

関西哲学会年報  
アルケール一九九八抜刷

複雑系の哲学的意味

齊藤了文

## 複雑系の哲学的意味

### 一 複雑系の対象<sup>(1)</sup>

どのような対象を複雑系と呼ぶかは専門家と呼ばれる人々の間でも一致してはいない。一説には定義が三種類あるとか四五種類もあると言われているし、日本の研究者の間でもその定義が一致しているとは言いがたい。<sup>(2)</sup>これは、カオス理論が数学的に定義された概念である(そのためここには不一致はありえない)のに対して、複雑系、複雑さという概念はさまざまな学問の分野で自然発生したものだからであろう。そのため、複雑系の定義から始めることはできない。

さて、現在の複雑系の流行はサンタフェ研究所の紹介、さらに自己宣伝に由来する部分が大い。そのため、このごろではサンタフェ研究所の提案した「複雑適応系」を中核として複雑系の理解が行われている。そして彼らの言う複雑系の研究の必要性を早くから主張していたのがW・ウィーバー(Warren Weaver)であった。彼は五〇年ほど前に既に次のよ

うな主張を行っている。<sup>(3)</sup>

一九〇〇年以前の古典的な物理学は主として二変数の「単純性の問題」を扱っていた。いわば二つか三つのビリヤードの玉の運動を分析しようとしていた。その後、統計力学などによって「組織されていない(disorganized)複雑性の問題」が扱えるようになった。いわば、多数のビリヤードの玉が大きなビリヤード台の上を動いているときにその平均的性質を調べようとする。これに対して、我々のこれからの時代は、「組織された複雑性(organized complexity)の問題」を扱う時代だと言う。つまり温度のような粒子の平均的性質が問題になっているのではなく、「ある化合物は毒であるが、それと同じ原子からなるが鏡像パターンに組み立てられている分子が全く無害なのはなぜか?」といったことが問題になっている。しかもウィーバーは、「組織された複雑性の問題」が、これまでの科学の方法では扱うことができないと認め、新たな方法としてORとコンピュータを提案している。

齊藤了文

以上のウィーバーの問題設定は、サンタフェの人以外の人々にも複雑系の対象として何を考えるべきかの方向を示している。ただし、経済や脳などは普通多くの人によって複雑系と見なされているが、複雑系をどの対象に限定するかは確定していない。しかし、複雑系の研究者の「関心」は割合に一致している。つまり、クォークやDNAといういわゆる世界の究極の原因が分かったにしてもそれだけでわれわれの住んでいる複雑な社会がすべて説明できたとはとても言えないというものだ。例えば、サンタフェの重要な一員であるゲルマンは、クォークのような単純で基本的な物理的存在からジャガーのような複雑なものがどうしてできたかを問題にする<sup>(4)</sup>。複雑系の研究者の関心は、たとえ究極の原因が見つかって、それでこの世界の真理をすべて知ったといえる点からは遠いところにある。そして、この問題設定は実は、要素還元論に対して全体論が、機械論に対して生氣論が主張される<sup>(5)</sup>ときの関心と一致している。

しかし、単純に全体論が主張されているわけではない。H・A・サイモン(Herbert A. Simon)が行った分類によると、複雑系の研究は三期に分かれる。第一次大戦後、全体論という言葉が生まれゲシュタルトや創造的進化に関心もたれた。第二次大戦後、フィードバックやサイバネティクスという言葉が好まれるようになり、現在ではカオスや遺伝的アルゴリ

ズム、セルオートマトンと複雑系が結びついている。この三期のうち、第一次大戦後は、「全体は部分の和を超える」という強い反還元主義が主張された。第二次大戦後は、還元主義の問題にはかなり中立で、フィードバックの役割などに集中した。現在では複雑系を作り出し維持するメカニズムや複雑系を記述するツールに集中している。

