

単細胞が教えてくれること

— 粘菌からロボットへ —

小林 亮（広島大学大学院理学研究科）

1 真正粘菌変形体

皆さんは、真正粘菌という動物とも植物ともつかぬ一風変わった生物をご存知でしょうか。真正粘菌はそのライフサイクルにおいて、様々な状態をとります（図1）。ある段階では孢子の状態をとるので、きのこやカビのような菌類の仲間のようにも見えます。しかし、孢子から発芽して出てくるのは、菌類では菌糸ですが、粘菌の場合はアメーバです。このアメーバには性があり二つのアメーバが合体して接合子を作ります。この接合子が、独特の成長過程を経て変形体と呼ばれる状態に至ります。この変形体は、森の朽ち木や落ち葉の下に見ることができます（図2(a)）。この変形体が今日のお話の主役です。

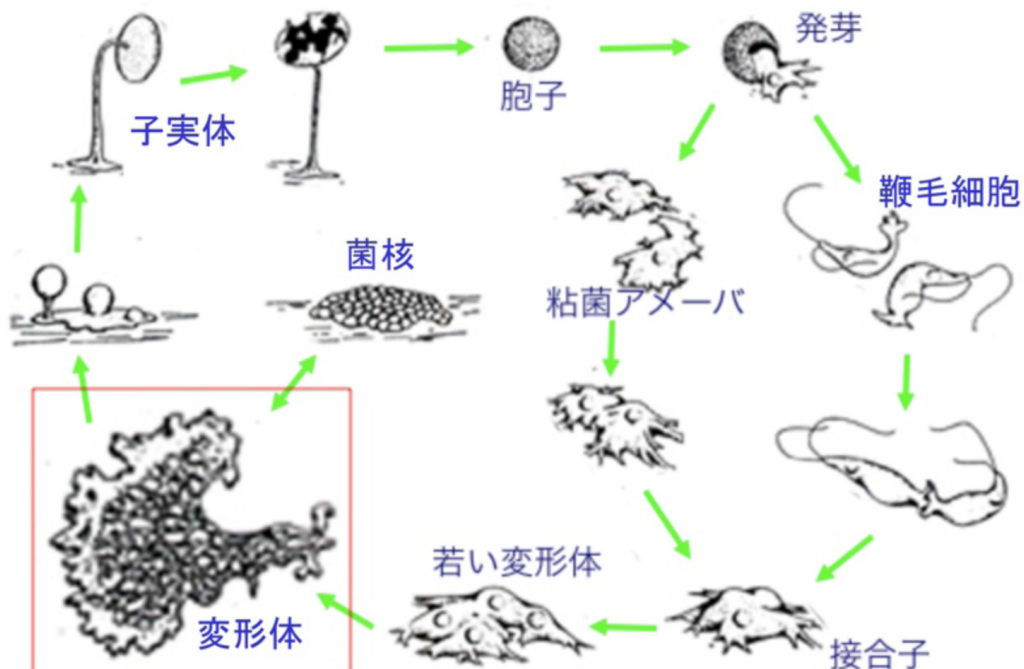


図 1: 真正粘菌のライフサイクル

変形体は一口で言えば、原形質の塊で、多核の単細胞生物です。この変形体は単細胞生物とはいえ、条件が良ければ数10cm～数mの大きさになることもありますし、また1 mm以下の小片に切り分けられたとしても、それぞれが問題なく生きて行くことができます。驚くべきことに、それらのバラバラになった変形体同士が接触すると、融合し再び一つの変形体になってしまうのです。こんな融通無碍な生物は、まず他には見当たりません。

