

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 22 日現在

機関番号：82723

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K21685

研究課題名(和文) 真性粘菌変形体における認知的情報処理機構の解明

研究課題名(英文) Analysis on cognitive information processing mechanism of the plasmodium of Physarum polycephalum

研究代表者

白川 智弘 (Shirakawa, Tomohiro)

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・電気情報学群・助教)

研究者番号：60582905

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：真性粘菌の変形体は単細胞多核の巨大アメーバであり、栄養源の間を最短距離で結ぶなど、ある種の計算能力を有していることが知られている。本研究では、単細胞生物である真性粘菌変形体の探索行動並びに意思決定に関して、その行動を認知的情報処理過程としてとらえることにより、細胞における自律性を情報科学的な観点において分析することを試みた。

研究成果の概要(英文)：By analyzing a unicellular organism the plasmodium of Physarum polycephalum in the observation of its exploratory behavior and decision making in terms of cognitive information processing, we tried to investigate the autonomy of the organism and its significance in the information science.

研究分野：知能情報学

キーワード：真性粘菌変形体 探索行動 意思決定

### 1. 研究開始当初の背景

近年、真性粘菌変形体は生物学と情報科学の境界領域において、神経系に依らない計算、記憶、学習の一般的モデルとして注目を集めている。2000年以降の研究により、変形体には迷路の最短経路を求める能力 [1] や、複数のノードから成るネットワークの最適化 [2] など、空間的な最適化を行う能力を有することが示されてきた。さらに近年の研究において、変形体は一定周期で与えられた刺激のリズムを記憶する能力 [3] や、2種類の刺激間の関係を連合学習する能力 [4] など、ある種の記憶、学習能力さえも有することが示された。これらの研究は様々な分野の研究者からの大きな注目を集めており、国際的な場において非常に数多くの論文が発表されている。また、変形体による生物計算を題材としたワークショップや大学間連携プロジェクトなども数多く実施されている。しかしながら、これまでの研究のほとんどは定常的な刺激への応答の結果実現される最適化を観察したものであり、変動する環境に対し変形体がどのように反応し(その結果である意思決定としての)適応的行動を選択しているのかに踏み込んだ研究は、本研究計画課題開始時において少数であった。

### 2. 研究の目的

上記のような状況に対し、変形体における学習現象 [4] 並びにカニツァ錯視に相同な現象の発見 [5] により、世界的にも先進的な実験結果を観察した我々は、変形体を認知モデルの一種と見なして観察を行うという着想を得た。本研究では、変形体が行う情報処理とその結果である応答の認知的側面に着目し、実験及びその結果を基にしたモデル化を行うことにより、変形体が複雑な環境においてどのような情報処理を行い適応しているのかを明らかにすることを試みた。そのために、以下に示すサブテーマを設定し、研究を実施した。

#### (1) サブテーマ1：ジレンマに対する応答の分析と意思決定メカニズムの解明

誘引物質は細胞を誘引し、忌避物質は細胞の忌避応答を誘導する。では、刺激強度が近い誘引物質と忌避物質の混合物は細胞にいかなる応答をもたらすか。変形体の場合、このような混合物に対し、それを誘引物質と見なすか忌避物質と見なすかの二者択一的な応答を示す。つまり、ジレンマを含む環境刺激に対し、それをポジティブな刺激と見なすか、ネガティブな刺激と見なすかの意思決定において分岐が発生する。本サブテーマでは様々な条件でこの現象を観察し、変形体における曖昧あるいは矛盾する刺激に対する意思決定メカニズムを明らかにする。

#### (2) サブテーマ2：学習能力の分析と学習機構の解明

過去の研究において、我々は変形体における連合学習現象を発見した。具体的には、変形体に低温刺激と栄養刺激を同時に与え学習を行わせることにより、本来変形体が忌避する低温刺激に対し誘引される性質を獲得させることができる。本サブテーマでは、学習現象のメカニズムを理解するため、学習効果の刺激強度依存性や学習効果の持続期間を観察し、その結果を基にした遺伝子制御ネットワークモデルを構築することによりその分子メカニズムの詳細を解明する

#### (3) サブテーマ3：探索行動の分析と行動決定メカニズムの解明

我々は、変形体を無刺激かつ均質な開放環境で自由に探索させた場合、その運動パターンには Lévy-flight と呼ばれる探索パターンに似たべき乗パターンが現れることを発見した。本サブテーマでは、この探索パターンをさらに様々な条件で観察することにより変形体の探索行動の詳細を調べると共に、探索の途上で誘引、忌避刺激を受けた場合の探索パターンの変化を調べ、変形体が探索空間についてどのような内部モデルを有しているのかを明らかにする。

