

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 14 日現在

機関番号：82723

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2012

課題番号：23700187

研究課題名（和文）真性粘菌変形体の計算，記憶，学習能力の解析とその知能情報学的展開

研究課題名（英文）Analysis for the computation, memory and learning abilities of the *Physarum plasmodium* in terms of intelligent informatics

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

研究成果の概要（和文）：真性粘菌 *Physarum polycephalum* の変形体は単細胞多核の巨大アメーバである。近年の研究により，変形体はある種の計算，記憶，学習能力を持つことが示されつつある。本研究では，変形体が有するこれらの能力について，そのメカニズムを明らかにすべく，いくつかの実験が遂行された。実験により，1. 変形体の運動におけるアロメトリー則 2. 新たな走性である走磁性が発見されると共に，3. 連合学習に相当する現象を発見することに成功した。また，実験により観察されたこれらの現象についてのシミュレーションを行うことにより，上記それぞれの現象のメカニズムを理解することに繋がるいくつかの知見が得られた。

研究成果の概要（英文）：The plasmodium of true slime mold *Physarum polycephalum* is a unicellular and multinuclear giant amoeba. Recent studies demonstrated the presence of the abilities of computation, memory and learning in the organism. In this study, we tried to elucidate the mechanism of such phenomena and performed some experiments. As a result, we got following findings: 1. The motility of the plasmodium is ruled by some allometric laws. 2. The plasmodium has magnetotaxis. 3. The plasmodium is capable of associative learning. Furthermore, we found some clues to understand these phenomena by performing some simulations based on our experimental findings.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,000,000	0	3,000,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・知能情報学

キーワード：真性粘菌変形体，学習と知識獲得，生物計算，アロメトリー，走磁性，探索行動

1. 研究開始当初の背景

真性粘菌 *Physarum polycephalum* の変形体は，単細胞多核の巨大アメーバである。変形体は単細胞生物でありながら，計算，記憶，学習能力を持つことが近年明らかにされつつあり，生物学的見地からのみならず，脳科学，人工知能等の研究分野からも注目を集めている。変形体を用いた研究はその数を大きく増してはいるものの，変形体が持つ能力について，それらのメカニズムを探る研究は数少なく，そのため当該分野における研究の多

くは未だ現象論的段階に留まっていた。

2. 研究の目的

1. で述べた状況を踏まえ，本研究では，変形体の持つ能力のメカニズムを明らかにすることを目標としつつ，変形体の計算，記憶，学習能力についての研究を行い，必ずしも神経系の存在に依存しない知能一般の理解を構築することを目的とした。また，細胞が持つ計算，記憶，学習のメカニズムの原理を探ることにより，それらを知能情報学的に

応用することを試みた。

3. 研究の方法

本研究は真性粘菌変形体の運動を様々な環境刺激の元で観察する実験と、それによって得られた知見をモデルで再構成するシミュレーションとの2方向から遂行された。

(1) 変形体は20°Cから30°C程度の温度条件において生存可能であるが、この温度帯においては低温よりも高温を好み、正の走温性を持つ。実験では、変形体を低温条件下でのみ栄養源を得ることができるという環境に長時間（数日から1週間）置くことにより、低温刺激と栄養刺激の両者の関係を連合学習させることを試みた。

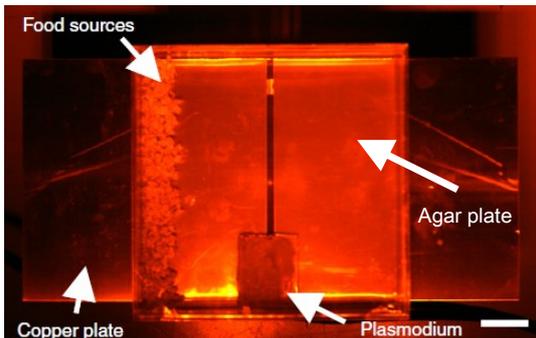


図1. 変形体を用いた連合学習実験の実験系。2つのペルチェ素子を用いることにより、1枚の寒天培地の中に2つの異なる温度環境が用意された。図中、寒天培地の左半分が20°C、右半分が25°Cに設定されている。実験開始時、変形体は実験系の中央部、温度の境界面に設置された。低温部にのみ、栄養源となるオートミールが置かれている。(Bar: 3 cm)

