真正粘菌による迷路・最短ネットワーク・最適交通網問題の解法

手老　篤史 [1], 中垣　俊之 [2], 小林　亮 [3]

[1] 科学技術振興機構さきがけ
[2] 北海道大学電子科学研究所
[3] 広島大学大学院理学研究科

概要

真正粘菌モジホコリの変形体は単細胞生物であるが、予想以上に知的な振る舞いをする事ができる事が近年わかってきた。本発表では粘菌が迷路、多点間の最短ネットワーク及び流通ネットワーク問題を解く実験結果を紹介する。また、どのようなメカニズムでこの単細胞生物がネットワーク問題を解くかをモデル方程式によるシミュレーションにより説明する。

Solving maze, the shortest network problem and traffic network problem with true slime mold

Atsushi Tero[1], Toshiyuki Nakagaki[2],Ryo Kobayashi[3]

[1] PRESTO JST,
[2] RIES Hokkaido University
[3] Graduate School of Science

Abstract

True slime mold ”Physarum Polysepharum” is single-cell organism. But it can behave more cleverly than we thought. Here at first we will introduce the experimental results solving maze, shortest network problem and the optimal traffic network problem with it. Then we will explain the model equations and simulations of it.

1　はじめに

真正粘菌モジホコリの変形体（以下「粘菌」）は多核単細胞生物であり、アメーバのような外観をしている。この粘菌をナイフ等で幾つかに切り分けたとしても、そのそれぞれは 1 個体として生存可能である。反対にこれらが接触すると 1 個体に融合可能になるという性質を持っている。

粘菌はシート状の部分と管状の部分から構成されている（図 1）。粘菌内部のアクトミオシン繊維は約 2 分周期で収縮弛緩運動を行っており、それによりシート状部分の厚みは１～２分周期で振動する。また、これにより押し出されたゾル（粘菌の体）は管の中を通って別な場所に輸送される。また、この管は流量が多い管ほど太く成長し、反対に流量の無い（使用されていない）管は減衰し、消滅するという性質を持っている。

2　粘菌の管ネットワークの実験結果

前節で述べたとおり粘菌は思考する為の脳や遠くの情報を得る目のような器官は全くもたない、単純な生物である。粘菌はエサに接触するとその周りに

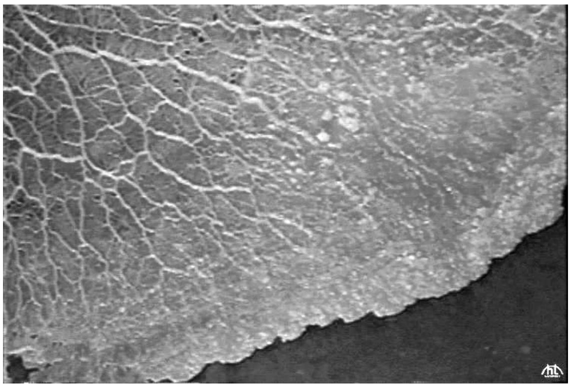

図 1: 実際の真正粘菌変形体の写真。シート状に広がった中に管状の構造を持った輸送ネットワークが存在している。

集まる性質を持っている。特に２つ以上のエサに同時に触れた場合そのそれぞれの周りに集まるのだが、その時、集まり同士を管ネットワークで繋ぐという振る舞いをする（図 2)。この性質により以降に説明するように粘菌が迷路や複雑なネットワーク問題を解く事ができるのである。

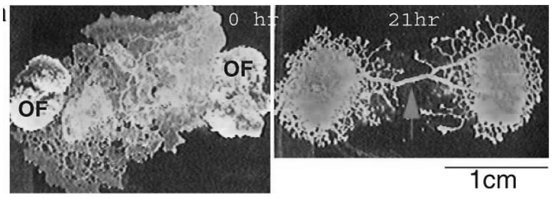

図 2: 最も基礎的な粘菌のネットワーク実験の結果。初期状態で広がっている粘菌の２か所にエサを置くと、粘菌はそれぞれのエサに集まりながら、その間にお互いを繋ぐネットワークを構築する。

2.1 迷路解き

ここでは粘菌が迷路を解く実験について紹介する。まずは寒天培地の上に OHP で迷路の壁を作り、粘菌を敷き詰める (図 3-(a))。そして迷路のスタートとゴールにエサを置くと粘菌はスタート地点とゴール地点のエサの上に集まり、まずは迷路の行き止まりの部分から管ネットワークを撤退させる (図 3-(b))。最終的には迷路の答えの上に管状の構造を持った輸送ネットワークを作る (図 3-(c))。

