未来技術報告
The future of technology and design

第19回
粘菌チップの世界最低速コンピュータが目指すデバイス設計のパラダイムシフト

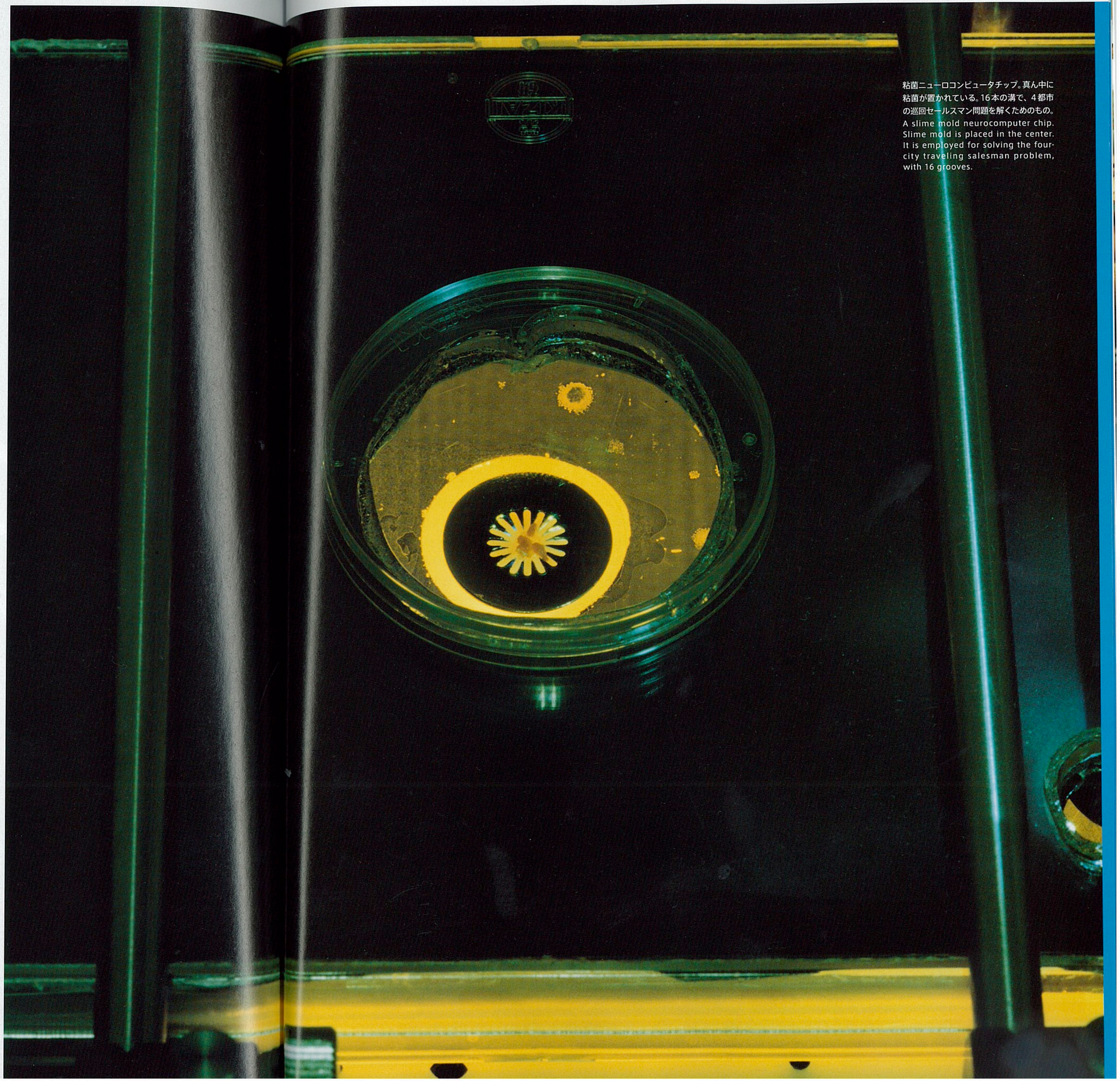
Installment 19:
Paradigm shift in device design sought by the world's slowest Amoeba chip computer

