

# 単細胞（原始的生命体）に学ぶ 生命知のからくり

中垣 俊之

## 1 粘菌——どんな生きものか

きょうは、タイトルにもありますが、「単細胞」ということでお話しします。具体的には「粘菌」という原始的な生きものの話です。

ふつう、「ねんきん」というとお金のほうですが（笑）、僕はこれを20年ぐらい研究して、この生きものとともに生きてきたという感じですよ。ですから、私の家で「粘菌」というと、黄色いネバネバした菌のことを意味していたわけですよ。あるとき、子どもが幼稚園に行くようになって、テレビのニュースで「年金」という言葉を耳

にして、「お父さん、お父さん、いまテレビで『ねんきん』といったよ！」と。子どもは、そのネバネバの菌のことだと思ったわけですよ。まあ、そんな子どもにしてしまっているのだからというように、なこともあったのです（笑）。

その粘菌の研究で、2年前と今年、「イグ・ノーベル賞」というのをいただきました。

※2008年は「単細胞生物の真正粘菌にバズルを解く能力があったことを見出したことに対して」認知科学賞を、2010年は「鉄道網など都市のインフラ整備を行う際、真正粘菌を用いて、輸送効率に優れた最適

なネットワークを設計する研究に対して」交通計画賞を受賞。「イグ・ノーベル賞」は「人々を笑わせ、そして考えさせてくれる研究」に対して与えられる。

自分では「イグ」がつかないほうの「ノーベル賞」を目指して、まっしぐらに研究してきたつもりなのですが、今のところ、「イグ」のほうを2回ももらってしまったわけです。

脳がなくても賢さはある

そもそも、僕はどういうことに興味があったのかというと、やはり生きものです。生きものはものすごく不思議です。小さいときに読んだ『ファーブル昆虫記』などを思い出してみると、小さな虫が巧みな行動戦術を取ります。「どうして、そんなことができるのだろうか」と素朴に不思議に思っております。生きものには、不思議なところがいろいろありますが、特に生きものらしさの集約しているところは、問題を解決したり、情報処理を試みたり、何か知的な振る舞いをしてみたり、そういうところでは

知的、といいましたが、生きものも物質からできていて、物質の法則、自然現象として、ある種の賢さ、というものが生まれてくる。これは事実なわけですが、それがどういふことなのかというのが、ずっともっている疑問としてあります。

そういう問題を考えると、ふつう脳とか神経を研究してみようと思うわけです。僕も最初はそうでした。でも脳の研究というのは、日進月歩で、びっくりするようなことが次々とわかってきていますが、では、どういふ物質法則から人間の知性とか心というものが生まれてくるのか。そういうことに関しては、なかなかストレートに答えることができないと思います。

そんなことは百年やってもできないかもしれないと一方では思いますが、科学の素朴な疑問として、それはやはり大きな問題だと思っています。できれば、そういうところで何か仕事したいと強く思っています。

そこで、単純な生きものを見てみようと思ったわけ

です。なぜかという、まず、どんな生きものも何らかの意味で情報処理をしている。ある種の「賢さ」というものがあるだろうという前提に立ったわけです。

生きものが生まれて35億年とか36億年とかいわれませんが、人間が人間らしく生きるようになったのはたかだか2百万年前くらいです。35億年の最初の20数億年というのは、神経系とか脳がない生きものが地球上で繁栄していたという時代です。最初の20数億年は、ほとんど単細胞だけの世界でした。

そんな長い間きちんと生き長らえてこられたということは、やはり単細胞は単細胞なりの必死の生活があつて、それをうまくやりこなせたからこそ今日もなお生きていることができる。そう考えるのは、むしろ自然だと思えます。

そういうふうになると、脳とか神経というのは、もつと後になってから、情報処理することに特化してでき上がってきた、ひとつの器官であつて、そもそも生きものの情報処理というのは、脳があるうとなかろうと、生きものであるかぎり根源的な共通の原理と

というのがあつてしかるべきだろうと。そう思うようになりました。それで、ものすごく飛躍していますが、あまり人がやっていない「単細胞の賢さ」を研究してみようと思いました。

具体的には、2つの問題設定をしました。1つは、実際にどれほど賢いのか。どんな難しい問題が解けるのかを、きちんとまず評価してみようと思いました。第2に、そこで出てきたある種の賢さというものが、どういう仕組みなのか。できればそれを物質の物理的な仕組みとして理解したい。そういう想いで始めました。

#### 真正粘菌の不思議な性質

粘菌とはどんなものかですが、ここで扱うのは、きちんと言うと「真正粘菌」といいます。これは非常に身近に生きている生きものです。

野原あるいは畑の土をとってきて、水で洗ってやります。中のほとんどはカビの菌糸とかバクテリア、細菌とかで、そういうものがおびただしく入っています。土の中のアメーバもたくさんいます。土の中のアメーバの



黄色いマヨネーズのように広がる真正粘菌  
(アメリカのオリンピック国立公園で)

何割かは粘菌のアメーバだと言われています。

函館だと、たとえば函館山に木が生えていますね。枯れ葉が堆積しているようなところとか、木が朽ち果てているようなところ、いわゆるキノコがたくさん生えるようなところで、木の中、あるいは土の中、湿った土の中にはまず間違いなくいる生き物です。また、自動車の通る大きい通りには木の植え込みがあつたり

しますが、  
そういうと  
ころの土を  
採ってきて  
もいます。  
おうちの庭  
に草花とか  
木を植えら  
れていると  
したら、そ  
ういうとこ  
ろの土の中

にも間違いなくいる生き物です。ただ、あまり意識することはありません。なぜかという、非常に小さいですから、肉眼で見ることができないわけです。

ところが、時々、巨大化します。通常、細胞はミミリの百分の1ぐらいの大きさですから、目では見えません。粘菌は、環境がよくないときや寒いときは、カビの胞子のようなものをつくって、ずっと休眠しています。胞子は数ミクロンの小さいものです。暖かくなって、飛んでいき、環境のいいところへ落ちると、胞子の殻が割れて、中から小さいアメーバが生えてきます。こういうものが、実は土の中にたくさんいます。

やがて、これが結婚して(接合して)大きくなります。これを「変形体」といいます。これも、できたばかりのときは1ミリにも満たない非常に小さいものですが、実は不思議な性質があります。変形体同士が出合うと自然に融合して、さらに大きい1匹の変形体になるのです。

それで、栄養条件が非常にいいと、体の大きさが10時間で倍くらいに大きくなっていく。倍、倍で大きく

なつていきますから、2〜3日すると50倍ぐらいに平気でなつてしまいます。そうすると、だんだん目に見える大きさになってきます。函館に「四季の杜公園」というところがありますが、この夏、散歩がてら粘菌を探してみると、拳の大きさぐらいの変形体を見つけたことができました。

変形体は、ときとして数メートルぐらいの大きさになつてしまつて、たとえば、人の家の庭の芝生の上、一夜にして、変形体が何メートルにもわたつて土の中から染み出てきたというようなことがあります。こんなに大きいですが、実は1つの細胞です。これでも単細胞生物なんです。

ただ、普通の単細胞と違う点があります。少し専門的になるかもしれませんが、細胞の中には遺伝情報をもっている核という小さい構造物があり、1つの細胞には大体1つです。ところが変形体には、おびただしい数の核が1つの細胞の中にあります。そこがちょっとふつうの細胞とは違うということになります。