サイモンによると、弱い意味で「創発」を理解することが現代の傾向である。つまり、孤立した部分には存在しなかった新たな性質は、相互作用によって発現するというものだ。物体間の重力による引力は二つ以上の物体が相互作用する場合にのみ存在しうる。二つの星の間の重力加速度について語ることはできても、孤立した星については語れない。サイモンはこういう例を挙げる。もちろんこれは多くの還元主義者も認めるものだ。現在の、「複雑適応系」や「遺伝的アルゴリズム」などは、全体としての性質が創発するか自己組織化ということを言って、要素に還元できない性質が現れることを強調する。しかし、その場合でもその全体としての性質が、局所的な規則だけを使うだけでコンピュータシミュレーションによって創発すると言う。例えば、ボイドという言葉プログラムによると、三種の単純なルールを使うことによって、群れになった個々の鳥のそれぞれの運動をプログラムするよりも、かえって自然な群れの運動が記述できる。また、複雑

に見える現象は複雑な多数の法則が絡み合つて生ずるというのではなく、カオス理論を使えばその現象も単純な数式で表されると言う。例えば、ヤリイカの巨大神経膜が示す多様なカオス応答が、非線形微分方程式の解として記述できることが知られている。<sup>(6)</sup>このようにシミュレーションや非線形数学の理論を使うことによつて、全体は部分の和ではないという全体論を解釈し直している。創発は部分の非線形的な相互作用によつて生じるといふのが、複雑系の科学の研究プログラムだ。もちろん、部分の性質の知識から全体の性質を厳密に推論することは全く容易でないので、大きな研究分野として成り立っている。

ちなみに、科学の内部でも従来から複雑系の問題設定は受け入れていたという指摘が存する。例えば、田中正は物理学が単純な分析的方法をとると考えて、物理学に対して要素還元主義批判を行うのは物理学を理解していないためだと述べる。物理学は単に「法則発見の学」と見なしてはならないと述べ、普遍的法則から具体的現象へと向かう上昇過程が物理の現場には存在すると指摘する。例えば、ラザフォードに始まる原子核、電子の発見は分析・下向過程に対応する。しかし、物理学者はラザフォード模型にとどまらず、その模型によつて現実の原子が示す多様な特性、例えば個々の原子が発する特有の光のスペクトル構造をもたらずかを研究しようと

したのだ。つまり、物理学者も階層の問題として創発を理解していたというのだ。そしてこの論点は物理学の中ではある意味で当然のことと認められており生物学などでも指摘されている。<sup>(7)</sup>研究はそれぞれの階層ごとに進んできた。そのつながりをつけることも研究対象になつていく。しかし、この研究がそれほど容易ではないことはほとんどの人が認めている。この意味で、物理学内部の研究方向の一部とも対応して、複雑系の研究が行われていると見なすこともできる。

結局、複雑系の研究が今までになかった全く独自のものであるかどうかはともかくとして、現代の複雑系は非線形的で予測のできない相互作用を扱おうとしているとは言える。まず第一に、三体問題（という意味での相互作用）の研究を行ったポアンカレはカオス理論の祖と言われている。もちろん、数学は自律的な研究が行われるために、研究対象そのものは相互作用の話に限定されなくなっている。第二に、ラングトンの人工生命のような研究は、要素の動くルールを決めた上で、その相互作用によつてそこからどのような秩序ができるかをシミュレーションしようとする。第三に、物理や化学や生物で基本粒子や基本法則の追求だけでは不十分だと言っているのも、粒子の存在は認めた上で、その相互作用から生じる現象をうまく捉える方法を探しているように思える。特に、どうやって秩序が出来るかを考えようとしている。

