

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24740066

研究課題名(和文)生物の振動収縮に基づく分散情報処理機構の研究

研究課題名(英文) Mechanism of distributed information processing based on oscillatory contraction of living organism

研究代表者

伊藤 賢太郎 (Ito, Kentaro)

広島大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：20528351

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：真正粘菌変形体は巨大な単細胞生物である。餌を求めてその先端を広げていくという性質を持っており、周辺環境の情報を受け取り自らの振る舞いを変化させることができる。例えば、移動している先端が壁に触れたときは数分で他の箇所が新たな先端として動き出す。これは粘菌が片側からもう片側へ情報を伝達したかのように見えるが、彼等に神経系は存在しない。

この情報処理機構を解明するため、我々は広がっていく粘菌の数理モデルを構築した。このモデルにより方向転換を含む様々な粘菌の振る舞いを再現することができ、圧力を「情報」として用いる事により方向転換を実現できるという解釈ができることがわかった。

研究成果の概要(英文)：The plasmodium of the true slime mold *Physarum Polysepharum* is a large, single-celled amoeboid organism. This large organism extends its front for foraging. The slime mold can sense environmental information and change its behavior depending on the situations. For example, when the expanding front touches the wall, other part will start to move and become a new front in few minutes. It seems the slime mold transmits information from one side to another. However they do not have nerve system.

We made a mathematical model of the expanding slime mold to reveal their information processing. Our model reproduces fundamental characteristics of the front expanding, including change of direction. We found that the pressure of protoplasm plays a role as "information" in our model for change of moving direction.

研究分野：非線形科学・数理モデル

キーワード：数理モデル 振動子系 真正粘菌 パターン形成 情報処理

### 1. 研究開始当初の背景

生物の情報処理機構は、一般的には解明の困難な問題である。脳は進化により獲得された最高の情報処理器官であり、昨今の脳科学分野では様々な手法を用いて脳への挑戦が続けられている。だが、情報処理を行うのはなにも脳をもつ高等生物に限った話ではなく、様々な原始的な生物、例えば単細胞生物であっても、環境からの情報を処理し適切な行動を選択している。彼らの行う体全体を使った情報処理の方が、生物としてより根源的なものであると考えることもできるだろう。しかし、現時点では我々は彼らの情報処理のありようを十分に理解している訳ではない。

真正粘菌変形体は、分化した器官を有さずに、知覚、判断、運動を体全体で行っているアメーバ状の単細胞生物であり、その体全体を使った情報処理機構はここ 10 年来、多くの注目を集めている。近年では、申請者が手老等と共同で行った研究(Tero et al. 2010)により粘菌の生み出す輸送ネットワークが実在の鉄道網にひけをとらないほど優秀であることが明らかになり、この結果が Science 誌に掲載された。また、変化する環境に対応して、輸送経路を自発的に切断するといった、巧みなりスク管理を行っていることが申請者等の研究 (Ito, Nakagaki, 2010)により明らかになっている。

粘菌は神経ネットワークのような「正確かつ高速に遠方に情報を伝達する機構」を持たない以上、接触などによって得られた情報はその情報を受け取った場所で局所的に処理されている筈である。それにも拘らず、時間が経過すると、まるで体全体の情報を何者かが統合して解決策を提案したかのような、見事な振る舞いを示すことが知られている。このような空間的に分布した「局所的な系」は、どのように協調することで「合目的性をもった全体の振る舞い」を生み出すのであろうか？

### 2. 研究の目的

粘菌の局所的な収縮弛緩運動からスタートして、粘菌の生み出す大域的なパターンや、どのように動く方向を決定するのか、といった大域的な動きを結びつけることのできる包括的な数理モデルを構築し、それを通して原始生命の情報処理機構についてシンプルなシナリオを提案することを目標としている。

### 3. 研究の方法

粘菌の構造はほぼ均一なので、生理学な構造を仔細に調べただけではこの分散的な情報処理機構を解明する事は困難である。この

ような局面で最も有効なのは、数理モデルによるアプローチである。適切に構築された数理モデルを用いて、数値実験と解析を行うことにより、局所と全体を繋ぎ、合目的な振る舞いが創発するシナリオを提示する。

