

# 複雑さを理解するためのパラダイムを求めて

——多様性について(三)——

輪 湖 博

ここに自分は(ヨーロッパの芸術の特徴を捉える)最も重要な視点として「規則にかなうこと」を選び出そう。(中略)詩の形式的論理的性格、特に多様なものにおける統一が、詩の与える美的なよろこびの根拠である。秩序から美が出る。そのように音楽における音の秩序正しい響き、舞踏における規則正しい運動、詩における長短の綴音の規則正しい連続、すべて秩序正しさが美的のよろこびをもたらすのである。視覚芸術における「比例」のよろこびもこれにはかならない。芸術的創作は、思惟の構成的な統一によって宇宙の秩序を把握する能力と相並んで、構成的な形作る試みによってかかる秩序を持った対象を模倣し、いわば神のごとくに或るものを創造する能力である。

(和辻哲郎『風土』<sup>(1)</sup>より)

小さい頃、「虹は七色」と教わった。しかし、実際に虹を眺めてみると、どのように七色に分けるのかよくわからなかったものだ。大きくなって、虹は太陽光線がその屈折率の違いから水滴によってスペクトルに分光されることに

よって生じたものであることを教わった。したがって、波長の最も長い赤から最も短い紫まで連続的なスペクトルをもつ虹の色は本来連続的に変化しているはずであり、「虹は七色」という表現はおかしいことになる。ただ、七色かどうかは別として、そうした有限の数の色からなるという表現自体は理解できないわけではない。なぜなら、われわれはせいぜいこの連続的に変化するスペクトルを六色とか七色くらいに分類して認識する能力しか持ち合わせていないからだ。

太陽光線を初めてスペクトルに分光したのはニュートンであった。彼は、プリズムを通じて分光された太陽光のスペクトルを七色に分け、色と色との境界線を決めているが、その著『光学』<sup>(2)</sup>の中で、それら境界線が、色の識別に彼より鋭い眼を持つ一人の助手によって境界線を決する作業を幾度か繰り返すことによつて一意的に決められたものであつて、決して恣意的に決められたものではないことを強調している。しかしこうした記述からは、逆に、連続的に変化する色を無理やりに七色に分類しようとしているニュートンの苦渋がひしひしと伝わってくるような気さえずる。

それではなぜニュートンは七色にこだわったのであろうか。

実は、彼が決めた七色のスペクトル、堇、藍、青、緑、黄、橙、赤の境界線は、堇の端を1、赤の端を $\frac{1}{2}$ として数直線上に印をつけていくと、 $\frac{8}{9}$ 、 $\frac{5}{6}$ 、 $\frac{3}{4}$ 、 $\frac{2}{3}$ 、 $\frac{3}{5}$ 、 $\frac{9}{16}$ の位置にくる。これらはまさしくピタゴラス音律における主音、二度、短三度、四度、五度、長六度、七度、八度の弦の長さの比に対応している。ピタゴラスは魂の浄化のために音楽を重視したが、この「音の学」とともに「数の学」「形の学」「星の学」を神、宇宙、自然、人間の窮極な真理の扉を開く一組の鍵と考え、自然や社会の中に根源的な比例関係を見いだそうとしていた。したがって、弦の長さを

$\frac{1}{2}$ ,  $\frac{2}{3}$ ,  $\frac{3}{4}$  という最も単純な比で変化させていったときにできるいわゆるピタゴラス音律がわれわれの感性に快く響くことの発見はとりわけ重要視していた。そしてこれが現在の 12 平均律の基礎となっているわけであるが、ニュートンは、われわれの聴覚に快い響きをもたらすピタゴラス音律とまったく同じ比例関係を、色の世界、すなわち視覚についても発見したわけで、そのことに歓喜したのであった。同様な比例関係は、ケプラーが惑星の角速度の比の中に発見し、彼もまたそこにこの宇宙の創造主の深い御心が現れていると信じて疑わなかった。<sup>(3)</sup> それほどにこの比例関係は宇宙の秩序そのものであり、この秩序こそわれわれに美的なよろこびをもたらす本質的な原理でなくてはならなかったのである。

こうした比例関係の中に美を見いだすという発想は他にも例をあげることができる。たとえば黄金比などはその典型であろう。線分 AB を点 P が  $AB \cdot PB \parallel PB \cdot PA$  に分けるとき、この比の値を黄金比というが、この値は  $x + x + 1 \parallel 0$  の根に等しく、連分数表示すればそこには 1 だけが現れるというように、数式上きわめてシンブルな形に表現される。また図形に関して言えば、縦、横が黄金比の長方形は最も美しいとされ、過去、建築物や絵画を初めてして多くの美術作品に、意識的に、あるいは無意識的に採用されてきた。正五角形の同じ頂点を通らない二本の対角線が互いに他を黄金分割することから、そうした対角線で描かれるペンタグラム（星型）も、ピタゴラス学派によって靈力をもったものとして尊重され、その後の魔術書などにしばしば登場する。

また、黄金比は自然の中にも見いだすことができることとされている。植物の葉序にはいろいろなパターンがあるが、それらがフィボナッチ数列をなすことはよく知られている。実はこのフィボナッチ数列の極限は黄金比であり、そのことから葉序の窮極もまた黄金比であると論理は展開される。また、黄金比の長方形の中に短い辺を一辺とする正方