## 二 考察の枠組みと問題設定

以上は複雑系研究者が実際に行っていること(説明していることではない)を基にした説明になっている。一般に、科学者や工学者が哲学的な概念を適切に用いて自分の学問を記述していると過信すると、とんでもないことになる。また、(AIに典型的だったように)現に実現している事柄と今後の展望との間にギャップがあることを見逃してはいけない。だから、いわゆる先端科学の成果を哲学に取り入れようとする、まず、その成果が哲学的にどの程度のものであるかを値踏みする必要があると考えた。研究の成果というものと、アイデアの提出や研究プログラムの提示とは違っている。実際に何が行われているかを確定する必要がある。例えば、複雑系の研究者が「反還元主義」を主張していても、その言葉ほどの程度のことを言っているかを吟味する必要がある。そして、そのなかで評価すべき部分を取り出す必要がある。例えば、複雑系の研究対象は典型的には有機体だと言われる。そして、脳は究極の複雑系だという言い方を聞くと、生物や有機体と結びつく全体論の見直しが論点であるように思えるかもしれない。しかし、部分だけでは全体が分らないという論点は、単純に昔の全体論や生気論の復活を提起しているわけではない。複雑系の研究者が実際に行っていることは極

端な反還元主義とは違って、弱い意味で創発を理解しているという点を前節で指摘した。

それでは、複雑系の研究に何か新しい哲学的な問題設定があるだろうか。

ときには複雑系に典型的な実例が取り上げられることも多い。おもしろい現象が見つかった。そのイメージを基にして世界を考えようとする。例えばバタフライ効果や自己組織化などである。そのイメージを膨らませてどういう帰結が生じるかを見ていこうとする。しかし、非線形現象がすべて実際上意味のあるバタフライ効果を持っているわけではない。例えば、太陽系の惑星の運動は多体問題の実例になっているためにカオスになっている。そのため一〇億年後の日食はいつかといった計算はできない。しかしもちろん一〇〇年程度のオーダーでは日食や月食の起きる日時を極めて正確に予測できる。また、一般に数値天気予報の予報限界はカオス理論により約二週間と言われている。つまり、それより短期の予測にはカオス理論はあまり大きな影響を与えない。そして次に非線形方程式に従う現象はどんな状況でも自己組織化が起こるわけではなく乱流になる場合もある。また、例えば経済を思い浮かべても分かるように、自己組織化が生じてもそこに生じる秩序が望ましいものとは限らない。そして、この世界の秩序はすべて自己組織化に由来するかといえば、もちろん

そうではない。また秩序の形成とは違って、バタフライ効果があるためにこの世界はすぐに混沌となり、我々のコントロールできないものになってしまうかといえそうではない。実際、カオス理論で扱えるタイプの混沌とした状態だということが分かったとしたら、その知識を利用してある程度その現象を予測したり、コントロールしたりすることができる。例えば、カオス的な不整脈を起こすウサギの心臓に電気信号を与えて、規則正しい脈拍へコントロールするという実験が報告されている。

複雑系に関してよく取り上げられるトピックが現象として非常に面白く奇妙なために、何か新しい哲学的論点を含むのではないかという予想に反して、差し当たり現実は期待外れかもしれない。提案された個別のモデルの説明力は、ニュートンの運動方程式の説明力には、普遍性の点で及ばないし、非線形微分方程式という仕方での一般化はあらゆる方程式を含んでしまい世界の理解に関してはニュートンほど単純な像を結ばせてくれない。しかし、複雑系が二世紀につながる新しい科学だという主張に関しては考察に値するように思える。それは非線形の要素を組み合わせたときに容易に予想できないことが起こるということに、多くの複雑系の研究者の関心があるからだ。そしてこれは、いわゆる分析的方法では扱いにくい対象であることも事実だ。しかし、複雑系の研究

者は物理学者であった人も多いのであり、分析的な方法を頭から拒否しているわけでもない。ただ、カオス理論という数学やコンピュータを使うという点が特に強調されている。もちろんこのような方法論を使うだけでは全く新しい科学が成立したとはとても言えないように思えるかもしれない。しかし、単純に従来の方法では取り扱えないという感じを持っている研究者も多いので、彼らの感覚をもう少し説明する必要がある。

つまり、複雑系の研究でよく使われているシミュレーションなどの位置づけやコンピュータを使うことの意義を見ておかないといけない。そして、複雑系の研究方法としての有限数学、コンピュータの数値計算などを位置づける必要がある。またそこでは、シミュレーションが実験として使われるが、これは科学の通常の実験と少し違っているように思える。以上の論点の解明が、複雑系を学問として位置づける際に必要となる。