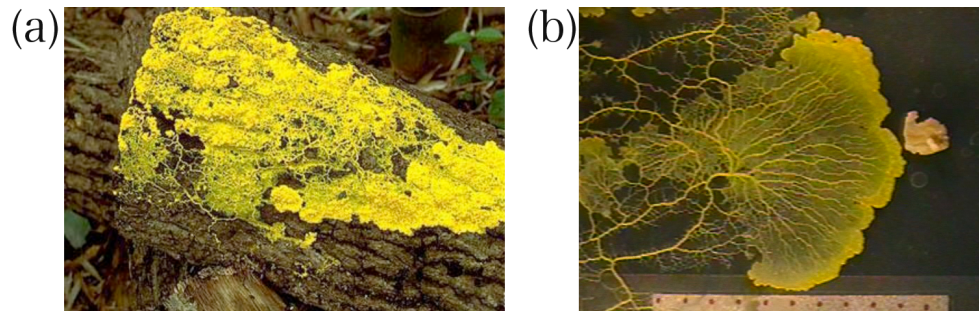


図 2: (a) 朽ち木の上を這う野生の変形体^[3] (b) 餌を探す変形体：フロント部分（右端）はシート状で、その後方では管のネットワークが発達している。

変形体は図 2(b) のように、細かく枝別れした管状構造のネットワークからなっていて、この管の中を原形質が流れています。この流路網に従って原形質を輸送しながら、同時に流路網そのものの形を変えることによって、粘菌は移動します。粘菌はそうすることで、自分にとって快適な場所（栄養分、温暖、多湿 etc.）に近寄ったり、不快な場所（忌避化学物質、寒冷、乾燥 etc.）から逃れたりしているのです。

このように変形体が一個体として調和のとれた運動をする以上、何らかのレベルの情報処理がなされているはずですが、一見したところ変形体は、脳も神経もない単なる原形質の塊のようです。我々人間ならば、目や耳から情報を得て、脳で考え、筋肉で動くという分業体制になっていますが、変形体は情報の獲得も、判断も、運動もすべて身一つでやるというオールインワンシステムです。私たちは、このように原始的な生物である粘菌を、物質レベルから生物的な情報処理が創発してくるメカニズムを探る上での絶好のモデル生物と考えています。本日は、その研究の中で見えてきた、粘菌の意外な賢さを紹介したいと思います。

2 変形体が迷路を解く？

粘菌博士として有名な中垣俊之氏は、実にユニークな実験を行い、科学誌 Nature に発表しました。彼は、変形体が迷路を解くことができること、のみならず最短の経路を求めることができることを示したのです。どのような実験か、簡単に紹介しましょう。

まず、図 3 (a) のように迷路を変形体で満たしておきます。そして、迷路のスタート地点とゴール地点に餌（オートミール）を置いたところが初期状態です。しばらくしますと、管のネットワークが現れ、行き止まりにある管がまず最初に消失します（図 3 (b)）。

実はこの迷路，答えは一通りではありません．実際，図 3 (a)にあるように，経路 α_1 と

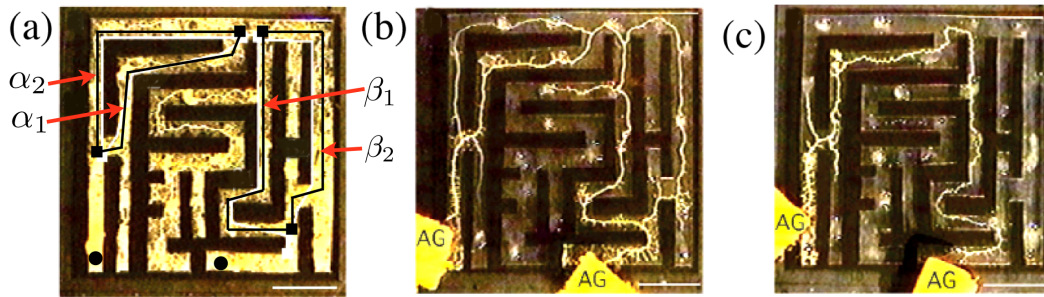


図 3: (a)-(c) は変形体が迷路を解いていく時間経過

経路 α_2 および経路 β_1 と経路 β_2 という選択肢があり，全部で 4 通りの経路があり得ます． α_1 と β_1 が，それぞれの選択肢で短い方の経路です．図 3 (b) の段階では可能な選択肢はすべて残っていますが，さらに時間が経過すると図 3 (c) のように最短経路 (α_1 と β_1 を含む経路) のみが残されます．結果として，変形体は最短経路探索問題を解いたことになるのです．

