

複雑な現象を解きほぐす 複雑系数理モデル学

科学や技術の進歩で、私たちは多くのことが予測できるようになりました。しかし、予測できない現象もまだまだたくさんあります。また、これまでは複雑な振る舞いをする現象を科学で扱うのは難しかったのですが、そのような現象に隠れた法則を見つけ、その本質に迫るカオス工学や複雑系工学といわれる分野が発達してきました。カオスとは何か、カオスの研究でどのようなことがわかるのかなどを伺いました。

■複雑な振る舞いをするカオス なぜカオス工学の研究をするようになったのですか。

実家は九州で電気設備会社をしていて、私はその3代目社長になる予定でした。ですから、跡を継ぐことを視野に入れ、大学では電気工学を学んでいました。大学卒業後は大学院に進学したいと思い、何を学ぶかを考えました。

もともと生き物が大好きだったので、このまま電気関係の分野にするか、生き物を一つのシステムとして研究する生体工学という分野を学ぶかで大変悩みました。結局後者を選択して、脳科学者の松本元先生のもとで学ぶことになりました。思えば、この選択が私の人生を大きく変えることになったので

す。松本先生の下では、イカの巨大神経細胞を用いた研究に取り組みました(図1)。そのときに、神経でカオス現象が起きることを発見したのです。以来、ずっとカオスそして複雑系の研究をしています。

カオスは、「混沌」などと訳されますが、どのような現象のことですか。

カオスは数学から発展してきた概念で、一言でいうと、「決定論に従っているシステムが、非常に複雑で不安定な振る舞いをする現象」の総称です。決定論に従っている現象は、あいまいさのない方程式で表すことができますが、カオスはそのような式から導き出される振る舞いに規則性がほとんどなく、非常に複雑になります。カオスとはこのように、数式で表現できても、長期の予測ができないという大きな特徴もっています。

わかりやすい例に振り子があります。通常の振り子は、一定周期で同じ振る舞いをくり返します。しかし、この振り子の先にもう一つ振り子をつけて二重振り子にすると、途端に振る舞いが複雑になります。同じように力をかけたつもりで揺らしても、1回ごとに振り子の動き方が違ってくるのです(図2)。

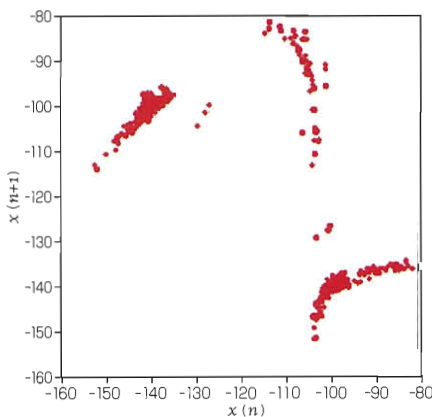


図1 電気刺激に対する神経細胞のカオス応答
ある強さの刺激に対してはカオス応答を示すことを実験的に発見し、数理モデル化した。



東京大学生産技術研究所教授

合原 一幸 あいはら かずゆき

1982年東京大学工学系研究科博士課程修了。東京電機大学助教授、東京大学大学院工学系研究科教授、東京大学大学院新領域創成科学研究科教授などを経て現職。独立行政法人科学技術振興機構・ERATO合原複雑数理モデルプロジェクト研究総括も務めた。専門は数理工学、カオス工学、生命情報システム論。AROB Academic Achievement Award、東京テクノフォーラム21・ゴールドメダル賞などを受賞。

■カオスはいつでも現れる 日常生活の中でも

カオスは現れるのでしょうか。

実は、私たちは、知らないうちに日常的にカオスが起る現象に触れています。グラフに表したときに直線にならないシステムを非線形システムといいます。一番単純な非線形システムは変数が一つの二次関数です。この二次関数に従う単純なシステムでもカオスは起きます。基本的に、生物はすべて非線形のシステムですし、たとえば地震や台風、川の流れなど、世の中の現象もほとんどが非線形なものなので、カオスの現象は