(2) 変形体の運動、探索行動について観察を行うために、変形体を無刺激環境下に置き、運動の進展の様子を長時間に渡り微速度撮影し、それに対する分析を行った。

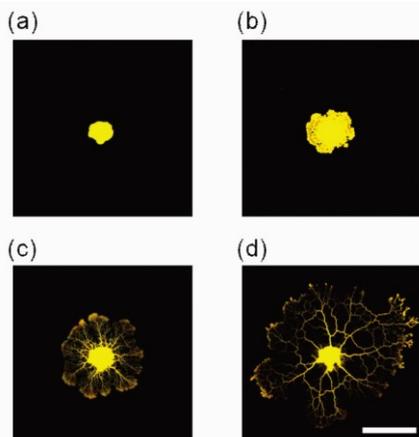


図2. 1.5% 無栄養寒天培地上に植菌された変形体の運動。(a) 植菌直後、(b) 630分後、(c) 850分後、(d) 1130分後。(Bar: 2 cm)

(3) 変形体の運動に対し磁場が与える影響を調査するため、変形体を磁場の中に置き、その運動に対する観察と分析を行った。

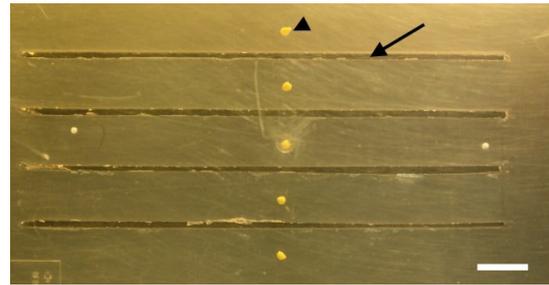


図3. 磁場内での変形体の運動を観察するための実験系。変形体の動きを1次元な経路の中のみ制限するため、寒天培地上に溝を作成した(矢印)。変形体は経路の中央に置かれ、その後経路に沿った運動を行った。この実験系の中で、ほぼ一様な磁場が、図の左側から右側に向かい印加された。(Bar: 3 cm)

(4) 変形体を用いた実験により観察された、変形体が連合学習を行っていると思われる現象について、どのようなメカニズムに依ればそれが実現可能であるのかを調査するため、遺伝子制御ネットワークのシミュレーションを行った。

4. 研究成果

真性粘菌 *Physarum polycephalum* の変形体は、単細胞多核の巨大アメーバである。本研究課題は変形体が有するであろうと予測される計算、記憶、学習能力についてその存在を明らかにすると同時にそのメカニズムを明らかにすることを目的とするものであるが、一連の実験とシミュレーションにより以下のような成果が得られた。

(1) 変形体は、20°Cから30°C程度の温度範囲においては高温に向かう走性を持つが、低温条件(20°C)にのみ豊富な栄養源を準備することにより、変形体に低温の場合のみ栄養源が存在するという条件での連合学習を行わせ、走温性を逆転させることに成功した。即ち変形体に学習を行わせることにより、変形体が従来有している走性を変更することに成功した。また、このような「細胞による学習」を可能とする分子ネットワークは、比較的単純かつ少数のメンバーから成るネットワークによって実現可能であることが示された (*Nano Com. Net.* 2, pp. 99-105, 2011).