ここで，なぜ変形体にこのような芸当ができるのかを，変形体の気持ちになって考えてみましょう．

1. できるだけ多くの「からだ」で餌を覆いたい．
2. できるだけ個性（連結性）を維持したい．

この 2 つの要請を同時に満たそうとすれば，できるだけ多くの細胞質で餌を覆いながら，できるだけ短い管を残して 2 つの餌をつなぐ，というのは妥当な作戦でしょう．これはよく考えてみると，変形体が最短経路を求めることに他なりません．

さてこれはこれで，一つの説明ではありますが，やはり変形体がどのようにして迷路を解いているかを説明しなければ，本当にわかった気にはなれません．そこで，数理モデルを用いて，この過程を表現することを目指すことにします．まず第一に，管のネットワークが与えられたとき，そのネットワークの中をどのように原形質が流れるかを計算する必要があります．次に管のネットワークが，時間とともにどう変化していくかを記述しなければなりません．実は実験によって，流量の大きい管は太くなり，流量の小さい管は退化するということが知られています．このあたりは，よく使う筋肉は発達し，使わない筋肉は萎縮するというのと同様で，生物に共通の性質のようです．

ここでは，あまり詳しいことは説明しませんが，上に述べたことを数理モデルで表現しますと，以下ようになります．

$$\sum_i \frac{D_{ij}}{L_{ij}} (p_i - p_j) = \begin{cases} -1 & j = 1, \\ +1 & j = 2, \\ 0 & \text{それ以外,} \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} D_{ij} = f(|Q_{ij}|) - D_{ij} \quad \text{ただし} \quad Q_{ij} = \frac{D_{ij}}{L_{ij}} (p_i - p_j). \quad (2)$$

この数理モデルを用いて、シミュレーションを行った結果が図4に示してあります。まず、袋小路の経路が消失し、その後に最短経路が求まっているのがわかります。我々はこの数理モデルを「フィザルムソルバー」と名付けました。「フィザルム」とはこの粘菌の学名です（通り名でもあります）。

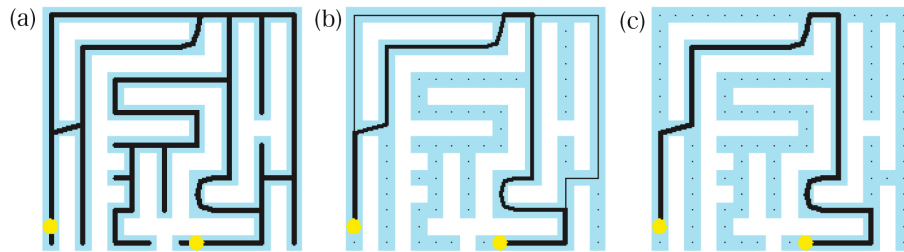


図 4: (a) 初期状態 (b) 袋小路からなくなった状態 (c) 最終状態

次に、このフィザルムソルバーを、カーナビゲーションに応用してみましょう。アメリカ合衆国の高速道路網を使ってシアトルからヒューストンに車で旅をするという設定です。ペトリ皿の中の現象を眺めながら作った数理モデルですが、ひとたび原理が明らかにされれば、ネットワークの規模は関係ありません。図5に見られるように、最終的にシアトルからヒューストンを結ぶ最短経路が求まりますが、途中の段階を見ると、次善の経路やさらに次に見込みのある経路はかなり後の段階まで生き延びていることがわかります。

