

パラダイムシフトとしての

カオスの紹介

河村 明

ハレー彗星の地球接近、日食、月食を正確に予測する現代科学が、どうして天気や木の葉の落ちる道筋、人口の増減など日常的なことをなぜ正確に予測できないのか。実は、不規則で予測不可能に見える現象の背後に、ある法則性が潜んでいることが最近分かってきている。それは、(矛盾しているようにも聞こえるが) 予測不可能なものを予測するために全く新しい考え方『カオス』である。カオスの発見は、我々に大いなる考え方の転換すなわちパラダイムシフト (Paradigmshift: 日本語では範例交替と訳されている) をもたらしめている。ちなみに広辞苑によると、パラダイムとは「一時代の支配的な物の見方、特に、科学上の問題を取扱う前提となるべき、時代に共通の体系的な想定」と記されている。

ここでは、相対論、量子論に続く今世紀最大の発見といわれるカオスを、私の勝手な解釈により、その面白そうな一部分を簡単に紹

介したいと思います。これにより、皆さんも森羅万象の法則の一面について、『そうだったのか』と唸って頂けたらと思います。

そもそもカオスとは

カオスというのは本来ギリシャ語であり、発音もギリシャ式にカオスと発音するらしい。英語では Chaos (ケイオス) である。カオスには、混沌あるいは渾沌という漢字が当てられるが、カオスがブームとなる以前からカオスには基本的な二つの意味があった。その一つは神が天地を創造する以前の状態。その二は完全に秩序のない大混乱である。なお、渾沌と言えば、昔漢文で習った荘子の寓話を思い出す人もいるであろう。すなわち、目、鼻、口、耳などのないのっぺらぼうの渾沌に、お礼として七つの穴をあけてあげたら、渾沌は死んでしまったというものである。

さて、ここで紹介しようとしているカオスは第三番目の新しい意味でのカオスであり、決定論的システムから生みだされるにもかかわらず、不規則で乱雑な挙動を示す場合をカオス(あるいは決定論的カオス)と呼んでいるようである。但し、カオスは、エネルギーなどと同様に、一つの大き概念であり、

カオスの種類によってその性質や定義が変化する、数学、物理学、天文学、生物学、医学、工学等の各分野によりそのニュアンスは異なる。カオスの厳密な定義を余り気にすると「木を見て森を見ず」ということになりかねない。

科学の発見のきっかけは、理論タイプと実験タイプの二つに大別できる。理論タイプは、理論が先行し、後に別の人がそれを実験などで再現してその理論が認知されるもので、湯川博士の「中間子理論」、アインシュタイン博士の「相対性理論」等が挙げられよう。一方、実験タイプは「オームの法則」等が挙げられる。そして、カオスは実験タイプの発見であり、なぜカオスが生じるかという理論については、まだほとんど説明されていない。これは、万有引力もそれが生じることは十分に理解されているが、なぜ生じるかということになるとまだ分かっていない事に似ている。カオスという言葉は一九七五年に発表されたりとヨークの論文「周期3はカオスを意味する」で初めて用いられたものであり、カオスという語が世に出て来たのはここ二十年程度のことである。しかも、各分野でカオスを認めた研究者は、(新しい画期的学問体系

はいつも決まっている（そうであるが）当初正統的な学問の枠にはまるものとして認められず、酷評され論文の掲載も断られて、「それでも科学と言えるのか」などと、かなり辛苦を舐めさせられ肩身の狭い思いをしたようである。今のようにカオスが脚光を浴びてきたのはここ数年のことではなからうか。

カオスは、ランダムのように見えるが、ある決定論的システムにより規定されている。即ち、カオスとは妻にコントロールされている旦那のようなものである。自分は外で好き勝手放題に振る舞い（中洲なんかにも没出し）その行動はランダムのように見えるが、あくまでもそれは妻の手綱の範囲の内というようなものである。（あるいは御釈迦様の手のうちの孫悟空の行動もカオスの典型といえよう。）こう考えてくると人間生活（ひいては森羅万象そのものが）ほとんどカオスではなからうかとも思えてくる。

