



左から石崎さん、福井さん（昨年8月）。

「カオス」という言葉を聞いたことのない人は少ないと思うが、正確に説明できる人はそう多くないのではないかと。語源はギリシア神話に登場する神の名前にあり、神であるカオスは何もない世界で、ガイヤやエロスといった別の神を次々に生んだとされている。今では「混沌」や「無秩序」を意味し、科学的には「決定論的な力学系にみられる不規則かつ複雑な軌道」などと定義されている。

「ボールを投げる」「振り子を左右に揺らす」といった力学的な運動は、初期条件と境界条件が決まりさえすれば、その後にみせる運動も決まるため、動きを確実に予測することができる。ところが、水を入れた鍋を熱したときに底から沸き上がる泡や、海岸に打ち寄せる波、風に吹かれる木の葉などの動きはカオス現象の一種で、その動

単純な仕組みを使って複雑な現象をとらえる、振り子のカオス研究

長崎県立長崎西高等学校（平成17年度SSH指定校）

自然現象、社会の動き、自分や他人の思考など、私たちの日常は、不確実なもの、でたらめなもの、結果の予測が困難なものであふれている。これらのなかには「カオス現象」と総称されるものが多く、物理学や数理科学の研究テーマの1つにもなっている。長崎西高校の石崎貴大さんらは、振り子を上下に2つつないだ「二重振り子」の運動を考察することなどから、単純な仕組みでもカオス現象が示される可能性のあることを明らかにした。

きを予測することは不可能だ。初期条件のごくわずかなちがいが、その後の運動に大きく影響してしまうからである。

二重振り子の運動

現在、長崎西高校物理部SSH物理班に所属する石崎貴大さんは、昨年「二重振り子」の不思議な動きを見てカオス現象に興味をもったという。二重振り子は、軽い棒の先端におもりを取り付けた振り子を2つ接続しただけの単純な装置。片方の振り子が左右に揺れたり、回転すると、その動きにつられて、もう片方の振り子も左右に揺れたり回転したりする。素人目にも、2つの振り子の動きがバラバラで、不規則であることがわかる。簡単な仕組みで「複雑な動き」を観察できることから、二重振り子は中・高校生向けの科学実験でもしばしば使われるようになっている。

「実は、これまでの研究では、複雑な動きをみせる現象には複雑な条件が必要だとされてきました。ところが、コンピュータを用いた最近の解析で、単純な条件でも複雑な動きをみせる現象、すなわちカオスが存在することがわかってきました」と石崎さん。さっそく、物理部のメンバーで昨年3年生だった福井教文さんとの2人で、二重振り子が「単純な条件で示すカオス現象」に本当に相当するかどうかを確かめてみることにした。

ロジスティック写像に当てはめると

石崎さんらは、水道栓からの水滴の滴りや生物の個体数の変化といったカオス現象を説明することができることとされる「ロジスティック写像」に着目した。この式では、変数「 X_n 」と「 X_{n+1} 」との関係を表すグラフ（リターンマップ）が山型を示した場合にカオス現象であると判断されることから、石崎さんらも「山型のリターンマップ」をカオス現象の指標として用いることにした。

次に、上の振り子と下の振り子でおもりの重さや棒の長さの比率を変えたさまざまな二重振り子について、ひとつひとつをパソコン上でシミュレーションしてみた。そして、下の振り子の軌跡を示すデータから、その水平X座標のピーク値のみを百数十個選び出し、そこからリターンマップを作成した。

その結果、上下の振り子の長さや質量が極端に異なる場合のリターンマップ

文系・理系を問わないSSH活動

ひと口にSSH指定校といっても、「理系の学生だけが参加する」「クラブ活動で行う」「1、2年生だけが行う」といったように、その活動方法は多彩である。長崎西高校の場合は、理系・文系を問わず、全生徒がSSHの何らかのテーマに取り組んでいるのが特徴だ。「これからの科学技術社会では、文系理系を問わず科学的リテラシーが必要だ」との考えからだという。現在は、石崎さんらのカオス研究のほか、化学分野で「有機合成の化学」、生物分野で「小動物の研究」、地学分野で「長崎地域の気象現象の解析」など、合計37テーマの研究を進めている。

「複雑系の研究は今後の応用が期待されており、石崎君たちには果敢に挑戦してもらいたい」。SSHの担当を務める川上洋一郎教諭は、そう話す。一方、長崎西高校の生物班では、全国のSSH校と協力して「乾型耳垢型遺伝子の全国地図作成に関する研究」を進めており、現在、日本人類遺伝学会で発表するためのDNA分析を急いでいる。

「すぐれた理数的資質をもつ生徒に、さらに高度な科学技術教育を施したい」。そう考える川上教諭は、適切な指導と助言のために自らも積極的に学ぶ日々を送っている。

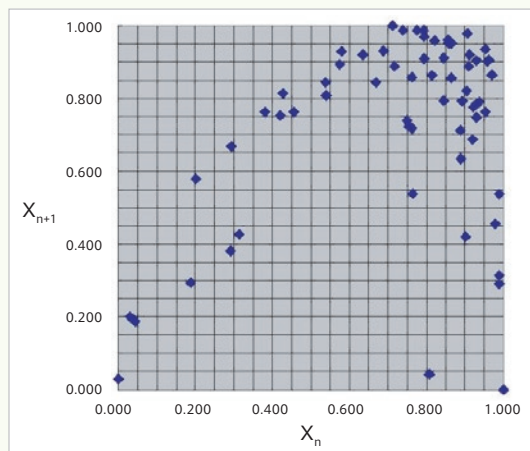


図1 二重振り子で、上の振り子を長さ0.1m・重さ0.1kgに、下の振り子を長さ0.2m・重さ0.2kgにしたときのリターンマップ。カオス現象であることを示すきれいな山型になっている。

