

## 粘菌に見る生物の生存戦略と その工学的応用の可能性

長 野 正 道

現在われわれが目にする生物は長い間その子孫を残すことに成功した生存競争の勝者といえる。その中でも単細胞アメーバの一種である細胞性粘菌は、飢餓状態下では多数が凝集して一緒になり凝集体の一部を子孫として残そうとする面白い生物である。ここではそのような細胞性粘菌から“生物の生存戦略の真髄とは何か？”ということの一端を学び、新しい視点から工学的システム設計の可能性を探る。

**Keywords :** cellular slime mold, survival strategy, engineering application, synchronization, crystal growth

### 1. モデル生物としての細胞性粘菌

最近、Nature Neuroscience 誌が“生物研究ではモデルが多い割に理論が少ない”として特集号<sup>1)</sup>を組んでいる。バイオ、IT (information technology) など大変注目されている生物研究なのに、これは意外に思われるかもしれない。どこにその原因があるのであろう？ それは材料・デバイス研究などに比べ、細胞レベルでは同じ実験条件を準備すること自体が難しく、再現性のよい定量データがなかなか得られにくいところにあると思われる。再現性の悪さは理論を構築するうえで致命的な欠点となる。工学応用の面から見て最も成功している例の一つは神経系の研究であろう。しかし、神経だけからなる生物はこの世に存在しないし、システムとしての神経ネットワークの理解も実験面の難しさがネックとなってまだまだ十分とはいえない。個々の生物現象を解明し、その応用を考えることも可能である。しかし生物系を一つの閉じたシステムとして考え、それを工学的な応用に発展させようとする、まず複雑な中でもできるだけ単純で定量化も容易なモデル生物を選び、それを総合的に研究することが最短の道であろう。そのような代表例が単細胞アメーバの一種で *Dictyostelium discoideum* という学名で知られる細胞性粘菌<sup>2)</sup>である。米国の代表的な生物研究センターの一つであるとともに米国内の研究を財政的にも支援する National Institutes of Health (NIH) は 8 種類のモデル生物を指定し<sup>3)</sup>、研究を重点的に支援している。そして *Dictyostelium discoideum* はその中の一つでもある。ただ残念ながら、これは日本の粘菌研究者として著名な南方熊楠が扱った粘菌 (真性粘菌)<sup>4)</sup>とは異なる種類の粘菌である。2 種類の粘菌の顕著な違いは、細胞性粘菌が凝集しても細胞同士が単に接着するだけなのに対し、真性粘菌は完全に融合してしまうことである。

このような細胞性粘菌は生体系における多体問題のよい例であり、豊富な内部自由度をもつ新シリコン系のようでもある。

細胞性粘菌の生物学的研究は他の生物と同様に長い歴史があり、国際会議も毎年開催されている<sup>5)</sup>。1950 年代の初頭、プリンストン高等学術研究所にいた Einstein も細胞性粘菌の映画を見て強い興味を覚え、映画の作成者である Bonner (粘菌研究のパイオニアの一人) に興奮した声で電話をかけてきた、という逸話も残っている。残念ながら Einstein が興味をもったころはまだ細胞性粘菌の生物学的知見が少なかった。1996 年には cDNA 計画が日本、特に筑波大学を中心に開始され、1998 年からはゲノム計画も海外グループを中心に始まり、分子生物学的知見も着実に蓄積されつつある。国内でも細胞性粘菌研究会<sup>6)</sup>が 1999 年に開始され、活発な活動が続いている。2000 年には最新の研究成果を紹介する日本語の専門書<sup>7)</sup>も刊行された。

### 2. ユニークな細胞性粘菌の生存戦略

細胞性粘菌のどこがそれほどユニークなのであろうか？ 細胞性粘菌は基本的には単細胞アメーバであり、餌がある限りは 2 分割を繰り返して増殖を続ける。しかし一般のアメーバと異なり飢餓状態になると分割を停止し、図 1 に示すように 1000 個から 10 万個程度のアメーバが凝集する。次第にナメクジ状の移動体 (slug) と呼ばれる形状となり、動物のように移動を開始する。その後、移動体は背に光を浴びると植物のように上方に伸びて、その先端部分の細胞が孢子となる。この孢子が飛び散り、適度な湿り気があると発芽し、再び粘菌アメーバとなる。また、細胞性粘菌の最適気温が 24°C、飢餓状態下の凝集から孢子形成までに要する時間が 24 時間と大変短い。

動物の特徴は長期の飢餓状態には弱い、機動性が高い

NEC 基礎研究所 〒305-8501 つくば市御幸が丘 34. E-mail: s-nagano@bx.jp.nec.com

Toward engineering applications of the survival strategy of cellular slime mold. Seido NAGANO. Fundamental Research Labs., NEC Corporation (34 Miyukigaoka, Tsukuba 305-8501)