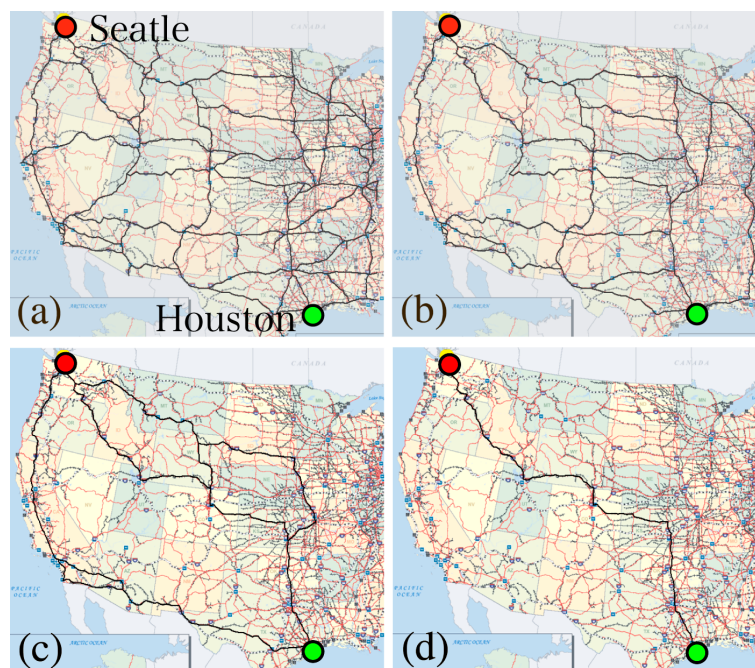


図 5: (a) ハイウェイネットワーク (b) 見込みの薄いハイウェイから脱落 (c) 候補がかなりしぼられた状態 (d) 最短経路

3 粘菌に学ぶネットワークデザイン

鉄道網，道路網，電力網，水道網，電話回線網，インターネット等々，世の中にはいろいろなネットワークがあります．これらはすべて，人や物またエネルギーや情報などを輸送するという役割を担っていて，私たちの社会を支えている重要な基盤です．もし，あなたがこのようなネットワークを設計する立場になったら，なんとかしていいネットワークをデザインしたいと考えるでしょう．でも，どのようなネットワークがいいデザインなのかというと，これはそれほど簡単な問題ではありません．

どのようなネットワークも，造るのはタダというわけにはいかないのです，コストが一つの評価基準になるでしょう．また，輸送を目的としているネットワークであれば，輸送効率が重要なことは言うまでもありません．さらに，何かのトラブルが起こったとき，それが大きなダメージに繋がらないことも重要です．これは耐故障性と呼ばれる評価基準です．

