

# アドホックネットワークから見た生物のプリミティブな環境適応能力 最近の研究動向

田中 久陽<sup>†</sup> 近藤 悠太<sup>††</sup>

<sup>††</sup> 電気通信大学 電気通信学部 電子工学科  
東京都 調布市 調布ヶ丘 1-5-1

E-mail: <sup>†</sup>htan@ee.uec.ac.jp, <sup>††</sup>kondouyut@synchro2.ee.uec.ac.jp

自律分散通信ネットワークの視点から見た生物のプリミティブな環境適応能力について、最近の研究動向を紹介し、研究会での議論に供したい。トピックとして、以下の2点について報告する。(i) ネットワーク構造をもつ巨大な単細胞アメーバ (*Physarum Polycephalum*) は、そのネットワーク内にある種の最短経路構築能力をもち、タフな環境適応能力をもつこと。(ii) 上記のアメーバは、ある苛酷な環境下では子実体を形成する。この子実体形成のプロセスで、アメーバはその環境下で最適と考えられる合理的な挙動を示すことが実験検証により明らかとなりつつある。

## Primitive, Environmental Adaptation Ability in Living Organism Form an ‘Ad Hoc Network’ Point of View

–Some Recent Progress–

Hisa-Aki TANAKA<sup>†</sup> and Yuta KONDO<sup>††</sup>

<sup>††</sup> The Department of Electronic Engineering, The University of Electro-Communications  
1-5-1 Chofugaoka, Chofu-shi, 182-8585 Japan

E-mail: <sup>†</sup>htan@ee.uec.ac.jp, <sup>††</sup>kondouyut@synchro2.ee.uec.ac.jp

**Abstract** We will review and talk about recent researches on primitive, but intelligent environmental adaptation ability of a certain living organism, from an ‘ad-hoc network’ point of view. The following two topics are reported. (i) A huge, single-cell amoeba (*Physarum polycephalum*) usually forms a dynamical network structure by its body. Experiments have been uncovering that this amoeba has a certain, shortest path finding ability (; routing algorithm) in this network, which is quite robust to environmental changes. (ii) This amoeba spontaneously forms a fruit body under a harsh condition. During this fruit body formation, experiments are now uncovering that the network of this amoeba exhibits certain, mobile adaptation to the environment.

### 1. はじめに

調布にある電通大の研究室にて、学生たちの会話、

学生 A 「うちの T 先生、5 月の研究会で発表するけどさ、フレッシュマンセッションらしいぜ。本人は『初心忘れるべからず!』って言ってるけど...」

学生 B 「やばいじゃね? それよか、タイトルがさ、生物に学ぶアドホック・センサネットの間違いじゃね??」

学生 A 「いやいや、あれで良いらしいよ。先生自ら『確信犯だ』って言っているみたいだし。何が確信犯なんか、良く分か

らないけど。」

学生 B 「おまえの研究室、大変だよな。こないだの研究室公開で見てきたやつの話だと、部屋でアメーバを飼ってて、学生も北大に修行に行ったりするらしいじゃん?」

学生 A 「それ、粘菌のことね。その北大の研究室って、実は Nature や Phys.Rev.Lett. 辺りにバンバン発表してて、その道一筋三十年らしいんだけど。」

学生 B 「じゃあ、T 先生は、そこの二番煎じなわけ?」

学生 A 「そんなとこかねえ? うち、たいして金ないみたいだし、大体うちら電子工学科じゃん...」

その頃、T 先生は自宅で原稿を書いている。何故か、くしゃみを連発している。

先生 T 「あ、風邪ひいたかな？今週末原稿 4 本切だし、査読も切だったな。オレの原稿早く仕上げないと。やっぱり、あのアメーバでいか。ネットワークの最短経路探索アルゴリズムと、あと子実体形成の実験の話でいいんじゃない？まだ完結してないけど、別に盗られるわけでもないし。まあ問題提起ってことで。それはそうと、大きな仕事がしてえよなあ ...」