ラプラスの悪魔

摩擦などによるエネルギーが散逸しない体系（純粋に力学的な体系と呼ばれる）で、外からのエネルギーの注入もない理想的な力学体系の見事な例として、ニュートン力学の世

界がある。地上界では摩擦や抵抗などによるエネルギーの散逸を伴うので、純粋に力学的な体系とは、現実には存在しない理想的な世界がある。これに比べると天上界の天体の運動は理想的な世界（純粋に力学的な世界）と考えても良いかも知れない（実際には宇宙空間にも宇宙の散りなど、色々の物質や光の放射が飛び交っている）、それらの影響のため、天上界といえども程度の差こそあれ地上界と同じである）。

さて、ニュートン力学の重要な点は、これが決定論の模範であることである。即ち、「物体の質量にその加速度をかけたものは、物体にはたらく力に等しい」というニュートンの運動の法則は、微分方程式という形に表され、初期状態が決まれば未来永劫にその物体の運動は予測できてしまうというものである。この決定論では、出発点である初期状態以外の途中で「偶然性（運不運）」の入る余地は全くない（初期条件以外に途中で偶然性の影響を受ける運動は確率過程（非決定論）と呼ばれている）。この決定論で最も説得力があったのは、太陽の周りを地球などの惑星が回る運動を説明できたことである。太陽をめぐる惑星の運動の法則（ケプラーの法則）は観

測結果に基づいた経験則であったが、ニュートンは力学の法則と万有引力の法則とからケプラーの法則を誘導してみせたのである（これは、ニュートン力学の有効性を示すのに最高の説得力を持っていた）。

さらに、ニュートン力学を引き継いで、これを科学のパラダイムにしたのはフランスのラプラスであった。ラプラスの悪魔とは、「ある瞬間における宇宙すべての物体の運動状態（初期状態）を正確に知りえて、ニュートンの運動微分方程式をたちどころに計算することができ存在」のことであるが、この悪魔にとって、宇宙の巨大な運動も微小な原子の運動も全てを知ることができ、彼の眼中には不確実なものは一切存在せず、未来は過去と同様に明白である。この決定論的パラダイムでは、自由意志などありえないことになり、全てが運命論的に決定されていることになる（そんな馬鹿な、科学はどこか間違っているといいたくなるのが人情であろう）。

二十世紀初頭のアインシュタインの相対性理論により、ニュートンのいう絶対空間、絶対時間というものは存在せず、高速度での運動ではニュートンの力学の運動方程式が成り立たないことが示された。また、重力により

時空間が歪むことも示された。この相対性理論は、ニュートン力学を書き変えたが、初期条件を与えれば将来が決まるという決定論はむしろ強化されている。さらに、微視的世界の力学として登場した量子論は、ニュートン力学や相対性理論が、電子などの微視的な運動には通用しないことを示した。量子論による大変革は、電子などの微視的粒子の位置と速度を同時に正確に知ることは出来ないというハイゼンベルグの不確定性原理である。即ち、量子論では、ニュートン力学的な初期条件を確定することは不可能なことになる。しかし、量子論でも初期条件は確定できなくとも規定できるとしている。それは量子論における粒子系の状態は波動関数と呼ばれるものによって定められるが、この波動関数の初期条件は規定できるとしているからである。よって、量子論も波動関数が従う運動方程式と初期条件で規定されている。そして、カオスの発見がもたらした革命は、次の「バタフライ効果」のところで述べるが、ラプラスの悪魔のような決定論的な予測は不可能であることを示したことである。

バタフライ効果

アインシュタインの相対性理論やハイゼンベルグの不確定性原理を知っている今日の人間にとつては、ニュートン・ラプラス的考えは楽観的で滑稽にさえ見える。ところが、(自分の研究をみてもそうであるが)現代科学の大部分がこのニュートン・ラプラスの夢をひたすら追ってきているようである。表だててそうは言わないまでも、暗黙のうちにそれぞれの分野において科学的な法則に従う最も単純なところまで現象を分解分析していくような、一種のニュートン流決定論を念頭においている。