いずれにしろ、こういうマヨネーズみたいに大きい

ものが1匹としてドロドロと出てくる。1時間に1センチぐらいの速さで流れるようにして移動していきます。移動しながら、1分間に1度ぐらいの周期で脈動する。プルプルと震えながら動いていきます。ときとして、家の壁をよじのぼりたりします。これは実際にあつた話だそうですが、1960年代のアメリカのテキサス州で、一夜にして庭に大きい粘菌変形体が出てきた。けげんに思ったあるじが、昼過ぎに見てみると、家の壁をよじのぼり始めている。これは何だろう。宇宙から来た何かか、あるいは生物兵器かもしれないということ、FBIとかまで出てきて大騒ぎになつたことがある。そういうふうには、人を驚かせることもあつたような生きものです。

粘菌は見たところ、薄く広げたマヨネーズかマスタードのようですが、生きものですので、1匹としてきちんと統率のとれた行動ができます。そして、よく調べてみたら意外と賢い面もありました。

では、粘菌は、どうしてこんなに大きい単細胞になつているのか。大きいと有利なことがいろいろあるわ

けです。ミクロなニッチ（生活環境）で生きているので、カビやバクテリアと競争するときには、小さいままでは多勢に無勢という面で不利でしょう。もうひとつ、物理的なギャップ、すき間があったときに、大きいと管を垂れ下げて反対側へ到達し、その間をうまく体を運んで、すき間も飛び越えて渡って行くことができます。これに似た話が、アリの行列などでもあります。アリ同士が体をつかんで橋をつくり、その上を他のアリが歩いて行く。皆が協力することで、1匹ではできない仕事をなすことができる。そういうふうには、単純な生きものでも、ある種の社会性をもっているわけです。

先ほど言いましたように、ある種の粘菌は栄養状態が悪くなると、お互いに集合して休眠体である胞子をつくろうとします。このときも、だれが中心になって煽動するかということは決まっていますが、みんな対等のものが集まってきて、全体として自然と「こちらへ動いて行きましょう」という秩序が生まれてくるようです。

細胞性粘菌では、最初に中心に集まってきた細胞が胞子の「柄」<sup>え</sup>になります。後から集まってきた細胞が、その柄の上にながって行って、胞子つまり子孫を残す種になるわけです。だから、最初に柄になった細胞は自分自身の子孫は残せません。役割分担というか自己犠牲というか、そういうものが自発的にできる。

柄になるタイプは、生まれてからずっと柄になることが宿命づけられていたのかというと、決してそうではありません。最初に集まってきた細胞を人の手で取り除いてやったりすると、柄になる細胞はいなくなってしまう。その後、胞子になるべき細胞だけだったのですが、その中で何割かが柄になる細胞に変わる。最終的にはきちんとした胞子、いま柄になる細胞がずっと伸びていきます。

## 2 単細胞なのに情報処理能力

現在、だいたい数百種類の粘菌が知られています。種類によって食べるものが違っていたり、生えてくる木が違っているというふうに棲み分けていると言われ

ています。

実際にどんな姿・形なのか、ドイツのテレビ局で作ってくださった粘菌のフィルムがあります。時間がありませんので一部分だけ、お見せします。タイトルは『Like Nothing On Earth : The Incredible Life of Slime Moulds、(無二の存在——粘菌たちの信じがたき生活)』。「ライク・ナッシング」は「何にもないものに似ている」つまり「これは唯一無二のものです」「地球上に、似たものはありません」と言っているわけです。

〔以下、会場で一部を上映。You Tubeのサイトで、中垣氏らの研究の模様を紹介した映像「Schleimpilze (粘菌) (ドイツ語) を見ることが出来る(2011年4月26日現在)。<http://www.youtube.com/watch?v=mrrcYQWosJI>〕

黄色いものが上のほうへ動いているのがご覧になれると思いますが、これが粘菌の変形体です。大きさがいま20センチぐらいありますが、1匹になっていきます。先ほど申しました脈動、バクバクバクという運動があります。このようにして1時間に1センチぐらい

の速さで、朽木の上などから染み出してきて、流れるように動いていきます。

ふだんは朽木の栄養分とかバクテリアを吸収して食べていますが、ときとして生きたキノコを活発に貪食することもあります。シイタケのように大きいキノコでも、粘菌は体の外に酵素を分泌して溶かし、あとかたもなく完食してしまいます。ひっそりと生きているものですが、秘めた力はたいしたものだと思います。

とりたてて構造らしいものはありませんが、唯一あるのが「管」です。これが血管網のように網目状になっていて、この中を栄養分とか情報とか、自分の体自身が活発に流れ、混ざっています。

バクバクという拍動に呼応して、流れが行ったり来たりします。いったん止まって逆流したりして、全体で混ざっていくわけです。左と右から粘菌がやって来て、出合って溶け合って1匹になったりもします。環境が悪くなると、「ここはよくないな」ということで、流れるように逃げて行きます。自分の体を溶かして、自分でつくった血管網のようなものを使って動いてい

く。

ですから、この「管のネットワーク」というのは、機能的なことを考えてみると、まさに僕たちの「血管網」のように養分とかいろいろなもの運ぶという働きもあるし、この中を情報の信号が流れている面を考えると「神経系」のようなものも機能的には実現していることとなります。さらに、自分の体を溶かして運ぶという意味では「運動器官」ですから、足のようなものもあるというわけで、非常に多面的な機能性をもっているものだといえます。

今回お話しするのは、主にこの管のネットワークの形に表れる粘菌のある種の「賢さ」についてです。

### 「迷路」を解く粘菌

どれぐらい賢いのかということで、いろいろな試験を考えました。最初にやったのが迷路です。「迷路解き」というのは、ネズミとかいろいろな生きものの賢さを測る標準的な試験として知られていますから、それを何とか単細胞が解くように仕向けてみようと思えました。それには、少し工夫が要ります。人間だと何か知

的なレベルを測ろうとすると、紙と鉛筆を渡して、試験をして、「はい、あなたは何点でした」となります。まあ、紙の試験で本当に知性が測れるかについては、いささか疑問もあります。

人間以外の生きものではどう調べるかというと、やはりご飯を食べるという生理的な欲求に引っかけてやらざるをえません。つまり、「工夫をしないと、ご飯にありつけない」という状況を無理やりつくってやると、そのときはじめて秘めていた力を出してくるといえます。

とても賢いチンパンジーのアイちゃんの話をご存じの方もいらつしやると思います。難しい問題をコンピュータ画面で一生懸命にこなします。そのアイちゃんですら、はじめは、正解が出るとリンゴのかけらがコロコロと落ちてきて、それを食べてうれいというところで条件づけされ、それが動機になっています。アイちゃんがすごいのは、最近では、何ももらえなくても解くこと自体が楽しいという段階に入っているという話もあって、非常に興味深いです。



粘菌の場合はどういうふう考えたかというところ、それまでは「1カ所にエサがあり、1カ所に嫌いなものがある」という状況をつくって、粘菌の反応、動きを研究する、そういうことがなされていきました。マヨネーズみたいなものが、どうして、そのように動いていけるのかということ自体、興味深い問題だと思えますが、生きものが生きていく賢さという点で考えてみると、あまりにも当たり前であって、「好きなものがあっても、そこへ行けません。危険なところがあっても、そこから逃げられません」ということでは、おそらく生き延びることは難しかろうと思えます。

