

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K11948

研究課題名（和文）真性粘菌変形体が有する自律的行動選択メカニズムの解明とその AI への応用

研究課題名（英文）Elucidation of the mechanism of autonomous behavioral choice by Physarum plasmodium and its application to AI

研究代表者

白川 智弘 (Shirakawa, Tomohiro)

長岡技術科学大学・工学研究科・准教授

研究者番号：60582905

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、1. 真性粘菌変形体の自律的な行動選択のメカニズムを実験によって解明し、2. 現象をモデル化することにより工学的に応用可能な形式として表現し、3. それを AI に応用し、変形体の自律性を AI に実装するという3段階の計画を、3年間の研究期間の各年度に実施した。その結果、粘菌がその行動ルールを変える際に発生する現象の観察、その遺伝子制御ネットワークとしてのモデル化及び理論的な分析の実施に成功した。一部計画を変更し理論的な分析に注力したため AI 実装には至らなかったものの、将来の実装のための十分な準備は整っており、成果の量としては元々の計画に比して同等以上のものが得られている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

生物の情報処理に学びそれをコンピューティングに応用しようとする Bio-inspired Computing の分野ではこれまで様々な研究が行われているが、生物の生物らしい特徴を直接的に計算に応用した例、もしくはそれを AI 実装した例はほとんど存在していない。一方、本研究は生物の情報処理メカニズムに関する実験的観察から直接的に AI 実装に至るまでの道筋を付けたという点で、今後の同分野の発展に資するところが大きいと思われる。

研究成果の概要（英文）：In this research project, a three-stage plan was implemented in each year of the three-year research period: 1) to elucidate the mechanism of autonomous behavior selection of Physarum plasmodium, 2) to express the phenomenon in an engineeringly applicable form by modeling it, and 3) to apply it to AI and implement the autonomy of the organism in AI. The results showed that the slime molds are able to control their behavior. As a result, we succeeded in observing the phenomena that occur when slime molds change their behavioral rules, modeling them as a gene regulatory network, and conducting a theoretical analysis. Although we were not able to implement AI because we changed some of our plans and focused on theoretical analysis, we are well prepared for future implementation, and the amount of achievement we have obtained in this project is equal to or greater than that of our original plans.

研究分野：知能情報学

キーワード：真性粘菌変形体 生物物理学 生物計算 意思決定 人工知能

1. 研究開始当初の背景

真性粘菌変形体は単細胞多核の巨大アメーバである。変形体は生物としては最も単純な単細胞生物であるにも関わらず、化学物質、光、温度、電磁気、重力など、多様な刺激に対する応答性を有しており、それらの情報に基づいて環境に適応する。近年、このような能力を有する変形体は、生物の適応能力、能動性、自律性などを応用した生物計算のモデルとして注目を集めている。2000年代以降の研究により、変形体は迷路の最短経路を求める能力 (Nakagaki et al., *Nature*, 2000) や、ネットワークの最適化能力 (Shirakawa et al., *Biophys. Chem.*, 2007) などを有することが示されており、これらを応用した経路計算のソルバーも提案されている (Tero et al., *Science*, 2010)。しかしながら、これまでの研究の多くは定常的な環境におけるある種の最適化に関するものである。生物計算においては生物の特性を分析、応用し、新しい計算のフレームワークをもたらすことが期待されているにも関わらず、自律性などの生物の特性が顕著となる状況での変形体の行動を扱った研究は数少ない。それに対し研究代表者らは、変形体における学習現象 (Shirakawa et al., *Nano. Com. Net.*, 2011) や、刺激-応答関式では説明できないような、刺激に対する応答の多様性 (Shirakawa et al., *Proc. of ICNAAM2016*, 2017) など、変形体が環境に応じ、状況ごとに行動を変える様子を観察した結果、変形体を「生物自律性そのもののモデル」として分析するという着想を得た。本研究課題では、「変形体が自律的に行動ルールを変更する現象」を、生物自律性の典型的な例として捉え、それを観察、分析し、モデル化することを試みた。