考えてみると、相対性理論は超高速で物体が動いているときや重力が異常に大きいときだけに顕著なことだし、量子論のような目に見えない世界のことなんかはその道の学者以外には影響がなく、普通の身の回りの科学ならニュートン力学で必要かつ十分であると考えているのではなからうか(事実今まではそれで不都合もなく十分であったと思うが)。このため、現在でも天文学者がたとえば「ハレー彗星がこの次地球の近くに戻ってくるのは七六年後だ」と言えば、ただの予測ではな

く、確固たる事実のように聞こえる。また、実際の宇宙船やミサイルについても決定論的な数学上の予測が、(相対論・量子論に関係なく)その正確なコースをちゃんと正確に算出している以上、これが、通常スケールの地球上の現象を網羅していると考えるのは不思議なことではない。そしてこの法則が身の回りの天気についても利用できない筈はないと考えてもごく普通のことであろう。なぜなら、空気と水の運動を表す方程式も、惑星の運動を表す方程式と同じくらい良く知られた式である。

コンピュータの生みの親であるノイマンは、そもそも天候を模擬するのは、コンピュータにもって来いの仕事だという事実に気づいたらしく、彼が世界で最初のコンピュータを組み立てたときの目的の一つは、ずばり天候を制御することであった。即ち、観測データを入力し、コンピュータを酷使し気象の流体運動の方程式を計算させ(現在の気象の数値予測がまさにこれである)、その結果が出次第、気象学者が天候を望み通りにこの形にするような雲の種をまく等して、天候を制御するというものである。しかしアンラッキーなことに、ノイマンは潜んでいるカオスの存在を知

らなかったのである。

ニュートン流決定論を追っている研究者には一つの仮定があった。つまり、「ある系の初期条件がほぼ正確に分かっており、それを支配する自然の法則さえ分かれば、その系の近似的な振る舞いを計算することが出来る」という主張で、これこそ科学思想の中心となる大前提であった。これは、ものの動きには収束現象があつて微小な影響は無視しても構わないというものである。例えば、一九一〇年のハレー彗星の位置決定に、少々の誤差があつたところで、それは一九八六年の彗星の再来の予測に僅かな誤差を生じるだけである。また、宇宙船の軌道なんかもそうである。

一九六一年気象学者のローレンツは、いくらかの試行錯誤の後、天候に関する十二の法則を選んで、十二変数の微分方程式からなる天候モデルをつくり、それを（今から見ると骨董品の真空管の）コンピュータで解かせて模擬天候作りを行なっていた。こうした模擬天候作りの背後には、運動の法則が、数学的確定さで現在と未来をつなぐかけ橋となってくれるはずだという暗黙の信念がある。ある日のこと、一区切りのデータをもっと念入り

に調べたいと思つたローレンツは、時間を節約するため、始めの部分を端折つて途中から処理を始めることにした。まず最初の条件をコンピュータに入力するため、前のプリントアウトの結果をそのまま入力した。別にプログラムを変えたわけではないのだから、その結果も前のと全く同じになるはずだった。しかし、一時間後に部屋に戻つて彼の見たものは、天候が前のものと似ても似つかぬものとなつていたということである。普通の人ならここで、この原因をお粗末なコンピュータのぶれのせいだとしてかたづけるところであるが（研究室でもパソコンを使つてるとき、思い通りにならないのはお粗末なバグのあるソフトのせいにするが）、彼はそれが、初期値としてのデータインプットの時、小数点第3位までしか正確に入力しなかつたこと（実際問題として千分の一程度の誤差で観測できれば非常に高精度である）に原因があるという本質を見抜いた。

それまでは、数字上の僅かな誤差などというものはほんのそよ風のようなもので、いつの間にかひとりで消えてしまふにちがいないと思われていた。ところが、ローレンツの方程式系では僅かな誤差が「大異変」を招く

ことになつたのである。その運命の日、ローレンツは長期天気予報もおしまいだと観念したのだ。しかし、この偶然の発見のおかげで彼は何年か後には、歴史上に偉大な名を残すことになる。即ち、それ以降世に出た何千ものカオスに関する論文や記事のなかで、彼の「決定論的非周期的な流れ」ほど、たびたび引用されている論文は例を見ないのである。普通の人にしてみれば、何ヶ月先の潮の干満を割合正確に予測できるからには、大気に関する予測も出来ない筈はないと思うわけである。法則の複雑さも同じぐらいだし、違ふのは流体の種類だけじゃないかと言うわけだが、ローレンツは周期的に振る舞わない物理系というものは、どんな系であっても決して予測は出来ないものであると悟つたのである（これがこの世の中の本質らしく人の将来がどうなるかは、たとえラプラス悪魔がいたとしても分からないらしい。）