それで、ちよつと矛盾をつくると思いますか、困った状況にしてみようというわけです。大きめの粘菌にエサを与えず、おなががすいて仕方がないという状態にしておきます。そして、体の大きさにしては少し小さめのエサを、こちらとあちらとに離して置きます。そうすると、どう反応するか。やり方は必ずしも一通りではなくて、いろいろあるのではないかと思えますが、彼らはどう反応するのか。

粘菌は、できればどちらのエサにも行って養分を吸収したいだろう。一方で、1匹として体をつなげていなければいけないという要請もありますから、そこに少し「ジレンマ」があるわけです。では、粘菌はどうするのだろうかということをやったのが、この迷路の実験です。

大きさ4センチ四方ぐらいの簡単な迷路を用意しておきます。最初に、1匹の粘菌が迷路全体にくまなく広がっているという状況をつくります。そして場所はどこでもいいのですが、離れた2カ所に、エサを置いてあげます。このエサの場所が、迷路の入口と出口に相当すると思ひましょうというわけです。

ですから、迷路といっても、人間が大きな迷路、たとえばトウモロコシ畑の巨大迷路に入口から入って行って、試行錯誤して外へ出てくるというスタイルとはちよつと違います。むしろ、雑誌の後ろのほうに迷路の問題があつて、答を鉛筆で書きましようという、どちらかというところ、そういうスタイルの解き方になります。

実験の様子を、少しご紹介したいと思います。直径9センチぐらいのシャーレに、寒天を1センチぐらいの厚さで敷き詰めます。その上に、プラスチックのフィルムを乗せます。フィルムが迷路の壁に相当するわけです。通路に相当するところにはフィルムがなく、寒天の濡れた表面がむき出しになっています。粘菌は、湿ったところを好んで這うので、こんなふうにするとき壁を這おうとしないわけです。

ふだんは、直径30センチほどの大きい桶に大きい粘菌を飼っておきます。先端部分が少し盛り上がって厚くなっているのです、先端を30個、40個ぐらい小さく切って、迷路のあちこちに置いてやります。3ミリ角くらいに切られた小さい粘菌は、死なないうで、きちんと再生します。30分ぐらいすると、もとのリズムを刻んでまた脈動を始め、広がって接触すると、お互いに融合してつながっていきます。それで、1匹が迷路の全体を覆い尽くします。これが、実験をする前段階になります。

それから、きちんとした実験のときには、エサの大

きさとかエサの濃度をきちんと調整してやりますが、ムービーの撮影用ですので、エサはオートミールを置いています。撮影では、ちょっと湿度が高かったので、壁に乗り上がったりしてしまいましたが、ともかくウネウネした動きが迷路全体に行き渡りました。

それで、2カ所にエサを置いてみました。そうすると、4時間ぐらいたつと、体の形が劇的に変わったのです。はじめ迷路全体に広がっていた粘菌が、いなくなっている場所があります。いなくなったところはどのようなところかを見てみると、「行き止まりになっている経路」だったのです。行き止まりの経路に伸びていた体は全部引き上げてしまっている。そしてエサの上に移動して、上に盛り上がって養分を吸収しています。エサを食べています。

行き止まりの経路にある部分から撤退するとともに、粘菌は入口と出口を結ぶ経路のすべてに管を残します。すべての経路とは、この迷路の場合、4つです。図1の左上の分かれ道では、A1とA2という2通りの道筋があります。図の右のほうの分かれ道にも、B1と

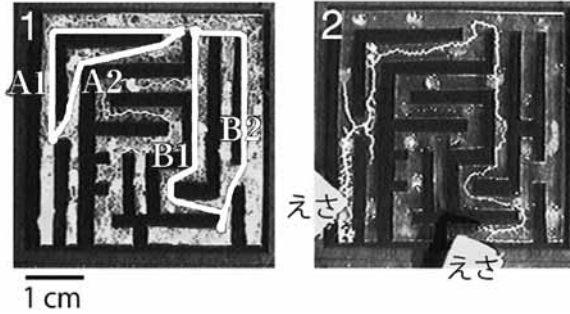


図1

迷路いっぱい広がる粘菌に2つのえさ場を与えると(左)、半日ほどで最短経路に管を残して2つのえさ場をつないだ(右)。(図1～6は中垣俊之著『粘菌 その驚くべき知性』(PHPサイエンス・ワールド新書)から)

B2という2通りありますから、全部で4通りあるわけです。その4つの経路に体が管状に残っています。1つの経路に、太い管を1つずつつくっています。ですから、この迷路の可能な経路をすべて指し示します。だから、「問題を解く」という意味では、この迷

路のすべての答をきちんと指し示すことができたと云えます。

その後、その管のうち、どれを残していくか、どれを引き上げるのかというような選択のプロセスがあって、最終的には、そのうちの1つだけが残りました。この経路が、半分ぐらいの確率で「一番短い経路」になっていました。ですから、最終的に残ったものは一番短いものだというわけです。

つまり、はじめに迷路の道筋をすべて答えました。その後、一番短いものだけをきちんと表すことができました。この実験をもって、粘菌には迷路の最短経路を探し出すある種の計算能力があると主張しました。

粘菌が、こういう最短経路の形になる。これは、ご飯を食べるという意味では、非常に効率的です。一方で、1匹としてつながっているための資源というか、そこに費やされる体の資源としては、「最短距離」ですから一番少なくて済みます。つまり、1匹としてつながるのにも効率的だし、エサを食べるという意味でも効率的。「どちらのエサも食べたいし、1匹としてつながっ

てもいたい」というジレンマを、こういう形を取ること  
で、最適に処理することができたのだろうということ  
です。彼らの「生きる」という目的に対しては、非常に  
理にかなっているわけです。そういう意味で、何らか  
の「賢さ」と呼んでいいのだろうと。反論もたくさんあ  
りますが、僕たちはそれを主張しています。

これが迷路の実験で、寒天とオートミールとプラス  
チックのフィルムでできる実験です。1回百円ぐらい  
ですから、研究費がもらえなくなっても多分できると  
いう研究になっています。

#### 危険度が最小の経路をとった

さて、いまの迷路は、僕たち人間が見ると、まあ、  
それほど難しいものではありません。「それぐらいの  
迷路ができたからといって『賢い』などというのはチャ  
ンチャラおかしい」と。では、もっと難しい問題がで  
きないのだろうかということ、次の実験を考えてみ  
ました。

それは、一部分にだけ、粘菌が嫌がる「光」を当てて  
みる。すると、ある場所は好きで、ある場所は嫌いで

すから、まだらの形になるわけです。

人間でいえば、どこかお使いに行きたいけれども、  
一番近い道には犬がいて近くを通りたくないとか——  
最近では、犬も放し飼いになっていないから心配は少な  
いですが——たとえばそんなことがあったときに、な  
るべく犬に近寄らないで、でもそんなに遠くない距離  
で行きたいとか、そういう問題をちよつとやらせてみ  
ようという実験をしました。