本研究課題は以下の予備実験を起点とした。この実験では、変形体をプラスチックフィルム(忌避物質)内の閉空間に閉じ込め、脱出に至るまでの過程を観察した。変形体の分泌物は自己忌避物質であるため、時間経過により分泌物が蓄積され、脱出に至る。しかし、この実験の結果、脱出までの所要時間は個体ごとに大きく異なった。これは、同じ細胞から実験の直前に切り取ってきたクローン個体間で発生した差異である。つまり、忌避物質の分泌、蓄積の状況において個体間に差異が発生することは考えにくく、従って忌避物質の濃度が一定の閾値に達すると脱出行動が誘導されるという関式では説明ができない。さらに、脱出の直前には必ず、変形体の各部位の厚み振動(情報伝達を担っている)が細胞全体で強く同調する現象が観察された。通常時においては変形体が忌避物質と接するとその部分の厚み振動の周波数は低下し、それにより忌避行動が誘導されるが、上記の同調現象の発生後は忌避物質に接することによる厚み振動の周波数の低下が発生しなくなった。このような応答性の変化が閉所脱出を可能にしていると考えられる。つまり、閉所からの脱出は、確率的に発生するものでもなく、振動状態を変えること(細胞全体の振動の活性化)により、忌避物質に対する感受性・応答性を変形体が自ら変更(抑制的な入力に対する応答を抑制)して発生するものであると言える。本研究課題ではこのような変形体の自律的な行動選択に着目し、「変形体の自律性はどのようなメカニズムで実現されているのか。」という問いに答えることを試みた。

2. 研究の目的

以上を踏まえ、本研究は、**1.** 変形体の自律的な行動選択のメカニズムを実験によって解明し、**2.** 現象をモデル化することにより工学的に応用可能な形式として表現し、**3.** それを AI に応用し、変形体の自律性を AI に実装することを目的とした。近年、生物を用いる **bio-computing** や生物の仕組みを模した **bio-inspired computing** は、生物の適応能力、自律性、能動性、文脈に依存した解釈など、通常のコンピューティングにおいては実現、実装が難しい機能を実現するための新しい計算のフレームワークをもたらすものとして期待されている。しかしながら多くの研究は、生物が有する、進化の果てに洗練された機構を真似るもの(ニューラルネットワークや遺伝的アルゴリズムなど)や、物質としての生物・生体分子が有するアナログ性や超並列性を利用するもの(従来の粘菌計算機や DNA コンピューティングなど)であり、生物自律性などの「生物らしさそのもの」を利用しようとした研究は数少ない。それに対し、生物の自律性そのものを比較的単純な実験から読み取り、それを形式化することを通じて実際の AI に応用しようとする点に、本研究課題の独自性と創造性がある。

3. 研究の方法

前述の通り、本研究は **1.** 変形体の自律的な行動選択のメカニズムを実験によって解明し、**2.** 現象をモデル化することにより工学的に応用可能な形式として表現し、**3.** それを AI に応用し、変形体の自律性を AI に実装するという3段階の計画で実施された。

1. においては以下の実験が実施された。閉所全体を被覆する変形体を格子で区切り、非線形振動子の集合体と見なして振動の解析を行った。通常時と脱出前後における各振動子の振動状態並びに振動子間の同調状態などを比較、分析することにより、「忌避物質の回避」から「忌避物質の積極的無視」への自律的ルール変更が、具体的にはどのような振動状態の変化や振動子同士の協調によって実現されているのかを明らかにした。

2. については、以下の通り、シミュレーションに基づく研究が実施された。即ち、**1.** の実験

によって解明された変形体振動子の特性を、遺伝子制御ネットワークモデル (Alon, Chapman and Hall/CRC, 2006) を用いてモデル化した。これにより、変形体による自律的な行動ルールの変更を実現するためのメカニズムを、分子装置のモデルにより表現した。

3. について、元々はここまで得られた結果を AI 実装することを計画していたが、2. で得られた結果に関してより深い理論的な分析が必要であることが明らかになったため、計画を変更し、分析を実施した。具体的には、具体的には、2. のモデルをより一般的に、外部信号に対する応答が緩やかに変動する、2 変数の相互抑制系モデルとして再構築し、ノイズに由来する双安定性をより一般的に研究した。

4. 研究成果

前述の通り、本研究は 1. 変形体の自律的な行動選択のメカニズムを実験によって解明し、2. 現象をモデル化することにより工学的に応用可能な形式として表現し、3. それを AI に応用し、変形体の自律性を AI に実装するという 3 段階の計画で実施されたが、それぞれのステップにおける成果は以下の通りである。