このローレンツが発見した、入力にほんの僅かの違いがあつても、出力に莫大な違いが生じるといった現象には「初期値に対する鋭敏な依存性」という名前が付けられた。この依存性はカオス現象の特徴の冴えたるものであるが、気象関係ではこれに、「バタフライ

効果」という名前を付けている。これは冗談めかして、北京で蝶が一匹羽を動かして空気を乱したとすると、一ヶ月後にはその影響が積もり積もってニューヨークで嵐が生じるといったような考えからきている。そして、今日のカオス革命の特に際だった発端となったのがこの「バタフライ効果」である。

ロンドン郊外にあり世界一を誇る（よく当たる）ヨーロッパ中距離天気予報センターの最新式世界天候モデルでは、世界各地からの気象データ（もちろん人工衛星などからのデータも含む）をどんどん取り込み、ローレンツなら十二も方程式ができれば満足なところを何万もの方程式を含む系の計算を、クレイのスーパーコンピュータを駆使して、鮮やかに解くのである。しかし、この天気予報でも、二、三日先のこととなるともう思惑の域を出ず、一週間先の予報などは全く役に立たないのである。その理由というのがこの「バタフライ効果」である。小地域的についての予測はあつと言つ間に崩れ去っていくものなのである。即ち、出発点の値の入力として、例えば全地球上を一メートル間隔、高さ一メートル間隔で大気圏の上端までセンサを設置して、そのデータを使って超スーパーコンピュー

タを駆使し、気象学者の考えうる完璧な方程式を解いても、一ヶ月後に福岡市の天気が晴天になるのか雨になるのかを予測することは出来ないのである。すなわち、天気の変化は本質的にカオスなのである。

一九六〇年代当時、人は皆天気予報や天候制御に樂觀的すぎる夢を抱いていた。ローレンツがこのバタフライ効果の話しを聞かせても、聞いた人はノイマン気取りで「予報なんて君、あんなものわけないよ。今はもう天気制御の時代だよ」と一笑にふした。当時、天候の僅かな修正によって思い通りに大規模天候の変化をつくらることができると考えられていた。確かにその考えは正しいと言えるが、天候が変わることが分かっている、それがどのように変わるのかは、決して分かりっこないのである。

我々の人生でもこの初期値に対する敏感な依存性（ちよつとしたことがその人の将来を大きく左右すること）が実感できる。例えば、入試で一点差で不合格となり、合格した場合とその後運命が大きく変わるとか、飛行機にタッチの差で乗り遅れふてくされていたところ、その飛行機が墜落して、飛行機に間に合つて乗っていた場合に比べてその後の人生

が全く変わる場合など、そのような例はいくらでもある（尤も飛行機に乗っていた場合は、死んでしまうであろうからその後の人生があるかどうかは知らないが）。また、実際に、電車の中の高校生のなにげない話で、銀行倒産の噂があつたという間に広がり、人々が預金をおろそうと、その銀行の支店に殺到したという話もある。こう考えると人生も人間の心理もカオスではないかと思える。

カオスの法則

ローレンツはバタフライ効果の発見以降、完全には定常状態にはなることのない系（つまり前の状態をそっくり周期的に繰り返してうでいて、完全には繰り返さない系）の数学に目をむけた。このような系は自然界には数多く存在する。例えば動物の個体数の変動、伝染病の流行、太陽黒点の数、毎日（毎週）の人間の行動パターン等が挙げられよう。そして、ローレンツはしばらく天候の問題から離れ、非周期性を生み出す様な単純な微分方程式を探り始めた。それはなかなか見つけないが、ともすれば全く周期的な系に陥りがちであったが、遂に、たった3つの変数からなる微分方程式の系のなかに、これを見つけた

