



INVITATION

北海道大学
電子科学研究所

「知性」とは何か。
単細胞生物に
そのメカニズムを探る。

所長 学術博士 中垣俊之 氏

北海道大学電子科学研究所は、面積約1776m²(東京ドーム約38個分)という広大な札幌キャンパスの北東部に位置する。取材に伺ったこの日は一面の雪景色

イグノーベル賞に2度輝く

粘菌という生きものをご存知だろうか。単細胞で核を持ち、動物のように動き回り、キノコのように胞子で増える、生物分類の枠を超えた不思議な存在だ。胞子や、そこから生まれたばかりの頃は目に見えないほど小さいが、条件が整えば、ときには数十cm以上に巨大化する変形体となる。

「変形体は、細胞としては1つのまま、核だけが分裂して無数に増えています。内部には細かな管が網目状に張り巡らされ、その中を養分や信号物質を含む細胞原形質が流れています」。この謎めいた生物を長年の研究テーマとしてきた、北海道大学電子科学研究所の中垣俊之所長は、そう教えてくれた。

中垣氏の名声とその独創的な研究内容は、「人々を笑わせ、考えさせる研究成果」を讃えるイグノーベル賞を受賞したことで一躍社会に広まった。小林亮氏(現広島大学教授)、手老篤史氏(現九州大学准教授)らと共に取り組んだ、粘菌の迷路を解く能力を証明した研究が、2008年に「認知科学賞」に輝いたのだ。さらに、この共同研究を発展させ、関東圏の鉄道網を例に粘菌が最適な路線を設計できることを示した研究は、2010年に「交通計画賞」を受賞している。

「2つの研究は、どちらも粘菌の行動を数理的に解き明かすことをめざしたものですが」と中垣氏は言う。受賞理由となった実験の詳しい内容は『粘菌 偉大なる単細胞が人類を救う』などの著作に譲り、ここではその骨子だけを述べると、粘菌は複数箇所にエサがあると、それぞれのエサに体を集中させ、間をつなぐ最短ルートを管で結ぶ形態となる。迷路や鉄道網のようにルートに複数の選択肢があっても、その中から最適なものを選ぶのだ。

「迷路解きでは最短経路を、鉄道網ではネットワークの





中垣氏が関心を持つ反応拡散系の代表的な化学反応である「BZ反応」のデモ映像。反応で生じた同心円状の模様が広がっていく様子は美しい



上：粘菌にはさまざまな種類があるが、研究には飼育法が確立されている「モジホコリ」を用いる。エサはオートミールで、特に有機栽培のものがお気に入りだ

上右：クラミドモナスの動きを顕微鏡で観察する。眼点と鞭毛があり、光を感じて元気に泳ぎ回っている

右：ワラの煮汁でゾウリムシを培養中。ワラに付着している枯草菌などがゾウリムシのエサになる



全長(経済性)、迂回ルート(対故障性)、各拠点間の距離(連絡効率)という、トレードオフになる3つの要素をバランスよく満たす、最適なネットワークを形成しました。脳や神経を持たない単細胞生物なのに、その賢さに驚かされます」。

生物の行動から知能メカニズムを解明

生物をテーマとする研究には、生態学、生理学、生化学、遺伝学などのさまざまな角度があるが、中垣氏が追求しているのは、自分が名づけた「物理エソロジー(動物行動学)」、生物の行動を物理・数理の側面から解明するという新しい学問分野だ。「生物の行動は、周囲の環境情報を入力情報とした情報処理のアウトプットであると言えます。その情報処理の特性や仕組みを解明することは、知能や知性というものの解明につながります。そこで、生物の基本形である単細胞生物やそれに近い生物に着目し、その行動を力学の運動方程式で記述するとともに、そこから、他の生物とも共通するような、身体運動制御や問題解決知能のアルゴリズムを抽出することをめざしています」。

例えば迷路の場合、人間は主に視覚情報をもとに脳で考えて解くが、粘菌は体の各部の状態を環境に応じて変化させることで解く。つまり、身体運動のメカニズムがそのまま知能のメカニズムと考えられる。人間の意志決定や行動は粘菌よりも高次な機能によるものだが、ミクロなレベルで考えれば、化学反応や細胞の運動によって細胞間で情報伝達物質が処理されたことの結果だと言える。そこには、単細胞生物と共に通するような原理、物理法則があるのかもしれない。

中垣氏が所長を務める電子科学研究所は、従来の学問体系から脱却し、光・物質・生命・ナノテク・数理科学の融合による新しい学際領域を開拓することをミッションとし

ている。電子科学研究所で粘菌研究と聞くと意外に思えるが、中垣氏の研究内容を聞けば納得できるだろう。

粘菌はこうして迷路を解く

では、脳も神経も持たない粘菌は、どのようにして最適解を選択しているのだろうか。中垣氏は次のように説明する。

「簡単に言うと、内部にある管を細胞原形質が流れる量がカギとなっています。複数箇所にエサがある場合、粘菌は1つの個体を維持しながら効率よく栄養を吸収したい。そこで、体を各エサに分散させつつ、その間をなるべく太く短い管でつないでエネルギーを減らそうとします。そのためには、管の中で流量の多い管が太くなり、小さい管は退化していくのが合理的です。人間の神経回路でも、よく使う回路は発達し、あまり使わない回路は衰退しますが、これは生物に共通するメカニズムなのでしょう。粘菌の場合は、その結果として、迷路の最短経路という最適解が導き出されるのです」。