### 3. 研究の方法

#### (1) サブテーマ1：ジレンマに対する応答の分析と意思決定メカニズムの解明

誘引物質と忌避物質の混合物に対する変形体の応答を観察する。誘引、忌避物質の刺激強度が近くなるような濃度の場合も、変形体は混合物に対し完全な忌避反応(図1 a)もしくは完全な誘引反応(図1 b)を示し、中間的な応答は見せない。本サブテーマではまず誘引、忌避物質の濃度及び変形体の栄養状態を様々に変えて実験することによってこの応答の性質を分析し、応答の決定要因を明らかにする。

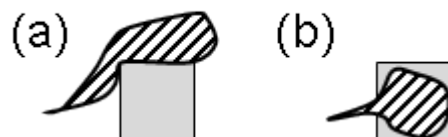


図1. 誘引物質と忌避物質の混合物に対する変形体の応答の模式図。図中斜線部は変形体、四角は混合物を表している。

#### (2) サブテーマ2：学習能力の分析と学習機構の解明

変形体を用いた連合学習実験を実施する。連合学習とは、古典的なパブロフの犬の実験が示す通り、同時もしくは時間的に近接して与えられる複数の刺激の関連性に関する学

習である．[4] の実験では，1枚の寒天培地上に高温（25℃），低温の表面（20℃）を用意し，その境界に変形体を配置した．変形体は正の走温性を持つが，この実験系は低温側のみ栄養源を供することにより，低温刺激と栄養刺激を連合学習させる仕組みになっている．図2に示す通り，この実験により変形体の走性は逆転した．本サブテーマでは刺激強度（温度，栄養濃度）に対し学習成立に至るまでの時間や学習効果の持続時間がどのように変化するかを観察することによって学習メカニズムの特性を分析し，それによって学習に関わる分子装置の性質を探る．

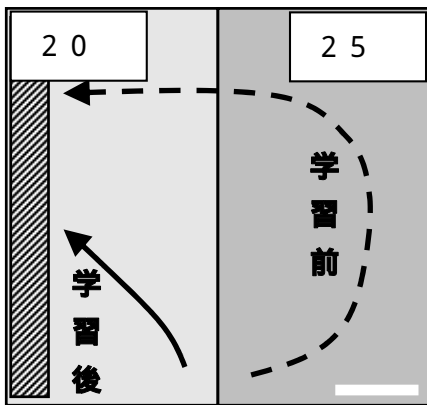


図2．変形体を用いた連合学習実験の模式図．x印は変形体の初期位置，斜線部は栄養源の配置位置を示す．(Bar: 3 cm)

さらに，上記実験の結果を基に，学習モデルを構築する．具体的には既に構築済みのネットワークモデル（図3）に関し，実験結果に即してネットワーク構造の改善及び各反応定数のチューニングを行う．

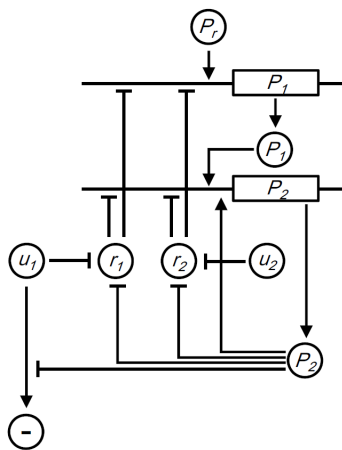


図3．学習機構の遺伝子制御ネットワークモデル．

### (3) サブテーマ3：探索行動の分析と行動決定メカニズムの解明

1 m × 1 m の巨大培地を用いることにより，変形体の探索行動を観察する．予備的な実験では無刺激環境での探索行動においては Lévy-flight 様のべき乗パターンが発生することが既に確認されている．ここではさらに探索の途上において誘引物質もしくは忌避物質を与えることにより，その後の探索パターンがどのように変化するかを観察する．

上記実験の結果に基づき，探索エージェントを用いたモデル化を行う．運動速度，運動方向の傾向性及び誘引，忌避物質に接した後の運動変化のルールをエージェントに実装し，その探索効率をシミュレーションにより評価する．

## 4．研究成果

### (1) サブテーマ1：ジレンマに対する応答の分析と意思決定メカニズムの解明

誘引物質と忌避物質の混合刺激を与えることにより，それに対する変形体の誘引・忌避選択（意思決定）において，その行動に分岐現象が発生していることを観察した．予備実験で得られていたデータにおいては混合物に対し完全に誘引されるか完全に忌避するかのどちらかしか観察されていなかったが，より細かい条件において実験を実施することにより，これらの中間的な挙動も観察された．具体的には，1 cm 四方，厚さ 1 mm の寒天ゲルシートを覆った割合により評価が行われたが，図4に示す通り，いずれの条件においても強く誘引を受けたグループ，強く忌避応答を見せたグループの少なくとも2群へと行動が分岐した．以上の成果は雑誌論文において公表された．