1. の実験は計画通り実施された。具体的には、変形体をプラスチックフィルム(忌避物質)内の閉空間に閉じ込め、脱出に至るまでの過程を観察する実験を実施した。さらに、閉所全体を被覆する変形体を格子で区切り、非線形振動子の集合体と見なして厚み振動の解析を行った。ここで、変形体の厚み振動は、細胞運動の駆動力の供給源であると共に、細胞の内部状態を反映する。この実験では、プラスチックフィルムを忌避するがため閉所から脱出できない状態(脱出前)と、忌避をやめ脱出を開始した後の状態(脱出中)を比較することにより、変形体の厚み振動(内部状態)におけるどのような変化が忌避応答のルールの自律的な変更と連動しているのかを分析した。結果、脱出前の状態に比して、脱出中の変形体の各格子間の相互情報量は有意に増加していることが明らかとなった。即ち、脱出(応答ルールの変更)に先行して変形体の各部位間の同調性は強くなり、かつ、そのような同調は細胞全体に渡って発生していることが明らかとなった。

また、続く 2. の研究も計画通り実施された。1. の実験では、変形体をプラスチックフィルム(忌避物質)内の閉空間に閉じ込め、脱出という行動選択に至るまでの過程を観察する実験を実施したが、この実験を踏まえ、2. のモデル化では、実験における変形体の忌避物質に対する応答性を再現するためのシンプルな遺伝子制御ネットワークモデルを構築した。このモデルは変形体の栄養状態(実験系に長期に渡り閉じ込められることによる飢餓)並びに忌避物質の濃度(実験系内に蓄積される、自らの分泌物に対する忌避性)を入力とし、移動の有無、即ちその場に留まるか脱出するかを出力とする。このモデルはその出力において弱い二峰性を示し、かつその二峰性においては通常の双安定性ではなく入力ゆらぎ自身が二峰的構造に対し本質的な寄与を為しているということが明らかとなった。このモデルにより変形体の行動選択を少なくとも部分的には説明することができたと言える。