形を描くと、残りの長方形は再び黄金比の長方形となる。この操作を無限に繰り返すと、そこには黄金比の長方形からなる渦巻模様が現れてくる。この渦巻状に無限に続く相似形は、巻貝や種子の配列に見られる渦巻に代表される生物の成長曲線を連想させるが、実際、それを黄金比と絡めて話題にすることが多い。さらには、雪の結晶において、樹状突起の先端部分に外接する円の半径と中心部付近の正六角形様の密集した部分に外接する円の半径が黄金比をなし、自然のもつ神秘さに感嘆するといった記述さえ大衆向けの現代書の中に見ることができ。しかし、こうした比が実際の観測事実として黄金比に近い値をとっているとしても、その物理的な説明が与えられないかぎりにおいては、これらが古代ギリシア人の発想、そしてケプラーやニュートンの発想とまったく同じ信仰に基づいた論理にすぎないといった非難を免れることはできないであろう。

われわれは日常自然の中にさまざまな美を見いだす。そして、秩序正しさがそうした美的よろこびの源泉の一つであることは確かであるが、現実にはわれわれが観察する事象において、その秩序正しさは数学的な意味での完璧さを備えていることはなく、必ずどこか不完全であり、不規則な部分を残しているものである。こうした現実を目の当たりにしながらも、美の本質はそうした個々の事例を超越した完全な存在でなければならず、また逆に、われわれが目当たりにする事物の美しさは、その美のアイデアにあずかることによってそのアイデアを原型として美しいという性格をもつことができるとするアイデア論的な発想が長く西洋哲学の観念論の源流となって人々の心を流れてきた。そして美のアイデアは、おそらく数学的に最も美しい形で表現されるはずであった。なぜならば、美のアイデアは日常経験する事象や感覚から厳格に区別され、純粹の思考によってのみ捉えることのできるものであり、数学はまさにそうした学問だからである。そして、**数学的に美しいものにこそわれわれの感性は刺激され、精神的な快を成立させると考えられ**

た。しかも、自然のもつ数学的な美しさは、そのままこの宇宙の創造主の崇高なる意志の現れでもあった。したがって、自然という書物は数学の言葉で書かれているというガリレオの言葉を引用するまでもなく、その創造主の意志は数学の言葉で最も適切に表現されると考えられ、また表現されてきたといえるであろう。

二一

だから（ローマの）庭園において人が喜んだのは、自然を支配する人工の力のよろこびにはかなならぬ。（中略）造園はただ幾何学的な規則にかなうように、自然を区切るということのほかの何ものでもなかった。人はローマ郊外ティヴォリにあるエステ家別荘の庭園を、ルネサンス時代の最も美しい庭園の一つとして賞賛する。それはカムパニヤのはるかなる野を見おろした絶好の斜面に位するものであり、土地は豊饒、水は潤沢である。ところでこの庭園が庭園として賞賛されるのは、幾何学的な直線や円の道路をもって地面や植物を区切ったこと、斜面を利用した石段が同じくその強い幾何学的な印象をもって庭園全体を支配していること、及び直線的に数十間にわたって並列されたりあるいは種々の技巧をもって組み合わせられている噴泉が人工の支配を庭のすみずみにまで感じさせることなどである。それは確かに自然を人工的にしたとは言えるであろう。しかしそれによって自然の美しさが醇化され理想化されたと言えるであろうか。

（和辻哲郎『風土』より）

科学者はしばしばその研究成果について語るとき、「美しい」とか「エレガント」といった形容詞によって賞賛することがある。物理学者ハイゼンベルグがアインシュタインに「単純性と美しさについて語ることによって、私が真理についての審美的規準を導入していると、あなたは反対なさるかもしれません。率直に認めますが、私は、自然が

私たちに提示する数学的骨格の単純性と美しさに強く惹きつけられます。あなたもこのことを感じられているにちがいありません。すなわち、自然が突如として私たちの前にくり広げる関連性の、ほとんど驚くべき単純性と合一性で「す」と述べたことがあると回想しているが、<sup>(4)</sup>自然科学者にとって、自然の本質をシンプルで美しい数式で抽象できたときほど喜ばしいことはないであろう。それは自然科学者のもつ美意識であり、また自然哲学であるといってもいい。たとえばマクロな世界（古典力学）におけるニュートンの運動方程式、ミクロな世界（量子力学）におけるシュレディンガーの波動方程式などはその典型である。もちろんそれはただ単に数学的に単純というだけではなく、包括的であり、自然の本質の合一性を示しているからこそ驚嘆に値するのである。

たとえば、ある物体が中心力のポテンシャルの作用を受けて運動する場合を考えてみよう。それは天体の運動でもよいし、荷電粒子の運動でもよい。このときニュートンの運動方程式の解は二次曲線を与えるが、それは状況に応じて円となり、楕円となり、放物線となり、双曲線となる。これらはいずれもシンプルで美しい形状の曲線である。たとえば地球が太陽のまわりを楕円運動することもこれによって説明される。ところで、実際には、地球は他の惑星からの引力の影響をも受けているため、その軌道は完璧な楕円ではなく、楕円軌道の近傍を複雑に揺れながら公転している。そうした複雑な運動さえも現代のコンピュータを使えば計算で示すことができ、実用上はそうした精度の高い計算が必要となるが、それでも楕円であることが事の本質であって、複雑なゆらぎは些細なこと（物理学でいうところの摂動）と理解して基本的に差し支えない。こうしてわれわれの心の中にある太陽系の数学的な秩序正しさをもった美しさは依然保たれている。

ところで、**自然が数学的に美しい形で表現されるといえるのは、純粹に美意識だけに根ざした問題でないことは明か**

である。むしろもっと重要なことは、そうして数学的に表現されることによって、現在の状態を出発点として運動方程式を解けば、未来の任意の時刻（そして過去の任意の時刻）における物体の運動の様子を予測することができるという点にある。すなわち、運動方程式を手にしたことによって、われわれは未来に対する予知能力を獲得したといってもよいであろう。

