

〔大阪体育大学紀要  
第28巻(1997) pp.183-196〕

# 複 雑 系 の 流 行

齊 藤 了 文

Current Topics of Complexity

Norifumi SAITO

BULLETIN  
OF  
OSAKA UNIVERSITY OF HEALTH  
AND SPORT SCIENCES

〔大阪体育大学紀要  
第28巻 (1997) pp.183-196〕

# 複雑系の流行

齊藤了文

1997年3月31日受付

Current Topics of Complexity

Norifumi SAITO

## 第1節 複雑系流行の現状

複雑な系に関する個別的な研究は昔から行われている。しかし、このごろ複雑系が注目されるようになったのはどのような関心が大きいのか。そこにはどういう問題設定が行われているのか。この点の解明が、この論文の主題である。複雑系の由来を歴史的にたどるといっても、現在の複雑系の流行の中心をなすアイデアを探ろうとする。

### 複雑系のほめ殺し

M. ミッチェル・ワールドロップ 著『複雑系』日本語版の著書の帯にはすごい宣伝文句が書いてある。「今、米国サンタフェ研究所に驚くべき科学革命が進行している。なぜ、ソビエト連邦は劇的に崩壊したのか？なぜ、1987年10月、株式は暴落したのか？なぜ、恐竜は絶滅したのか？なぜ、アミノ酸は生命と化したのか？なぜ、人口問題は防げないのか？なぜ、WINDOWSは圧倒的なシェアを握ったのか？生命とは何か？進化とは何か？精神とは何か？全ての鍵は「複雑系」にある！」<sup>1)</sup>そして、表紙にはこれらをまとめたキャッチフレーズとして「生命現象から政治、経済まで

を統合する知の革命」と記されている。

また、週間ダイヤモンドの「『複雑系』の衝撃」特集でも、その特集の最初に「自然と社会には多くの「謎」が存在するし、予測不可能なことは数限りなくある。今、安定したシステムが突然変化する仕組みを科学・経済学が研究しはじめている。「複雑系 complex system」である。さまざまな分野に应用可能なこの「知の大革命」を特集する。」<sup>2)</sup>と述べられている。『複雑系』はサンタフェ研究所<sup>3)</sup>の誇らしげな自伝(自己宣伝?)であり、ダイヤモンドの特集もサンタフェ研究所の紹介が大きな位置を占めている。その意味で、複雑系の流行にはサンタフェ研究所の仕事が大きな役割を果たしている<sup>4)</sup>。

さて、複雑系は全ての現象を説明すると言われる。例えば「大地震や経済恐慌を説明する数学理論」という邦訳の題名をもつ論文<sup>5)</sup>がある。このように、何でも説明すると称する科学理論が出てきたのは、カタストロフィーの理論以来久しぶりのことである。

しかしこのような流行については、複雑系の研究者と言われる人々の間にもその軽薄さが危惧されている。

「しかし、これからが大変だと思います。かつて、ファジーやカオスが一時期注目されたことがあった。複雑系が一つの流行に終わってしまっただけではないと思う。複雑系はそれだけの深みをもっているもので、あまりトピカルに言葉を振り回すのではなく、これから何を考えていかなければならないかを、さらにじっくり議論していかなければなりません。」<sup>6)</sup>

「なお、最近の「複雑系」ブームの中には、サンタフェ研究所の宣伝活動に便乗した軽薄なものが多いので注意されたい（但しサンタフェ研究所の若手が行った研究には、重要なものがいくつかある）。」<sup>7)</sup>

こういったものが、複雑系の最近の大騒ぎの一端であり、それに対する複雑系の研究者の典型的な反応である。

#### 最近の流行の兆候

もう少し詳細に、複雑系の流行を概観し、その特徴を取り出してみよう。さしあたりここでは、「複雑系」をめぐる、カオス、非線形、フラクタル、ニューラルネットワークという典型的なキーワードに注目する。

まず、『日経サイエンス』（日経サイエンス社）の少し古い『掲載論文分野別一覧』（1991年9月25日発行）を見ると、そこでは、1971年10月の創刊から1991年9月の通巻240号に至る1981本の論文がジャンル別に26に分類されている。ここには複雑系は分類項目として挙げられていない。それに対して、それから5年後に纏められた、『日経サイエンス』の『掲載論文分野別一覧』（1996年10月1日発行）は、1971年10月の創刊から1996年9月の通巻300号の全論文をジャンル別に28に分類している。このとき「資源」と「エネルギー」の2項目が統合され、新たな項目として登場したのが「コンピュータ」「人間と行動」「複雑系」である。「複雑系」という項目においては、1991年10

月以前の論文は3つ、それ以降の論文が17挙げられている。ここにはサンタフェ研究所での研究の紹介も含まれているが、日本人の独自の研究も多く含まれている。

また『日経サイエンス』では、1992年3月号で「カオス」を特集し、1994年5月号で「複雑系の科学」を特集している。またこの夏にも『別冊・日経サイエンス』として複雑系の特集が出る予定である。この意味で、『日経サイエンス』においては、ここ数年間で論文紹介の量を含めて複雑系の流行に貢献している。

『数理科学』（サイエンス社）では、1989年5月号では「カオス 複雑な系のダイナミクス」を、1992年6月号で「応用カオス」を、1995年3月号で「生命とカオス」を、1996年6月号で「複雑系生成と崩壊のダイナミクス」を特集している。また、『別冊・数理科学』においてもカオスに関わるものは、『流れの数理 乱流・カオス・フラクタル』1987・10、『現象にひそむ非線形 カオスの母』1989・10、『ゆらぎ・カオス・フラクタル』1994・4といったものがある。数理的方法を中心に扱うこの雑誌においては、数学理論としてのカオス理論を軸に以前から非線形力学に関する話題は何度か特集されている。