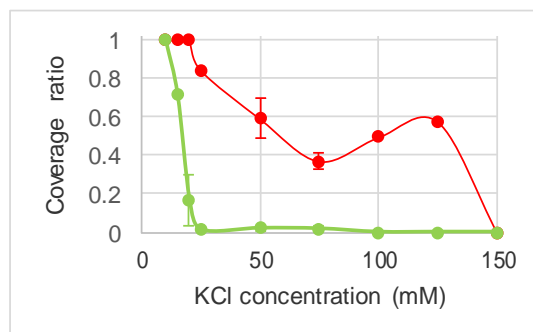


図4．各カリウム濃度（忌避物質）における寒天シートのカバー率．被誘引群（赤色）と忌避群（緑色）の挙動は明瞭に分かれた．栄養源（誘引刺激）の濃度は一定（10 mg/ml）である．

### (2) サブテーマ2：学習能力の分析と学習機構の解明

同実験系を用いることにより，既存の結果を追試することに成功したが，学習の効果がどの程度持続するのかに関しては，現在のと

ころ安定した結果を得られてはいない。今後も同実験を引き続き継続することにより、学習メカニズムの詳細を分析する予定である。

### (3) サブテーマ3：探索行動の分析と行動決定メカニズムの解明

セロファンをベースとする大規模かつ水分等に関して均一な培地を開発することにより、真性粘菌変形体の長期的な探索行動を観察することが可能な実験系を構築することに成功した。これを用いた観察により、シカヤアリなどにおいて見られる効率的な探索パターンである Lévy walk と同型な探索パターンを細胞の探索行動において観察することに成功した。以上の成果の一部は雑誌論文において公表され、また、現在1件の雑誌論文を投稿中である。

#### <引用文献>

- [1] Nakagaki T., Yamada H. and Tóth Á., Nature 407, p.470 (2000)
- [2] Adamatzky A., "Physarum Machines: Computers from Slime Mould", World Scientific (2010)
- [3] Saigusa T., Tero A., Nakagaki T. and Kuramoto Y, *Phys. Rev. Lett.* **100**, 018101 (2008)
- [4] Shirakawa T., Gunji Y.-P., Miyake Y., Nano Com. Net. **2**, pp.99-105 (2011)
- [5] Tani I., Yamachiyo M., Shirakawa T., Gunji Y.-P., *Front. Cell. Infect. Microbiol.* **4**, pp. 1-11 (2014)

#### 5. 主な発表論文等

##### 〔雑誌論文〕(計18件)

Shirakawa T., Sato H., Tsubakino H., Bifurcation in the chemotactic behavior of Physarum plasmodium, Proceeding of the 14th International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics (in press)

Shirakawa T., Sato H., Nishida H., A power law in the exploratory behavior of the Physarum plasmodium, *Artif. Life Robotics* 21, pp. 195-200 (2016), doi: 10.1007/s10015-016-0269-6

##### 〔学会発表〕(計9件)

白川智弘, 生命と不利益, 第17回不利益システム研究会(招待講演)2016年12月9日(京都キャンパスプラザ, 京都府京都市)

白川智弘, 佐藤浩, フラクタル解析に基づく生物の輸送ネットワークの機能評価, SSI2015: 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会 2015, 2015年11月18日(函館アリーナ, 北海道函館市)

白川智弘, 単細胞生物の知性, 2015年度

第5回知能工学部会研究会「賢さの先端研究会」, 第53回システム工学部会研究会(招待講演)2015年7月8日(近畿大学東京センター, 東京都中央区)

##### 〔図書〕(計2件)

Tomohiro Shirakawa, Power Laws of the Physarum Plasmodium in: *Advances in Physarum Machines: Sensing and Computing with Slime Mould*, Springer, pp. 373-394, 2015.

Tomohiro Shirakawa, Atlas of Physarum computing Chapter 5: Basic features of slime mould motility, World Scientific, pp.75-90, 2015.

##### 〔その他〕

ホームページ等

<http://www.nda.ac.jp/~sirakawa/> (研究代表者のウェブサイト)

<http://abbii2016.wixsite.com/home> (本科学研究費により主催された国際会議シンポジウムである ABBII2016: The 2nd International Symposium on Artificial, Biological and Bio-Inspired Intelligence のウェブサイト)

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

白川 智弘 (SHIRAKAWA, Tomohiro)  
防衛大学校・電気情報学群・助教  
研究者番号: 60582905

##### (2)研究協力者

中村 彰男 (NAKAMURA, Akio)  
群馬大学・医学研究科・講師  
研究者番号: 30282388

郡司 幸夫 (GUNJI, Yukio)  
早稲田大学・理工学術院・教授  
研究者番号: 40192570

谷 伊織 (TANI, Iori)  
総合研究大学院大学・学術情報基盤センター・助教  
研究者番号: 70751379

佐藤 浩 (SATO, Hiroshi)  
防衛大学校・電気情報学群・准教授  
研究者番号: 30295737

Andrew Adamatzky  
University of West of England・Unconventional Computing Centre・教授