

カオスは  
ものではなく数である  
複雑系ブームを超えて

Chaos Is Not Substance, but Number:  
Transcending the Recent Complexity Boom

黒崎政男



A I H A R A K a z u y u k i



K U R O S A K I M a s a o



合原幸

特集 情報社会の未来形  
対話篇.....

5

カオスはものではなく数である  
複雑系ブームを超えて

カオスは、  
非線形システムでは  
当たり前のように起きる  
現象なんです。  
したがって世の中には  
非線形なカオス現象が  
あふれている

黒崎—きょうはカオス研究の世界的権威である合原さんにお越しいただいて、いま世の中をかなり騒がしている「複雑系」について考えてみたいと思います。複雑系という茫漠とした分野の中で、明らかに核になる研究が「カオス」だと思うんですね。そこでまず最初に、複雑系に入る前に、カオスは基本的にどんなものかという簡単なお話をさせていただいて、それがどうして複雑系という話につながるかを簡単にお話しいただけますか。

合原—複雑系はいまブームで、なんでもかんでも複雑系みたいになっているんだけど、理論的にきちんとしたベースがあるのは、カオスを踏まえた複雑系の話だと思うんです。カオスとは何かとい

うと、要するに決定論に従っているけれども非常に複雑な振る舞いをして、遠い将来の予測ができなくなるという現象なんですね。この現象自体は100年ぐらい前から知られているんですが、特に研究が盛んになってきたのはここ20年間ぐらいです。それはなぜかといううと、カオスというのは非線形システム[★1]に固有の現象だからなんです。非線形システムはほとんどの場合、紙と鉛筆では解けない世界なので、数学の一部の世界を除いて、一般人はなかなかカオスの問題には迫れなかったんですね。

★1— $y=ax+b$ のように、ある種の入力があったときに、それに比例して出力も変化する関係を線形性という。非線形とは線形でないものすべてをさす。

ところが20年ぐらい前からコンピュータが、特に研究者にとって身近なツールになってきたわけです。紙と鉛筆では解けないカオスを近似的にコンピュータを使って見られるようになった。それがここ20年の非常に大きな進歩です。そのときに最初に判ったのは、非常に低い次元のカオス(低次元カオス)で、時間が離散的なシステムだと1つの変数でカオスが起きるわけです。時間が連続的に変化する微分方程式だと、一般には3変数あれば、つまり三次元の空間で考えればカオスが起きる。そういう低い次元のカオスがここ20年でかなりよく判ってきたんだけれども、そういうものを理解すると今度は高い次元のカオスを知りたくなるわけですね。

その流れで高次元のカオス、特に時間的・空間的に広がっている時空カオスの研究がここ7-8年ぐらいの間に非常に進んできて、それはカオスをベースにしているの、基本的に力学系理論という、ちゃんとした数学の枠組みがあるわけです。つまり、理論的にきちんとした枠組みの中で、高次元カオスというかたちで複雑系の研究のひとつの核ができたのが最近の一番重要な前進だと思うんです。黒崎——いまのお話で確認しておきたいのは、決定論に従っているのに予測が不可能という、カオスにとってアルファでもオメガでもあるような思想がひとつ、もうひとつが、非線形システムという言葉ですね。

合原——これまでの科学技術の基本的な理論体系は線形です。線形というのは非常にきれいだし、きちんと解ける世界なのです。たとえば実世界のシステムでも、電気で言うとオームの法則とか、機械で言うとフックの法則というのがあって、ああいうのは線形の法則です。そういう線形の理論体系をベースにしてこれまでの科学技術は基本的にはできているわけです。

黒崎——なるほど。オームの法則なんて非常にクリアですね。100Vで1A流れているのを200Vにすると2Aになるし、500Vにすると5Aになるという非常にきれいな比例関係、算数のレベルで計算できるような世界です。それで世界が記述できればこんなにいいことはないですよ。

合原——ところが、実際に世の中のシステムをちゃんとと見ると、ほとんどのシステムは非線形なんですよ。バネの伸びを示すフックの法則を例にとると、確かに重さが適当な範囲ではほぼ比例するんだけれども、だんだん重さを増やしていくと、バネの伸び方は線形の特徴からずれてくるんです。それで最後は切れてしまうんですけども、基本的にそういう非線形性がフックの法則の背後にもあ

特集情報 対話篇 社会の未来形

るわけです。

黒崎——内在しているということですね。つまり、普通の体重計だと一般の人が乗っても大丈夫だけれども、小錦が乗ると壊れちゃう。だから20キロ、40キロ、80キロだと目盛りがきちっと正比例していくけれども、200キロぐらい乗せるとボンと振り切れるという構造の中に、線形で世界を扱っているながら、実はその背後に非線形が潜んでいるということですね。

合原——そうですね。実は、カオスは、非線形システムでは当たり前のように起きる現象なんです。したがって世の中には非線形なカオス現象があふれている。

複雑系がもしも深い意味を  
もっているとすれば、  
機械論と目的論の  
アウフヘーベンというか、  
対立を超えるような  
研究の方向だということだと思えます

黒崎——決定論に従っているのに予測が不可能だということはカオスの本には必ず書いてある。ところが、法則に従っているんだったら予測ができるだろうし、予測が不可能だったらそんな法則はしっかりしていないんじゃないかというのが従来の世界観でした。ある種現象の背後なり現象に本当の法則を見出せば、それですべて予測も可能だし、制御も可能だという考えだった。