今、コンピュータは、半導体素子の集積度の限界や計算スピードの限界に直面しようとしている。その限界を粘菌が解決してくれるかもしれない。生体の揺らぎに着目して、21世紀の新しいコンピュータの可能性を探る、理化学研究所 揺律機能アジア連携研究チームを訪ねた。

The computer today is challenging the limits of semiconductor integration and computation speed. Those limits may be solved by the Amoeba chip. We explore the possibilities of new computers in the 21st century.

文／藤崎圭一郎
Text by Keiichiro Fujisaki

写真／伊藤慎一
Photos by Shinichi Ito



粘菌ニューロコンピュータチップ。真ん中に粘菌が置かれている。16本の溝で、4都市の巡回セールスマン問題を解くためのもの。
A slime mold neurocomputer chip. Slime mold is placed in the center. It is employed for solving the four-city traveling salesman problem, with 16 grooves.

揺律するデバイスを求めて

理化学研究所の揺律機能アジア連携研究チームは、粘菌を使ったコンピュータの研究に携わっている。「揺律（ようりつ）」という言葉が、研究のキーワードである。リーダーの原正彦氏に話をうかがった。

「揺律というのは、私がつくった造語です。揺動と自律、もしくは、揺動と律動を合わせたもの。揺らいでいるもののなかで、自律的な機能を発現させることが、私たちの研究テーマです」。

原氏は、理化学研究所に1986年入所。現在は理研に所属すると同時に、東京工業大学の教授も務めている。今回取材した粘菌コンピュータの研究は、埼玉県和光市にある理研の研究室で行っている。

"世界最低速" コンピュータ。黄色く光る台の上に「粘菌チップ」が置かれている。上部には実験をモニタリングするカメラ（左）と、光を照射するプロジェクターがある。
The world's slowest computer. The slime mold chip is placed on the yellow platform. A camera (left) for monitoring the experiment and a projector to irradiate light are installed above it.

「ナノテクとバイオを融合させる研究を10数年やってきたのですが、有機分子や生体分子でデバイスをつくろうとすると、不安定性ばかりが見えてくるんです。時間が経つと形が変わってしまったり、性質が変化してしまったり、劣化したり。とても一定の機能を出すデバイスにならないんです」。

研究が行き詰まった。

「そこで発想を転換してみたんです。なんで揺らぎを抑えなくてはいけないのか。有機分子や生物はもともと不安定なものなのだから、その本来の性質を積極的に生かしてみよう」。

生物だけでなく、ナノレベルの微細な世界では、基本的に物質は不安定だ。「ナノ粒子の中に光を放つ蛍光性のものがあります。夜空の星のようにそれぞれが勝手に明滅していて、光り方に規則性があるわけではない。そうした揺らぎを100Vや200Vの電気を使って、抑えつけているのが、今のコンピュータです」。

揺らぎを抑えているから、コンピュータは高速で絶対に答えを間違わない。しかし「揺律」するものは、揺らぎを受け入れる。

「トランジスタと生物を比較すると、トランジスタは、1秒間に10億回くらいオン／オフしている。生物は1秒間に1,000回といわれている。間違える確率は、トランジスタは10の80乗回に1回です。つまり何百年経っても間違えない。しかし生物の間違える確率は、1万回に1回といわれています。1秒間に1,000回振動していますから、1万回に1回というと、10秒に1回ぐらいは間違えている。人間の脳も10秒に1回、何かヘンなことをやっているといえるわけです。ところが、ちゃんと生き延

理化学研究所の揺律機能アジア連携研究チーム。左から、リーダーの原 正彦氏、研究員の青野真士氏、西川麻樹氏、テクニカルスタッフの長谷川志（ゆき）氏。原氏は国際連携研究グループのディレクターとして、理化学研究所と韓国の漢陽（ハンヤン）大学とのアジア連携研究の指揮を執っている。韓国では、揺律を基本にしながら粘菌などの生物を使わない物質系の材料開発を行うという。
RIKEN Advanced Science Institute's Flucto-Order Functions Asian Collaboration Team. *From the left*; leader Masahiko Hara, researchers Masashi Aono and Asaki Nishikawa, and technical staff Yuki Hashegawa. Hara is supervising the Asia Collaboration research at RIKEN Advanced Science Institute and Hanyan University in South Korea.