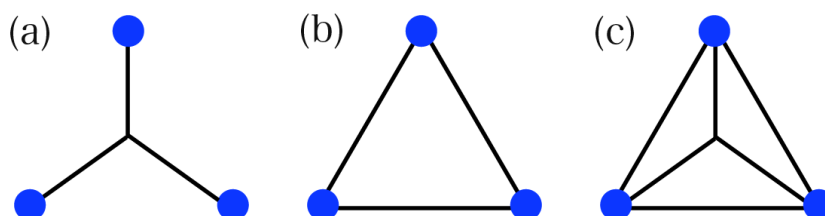


図 6: 3つの町をつなぐ道路のネットワーク

簡単な例として，図6のような3つの都市を結ぶ道路網を考えてみましょう．コストは道路の長さに比例するとして，道路の長さの合計で評価するとします．コストの面から見た場合は，(a)が最善の形です（このような複数の点を結ぶ最短の経路をスタイナー経路といいます）．しかし，隣の町に行くのに直線経路で行けないので，輸送効率は最善とは言えません．また，何かのトラブルで道路が1カ所でも切れてしまうと，必ず1つの町は孤立してしまいますので，耐故障性ははなはだ低いと言わざるを得ません．(b)のように町同士を直線の道路で結べば，(a)よりはコストがかかりますが，輸送効率はベストです．さらに，道路が1カ所で切れたぐらいでは，どの町も孤立することはありませんので，耐故障性は改善されています．さらに(a)と(b)を足しあわせたような道路網(c)を作れば，輸送効率は最善である上，道路が2カ所切断されても，孤立する町はなく，高い耐故障性を誇っています．よって(c)が3つの中ではベスト，と言いたいところですが，当然余分な道路を作った分コストが高くついています．

ネットワークの評価の指標として，コスト・効率・耐故障性という3つを考えたとき，コストと効率，コストと耐故障性はトレードオフの関係（あちらを立てればこちらが立たず，という関係）になっています．現実のネットワーク設計においては，これらの指標をバランスよく満たすようにしなければなりません．このような問題は，多目的最適化問題と呼ばれていますが，粘菌はこの問題をどのように解いているのでしょうか．粘菌はネットワークを作ることにかけては大先輩ですので，粘菌に首都圏の鉄道網をデザインしてもらい，実際の鉄道網と比較してみましょう．そのために，まず首都圏の主要都市の位置に餌

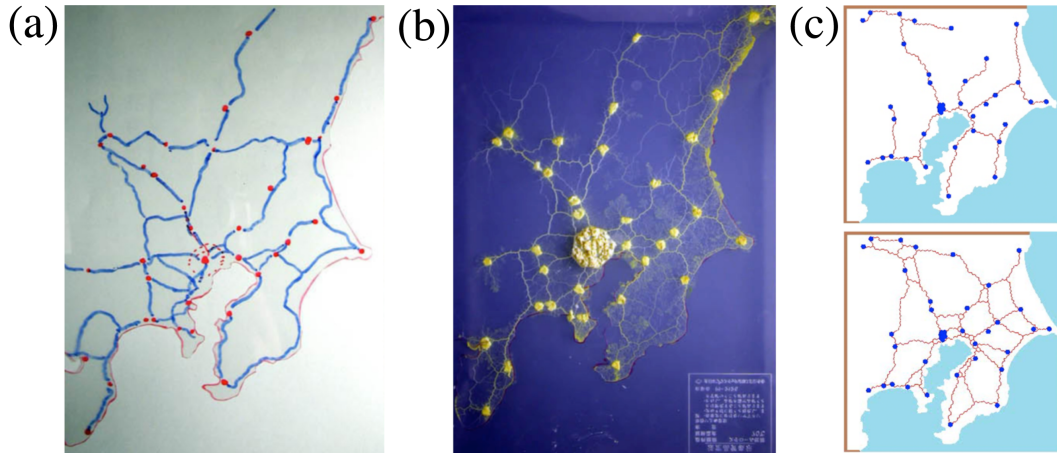


図 7: (a) 実際の鉄道網 (b) 粘菌によるネットワーク (c) 数理モデルによるネットワーク

を配置して、東京 2 3 区に当たる部分にある程度の大きさの粘菌を置き数時間放置します。その結果、図 7(b) に示されるように、粘菌は各都市（餌）を結ぶネットワークを作りました。同じ実験を繰り返しても類似のネットワークが形成され、それは実際の鉄道網（図 7(a)）に近いものでした。

粘菌の作るネットワークと実際の鉄道網を、コスト・効率・耐故障性の観点から比較したところ、粘菌のネットワークは多くの場合、人間が苦勞して作った鉄道網と同等以上のものであることがわかりました。また、私たちは前節で紹介した フィザルムソルバーを改造して、適応ネットワークモデルを提案しました。このモデルでは、パラメータを変えることでコスト重視型（図 7(c) 上）から効率・耐故障性重視型（図 7(c) 下）まで、様々なタイプのネットワークを作り出すことができます。まさしくこれも、粘菌に教わった知恵の一つです。