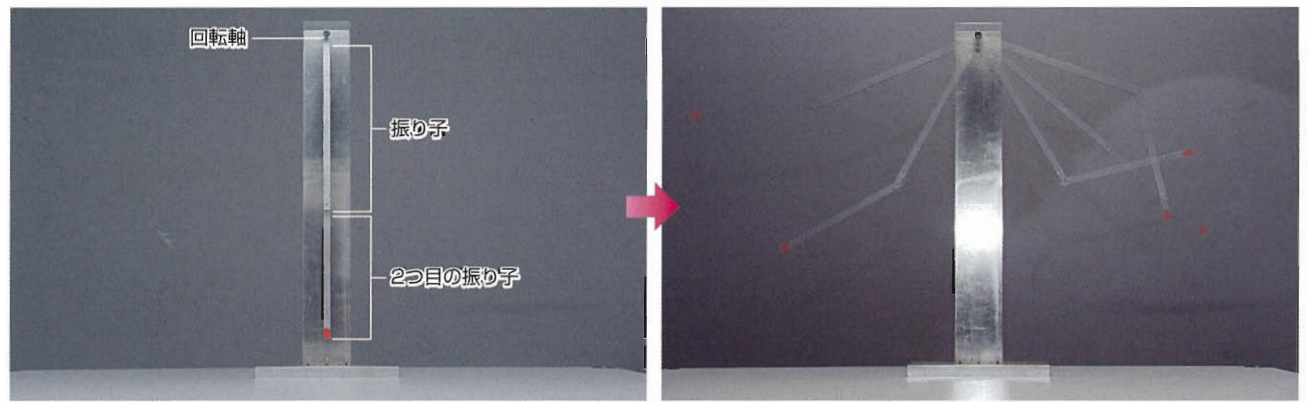


図2 二重振り子の振る舞い 振り子の先に2つ目の振り子をつけると、予測不能の動きを示す。

常にいたるところで起きているのです。
カオスがあるとわかったことで、
どんな変化が起きましたか。

これまで私たちは、日常に起こる現象を直線で近似して法則を見いだしたり、線形の回路などで実装したりしてきました。このような線形の枠組みでは、ある現象の本質を見抜くという目的で実験をして、複雑で不安定な振る舞いが観測された場合、たいていは、その実験のやり方がまちがっているとか、失敗したと思われていました。

しかし、カオスという知識を得たことにより、世の中で起きる現象の見方が一変したのです。これまでの失敗と思われた実験データも、カオスの考え方を踏まえて検証すると、実はその根底に単純な決定論的法則があることがたくさんわかってきました。

カオスは数学の分野で生み出されたものですが、その後、さまざまな分野で検証されるようになり、実験的にもたくさんのカオス現象が確認されています。蛇口から落ちる水滴や流れの乱れなどもカオスです。私たちも、早い時期にイカの神経細胞でカオスを発見したことで、カオスの実験研究の発展にも大きく貢献できたと思っています。

■バタフライ効果が 劇的な変化をもたらす

カオスは予測ができない、つまり、同じような現象でも振る舞いが1回ごとに違うということですが、それはなぜでしょうか。

カオスは、ちょっとした誤差やずれが

時間の経過とともにどんどん広がってしまふという性質をもっています。これをバタフライ効果といいます。バタフライ効果は「アマゾンでチョウが羽ばたくとテキサスでトルネード（竜巻）が起きる」というたとえ話で表現されるように、最初はちょっとした変化だったものが劇的な変化につながっていくという性質です。カオスを生じる場合は、初期値がわずかに1000分の1ずれると、最初のうちはほぼ同じでも、だんだんずれが大きくなってしまふのです（図3）。