自然科学のもつ予知能力をまざまざと見せつけてくれるのは、日食、月食、彗星の到来といった派手な宇宙ショーを演じてくれる天体の運動であろう。まだ日食を予測できなかった時代、何の前触れもなく起こった皆既日食に人々がパニック状態に陥っている光景は想像するに難くない。われわれがタイムマシンに乗ってそんな時代を訪れ、日食を見事予言して人々に崇められる、そんなSF小説的情景も容易に目に浮かぶ。今でもハレー彗星到来の状況を前もって子細に知らされるとつくづく自然科学の予知能力の高さに感服せざるを得ないが、ハレーが何十年も先の彗星の到来を予言し、それが見事の中した一八世紀の驚きは、さぞかし強烈なものであったであろう。

ニュートンの運動方程式はわれわれに自然で起こる現象に関する予知能力を与えてくれただけではない。ロケットを打ち上げ、月に無人で軟着陸させることも、木星、土星、冥王星と観測しながら太陽系の外へと無人ロケットを旅立たせることも、同様にその運動方程式を解くことよって達成することができる。人工的な物体を人間の制御下において、思うがままにこの自然を変えていく能力をもニュートンの運動の法則はわれわれに賦与してくれたのである。

ラプラスは一八世紀の終わりにこのことを次のように表現した。<sup>(5)</sup>

「大自然の事物の現在の状態は、疑いもなく過去の状態によって決定される。だからある時刻での宇宙の構成要素の

相互関係をすべて知りえたとすれば、これらの構成要素すべての位置速度とその相互影響を、過去未来のどの時刻でも明言できるだろう。

天体力学は、人間理性に輝かしい榮譽をもたらした学問であるが、これは、私たちに、そのような予知能力がどのようなものであるかを不完全にはあるが知らせてくれる。天体の運動を支配する法則は簡明なので、天体の質量や距離の関係を知れば、その運動がある程度まで追跡することが可能である。これらの天体全体の過去未来の運動を完全に知るには、どの時刻にせよ、天体それぞれの位置と速度を観測しさえすればよい。この予知能力は、使用する観測機器の優秀さや計算に必要な少数の法則によって保証される。しかし、他の多くの現象については、要因が複雑でありまた完全には知りえないので、分析力の不完全さと相まって、これほど正確には実行できない。つまり、不完全にしか知りえないもの、程度の差はあれ不確実なものが存在する。それらの現象は完全には知りえないのだから、確からしさのさまざまな程度を決定する方法を見出さねばならない。こういう人間理性の弱点のおかげで、精緻で画期的な数学理論の一つ、すなわち偶然の（あるいは確率の）理論ができたのである。」

ここでは、自然界において、事象が因果律に従って決定的に変化していくことの表明と、しかし、構成する要素が膨大なために、その要素一つ一つに関する情報を完全には収集できないこと、および、ニュートンの運動方程式というデータを解析する手法はもっているものの、すべての要素について情報が得られた場合にはデータが膨大なため現実的な時間内に計算を終了させるだけの計算力をもたないこと、この人間の能力における二つの限界のために確率論に頼らなければならないことが述べられている。彼がここで強調したかったことは、確率論ではその由来を正すことのできないランダムな運動の導入を余儀なくされるが、そうしたランダムさは決して自然の本質ではなく、情報収集

力と計算力が向上すれば、確率論に頼ることなく未来を予知する能力をわれわれは手に入れることができるであろうとであった。そして、完璧なる情報収集能力と計算力とを持ち合わせた英知を、後の人がラプラスの悪魔と呼び、決定論的自然観の象徴としたことはよく知られるところである。

この決定論的自然観は、量子力学の登場にともない、ミクロの世界では物質の状態は原理的に確率的にしか捉えることができないということになって大きくゆらぎ、ラプラスのいうような厳格な意味での決定論的描像は否定された。しかし、確率論的、あるいは統計的な意味での法則性はそこに存在し、その意味では量子力学においても必然性のある結果が導かれる。したがって、厳格な意味での決定論は否定されたものの、現在の状態から未来の状態を予測できるという意味における決定論的自然観は、むしろミクロの世界にまで拡張され、科学の進歩とともに人間の予知能力は確実に増大し、人間を限りなくラプラスの悪魔に近づけてくれるという思いをますます募らせてきた。それはこの自然のすみずみにまで人間の支配をおよぼすことができるということでもあった。

しかしこうした中であって、人間のもつ予知能力のもう一つの限界を見極めていた人物がいた。数学者ポアンカレである。彼は一九〇三年に次のように述べている。<sup>(5)</sup>

「小さすぎて注意を引かないほどの要因が、見逃しようないほどの大きな影響を招く。そして偶発的効果だと言われる。もし大自然の法則と宇宙の初期状態をすっかり知りえたとすれば、宇宙の未来を完全に予測できるだろう。しかし、大自然の法則の謎がすべて解き明かされたとしても、初期状態というものは近似的にしか知りえない。もし未来の状態が初期状態と同程度の近似で知りえるとすれば（これこそわれわれが切望するものだが）、現象が予測されたとか、現象が法則に支配されていると言えるだろう。しかしいつもそうなるとは限らない。初期状態の微少な差異

が、最終的に巨大な差異をもたらすことがある。最初の微少な誤差が、最後の巨大な差異を招いて、予測は不可能となり、偶発的現象が生じる。」

彼が言及したことは一世紀近くもの間注目されることなく過ぎた。決定論的自然観<sup>II</sup>予測可能というパラダイムの中で、科学の進歩が確実にわれわれをラプラスの悪魔に近づけていくようにみえた時代であって、それは無理のないことであった。しかし今、このポアンカレの言葉がよみがえってきた。そして、それは自然科学に新しい、自然の描像を提起しようとしているかもしれないのである。