びていられるのは、どうしてか？　それは、揺らぎを逆に生き延びる手段として活用してきたからです」。

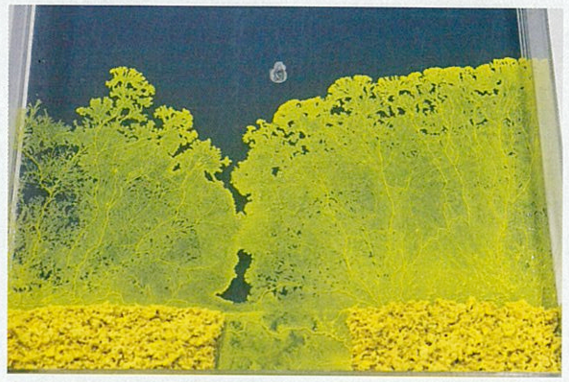
今のコンピュータは、人間にできることが苦手だと原氏は言う。「例えばサッカー選手がスルーパスを出すときは、だいたいあのあたりのスペースにボールを蹴れば、味方の選手が走り込んでくれるだろうって思って、パスを出すわけですよね。しかもいつも成功するわけではありません。今のコンピュータは、答えを絶対に間違わないようにつくられているので、だいたいこんな感じで、というあいまいな答えの出し方が苦手なんです」。

揺れ動く粘菌

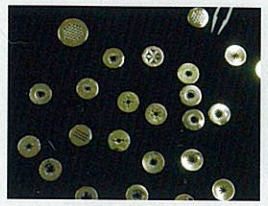
そのコンピュータが苦手なことを、粘菌でやろうとしているのだ。

粘菌は、不思議な生き物である。植物の性質も動物の性質も併せ持つ。真性粘菌モジホコリカビ（フィザラム）の変形体は、手のひらくらいの大きさの網目状の不定形な生き物で、光を嫌い、倒木や落ち葉の裏に生息し、餌を求めて時速数cmで移動する。変形体は、アメーバのような単細胞動物に近い。しかし子孫を残すときは、菌類のように胞子で増える。その存在自体が、動物と植物の間を揺れ動いている。

研究には、真性粘菌の変形体を使う。実験に用いる直径1.5cmの円形チップには、「米」の字のように8本の溝が刻まれており、チップの中央に粘菌を置く。粘菌はこの8本の溝の中へ分枝を伸ばしていくことができる。



真性粘菌モジホコリカビ。これ全体が1つの細胞。扇状になってどんどん広がっていく。広がった隣同士がくっつくと融合している様子がわかる。研究室で手のひらサイズのケースの中で育てられている。
True slime mold *Physarum Polycephalum*. This in its entirety is a single cell. It expands in a fan shape. It is cultivated in a palm-size case in the lab.



粘菌コンピュータチップ各種。実験の用途によって使い分ける。幅1.5cm。プラスチック製のものに金でコーティング。手づくりだ。
Various slime mold computer chips. They are selected depending on the purpose of the experiment. 1.5 cm in width. A plastic chip is coated in gold. They are handmade.