合原——そうですね。だからそれをカオスが打ち破ったわけで、そこに黒崎さんは特に興味をもったわけですね。

黒崎——ええ、そうです。複雑系という話は、これは歴史的に言うと、あるアメリカの研究所から出てきた言葉でもあるし、その研究所のストラテジーでもあるわけですね。

合原——一番有名なのはそうですね。サンタフェ研究所です。それを最初に考えて精力的に動き回ったのが初代所長で物理学者であるジョージ・コーワンです。彼が考えたのは、世の中には非常に複雑なシステムがいっぱいあるのに、そういうものをこれまでの科学は正面から取り上げることがせずに、線形や解ける非線形にのみ注意を向けていたんじゃないかということなんです。脳にしても免疫系にしても、経済にしても、いままで取り残されてきたけれどもきわめて重要だと思われる大規模な非線形システムがあるので、さまざまな分野の研究者を一箇所に集めてお互いが刺激を受けるような状況をつくりたいというモチベーションで始めたみたいなんです。それがサンタフェ研究所の始まりです。

最近大阪体育大学の斎藤了文さんに聞いたことなんですが、情報理論の創始者の一人とも言えるウィーヴァーがすでに1948年の論文

「科学と複雑性 (Science and Complexity)」で、非常に面白いことを言っていて、それまでの物理学は、大ざっぱに言うと二つのことしかやっていない、ひとつはプロブレム・オヴ・シンプリシティ、要するに非常に変数の少ない単純系の問題です、もうひとつはプロブレム・オヴ・ディスオーガナイズド・コンプレキシティ、つまり組織化されていない複雑系の問題です、非常にたくさんの要素が素子レベルでは確率的な振る舞いをしているわけですが、要素の数が多くて複雑であるがゆえに、統計的な精度のいい記述が成り立つというもう一方の極です、そして、問題は、中間に重要な問題が取り残されていると言うんですね。

黒崎——それは的確ですね。

合原——それを彼はプロブレム・オヴ・オーガナイズド・コンプレキシティ、つまり組織化された複雑さの問題と言っている、それがまさにいま、複雑系の問題としてわれわれが解かなければいけなくなっているその問題でもあるわけです。

黒崎——しっかり見えていますね、つまり、科学でメスがきちっと入れられるものは、要素還元主義的な、つまり単純な要素に分解するという一方の極があり、もう一方では、あまりそれにはひっかからないような現象に関しては確率でいくんだという……。

合原——つまり統計的な平均ですね。

黒崎——そうですね、コンプレキシティは基本的にはディスオーガナイズドでわれわれの手の外にあるから、その内的構造を探るというよりはむしろ、統計的処理を施そうということですね、科学は単純に還元できるものに対しては厳密にいくけれども、そうでないものに関しては、ある種の確率でいくしかないんだという分裂があったわけです、しかし、まさにその中間をねらう、つまりコンプレキシティであってもディスオーガナイズドではなくて、オーガナイズドなコンプレキシティというのを狙おうという意味では、先駆的ですね。

合原——そうですね、そのときに重要なのは、先程の非線形なんです、それはなぜかという、線形システムというのは基本的に解けちゃうわけですね、特に線形システムの非常に著しい性質というのは、重ね合わせが成り立つということなんです、要するにいくつかの解が解けたら、それを重ね合わせたものも解になるという性質があって、これがけっこう深いところで要素還元論と結びついているんです、要素還元的なアプローチというのは、複雑なシステムがあったときに、それを要素に分解して、要素の性質を調べましようというものです、それを調べたら、要素というのは単純系に落としてしまうのでそれは判るだろう、そうすると、もし線形の考え方に従えば、そういうものを重ね合わせることによって全体を再構成できる、これが要素還元論の基本的なベースにあるわけですね。

黒崎——つまり、部分を足したものが全体であり、全体を分けたものが部分だということですね、そこに算数的な一対一の関係がある。

合原——ええ、ところが、最近よく言われる、全体は部分の和以上であるという、これが非線形系の性質ですね、これはアリストテレスも言っていたらしいんだけど。

★2—機械論とは、有機体を含めた自然界におけるすべての変化を要素間の機械的連関に基づく変化と見る考え方。決定論的世界観となりがちである。一方、目的論とは、事物の生成変化にはその事物に内在する目的が原因となって結果を規定するという考え方であり、機械論とは反対の思想である。また、有機体論は、各部分が互いに関係しあいつつ全体として統一され、合目的的な自己形成がなされている生物システムを、あらゆるものに適応しようとする考え方。

黒崎—全体は部分の総和以上であるというのは、哲学の伝統で言うと、機械論対目的論[★2]とか、あるいは機械論対有機体論というかたちで言われてきました。つまり、機械論は要素還元主義でみないくんど。一方、有機体論とか目的論の場合には、全体と部分の間に見えざる相互作用があつて、どちらからどっちを説明することができるといことではないんだという思想はずっとあるわけです。合原—要するに部分と全体との間で循環があるわけですね。

黒崎—循環と言ってもいい。ただ複雑系は、全体論という一方の極に振れているのではなくて、中間をねらっているような気がする。合原—こういう変なブームになると、要素還元論では駄目だということは確かなんだけど、逆に全体論に回帰しちゃう人がけっこういるんですね。それは非常に勉強不足なわけで、いまの複雑系の考え方はそうではないんです。要するに非線形ですから、要素に還元しても全体は判らないんですが、しかしやはり個々の要素はちゃんと知らないといけないんです。それはなぜかという、非線形システムを考えたときに、実は要素がどのような性質をもっているかで相互作用自身のありかたまでもが規定されるということが起きちゃうんです。