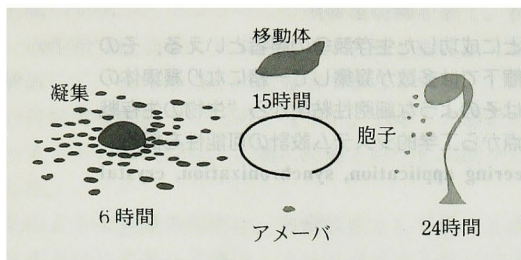
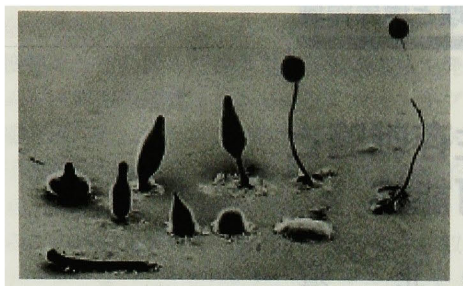


図1 細胞性粘菌のライフサイクル。単細胞アメーバは餌が枯渇すると、約6時間後には凝集しナメクジ状の移動体となり、24時間後には植物のように上方に伸びて先端部分が孢子を作る。この孢子は落下し適度な湿り気があると発芽し再び粘菌アメーバとなる。上の写真はTexas Tech UniversityのDr. Richard Blanton作。

こと、逆に植物の特徴は機動性が低い種子の形態になると長期の乾燥状態、飢餓状態に強いことであろう。通常ほとんどの生物は動物か植物に分類され、両方に属することはない。しかし細胞性粘菌はこの例外に当たる。単細胞生物なのに子孫を残すために凝集して、疑似多細胞動物や疑似多細胞植物になり、それぞれの形態の強みを十分に活用して子孫を残す。さらに凝集するアメーバをすべて遺伝的に同一なクローン集団にするとか、特定の遺伝子だけを壊したアメーバを混ぜ合わせ細胞集団の振る舞いを定量的かつ系統的に研究することができる。また、移動体は2つに分割されると2つの独立な移動体へと自動的に再構成されるという特徴がある。移動体の先端部分を他の移動体の後ろに移植すると移動体が2つに分割することから、先端部分は司令塔となる動物の頭に似ている。一般の動物と異なるのは司令塔部分が固定組織ではなく、変化に応じて再選別されるダイナミックなシステムとなっていることである。

1983年にはNewell<sup>9)</sup>が粘菌アメーバの凝集の様子が化学反応の非線形現象として有名なBelousov-Zhabotinskiiパターン<sup>9)</sup>(図2)そのものであることを発見した。それ以来、細胞性粘菌は非線形物理の対象としても脚光を浴びている。

### 3. 生物センサー(レセプター)を介した相互同期

細胞同士はどのようにコミュニケーションしているのだろうか? これには細胞内外でイオンを移動させる方法と、化学物質を合成し細胞外へ拡散させる方法の二つがあ

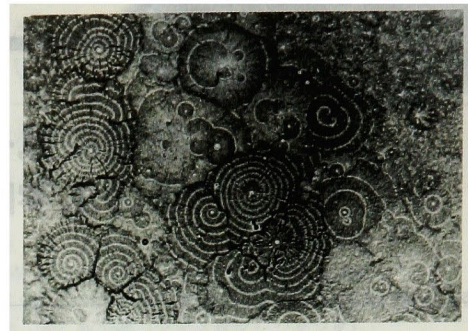
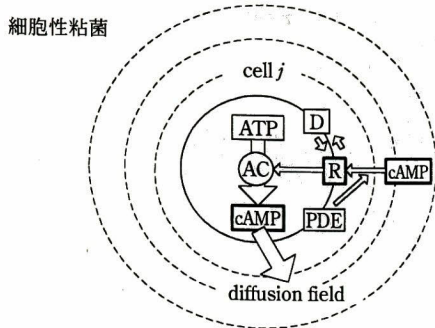


図2 細胞性粘菌のBelousov-Zhabotinskiiパターン。屈折率の違いで動いているアメーバは明るく、止まっているアメーバは暗く見えることを利用して得た写真。サイズは6cm×8cmで細胞数密度は $10^6 \sim 10^8/cm^2$ と思われる。University of OxfordのDr. Peter C. Newellの作。

る。イオンの相手は細胞膜に空いた穴状の構造体(イオンチャネル)であり、化学物質の相手はその吸着先となる受容体(レセプター)と呼ばれるたんぱく質である。レセプターとイオンチャネルを総称してレセプターと呼ぶことも多い。生体系の研究が進展するにつれ、重要な役割を果たす化学物質がどんどん見つかってきていると同時に、化学物質に対応するレセプターも発見されている。つまり細胞間コミュニケーションではレセプターがきわめて重要な役割を果たしていることがわかる。イオンチャネルを含めたレセプターはその構造の違い、対応する化学物質も多種多様である。それにもかかわらず観測されるレセプターの反応特性のほとんどが大変よく似ている。これには次のようなレセプター系のもつ共通の特性が起因している。(1)レセプターが感知する物質はその起源を問わない、(2)レセプターが感知できる量には上限が存在する、(3)レセプター系の感知から応答には時間的な遅れがある、といったところである。レセプター系の特徴を数学的にもう少し厳密に言えば、いかなる揺籃に対しても安定した振動モードに戻るといふリミットサイクルシステムを構成していることとみなせることが多いのである。