のである。この方程式は、流体の「対流運動」として知られるものを模擬する方程式であり、元の十二個の方程式から変数を削っていき、残っているものはほとんどないくらいに削った式であったが、非線形項だけは残してあった。その方程式は物理学者や数学者から見ればいかにも易しそうで（我々工学者特に土木屋から見れば微分方程式そのものが既に恐怖であるが）、一見して解けるなど思わせるような簡単なものである（らしい）。なお、線形システムや解が書ける微分方程式はカオスにはならない。また、カオスを生じる微分方程式では最低3つの変数が必要であることが証明されている。私もこの方程式を研究対象の一つとして取り扱っているが、最初にこの方程式を見たときの印象は、変数が2つ以上（3つ）もある微分方程式などというものは、線形・非線形を考える以前に、複數怪奇に見えたものである。

ローレンツの方程式はたった3つの変数からなる決定論であるが、その方程式の生み出す挙動は複雑で一見周期的にも見えるが二度と同じ値を繰り返さずに無限に続くものである。（有限の空間の中に無限の長さの線を引くことは、後で述べるが実は可能であるこ

とが分かっている）。この3変数をx軸、y軸、z軸に取りその挙動を图示する（専門用語で言えば位相空間上の挙動を图示する）と、これは発散することもなく、ある空間の回りに引きつけられたように挙動し、これがまさしくバタフライ（蝶）が羽を広げたような図となるのである（この図は、ローレンツのストレンジ・アトラクタと呼ばれている。）さて、3つのなかの一つの変数の時系列的挙動は、正の値を疑似周期的に繰り返していたかと思うと、突然（予測できず）今度は負の領域へと入っていき疑似周期的挙動を繰り返す。そしてまた突然、正の領域に戻ってくるというものである。

実は、このローレンツの方程式は、電磁場の中を回転する円盤を通して電流が流れる方式、すなわち今日の発電機の元祖とも言えるダイナモシステムを正確に描写している。地球の磁場も長い地球の歴史のなかで何度か逆転してたこと（北極のS極と南極のN極が入れ替わったこと）が知られているが、その間隔は一見全く不規則で説明がつかない。こうした不規則性にぶつかると、今まではとかく、例えば隕石が地球にぶつかった結果などとその系の外に原因を探していたが、実は地球の

ダイナモシステム自体の自然な（カオス的）挙動ではないかと見られてきている。また、地球の氷河期等の変動についても地球気候の自然な挙動ではないかとも解釈されている。

人間にも時々突拍子もない行動をとる人がいるが、これも人のせいではなくその人自身に内在するカオスではなからうか。また、ジギルとハイドのような性格の突然の変化も、薬などの外系からの影響ではなく、自分自身の自然なカオスの挙動ではないのか。

（カオスの法則：他人のせいにするな。自分自身に原因はある）

これまで自然界は、現象が複雑であるために不規則であると考えられてきた。例えば、木の葉の落下運動は、風の影響や、木の葉の落下と回転による空気の乱れ等の複雑な影響を受けるために、極めて複雑である。多くの日常的な事柄に関して科学が無力だといわれることがあって、それは日常的な事柄は実は大変複雑であるためといわれてきた。しかし、そうである場合もあるが、この常識が必ずしも正しくないことが、カオスの発見により分かってきた。

物理学や工学では、何か複雑な結果にぶつかると、さっそく複雑な原因を探そうとする

のが普通である。そして、ある複雑な現象をより詳しく物理的に説明しようとして、変数の数をどんどん加えて複雑なモデルを構築し、自己満足しながらどつばにはまっていくのである。最終的に、系の中への入力と出力の間にランダムな関係が見つかったりすると、とにかく現実的な理論を作るためには、人工的にノイズや誤差を加えるなどして、そのランダムな要素を含ませなければならぬと考えられている（まさに私自身がそうである。）

現代のカオス研究は無秩序な系が、実は単純な数学の方程式でもらさず模す事が出来るのだという認識から出発した。例えば、人口曲線として有名なロジスティック方程式は、解析的に（変数分離形で）簡単に解けて、その曲線は授業でも見たことがあると思われるが、S字型の曲線でシグモイドと呼ばれる。ここで、ロジスティック方程式を、オイラーの差分法と呼ばれるごく普通の単純な前進分で離散化すると、ある時点 $n+1$ における値 X_{n+1} は $X_n + \Delta t \cdot f(X_n)$ (ここに、 a はパラメータである) という極めて単純（しかし非線形）な形に直すことができる。この差分化されたロジスティック方程式の挙動を、パラメータ a を変化させることによって