### 三

優れた庭の池は、決して一目ではその全体の形を捕えしめず、いかなる方向からながめても常にそこに新しいまとまりのある姿を感じしめるように、無限に複雑な面を具えたものとして作られている。(中略)種々の樹をそれぞれの位置にそれぞれの大きさに布置し、季節の移り変わりに従って移り変わらつゝ調和を保つまとまりを作り出し得なければ、優れた庭とはならない。これらをも人は自然のままなる山野のある個所に偶然に現われている調和を模範としそれを偶然ならざる全体にまとめるのである。このような複雑なまとめ方はすべて幾何学的な規則正しさによってはなし得ないものである。そこに何らか規則があるとしても、それは人間が合理的にはつかみ得ないものにほかならぬ。

(和辻哲郎『風土』より)

天気予報は、科学のもつ予知能力の素晴らしさを日々われわれに示してくれる好例であろう。天気予報の的中率を二四時間先の予報について見てみると、一九四五年には七〇%であったものが、一九五五年には七五%になり、その

後しばらくその状態が続くが、一九七〇年頃から向上し始め、現在では八二%を越えている<sup>6)</sup>。われわれも実感として、以前に比べ「明日の天気」に信頼をおくようになった。しかし一方で、予報がはずれることも依然ある程度覚悟しておく必要があり、それを肝に命じながら天気予報に耳を傾けていないと後で腹立たしい思いをすることにもなりかねない。それでも、天気が大気の運動、すなわち空気分子や水分子の運動によって起こるものであるかぎり、科学の進歩によって、明日の天気のみならず、将来的には一週間予報や三ヶ月予報といった中期、長期の予報精度も次第に向上していくだろうことに多くの人はきわめて楽観的であろう。

実際、こうして天気予報的中率が向上した理由として、スーパーコンピュータの登場に代表されるコンピュータの進歩による数値予報の実用化と、気象衛星の打ち上げによる観測体制の強化といった科学技術の進歩を掲げることができる。いま述べたように、天気の変化を支配する主たる要因の一つは気圧の変化であり、それは大気の運動によって生じる。空気のような流体を扱う学問を流体力学というが、そこで与えられる流体の運動方程式を解くことによって大気の運動を予測することは原理的に可能である。しかし、その計算量は膨大であって、一昔前のコンピュータではたとえそれを試みても実用的な時間内には計算が終了しなかった。コンピュータの進歩によってまずこの点が徐々にクリアされてきた。また、気象衛星の打ち上げは、それまでの天気予報が地上の離散的に設置された観測点からの情報をもとに描くしかなかった天気図だけに依存せざるを得なかったのに対して、地球規模の情報を空間的にも時間的にも連続的情報として得ることを可能にし、予報に取り入れることのできる情報量を飛躍的に増大させた。

こうして天気予報が科学の進歩とともにその的中率を上げてきた経緯を見ると、まさに計算能力および情報収集能力を増大させ、着実にラプラスの悪魔に近づこうとした努力の結果であることがわかる。それでは、将来的中率一

○○を達成することが可能なのであろうか。おそらく多くの人は漠然と科学の進歩がそれを可能にすると考えているであろう。それは科学の進歩が着実に情報収集力と計算力をアップさせ、それが予測能力アップにそのまま反映されるかと考えているからに他ならない。しかし、そうした当然とも思われるわれわれの期待に疑義を投げかけている人たちがある。<sup>(7)</sup> 彼らは、「明日の天気」といった短期予報は今後も向上していくであろうと認めている。しかし、中期、長期予報となると、これは本質的に不可能ではないかという実に悲観的な見方をしてるのである。たとえば中期予報について、数値予報で五〇〇ミリバールになる高さを予測し、それが実際にどの程度の予測精度をもつかを調べた結果では、二日目ではまだ九割の予測精度を保っていたものが、三日目で八割、六日目では五割にまで落ち込んでしまう。<sup>(8)</sup> ましてや、三ヶ月予報などといったものにどれだけの意味があるのかなどといったら気象庁に叱られるであろうか。もちろん、この結果はあくまでも現在の科学の能力を評価したのであって、今後徐々によくなっていくという楽観的な見方は成り立つ。しかし、ひょっとしたら、われわれの自然に対する見方そのものにどこか間違いがあって、われわれの予測能力には限界がないという信念は、ラプラスの悪魔という幻影とともに生き続けてきた誤解にすぎないのではないか、そんな疑念がいま科学者によって語られ始めているのである。

事の発端は一九六三年に発表された気象学者ローレンツの論文であった。<sup>(9)</sup> 彼は、大気循環を低緯度と高緯度の温度差、大陸・海洋間の温度差によって発生する高低気圧の強さ、偏西風の不安定さから生じる高低気圧の強さという三つの変数に関する一階の連立微分方程式で記述した。この方程式は解析的に解くことができなかつたため、数値計算によってその時間変化が追跡された。しかし、得られた結果は実に奇妙なものであった。式のシンプルさとは裏腹に、その解の挙動はきわめて不規則で複雑なものであった。その結果がそうしたシンプルな方程式から得られたこと

を知らなければ、まったくランダムな変動と判断するしかないような運動であった。しかも困ったことに、わずかに違う二つの初期値から得られた結果は、長時間経つとまったく異なった運動の様相を示したのである。初期値の違いをどんなに小さく抑えても、あっと言う間にその差は拡大され、初期値が近ければ解の振舞いはだいたいわずかというこれまでの常識を覆すものであった。アメリカで一羽の蝶が一回羽ばたきをするかしないかで、何ヶ月か後の日本の天気は全く異なった様相を示すといったたとえから、これは「バタフライ効果」とも呼ばれているが、このことは、初期値には真の値を無限精度で与えない限り、長時間後の状態に関する結果はまったく信頼できないことを意味していた。これによって、彼は、天気の長期予報は原理的に不可能であると結論した。