はじめに長方形の場所を用意して、長方形の粘菌を  
用意します。これが、実験をする前段階になります(図  
2上段の左)。先ほどと同じように2つのエサ場所を、  
今回は、左上の対角と右下の対角に置いてみます(図  
のFS)。

これを暗いところで実験すると、平均的な経路とし  
ては、粘菌は、みんなエサの上に行ってしまう、養分、  
ご飯を食べます。一方で、1匹としてつながるために、  
ほぼまっすぐ1本の管をつくって2つのエサ場所を結  
びます(下段の左)。これが、今までのストーリーで  
した。

今回は、上段の点線で囲った「上側3分の2」に、粘菌の嫌がる「光」を当ててやります。粘菌は光になるべく当たりたくないということで逃げようとします。そ

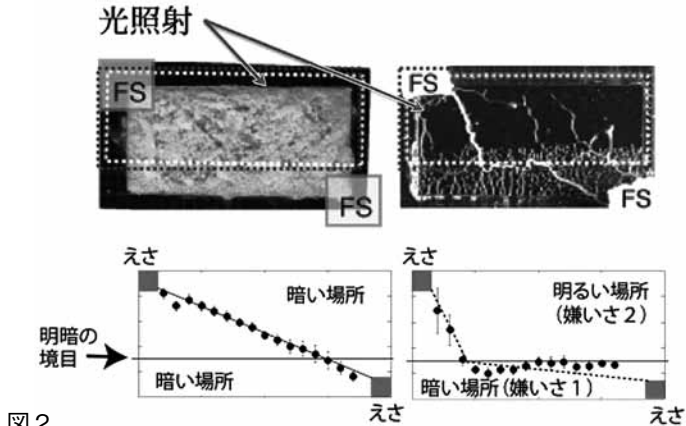


図2

〔上〕長方形の粘菌の一部(点線で囲った部分)に光を照射すると同時に、対角の位置にえさ場(FS)を置いた。えさ場をつなぐ経路が、明暗の境目で折れ曲がった。〔下〕左図は明暗の差がない場合。管は一直線にえさ場をつなぐ。右図は明暗差がある場合。全長は左図より長くなっているが、明るいところを通る長さは短くなっている。コース全体にわたる「嫌いさ」の量が最小のコース(点線)とほぼ同じ

うすると、ではこの2つのエサ場所を結ぶ管の経路はどうなったか。結果は、明るいところと暗いところの境目で折れ曲がるような経路になりました。折れ曲がっているということは、まっすぐではないので、経路は最短ではなくなっています。

これはどういうことなのか。つらつら考えてみると、結局、光の当たる危険なところを通る長さは短くなっています。最短の経路でいくと、危険なところを通る管の長さは長くなってしまふ。そういうことに反応しているのではないだろうかと思いました。

そこで、当てる光をどんどん強くしていつてみました。そうすると、折れ曲がりの点が、どんどん左のほうへとズレました。つまり、危険な場所を通る長さが短くなったわけです。これは、「光の強さにたしかに反応している」と。こういうことがわかりました。

さらに、粘菌の示したこういう経路が、定量的に本当にいいものなのか、もっと具体的に踏み込んでみようということ、光が当たっている場所が暗いところと比べて何倍危険なのか、何倍嫌いなのかということ

を数値で表してみようと思いました。

簡単な実験でそれを見積もつてみました。細長いレインをつくって、その端っこに粘菌を置いておくと、反対の端に向かって動いていきます。これを暗いところでやると、大体、1時間に1センチぐらいで動いていきます。そして、お尻の一部分に光を当ててみると、少し速く逃げました。お尻に火がついて、あわてて逃げていくという感じかと思いますが、この「逃げる速さ」が、暗いところで移動する速さの何倍なのかを測ります。逃げ足の速さが、たとえば2倍であったなら、2倍嫌いなのだというふうに、この数値をもつて表してみました。

たとえば暗いところの動きを1とすると、2倍の速さで逃げたから「嫌い度が2倍」というわけです。同じ嫌い度であれば、管の長さが2倍だと嫌い度の総量は2倍と考えます、すると、コース全体の嫌い度の総量は「明るい場所の管の長さ」×2 + 「暗い場所の管の長さ」×1となります。

図2の下段で黒丸で示したものが粘菌の実際の経路

で、蛇行していたり、多少ずれていたりもしますが、「えいやっ」と2本の直線に当てはめて考えたすると、この粘菌の取った経路は、危険度(嫌い度)の総量が一番少なくなる経路(下段右の点線)とほぼ同じだったのです。

これがどれくらいすごいことかというところ、身近な例で考えると、こんな問題になります。

たとえば、夏の暑い盛りに、友達と海へ泳ぎに行つたことを想定してみましょう。自分は浜辺に座って、友達が海で楽しんでいるのを見ていました。そのときに何か異変が、「これはまずい！」ということが起きました。サメ、ジョーズが来たというようなことがあつて、一刻も早く助けに行かなければいけません。「どういうふうに行くと、一番短い時間で助けに行けますか」という問題です(図3)。

1つは、まっすぐ行くという経路があります。距離としては一番短い。ところが、泳ぐ距離は比較的長くなるわけです。走る速さと比べると、泳ぐ速さはうんと遅いので、泳ぐ距離が長ければ時間もかかる。まっすぐ行くのは、一番速いことになりません。

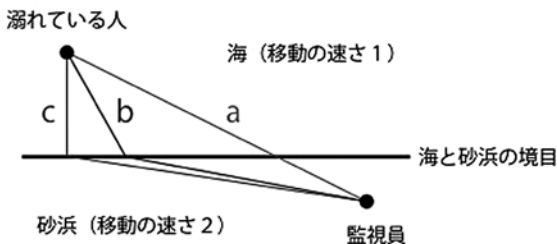
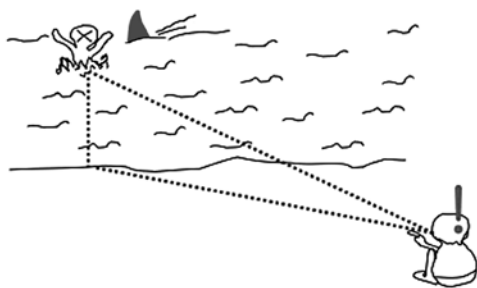


図3 粘菌が解いた危険度最小化問題と数学的に同等の問題例。「緊急事態！ 最短で着く経路は？」

今度は、泳ぐ距離が一番短くなるように、浜辺を走って行って、垂直にバツと泳いで行くとします。そうすると、全部の距離が長くなり過ぎて、やはり最短経路で行く経路にはならない。

結局、泳ぐ速さと走る速さの兼ね合いで決まる「最短

の時間で行ける経路」のためには、どこで折れ曲がり点をもてばいいのか。これを解けますか、という問題です。これは、粘菌が危険度最小の経路を取ったということと、数学的には全く同等の問題です。

これが実は、理系の大学生でも難しい。生物系の学生さんは、まず解けません。数学や物理を専攻している学生さんは、こういうものを解く数学を習うわけですが、忘れてる人も多いです。この話を僕は東京大学とか大阪大学でしたが、大学院の学生さんでも「できない」という方が半分ぐらいいます。オックスフォード大学に行っているとき、理系の学生さんに話しましたが、できないという方がやはり半分ぐらいいました。