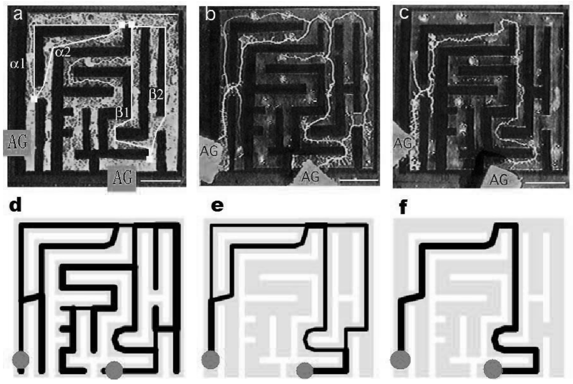

図 3: 粘菌の迷路解きの実験結果。(a) が実験の初期状態。最終状態 (c) で迷路の解の上にのみ粘菌は管ネットワークを作っている。下段はそれに対応するシミュレーション結果。初期状態 (d) から最終状態 (f) まで時間経過までしっかり再現されている。

2.2 多点間の最短ネットワークの実験結果

次にエサの数が３つ以上の場合の実験結果を紹介する。初期状態として円形の容器に粘菌を敷き詰め、その周囲の３点にエサを置く。すると最終的に粘菌は３点を結ぶ最短ネットワークを作成する。

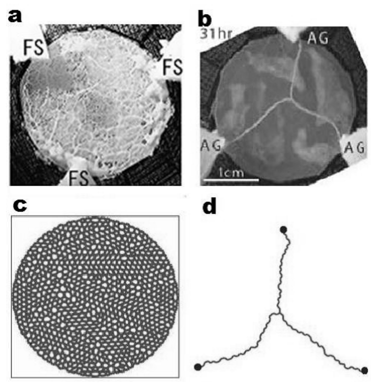

図 4: 粘菌による多点ネットワーク実験の結果。(a) が初期状態。(b) が最終状態。３点を結ぶ最短ネットワークが作成されている。下段 (c),(d) はそれに対応するシミュレーション結果。

2.3 交通ネットワークの実験結果

ここでは粘菌を用いた交通ネットワーク問題の実験結果を説明する。粘菌の量がエサの量に比べて少ない場合は前節までで述べたような最短ネットワークが生成される。だが、粘菌の量が多いとよりアク

シデントに強いネットワークを作成する。これにより、実際の都市間交通問題を粘菌に解かせたのが図5である。これらの粘菌のネットワークと鉄道ネットワークでは３つの共通点がある。１つ目は生成メカニズムである。生物は利用した部分が進化・発達し、反対に利用していない器官は退化するという性質があり、粘菌も同様によく使われている管が発達する。鉄道ネットワークも同様に利用客が多い部分は増便・補強され、利用客が少なければ減便・廃線となる。２つ目は維持コストである。粘菌はエサの無い快適で無い部分に管を作成するので、ネットワークの総距離は短い方が良い。もちろん鉄道網もネットワークが短い方が維持コストが少ないのである。３つ目はネットワークの強さである。粘菌は自然界では他の生物等によりネットワークが断線する場合がある。鉄道も事故などが起こる事を考える必要性がある。どちらもネットワークはアクシデントに強い必要がある。

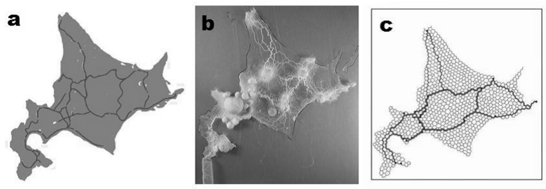

図 5: (a) は実際の北海道の鉄道ネットワーク。(b) は実験結果。３万人以上の人口の市にエサを置き、エサの量は人口に比例させた。(c) はシミュレーション結果。

