

# 研究報告書

## 「真正粘菌に学ぶ時間・空間に対する原始的インテリジェンス」

研究期間：平成19年10月～平成23年3月

研究者：手老 篤史

### 1. 研究のねらい

本研究は真正粘菌変形体という多核単細胞生物の知性を解明する事を目的とする。粘菌には迷路を解いたり、最適なネットワークを発見したり、時間間隔を記憶して予測行動をとるという能力がある事が近年実験によりわかってきた。本研究はこの粘菌の行動をモデル方程式であらわし、コンピューター上で再現する事により、原生生物の知性を理解し、生物の知性の起源を調べるものである。

### 2. 研究成果

#### (1) 真正粘菌の作る管ネットワークの解明

本研究は中垣俊之氏(現はこだて未来大学教授)の行った、真正粘菌変形体という単細胞生物が迷路を解く実験に基づく。私はこのメカニズムを数理モデルにより解明した。これが重み付きの最短経路問題や最短ネットワーク問題にも適応可能であることを示し、新しい解法を得た。このように単細胞生物であっても高度に知的な振る舞いをするという研究が認められ、2008年にイグノーベル賞を共同受賞した。(Nature 誌 Nature News でも紹介された)

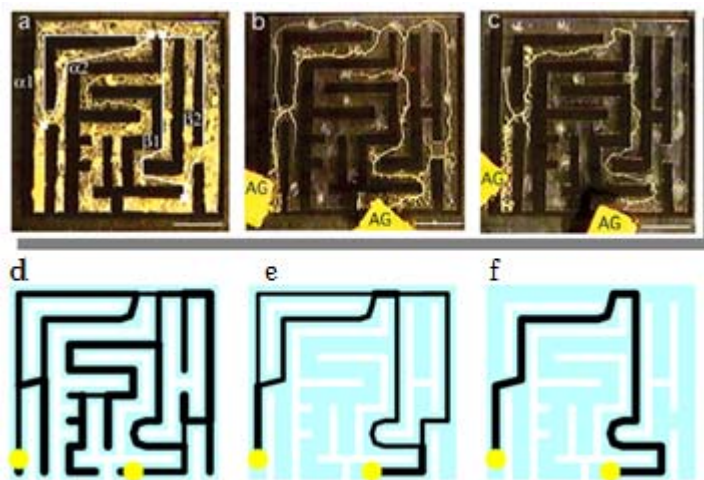


図1 粘菌が迷路を解く実験(a-c)とコンピュータシミュレーションの結果(d-f)

#### (2) 適応ネットワークの共通原理の解明

この粘菌による最短経路が求まるパラメータは適応的ネットワークの形状決定の重要な境界となっており、この結果、様々な生物ネットワークに共通する原理の解明に成功した。特に人間が作る鉄道網を例とし、都市ネットワークの構築に応用した結果を Science 誌にて第一著者として発表した[1]。この研究の反響は大きく、他に Science 誌にて Wolfgang Marwan にも解説され、読売新聞・日経新聞等の国内主要13紙等にて幅広く紹介されるなど、大きな反響を得た。