したがって、非線形な複雑系を考えるうえで、まず要素を解明しなければいけない。ところが、それだけでは全体が判らないわけですから、その先なんですよ。その際に、非線形システムをどう扱うかという方法論は、構成論的な解析(アナリシス・バイ・シンセシス)といって実は工学が提供したんです。つまり要素が判ったときに、要素を部品として非線形システムを理論的に構成しちゃうんです。構成したシステムの振る舞いを解析することによって非線形な複雑系を理解しようとする。これはだから全体論まで戻るのではなくて、要素を解明したうえで、構成論的なアプローチで非線形性を解明しようということなんですね。先程黒崎さんがおっしゃった中間の領域を狙っているというのは、まさにそういうことなんです。黒崎—哲学の歴史から見て、機械論対目的論という図式がすごく強かったので、機械論は駄目だというときに、伝統的には目的論が出てくる。でも目的論や全体論は科学にはならないんだという二項対立としてずっときたわけです。だから要素還元主義が終わりと言ったときに、じゃあ全体論や有機体論に行くというものではないんだというところはまず押さえておかないといけない。それはちょうど、ライブニッツが機械論であるけれども目的論も入れなきゃならないとか、カントも機械論でいくんだけどどうしても最後は目的論が必要だという、あの議論にただ逆戻りしちゃうだけなのね。複雑系がもしも深い意味をもっているとしたら、その両者のアウフヘーベンというか、対立を超えるような研究の方向だということだと思うんです。従来の機械論だったら、決定論に従っていたら予測は可能だろうと言うし、従来の目的論だったら、決定論には従っていないんだと言う。そのどちらかだったわけです。複雑系が示唆しているのは、決定論的法則に従っているのに、しかしあまりにも予想不可能な多様な現象が生じるという点。つまり、哲学的的に見て

もかなり面白い考え方が複雑系にはあり得るんだと思います。現状がそうになっているとはとても思えませんが、方向性としてはそうじゃないか。

合原——その立場から考えると、ある意味で機械論が生まれ変わろうとしているんですよ。哲学の人が機械論と言うときは、たぶん、要素還元論で部品を集めて組み合わせたというイメージなんだろうけれども、実際の機械の設計を見ていると、そんなに要素還元論的に単純にいくような話じゃないんですよ。

先程のカオスの関連で言うと、カオスを知ることによって、機械論的なアプローチをするときに、部品としてカオスを手に入れたわけですね。このことがきわめて大きかった。だからカオスを部品として、それを組み合わせて非線形のネットワークをつくることが可能になったわけです。それが先程言った低次元カオスから高次元カオスへの流れなんです。だからカオスを部品とした機械論をやっているというのがいまの一番重要な複雑系の研究です。

単純なものから

これほど複雑で多様なものが出るはずがないんだという西洋哲学がもっていたある種の思い込みがかなり根本的なところで問い直されたと思うんです

黒崎——部分と全体、あるいは複雑なものや単純なものというタームを使って複雑系を考えてみましょう。私がいつも複雑系という言葉が非常に深い方向をもっていると感じながら、同時にしかし絶対これは表面的なブームでつぶされてしまうという確信も深くもっている理由がここにあるのです。ある種の三段論法で、前提1は、カオス理論によれば、非常に単純で少数の何の変哲もない公式から信じられないほどの複雑なものが生み出されるということ。前提2は、世の中には非常に複雑でとても解明できないだろうと思われているものに満ちているということ。

この二つの前提から短絡的に結論を導き出すところに、複雑系の欠点があると思うんです。つまり、前提1で明らかになったように、非常に単純な公式から非常に複雑な現象が出てくる。そして前提2では、世の中は複雑な現象に満ちている。したがって結論としては、複雑な現象の背後には単純な法則が潜んでいるだろう。この三段論法で複雑系のブームというのは走ってしまうんですね。これまでは複雑すぎて解明できなかったものが、なんとかうまく理論を使うと、非常に単純な公式に落として、その公式や法則を見出せば、われわれは複雑な現象について解明もできるし、予測もできるんじゃないかというふうな、ある種先走りというか……。

合原——先走った結論は随分言われていますね、経済恐慌が予測できるとか。

黒崎——たとえばこれまでの経済学では説明できなかったけれども、カオス理論や複雑系を使えば株価の予想ができるようになるかもしれないとか、あるいはこれまでは複雑すぎて判らなかつたものが解明できるかもしれないという語り口が、一方でかなり強固なものとしてあると思うんです。それは私の感じでは、科学の近代的なパラダイムから一步も外に出ていない。つまり、複雑なものの背後に単純な法則があるかもしれないというのは、大昔からやってきたわけですよ、まさにものの探求というのは、複雑なものを単純なものに還元するという基本的な構造をもっていて、それはいまに始まったことでないどころか、ものを探求するというのはそもそもそういうことだったわけです。けれども、複雑系ブームで表面だけかじってしまつて、複雑な現象の背後にそれを見通すような素晴らしい視点ができつつあるんだというかたちで受け取られてしまうと、それはこれまでのパラダイムを変更しないままに、ただ次の理論に飛びついただけであるし、かつそれがうまくいかないことは目に見えている。