次に細胞性粘菌の凝集を例に細胞間コミュニケーションをもう少し具体的に見てみよう(図3)。細胞性粘菌は飢餓状態に入ると、生体系の燃料にあたるアデノシン三リン酸(ATP)からサイクリックAMP(cAMP)という化学物質を作り細胞外に分泌する。この際cAMPの細胞外への分泌量が時間的に規則正しく変動することが知られている。この変動はcAMPレセプターが上に述べた3つの条件を満たしていることに起因する。cAMPを産生する生化学反応はレセプターが感知できる上限にまでcAMPが増えると停止する。しかし感知から生化学反応の実際の停止までに時間的遅れがあるため作りすぎる、一方、一定値以下になると産生の生化学反応を再び開始する。しかし産生までに時間がかかり、その間にさらにcAMPが減り続けることになる。つまりレセプターは細胞外のcAMP密度を一定量の



レセプターモデル

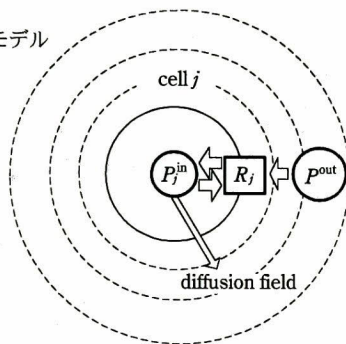


図3 上の図は細胞性粘菌アメーバ1個の細胞内外のやり取りを、下の図は簡素化したモデルを示す。ATPからcAMPを作り細胞外へ分泌する。この際レセプターRは細胞外のcAMP濃度を感知し濃度が低ければ細胞内cAMPの産生を促し、濃度が高ければ産生を止める。下の図では産生される化学物質全般を一般化し $P_j$ と書いている。 $j$ は細胞の番号。

範囲に収めるように働いているのに実際には絶えず作りすぎ、減りすぎが起こり、規則的な振動状態が発生することになる。さらに、cAMPレセプターが(1)の条件を満たすことで現れるのが各粘菌細胞間のcAMP産出リズムの相互同期である(図4参照)。cAMPレセプターは感知するcAMPがどの細胞から分泌されたのかを問わないということは、相手の細胞が近くに寄るとレセプターは自分が作るだけでなく相手を作るcAMPも感知してしまい、お互いに分泌する量を否応なく調整し合うことになる。このレセプターの単純な調整機構が細胞間のcAMP産出リズムの相互同期を実現しているということが見いだされた<sup>10)</sup>。工学的な同期ではマスタークロックとスレーブ間を同期させる強制同期がよく利用される<sup>11)</sup>。しかしここで話題にしている同期は相互同期であり、強制同期のようにマスタークロックを必要としない。

レセプターを介した粘菌の同期現象にはさらに次のような面白い特徴がある。二つの粘菌細胞が近づくと、レセプターが感知する相手の分泌するcAMP量が増加する。ところがレセプター系は規定の上限以下に抑えようと自身自身の産生量を減少させる。これはいい換えれば、細胞内cAMPの産生量の変化を通して相手の位置を感知する聴

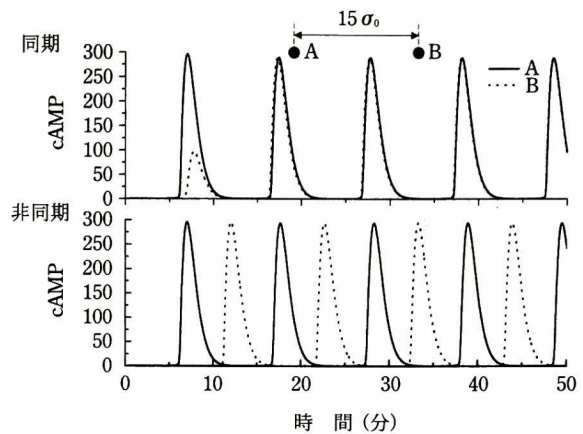


図4 2つの粘菌細胞内cAMP産生の同期。上はレセプターが機能している場合、下は機能しない場合。それぞれの細胞内で生化学反応の開始を5分ずらしてある。

覚のような機能が実現していることを意味する。また、グループ内の細胞のどれかが壊れると、残った細胞のcAMPレセプターが感知するcAMP濃度が当然減少する。しかしcAMPレセプターは感知するcAMPを上限にまで増産させる指示を出すので、残った細胞が自動的にcAMP量を増産し、グループ全体の産出量が以前と同レベルに回復されることになる。つまりシステム全体が相互同期を介してロバストにできていることになる。ここで注目すべきことはレセプターの単純な仕組みだけで高次機能であるロバストさが保証されているという事実である。