さて、ここでもう一度重要なことを確認しておきましょう。最短経路を求めるのも、ネットワークを設計するのも、人間と粘菌ではやり方が根本的に違うということです。我々人間は、目から得た情報をもとに、ああでもないこうでもないと脳でいろいろと考えて問題を解決しようとしています。一方、粘菌には脳はもちろん、神経もありません。粘菌はただ身体を広げ、状況に応じて管を作ったり引き上げたりしているだけで、問題を解決しているのです。このように全体を統制する情報中心なしで、各部分が適当に振る舞うことで、全体としてなんらかのタスクを達成するような系を「自律分散システム」と言います。粘菌はいわば究極の自律分散システムなのです。

4 粘菌からロボットへ

動物たちの動きを見ると、とても柔らかくしなやかです。それは動物のからだに多くの力学的な自由度があること、そしてそれを同時にうまく使いこなすことで実現されています。また、未知の環境に対してもリアルタイムで対応できるというタフさも兼ね備えています（もちろん、そうでなければ自然の中で生き延びることはできません）。

一方、ロボットはどうでしょうか。現在のロボットは、ひと昔のロボットに比べればはるかに滑らかに動きます。特に、工場ではたらくロボットアームの動きは素早くて正確です。こういう技術を見ていると、もうロボットが人間と共存する社会はすぐそこまで来ているようにも思えるのですが、ここに一つ大きな問題があります。それは未知の環境の中を、タフに動き回ることのできるロボットはいまだに作れない、という事実です。遙か遠くの天体に探査機を送り込む技術がありながら、我々の周りのありふれた日常的な空間を自由に動き回れるロボットを作ることは難しいのです。

これにはいくつかの深い理由があるのですが、その一つは現在のほとんどのロボットが、中央集中型制御で動いているということにあります。これは強力な CPU にすべてのセンサー情報を集め、すべてのアクチュエータ（モーター等の力を出す部品）を動かすための制御信号を計算するという、中央集権型の制御方策です。これは、いわば霞ヶ関が日本中の役所で日々起こる諸々の事態に対して、すべて判断を下すというようなシステムです。こんなことは不可能であることはすぐにわかりますね。実際は、個々の役所で日々の事態に対処し、霞ヶ関は大まかな方針を示したり報告を受けたりしている訳です。

大自由度を持ち、かつ未知の状況に対処しないとイケないというシステムでは、どうしてもこのような地方分権型の制御方策を考える必要があります。このような制御方策は「自律分散制御」と呼ばれています。辞書的な固い定義を述べますと「単純な知覚、判断、行動出力の機能を持つ要素（自律個）が多数集まり相互作用することで、大域的に有用な機能を創発させる制御方策」ということになります。一人一人はたいしたことなくても「3人（多数）よれば文殊の知恵」というわけですが、問題はこういうシステムを設計するにはどうしたらいいか、ということです。へたな設計をすると「文殊の知恵」どころか「烏合の衆」になってしまいかねません。実は、大自由度を持つロボットの自律分散制御に関しては、これといった設計原理がないのです。そこでこの問題を解決すべく、粘菌博士である中垣俊之氏（北海道大学）とロボット工学者である石黒章夫氏（東北大学）と私の3人でチームを作り、プロジェクトを立ち上げました（JST, CREST 2008–2014）。私たちのモットーは「粘菌に学べ」、すなわち究極の自律分散システムである粘菌に、自律分散制御の真髄を教えてもらおうと考えたのです。