日本やイギリスを代表する大学の秀才が「できない」という問題です。だから、できなくていいのです。僕も、実はしばらくできませんでした。でも、粘菌はできたのです！ それは何を意味するのかということ、ちょっと考えていただきたい。それ以上は申しませ

管——使うところが太くなる

粘菌が、どのようにして問題を解いたのかを考えた  
と思います。少しややこしい話になるかもしれませんが  
なので、覚悟して聞いてください。彼らはどういふ  
うにして解いているのかというのを、何らかの運動方  
程式というようなものを考えつつ、物理現象というか  
自然現象として、「こんなふうに自然に解いているのだ  
よ」ということをお示ししたいと思います。

そもそもいま見た「粘菌の迷路解き」とか、「危険度最  
小の経路をとる」というのは、粘菌の管ができたり壊れ  
たりという生理現象に基づいています。あるところで  
は管を壊して引き上げてしましますが、あるところで  
は管を発達させ太らせて残しましょうということをや  
っているにすぎません。

では、管がどうやってできたり壊れたりするのか。  
これを実験でいろいろ調べました。そうすると、1つ  
面白いことがわかりました。粘菌の管を流れているド  
ロドロのマヨネーズみたいな体がありますが、それが  
活発に流れていると、管がそれに適応してというか、

どんどん太くなって行って存続するわけです。一方、  
流れがあまり活発でないで、だんだん痩せ細っていつ  
て、最後は消滅してしまふ。

これは、もともと非常にネバネバしたマヨネーズの  
ようなものですから、それが狭い1ミリぐらいの細長  
いところを流れているので、流れにくいわけです。管  
が広がると、流れの抵抗が下がりますから、ますます  
流れやすくなります。そうすると、また太くなって、  
ますます流れるというわけで、雪だるま式にどんどん  
発達していくわけです。逆に、流れないと細くなる。  
そうすると、ますます流れにくくなって、もつと細く  
なるというところで、逆方向の雪だるまもあります。こ  
ういう性質が、粘菌の管にはあります。

実は、同じ性質が僕たちの血管にもあります。ある  
ところが閉塞すると、周りの血管が広がってそれを助  
けるといふこともしばしば起きます。このように、生  
きもののネットワークには、使うところは栄えていく  
し、使わないところは衰退していくという性質があり  
ます。こういう性質が鍵になっているだろうというこ



とが、だんだんわかってきました。

では、そういう性質が、経路を探し出すことを、どういうふうに導いているのか。ここで、いよいよ問題の核心に迫ってきました。「この先、どうしようか」ということになって、実は数学が助けられました。僕はもともと生物専攻でしたが、数学が生物の研究に使えるというふうに思って、30歳を過ぎてから数学を少しずつ、一生懸命勉強するようになりました。数学が面白いのは、日常感覚では到底及びもつかないようなロジックがあることです。

#### 粘菌解法の数理モデル

それで、いまの「流れるところは榮える」ということだけで本当に経路が探し出せるのか。これを簡単な数モデルを使って検証してみようと思いました。まず、なるべくシンプルなものごとを考えましょうというわけで、単純化します。粘菌の管のネットワークを水道管のネットワークのようなものだと思います。本当は、粘菌の管というのは柔らかくて、その中の流れは複雑なのですが。

たとえば、1ミリぐらいの細い水道管を想定してください。「円筒形のパイプ」と「2つの継ぎ手」からなっているような水道管があったとします。1つの継ぎ手から水が流れ込んでいて、同じ量の水が反対側の継ぎ手から出てきます。この水が入ったり出たりするところがエサ場所に相当するとします。エサ場所にはたくさん粘菌の体があるので、そこが水だめのような感じで、体を送り出していったり吸い込んだりすると思います。

継ぎ手に  $i$  と  $j$  という名前をつけ、その継ぎ手を結ぶ円筒形のパイプを「 $ij$ 」と呼びます。このパイプには長さがあり、太さもありませんから、そこを流れる水の速さ、水の量というのが物理量としてあります。

2つの継ぎ手の圧力差、パイプの太さと長さが決まると、どこをどれぐらい流れるかを全部自動的に計算できます。水道管のネットワークをつくって、蛇口をつないで水をひねれば、どこをどれだけの水が流れるかが決まるようなものです。

先ほど「流れるところは榮える」と言いましたが、流

れが多ければますます太くなって流れやすくなるという性質があります。そこに、生きものらしさがあったわけです。この「管の適応性」を、数式で表しますと、まあ、こんな式で書けるわけです。

$$\frac{dD_{ij}(t)}{dt} = |Q_{ij}(t) - aD_{ij}(t)|$$

これを離散的に表すとこうなります。

$$D_{ij}(t + \Delta t) = D_{ij}(t) + \Delta t | | Q_{ij}(t) | - aD_{ij}(t) |$$

これは、微分方程式と呼ばれる数式です。物理法則というのは大体、微分方程式で書いてあります。ニュートンの運動方程式もそうだし、量子力学とか、宇宙の果てがどうなっているかというのも、たいがい、こういう微分方程式という形で書いてあります。

これが今日の話の中で一番ややこしいものですが、「こういう言葉を使いました」というものをお見せしたかったわけで——数学というのは一種の言葉ですから——この式の内容をくどくどと説明しようというわけではありません。

ごくごく素朴に式の意味を言ってみると、いま、このパイプ「ij」の流量は $Q_{ij}$ と書いてあります。太さは $r$ と書いてあります。ほかに、水のネバネバさ加減 $\eta$ （イータ）とか円周率 $\pi$ （パイ）とかの問題もありますが、全部ひっくるめて、「流れやすさ」（コンダクタンス）という変数をつくって、これを表すこととしましょうというわけです。こうなります。

$$Q_{ij}(t) = \frac{\pi r_{ij}^4 (P_i - P_j)}{8 \eta L_{ij}}, \quad D_{ij}(t) = \frac{\pi r_{ij}^4}{8 \eta}$$

前のほうの方程式で、 $t$ というのは、いまの時間です。 $t + \Delta t$ と書いてありますが、 $\Delta t$ は、少したった時間という意味です。だから、いまの時間からちよつとだけ未来の時間に太さがどういふふうになっているかを表しているのがこの記号。 $D(t + \Delta t)$ です。ちよつと未来の管の太さが、いまの太さ $D_{ij}$ とこのカギカッコの項を差し引きしたものに変化するということを言っています。

変化する分、つまりカギカッコの中がどういふふうになっているかという、流れる量 $Q_{ij}$ が多ければ、ち

よつと未来は、より太くなります。

一方で、痩せ細るという効果  $- \partial D_{ij} / \partial t$  があります。

これは、粘菌のどの部分もエサのほうに向かって移動しようとして細くなる性質があるからです。現在の太さに比例して、つまり、いま僕が70キロだったら、「10%の7キロ減る」となっていたとすると、僕が体重10キロになったときには、やはり10%の1キロだけ減るといふような痩せ細り方です。管が細くなれば、流れにくくなります。この「流れの量に応じて太くなる」という性質と「太さに応じてコストを払う、つまり細くなっていく」という効果。この2つのバランス、綱引きで、太さが変わっていきます。