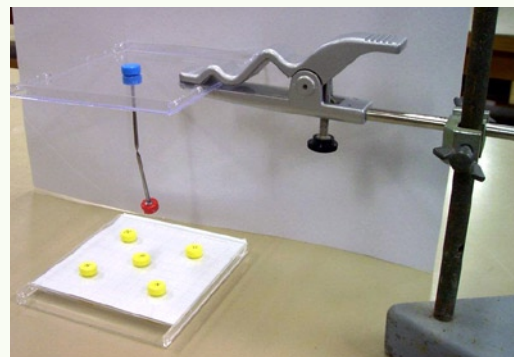


図2 おもり(赤)に磁石を用いた磁石振り子の実験装置。おもりの下の平面に複数配置された別の磁石(黄)の影響を受けて複雑な運動をする。

は直線的になりカオス性は小さいが、両方の振り子の長さや質量を同じ程度にすると、山型に近いリターンマップになることがわかった。「特に、上の振り子を長さ0.1メートル・重さ0.1キログラムに、下の振り子を長さ0.2メートル・重さ0.2キログラムにすると、180個のX値データがきれいな山型を描くことがわかりました」と福井さん(図1)。条件さえ整えれば、単純な装置である二重振り子もカオス現象を示すことを明らかにできたのである。さらに石崎さんらは、おもりに磁石を用い、その下の平面に複数の別の磁石を配置しておもりを運動させる「磁石振り子」を製作し(図2)、その軌跡をコンピュータに取り込んで解析してみた。おもりの水平X座標のデータは、二重振り子と同様なリターンマップを示し、磁石振り子でもカオス現象を示す可能性が高いことがわかった。

パイこねで初期値感性を確認

一方で石崎さんらは、白い粘土に赤い粘土を練り込むときの赤い粘土の位置の変化(写像)がロジスティック写像と同じような三角の山型(テント型)のリターンマップを示すことを利用し、カオス現象が初期条件にどのくらい左右されるかについて検討した。実験はごく単純なもので、白い粘土の一部分に赤い粘土を挟み込んだ太さ3センチメートル、長さ10センチメートルほどの角棒を用意し、手でこねて粘土を2倍に引き伸ばし、中央で2つに折り返す操作を繰り返すというもの。「当然ながら、

このパイこねのような操作を何度か繰り返すと、赤い粘土が全体に何層にも重なって分布するようになります。つまり、初めの赤い粘土の位置がほとんど同じでも、最終的な分布は広くバラバラで、長期予測がまったく不可能のようにみえます」と福井さん。

シミュレーション実験では、三角の山の高さを変化させながら、ひとつひとつ確かめた。リターンマップの山の高さが高いということは、パイこね操作の「引き伸ばしを大きくすること」に相当する。引き伸ばしを大きくする(つまり、山の高さを高くする)と、カオス性が大きくなり、引き伸ばしの程度がカオス現象の初期値感性を生じさせていることが確認できた。

こうして石崎さんらは、高い山型のリターンマップで表される写像が、初期条件の微妙な差によって結果が大きく異なるカオス現象を示す可能性が高く、そのような現象を長期にわたって結果を予測することは極めて困難であるということを示すことにも成功した。

苦戦した専門用語の理解

カオスの概念を理解するには、非線形グラフの読み方やフーリエ解析、フラクタル次元といった、高校の数学のレベルをはるかに超えた知識が必要である。今回、石崎さんらは大学の研究者には協力を求めなかったというが、代わりに顧問の川上洋一郎教諭から懇切丁寧な説明を受けたという。「先生には、専門書を一行読むたびに質問しているような

状況でした。自分が理解するだけでもたいへんな内容でしたが、研究成果を発表するにあたって、一般の人々に説明する苦労はそれ以上でした」。石崎さんはそうコメントするが、メンバーは2007年8月に開催された平成19年度スーパーサイエンスハイスクール生徒研究発表会において、平易な解説で、かつ堂々としたプレゼンテーションを行った。

「今回の成果が私たちの生活にどのように応用できるのかを考えるとところまではできませんでした」。福井さんはそうコメントするが、カオスの概念に基づいた解析は、気象予測、株価予測、脳機能計測、暗号技術など、さまざまな方面で応用されようとしている。「今回の研究で、今まで解明できなかった複雑な現象が、実は単純な法則に準じているとわかる日がくるのかもしれないと、カオスの将来的な可能性を感じました」。そう話す石崎さんは今年2年に進級し、現在も研究を続けている。次なる課題は、「フーリエ解析」や「リヤプノフ指数」、「サロゲートデータ法」といったリターンマップ以外の判定法を学習し、再検討を行うとともに、「流れる水」や「非線形電子回路」のカオス研究に取り組むことであるという。

将来の夢は、大学の工学部に進学して航空機や宇宙機の研究をするのが夢だという石崎さん。さまざまなところで、カオス研究の体験が役立つことだろう。

執筆：西村尚子(サイエンスライター)