詳しく調べたのがメイという数学者であって、これを一九七四年に発表した。ただ、 a を変えてその差分式の収束値がどうなるのかを調べたのである。本当に単純ではあるが、不思議なことに、それまでにそれをやった者はいなかったのである。なぜなら、その差分式の極限はある値に収束すると信じられていたからである。というのも、ロジスティック方程式の解析解がある値に収束することは明白である。ところが、差分式になるとそうではなかったのである。 a が3まではある値に収束するのであるが、 a が3を越したとたん2つの値を繰り返す周期運動に収束したのである。そして、さらに a を大きくしてゆくと今度は4つの値を繰り返す周期運動に収束したのである。 a をもっと大きくしてゆくと8、16、32... の値を持つ周期運動へと次々に変化してゆき、遂に、 a がある値 (3.57...) より大きくなると、周期性は全くなくなり、どの値にも落ちつかず、ただめっちゃくちゃな値を取り続けるというカオス状態に陥ってしまったのである。ところが、これまた不思議なことに、 a がさらに大きくなってゆき、非線形性がいやが上にも高くなっているときに、ある点になると突然奇数の3とか7などのよう

な規則的な周期が現れるところが出てきたりするのである。

このように、単純な決定論的差分式（この差分式というところが重要で、この場合一変数でもカオスとなる。但し非線形でなくてはならない）でも極めて複雑な挙動を呈することが明かとなったのである。さらに、非決定論の典型的な例として、硬貨投げを無限に繰り返すことが挙げられる。今一枚の硬貨を取って投げ、表がでれば0、裏がでれば1として記録してゆくと0と1の数列ができる。このようなランダムな系列は確率を定めることのできないストカスティック (Stochastic: 確率的) な系列である。ところが驚くべきことに、この全くランダムな系列を単純な決定論的法則で作り返すことができることが分かったのである。

こうなってくると、複雑で不規則に見える（あるいは本当に不規則な）現象の原因が、本当に複雑だからそうなのか、はたまた本当は単純な決定論から生み出されてそうになっているのか分からなくなってくる。事実、今まで雑音の一言でかたづけられてきた色々な不規則時系列のなかにカオスがかなり存在することが明らかになってきている。以上のように

に、現象が複雑に見えるからといって、必ずしも多くの要因が複雑に絡み合っている訳ではないのである。

(カオスの法則・複雑に見えてもその原因は単純である)

カオスによるモデル化の一例

身の回りのカオスの一例として、ロバート・ショウによって紹介された、ポタポタ水滴のたれる締めりの悪い蛇口の例を取り上げたいと思う。ポタッポタッと蛇口から落ちる水滴は、ほとんどの人が周期的だと思いでいると思われる。しかし、少し実験してみれば分かるようであるが、実は必ずしもそうではない(らしい)。特に、あのポタポタの間隔が長くなってくると、そのパターンがなかなか予測できないことがはっきりしてくる。つまり蛇口のような単純なものでも、永久に独創的なパターンを作り出すことができるのである。こんなものは通常研究対象にはならないであろうが、もしこのような系を研究する方法を計画するよう頼まれた場合、伝統的な物理学者なら、まずできる限り完全な物理モデルを作ることから始めるに違いない。水滴の生成とそれが蛇口を離れる過程は見か

けほど単純なものではないにせよ、一応理解できる。取り入れるべき変数としては流速、そして流体の粘性や表面張力などが挙げられる。しかし、蛇口にぶら下がって今にも落ちようとしている水滴は、伸縮自在な表面張力を持つ小さな袋のようなもので、ぶらぶらと揺れながらだんだん質量がふえてゆき、遂にその臨界点を過ぎると、ちぎれて落ちてゆくような、実に複雑な三次元の形をとるものである。そして、その形を忠実に計算するだけでも、スーパーコンピュータが必要である。その水滴の問題を完全に模擬するため、適切な境界条件を含む一連の連立偏微分方程式を作って、それを解こうなどと考えた者は、なかなか実際の系を再現できず、取り込むべき変数をどんどん増やしていき、結局自分が底無し沼にはまり込んでいくのに気づくのである(まあ、気づけばましであろうか?)。