#### 4. レセプターを介した同期の数学的一般化

これまで細胞性粘菌の単純ではあるが、たくみな生存戦略の一端をみてきた。これを工学的応用にまで発展させるにはアルゴリズムの一般化が必要である<sup>12)</sup>。そこでまず、細胞性粘菌のレセプターを介したcAMP産生リズムの同期化のメカニズムを次のように単純化する。(a)レセプターと拡散性の生産物の相互作用が細胞内でリミットサイクル振動子を成す、(b)生産物は一定のレート( $k_e$ )で細胞外へリーク、(c)リークした生産物は細胞外へ拡散、(d)レセプターは(細胞内生産物の濃度)+(細胞内生産物の細胞外濃度) $\times$ (レセプターの感度( $\gamma$ ))を感知する、と。この単純化は次のように数式として書き下すことができる。条件(a)から $j$ 番目の細胞では生産物( $P_j$ )とレセプター( $R_j$ )が次の方程式

$$\frac{dP_j}{dt} = F_j(P_j, R_j) \quad (1a)$$

$$\frac{dR_j}{dt} = G_j(P_j, R_j) \quad (1b)$$

に従い、リミットサイクルを成すとする。次に(1)式を条件(b)、(d)に従い、次のように書き換える。

$$\frac{dP_j^{in}}{dt} = F_j(P_j^{in}, R_j) - k_e P_j^{in} \quad (2a)$$

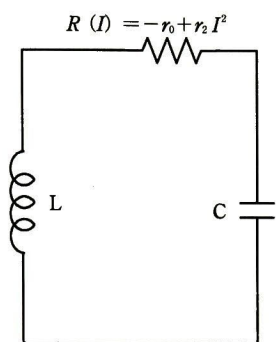


図5 van der Pol 回路の模式図。R(I)は負性抵抗、Lはコイル、Cはコンデンサー。Kirchhoffの法則と適当な変数変換で(4)式が得られる( $r_0, r_2 > 0$ )。

$$\frac{dR_j}{dt} = G_j(P_j^{\text{in}} + \gamma P_j^{\text{out}}, R_j) \quad (2b)$$

ここで細胞外にリークした生産物  $P_j^{\text{out}} \equiv P(\vec{r}_j, t)$  は次の反応拡散方程式

$$\frac{\partial P^{\text{out}}(\vec{r}, t)}{\partial t} = \sum_j k_t P_j^{\text{in}}(t) w_\sigma(\vec{r} - \vec{r}_j) - k_d P^{\text{out}}(\vec{r}, t) + D \nabla^2 P^{\text{out}}(\vec{r}, t) \quad (2c)$$

で求まる。(2)式の中で  $k_t$  は細胞内生産物の細胞外へのリークレート、 $k_d$  は生産物の分解酵素などの効果に対応する減衰率、 $D$  は生産物の拡散係数、 $w_\sigma$  という関数は生産物がリークする場所を細胞内に限定するための関数で、細胞外では急速に減衰することになるガウス関数などで近似する。(2c)式の右辺第1項は直径  $\sigma$  の細胞内の生産物がリークレート  $k_t$  で細胞外へ分泌し、これがマクロな拡散方程式の中の湧き出し項となるということを意味する。(2c)式は反応拡散型と呼ばれる方程式の一種である。これまでのアプローチとの違いは個々のシグナルソースを連続体モデルとしてではなく、1個1個、個別に扱っている点である。このため、(2)式で  $k_t = 0$  とすると  $P^{\text{out}} = 0$  となり、この系は空間に分布した相互作用のない振動子系に戻る。

生産物の拡散に特徴的な長さが系の大きさに比べはるかに大きい極限では、任意の細胞が感知する拡散性の物質の量に差がなく、 $P_j^{\text{out}} \propto \sum_{i=1}^N P_i$  となる。このことを細胞からのリーク量が細胞内生産量に比べ大変小さい場合を利用すると、(2)式は次のように簡略化される<sup>13)</sup>。

$$\frac{dP_j}{dt} = F_j(P_j, R_j) \quad (3a)$$

$$\frac{dR_j}{dt} = G_j(P_j + \gamma \sum_{i=1}^N P_i, R_j) \quad (3b)$$

この結果、レセプター理論を電気・電子回路に応用することが容易になる。そこで非線形電気回路として有名な van der Pol 回路<sup>14)</sup>(図5)を考えてみよう。この回路方程式は

$$\frac{d^2 x_j}{dt^2} - \epsilon(1 - x_j^2) \frac{dx_j}{dt} + \omega_j^2 x_j = 0 \quad (4)$$