そして、このように理解された複雑系がわれわれの生活にまで、またものの見方にまで影響する広がりを持ちうるかを考える必要がある。相対論や量子力学は、科学論を超えた影響力を持っていた。その意味で、(もしあるとすれば)複雑系の研究がもっている意味を解明する必要がある。

このように見てくると、複雑系の哲学的問題として残るのは、コンピュータの使用やシミュレーションの使用を科学方法論（複雑系の研究者がときに構成的方法と呼ぶことがある）としてどう位置づけるかという問題と、複雑系研究が新しい学問だと言おうとするときの基本的関心が何を指し示しているかという問題の二つだ。<sup>(17)</sup>

まずシミュレーションの位置づけの問題である。複雑系の研究に限られず、コンピュータ・シミュレーションや有限要素法、数値解析は現在の科学や工学の分野で頻繁に使われている。工学の設計に対する有用性からいってもこれらの方法の役割は非常に大きいものである。その意味で、テクノロジーを理解するためにもこれらの方法論の吟味をする必要がある。

まず科学における分析的方法を簡単に取り上げ、それとの対比でシミュレーションを位置づけることにする。

最初に例示するのは、実験がどういう意味で分析的かということだ。例えば、ある薬Aが低血圧を起すかどうかを実験によって確かめようとする。まず、ラットを使いそれ对照群と実験群に分ける。ここで使われるラットは同じ遺伝系列から取ってきて、両グループが血圧、性、年齢、体重など

について同じ平均と分散になるようにする。また食事や温度なども同じにする。ただ、実験群のラットはAという薬を与え、対照群のラットにはそれを与えない。もちろん薬を注射することそのものが二つのグループの差異になるかもしれないので、対照群のラットにも例えば蒸留水を注射する。こうして最終的にそれぞれのグループのラットの血圧を測り、実験群のラットの血圧が対照群のラットの血圧よりも低いならばAという薬がその低下の原因だと結論できる。このように原因を確定しようとする場合には、結果に關与する条件を分割してそれをコントロールすることが必要になる。実験室の中で十分コントロールされた状態を作らないと、本当にその薬が原因であつて、他のものが原因でなかつたことを保証できない。ときには、いい結果を得たいという実験者の無意識的バイアスが血圧の記録に無意識の誤りを犯させるといふ予想もできなかった原因が効くこともありうる。このような意味で、原因の確定には、「要因の分析」が必要であり、それを「コントロールされた状態で試験すること」が求められる。さまざまな要因が絡み合っている現実の状況では、このタイプの実験を行つても確定的な結果を見出すのは難しい。

これを一般の科学実験の典型例とすると、シミュレーションで試そうとするのは、さまざまな要因があつたときにそれらが相互作用したら何が起るかを見ようとしている。コン

ピュータシミュレーションの場合は、再現性とか初期条件の設定とかが容易であるという点も、ラットの実験とは違っている。つまり、どのように実験をリファインしていくべきかという指針が、一般の実験とシミュレーションとは違っている。

科学の分析的方法では、原子や分子のような要素が発見されるだけでなく、物理法則が発見されると言われる。そして物理法則は通常微分方程式で記述される。シミュレーションの問題が出てくるのはこの後である。典型的には微分方程式は、ある物体に対してある時点でかかる力の大きさと方向を示している。例えば二体問題にしろ三体問題にしろ、質点にかかる運動方程式は割に単純に書くことができる。さて、複雑系では局所的な性質と全体の性質とのギャップが問題になっていた。この点を言い換えると、一般に物体の運動を支配する微分方程式が分かってもそこからそれを積分してその物体の将来の運動を予測することができないということである。そして積分は、非線形の場合には一般に解析的に解けない。そのため、コンピュータによる数値解法が必要となる。ある要素にどういふ力が働いているかを説明することと、それらの力が総合されたときに何が起こるかを理解することとはかなり違う難しさがある。このとき、コンピュータを使って数値計算するということは、ある有限の値で近似していること