はじめに迷路のような形をつくり、それに合わせて水道管をつくっておきます。そうすると、太さとか長さが全部決まっていますので、どれぐらい流れるかが、つまりすべての  $Q_{ij}$  が計算できます。流れが決まると、ちよつと未来にそれぞれの管がどう太くなったり細くなったりするかというのを、先ほどの式に当てはめて計算すればいい。

太さ  $D_{ij}$  が変わると、今度はこの変わった太さで流れ  $Q_{ij}$  がどう変わるかを、もう1回計算できるわけです。次に、この流量  $Q_{ij}$  をもとに新たな太さ  $D_{ij}$  を求め……というふうに、繰り返して計算していくわけです。そして、最終的にどうなるかを、コンピュータを使って計算してみました。

そうすると、まず行き止まりのところですが、ここはあまり流れないので細くなるでしょうということがわかります。そして、4つの経路がすべて、いったん浮かび上がります。最終的には、たしかに「一番短い経路だけが発達して残った」ことがわかります。

先ほど説明しました「危険度最小の経路」というのも同じように考えます。どう考えるかというところ、流れるところは栄える」ということでは全く同じですが、痩せ細る効果というのがあって、管が痩せ細るということ、は逃げて行くということですから、光が当たっているところは逃げ足が少し速くなると考えられます。光が当たっているとこでは、痩せ細る効果が、暗いところよりも強くなるというふうにしておきます。そして、

先ほどの数学モデルで計算してみると、はじめに、光が当たっているとところの管がすみやかに消滅してしまします。その後、幾つかの候補が暗いところに残り、最終的に1本の経路が残ります。これが、実は「危険度が最小の経路」にたしかになっていましたというわけなのです。

### 生命の「自律分散的な情報処理システム」

こんなふうに数学モデルができたということは、粘菌がどういふふうな仕組みでこの問題を解いていったのかということを表しているということです。

非常に面白いところは、どれか1つのパイプが、未来の時間にどれぐらい太くなるか、細くなるか。それは全部、自分のところの情報だけで決まるということです。いま自分の管の中を流れる量と、いまの自分の太さだけで決まります。つまり、「他のものがどうなっているかは一切関知しません」ということなのです。そこが、とても特徴的です。

それぞれの管は、てんでんバラバラに自分のところの流れだけを見ながら太さを変えていきます。どこか

に司令官がいて、全体を見渡していて、「はい、あなたは太くなりなさい。あなたは細くなりなさい」、そういうことを行っているわけではありません。どの管も対等な立場で、自分のところの都合だけで太さを変えています。それにもかかわらず、全体としては最短な経路になっています。ある意味、いい答になっているわけだし、見方を変えれば秩序をつくっているということかもしれません。こういうことが実現する運動の様子を、先ほどの方程式によってつかみ出しているわけです。

こういうふうには、全体を見渡す司令官がなく、それぞれが「身勝手に」というと表現が悪いです、自律的に「独り立ちして行動しつつ、全体としてはうまく調和が取れている。このようなシステムを「自律分散的なシステム」と呼んでいます。ひとりの王様が命令するのは中央集権的なシステムですが、この自律分散的な情報処理の仕方というか、答の出し方が、生命の情報処理の際立った特徴のひとつになっているということがあります。そこを、改めて強調しておきたいと思えます。

こういうことを言いますと、「異議あり！ 脳は中枢神経系であり、中央集権ではありませんか」というふうにおっしゃる方がいます。まさに、そうです。では、脳の中はどうやって問題を解いているのかということを考えてみると、脳の中に「脳」は多分いないと思います。脳自体の中には司令官となるような中枢はおそらくなく、やはり自律分散的になっていると言わざるをえません。

脳の中には、ひも状の非常に細長い神経細胞というものがある。それがお互いに手を取り合っていてネットワークをつくっています。そこを非常に弱い電気信号がワーツと流れ伝わっていくと、何か答が出てきます。人間が学習するときに脳の中で何が起きているかというところ、神経細胞同士が手をつなぐ、そのつながり方を強めている。そういうものはHebb学習（強化学習）といいますが、学習というものを神経細胞のレベルで見ると、神経細胞同士のつながりがより強固になることで実現されていることが知られています。

どういふふうに起こるかというところ、ある神経細胞が

あり、そこを電気信号がひんぱんに通ります。そうすると、だんだん強くなっていく。つまり、「使うところは栄える」というのと似たような性質になっています。そういう意味で、大ざっぱに言うと、粘菌のやっている解き方のミソは「使うところは栄える」という脳の学習方式と同様のものなのです。

### 3 「粘菌方式」の大きな可能性

さて、こういう生きものらしい「経路探索の仕方」がわかると、これはいまままでにない解き方になっていきますから、これをどこかに役立てるといって可能性が開けてまいります。

カーナビに 응용してみた

ひとつ考えているのが、カーナビの経路探索に使えないのではないか。カーナビは15年ぐらい歴史がありますが、ダイクストラの方法というもので最短経路を探しています。この方法は、実にうまいやり方で、素晴らしいものですが、基本的には、すべての道路の組み合わせを考えます。道路の組み合わせを全部挙げて、

その中で一番短い経路を決めるというやり方です。組み合わせの数はすごく大きくなりますが、そこをうまくやっているのがダイクストラの方法です。いまでは、

どの車のカーナビも、1秒あれば日本中の経路をパツと探してくれるように、テクノロジーが進化しているわけです。

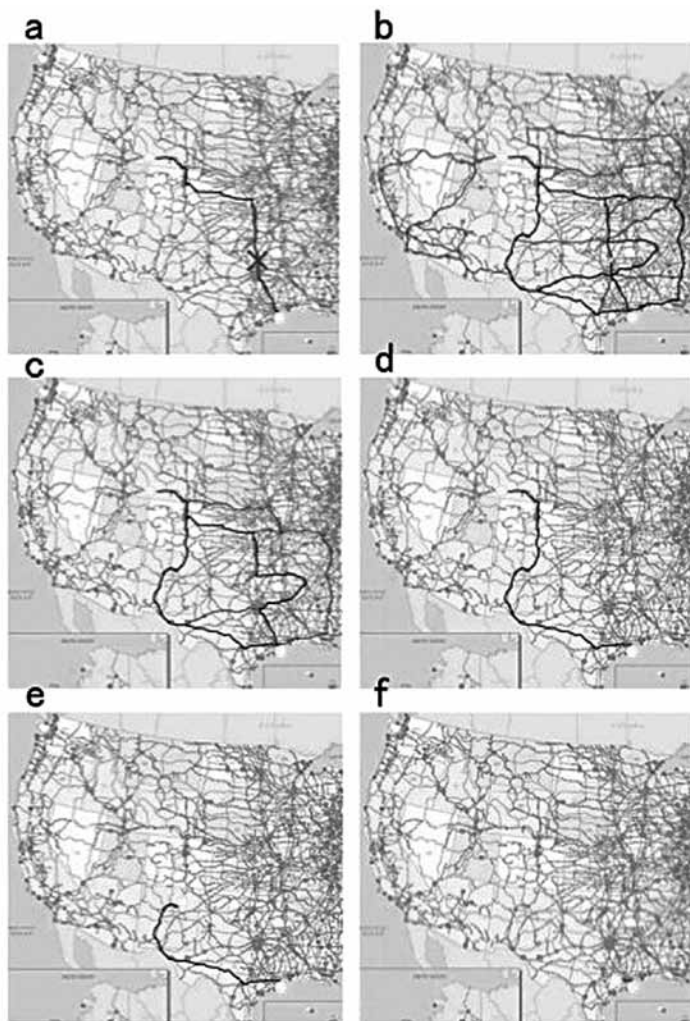


図4 粘菌方式をカーナビに応用。シアトル(左上)からヒューストン(右下)へ向かう途中、ソルトレークシティあたりで事故発生(a図の×印)。こういう状況変化にも対応して迂回路を見つけ、無事到着