水滴の問題を解くもう一つの方法は、物理学などさっぱり忘れて、水滴の落ちる時間間隔のデータだけが、いきなりブラックボックスの中から出てきたかのように、前後の関連を気にせずそれだけを見ることである。工学ではこれを(物理学では邪道な)確率モデルを用いて、最終的に人為的に白色雑音を与え

て、実際の現象の複雑さを再現しようとする(何を隠そう私自身がそうであるが)。ところが驚いたことにそんな単純なデータから、確率モデルではなく、それを系統だてて決定的物理学的に当てはめる方法を、ショウは考えたのである。

ショウは、上述の二つの両極端な方法の間をとって、バネから吊り下がったおもりがちぎれて落ちるといった単純な物理モデルを頭に描いた。問題は、これが本物の蛇口と同じくらいの複雑さを生み出すことができるのか、また、たとえできたとしても、その複雑さは全く同じ種類のものかということであった。もっと複雑な系なら、時間が経つに連れて変化する温度や速度の関係を表せるが、この場合ポタポタ漏れる一次元の一連の時刻の列があるだけだった。そこで、ショウはある技法を考えた。これは、カオス研究の中で巧妙で永久的な実用的貢献となるのであるが、見えないストレンジ・アトラクタ(ローレンツのモデルでは、前述したバタフライが羽を広げた図のこと)用に、位相空間を復元するという方法で、どんな一連のデータにも応用できる。ゆるんだ蛇口の場合、全ての水滴について、その前に水滴が落ちた時刻の間

隔と、その次に落ちた水滴の時刻の間隔を、それぞれx軸とy軸にとるという2次元のグラフを作ったのである。何のことはないただそれだけのことであった（これはまさにコロンブスの卵であろう）。もし、水滴の落ちる間隔が規則的だとするとグラフはたった一個の点にしかならない。

しかしそのグラフはというと、流速が小さいとき（水時計の体系のとき）はほぼ一点であったのが、流速が増えるに従って系は倍周期の分岐過程（つまり水滴が2個づつ落ち、グラフ上は2点になる）に入り、そしてさらにその分岐が進み遂にパターンがカオス的に乱れたのであった。もしそれが本当にランダムであれば、点はグラフ上に不規則に散らばり、その間隔どうしに何の関係もないはずである。もし、そのデータの中に何か特徴のある構造（カオス的構造）が潜んでいるとしたら、それはストレンジ・アトラクタのようなあるパターンを示すことになる。その構造を見るには、普通3つの次元が必要だが、彼の技法を使えばそれを3次元にすることはとても簡単である。すなわち、引き続き起こる3つの水滴の時間間隔を3変数にすればよい（まるで魔法の箱のようだ）。シヨウの蛇口の

場合の3次元の図は、まるで暴走した空中文字用の飛行機が後に引く煙の環のようなパターンが現れたのである。そして、シヨウは実験データの図と、彼の考えた単純な物理モデルが作り出すデータの図を一致させることに成功したのである。なお、その後、別の研究者によって、単純な過程から生まれた秩序ある無秩序としてのカオスとただのノイズを見分ける強力な方法が見つけられた。

ところで、モデル化の時の選択はいつも同じで、モデルをもっと複雑に、もっと現実に近いものにするか、あるいはもっと扱いやすく単純なものにするかということにある。尤も、完璧なモデルこそ、現実を余すところなく表すものだ。などと信じるものはいないであろう。そのようなモデルは、対象となる地域と同じ縮尺の地図を作り、その詳細まで（木の一本一本、道の全てのでこぼこまで一つ残らず）描くようなものである。それこそ、そんな地図は現実そのものが地図であるというようなもので、一般化し抽象化するという地図の本来の目的を打ち消してしまう。地図製作者は依頼者の注文に合わせて、特徴を強調しなければならぬ。モデル化も世の中を模倣しようとするほど、単純化しなけ

