はほとんどの試行で「負」とであると推定された。すなわち、実験で用いたラットは報酬確率の認識があいまいなバンディットを避け、認識が明確なバンディットを好んで選択する、保守的な性格を有するということである。この保守的な行動は、動物が報酬を安定して得ようとするためのものと解釈することができる。

また、報酬確率の変化に伴って、好奇心は上昇することが分かった。この結果は、動物は環境の変化を素早く認識し、好奇心を適応的に制御していると解釈することができる。さらには、推定した好奇心と認識とを比較したところ、ラットは報酬確率の認識があいまいになると、好奇心のレベルを積極的に上昇させることが分かった。このように、動物が現在の認識と不確実性の度合いに応じて、好奇心を適応的に制御していることを定量的に示した報告は、これまでに例がなく、重要な成果と言える。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 本田 直樹	4. 巻 49, 3
2. 論文標題 心の揺らぎ・非合理性のデータ駆動的解読	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 メディカル・サイエンス・ダイジェスト	6. 最初と最後の頁 114-117
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 Konaka Yuki, Naoki Honda	4. 巻 3
2. 論文標題 Decoding reward?curiosity conflict in decision-making from irrational behaviors	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nature Computational Science	6. 最初と最後の頁 418 ~ 432
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s43588-023-00439-w	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 Hiraga Takahiro, Yamada Yasufumi, Kobayashi Ryo	4. 巻 18
2. 論文標題 Theoretical investigation of active listening behavior based on the echolocation of CF-FM bats	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 PLOS Computational Biology	6. 最初と最後の頁 e1009784
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1371/journal.pcbi.1009784	査読の有無 無
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 Yoshido Kana, Naoki Honda	4. 巻 26
2. 論文標題 Adaptive discrimination between harmful and harmless antigens in the immune system by predictive coding	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 iScience	6. 最初と最後の頁 105754 ~ 105754
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.isci.2022.105754	査読の有無 無
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 Nakamuta Asahi、Yoshido Kana、Naoki Honda	4. 巻 5
2. 論文標題 Stem cell homeostasis regulated by hierarchy and neutral competition	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Communications Biology	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s42003-022-04218-7	査読の有無 無
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 -

〔学会発表〕 計2件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Honda Naoki
2. 発表標題 Data-driven decoding of mental conflict in decision-making
3. 学会等名 NEURO2022 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Honda Naoki
2. 発表標題 Decoding reward-curiosity conflict in probabilistic bandit task
3. 学会等名 International free energy principle workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔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	山田 恭史  (Yamada Yasufumi)  (80802561)	広島大学・統合生命科学研究科(理)・助教    (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
---------	---------