そこに粘菌のやり方を使ってみようというわけで、やってみました。

ここに、アメリカの高速道路の地図があります。イチロー選手が活躍しているシアトルから、テキサス州のヒューストンまで行く最短経路を、粘菌方式で計算して探します。

粘菌方式の面白いところは、はじめに、よくない経路をササッと落としてしまいます。それで幾つかの経路が残ります。10通りぐらい残るのではないかと思いますが、それらの長さはさほど変わりはありません。

こういう地図を見たときに、私たちは、直感といえますか、こういうふうに行けば、大体こうなるのではないかというのが、たちどころにわかるわけです。しかし、それをいまのコンピュータのアルゴリズム(算法・手順)でやろうとすると、非常に難しくてなかなかできない。粘菌方式の面白いところは、それが自然に表現できていることです。ですから、わりと人間的な解き方をしているのではないかと思えます。

ただ、人間が不得意なこともあって、「では、一番短

い経路はどれかを、きちんと特定してください」と言うのと、「うーん」となるわけです。その点は粘菌方式でも似ていて、はじめにベスト10%やベスト5%ぐらいまで挙げるのは、わりと簡単なんです。しかし、そこから本当に最短のルートを探すのは難しく、そのためには、もうちょっとカーナビ用に作り変えてやらざるをえないところがあります。

この方式で、もう1ついいところは、「事故があつて通行止めになつてしまつた」というようなときにも、自然に迂回路を探してくれる点です。将来的に、渋滞情報がちんと取れるようになると、あの道は3割ぐらい混んでいる、こつちの道は8割ぐらい混んでいる、それが時々刻々変わるわけですね。そういう情報があつたときに「一番短い時間の経路を常に探し続ける」ということを考えると、このやり方はそれが自然にできるといふ長所があります。

つまり「大ざっぱだが、すばやく答えを導く」そして「渋滞状況への適応性が高い」といふ美質があるわけです。

「こんな素晴らしい方法なので、ぜひ使ってみませんか」ということで、カーナビの会社に一生懸命売り込みましたが、残念ながら採用にはいたっておりません。なぜかという、「わかりました。先生のおっしゃる方法は、たしかに新しく面白いです。ところが、まったく違う方法になってしまいますから、これを変えようと、すべてを変えないといけない。それは簡単にできることではありません。もう15年の積み上げがあつて、やっとここまでできました。いまヨーロッパやアメリカで日本車が走るときに動くカーナビをつくるのに一生懸命を出しています。それを足元から変えるようなこととは、ちょっとご勘弁願いたい」ということでした。

### 3つの指標を「同時に最適化」する粘菌

時間が足りなくなつてしまいましたので、少し急いで話をさせていただきます。核心部分は、だいたいお話ししたと思いますので、「こんな事例もあります」ということを大急ぎで紹介したいと思います。

いままではエサ場所が2つの場合でしたが、これをたくさんにしてみましよう。3つの場合、6つ、7つ

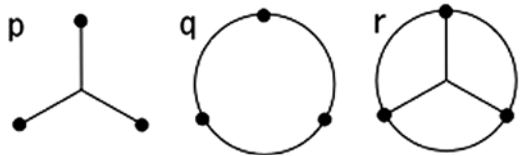


図5

3つのえさ場をつなぐ粘菌ネットワーク。シュタイナー最小木型(p)、サイクル型(q)、ベンツ型(r)などがあった

結ぶ最短の経路(3点を正三角形として、三角形の中心にある重心と各頂点を直線で結んだ形。図5のp)に似た形もつくりませんが、それだけではありません。3つをつなぐ輪っか状の構造もつくります(図のq)。その組み合わせも多かったものも多い(図のr)。当然、最短ではありません。彼らが短さだけを追求しているわけではない

の場合、12の場合です。そういう数のエサ場所をつくつて粘菌を置いてみると、そのエサ場所を全部つなぐような、何か意味ありげなネットワークをつくつていきます。ところが、たんに「最短な経路」というのはほとんどできません。たとえば3つのエサ



ということがわかってきました。

では、どういふことを彼らはやっているのだろうか。

粘菌が本当にそうしたいかどうかというのはわかりようがありませんので、勝手な想像になります。粘菌のふだんの生活から考えてみると、1匹ずつつながっていたがるので、どこかが切れたときも、どこかの迂回路を通じて、つながりがまだ保てているというような性質は、多分うれいだろうと思うわけです。

どういふことかという、輪っか状につながってれば、たまたまワラジムシとかダンゴムシが、その上を歩いて管を切ったとしても、依然として全体がつながっているわけです。どれかのエサ場所が分離孤立することはない。管が切れてしまっても、まだつながっている——「耐故障性」と呼んでいます。故障に対してもきちんと対応できるという性質がある。

さらに、つながっているだけではなくて、「どの2つのエサ場所を選んだときにも、なるべく近い距離でつながっている」ほうが多分、効率はよろしいでしょうと考えます。すべての2点間の距離の平均がどうな

っているかをみて、平均距離が短いほど効率がいいわけです。

このように、「短さ(コスト・経済性)」と「耐故障性(保険)」と「効率」という3つの指標があることになりました。実は、これらは相反する性質です。一番短いものをつくると、耐故障性はゼロです。効率もよくありません。

ですから、一番短いネットワークに少し予備的なつながりをつけていったときに、耐故障性とか効率がどんなふうにながっていくだろうかということが、ここで粘菌がやっている問題に対する僕たちの見方ということになります。

くわしい話は省かせていただきますが、結論として、この3つの性質がどれもほどほどに満足するような性質をもったネットワークになっているということがわかったのです(多目的最適化手法)。