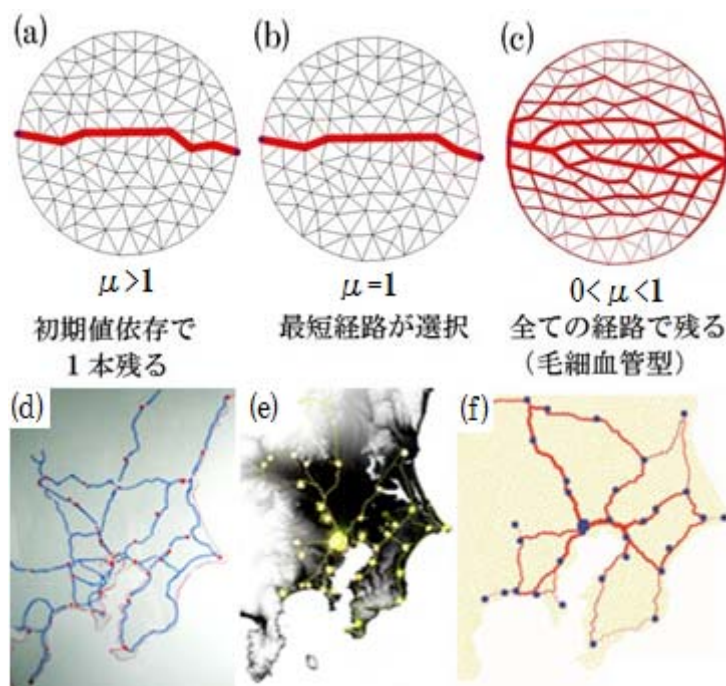


図2 適応ネットワークの最終的な形状(a-c)。最短経路上のみ経路が残るパラメータを境としてネットワーク形状は大きく変化する。その法則を用いて行った鉄道網との比較実験(d-f)。(d)実際の鉄道、(e)粘菌のネットワーク(f)シミュレーション結果。

### (3) 真正粘菌の記憶現象の解明

粘菌はカビやバクテリアを捕食するために通常ゆっくりと前進する。また粘菌は通常落ち葉の下など暗くて湿度の高い場所におり乾燥を嫌い、寒い環境に長時間いると胞子を作りライフサイクルの異なるモードへと移行する性質がある。粘菌はこのように高い湿度とある程度の暖気を好む生物であり、乾燥・低温の悪条件においては前述した前進速度が低下する。この乾燥・低温の刺激に対し、粘菌は記憶・想起現象を引き起こす(図3)。これは簡単に説明すると、以下の2つである。

① 粘菌に防御体制を取らせるような刺激を周期的に与えると刺激を止めても次のタイミングで防御体制をとる。

② このように刺激間隔を学習した粘菌はもう一度刺激を受けるとそのタイミングを思い出し、次のタイミングでまた防御体制をとるというものである。この事からわかるとおり、粘菌は刺激間隔を学習する事が可能である。だが、脳機能を持たない粘菌がこのような振舞いのできるという事は大変興味深い。生物は脈拍や呼吸などの短い周期から日周リズムなどの長い周期まで様々なリズムがあり、一見単純に見える単細胞生物の内部でも様々な反応が起こっているため周期的な活動が見られる。粘菌も同じように体内に様々なリズムを持っており、このリズムを用いることにより記憶や学習的な動きができる事をモデル方程式で説明する。その結果、このモデル方程式は振動子群により学習・想起が可能な新しい系となっている[2]。