を意味する。

ここでは、原因や仮説を背景から孤立させずに理論的体系を作ることを考えるべきだ、ということが問題になっているわけではない。いわば、現象を説明する仮説として微分方程式を作ることに對して、(それを認めた上で)それを積分することによってそれらの原因を組み合わせた場合にどのような「現象」が起こるかを説明しようとしているのだ。仮説の検証の手續きの一部として具体的実験が取り上げられることはあっても、現象を構成するときの困難さが注目されることは少ない。しかし、解を求めること自体が非常に困難なので、数値解を求める方法論自体の解明も必要となる。この方法論の問題はもちろん複雑系に限られはしないが複雑系の研究によって特に取り出されたものである。その意味で、複雑系に對する方法論の学問的な位置づけも必要となる。

科学の営為がすべて還元的とはいえないにしても、科学方法論として「特に」取り上げられるのはいわゆる分析的方法である。原因を見つける方法や理論を検証する方法が取り上げられている。科学の示す知識は、この世界の「本当の」姿を示すものであるかどうかということが、哲学的に問題になっていた。それに対して、原因を組み合わせる何が起こるか、そしてそれをどうして保証するかという問題も(たとえ科学法則が基本的に正しいと認めたとしても)無視できない難しさ



を含んでいる。

解を求めるということについては、「原理的」に解が求められるということだけで十分だと言われるかも知れない。たぶん、自然がどうなっているかという存在論の問題としては、究極の「原因」や「法則」が見つければいいかもしれない。しかしながら、人工物を作ろうとしたり、我々人間が、測定したり予測したりするときには、原理的という条件に止まることはできない。このように世界に対処しようとするときに、解を求めることに意味が出てくる。環境問題はこの世界が何であるかということを超えて、この世界に対処しようとする問題だ。このときは、複雑な相互作用に関して解を求めることが重要になる。したがって、その研究の仕方に対する根拠づけや吟味が必要になる。

#### 四 哲学的問題 その二

以上で、シミュレーションや積分は仮説演繹法で位置づけられた実験とは違ったものであることを示そうとしたが、にもかかわらず、科学方法論固有の問題はたいした論点ではないと言われるかもしれない。ただ、工学やテクノロジーの問題を考えるとときには、複雑系の基本的な方法論であるシミュレーションは重要である。

さて、複雑系のサンタフェ研究所ではさらに複雑系の「統

一理論」が提案されているが、今のところそままでの主張にはまだ実質はない。しかし、複雑系の研究対象は新しいものではなくても重要であり、分析が困難であることは間違いない。これは、基本的には要素を総合する場合、予測する場合に生じる問題の難しさに気づいていることだと思われる。そして複雑系が問題にする対象は非線形の相互作用をする多数の対象である。このような対象を昔から扱っていたのは工学である。このように、工学やテクノロジーを複雑系を対象とする学問とみなすことによって、複雑系という特殊な科学的流行のテーマを超えた意味を見出したい。

工学の話に入る前に、これまで問題にしてきた点を別の観点から見直してみる。例えば野球を知らない人がテレビで観戦していて、野球のルールを発見しようとしていたとする。これは、すべての試合に共通するルールを求めるという意味で、科学的法則を探求する行為と類比的だ。しかし、どうすれば面白いゲームになるとか試合に勝てるかというような、ゲームをデザインし戦略を練ることは、野球のルールを発見することとは違っている。そして、ルールを知ってもそれだけで勝てることにはならない。正しい予想を立て、そのための設計をすることは、法則を見つけることとは少し違った知識を求めることである。なかなか乱暴な比較ではあるが、こういう仕方での工学の知識は科学の知識とは違っているという