合原——サンタフェ研究所の周辺がそういう宣伝をしすぎたという側面もありますね。アメリカではそのことに関する反省も出てきているけれども、日本はその反省を知らなくて、変にブームになっているという点は確かにあるですよ。ところが複雑系をちゃんと研究している人たちは、その難しさもよく判っているんです。もちろん、ある意味で成功した研究もあります。実は世の中の複雑なものの中で、低次元のカオスを探すという研究をここ15年ぐらいいろんな実験家がやってきていて、そういうものが確かに世の中にあるということは判ってきたんですね。けれども、それはほとんどすべて低次元カオスの場合です。しかし、実は脳の問題のような非常にわれわれの興味をそそる複雑系というのは、そんな低次元のカオスではないわけですね。それを高次元カオスとして理解できる可能性があるんじゃないかと、一部のちゃんとやっている研究者は思つてやっているわけです。先程の構成論的なアプローチというのは、自分で設計するならまだいいわけですね。ところが、脳のように実在するシステムがどうやって動いているかというのは、こちらが設計するわけにはいきませんから、そういったものを高次元カオスの立場でどう記述するかというのはきわめて難しい問題なわけです。

黒崎——ほとんど夢物語……。

合原——でも、その可能性はあるわけです。だからちゃんとした研究をやる人はそういうかたちで地道な研究をいまやっているわけです。

黒崎——そうすると、いま言った少数の単純なものから信じられないほどの多様性が出るという前提1。そして世の中は非常に複雑なものに満ちているという前提2。そして複雑なものの背後にある種の法則が見出されるかもしれないという結論がある。いまお話を伺うと、そのすべてを実現したというよりはむしろ、前提1と結論との間の往復運動、つまり非常に単純なものからカオス的なものが見出されるということと、それからある種カオス的に見えるものの中に低次元

のカオスとして記述できるものが実際の現象の中に見つかったということですね。

だから、そういう三段論法が一個でも成立しているとするべきなのか、あるいは成功しているのは前提1と結論であって、必ずしも前提2を含んだものではないと言うべきなのか、そこは微妙ですね。

合原——一部が成功したと言うべきなのでしょうね。

黒崎——合原さんだったら、おそらくそう言うだろうな(笑)。それで、私は複雑系というものに興味があるというよりは、カオスの前提1のレベル、つまり非常に単純な法則から信じられないような多様性が生み出されるということに興味がある。これはどんなに驚いても驚き足りないことなんだと思う。これまで、数学の世界であれ思想の世界であれ、やっぱり単純なものからは単純なものしか出てこない、そして複雑なものは複雑な構造からしか出てこないだろうというのが前提になっていて、それ自体を問うことはなかった。

私の専門は一応カントですが、カントが、自然の多様性と自然の統一性、あるいは有機体の複雑性と単純な統覚の問題を考えているときに、単純なものから複雑なものは出ないというのが、文章に書く以前の前提になっているわけです。だから自然のこういう統一はこの単純性でいけるけれども、こんな複雑なものに関しては絶対これではいけないだと言って議論を進めているその根底に、単純なものからこれほど複雑で多様なものが出るはずがないんだという西洋哲学がもっていたある種の思い込みがかなり根本的なところで問い直されたと思うんです。

合原——それは完全に壊れましたよね。

黒崎——かなり壊れたと言っていいと思うんですね。その衝撃は、普通感じている以上にもすごく大きいものだと思う……。

合原——そうそう、ここで驚かないと黒崎さんに怒られるので驚くことにしよう(笑)。

黒崎——もしも複雑系といわれているブームが去っても、今後の世界観ということに関しては、やっぱり決定的な地点をつくったと思うんです。それは今回のようなブームが来て、また去り、次にまた何かきっかけがあってブームが来て、去りというかたちを何回か繰り返しているうちに、われわれの中での数学に対する感じとか思想に対する感じが少しずつ変化していくような、そのぐらいの大きな出来事、一度、複雑系のブームが来たからといって、がらっと変わるわけではない。そして表面的なところはまた押し流され、ブームによって変形されながらも、しかし基本的なところは本当に深いものをもっているんだと私は思っているんです。だからこそ複雑系、複雑系って騒がれるのが非常に愉快でない。

合原——むしろちゃんとやっている人にとっては、非常に気の毒ですよ。これはカタストロフ理論[★3]のときと似ているんですよ。

黒崎——ルネ・トムとか。

合原——そうそう、20年以上前だと思うんですが、破局の理論とか言われて、突然の不連続な変化が世の中にはいっぱいあって、それが全部説明できるんだと喧伝されたんですよ。それと非常に似てい

★3——フランスの数学者ルネ・トムによる理論。彼は、位相幾何学の研究から、非線形現象の非連続性を多様体の特異点としてとらえることを提唱した。状況が急転換する仕方を意味することからカタストロフと名づけられた。

る。ひとつ、これは正しいことですが、何でも説明する理論というのは何も説明していないのと一緒にすよね(笑)。

黒崎——そうですね。

合原——そういう捉え方を複雑系に関してもしている人が多いので、だからたぶんあんな感じになっていくのかなと思うんです。そのときに、カタストロフ理論が、ブームはもう終わったけれども、あれが何を残したかというのを考えてみると、あれは数学で言うと分岐理論と関連します。そのあと分岐理論の多様な研究が非常にきちんとした数学の枠組みの中で進んできました。おそらく、複雑系のブームが終わったあとにも、そういったかたちで力学系の理論の中で、たぶんカオスがその役割を果たして、きちんとした理論的な枠組みとして残っていくんだと思うんです。つまり、これはニュートン以来の伝統ですが、世の中のモデルをつくるときに数学の言葉を使う、特に微分方程式でモデルをつくらうという立場で自然科学や科学技術がずっと進歩してきているんです。