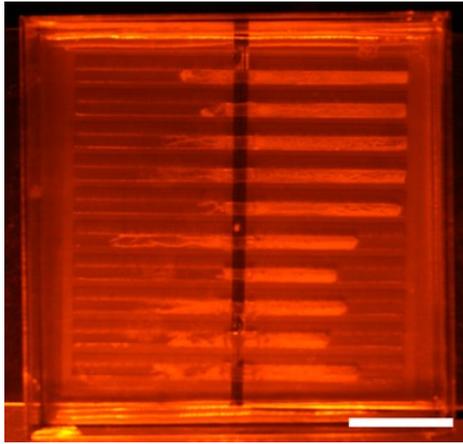


図4. 連合学習実験後の走性の変化を観察するための実験系. 図1と同様に設定された寒天培地上にプラスチックフィルムを切り抜いて作成した1次元状の経路を用意し、その中での変形体の運動を観察した. 図中左側が低温表面, 右側が高温表面である. (Bar: 4 cm)

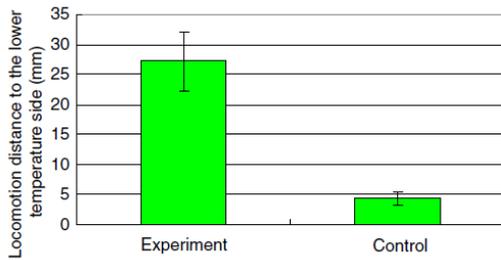


図5. 図4. に示した走性試験の結果. 連合学習後の変形体 (Experiment) は対照群 (Control) のそれに比して, 低温表面に向かう強い傾向を示した.

(2)変形体の細胞運動, 平面探索におけるアロメトリー則が複数発見された. 即ち, 2次元形状の変形体が平面上において被覆する面積は変形体の重量の $3/4$ 乗に比例し, 変形体の運動速度は体長に比例することが示されたが, 原形質流動のダイナミクスに基づきこれらを統合的に解釈可能であることが示された (*Int. J. Artif. Life. Res.* **3**, pp. 22-33, 2012).

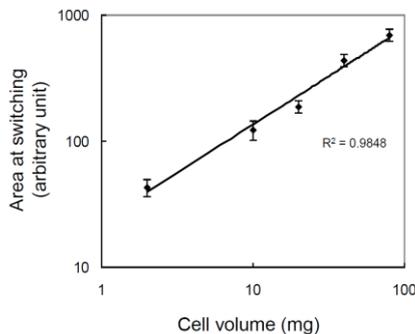


図6. 変形体の重量に対する変形体の面積 (最大値) の両対数プロット. 近似直線の傾きは 0.77 であり, 変形体の面積は細胞重量のおよそ $3/4$ 乗に比例することが示された.

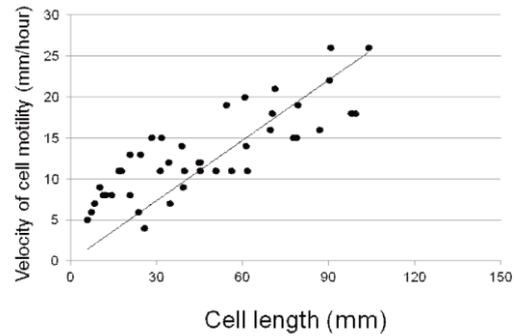


図7. 変形体の体長に対する, 1次元状の経路内における変形体の運動速度. 変形体の運動速度はその体長に比例して増加した.

(3) 変形体における新規な走性を発見した. 即ち, 変形体は走磁性を持ち, 磁場の方向に応じてその運動方向を変えることが明らかとなった. また, このような走磁性を利用することによる, 変形体を用いた論理演算実装の可能性が示唆された (*Proceeding of the 6th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems, and the 13th International Symposium on Advanced Intelligent Systems*, IEEE, pp. 296-300, 2012).

		Intensity of the magnetic field (mT)		
		0.1	0.2	1.0
Cell Weight (mg)	5	N-10	N-0	N-3
		S-0	S-5	S-1
	20	N-0	N-5	N-1
		S-10	S-0	S-4
	80	N-3	N-0	N-3
		S-1	S-4	S-1

図8. 図3に示す実験系の中での変形体の運動方向. 別の実験により変形体は磁力線に沿って運動することが示されたが, N 極, S 極のどちらに向かうかは, 磁場強度及び実験に使用された細胞の重量の両方に依存する形で反転した. 表中 N, S の隣に示す数字がそれぞれ実験において N 極, S 極に向かった変形体の個体数を示しており, 1つの条件で実験に供された個体数はセルの中の数字の和である. N 極に向かう傾向を示した実験条件については緑色, S 極に向かう傾向を示した実験条件については赤色で示している.