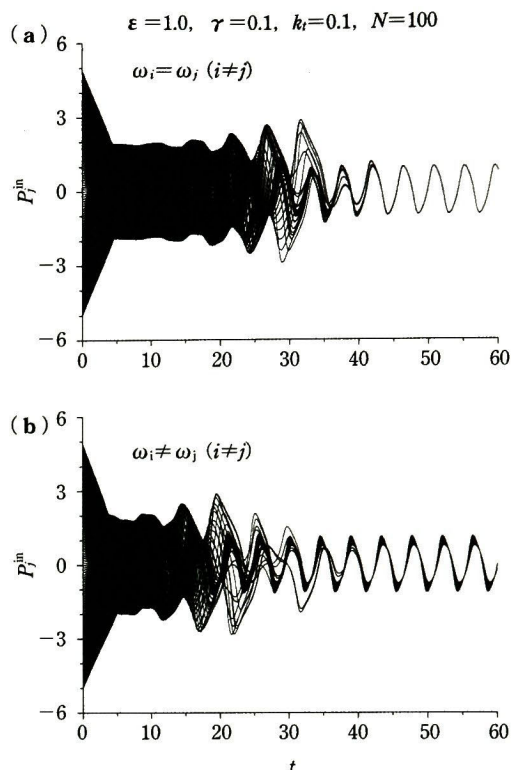


図6 100個のvan der Pol振動子間の相互同期。(a)すべての基本振動数が等しい場合、(b)すべての基本振動数が±10%の範囲内で異なる場合。

となることが知られており、 $x_j$  は回路  $j$  を流れる電流に対応する。ここでまず(4)式を

$$\frac{dx_j}{dt} = y_j \quad (5a)$$

$$\frac{dy_j}{dt} = -\omega_j^2 x_j + \epsilon(1 - x_j^2) y_j \quad (5b)$$

と書き換え、 $(x_j, y_j) = (P_j, R_j)$  または  $(x_j, y_j) = (R_j, P_j)$  と置くことで、(1)式または(2)式の中の関数  $F_j, G_j$  が決定できる。図6に基本振動数の異なる100個のvan der Pol振動子が(3)式に従って同期する様子を示す。ここで振動子  $j$  の基本振動数は  $\omega_j = 0.90 + 0.002 \times (j-1)$  である。一般にレセプターの感度  $\gamma$  を大きくすると同期化がより早くなるという特徴がある。ここで  $x$  と  $dx/dt$  の関係は有名なウサギ(被捕食者)と狐(捕食者)の数量変化とまったく同様にお互いの対応の遅れが起因となり、振動が発生しているとみなせる。

## 5. デジタル-アナログ変換

図6の同期状態で安定振動状態の振幅を図7にプロットしてみた。ここで横軸は振動子の番号で順番とともに振動数が増加する。注目すべきことは振動子間を結合していないときの振幅はほぼ2.0で振動数にほとんどよらないのに、結合状態では振幅が小さくかつ基本振動数の大きい振

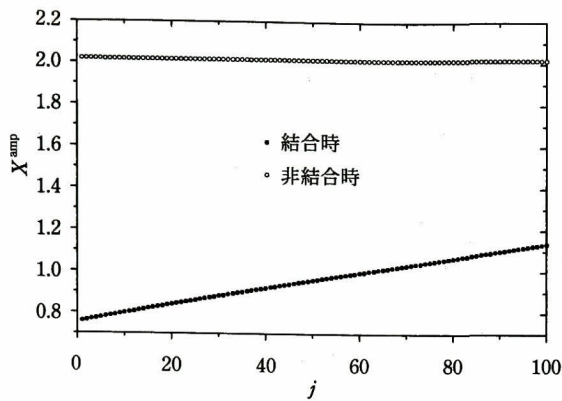


図7 相互同期状態下での振幅 ( $x^{\text{amp}}$ ) の基本振動数依存性. 横軸  $j$  は振動子の番号で番号が大きいくほど固有振動数が高い.

動子ほどその振幅が大きくなっていることである。すなわち基本振動数の違いが同期状態では振幅の違いとしてきれいに保持されている<sup>12)</sup>。もう少しわかりやすい例として図8を示す。同じ基本振動数のものは同じ基本振動数に対応する振幅に完全に収束することがよくわかる。動物の聴覚系などでも、このように特定の周波数を選別できることは大変重要である。例えば昆虫などでは、雑音の中でも特定の周波数を聞き分けられないと、同一種のおスとメスが出会えず子孫を残せないということが起こりうる。このように、デジタル入力同期状態下で振幅の差といった一種のアナログ状態として明確に区別されて保存できるということは注目に値する。ここでは数値計算の例を示したが、数学的にも厳密な結果として確認されている<sup>13)</sup>。