そういう非常に長い時間スケールで見たときに、カタストロフとか複雑系とかいうある意味で軽率なブームも来るんだけど、それが終わったあとに、そのことによってちゃんと進歩していく基盤があるわけです。そういう意味では、最初に言った高次元カオスが、複雑系のブームの去った後にきちんと残る核になるんだと思います。黒崎——私も明らかに残るだろうなと思われるのは、複雑な現象の背後に単純なものを見出すこと、これは何回も私は言っているんだけど蓋然性でしかない。この背後にはこれで動いているんじゃないかなというのは、「かもしれない」のレベルでどうしても止まってしまうんですよね。ところが、単純なものから複雑なものへの説明というのは確実な語り方ができるわけです。つまり予想ではなくて、非常にしっかりした構造をもっている。だから単純なものから複雑なものを説明するカオスは、本当にすごい研究だし、これは大丈夫だと思うんだけど、複雑なもの背後にある種の構造や法則を見出して、あわよくばこの世界を解明してみせる統一理論なんていうのは、おそらく消え去るだろう。

合原——その見方は正しいと思いますね。

ロジスティック写像の衝撃たるや、  
新たなすごい本に  
出会ったというの  
何十倍のものを  
体で受け止めてしまうと思うんです

黒崎——低次元カオスの発見で言えば、1960-70年代にそれぞれの研究者が勝手に草の根的に発見していて、何かめまい状の驚きをそ

れぞれ感じる。それは現在のわれわれでも同じことで、コンピュータが安くなったために、自分で方程式を入れて……。

合原——黒崎さんは随分発見したんですね、20年遅かっただけで……(笑)。

黒崎——もうちょっと早くやっていたらよかったなと思ったんだけど(笑)。それでも10万回に1回だけ変動が起こるカオスが自分のコンピュータの中で出現したときには、やっぱりめまい以上の興奮を覚えてしまって、これがカオス研究の一番のバイタリティになっていると思うんです。思想のブームでは、よく表面的な言葉の遊びで興奮するというのがあって、たとえば「実存」とか「現存在」とか、言葉にある種共同幻想的に酔ってしまったけれども、それが終わってしまうと「よく言ってたね、あのこと実存がとかって」というゲームの繰り返しがあるんですね。しかし、もしもカオス研究が

### ■ロジスティック写像

$X_{n+1} = aX_n(1 - X_n)$  という簡単な二次方程式を考えてみる(ただし、 $0 < X_n < 1$ )。定数  $a$  と  $X_0$  (初期値) が決まれば、 $X_n$  が決まり、これを繰り返すとあらゆる  $X_n$  が決定することになる。

#### ① $a=2$ のとき

初期値  $X_0$  がどんな値をとろうとも、最終的には  $0.5$  となる。

#### ② $a=0.8$ のとき

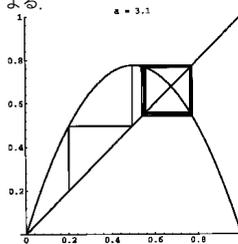
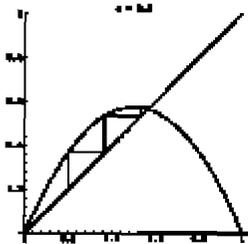
初期値  $X_0$  がどんな値をとろうとも、最終的には  $0$  に収束する。

#### ③ $a=2.3$ のとき

初期値  $X_0$  がどんな値をとろうとも、最終的には  $0.565217$  となる。

#### ④ $a=3.1$ のとき

最終的には  $0.764567$  と  $0.558014$  の2点を交互に繰り返す。  $X_n$  の値がどちらになるかは初期値による。

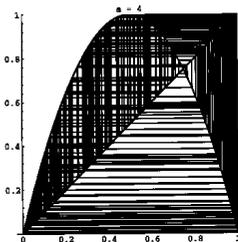
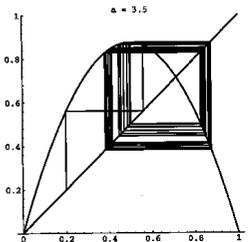


#### ⑤ $a=3.5$ のとき

最終的には  $0.500884$  と  $0.874997$  と  $0.38282$  と  $0.826941$  の4点を繰り返す。

#### ⑥ $a=4.0$ のとき

周期性をもたず、まったくランダムとなる。



図＝黒崎政男『カオス系の暗礁めぐる哲学の魚』(NTT出版、1997)より

★4—カオスの典型例として有名な写像のひとつ。無限大に発散したり、0などの一定値に収束したり、いくつかの値を周期的に振動したりする一般の漸化式とは異なり、解が実数値をとりながら永久に不規則な変動を続ける。

文科系に入るとすれば、各人が自分でカオスを体験し、それが文科系の中である種の数を占めるようになれば、単に言葉の遊びのブームというよりは、非常に実感を伴った世界観の変更になると思うんです。

合原—少なくともロジスティック写像[★4]は文科系の人も理解できるから、あれは知ってほしいですね。

黒崎—とにかくロジスティック写像だけでいいから(笑)。特に思想をずっとやっている人たちだったら、その衝撃たるや、新たなすごい本に出会ったというのの何十倍のものを体で受け止めてしまうと思うんです。たとえば非常な思想の天才が100年前にそれを言ったというインパクトも強いけれども、それよりも、自分がそれを実際目の前で体験してみるというインパクトの強さはすごいものです。カオス理論というのは非常に複雑に見えて、非常に単純な数式のお遊びで体験できるわけで、これは願ってもないチャンスですね。