ローレンツの発見はその後しばらく注目されなかったが、七〇年代にはいると、今度は数理生物学者メイが生態学における個体数変動に関する理論的研究の中で、やはり非常にシンプルな漸化式にもかかわらず、その式に含まれる係数への値の与え方によってはローレンツで見られたような解のきわめて乱雑な挙動と初期値への鋭敏性というまったく同じ様相を呈することがあることを見いだした。<sup>(9)</sup>同時に、その他の多くの分野でも同様の問題が存在することに気づき始めた。そして、こうした現象はカオスと呼ばれるようになった。

カオスは、決定論的な式によって記述されているにもかかわらず、その初期値に非常に敏感なために、無限精度で、すなわち無限桁の数値として初期値を与えることができないかぎり、未来を正確に予測することはできないことをその特徴としている。また、得られた解の振舞いはきわめて不規則で複雑な動きを呈し、一見ランダムとしか捉えることができない。それは惑星の軌道のように決して一目でその全体の形を捉えることはできず、また、初期値への鋭敏性は、位相空間の細部の様相をいかに拡大しようと、そこには無限に複雑な面を具えた新しい世界が現れると

いうフラクタル性に由来するものであった（自然のフラクタル的描像もこの論旨からは重要な意味をもつが、ペー  
ジ数に制限もすることからここでは触れないことにする）。

カオスの振舞いをする運動では、長時間後の未来を予測することは不可能であり、もはや確率論的に論じるより他  
にない。しかし、このことはラプラスが確率論の必要性を説いた意味合いとは本質的に異なっている。ラプラスはわ  
れわれの計算能力の不足と情報収集能力の不足を述べているが、それは対象となる系を構成する要素が膨大であるこ  
とに起因していた。したがって、要素数が小さければ未来は決定論的に予測することが十分に可能なはずである。し  
かし、カオスでは、計算はシンプルでパソコンのレベルの場合もあるし、変数の数も数個で起こり得るのである。す  
なわち、ラプラスのいう困難さは全くない。カオスにおける予測不可能性は初期値を無限桁の精度で知ることができ  
ないことに由来しており、そうした精度で初期値を得ることが有限の時間内では不可能であることよって起る。こ  
のことは、数学的には実数は連続であっても、現実的にはわれわれは離散的にしか数を扱うことができないことに起  
因するということができる。これはある意味で量子力学の不確定性原理に似ている。そして、初期値への鋭敏性をも  
ちカオスの振舞いをする系におけるこの予測不可能性こそ、まさにポアンカレが指摘していたことであった。決定論  
|| 予測可能というパラダイムの中ではポアンカレの指摘に多くの注意が払われなかったが、コンピュータが普及し、  
誰もが気軽にローレンツの方程式やメイの方程式を数値計算することができるようになると、コンピュータ・デイス  
プレーの中に展開される奇妙な運動を誰もが体験できるようになり、カオス現象の存在が共通の認識として科学者の  
間に定着するようになって、決定論|| 予測可能のパラダイムはにわかにその足元がぐらつき始めたのであった。

しかし、このカオスの発見が自然科学にパラダイムシフトを引き起こすことができるか、その可能性については賛

否両論あってまだ評価が定まっていな<sup>(1)</sup>い。

パラダイムシフトを引き起こすと見る人々は、カオスの発見を、アインシュタインが光の速度を越えることができないことを示し、ハイゼンベルグが位置と速度を同時には正確に決めることができないという不確定性原理を提唱した今世紀初めの二つの発見に相当する画期的なものであると絶賛する。決定論といえども初期値を無限精度で決めることができないためにわれわれには予測不可能な世界があると、というもう一つの限界をカオスは示したというわけである。それはゲーデルの不完全性定理に匹敵するものである。また、力学のもつ可逆性と熱力学・統計力学のもつ不可逆性の間に存在していた矛盾が、これによって解決されると考えている科学者たちもいる。

これに反して、単に一世紀前のポアンカレの指摘を再確認し、決定論 $\parallel$ 予測可能というこれまでの誤解を正したにすぎず、自然観がこれによって大きく変わることはない<sup>(2)</sup>と冷めた見方をする人々にとっては、カオスの発見に、むしろ人間の無知のゆえに必要となるのであって、自然の本質ではないとする人々にとっては、カオスの発見に、むしろこれまで一見してランダムと思いついてきた自然現象が実はカオス現象であって、簡単な数式で決定論的に表現できる可能性があることを気づかせてくれた功績を強調するようである。すなわち、天気がカオス現象だとすれば、長期予報の精度向上は諦めなければならぬかもしれないが、逆に短期予報は、その機構が明らかとなればその決定論的機構によって確実に予測できることを意味し、そうした期待の方が科学者にとっては喜ばしいからである。

予測は、明らかに科学の使命の一つであり、また、予測的中率によって科学が評価されていることも確かである。そういった意味で、後者の考え方は一つの当然の帰結といえよう。一方、決定論的に記述される自然、それにはわれわれ自身も含まれており、そうした状況下におけるわれわれの自由とは何かといった問題は常に自然哲学の中心

的課題の一つとなってきたが、前者のような見方は、そこに一石を投じるであろう。前に述べたように、カオスの評価はまだ定まっておらず、しばらく事態の推移を見守る必要があるが、私には、自然観に大きな変革を迫ってくるものと思えてならないのである。