#### ・ 数理モデル (シリンダーモデル)

我々は粘菌の生み出す内部圧力に注目し、間的に離散的な数理モデルを構築、シミュレーションを行う事でその数理モデルの妥当性を検証した。本研究で用いる粘菌の数理モデルの模式図を図 1 に示す。二次元的に広がった粘菌を空間的に離散化しており、個々の要素は原形質で満たされたシリンダーとみなしている。個々のシリンダーの内部には、アクチンミオシンを模した収縮弛緩運動をするバネが存在する。このバネが周期的に圧力を発生させており、その圧力差に従って要素間を結ぶ管に原形質が流れる仕組みになっている。以上のメカニズムだけで特定の領域に留まった粘菌の厚み振動の様子を再現できるかどうか調べた。

また、粘菌の境界に位置するシリンダーの内部圧力が閾値を超えたら、そのシリンダーは原形質を境界外部に吹き出し、そこに新しいシリンダーが生まれ新たな境界を形作るという仕組みをモデルに実装し、自らの境界を広げて移動していくことができるように数理モデルを拡張した(図 2)。この際に、内部の圧力が上昇すると先端だったシリンダーの隣に新しいシリンダーが生まれる。新しく生まれたシリンダーは柔らかく、時間とともに徐々に硬くなっていくという効果(ゾルゲル変換)も取り入れた。シリンダーは柔らかければ柔らかいほど、低い圧力閾値で原形質を吹き出す。これにより、粘菌の進行方向の決定という最も観察しやすい状況判断実験の結果と数理モデルのシミュレーション結果を対応付けることが可能となった。このモデルを用いて、次に挙げる通路実験を再現できるかどうかを調べた。

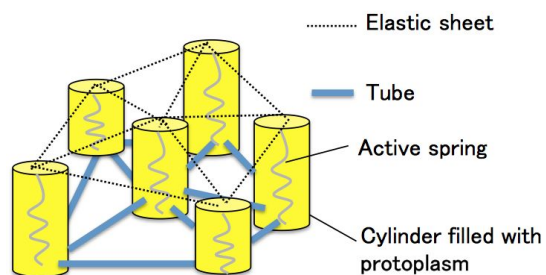


図 1: 粘菌の数理モデルの模式図。

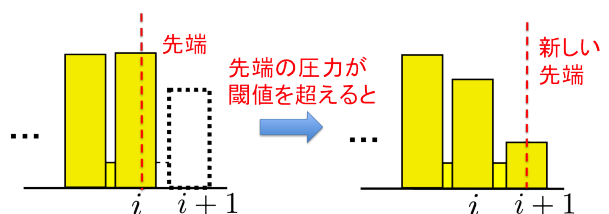


図 2: 新しいシリンダーが生まれる状況

#### ・ 粘菌の通路実験

実際の粘菌を用いて実験を行った。左右どちらにでも進行できるように通路の中央におかれた粘菌がどのように振る舞うかを観察した。初期の粘菌量に対する振る舞いの変化と、行き止まりに接触の反応を調べることにより、行き止まりへの接触という局所的な情報が、進行方向の変更という大域的な振る舞いにどう影響するのかを考えた。

#### 4. 研究成果

(1)実際の粘菌では厚み振動のパターンは定常的ではなく、時間とともに移り変わることが知られているが、本数理モデルでもこの変遷を確認する事ができた。このような振動パターンの遷移現象は、少数のシリンダー結合系でも見られ、これらの結果については同様のシリンダー機構をもつロボットを作った Umedachi 等との共著論文として発表済みである。

(2)アクチンミオシンは収縮弛緩繰り返しながら徐々に(非常に長い時間をかけながら)短くなっていくという効果を取り入れることにより、粘菌の通路実験でみられた「先端が通路の端に触れると、方向転換をする」という振る舞いを数理モデルでも再現する事ができた。このことにより、粘菌の方向転換の仕組みとして以下のようなシナリオが提案できる。定常的に粘菌が進行している状態というのは、「アクチンミオシンの長い時間スケールの収縮による圧力増加」と「やわらかい先端部分が進行することで比較的硬い部分の厚みが減ることによる圧力低下」が釣り合っている状態である。だが、先端が壁に接触したあとは、圧力増加の効果だけが残ることで圧力は大きく上昇し、その結果、硬い部分からも粘菌が吹き出すことになる。この吹き出した部分が新たな先端となり進行することで、方向転換を行うことができている。この結果については、現在論文を作成中である。

この結果は、ゾルゲル変換やアクチンミオシンの収縮といった物質の性質を使う事で、「行き止まり回避のための方向転換」という情報処理を実現できるということを示しており、複雑な化学反応過程や回路の問題に立ち入ることなく説明可能な情報処理の一例となっている。

(3)これらの結果を応用して、忌避物質を避けるといった粘菌と同様の振る舞いも再現することが確認できている。また、粘菌の管の成長を取り入れても整合性のとれた振る舞いをすることがわかっているため、これらの結果についても順次論文文化を進めていく予定である。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 3 件)