粘菌は揺らいでいる。繊維状のタンパク質アクトミオシンが伸縮を繰り返すことで、内部で細胞液が流動するのだ。1～2分周期で各所が伸び縮みするために、それに合わせて、液の流れる方向が反転を繰り返す。この揺らぎが粘菌の伸長や変形を引き起こす。

真ん中に置いた粘菌は、最初は同心円状に生長するが、細かく振動しながら生長しているので、最初にどの溝に分枝を伸ばすかはわからない。溝に入った分枝が検知されると、粘菌に問題を課すためのシンプルな規則が発動する。

「粘菌が入った溝の両隣の溝に光を当てる」。

粘菌は光を嫌う性質があるため、両隣の溝には入らなくなる。このため粘菌は「米」字形に広がることを許されず、「X」字や「Y」字形の10種類のパターンのどれかを探し出す。これを粘菌が答えに到達した状態と見なすわけだ。

「ところがです、粘菌は答えの状態でしばらく安定しているのですけど、あるとき、嫌いなはずの光の当たっているところに突入していくんですよ。そうすると、問題の規則に従って、両隣に光が当てられる。そこで伸びていた分枝は退却しはじめる。つまり、ようやく1つの答えに辿り着いたのに、しばらくすると、ご破算にして、もう1回、別の答えを探しはじめるのです。粘菌は自発的に安定と不安定の間を行き来している。そこがわれわれの研究のスタートポイントです」。

だいたい正しい答えを出す

現在は、粘菌に巡回セールスマン問題を解かせる研究を行っている。巡回セールスマン問題とは、セールスマンが地図上のすべての顧客の家を訪れて、自分の家に戻る場合に、どのルートが最短かを求める、組み合わせ最適化問題である。「顧客の数が増えると、組み合わせが天文学的数字になるため、スーパーコンピュータでも何世紀もかかってしまうんです。粘菌を使って、今のコンピュータが苦手な、だいたい正しい答えを導き出す原理を探りたいと考えているのです」。

チームの研究員の青野真士氏が、4つの都市の最短経路を探る巡回セールスマン問題を、粘菌に解かせるシステムを開発した。16本の枝のあるチップをつくり、光の照射をニューラルネットワークアルゴリズムで制御する。

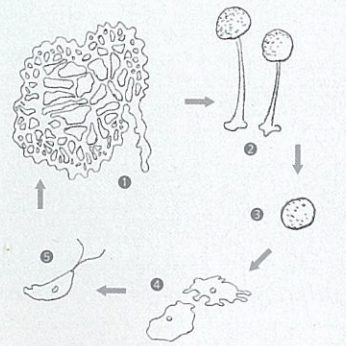
いつもベストの答えを出すわけではない。最短ではないルートを答えるときもある。ここでも、答えを出してしばらくすると、嫌いなはずの光に突入して、別の答えを探しはじめる。

青野氏は言う。「粘菌はこのチップの中では餌は与えられませんから、光が当てられなくて落ち着くからといって、答えに到達した状態のまま止まっていても、何の利益もない。そこで、どこかにあるかもしれない餌を探しに、嫌いな光の下であっても突入していくんです。それって一種のギャンブルですよね。未来に期待して、イチかバチかの意思決定をしているわけです。粘菌は、多核単細胞生物ですから、どこを切っても同じ、均質なシステムです。けれども、時と場合によって、部分部分がま

粘菌とはどんな生き物か？

粘菌には、真性粘菌と細胞性粘菌があるが、ここでは真性粘菌を紹介する。原氏のチームが実験に使っているのは、真性粘菌モジホコリカビの「変形体」❶という段階のものだ。変形体は、やわらかく不定形。数cmから1mくらいまで生長する。光を嫌い、朽ち木や落ち葉の裏にベタッとくっつき、餌を求めて、時速数cmで移動する。1つの細胞の中に数百万の核がある多核単細胞のため、切って複製したり、2つの個体が合体することも可能だ。

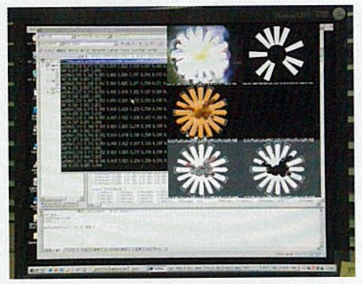
変形体は、光に当たりつづけると、「子実体」❷に変化する。球状やソーセージ形など種によって形の違う袋が開くと、「胞子」❸が大気にまき散らされる。胞子は、菌類のように菌糸にはならず、「粘菌アメーバ」❹になる。アメーバは水の中では「べん毛細胞」❺に変わるが、乾いた場所だとアメーバに戻る。粘菌アメーバにはオスとメスがあり、接合すると、変形体になる。変形体は乾燥すると、硬い殻を持った菌核という多細胞状態になり、乾いたまま1年以上も生き続ける。水をやれば変形体に戻る。



What is slime mold?