#### 四

自然のままの規則的な樹の形は、わずかに伴っている不規則的な部分のゆえに、かえってよく自然に内在する規則を思わせる。その不規則的な部分をさえも人工的に取り去るならば、そこに高められるのはむしろ自然より離れる感じである。人工化の感じである。(中略) しかれば人工的な庭園を作るといふことは自然の美を殺すことにほかならぬであろう。

(中略) さてかくしてできあがった(日本の)庭園はいかなるまとまりかたを持っているであろうか。(中略) それは幾何学的な比例においてではなく、我々の感情に訴える力の釣り合いにおいて、いわば気合いにおいて統一されている。(中略) そうしてこの「気」を合わせるためには規則正しいことはむしろ努めて避けられているように見える。このようなまとめ方は庭を構成する物象が複雑となればなるほど著しく目立って来る。

(和辻哲郎『風土』より)

カオスを自然界に見られるランダム現象の背景にある決定論的な描像を見いだそうとする方向で注目して行われた研究の中には、生命現象の中で見いだされたカオスがある。(1) たとえば、正常な人の心電図や脳波にカオスが見られるという報告がある。生体に生じるリズムにはいろいろなものがあるが、心電図と脳波はそうした中でも最も馴染み深いものである。医療の面からは、心臓発作やてんかん性の発作が起こるとき、心電図と脳波にそれぞれはっきりとし

た異常が見られるため、その診断に使われているわけであるが、ここで問題にしたいのは、正常時における心拍と脳波のリズムに関してである。直観的に思うのは、正常であるからにはかなり正確にリズムを刻んでいるに違いないということである。これは、これまで述べてきた秩序正しきこそ自然の本質という発想からも当然と考えられることである。ところが、実際には正常人のリズムは基本的なりズムから大きくずれることはないものの絶えずゆらいでいることがわかっている。そのゆらぎは、一見するところかなり複雑であり、単なる雑音のようにランダムに見える。このランダムさが、決定論的な発生機構によって生じたものでないならば、生体のリズムは正確にリズムを刻むことだけがその本質であって、そのゆらぎはあくまでも雑音と考えてよいであろう。ところが、実際には、そのゆらぎの複雑さがなくなり、秩序度が増して来ると、むしろ生体にとっては何らかの危険信号であることがわかってきた。また、そのゆらぎ発生の決定論的機構を示唆する研究結果がいくつか報告されるようになった。

しかし、現時点ではこの複雑なゆらぎがカオスであるか否かについては確定的な結果は得られていない。すなわち、一見ランダムに見える心拍や脳波の変化が実は決定論的に少数の自由度で制御されたものであるという説を現状では否定も肯定もできない。ただし、こうしたゆらぎが、外部からのさまざまな刺激に応答するための柔軟性を与えていて、不可欠なものであるという認識は強まっている。カオスには、個々の点を追跡してみるとランダムであるが、システム全体として見ると非常に安定なものが多い。したがって、環境変動に対して恒常性を維持しようとするホメオスタシスの機構などで、こうしたカオスが普遍的に採用されている可能性すら示唆されている。もしそれがカオスであるならば、決定論的に変化するそのゆらぎには大量の情報が含まれていることになり、そのゆらぎを解析することによって身体の状態について診断する手がかりを得られるのではないか、そんな期待をもった研究も進

められている。

心拍や脳波のゆらぎがカオスであるという結論は出ていないが、それらが $1/f$ ゆらぎであることはよく知られており、カオスであることの傍証であると指摘されている。 $1/f$ ゆらぎとは、ゆらぎをスペクトル分解したとき、各周波数の強度の分布が周波数 $f$ に反比例することからその名がつけられたもので、生命現象だけでなく、物理現象を初め身の回りに広範に見られるものである。実際、カオスの中には $1/f$ ゆらぎとしての性質をもつものがある。しかし、 $1/f$ ゆらぎならばカオスというわけではないから、 $1/f$ ゆらぎをもつことがカオスであることの証拠とはなり得ないが、そこにカオスのもつ一つの側面を見ることはできる。

そもそもゆらぎというのは、雑音といわれることもあるように、元来平均値のまわりのランダムな変動で、秩序正しさを是とする自然科学においても工学においても、邪魔でこそあれ役に立つなどとはまったく考えられなかったものである。ところが、このゆらぎにも種類があることがわかってきた。ゆらぎがまったくランダムであって、ある時刻あるいはある地点における変化が過去の変化あるいは他の地点の変化とまったく相関がないとき、そのスペクトルの強度分布は周波数によらず一定となり、白色ゆらぎ（白色雑音）と呼ばれる。しかし相関がある場合には、その相関のおよぶ範囲に応じて周波数依存性が現れてくる。ブラウン運動のようにその一ステップごとの変化の方向はランダムであるが、全体からみればその変化幅が小さく、比較的ゆったりとした変化をする場合には、ゆらぎのスペクトルは $1/f^2$ に比例する。相関でいえば、かなり長時間にわたって、あるいは長距離にわたって相関が持続する。これらに対して $1/f$ ゆらぎは白色ゆらぎとブラウン運動の中間に位置するもので、相関は中程度の時間、あるいは中程度の距離の間しか持続しない。いわば、ある程度ランダムであり、ある程度ゆったりとした変動をもったゆらぎといった感じ

である。

$\frac{1}{f}$ ゆらぎが注目されるようになった理由の一つに、正常者の心拍や脳波のゆらぎ以外に、 $\frac{1}{f}$ ゆらぎがわれわれに心地よさをもたらすことの発見がある。たとえば、そよ風における風の強さの変動、小川のせせらぎにおける音の変化などは、決して連続的ではなく、むしろ間欠的で、しかも決して規則的なりズムもたない、しかし白色ゆらぎでもなく、まさに $\frac{1}{f}$ ゆらぎの性質をもっている。最近、一定強度の風を送るだけでなく、 $\frac{1}{f}$ ゆらぎをもった風を送ることができる扇風機や、小川のせせらぎの音のはいったCDやビデオまで登場して、その心地よさは商品とさえなっている。また、音楽における音の高低（周波数変動）や音響パワーの変化、絵画における濃淡の変化など、われわれが心地よいと思うものの多くがこの $\frac{1}{f}$ ゆらぎに該当しているようである。