先ほど例に出した二重振り子も、同じように力をかけているつもりでも、実際には微妙に力のかけ方が違ってきます。その初期値の微妙なずれが、毎回大きく違う運動パターンを生み出す要因となるのです。私たちの身の回りには常にたくさんの揺らぎがあります。力のかけ方の微妙な差や、空気の揺れなどがそうです。絶対零度でない限り、すべての物質を構成している分子は常に揺らいでいます。あらゆるところにノイズがあります。そういったものが初期値のずれをつくりだしているわけです。

カオスに現れる複雑さのもとをたどると、実数のもつ複雑さに行き着きます。私たちは温度、距離、速度などたくさんの数字に囲まれています。それらは26℃、1mというように計測することができますが、実際は26.00132℃だったり、1.000101mだったりするかもしれません。実数は一般に小数点以下が無限に続きます。実際に計算する場合などはそういう無限桁の数字は扱えないので、必ずどこかで数字を切り捨ててい

ます。

しかし、カオスでは、その実数の無限性という複雑さがバタフライ効果で増幅されて表に出てきます。人類は、いままで実数をそのまま扱うことができませんでしたが、カオスを知ることによって、実数の無限の複雑さを増幅して読み取るという、基本的な原理を手に入れたことにもなるわけです。

■部分と全体の折り合いをつけて 問題を解決する

カオスはいろいろな現象で起きるというお話ですが、研究対象はどのように決めるのですか。

数理工学研究は基本的に、自分がおもしろいと思ったり、興味をもったりした現象を対象とします。そして、まずその現象をきちんと知り、数理モデルをつくりまします。現象を探るために実験をしますが、これは自分でやる場合もあれば、共同研究者と一緒にやる場合もあります。実験で集めたデータをコンピュータで解析してモデル化していきます。私の研究分野は力学系理論といって、ダイナミックな振る舞いに興味があるので、

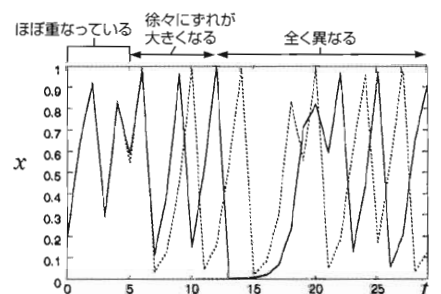


図3 初期値が1000分の1ずれると、最初は重なっているが、やがて全く異なる振る舞いをしてしまうグラフ。X(0)=0.2(実線)、X(0)=0.201(破線)

そういう振る舞いを取り出して、なるべく単純な数式で表現していくのです。

私がいま力を入れて研究しているテーマの一つが、新型インフルエンザの問題です。もともとは2002年に発生したSARS（重症急性呼吸器症候群）が対象の研究で、感染拡大に対する満員電車の影響を調べたところから出発しています。このときの計算を新型インフルエンザに置き換えて、新型インフルエンザでの満員電車の影響を調べたり、ワクチンの配分問題などの計算をしています。

ワクチンの問題は、2009年から2010年にかけては、例年の季節性インフルエンザと同時に、新型インフルエンザもはやることが想定されたので、限りあるワクチンを季節性と新型でどのように振り分けたら一番効果的かを計算しました。2009年6月時点では日本でつくれるワクチンの総量は5000万人分だったので、それをもとに計算したところ、約80%の4000万人分を新型に割り振れば、インフルエンザでの死者数を最少にすることができるという結果を得られました（図4）。

インフルエンザの予防対策では、うがいや手洗い、感染者のマスク着用の大切さがよくいわれていますが、これらの個人的な取り組みが社会に与える影響は実感しにくいものです。そこで、個人