There are two types of slime mold: true slime mold and cellular slime mold. The subject taken up here is true slime mold. Used in the experiments by Hara's team is a stage called microfabricated structure of true slime mold Physarum Polycephalum ❶. The microfabricated structure is soft and amorphous. It can grow from several centimeters to approximately one meter. As it dislikes light, it attaches itself to the back of decayed logs or fallen leaves and moves at a speed of several centimeters per hour in search of food. Since it's a multinuclear single-cell mold with several million nuclei inside a single cell, it is also possible to cut it into two or join two to form one.

When exposed to light for an extended time, the microfabricated structure transforms into a carpophore ❷. When its sack (comprising varying shapes such as spheric or sausage form, depending on the type) opens, spores ❸ are released into the air. The spores do not become fungal threads like a fungus, but slime mold amoebae ❹. The amoeba changes into a flagellar cell ❺ in water, but will change back into an amoeba in dry environments. There are male and female forms of slime mold amoeba, and when they join up they become a microfabricated structure. When the microfabricated structure dries, it turns into a multi-cellular state called sclerotium with a hard shell and can live for over one year. It returns to the microfabricated structure when watered.



16本の分枝の粘菌ニューロコンピュータチップで、4都市巡回セールスマン問題を解く過程をリアルタイムでモニタリング。粘菌が溝の中に入っていく様子がわかる。ニューラルネットワークで光の照射を制御。白枠で囲まれているのが、光が当たっている溝。原則的に粘菌は侵入してこない。6秒ごとに光の照射は更新される。
The process of solving a four-city traveling salesman problem is monitored in real time using a slime mold neurocomputer chip with 16 branches. The process of the slime mold entering the grooves can be seen. The slime mold does not enter, in principle, the grooves surrounded by white frames irradiated with light. Light is irradiated every six seconds.

るで全体を見渡して意思決定をしているかのように振る舞う。粘菌の研究を通して、フラットなシステムによって、どうすればシステム全体の活動をより豊かにするような、高次の意思決定を自律的に実現できるかを探りたいと考えているのです」。

1つの答えを出すのに1～2時間。何個か別の答えを出させようとすると16時間くらいかかる。それゆえ「世界最低速コンピュータ」と言われることもある。

原氏は言う。「われわれは粘菌でデバイスをつくろうとしているわけではありません。粘菌で突きとめた原理を使って、安定と不安定を行き来する別の人工材料に落とし込んで、20世紀のイチかゼロかのコンピュータを生んだ、高速で間違わない半導体素子とは違う素材を用いた、全く新しいイチかバチかのコンピュータをつくりたいのです」。粘菌コンピュータが、21世紀のパラダイムシフトを引き起こす起爆剤になるかもしれない。

In pursuit of a Flucto-Order device

The Flucto-Order Functions Asian Collaboration Team at RIKEN Advanced Science Institute is involved in research into amoeba-based Neurocomputing. We talked to its leader Masahiko Hara.

"Flucto-Order is a term I made up. Our research theme is to generate an autonomous function within a fluctuating entity."

Hara joined the RIKEN Advanced Science Institute in 1986, and became professor at Tokyo Institute of Technology around the same time. We visited Hara at his RIKEN lab in Wako City, Saitama Prefecture for this interview.

"I was doing research on fusing nanotechnology and biotech for over ten years, but all I saw from trying to create devices with organic molecules and biological molecules was instability. They change forms, change characteristics or deteriorate with time. A device that provides a consistent function seemed impossible."

His research reached a deadlock.