合原—複雑系に関しては、啓蒙書がすごく売れたわけですね。ミッチェル・ワールドロップの『複雑系』(新潮社)です。その前にロジャー・リューインの『複雑性の科学—コンプレキシティへの招待』(徳間書店)が訳されました。欧米ではあの2つがベストセラーになったんです。これはアメリカのジャーナリストの良さなだけけれども、ちゃんと自分でインタビューして自分の言葉できちんと理解して書く。だから数年の仕事として書くわけです。日本でブームのときに出る本はみんな数カ月とか非常に短い期間で出してしまう。だからちゃんと自分の言葉になりきってないという例が多いんですね。

そういう意味では、非常に優れたジャーナリストがアメリカにはいるんだということなだけけれども、ところが、そういう本を日本の普通のビジネスマンは翻訳で読んで複雑系を捉えるわけですよ。そうするとその研究者のレベルがあつて、それをアメリカのジャーナリストが自分の言葉にして、それをさらに日本で訳して、ツー・クッション入っているわけね。僕は複雑系が何かをちゃんと知るためには、やっぱりなるべく原点に戻ったところを読むべきだと思うんです。しかし、多くの人はツー・クッションで読んでいますね。それが欧米から遅れるひとつの原因にもなっているし、本質を捉えられないということだと思うんです。どの研究者が何をやったんだというのを原著できちんと読めば、あまり惑わされる心配はないんですけどね。

黒崎—現代は忙しいので、どうしてもツー・クッション、スリー・クッションの解説書で済ませてしまう。

合原—『日経サイエンス』などは、研究者本人が書いた論文を訳しているからワン・クッションなんです。せめてそれを読むべきだと僕は思います。なるべく源流に近いところで学べば、誤解する可能性は減ってくる。

単純なものから  
複雑な多様性が出るということと同時に、  
カオスの根源は  
世界の質料ではなくて、  
まさにイデア的な数そのものの中に  
あったんだという発見ですね

黒崎——ところで、複雑系研究を構成するのは、カオス研究の他にも、プリゴジンの散逸構造論とか自己組織化の理論とかいろいろありますよね。複雑系といっても、合原さんはもちろんカオスの専門家ですし、私もどちらかというとカオスから関心をもっているわけだけども、流れとしては、カオス一本でもないわけですね。

合原——はい。先程の高次元カオスとか構成論的なアプローチをするときには、やっぱり自己組織化の概念が要るわけですよ。どういう相互作用があるときにどういうオーダーが出てくるかといった議論が必要になるから。そういう意味では、カオスとともに自己組織化が非常に重要な概念ですね。

黒崎——自己組織化も、70年代のバレエやマトゥラーナなどの研究はちょっとどうかなのにおいもありましたが、カオスの非常に確実な成果が自己組織化とうまく結びつけばそれなりにいいかなと思ったり、微妙なところですけどね。

つまり、いままでの科学や思想は何でもだけれども、自明なものからあつと驚くものは出てこなかったわけです。西洋哲学の基本的発想でもあるけれども、自明なものからはやっぱりある程度自明なものしか出てこなくて、あつと驚くような現象やあつと驚くような変化というのは無理だろうと思われてきた。それは文学的な表現に任せてみたり、あるいは神の摂理に委ねてしまったりしてきたわけです。これは別に日本人のメンタリティということよりも、もうちょっと基本的な人間の世界観の問題のような気もするんですけど、それを決定論的カオスというのは軽々と乗り越えているんですね。

合原——つまり、実数を自明だと勘違いしていたんですね。あたかも実数を扱っているように勘違いしていたんですけど、実はそれは扱っていなかったんだということにカオスが気づかせてくれたということなんです。それはなぜかという、カオスというのは非常に複雑な振る舞いをするんですけど、そのタネは、実は実数の複雑さそのものだからです。それを拡大して読み出しているというのがカオスのからくりなんです。

黒崎——これは非常に面白く、また重要な論点ですね。カオスの根源とは何かと言ったときに、とかく自然がもっている多様性とか、ものももっている底知れない無限性みたいにイメージしてしまう。これまでもカオスという言葉は、秩序対カオスというかたちで使わ

黒  
崎  
政  
男

特集  
情報  
社会  
の  
未  
来  
形  
対  
話  
篇



★5——カオス・システムの大半が、初期値に対する鋭敏な依存性（初期値のわずかなずれが時間とともに指数関数的に拡大する性質）を有しているが、これを称して「バタフライ効果」と呼ぶ。蝶の羽ばたきによって生じたわずかな風が時間とともに拡大して地球規模の気象に影響を与えてしまうという、たとえ話から来ている。