## 6. 生物の形づくりと結晶成長

細胞性粘菌の生存戦略としての凝集を含め生物の形づくりは必ずしも理想的とは限らない環境下で行われる。したがって形づくりにもロバスト性が要求されることになる。このロバスト性を保証しているのがまたレセプターの特性である。cAMPを分泌する細胞性粘菌が集まるのはcAMPの濃度の高いほうに集まる走化性という特徴である。一般に高いほうに集まるのを正の走化性、高いほうから逃げるのを負の走化性と呼ぶ。cAMPの走化性の強さはcAMPの濃度こう配の大きさに比例しているとみられる。凝集とともに走化性が弱まらなると、集まってきた粘菌アメーバは凝集中心を通り過ぎるか跳ね返ってしまう。ところが、レセプターを介したcAMP産生の相互同期は粘菌アメーバ同士が近寄るとcAMPの産生を下げさせる。このことが走化性の強さを減少させ、凝集を成功させることになる。粘菌アメーバの集団が小さいと、cAMP産生の増減が激しくそれに伴う走化性の激しい変化で集団は壊れてしまう。数学

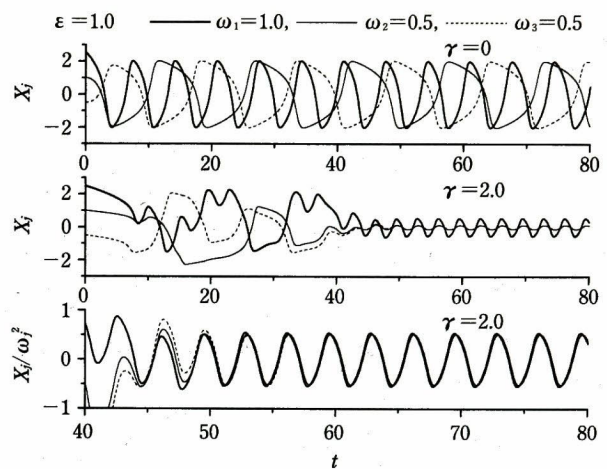


図8 同一基本振動数のものは同期状態下では同一振幅となることを示す。  $\gamma=0$  は相互作用がない場合。

的には小集団に分離して安定化した状態は局所平衡状態に対応するが、上記の理由で局所平衡状態が自動的に解除され大集団の形成へと向かうことになる (図9)。

細胞性粘菌の場合、細胞間の長距離力の大きさを調整しているのは自らが分泌する拡散性の物質である。同じような特性が非生物系でもありうるのではあるか？ そこで図10のような2艘の船が平行して動いている場合を考えてみる。もし船が動かなければお互いに接触しない限り力が生じない。しかし船が動き出し、それに伴う水面の波が十分大きくなると、船同士が互いに接触しなくても間接的に力を及ぼし合うことが可能になる。細胞性粘菌の凝集とこの船の例は周囲の媒体を介して長距離力を発生させているという意味で物理的に同等である。違いは相互作用の源がスカラー量である化学物質の濃度かベクトル量である周囲の媒体速度かということだけである。具体的な応用につながるため空気中の水分子について考えてみる。水分子が動くとき有名なストークスの法則で空気から摩擦を受ける。作用・反作用の法則に従えば、空気は逆に水分子から力を受け空気の波が発生することになる。水分子の密度が低ければ、この波が減衰する以前に他の水分子にまで到達する可能性は低い。しかし水分子の密度が十分高ければ、波の重