... 以上の次第で、本稿は最近着々と明らかになってきている真性粘菌のネットワーク知能、ならびに環境適応メカニズムについて紹介し、その動向がアドホック・センサネットワークの研究の問題意識とオーバーラップし始めていることを指摘する。紙面、発表時間の制約上、以下のトピックスに焦点をあてる。(a) ネットワーク構造をもつアメーバ (*Physarum Polycephalum*) の効率的かつロバストな最短経路を探索するアルゴリズム [1, 2] と、その変形版 [5]、また最近の実験により、(b) このアメーバは、ある苛酷な環境では子実体という状態に分化するが、この子実体形成の際に、アメーバは合理的なネットワークモビリティを示すことが検証されてきていることを紹介する。時間が許せば、最近の進展を紹介し、そのアドホック・センサネットワーク研究における潜在的なインパクトを考察する。

## 2. 粘菌の「ルーティングプロトコル」

粘菌 (*Physarum polycephalum*) は好条件下では 2 次元のシート状の形態をもつアメーバ状態となる。そのサイズは通常数 cm からまれには数 m ともなり、複数のアメーバを接合すると一つに融合し幾らでも大きくなる「スケラブルな」システムであることが知られている。その 2 次元シートの構造は、微細なチューブの「ネットワーク」から成り、そのネットワーク内には液体がある方向に流れている。この液体にはネットワークを維持するための養分のみならず、ネットワークが生存するために必要な「センシング情報」が含まれており、粘菌の環境適応能力を構成する要素となっている。

粘菌を植物等と比較するとき、その特徴が一層明らかになる。それは、上記のネットワークが数十分程の比較的短いタイムスケールで自在に変化し、移動も行うことである。すなわち、植物が有線ネットワークであるとするなら、粘菌は生きたモバイルネットワークであるといえる。北大・広島大のグループは、このネットワークの変形メカニズムに注目し、その第一近似として洗練された数理モデルを確立した [1, 2]。これにより、ネットワークの任意の 2 点間を結び最短経路を検出する分散アルゴリズムが得られている。また、この理論的成果は、実験室内で粘菌が示すネットワークダイナミクスと良くマッチすることも検証され [3, 4]、筋の良いものであることが認められる。

本報告では、粘菌のルーティングプロトコル [1, 2] の概略を説明し、その簡素化により得られる結果について説明する。まず、任意のネットワーク (図 1 参照) が与えられたとし、その中の任意の 2 ノードを選択する。ここでの目的は、これらのノー

ドを結ぶ最短経路を自律分散的に探索することである。

ネットワーク内のノード  $N_i$  とノード  $N_i$  と  $N_j$  を結ぶリンク  $M_{ij}$  に注目する。これらは、以下に示す通り時々刻々変化する内部状態をもっている。まずノード  $N_i$  は、その点での液体 (アメーバの原形質) の圧力  $P_i$  を内部状態としてもつ。これに伴い、リンク  $M_{ij}$  には圧力差  $P_{ij}(= P_i - P_j)$  が生じる。その結果、リンク  $M_{ij}$  には流れが生じ、その流量を  $Q_{ij}$  とすると、これは

$$Q_{ij} = \frac{D_{ij}}{L_{ij}} P_{ij}, \quad (1)$$

により与えられる。ただし、 $L_{ij}$  はリンク  $M_{ij}$  のもつ長さ ( $\zeta$ ; 定数)、 $D_{ij}$  はリンク  $M_{ij}$  の単位長さあたりの流れ易さを表している。以下で示すように、この  $D_{ij}$  はこのリンクを流れる流量  $Q_{ij}$  に応じてゆっくり変動するものとする。またノード  $N_j$  における流量の総和  $\sum_i Q_{ij}$  は  $\sum_i Q_{ij} = 0$  を常に満たすものとする。これは粘菌内の原形質の総量が一定であるためである。

いまネットワーク内で 2 ノード ( $N_1, N_2$ ) が選ばれたとする。このとき、 $N_1$  と  $N_2$  を結び最短経路は以下のプロセスにより得られる。