"I then tried from different angles. Why is it necessary to suppress fluctuation? Why not positively make use of the instability of organic molecules and living organisms since it is their essential nature?"

The computer is high-speed and absolutely accurate because it suppresses fluctuation. Things that fluctuate, however, accept fluctuations.

"When we compare a transistor and a living organism, a transistor turns on/off about one billion times every second, and a living creature about 1,000 times. The probability of a transistor making an error is once in 10 to the 80th power. But the probability of a living creature making an error is said to be once every 10,000 times. Since it oscillates 1,000 times per second, once every 10,000 times means it makes an error approximately every 10 seconds. This means that the human brain also does something strange every 10 seconds. How then is it that we survive? It's because we make use of fluctuation as a means for survival."

For the research, Hara uses a microfabricated structure of the true slime mold. On a circular chip, 1.5 cm in diameter, used in the experiment, eight grooves are etched radially in a starburst pattern. The slime mold is placed in the center so it can stretch its branches into the eight grooves.

At first it grows in a concentric fashion, but since it grows while oscillating minutely there is no telling into which grooves it will stretch its branches first. Once a branch is detected in a groove, a simple rule to assign the slime mold a task is generated.

"Light is irradiated onto two grooves adjacent to the groove in which the slime mold entered.

Since slime mold avoids light, it is prevented from entering the two adjacent grooves. It is therefore prevented from spreading into the starburst form and looks for either one of the ten possible patterns it can settle in, such as the "X" or "Y" shaped pattern. This chosen pattern is considered to be the state in which the slime mold has reached an answer.

"However, although the slime mold stabilizes for a while in the answer state, it suddenly charges into places it is supposed to dislike, where light is irradiated. It struggles to reach an answer, but after a while it gives up and starts to search for another answer again.

It generally gives a right answer

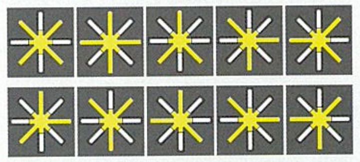
At present, Hara is working on research that gets slime mold to solve the traveling salesman problem. The traveling salesman problem is a combinational optimization problem that requires seeking the shortest route for a salesman to visit all the residences of his clients on the map and return to his own home. "When the number of clients increases, the possible combinations become astronomical, and it takes centuries even for a super computer to solve it. I'm looking for a principle that draws out a generally correct answer that today's computers are not so good at.

It doesn't always give the best answer. Sometimes it gives a route that's not the shortest. Here too, after giving that answer for a while, it charges into the light that it is supposed to dislike, and starts to look for another answer.

Aono says, "In search of food, not knowing whether it even exists, it charges even into the light it hates. It's sort of a gamble. It's making an all-or-nothing decision expecting a rosy future. We want to explore the possibility of realizing high-level autonomous decision making that can further enrich the activity of the overall system.

It takes one to two hours to arrive at one answer. If you want it to reach several different answers, it takes about 16 hours. That's why it's sometimes called the world's slowest computer.

Hara explains, "It's not that we're trying to make a device with slime mold. We want to use the principle we discovered with slime mold in another synthetic material that goes back and forth between stability and instability, and make a completely new all-or-nothing computer that employs a different material from the high-speed and error-free semiconductor device that gave birth to the zero-one computers of the 20th century.



8本の溝の粘菌コンピュータチップを使った実験。黄色が粘菌。黒枠が光が当たっているところ。粘菌が分枝を伸ばした溝の両隣に光を当てるという規則を与えると、最終的に「x」か「+」の4本枝の2種のパターンか、「Y」字型の角度違いの8つのパターンの、計10種の「解答」のいずれかに粘菌は辿り着き、しばらくその状態で安定する。
An experiment using a slime mold computer chip with eight grooves. The yellow part is the slime mold. Black frames indicate grooves irradiated with light. When a rule that says "irradiate light on the two grooves adjacent to the groove the slime mold entered" is applied, the slime mold eventually reaches either one of a total of 10 types of "solutions comprising two patterns "x" and + with four branches, and eight patterns of "Y" with different angles.