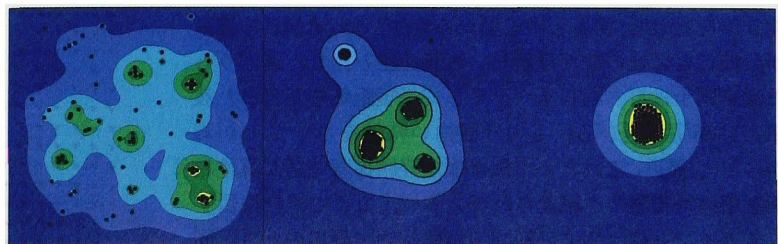


図9 細胞性粘菌の凝集シミュレーションの一例。黒丸は1個のアメーバ、等高線はcAMPの濃度分布を示す。明るい色ほど密度が高い。

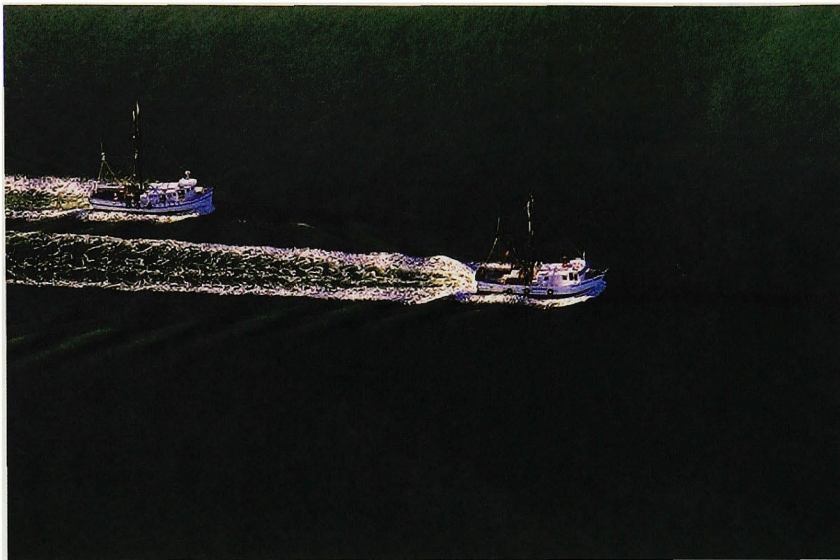


図10 2艘の船が動くとき海面に波が立ち海面を介して長距離力が生まれる様子を示す。

ね合わせで大きな波が発生し、水分子の動きを止めないまでも方向を変えられることになる(図11)。さらに空気中の波が到達できる範囲で全体の対象性がよければ全速度ベクトルはゼロになり、できあがった水分子のクラスターは安定化する<sup>15)</sup>。このような原理に基づく結晶成長の一例としては多種多様な六角対称の形になる雪の結晶などが考えられる。

### 7. 興奮系と最短経路探索問題

生体系では定常状態にわずかな刺激を与えるだけで、一過的に大きな変化をもたらす興奮性 (excitability) と呼ばれる状態がよくみられる。これもまたレセプターと切っても切れない関係がある。この興奮性が確認された例として、心臓細胞をリング状に並べた Mines<sup>16)</sup> と Garrey<sup>17)</sup> の実験が有名である。彼らはリングの一端を刺激したところ、収縮波が両側に伝わり衝突すると消滅するというのを見いだした。多数の細胞性粘菌を配置してシミュレーション実験を行うと、両者はまったく異なる系なのにそっくりの現象が観測された。このような興奮系の特徴がどのような意味をもつか調べるため、続いて図12のようなシミュレーションを行った。すると中心部から発生した cAMP の波束が分岐ごとに岐の数だけ新しい波束を生み出し、遠回りした波束同士は打ち消しあう、そして最短距離をたどった波束だけが生き延びる、という面白い特性を示すことがわかった<sup>2)</sup>。最近、これとよく似た最短経路探索問題が真性粘菌を用いた実験でも確認されている<sup>18)</sup>。ここで特に注目すべきポイントは、個々の細胞性粘菌は細胞凝集のときと同じようなレセプター系としての振る舞いをしているのに、図12に示した空間配置を与えられると新しい価値を生み出していることである。

### 8. 細胞性粘菌から脳型情報処理へ

脳とは何か？ 単細胞生物に脳がないことから、これは多細胞生物に固有な器官であることになる。多数の細胞がまとまって行動しようとするとき、当然ながら細胞間の調整が必要になる。この調整の中心が脳であるともいえる。動物の頭を切り取り、他の動物に接着させると頭が二つの動物になるなどという話はこれまでに聞いたことがない。しかし細胞性粘菌の移動体では実際そのようなことが起こる。移動体はパートタイムの動物状態であるから、通常の動物とは異なり、頭脳に対応する先端部分は凝集後に選別されている。仮にこの移動体の先端部分を切り

取り、他の移動体に移植するとする。移植される場所によっては移動体が2カ所の先端部分を核にして二つの移動体に分離するか、2カ所の先端部分が一つに融合するということが起こる。二つに分離した移動体はその後独立に行動することになる。ここで問題は移動体中の個々の細胞がどのようにして全体の変化を認識できているのかということである。このヒントになるのがまたもやレセプターを介した