粘菌の身体を観察しますと、体中いたるところが約2分周期で収縮と弛緩の振動を繰り返しているのがわかります。このようにある周期で振動を繰り返すユニットを「振動子」と呼びます。粘菌はこのような振動子の集合体と見ることができます。収縮したところでは圧力が高まり、弛緩したところでは圧力は低くなります。粘菌の原形質は圧力の高いところから低いところに流れることになりますが、このとき全体として意味のある原形質流動を作り出すためには、各部の振動子が好き勝手に振動してはいけません。簡単な例を挙げますと、図8のようなダンベル型の粘菌では、左右の振動が反位相になる（左が収縮しているときは右が弛緩、左が弛緩しているときは右が収縮）ことが知られています。これによって、左の部分と右の部分の間に強い往復原形質流動が生まれ、物質や情報のやりとりをしていると考えられます。

ここで位相という言葉が出てきましたが、これはどんなタイミングで収縮と弛緩が起きるかを測る時計のようなものと考えてください。この時計に従って、アクチン-ミオシン系（粘菌における筋肉のようなものです）は力を出すか緩めるかを決めています。

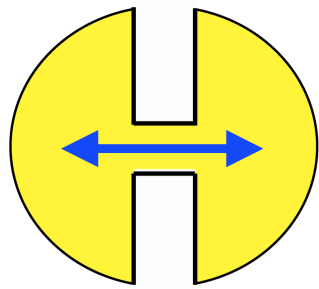


図 8: ダンベル型の粘菌に見られる反位相振動：強い原形質流動が生じている。

それと同時に、アクチン-ミオシン系から時計に対してフィードバック信号が出ていると考えられます（図9）。そうでなければ、うまく反位相の振動を作れないからです（ここでも、全体を監督している中心司令部のようなものはないことに注意してください）。数理モデルを使って解析しますと、このフィードバック信号はアクチン-ミオシン系にかかる負荷を減らす方向に時計をずらすように働いていないといけなことがわかります。

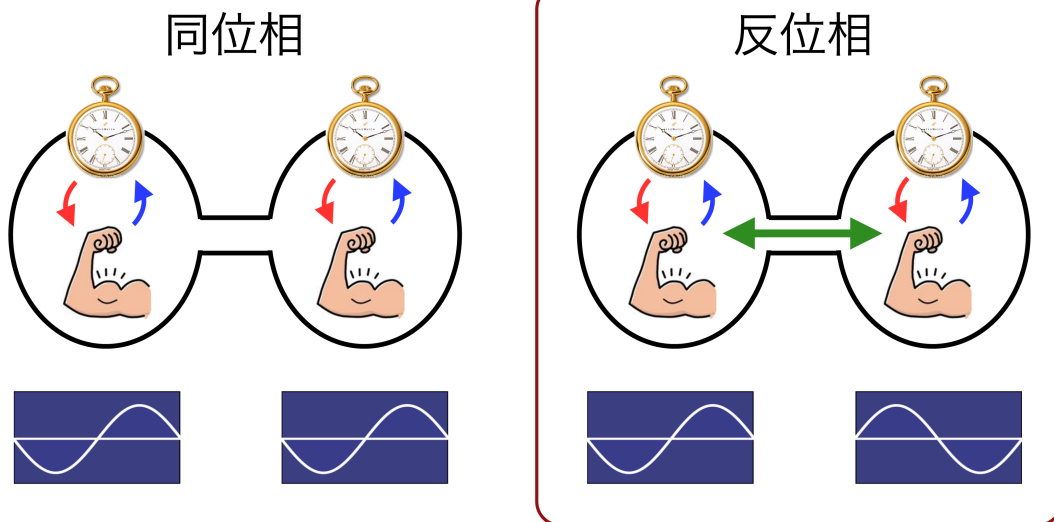
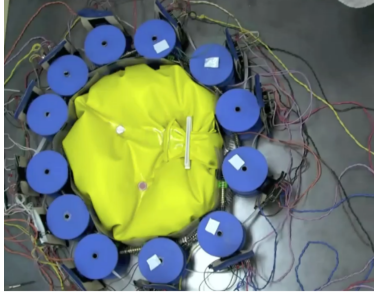