(i) まず、 $N_1, N_2$  に対し  $N_1^*, N_2^*$  のノードを仮想的に考え、これらがそれぞれ流れのソース、シンクとして働くと見做す。すなわち、 $N_1^*, N_2^*$  において流れの総量はそれぞれ、 $\sum_i Q_{i1} = I_0$ ,

$$\sum_i Q_{i2} = -I_0 \text{ と固定される。}$$

(ii) ネットワーク内のリンク  $M_{ij}$  での流れ易さ  $D_{ij}$  は、

$$\frac{d}{dt} D_{ij} = f(|Q_{ij}|) - r D_{ij}, \quad (2)$$

に従うものとする。ただし  $f(x)$  は  $f(0) = 0, f(1) = 1$  をみたす増加関数とし、 $r$  の正の定数である。

(iii) (i), (ii) より定義される  $Q_{ij}, D_{ij}$  のダイナミクスを時間発展させると (ネットワークの規模等に依存するが) 一定時間内に「最短経路」のみに流れが集中し、その他の全ての経路には殆んど流れが消失する。以上により最短経路が検出される。

[1], [2] は以上のプロセスにより、大規模なネットワークにおいても常に最短経路が検出されることを示している。また、このメカニズムの数学的な裏付けも行われている状況である。

このようなアナログ的な最短経路の検出方法は過去にも種々報告されている。にも関わらず、この手法は従来のもとの一線を画しているといえよう。その理由は、(i) この手法は、アントアルゴリズム等と異なり、常に「最短」経路に到達し、(ii) その発想は粘菌において得られている生理学的知見に忠実なものであることによる。

ところが、以上で示したプロセスは (非常に洗練されているが) あくまでも数理モデルの一つであることも事実である。したがって同様のメカニズムを具現する他のアルゴリズムも存在する余地があると期待される。この方向で、われわれは上記の手法を一層簡素化することを行ない、その結果、[1, 2] と同等の機能をより高速に得る見通しも得られている [5]。今後は「アドホックネットワーク的」観点から、「流れ」を制御バケット等

に置き換えた離散的アルゴリズムの構築も一つの課題として期待される。

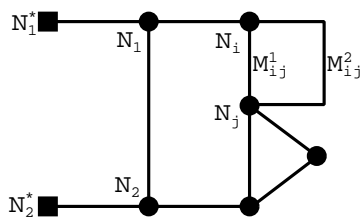


図 1 対象となるネットワーク

### 3. 粘菌の‘モバイルネットワーク’

粘菌はそのライフサイクルの中で多くの時間を、2章で述べたアメーバ状態で過ごしている。ところが、このライフサイクルの中で、粘菌は比較的短期間であるが唯一植物的に振る舞うイベントをもつ、すなわち子実体形成を行なう。この子実体とは、それまで流動的であったアメーバのネットワークが数ヶ所に集中して形成されるキノコのようなものである。この子実体は胞子を形成し、ここから散布された胞子は発芽後集合して再び多核のアメーバとなる。この子実体形成は、一般にアメーバ状態の粘菌が飢餓状態等の過酷な環境に置かれた後引き起こされる。すなわち、粘菌は現在の環境が生存に過酷に過ぎると判断した後、子実体形成により胞子を散布し、その胞子がおそらくは生存に適した環境に到達し、そこで再び活動を行なうという戦略をとっていると解釈できるだろう。

このように、子実体形成は粘菌にとって生存を懸けた一大イベントであるといえる。我々は、この子実体形成の直前に粘菌の示す行動パターンを多くの比較実験を行なうことにより、ある程度明らかにすることが出来た。すなわち、子実体形成を予定しているアメーバ状態の粘菌は、そうでない通常の粘菌と比較して以下のような真逆の性質を示すことが判明した。