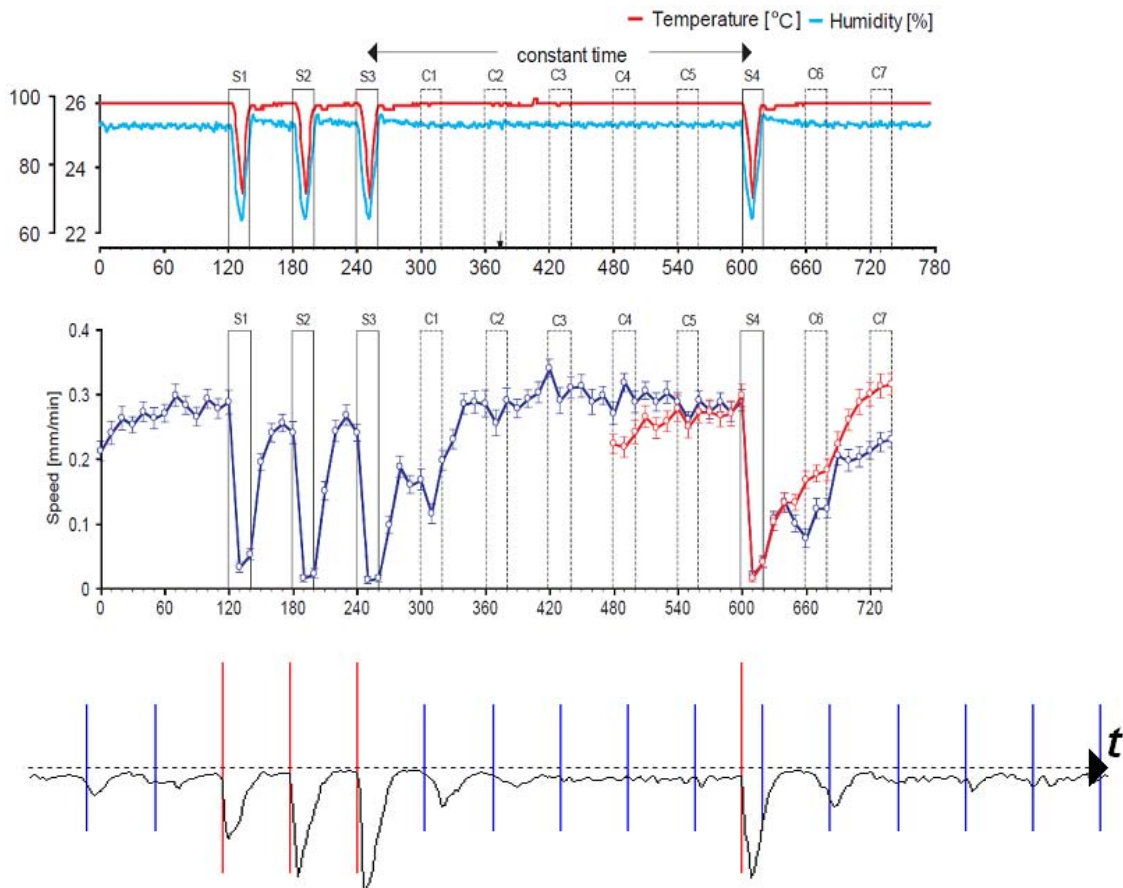


図3 (上段)粘菌に与えた温度(赤)と湿度(青)。(中段)粘菌の移動速度(共同研究者の中垣氏らによる)。(下段)多重リズムによるシミュレーション結果。

#### (4) 多重リズムから創発される知的制御

単細胞生物である粘菌の記憶現象の方程式は他の系へも適応可能である。例えば1935年 Fritz Bramstedt によってゾウリムシが容器の形状を覚えているという実験結果が報告されている(図4(a))。これについても2-(3)で得られた減衰振動による多重リズムの方程式で説明が可能であることを示した(図4(b))。また、四脚歩行動物はその移動速度によって歩容が自発的に変化する。脳からの情報が切断された四脚動物であってもこの歩容遷移がでる事から現在では歩容遷移は脊髄等の神経回路によるものであるとの研究が多いが、物理的な身体特性によって歩容遷移が創発される可能性を示した。

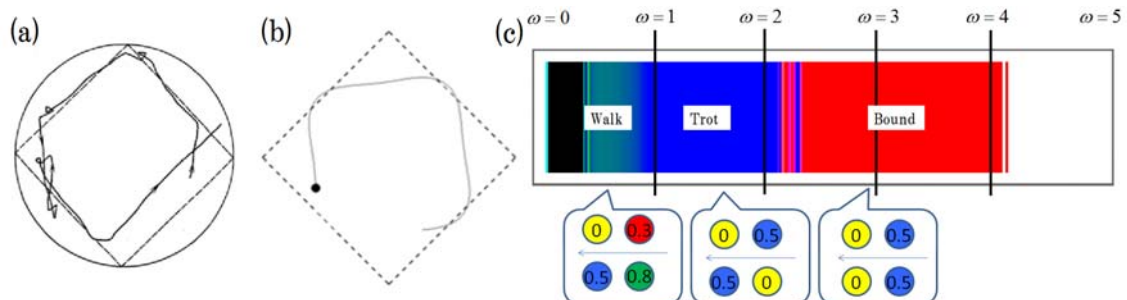


図4 (a)Fritz Bramstedt によるゾウリムシの記憶実験結果。(b)その多重リズムを持った減衰振動子を用いた再現結果。(c)多重リズムを持った減衰振動子を用いた四脚動物の歩容遷移のシミュレーション結果。