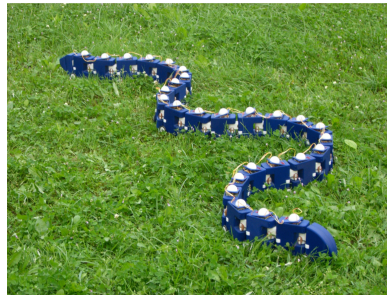
図 9: 同位相振動と反位相振動：同位相振動では原形質流動は起こらず疲れるだけであるのに対し、反位相振動では原形質流動を作り出すことができる。

このシンプルなフィードバックの原理を数式に表し、いろいろなタイプのロボットに注入してみました。アメーバ型ロボット Slimy, ヘビ型ロボット HAUBOT, 4脚ロボット OSCILLEX などがそのラインアップです（図 10）。これらのロボットでは、振動子が局所的なコントローラとして働いており、アクチュエータにかかる負荷（力）の情報を使って位相を制御しています。

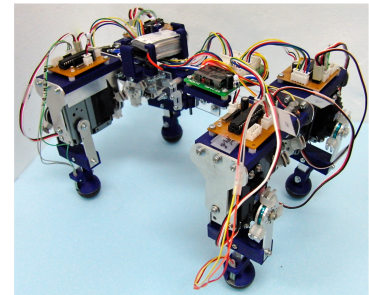
4脚ロボット OSCILLEX を例に挙げましょう。普通の4脚ロボットは中心の司令部から脚を動かすタイミングの指令を受けて動きますが、このロボットにはそんな中心部は



Slimy



HAUBOT



OSCILLEX

図 10: 自律分散制御で動くロボットたち

なく、4本の脚が独立して動いているという、まさしく自律分散的なロボットです。こんな設計では、うまく脚同士の協調ができるはずがないように思えますが、各脚を制御している振動子は身体からフィードバック信号を受けていて、それによって脚同士はちゃんと相互作用をしているのです。驚くべきことに OSCILLEX は、その簡単すぎる制御則にもかかわらず、実際の動物で見られる各種の歩行パターンを再現し、さらには歩行から走行へ移行する際に見られる「ウォーク → トロット → ギャロップ」という歩容遷移をも自然に再現することができたのです（世界初!）。まさしく、粘菌に教わった知恵のおかげですね。

5 おわりに

我々人間は、人間以外の生物を下等なものとして見下しがちです。とりわけ粘菌のような単細胞生物などは、とるに足りないものと思うかもしれませんが（実際、お前単細胞な奴や、と言われて喜ぶ人はいないでしょう）。しかし、粘菌は現実には何億年もの年月を生き延びてきているのです。このことは、何より彼ら自身がシンプルで優れたシステムであることを意味しています。そうでなければ、何億年という長い年月を生き延びることはできません。私たち自身が、ひとたび謙虚な気持ちになりさえすれば、生き物として大先輩である彼らからさまざまなことを学ぶことができます。

今回紹介しました例を見てもわかりますように、本気で彼らのやり方を学ぼうと思うと、数理モデルが必要になります。それなくしては、最短経路計算法もネットワーク設計法も抽出できませんし、自律分散制御則もロボットに注入できないことはおわかりでしょう。このように、生き物を理解し学び取り、さらには利用するための強力な道具が「数学」なのです。

参考文献

- [1] 中垣俊之：「粘菌 その驚くべき知性」(PHPサイエンス・ワールド新書)
- [2] 中垣俊之：「粘菌 偉大なる単細胞が人類を救う」(文春新書)
- [3] 松本淳, 伊沢正名：「粘菌？ 驚くべき生命力の謎」
- [4] 小林亮, 中垣俊之：「理論生物学 (望月敦史編)」第3章5節「真正粘菌の運動と知性」

本でご紹介した内容は、中垣俊之氏、手老篤史氏、高木清二氏、石黒章夫氏ほか多くの方々との共同研究の成果です。