提案をしていきたい。

ここで確認しなければならぬことは、工学は（設計ということを考えても）単純に部分の和を求めているのではないということにまず気づかなければならない。そんなに単純なことをしているなら、設計十年というように、設計者として一人前になるのにそんなに長い時間がかかるとは思えない。また、工学は要素の非線形の作用を無視することはできない。例えば線形近似をすることによって、きれいな理論は作れるかもしれないが、非線形の作用を無視したことによって思わぬ力がかかって橋が落ちてしまうというようなことも起こりうる。記録映像が残っているので有名なタコマ・ナローズ橋はこの例だ。つまり、非線形な作用を考慮に入れつつ「ものづくり」をしている。（工学者もいろいろな研究をしているが、ここでは総合する試み、設計し製造する試みに特に注目する。）そしてできるだけモジュールを作り上げて、相互作用から生じる奇妙な影響をできるだけ無くそうとしている。その上で、部品を組み立てようとする。

工学は、部分の相互作用を認めつつ組み立てを行ってきたという点で、複雑系を扱う典型的な学問といえる。高価な自動車や壁にぶつけて壊すという衝突実験を今でも常にしなければならぬということは、総合された製品である自動車（材料の科学的分析だけでは解明できない）複雑系であること

を端的に示している。いわゆる部分を機械的に組み立てたものと考えているならばこのようなコストのかかる実験は余分な影響も考えに入れて排除されてきた摩擦のような非線形的と故障や破壊が起こったりする。また、面白いことに工学では（理論的な解明が完結しないままでも）フェイルセーフのような仕方で非線形と結びつく複雑性に対処してきた。生物はもちろん複雑系であるが、まだ分析が完結しているわけはないので、理解の枠組みを求め点では問題を含む。したがって、工学の知識を解明することによって、複雑系を理解する道が開けるのではないかと考えられる。

さらに、工学は技能と科学の単なる応用のどちらにも解釈し尽くせない面をもっている。科学の応用という面を強調し過ぎると、いわゆる還元主義的な考え方（いわゆる物理学帝國主義）になる。認識論的な問題は工学にはあまり残っていないとするものだ。あとは、政治や経済との関わりで科学技術の役割を考えればいいということになってしまう。工学を複雑系と見ることは、少なくとも単なる応用といっても難しい部分が非常に多いことを示している。これと対比的に、工学を技能として特徴づけるとすると、いわば生氣論のような非合理的部分を強調することになる。これは、人工知

能の研究においても、エキスパートシステムの批判という論点と絡めて提出されたが、京都に五〇メートルを超えた駅ビルができるようになったというように、科学技術の知識が累積するという点は否定しようがない。だから、技能だけを強調するのには無理がある。

第一次近似として工学を複雑系の学問と理解することは、知識の内容は科学がすべて与えて、その目的だけが工学やテクノロジーに特有だという考えを否定する。つまり、分析し解析することと対比した、総合することが工学の大きな仕事である。このとき、非線形の相互作用をする部分をどのよう組み合わせて要求された機能を実現できるかということが工学が特に目指す仕事である。

ただし、工学が複雑系を扱うやり方は、「理解」という方法よりも、「つくる」という方法を使う。学問や説明可能性という点からは問題があっても、工学の知識を解明することによってテクノロジーの理解にも新たな視点が開けるのではないかと思う。

物理学や生物学で階層という場合でも、それぞれの階層についてはある程度理解が進んでいる。その結びつき方を明確にしようというのが物理や生物における、分析的傾向とは違った研究方向である。工学のような人工物においては、目的とするものは最初は存在しない。にもかかわらず、多量で多

様な要素を総合して「上の階層」を目指そうとするときは、最適化や安全性などさらに考慮すべきことが存在する。成熟した工学の分野では類似の機械はこれまでにも作られてきてるので全くの創造をしているわけではもちろんない。しかし、それを扱う方法としてはシミュレーションや昔からの実験という工学で用いられてきた方法が典型的だ。自然のもの認識という方向とは違った方向が問題になっている。