こういう性質は、実は社会のインフラネットワーク、鉄道や道路、水道網や情報の光ケーブル、そういうものももっていてほしい性質です。なるべく短く、

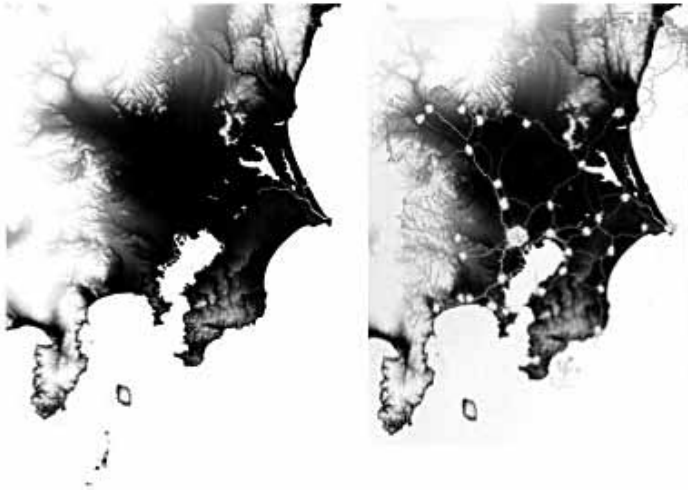
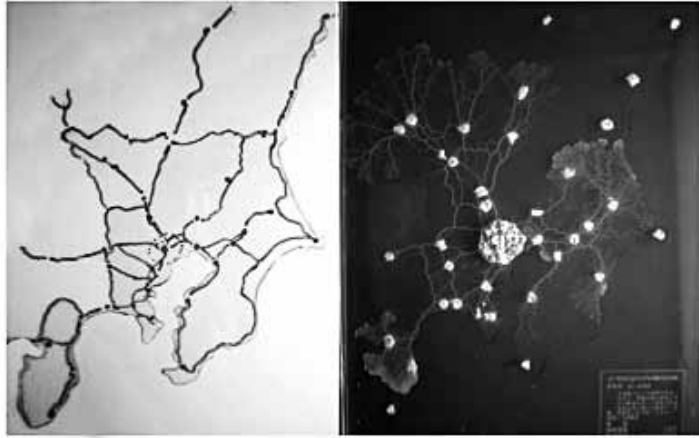


図6

関東圏の鉄道(JR)路線ネットワークとの比較 [左上]主な路線と街  
 [右上]街の場所にえさ場を置き、東京の場所に粘菌を移植。半日ほどで  
 広がった粘菌がえさ場をつなぐネットワークを構築。[左下]地形のバラ  
 エティを粘菌に伝えるための光照射用マイクロフィルム。[右下]地形情  
 報も加味して粘菌がつくったネットワーク。(高木清二博士による)

小さいコストでつくったほうがいいし、ある程度の頻  
 度で故障するわけですから、そのときに全く使えなく  
 なってしまったては困る。さらに、なるべく効率的にな

っていてほしいということです。  
 JR 鉄道網との類似性  
 では、実際に人間がつくったものと比較してみよう

ということ、関東圏のJ Rの鉄道網と比べました。

図の上段左で、点のところは都市、街です。線がJ Rの路線です。この街の場所にエサを置いてみましょう。そして東京の位置にエサと粘菌を移植し、粘菌に這わせてみると、エサ場所に向かって、どんどん広がり、上段右図のように、意味ありげなものをつくってくれます。

先端部分は、細かい管が非常にたくさんあります。やがて、そのうちのごく数本が太くなって、つまり、そこがよく流れることになって残っています。全体としては、大体2日ぐらいで、数本の太い管ですべてのエサ場所をつなぐという形になります。

さらに、次は地形の変化も取り込んで、もう少しきちんと比較してみようと。ここまでくるとちよっと悪ノリという感じもありますが、標高の高いところには粘菌の嫌いな強い光を当ててみます。水があるところには一番強い光を当ててみます。このような地形の差によって、鉄道をつくりやすさとかコストは変わってくるわけですが、それを粘菌にも反映させようという

わけです。

そうすると、やはり海岸線の平野部を路線が通って行ったり、霞ヶ浦はなるべく避けるようにしたり。でも、時々「えいやつー」と利根川を渡ってみるとか、谷筋に沿ってずっと路線が上がっていくとか、そういうことが見てとれます。興味深いのは、ところどころに管ができます。ここは実際には高速道路があります。が、そんなふうになっています。

実際、先ほど言った3つの性質、「コスト」「耐故障性」「効率」というもので測ってみると、J Rのネットワークというのは、実は粘菌がつくったネットワーク程度に非常にいいものだったということがわかりました。

実は、はじめはJ Rの鉄道ネットワークというのは随分いびつなものだろうと僕は思っていました。どこかに悪徳政治家と呼ばれる人がいて利益誘導を図っているのではないかとか、そういう先入観で見ているので、もしそれが本当ならば、粘菌の知恵を借りて暴いてみようと思いました。ところが、意外とよくできた

ものだった。それはどういふことかという、仮に悪徳政治家のような存在があったとしても、地域の方にとってみれば、ありがたい面があるわけです。地域の要望という後押しがあつて、そういう存在が成り立っている面がある。だからといつて、悪徳政治家をよしと言つてゐるのではありませんが、やはり、利用する方がいて鉄道路線というものは成り立つものである。というわけで、大きい時間スケール、広い空間スケールで考えると、それほどおかしなものにはなつていないといふことだらうと思ひます。

#### 原始的でも、知性<sup>レ</sup>の芽生え

粘菌の能力、あるいは生きものの適応性というお話をしましたが、もう少し見方を変えて、人間の社会のようなものでも似たようなことが実はあるといふことに少し触れて、終わりにしたいと思います。

不謹慎に聞こえるかもしれませんが、人間が住む街には「不道徳な近道」といふものがあります。たとえば地下鉄の駅があつてオフィスがあり、住宅街がある。美しい芝生の公園が造られている。そばには、きちん

と道が整備してあるにもかかわらず、芝生の中に人の通り道ができてしまつてゐる。こういうことが、しばしばあります。

これはどういふふうにしてできるのかと考えてみると、人が芝生の上で遊んだり通つたりすることが多少あつても、その数があまり多くなければ、芝生はまた元気に育つていきます。ところが、一定以上の人が通ると、芝生が傷んで、道らしき姿が浮かんできます。そうすると、人々の道徳心が下がつて、「これなら、僕も通つていいだらう」と思つて、ますます多くの人が通つてしまふ。結局、ますます芝生は傷んで、ますます多くの人を呼び寄せるといふことになり、こつこつ「不道徳な近道」といふものができるわけです。

やはり、「使うところは栄える」といふことで、放つておけばひとりでに痩せ細つて消えていきます。

実際、人の社会、集団で起こる近道の形成のような事例を数学モデルとして考えてみると、先ほどと同じ方程式が使えるということがわかりました。

たとえば、雪の上に人の足跡がつくといふのも、芝

生の話と似ています。皆さん、新雪の上は歩きたくないわけです。靴がビチヨビチヨになってしまいますから。だれかの足跡があれば、そこを踏んで歩く人が多い。僕もそうです。ところが、人の足跡があるからといっても、それほど遠回りするのは、やはり嫌だと。ここに少し駆け引きがあつて、結局、みんなが何となく平均的に通りやすいような経路が、自然にできる。

この冬は、函館の雪の上の道がどういうふうにできるか。これを観察し、将来、粘菌のやり方にならつて、歩道のいい歩き方を提案してみたいと思っております。

きょうは、単細胞生命の賢さを紹介させていただきましたが、さらに、単細胞生命にも「記憶」とか「学習する力」があつたり、それぞれの「個性」もあれば「迷い」とかもあることもわかってきました。たとえば、行く手にちよつと毒があつたりすると、それを踏み越えていくか戻るか逡巡します。行くべきか行かざるべきか、ハムレットのような迷いが、粘菌にもたしかにあるようなのです。

こういう単細胞生命に、ひよつとしたら「知性」とい

えるようなものの芽生えが、原始的な形ではあるが、存在しているかもしれないと思っております。

(なかがき としゆき／公立はこだて未来大学教授)

(2010年10月28日、函館市のロワジュールホテル函館で行われた講演に加筆していただいたものです)