れてきて、秩序が理論や知性に相当すると、カオスはそれから逃れてしまうというかたちで、ものの側の質料性に位置づけられてきたわけです。

僕が思うのは、カオスの面白さはまさに数そのものにあるんだということなんです。単純なものから複雑な多様性が出るということと同時に、カオスの根源は世界の質料ではなくて、まさにイデア的な数そのものの中にあっただという発見ですね。この転換はちょっと衝撃が大きすぎて、10年や100年ではちょっと判らないぐらいの大きなものだと思います。合原さんがカオスの根源は実数の複雑さだとおっしゃったけれども、それを実感するためには、シフト写像を考えればいいんです。シフト写像というのは何かというと、非常に単純に言ってしまうと、「0.\*\*\*\*\*」とずっと文字列が続いているとすると、それが一回転するたびに小数点第1位が落ちて、第2位以下が繰り上がり、もう一回やると第1位になったのが落ちて第2位が繰り上がるというふうに、永遠に繰り上がってくる写像なんです。そうすると、それは何を意味しているかということ、最初のうちでは小数点以下500桁ぐらいいあって何の意味もない数字が、500回の変換を繰り返すと、それは小数点第1位の一番重要なところに出てきてしまう。これは何を意味しているかということ、初期値に対する鋭敏な依存性、バタフライ効果★5の根源がまさにヴィジュアルイズされたかたちでもあるんですね。どんなに小数点以下遠くだろうと、何回かの繰り返しの後には必ず一番上にきてしまう。だからどんな数であれ絶対省略できないんです。それこそがバタフライ効果の根源なわけです。

それは同時に何を意味しているかということ、実数の無限性こそがまさにカオスの複雑性や多様性を形づくっているんだということです。だからカオスの根源は何かと問いたくなると、それは実数の神秘である。それは非常に意外なだけけれども、つまりカオスの本質はものの側の混沌なんだと思っていたわけだけれども、それはおそらく違う。今世紀に人類が発見したカオスの発見は、まさに数学というまさにオーダーの世界そのもので、イデアの世界そのもののまさにど真ん中にこそカオス現象というのは存在していたんだという発見なんですよね。

いまわれわれが議論しているカオスというのは、人間の知性などの単純なものに対する混沌としたつかみようのない自然という対立ではないんですよ。それは従来のオーダー対カオスです。決定論的カオスで発見されたカオスは、まさにオーダーそのものの中に潜んでいるものであって、そここのところの理解がないと、「カオスというのはオーダーじゃないから、カオス理論なんてつくっちゃったら、それはカオスじゃなくなるんじゃないか」なんて、つまらない反論が出てしまう。それは、オーダーとカオスの二元論がまだ根強いからなんです。その二元論自体を決定論的カオスは打ち破ってしまった。だからやっぱりカオス研究には驚いてしかるべきことが山ほどあるんですよ。

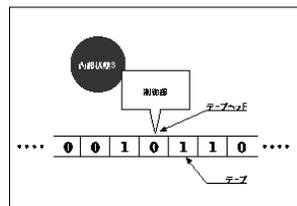
デジタル・コンピュータの限界を  
本質的な意味で  
クリアに示したのが  
カオスなんです

合原——そこでもうひとつ強調しておきたいことがあるんです。デジタル・コンピュータで何でもできるんだと思われているけれども、明らかに限界をもっているわけで、その限界を本質的な意味でクリアに示したのがカオスなんです。それはなぜかという、カオスをちゃんと計算しようと思うと、実数が計算できないといけない、ところがデジタル・コンピュータにしろ、その原理であるチューリング・マシン[★6]にしろ、ほとんどすべての実数を計算できないんです。計算できないということをわれわれは示すことができるわけですね、そうすると、まさにデジタル・コンピュータの限界がそこに見えているわけで、つまり数学的な実体であるカオスを実はデジタル・コンピュータは計算できないんです。そういう意味で、デジタルで何でもできちゃうというのは、非常におかしな間違っただ発想なんです。

黒崎——つまり、一方ではコンピュータが普及したからこそ、もちろんカオスの現象や複雑系の研究は飛躍的に進んだわけです。でも同時に、カオスは、デジタル・コンピュータには根本的な限界があるということも指し示しているわけです。つまり、何ビットかのコンピュータは数を表現するときに必ず何ビットというかたちでしか表現できないとすると、それは無限に続く実数を必ずどこかで四捨五入するか、まるめて表現するしかできないんです。だけども言ったように、カオスの根本は無限に続く実数の複雑性なんだから、それを正面から扱えなければ本当のカオスは扱えない。しかし、実際はそれをシミュレートしたかたちでしか扱っていないわけです。だから、コンピュータの結果こそがカオスの実態だと思うのは大間違いで、あれはカオスの影でしかない。

合原——そういう話をすると、たとえば $\pi$ や $\sqrt{2}$ なんかは計算できるじゃないかというふうに思いますよね。それらは確かに無理数だけれども、アルゴリズムがある。ところがこれは非常に例外的なんですよ。無理数の中でも例外的にアルゴリズムがあるのが $\pi$ とか $\sqrt{2}$ とかであって、実はほとんどすべての実数を計算するアルゴリズムはないんです。これは非常に単純な話で、要するにすべてのアルゴリズムの集合を考えると、それは可算集合になります。ところが実数というのは非可算無限個あるわけですから、当然可算個のアルゴリズムで非可算無限個の実数をカバーすることはできないんです。原理的にできない、そこは非常に重要なポイントだと思います。

★6——アラン・チューリングにより提唱された原理。記号が書き込まれたテープ、テープの記号を読み取るテープヘッド、内部状態をもつ制御部の3つの要素から構成される。計算の実行は、テープヘッドから読み取ったテープ記号とそのときの内部状態に依存して、1) マシンの内部状態を変える、2) テープ記号を書き換える、3) テープヘッドを左右に1つずらす、の3種類の動作を繰り返す。最終的に計算の終了を示す内部状態に達すれば、計算を終えて動作を停止する。



黒崎—そこで、いまデジタル・コンピュータがコンピュータのメインになっていますけれども、歴史的に言えば、決してデジタル・コンピュータがコンピュータの元祖でもないし、20世紀の中ごろでは、むしろデジタル・コンピュータとアナログ・コンピュータは同じくらいの可能性として存在していたんですね。