病気の原因が分かれば結果は分かるし結果をコントロールできると思われていた。しかし、現実はそんなに単純ではないというのが複雑な相互作用というものだ。このように複雑系の研究対象は新しいものではなくても重要であり、分析が困難であることは間違いない。これは、基本的には総合する場合、予測する場合に生じる問題の難しさに気づいていることだと思われる。したがって、特にその問題を扱ってきた「工学」の学問性の問題に焦点を合わせることができる。世界がどうなっているかよりも、世界にどう対処していくかを考えるときに工学のもの見方は教訓的だと思う。この意味で複雑系の研究が（未だ出来上がっていないにしても）新しい学問を提起するなら、シミュレーションのような方法が、どのような場合にどの程度信頼性を有するかといった問題を考察する必要がある。さらに、複雑系が提示する問題を考察することは、我々の生きている世界に多大の影響を与えてい

るテクノロジーを理解する一つの枠組みを与えるという点でも意義があるのではないかと思う。

註

(1) この節の基本的論点とそれを支持する事例や証拠については、斎藤了文『複雑系の流行』『大阪体育大学紀要』第二八巻、一九九七年、一八三—一九六頁、を参照。

(2) Seth Lloydが三二種類もしくは四五種類の complexity の定義をまとめている。John Horgan, *The End of Science*, BROADWAY, 1996, p.303, 参照(なお、口頭発表後邦訳が出版された。『科学の終焉』ジョン・ホーガン、徳間書店、一九九七年)。

また、日本の研究者に対するカオス理論やコンプレキシティに関するアンケートを見ても complexity や complex system の定義については、多要素、相互作用、非線形、非平衡、予測不能などのキーワードはよく使われているものの完全に一致しているとは言い難い。「工業および産業におけるカオスとコンプレキシティ(複雑性)に関する意識調査」『バイオおよびカオス応用に関する調査報告書』一九九五(平成七)年三月、社団法人日本電子工業振興協会、四三頁以下、参照。

(3) Warren Weaver, *Science and Complexity*. *American Scientist*, 36, 1948, pp. 536-44.

(4) マレイ・ゲルマン『クォークとジャガー』草思社、一九九七年八月。

(5) Herbert A. Simon, *Alternative Views of Complexity*, *The Sciences of the Artificial* (3rd ed.) Ch. 7, MIT Press, 1996.

(6) 合原一幸「カオス・複雑系と工学」『複雑系がひらく世界』(別冊日経サイエンス一二〇)一九九七年。

(7) 田中正『物理学と自然の哲学』新日本出版社、一九九五年、三

六頁。また、「特集階層のある系の物理学」『日本物理学会誌』五〇巻四号、一九九五年、も参照。生物学では、団まりな『生物の複雑さを読む 階層性の生物学』(自然叢書三〇)、平凡社、一九九六年、を参照。また複雑系を階層を基にして論じているのは、H.A. Simon, *The Sciences of the Artificial*, MIT Press (第二版の邦訳 H・A・サイモン『新版システムの科学』パーソナルメディア)、である。

(8) 田中 博「カオスの壁を越える天気予報の夢」『電気学会誌』一七巻九号、一九九七年。

(9) 合原一幸「カオス、複雑さを取り込む」『談』一九九四年秋号、たばこ総合研究センター。

(10) ここでの問題設定は、内井惣七「カオス、複雑系、科学方法論」『科学哲学』二八、一九九五年、に刺激を受けている。

(11) 世界そのものが複雑であるのか、それを認識する我々が有限なために複雑だと思ふのかという問題も提起できる。世界の記述は典型的には非線形的になるとするのが前者の論点だ。しかし、非線形的な相互作用を扱うためには、通常はコンピュータが必要だし、そのときの時間や記憶容量の制限などを無視することはできない。すると、特に存在論的な主張を強調しても、世界に対処しようとする関心に立つ限り、われわれの生き方に影響する問題設定にはなっていない。

(12) ここで議論は、木村龍治「自然法則で自然現象が予測できるか」『科学』一九九五年六月号、を下敷きにしている。