(4) (1) で示された変形体の連合学習能力に関してそれを可能にする遺伝子制御ネットワークのシミュレーションを行い, 少なくとも原理的には適切なネットワークを構成することによって細胞による連合学習が可能となることが示された. (*Proceeding of the 16th Asia Pacific Symposium on Intelligent and Evolutionary Systems*, IES2012 Committee, pp. 111-116, 2012)

5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者に

は下線)

[雑誌論文] (計 13 件)

(1) Shirakawa T. and Sato H., "Construction of Molecular Learning Network", *Proceeding of the 16th Asia Pacific Symposium on Intelligent and Evolutionary Systems*, IES2012 Committee, pp.111-116, 2012 (査読付).

(2) Shirakawa T., Konagano R. and Inoue K., "Novel taxis of the *Physarum* plasmodium and a taxis-based simulation of *Physarum* swarm", *Proceeding of the 6th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems, and the 13th International Symposium on Advanced Intelligent Systems*, IEEE, pp.296-300, 2012. (査読付).

(3) Shirakawa T., Yokoyama K., Yamachiyo M., Gunji Y.-P. and Miyake Y., "Multi-scaled adaptability in motility and pattern formation of the *Physarum* plasmodium", *Int. J. of Bio-Inspired Computation* 4, 131-138, 2012 (査読付).

(4) Shirakawa T., "Allometric Scaling Laws in the Exploratory Behavior of the *Physarum* Plasmodium", *Int. J. Artif. Life. Res.* 3, 22-33, 2012 (査読付).

(5) Shirakawa T., Gunji Y.-P. and Miyake Y., "An associative learning experiment using the plasmodium of *Physarum polycephalum*", *Nano Com. Net.* 2, 99-105, 2011 (査読付).

[学会発表] (計 17 件)

① 白川智弘, 小長野隆介, 井上桂太, "真性粘菌変形体の走磁性とそれに基づく探索行動", 日本機械学会第 25 回バイオエンジニアリング講演会, 2F17, 産業技術総合研究所つくばセンター, 2013 年 1 月 9 日.

② Shirakawa T. and Sato H., "Construction of molecular learning network", IES2012: The 16th Asia Pacific Symposium on Intelligent and Evolutionary Systems, Kyoto (Japan), Dec. 13, 2012.

③ Shirakawa T., Konagano R. and Inoue K., "Novel taxis of the *Physarum* plasmodium and a taxis-based simulation of *Physarum* swarm", SCIS-ISIS2012: The 6th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems, The 13th International Symposium on Advanced Intelligent Systems, Kobe (Japan),

Nov. 21, 2012.

④ Shirakawa T., "Allometries in the cell motility of the *Physarum* plasmodium," International Symposium on Complex Systems 2011, A-32, Tokyo (Japan), Dec. 1, 2011.

⑤ Shirakawa T., "Allometric scaling laws in the exploratory behavior of the *Physarum* plasmodium", IES2011: The 15th Asia Pacific Symposium on Intelligent and Evolutionary Systems, Yokosuka (Japan), Nov. 8, 2011.

⑥ Shirakawa T., "The tubular structure of the *Physarum* plasmodium drives its cell motility," 第 49 回日本生物物理学会年会, 1F1336, 兵庫県立大学姫路書写キャンパス, 2011 年 9 月 16 日.

⑦ 白川智弘, 横山幹, "体長の伸展に駆動される真性粘菌変形体の細胞運動", 日本機械学会 2011 年度年次大会, J024053, 東京工業大学大岡山キャンパス, 2011 年 9 月 14 日.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年月日 :
国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
取得年月日 :
国内外の別 :

[その他]

ホームページ等

<http://www.nda.ac.jp/~sirakawa/>

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)研究分担者 ()

研究者番号：

(3)連携研究者 ()

研究者番号：