3　モデル方程式

ここではこの実験結果再現したモデル方程式について説明する。

この実験で注目すべき重要な粘菌の性質は２つである。１つはエサに集まった粘菌と別なエサに集まった粘菌の間で原形質が流動しているという事である。粘菌のアクチンミオシン繊維が約２分周期で収縮弛緩運動を行う事によって、原形質が管の中に押し込まれ、それぞれの粘菌集合体の間を往復流動するのである。もう１つの性質は使われている管ほど太くなるという事である。管の中を原形質が流れると、管の壁と原形質の間にずり応力が発生し、その力が管を太く成長させる。反対に内部を原形質が流動していない管は細くなっていき、最終的には消える。これらの性質から粘菌の管ネットワークを再現する為のモデル方程式を２つの部分から構成した。１つは管内を流れる原形質の流動を表した方程式であり、もう１つは管の太さの変化をあらわす方程式である。（変数 p_i,L_{ij}/D_{ij},Q_{ij} をそれぞれ電圧、抵抗、電流に置き換えると電気回路のように見なす事ができる。以上の事を念頭におくとここでの話は理解しやすい。）

3.1　離散グラフと変数

ここでは図 3(d) や図 4(c) のように管ネットワークを離散グラフで表現する。そしてノードを N_1,N_2, $\cdots$ と番号付ける。N_i と N_j の間のエッジは M_{ij} と呼ぶ。各ノード N_i は１つのパラメータ $p_i(t)$ を持っている。これは管の壁が管内の原形質を押す圧力をあらわす。各エッジ M_{ij} は３つのパラメータ L_{ij}、$D_{ij}(t)$、$Q_{ij}(t)$ を持つ。L_{ij} は管の長さを表し、D_{ij} は管の太さをあらわす。（太い管はより多くの原形質を流動させるため、D_{ij} は管の伝導率（中をどれくらい原形質が流れやすいか）にもなっており、L_{ij}/D_{ij} は電気回路における抵抗になっている。） Q_{ij} は管内を流れる原形質の流量をあらわす。

3.2　原形質流動の方程式

管内の原形質流動をポワズイユ流で近似する事により、電気回路におけるオームの法則（$I = E/R$）の式と同じように次の方程式が成り立つ。

$$Q_{ij} = \frac{D_{ij}}{L_{ij}}(p_i - p_j)$$

この式は管内の原形質流動は管の伝導率（太さ）と圧力差に比例し、長さに反比例するという意味である。また、各ノードに流れ込んだ原形質の量と流れ出る原形質の量は釣り合っているという事から、電気回路におけるキルヒホッフの法則が成り立つ。

$$\sum_i Q_{ij} + I_j(t) = 0$$

ここで $I_j(t)$ はエサに集まった粘菌から流れ込んでくる原形質量であり、エサに対応していないノードでは常に $I_j(t) = 0$ である。

3.3　管の成長の方程式

次に管の太さの変化について説明する。粘菌において流量の多い管は成長するのに対し、流量の無い管は減衰、消滅するので、管の成長方程式は次のようにおける。

$$\frac{d}{dt}D_{ij} = f(|Q_{ij}|) - rD_{ij}. \quad (1)$$

ここで関数 f は $f(0)=0$ を満たす単調増加関数である。この方程式では D_{ij} の値は $f(|Q_{ij}|)/r$ に近づくので、内部を流れる原形質の流量 $|Q_{ij}|$ が大きければそれだけ管の太さ D_{ij} は大きくなるし、$|Q_{ij}|=0$ の場合は $D_{ij}\to 0$ となり、管は消失する。なお、迷路を解くシミュレーションでは $f(q)=q$ を、それ以外では $f(q)=\frac{q^3}{q^3+1}$ を用いている。

4　まとめ

これらの実験・シミュレーション結果からわかるとおり、予想以上に粘菌は賢く、粘菌の管ネットワークは効果的である。例えば鉄道網のような問題では人々は粘菌が6億年作り続けてきたネットワークから多くを学ぶ必要があるかもしれないのである。

参考文献

[1] Nakagaki, T., Yamada, H., Tóth, A., 2000a. Nature 407, 470.

[2] Tero, A., Kobayashi, R., Nakagaki, T., 2007. Physica A, Volume 363, Issue 1, p. 115-119

[3] Tero, A., Kobayashi, R., Nakagaki, T., 2007. Journal of Theoretical Biology, Volume 244, Issue 4, Pages 553-564

[4] Nakagaki, T., Saigusa, T., Tero, A., Kobayashi, R., 2007. Proceedings of "Topological Aspects of Critical Systems and Networks" (p. 94-100)

[5] Toshiyuki Nakagaki, Makoto Iima, Tetsuo Ueda, Yasumasa Nishiura, Tetsu Saigusa, Atsushi Tero, Ryo Kobayashi, and Kenneth Showalter, 2007. Phys. Rev. Lett. 99, 068104 (2007)

E-mail: tero@topology.coe.hokudai.ac.jp