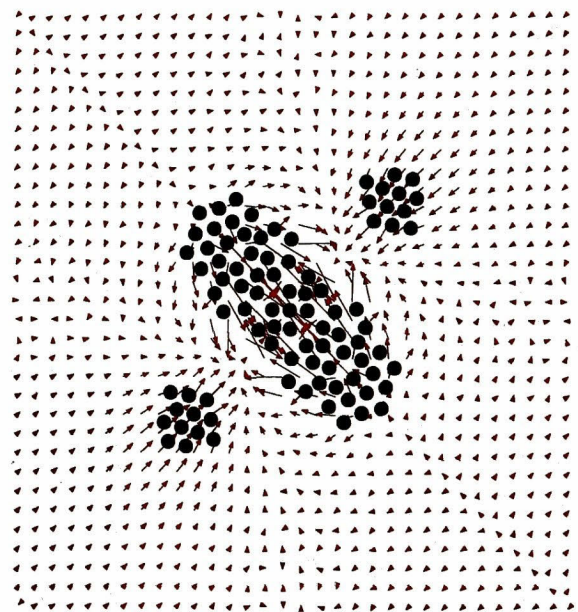


図11 水分子(黒丸)が空気中に波を生じ、その波が水分子のクラスター化に寄与する様子。矢印の方向と大きさは空気速度ベクトルの方向と大きさを示す。

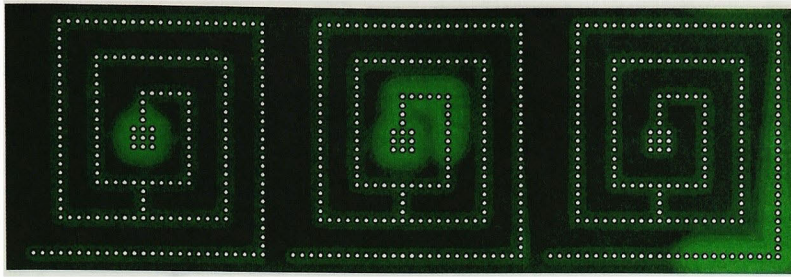


図 12 細胞性粘菌を適当に配置すると、化学物質 (cAMP) のパルス  
を周期的に発生し最短距離を伝達する。これは遠回りした波  
束は互いに打ち消しあうことで保証される。白丸は粘菌ア  
メーバ 1 個、明るい緑色は化学物質の濃度が高いことを示す。

相互同期である。図 6 で注目していただきたいのは、振動子の数が増加するにつれ、振幅が 2.0 より小さくなっているという事実である。細胞性粘菌の cAMP 産生リズムの場合でも、同様なことが観測されている。実際、細胞性粘菌では細胞外 cAMP 濃度の変動が一定数のアメーバが凝集すると止まるとということが観測されており、実験と理論のつじつまが合う。これは細胞集団が分割されるとか、細胞集団同士が合わさるといった外的変化が、レセプターを介した相互同期を通して、速やかに細胞内の振動状態の変化として個々の細胞に伝えられていることになる。もちろん実際の脳ははるかに複雑な機能もこなしているが、その基本は案外このように単純なロジックの組み合わせなのかもしれない。

## 9. 生物型システム設計の可能性

生物の最大の特徴は、(一定の範囲内という条件がつくが) 対処プログラムが用意されていない新規の課題でも自分で解決できる柔軟性であろう。これに対し人間はすべての課題を予想し、その対処プログラムを組み込んでシステムを設計しようとする。このようなアプローチでは必然的にシステムは大規模かつ複雑化し、柔軟性に欠ける。これまでの細胞性粘菌の生存戦略に関する研究が強く示唆していることは、複雑そうに見える生物も実際には比較的単純なロジックの組み合わせらしいということである。生物が複雑そうに見えるのは単にタンパク質をベースとして体の

構築およびエネルギー生産などすべての機能を自分自身で実現しているからである。したがってわれわれが必要なエネルギーを外部から供給し、構造体も用意できる場合であれば、比較的近い将来でも本研究がめざす生物型システムを工学的に実現できる可能性が高いといえる。

## 文 献

- 1) Nature Neurosci. 3, Special Supplement (2000).
- 2) S. Nagano: Develop. Growth. Differ. 42, 541 (2000) (Review).
- 3) <http://www.nih.gov/science/models/>
- 4) 前田みね子・前田靖男: 粘菌の生物学, (東京大学出版会, 1978).
- 5) <http://dicty.cmb.nwu.edu/dicty/dicty.html> (細胞性粘菌の国際ホームページ)
- 6) <http://www.csm.biol.tsukuba.ac.jp/ken9kai/> (細胞性粘菌の国内研究会ホームページ).
- 7) 前田靖男編: モデル生物: 細胞性粘菌 (アイビーシー出版, 2000).
- 8) P. C. Newell: In Fungal Differentiation/ A Contemporary Synthesis (Ed. J. E. Smith). Mycology Series 43, p. 43-71. (Marcel Dekker, New York, 1983).
- 9) 例えば, 三池秀敏・森 義仁・山口智彦: 非平衡系の科学III (講談社サイエンティフィック, 1997).
- 10) S. Nagano: Phys. Rev. Lett. 80, 4826 (1998).
- 11) 田中久陽, 大石進一: 日本物理学会誌 53, 200 (1998).
- 12) S. Nagano: Prog. Theor. Phys. 103, 229 (2000).
- 13) S. Nagano: Prog. Theor. Phys. submitted.
- 14) 例えば, 戸田盛和, 渡辺慎介: 非線形力学 (共立出版, 1991).
- 15) S. Nagano: J. Phys./ Condens. Matter 10, 11577 (1998).
- 16) G. R. Mines: J. Physiol. (Lond.) 46, 349 (1913).
- 17) W. E. Garrey: J. Physiol. 33, 397 (1914).
- 18) T. Nakagaki and H. Yamada: Nature 407, 470 (2000).

(2001年3月27日 受理)



ながの せいどう  
長野 正道

1976年東北大学物理学科卒, '81年東京大学大学院理学系研究科物理学科修了, '81年~'87年, Caltech, UCSB ほか, 米国にて研究員として勤務。'87年より NEC 基礎研究所に勤務。主任研究員。専門は多体問題, 散乱問題, 生物物理ほか。理学博士。