1. Takuya Umedachi, Kentaro Ito and Akio Ishiguro, Soft-bodied amoeba-inspired robot that switches between qualitatively different behaviors with decentralized stiffness control, Adaptive behavior, Vol. 23, 97-108. 査読有。(2015)

DOI: 10.1177/1059712315573334

2. Takuya Umedachi, Ryo Idei, Kentaro Ito and Akio Ishiguro, True-slime-mould-inspired hydrostatically coupled oscillator system exhibiting versatile behaviours, Bioinspiration & Biomimetics, Vol. 8, 035001. 2013. 査読有

DOI:10.1088/1748-3182/8/3/035001

3. Takuya Umedachi, Ryo Idei, Kentaro Ito, Akio Ishiguro: "A Fluid-filled Soft Robot That Exhibits Spontaneous Switching among Versatile Spatio-temporal Oscillatory Patterns Inspired by True Slime Mold", Artificial Life, Vol. 19, pp 67-78, 2013. 査読有.

DOI:10.1162/ARTL\_a\_00081

[学会発表](計 12 件)

1. 伊藤賢太郎, "環境適応的に振る舞う真正粘菌変形体の数理モデル", 第二回 JST CREST「数学」領域横断若手合宿, 2015年3月9-12日・休暇村志賀島(福岡県福岡市)

2. Kentaro Ito, "Mathematical model for spreading Physarum", MIMS 共同研究会「反応拡散現象にみられる境界層とその周辺の数理」, 2014年11月28日・招待講演・明治大学中野キャンパス(東京都中野区)

3. Kentaro Ito, "Mathematical model for the expanding true slime mold", JSMB/SMB 2014 Osaka, 2014年7月28日-8月1日・招待講演・大阪府立国立会場(大阪府大阪市)

4. Kentaro Ito, "Mathematical Model for Pressure Driven Locomotion of True Slime Mold", CREST International

Symposium Locomotion of Animals, Robotics and Mathematics, 2014年3月20-21日.招待講演.北海道大学(北海道札幌市)

5. Kentaro Ito, "Mathematical model for pressure driven locomotion of Physarum", Workshop on Ethology and Rheology of Physarum and its Related Topics II, 2014年2月17日-20日.招待講演. Gävle University(Sweden)
6. 伊藤賢太郎, 畑中直樹, 小林亮, "効率的な原形質流動を生み出す粘菌ネットワークモデル", 第23回日本数理生物学会年会, 2013年9月11-13日. 静岡大学(静岡県浜松市)
7. 伊藤賢太郎, "粘菌の厚み振動とその振る舞い", N.L.P.M. サマーセミナー2013, 2013年8月11-14日. 山喜旅館(静岡県伊東市)
8. 伊藤賢太郎, 出井遼, 梅舘拓也, 石黒章夫, "真正粘菌に着想を得た流体質量保存結合振動子系における自発的パターン間遷移の解析", 第25回自律分散システムシンポジウム, 仙台. 2013年1月25-26日. 東北大学(宮城県仙台市)
9. 伊藤賢太郎, 出井遼, 梅舘拓也, 石黒章夫, "振動子に駆動されるシリンダー結合系に現れるパターン遷移", 日本物理学会秋季大会, 2012年9月18-22日. 横浜国立大学(神奈川県横浜市)
10. 伊藤賢太郎, 出井遼, 梅舘拓也, 石黒章夫, "粘菌の振動パターン間遷移を説明するためのシリンダー結合モデル" 第22回日本数理生物学会年会, 2012年9月10-12日. 岡山大学津山キャンパス(岡山県岡山市)
11. 伊藤賢太郎, 出井遼, 梅舘拓也, 石黒章夫, "内部流体を介して相互作用するモジュール結合系における自発的振動パターン間遷移" 広島大学大学院理学研究科 数理分子生命理学専攻第4回公開シンポジウム, 2012年9月6-7日. 広島大学東広島キャンパス(広島県東広島市)
12. Kentaro Ito. "Coupled oscillatory cylinder model for Physarum oscillation", Two-day workshop on Ethology and Rheology of Physarum and Its Related Topics, 2012年7月2-3日. Hakodate City Central Library (北

海道函館市)

〔その他〕  
ホームページ等  
<http://home.hiroshima-u.ac.jp/kentaro/>

6. 研究組織  
(1)研究代表者  
伊藤 賢太郎 (Kentaro Ito)  
広島大学・大学院理学研究科・助教  
研究者番号：20528351