(i) 子実体形成を予定している粘菌と通常の粘菌をそれぞれ腰高シャーレの下部に少量のエサとともに入れ、恒温槽内に安置し、2, 3日にわたり約1時間毎に観察を行なった。ここで用いたシャーレは、上部の蓋にわずかな隙間を生じ(0.1mm程度と考えられる)、密閉されていない。シャーレの底には1cm程度の厚さの培養用寒天があり、これによりシャーレ内は常に十分な湿度に保たれている。以上の試行を多数(20回以上)行なった結果、子実体形成を予定している粘菌は、ほぼ確実にシャーレ上部の隙間の近傍へ移動し、そこに集中して子実体を形成することが判明した。一方、通常の粘菌には、そのような傾向は生じず、底部の寒天近傍にとどまった。

一方、これに対する対象実験の結果は以下ようになる。

(ii) (i)と同じ設定の実験を行なった。ただし用いたシャーレは(i)のような隙間を注意深くなくした密閉状態とした。その結果、子実体形成を予定している粘菌は、(i)の傾向とは逆にシャーレ上部に移動する傾向を示さず、はじめに置かれたシャーレの下部にとどまり、そこで分散して子実体を形成した。通常の粘菌も(i)と同様の傾向を示した。

以上の結果から、次のような合理的な解釈が得られる。

(a) (i)の結果のみからは、子実体形成を予定している粘菌は自身のポジションを認知し、より高い方向へ移動する可能性も否定できない。ところが(ii)の対照実験から、この可能性は否定される。

したがって、残された解釈の可能性は

(b) 粘菌は周囲の湿度をセンスし、子実体形成予定時はその低い方へ積極的に移動する能力をもつ、あるいは(また同時に)

(c) 粘菌は周辺の空気の流れをセンスし、流れがセンスされるとき、その方向へ移動するモバイル機能をもつと考えられる。現在、この可能性を検証する実験が進められている。

このように粘菌は時々刻々変化する環境を鋭くセンシングし、その生存を維持するためのモバイルネットワーク機能をフルに活用していることは疑いない。最近の結果[6]によれば、このネットワークには原始的な学習機能を示す証拠も得られ、一方アドホック・センサーネットワークが現在の実用レベルになってきたことと併せて、両者の表面的でなく本質的なオーバーラップに今後期待するものである。

### 謝 辞

本研究を行なうにあたり、多くの方々にお世話になっております。北海道大学 上田哲男先生、中垣俊之先生、ならびに中垣研究室の手老篤史さん、三枝徹さん、広島大学 小林亮先生に数年にわたり御指導頂きました。改めて感謝申し上げます。また組合せ最適化問題の現状について大阪大学 梅谷俊治先生に御教示いただきました。ならびに日頃御議論頂くアドホックネットワーク研究会、非線形問題研究会の諸氏に感謝申し上げます。

### 参考文献

- [1] A. Tero, R. Kobayashi, and T. Nakagaki, "Physarum solver: A biologically inspired method of road-network navigation," *Physica A*, 363, pp. 115–119, 2006.
- [2] A. Tero, R. Kobayashi, and T. Nakagaki, "A mathematical model for adaptive transport network in path finding by true slime mold," *Journal of Theoretical Biology*, 224(4), pp. 553–564, 2007.
- [3] T. Nakagaki, H. Yamada, and A. Toth, "Maze-solving by an amoeboid organism," *Nature*, 407, p. 470, 2000.
- [4] T. Nakagaki, M. Iima, T. Ueda, Y. Nishiura, T. Saigusa, A. Tero, R. Kobayashi, and K. Showalter, "Minimum-Risk Path Finding by an Adaptive Amoebal Network," *Phys. Rev. Lett.*, 99(6), 068104, 2007.
- [5] Y. Kondo and H.-A. Tanaka, "An Electric Circuit Analogue of a Mathematical Model for Adaptive Transport Network in True Slime Mold," *Proceedings of 2007 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA '07)*, pp. 521–524 (Vancouver, Canada, September 16–19, 2007).
- [6] T. Saigusa, A. Tero, T. Nakagaki, and Y. Kuramoto, "Amoebae Anticipate Periodic Events," *Phys. Rev. Lett.*, 100(1), 018101, 2008.