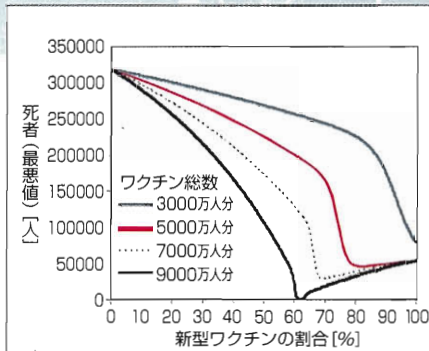


図4 季節性と新型のワクチン配分問題のグラフ
ワクチンの総数を5000万人分と仮定した場合、80%のワクチンを新型インフルエンザの患者に割り振ると、インフルエンザでの死者が最少になる。
(西浦、合原：生産研究 61,4,2009より一部改変)

の予防を徹底することが、感染を抑えるワクチン何人分に相当するのかを計算してみました。その結果、個人個人の予防対策によってインフルエンザの感染力を10%抑えることができれば、1600万人分のワクチンと同じ効果をもたらすことがわかりました。

インフルエンザの感染伝播は複雑な振る舞いをしますが、このような問題は数理的な研究である程度すっきりとした解が出せるので、その解をもとに、国や医療関係者などで議論していけば、よりよい施策が打ち出せるのではないかと考えています。

インフルエンザの問題が難しいのは、部分と全体の両方を考えていく必要があるからです。個人個人の行動は、地域や人間関係に影響を与え、それがさらに社会や世界レベルまで影響を及ぼすのです（図5）。個人が自己の目先の

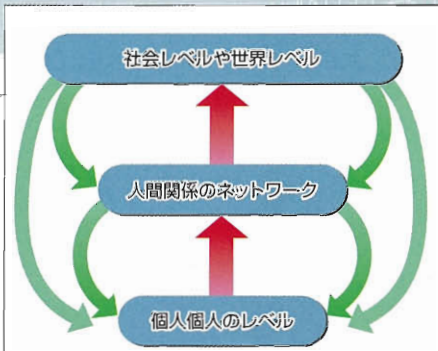


図5 部分（個人）と全体（社会）の相関図
私たちの社会では、個人の行動が社会全体に影響を与えると同時に、社会が変化することによって、社会全体から一人一人の個人にも影響が及ぶ。このような相互作用が社会現象などを複雑にしている。

利益のみを追求すると、一時的には得をすることもありますが、社会や地域にインフルエンザが流行して、結果として自分も不利益をこうむるということもあります。個人という部分だけ、または社会という全体だけを見ては駄目で、部分と全体の両方を見て、その相互作用を考えることが大切になります。

一つの問題を解決するのに、部分と全体を併せて考えないといけない例はインフルエンザだけでなく、社会全体にたくさんあります。基本的に、私が取り組んでいる複雑系の研究は、その折り合いをどうつけて、いかに最適な解を見つけるかということがポイントです。そういう意味でも、カオスや複雑系の数理モデルが社会に対して、提案できること、役に立つことはまだまだたくさんあると考えています。 □

どんなときでも夢をあきらめない

私は小さいときから昆虫が好きで、ずっと昆虫学者になりたいと思っていました。実際に2年前までは、「将来の夢は？」と聞かれたら「昆虫学者になること」と答えていました。しかし、2年前にカナダで開かれた神経行動学の会議に参加したときに、その考えが変わりました。驚いたことに、その会議には私が長年あこがれていた昆虫学者がたくさん参加していたのです。私は子どものころから、昆虫学者というと、珍しい虫をたくさん集めて標本にするというイメージしかありませんでしたが、昆虫学者の研究分野は昆虫の脳の機能を調べるという方向にも広がっていたのです。私はイカの神経に始まって脳の数理モデルの研究もしていますが、ある分野の昆虫学者は私と同じような研究をしていたのです。つまり、この意味で私はすでに昆虫学者になるという夢を果たしていたのです。

この体験を通して、夢はどんな形であれ、かなうと実感しました。人生の中ではたくさんの決断を迫られます。そのときにはささいな選択でも、バタフライ効果で思わぬ方向に進んでしまい、夢から離れてしまったと思うこともあるでしょう。でも、あきらめずに夢をもち続ければ、逆に夢に近づくようなバタフライ効果も起こしていけると思います。