武者利光著『ゆらぎの世界』<sup>(12)</sup>には自然界に見られるさまざまな $\frac{1}{f}$ ゆらぎ現象が取り上げられていて実に興味深い。なぜ自然界に $\frac{1}{f}$ ゆらぎが普遍的に見られるのかはまだわかっていないが、なぜ $\frac{1}{f}$ ゆらぎを心地よく感じるのかについて、彼は絵画と音楽を例に次のように分析している。

まず絵画についていうと、それを観る者に何か訴えるものをもつためには、図形、模様、配置が何らかの相関を内に持っていなければならない。色調、濃淡がゆるやかに変化している絵は、相関距離が長く、図形として認識するに十分な情報を持ち得る可能性がある。しかし、相関があまりにも長距離にわたって持続する $\frac{1}{f}$ 型のスペクトルの場合には、一部の情報から絵全体の情報を得ることができず、意外性が少なく退屈である。これに対して変化の激しい絵では、相関距離が短く、場所から場所へと登場する図形は激しく変化し、意外性が大きい。その極端なものが白色スペクトルをもつ場合で、意外性は最大となる。しかし意外なことばかり連続して起こると、観ている方は疲れ

てくるし、自分がすでに持っている概念との結びつきが得られなくて興味がわかないものである。音楽の方でも、たとえば周波数変動が白色スペクトルをもつ場合には、ピアノの鍵盤をでたために叩いているのと全く同じで、音のピッチの時間変化が完全にランダムでイライラを募らせるばかりである。一方、 $1/f^2$ 型のスペクトルをもつ場合には、ピッチの変化はゆるやかで、「意外性」が少なく、悪くいえば退屈、積極的な意味では瞑想的となる。こういったことから、 $1/f$ 型のスペクトルをもつ絵画や音楽は、「意外性」と「期待性」とが拮抗していて、適度な緊張感があり爽やかな感じを与えることができる。

こうした意味では、シンメトリーや比例関係のはっきりした幾何学的に設計された西洋庭園は、相関距離が長く、すなわち庭園の一部を見ただけで全体像が頭の中に浮かび、その秩序正しさに一瞬思わず目を見張るものの、奥ゆかしさのない退屈なものとなる。これに対して日本庭園は、その変化の仕方が $1/f$ ゆらぎをもつかどうかはわからないが、そこに伴う不規則部分のゆえにまさに「期待性」と「意外性」を醸し出し、より自然らしく、しかも自然そのものでない設計者の意図を感じる奥深い趣がそこに実現されているのである。そこでは厳格な比例関係やシンメトリーだけが美のアイデアではなく、そこに伴う不規則さも美のアイデアからの単なるずれを表しているわけではない。むしろ、適度に散りばめられた不規則さにこそかえってよく自然に内在する何らかの規則を感じさせるのである。そうした奥ゆかしさは、日本庭園が西洋庭園に比べはるかに多くの情報量をもつといってもよいであろう。

五

連句においてはおのおのの句は一つの独立した世界を持っている。しかもその間に微妙なつながりがあり、一つの世界が他の世界に展開しつつ全体としてのまとまりをも持つのである。この句と句との間の展開は通例異なった作者によって行なわれるのであるから、一人の作者の想像力が持つ統一は故意に捨てられ、展開の方向はむしろ「偶然」にまかせられることになる。従って全体としてのまとまりは「偶然」の所産であるが、しかもそのために全体はかえって豊富となり、一人の作者に期待し得ぬような曲折を生ずるのである。しかしながら「偶然」がどうして芸術的な統一を作り出し得るであろうか。ここでも答えは気合いである。しかも人格的な気合いである。一座の人々の気が合うことなしには連句の優れたまとまりは得られない。人々はその個性の特殊性をそのままにしつつ製作において気を合わせ、互いの心の交響呼応のうちにおのおのの体験を表現する。

(和辻哲郎『風土』より)

自然の本質とは単純なものであろうか、それとも複雑なものであろうか。少数の基本的要素と単純な基本法則の積み重ねで自然を記述できるとする還元主義論者にとっては、自然の複雑さとは、要素数が多いことによって生じるものであり、われわれがラプラスの悪魔に近づくことによって、そうした問題は解決される、したがってそうした問題は実用的な必要性に応じて対処すべきことであって、自然の本質を議論する上では問題にならないと考えるであろう。

これに対して、要素間に相互作用があって、協同現象を呈するような問題では事態はもう少し複雑となる。転移現象のように、個々の要素単独の性質からは決して理解することのできない集団としての振舞いがあるからである。そ

れでも、単一種類の要素からなる無限の大きさをもった系については、平衡状態における系の振舞いについて多くのことがわかっている。しかし非平衡状態におかれた系の振舞いとなるとわれわれの理解はかなり困難となる。生命現象を理解する上でも重要なこうした研究はいまようやくその端緒についたにすぎない。