ユレーション結果。

### 3. 今後の展開

#### (1) 真正粘菌に学ぶ空間に対する原始的インテリジェンス

本研究テーマでは粘菌の管ネットワークの法則を用いて鉄道網の解析を行った。他にも蟻の列・血管網・葉脈など、使われている経路が発達し使われて無い経路は縮退していく性質を持つネットワークがある。このような適応ネットワークに対しても本研究で得られた法則が適応可能なため、今後はこれらのネットワークに対して、本研究で得られた結果を適応していくことを予定している。

#### (2) 真正粘菌に学ぶ時間に対する原始的インテリジェンス

本研究テーマでは多重リズムを持った減衰振動子群に着目することにより、単細胞生物等の知的制御の創発を再現した。このような単純な生物の知性の創発を進める一方、人間の脳機能についても研究を行う。人間の脳波でも $\alpha$ 波や $\theta$ 波といった異なる周期を持ったリズムが観測されており、これらはお互いに密接に影響を及ぼし合っている。今後はこれらのリズムについて着目することにより、単純な状況から創発される知的現象についても解明して行くことを目標とする。

### 4. 自己評価

本研究は当初目標としていた真正粘菌の原始的インテリジェンスを解明することに成功した。その結果、適応ネットワークに関する共通法則が得られた。これを用いて粘菌のネットワークと人間の鉄道網を比較する研究成果は Science 誌に掲載され大きな反響を得た。主要新聞の掲載やイグノーベル賞受賞により、一般社会にも広く知られ、今後の実用的な応用が期待されている。

### 5. 研究総括の見解

脳をもたない多核単細胞生物の真性粘菌が迷路を解いたり、時間・空間を記憶するといった原始的インテリジェンスを示すことに注目し、それを数理モデルで再現する研究課題に取り組んだ。特に、粘菌の迷路解きの数理モデルでは、重み付きの最短経路問題と対応づけることにより人間の作る鉄道網に類似の形状が再現されることを示した。この成果は Science 誌に掲載されたのみならず、その意外性が2度のイグノーベル賞受賞に結びついた。時空間記憶の原始的インテリジェンスは多重リズムをもった減衰振動子群として一連のモデル化が進められているが、なお深く掘り下げて集大成されることを期待する。

### 6. 主要な研究成果リスト

#### (1) 論文(原著論文)発表

1. A. Tero, S. Takagi, T. Saigusa, K. Ito, D. P. Bebbler, M. D. Fricker, K. Yumiki, R. Kobayashi, T. Nakagaki, Rules for Biologically Inspired Adaptive Network Design. <b>Science</b> 2010/1/22 Vol. 327, No.5964 P.439-442 (2010)
2. T. Saigusa, A. Tero, T. Nakagaki, Y. Kuramoto, Amoebae anticipate periodic events. <i>Physical Review Letters American Physical Society</i> 2008/1/11 Vol. 100, 018101 (2008)
3. A. Tero, T. Saigusa, T. Nakagaki, Protoplasmic computing to memorize and recall periodic environmental events. <i>Proceedings in Information and Communications Technology Springer Japan</i> 2008/12/18, Volume 1,p 213-221 (2008)
4. T. Miyaji, I. Ohnishi, A. Tero, T. Nakagaki, Failure to the shortest path decision of an adaptive transport network with double edges in Plasmodium system. <i>International Journal of Dynamical Systems and Differential Equations Inderscience Publishers</i> , 2008/7/20 Vol. 1, Number 3, 210-219 (2008)
5. A. Tero, K. Yumiki, R. Kobayashi, T. Saigusa, T. Nakagaki, Flow-network adaptation in Physarum amoebae. <i>Theory in Biosciences. Springer Berlin / Heidelberg</i> 2008/4/16 Vol. 127, 89-94 (2008)

(2)特許出願

研究期間累積件数:0 件

(3)その他(主要な学会発表、受賞、著作物等)

受賞

1. 第 5 回(2010 年度)日本数理生物学会研究奨励賞受賞
2. Ig Nobel Prize 2010(Transportation network )受賞, 中垣俊之、手老篤史、他、  
2010/9/30
3. Ig Nobel Prize 2008(Cognitive Science)受賞, 中垣俊之、手老篤史、他 2008/10/03