3. については計画を変更し、更なる理論的な分析が実施された。2. のモデルは実験における変形体の忌避物質に対する応答性を再現するためのシンプルな遺伝子制御ネットワークモデルであるが、このモデルは変形体の栄養状態並びに忌避物質の濃度を入力とし、移動の有無、即ちその場に留まるか脱出するかを出力とする。2. の研究において、このモデルはその出力において弱い二峰性を示し、かつその二峰性の出現には通常の双安定性ではなく入力ゆらぎ自身が本質的な部分で寄与していることが明らかとなった。一方、モデルは実験結果を再現するものではあったが、より一般的なパラメータ領域において、ゆらぎが出力に対しどのような影響を与えているかについては不明であった。そのため、3. における AI 実装を実施するために、2. で形式化されたモデルに関し、理論的な理解を深める必要が発生した。そこで 3. における計画を一部変更し、2. のモデルに関する理論的研究を実施した。具体的には、2. のモデルをより一般的に、外部信号に対する応答が緩やかに変動する、2 変数の相互抑制系モデルとして再構築し、ノイズに由来する双安定性をより一般的に研究した。結果、入力変数の周辺定常確率密度に関して、それが一峰性から二峰性への遷移をもたらすための一般的条件を明らかにすることができた。現在この結果に関する論文を投稿中であり、また、この結果に基づく AI の開発が進行中である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Tomohiro Shirakawa, Hiroshi Sato, Kazuki Ishimaru	4. 巻 -
2. 論文標題 Observation of Autonomous Behavioral Selection in Physarum Plasmodium	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Logica Universalis	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） なし	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 Yukio-Pegio Gunji, Taichi Haruna	4. 巻 -
2. 論文標題 Concept Formation and Quantum-like Probability from Nonlocality in Cognition	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Cognitive Computation	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） 10.1007/s12559-022-09995-1	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 Hiroyuki Ohta, Kuniaki Satori, Yu Takarada, Masashi Arake, Toshiaki Ishizuka, Yuji Morimoto, Tatsuji Takahashi	4. 巻 143
2. 論文標題 The asymmetric learning rates of murine exploratory behavior in sparse reward environments	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Neural Networks	6. 最初と最後の頁 218-229
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.neunet.2021.05.030	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 Tomohiro Shirakawa, Hiroshi Sato, Michinori Muro, Ryusuke Konagano, Ryota Ohno and Keita Inoue	4. 巻 15
2. 論文標題 Magnetotaxis of the Physarum Plasmodium and Construction of a Magnetically Controlled Physarum Logic Gate	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Unconventional Computing	6. 最初と最後の頁 245-258
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 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 Tomohiro Shirakawa, Yukio-Pegio Gunji, Hiroshi Sato and Hiroto Tsubakino	4. 巻 15
2. 論文標題 Diversity in the Chemotactic Behavior of Physarum Plasmodium Induced by Bi-modal Stimuli	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Unconventional Computing	6. 最初と最後の頁 275-285
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 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12件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 家頭裕也, 白川智弘
2. 発表標題 日本人 Twitter ユーザー 2,600 万人を対象とする大規模属性分析
3. 学会等名 計測自動制御学会システム・情報部門講演会 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 阿部翔大, 白川智弘
2. 発表標題 ツイートテキストの単語埋め込みに基づく意味論的ユーザーリコメンドシステムの開発
3. 学会等名 計測自動制御学会システム・情報部門講演会 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 春名太一
2. 発表標題 二重忘却系について
3. 学会等名 第36回共創システム部会研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 春名太一, 中嶋浩平
2. 発表標題 Echo State Networkにおける雑音誘起記憶
3. 学会等名 第23回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 上田 真央, 佐藤 浩, 白川 智弘
2. 発表標題 認知バイアスを利用した Naive Bayes による少量の異常データからの産業機械音異常分類
3. 学会等名 計測自動制御学会第 64 回システム工学部会研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 有村 柊一, 佐鳥 玖仁朗, 神谷 匠, 吉田 豊, 高橋 達二, 太田 宏之
2. 発表標題 報酬量の分散に対する学習率の非対称化による適応
3. 学会等名 情報処理学会第 84 回全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 上田 真央, 佐藤 浩, 白川 智弘
2. 発表標題 人間の認知バイアスを利用したナীবベイズ分類器による産業機械音異常分類の性能向上
3. 学会等名 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 太田 宏之, 佐鳥 玖仁朗, 宝田 悠, 荒毛 将史, 守本 祐司, 石塚 俊晶, 高橋 達二
2. 発表標題 マウスの行動探索における報酬分布に依存した学習率の調整
3. 学会等名 人工知能学会第 34 回全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐鳥 玖仁朗, 太田 宏之, 宝田 悠, 荒毛 将史, 守本 祐司, 石塚 俊晶, 高橋 達二
2. 発表標題 非対称な学習からのリスク態度の反射効果
3. 学会等名 2020 年度日本認知科学会第37回大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石丸和樹, 佐藤浩, 白川智弘
2. 発表標題 真性粘菌変形体における自律的行動選択メカニズムの分析
3. 学会等名 計測自動制御学会第 63 回システム工学部会研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 太田 宏之, 荒毛 将史, 佐鳥 玖仁朗, 宝田 悠, 高橋 達二, 佐藤 泰司, 守本 祐司, 石塚 俊晶
2. 発表標題 行動柔軟性を評価するための5本腕バンディットタスク
3. 学会等名 第 94 回日本薬理学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐鳥玖仁朗, 吉田 豊, 神谷 匠, 太田宏之, 高橋達二
2. 発表標題 非対称学習率による報酬確率分布の弁別性向上
3. 学会等名 情報処理学会第 83 回全国大会
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	春名 太一 (Haruna Taichi) (20518659)	東京女子大学・現代教養学部・准教授 (32652)	
研究分担者	太田 宏之 (Ohta Hiroyuki) (20535190)	防衛医科大学校(医学教育部医学科進学課程及び専門課程、動物実験施設、共同利用研究施設、病院並びに防衛・薬理学・講師 (82406)	
研究分担者	佐藤 浩 (Sato Hiroshi) (30295737)	防衛大学校(総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工学群)・電気情報学群・准教授 (82723)	

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
---------	---------