合原—コンピュータの歴史をちょっと遡って50年前まで戻ると、実は世の中にはアナログ・コンピュータがあって、アナログ・コンピュータとデジタル・コンピュータというのはほとんど対等だったんです。これは科学技術の世界でよく起きるんですけども、なんらかの理由でちょっと一方がリードすると、ポジティブ・フィードバックがかかって、もう一方に非常にいい持ち味があっても、あつという間に世の中から消えてしまうんです。VHSとベータもそうでしたね。まさにコンピュータの歴史でそれが起きて、アナログが消えちゃったんです。でも50年後はどうなっているかわかりませんよ。デジタル・コンピュータの進歩は、基本的に二つのことに支えられています。ひとつはチューリング・マシンという確固たる原理があるということ。もうひとつはハードウェアがすごい勢いで進歩したことです。集積度が上がるし、高速になって、安くなった。ところがハードウェアの進歩にいま罫りが見えてきているんです。つまり、いままでの流れではデジタル・コンピュータの進歩は支えられなくなってきているんです。限界が見えてきたからこそ、そのあとどうするかを、やっとなんか考えはじめたんです。そのときに僕が重要だと思うのは、人間の脳なんです。脳は明らかにチューリング・マシンとは違う原理に従って動いていると思うんだけど、にもかかわらずチューリング・マシンよりもいろいろな面で能力が高いですよ。パターン認識にしても、もっと高次のレヴェルだと創造性とか意識の問題とか、デジタル・コンピュータでは全然できないことができるわけです。そういう意味で脳に関する興味が、特に10年ぐらい前からリバイバルしてきています。日本では「脳の世紀」という大きな研究構想があって、21世紀こそまさに脳を研究する世紀だという流れがでてきている。

その立場で脳を見ると、確かにいまのデジタル・コンピュータとは全然異質な原理があちこちに見えるわけです。そして、そのひとつのポイントはやはりカオスなんですよ。実際の神経そのものが、実はカオス的なアナログ・デバイスになっていて、脳はそういうカオス的なアナログ・デバイスでできた情報処理系なんです。だからそういう意味で、もう一度アナログを調べ直そうというのがわれわれのひとつの発想です。もうひとつのポイントは非同期性です。いまのコンピュータはクロックがあって、それで同期させて全体が動いていますよね。ところが、どんどん高速化していこうとすると、遅延が問題になってくるんです。同期をとろうとすると、遅延があることによって同期がとれなくなってくる。それで限界がひとつ見えてきた。もうひとつは消費電力の問題なんですが、クロックで全体を動かしていると、クロック動作のための信号遷移による電力消費の問題があって、集積度が抑えられてきているんです。

そうすると、僕は脳から学ぶべきことは少なくとも二点あると思っていて、ひとつはカオス的なアナログ・デヴァイスを使うということと、もうひとつは非同期性ですね。脳はクロックなしで動いているにもかかわらず、情報処理ができていて、そこでいまわれわれが具体的な計算マシンとして研究しているのは、カオス・デヴァイスと非同期性を使って、どうやってチューリング・マシンとは違う、脳みたいなものをつくるかということなんです。

黒崎——なるほど。そうするとカオス研究というのは、デジタル・コンピュータの登場とその進歩とともに成立した学問だけれども、まさに同時にデジタル・コンピュータの限界もきわめてクリアにされていて、今後の50年がどうかたちにメディアをもっていかかということに関して、きわめて示唆的な視点をわれわれに与えているということですね。つまり、デジタルのかたちでのコンピュータがある種世界を覆ってしまっていて、万能だと思われている。確かにそれはカオス研究を飛躍的に向上させましたが、同時にその研究は、デジタル・コンピュータの限界もきわめてクリアに出した。合原さんがおっしゃるように、デジタル・コンピュータというのはたまたま50年でしかないとする、もしかしたら50年先のコンピュータ・シーンというのはまったく別ものになっている可能性がある。

合原——カオスは、デジタル・コンピュータとはまったく別な情報処理系があり得るんだということを示してくれたんだと思うんですよ。もちろんデジタル・コンピュータがなくなるわけではないんですけど、まったく別な計算原理のコンピュータが世の中に共存した方がいいんじゃないか、というのがわれわれの考えです。

黒崎——それは一般的なメディア論の視点から絶対出せない視点で、やっぱりぎりぎりまで突き詰めていったところで明らかになってくるコンピュータの限界と今後の可能性ですよ。

合原——10-20年ぐらいのスケールだと、いまのデジタルの流れでどんどんやってもらって構わないんですけど、僕らはもっと先を見ているから……。

黒崎——やっぱり50年、500年の世界ですからね。

合原——100年後を見てやる方が研究というのはいいですよ。そのとき、自分たちはいないからね(笑)。

黒崎——それはそうですね。きょうは大変素晴らしいお話をありがとうございました。\*

[1997年4月7日、東京にて]

あいほら かずゆき:1954年北九州生まれ、カオス工学、ニューラルコンピューティングに従事、東京大学工学部計数工学科助教授。著書=『カオス—カオス理論の基礎と応用』(サイエンス社)など。

くろさき まさお:1954年生まれ、哲学者、東京女子大学文理学部哲学科助教授。著書=『カオス系の暗礁めぐる哲学の魚』(NIT出版)、『哲学者クロサキのMS-DOSは思考の道具だ』(アスキー出版局)など。