この粘菌の管の成長法則を運動方程式として記述すると、次のようになる。

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

これは、ある一部の管 ij の導通率(太さに関連する) D_{ij} が、その管自身の流れ Q_{ij} のある増加関数 $f(Q_{ij})$ で時間変動することを表す。この方程式と、管内の細胞原形質の流動法則を記述する方程式を組み合わせた数理モデルを用いると、迷路解きのほか、道路地図で2点間の最短経路を割り出すシミュレーションもできる。

体の部分がそれぞれ最適にふるまつた結果として、見事

生物の運動メカニズム
観察例はこちら

<http://www.labscope.net>



Lab SCOPE NEB



やさしく穏やかな口調で、粘菌や原生生物のおもしろさを熱心に語る。書棚には粘菌をはじめとするさまざまなジャンルの書籍がぎっしり。

に最適解を導き出す粘菌の行動。「これはまさに自律分散システムですね。全体を統べる中枢がなく、部分が自律的に動くことで、全体として合理的に機能する系です」と中垣氏。粘菌研究とは系譜が異なるが、生体システムを範として考案された「自律分散」コンセプトは、鉄道や鉄鋼などのシステムや、日立ハイテクノロジーズの機器にも応用され、広く社会・産業インフラに役立っている。天与の自律分散システムである粘菌から学べることも、まだまだ多くありそうだ。

迷い、選択する粘菌

このように興味深い生態と知的能力を持つ粘菌は、南方熊楠を筆頭とする多くの科学者を魅了してきた。中垣氏もその一人だ。「大学3年生の学生実験で粘菌を初めて見て、こんなおもしろい生きものがいるのかと感動したのが、粘菌研究の道に進んだきっかけです。薬学部でしたが、そもそも生物を物質面から見ることに関心を持っていたこともあり、卒業研究も、修士課程でも、物理化学の手法による粘菌研究をテーマとしました。生命現象という非線形な科学現象を説明する反応拡散系、パターン形成といった観点から粘菌を理解したいと思ったのです」。

その後、研究者への夢はあったものの、博士課程には進まず製薬会社に就職する。その理由を中垣氏は「周囲が優秀な方ばかりで自信をなくしてしまった」と言う。製薬会社では研究室に所属し、仕事にもやりがいを感じていた。「でも、もともと好きだった数理科学の勉強を続けていたうちに、やはり研究の道に進みたいと思うようになり、一念発起して退職。博士課程に進学して粘菌研究を再開しました」。

以来20年以上付き合う中で、粘菌には好き嫌いや個性があることもわかった。粘菌の嫌うキニーネを適度に薄め、細長い容器の中心に塗っておく。容器の端に粘菌を置くと反対の端に向かって移動し始めるが、キニーネに出会うといつたん止まってしまう。数時間後に再び進み始めたとき、粘菌の行動は、キニーネを乗り越えて進む、元の場所に引き返す、体の一部が乗り越えて残りは引き返すという3パターンに分かれる。「個体によって行動が分かれる理由は研究中ですが、少なくとも粘菌には個性の原型や、迷いのプロセスがあるのだろうと考えられます」。

嫌いなものに挑戦したり、逃げたり、どうすべきか迷ったり。生物として見れば共通性があるのは当然なのかもしれないが、粘菌も人間と変わらないのだと思うと、何となく親しみをおぼえる。

生命の不思議を追い求めて

中垣氏の研究室では、粘菌以外の単細胞生物として、繊毛虫のゾウリムシやテトラヒメナ、鞭毛虫のクラミドモナス、節足動物や植物などにも研究対象を広げている。中垣氏が最近、注目しているのはゾウリムシだ。ゾウリムシは身近な生物として、顕微鏡が広く普及した頃から盛んに研究されてきたが、近年では研究者も減少している。「でも、ゾウリムシと同様の繊毛は、神経細胞をはじめとする人間のほとんどの細胞もあり、実は重要な役割を担っているのです。ゾウリムシの繊毛の動きは細胞の膜電位で制御されていますから、その動きのメカニズムを運動方程式で記述し、細胞に共通するような機構の解明をめざしています。まさに温故知新で、研究し尽くされた生物でも、違った角度から光を当てると新しい発見があるかもしれません」。

粘菌やゾウリムシのような単細胞生物は、周期的な刺激を繰り返すと次の刺激のタイミングを予測するといった記憶学習能力も備えているという。複雑な状況の中で最適にふるまおうとする姿には、課題解決の知能だけでなく、「知性」というものの片鱗が見えてくる。

記憶学習のような高次の情報処理ができるのなら、粘菌にも心があるのだろうか。では、人間の心とは、知性とは何だろう。どんな物理法則に還元できるのだろう。中垣氏の研究を知ると、疑問が次々とわいてくる。

「不思議ですよね。その不思議を解き明かすことは私一人ではできないと思いますが、私たちの研究が生命やその知性の深淵に迫る一助になれるよう、これからも単細胞生物たちを見つめ続けます」と中垣氏は笑顔で締めくくった。知のフロンティアは、単細胞生物にこそあるのかもしれない。

(取材・文 関亜希子)