しかも、これらの研究において、対象となる集団が単一の要素からなる系をまず扱うのは研究の手順として当然のことであるが、その目指すところに、それぞれの要素が個性をもった存在であり、互いの相互作用を通して系全体の組織化を進めていくといった問題があることをはっきりと認識しておくことは重要である。脳の神経回路網、生態系の問題などはその代表的なものである。その系の振舞いは、たとえば通常行うように自由エネルギー最小といった基準によって、あるいは何らかの評価関数を最適化する状態を求めることによって調べることが可能であろう。そのとき、単一の要素からなる系とおそらく本質的に異なるであろう点は、最適解がただ一つだけに定まることはなく無数の極値が現れてくることである。ここでは、極値間の優劣はつけ難く、系はそれら極値をただ一つ選択するのではなく、環境の変化に応じてそれら極値を巡ることになると考えられる。また、似たような振舞いは、少数自由度の系でも、それがカオス系であればやはり生じてくることは前に述べた通りである。系は、その決定論的機構によって振舞うにもかかわらず、見た目には秩序正しさはなく、あたかもランダムなごとくさまざまな状態を巡っているように観察されるであろう。そしてそれが、何度も繰り返すが、系のもつ情報量を豊富にしているのである。

しかし、こうした問題を自然の本質と捉え、真正面から挑むという姿勢には、ひょっとしたら東西間の自然観の違いといったものが反映してくるかもしれない。それは、自然と文化は異質のものとして分離する傾向の強い西洋哲学に対して、これを「風土」として捉えようとした和辻哲郎の発想に共通するものでもある。幾何学的な庭園を前に頭

の中をかけめぐるさまざまな思い、それは容易にあるところへ収束していくのに対して、龍安寺の石庭を前にして頭の中をかけめぐる思いは、ある点に収束するかと思えば、他の点へと移り、いくつかの点を経巡っていく。その連想の連鎖は偶然にまかせているようでもあり、かといってまったくのたらめというわけでもなく、その人の体験した過去の履歴に依存し、連想の連鎖そのものの履歴にも依存している。そうした何かに捕らわれるわけでもなく、しかも様々な思いの中を淡々と経巡っている、そんな脳の状態こそ「無心」であるというのは少々うがち過ぎであろうが、前に述べた日本庭園のもつ情報量の豊富さとはこうしたことを指しているということが出来る。そこで、こうした情報量の多い対象を目の前にしていかなる態度をとるかが、複雑さを理解するための新しいパラダイムを求めていく上で、これから重要となってくるのではないだろうか。

そもそも複雑さとは、より簡単で理解しやすい問題に還元しにくいというある種の還元不可能性を指している。したがって、従来のようにシンプルな数式で表現できるかどうかは保証されていない。そうした問題に対して、多くのことを捨象してでも理解しようと試みるか、それとも溺れることを覚悟で、その情報の洪水の中に身を投じてみようとするか、その姿勢の違いは、これからの新しい自然観を構築していく上で大きなポイントとなる。複雑さの理解がこれからのように進展していくかはわからないが、次のようなことは言えるのではないだろうか。すなわち、それに馴染みのない人にはランダムにかなり近いと感じるような前衛絵画や前衛音楽も、それに通じている人にとって認識可能な対象であり、そこに快い感情さえ感じることが出来るわけで、複雑さの理解にとって、まずそれを認識しようとする側のそれを受け入れようとする意識の拡大と、受け入れるための感性の訓練が必要なのではないだろうか。確かに、虹の色を七色に見分ける人と十色に見分ける人の違いは、光のスペクトルという概念の前には自然科学

としては何の意味ももたない。しかし、自然に対する理解がすべてそのようにして進むとも考えられない。本質的に複雑な系が自然界にはあって、むしろそこにこそ自然の本質が隠されているのではないかとさえ思うことがある。しかし、複雑さをいかに理解したらいのか、まだわれわれは何の確固たる指針ももっていない。それは、われわれの認識の有限性と自然のもつ無限性との闘いでもある。

ある日本人カオス研究者の次のような独白<sup>(13)</sup>には、そういった意味で共感を覚えずにはいられないのである。「欧米の研究で感じるのは、複雑にみえる現象をできるだけ単純に理解しようという傾向である。そのためにはむしろ多くの部分をエイヤツと捨象しなければならぬ。これに対し複雑さをそのまま捉えようとする姿勢が日本の（欧米のオツカケでない）研究にはみられると思える。（それゆえにかえて欧米人にはクアンタのは複雑すぎてようわからん」といって評価されず、後に出た、その一部を単純化した研究のみが流行だすという傾向もあるのだが）。我々は複雑な系をその複雑さを失うことなく捉えていくという科学の新方向をきりひらけないであらうか。」

#### 参考文献

- (1) 和辻哲郎『風土』（和辻哲郎全集、第八卷、岩波書店、一九六二年）
- (2) ニュートン『光学』田中一郎訳（科学の名著、第6巻、朝日出版社、一九八一年）
- (3) ケプラー『世界の調和』島村福太郎訳（世界大思想全集31、河出書房新社、一九六三年）
- (4) J・ヴェクスラー編『形、モデル、構造』（金子務監訳）、白揚社、一九八六年、の引用文から。
- (5) J・P・クラッチフィールド、J・D・ファーマー、N・H・パッカード、R・S・シヨール、サイエンス（日本経済新聞社）、一九八七年二月号、六八頁、の引用文から。
- (6) 木村龍治、東京大学公開講座『混沌』第Ⅴ章、東京大学出版会、一九九一年。

- (7) R. Pool, *Science*, **243**, 1290 (1989).
- (8) E. N. Lorenz, *J. Atmos. Sci.*, **20**, 130 (1963).
- (9) R. M. May, *Nature*, **261**, 459 (1976).
- (10) R. Pool, *Science*, **245**, 26 (1989).
- (11) R. Pool, *Science*, **243**, 604 (1989).
- (12) 武者利光『ゆらぎの世界』、講談社、一九八〇年。
- (13) 金子邦彦、数理科学(サイエンス社)、一九九一年六月号、一六頁。