ればならないと、カオス学者アブラハムは言っている。つまり、現実の概念的モデルを、例えば（単純な）数学的モデルなどで置き換えて、その本質を表すモデルが良いモデルであって、生物や社会系など現実に余り忠実なモデルは、むしろ好ましくないと言っている。

おわりに

今までの我々の常識は以下のようであった。
①単純な系は単純な振る舞い方をするものである。
②複雑な振る舞いは、複雑な原因のあることを意味している。すなわち、見るからに不安定で予測を許さない系は、独立した多数の成分に支配されているか、外部からのランダムな影響を受けているのどちらかに違いない。
③異なった系は、異なった振る舞いをするものである。

しかし、今やその全てが一変してしまったのである。この二十年間程度の間、物理学者、数学者、生物学者、天文学者そして工学者などたちは、それにとって代わる一組の概念を作りあげたのである。単純な系が複雑な振る舞いを生み、複雑な系が単純な振る舞いを生むこともある。ここで最も重要なことは、複雑さの法則が、それぞれの系を構成するデ

イ・テイルにはいっさい関係なく、全てに普遍的に通用するということである。(本稿では、普遍性の法則そのものについては詳しく述べていない)。

今の科学は、益々局所的なディーテイルを追求しているが、大局的な複雑な系を理解するためには、学問の分野の壁を越え、全ての学問分野に共通の、新しいパラダイムとしてのカオスの考えが必要となってきたのである。

さて、私の研究室にはカオスに関する本が数十冊あるが、この原稿を書くに当たって直接参考としたものは数冊ある。この中で特に面白くお勧めなのは、新潮文庫のJ・グリック著「カオス―新しい科学をつくる」(大貫昌子訳・上田監修)である。これは、アメリカの新聞記者が書いたものであるが、その内容の豊富さ、正確さ、叙述の平易さでカオスの全貌を明快に解説してある。本当にたぐい稀な科学啓蒙書であり、目から鱗が落ちること請け合である(私としてはノーベル賞をあげたいくらいである)。この本は、五百三十ページにもわたるので、読むのに少々時間がかかる(私はこの原稿を書くおかげで2度読む羽目になる)が、そんな時間を取られ

たくない人には、「3時間でカオス理論がわかる本」(橋本尚著、HB J出版、一九九二年)を勧めたい。また、これ以外に、少しは数学的に興味はあるが、余り数式が出てくるのはいやだという人には、講談社のブルーバックスで「カオスとフラクタル」(山口昌哉著、一九八六年)や岩波書店の「カオス―混沌のなかの法則」(戸田盛和著、一九九一年)裳華房「カオス―自然の乱れ方」(竹山協三著、一九九一年)などが良いと思う。

本当は、あと「海岸線の長さとは」等から始まる、カオスの一面であるフラクタルの説明、そしてその中で有限空間の中に無限の長さを含むコッホ曲線、連続なのに通常のニュートンの微分が全く不可能(あらゆる点で微分が不可能)な関数がカオスの本質らしいこと、通常の位相次元を拡張したフラクタル次元(ハウスドルフ次元)、単純な法則からとてつもなく複雑な魔詞不思議な図形(集合)となるマンデルブロ集合、等を紹介するつもりであったが(いずれも我々のパラダイムを大いにシフトさせてくれるのであるが)、諸般の事情により(紙面の都合上、原稿の締切の都合、そして土木学会西部支部の原稿の締切が間近に迫ってきた、卒論・修論の関係、

その他雑用で忙しくなったため、今この原稿は日曜日に行っているが日曜は休みたくなつたため、そして読者も長すぎるそろそろ止めると言われているであろうから)割愛させて頂きたいと思います。

最後に、最近カオス理論を応用し、手の指の脈波の波形を図形化することで人の健康状態を判断しているそうであるが、これによると、軌道図形のパターン(カオスアトラクタ)が複雑でなほど人体は健康で、反対にパターンがびったり落ちついて秩序立った形の方が不健康なのだそうである。事実、我々が秩序正しく働いていると思っている心臓も、カオス的であることが指摘されており、むしろ周期的でリズム正しいのは心臓に疾患がある場合らしい。

皆さんもこれから社会に出てもカオス状態を保って頑張ってください。

(カオスの法則・カオスであれば健康

(正常)だ)

CILIV Vol.32
H6年3月