また、1986年1月に発刊され、“Physics Today”の論文の翻訳を中心にした物理科学誌『パリティ』（丸善）では、「カオス」というキーワードを含む論文が創刊号からあるだけでなく、物理学内部の多様な領域のカオスが取り上げられている。そこには、他の雑誌にはあまりない「複雑性」というキーワードを含む論文が時折見られる。特徴的なのは、1993年6月号の特集「“複雑さ”を追求する物性物理」である。しかも、1994年3月にはこれまでの雑誌掲載論文を編集して別冊No.10『カオス—複雑さに内在する規則性—』を出している。ただこの雑誌はあまり見かけないの

で、流行に対する影響力の点では疑問である。

次に、数学一般を扱う啓蒙雑誌である『数学セミナー』（日本評論社）では、1987年9月号で「フラクタルって何だろう」が特集されて以降は、1992年12月号で「カオス再考」の特集が組まれるまでは、カオスに関わる論文も非線形を題として含む論文も年に2、3本掲載される程度にすぎなかった。そしてそれ以降もこのようなテーマでの論文数は余り増えていない。この意味で、複雑系に関する話題は、数学の他の話題に比べて特に顕著な位置を占めているわけではない。

面白いことに、日本の科学雑誌としては老舗の『科学』（岩波書店）や『Newton』（教育社）では複雑系の扱いはそれほど熱心ではない。『科学』は、1990年から1996年にかけてカオスやフラクタルに関わる論文は年に1、2本程度である。その中で「脳の高次機能」の特集（1991年4月）で、カオスや複雑系に関する論文が2編掲載されていることと、From the USA という毎月のコラムを担当している Roger Lewin<sup>9)</sup> が1992年に複雑系に関わる幾つかの話題を紹介していることだけが注目される。さらに、『Newton』においては、1981年に創刊以来、フラクタルについての解説が一度掲載（1989年11月）された後も、カオスや複雑系に関する話題は年1篇ほどにも達しない。これは、『Newton』が天文学、地球科学、生物学を中心に編集されているからだけではない。例えば複雑系の典型とされる脳の特集においても、複雑系という扱いは全くされていない<sup>9)</sup>。恐らく、編集方針として科学の理論的側面より、実験、観察の側面、また科学技術の成果の紹介が中心になっているからではないかと思われる。

次に、幾つかの理工系の学会誌を見てみよう<sup>10)</sup>。

例えば、日本物理学会は、1996年に創立50周年を記念して「50年をかえりみる」という年間にわたる特集を組んでいる<sup>11)</sup>。しかしそこでは特に複

雑系に関わるキーワード挙げた論文はない。もちろん、カオスやフラクタルというキーワードを含んだ一般論文や解説はある。その点から見ると、複雑系は物理学会の主流にはなっていないことが見て取れる<sup>12)</sup>。

また、コンピュータのソフトウェアに関する基礎理論を研究する情報処理学会の学会誌である『情報処理』においては、1988年9月号で「ニューロ・コンピュータに向けて」という小特集があり、1994年4月号から6月号にかけて「様々な角度から見たニューラルネットワークの将来像」という連載で合計9本の論文が掲載されている。しかし、複雑系やカオスについて論じた論文は、この数年間を見ても非常に少ない。これはおそらく、カオス理論を扱う「解析的手法」が、ソフトウェアをプログラミングする「アルゴリズム的手法」と非常に違うということに由来するのではないだろうか。

また、ハードも含んだ情報通信の分野を扱う電子情報通信学会の『電子情報通信学会誌』においては、1990年2月号の「脳における情報処理」において、ニューラルネットワークが工学的アプローチ及び数理的アプローチとして紹介され、更に同年7月号で「ニューラルネットワークとその応用」の特集を組んでいる。その後、1994年2月に「人工生命」の小特集を組んでいる。『電子情報通信学会誌』においては、ニューロについては時折紹介されるが、カオスやフラクタルというキーワードを含む論文はここ数年で合計2、3編に過ぎない。しかし、学会内では1975年から、非線形問題についての研究会が行われ『電子情報通信学会技術研究報告』という形でその報告書が発行されている。1975年には年間7回研究会を開き、280ページ程度だったものが今では年間12回、合計年900ページに近いものになっている。工学は様々な基礎技術を総合する必要があるため、カオスな

どは一般学会員のための学会誌で紹介されることは少ないが、カオスを初めとする非線形問題についての着実で精力的な基礎研究が一方では行われていることが見とれる。

次に、工学の中でも成熟した学会である機械工学会の学会誌『機械学会誌』では、カオス、ニューロ、遺伝的アルゴリズムなどのキーワード<sup>13)</sup>を含む論文が平成元年以降、平均して年に2、3本掲載されている。そして、1993年の10月から「知りたい用語・気になる概念」という1年間の連載講座が始まり、その中ですぐ上に述べた3つの概念が紹介されているという点と、1994年に「生命、そして人工生命の可能性」という特集が組まれたという点とが注目される。成熟した学会は、学問の大きな枠組みは出来上がっているということなので、活性化のために新たなアイデアを常に必要としている<sup>14)</sup>。その意味で、特集も含めてアイデアの一般的な紹介としては納得のいくものである。

AIブームの中、1986年に設立された人工知能学会の『人工知能学会誌』においては、早くも1989年3月号で「ニューラルネットワーク」の特集を組んでいる。また1994年7月号では「遺伝的アルゴリズムの新しい潮流」という小特集を組んでいる。このように、『人工知能学会誌』では、1988年以降、「ニューラルネットワーク」というキーワードを中心に、年間数篇から十数篇の論文が掲載されている。新しい学会だけに多くの方法論を手元に持っていないということもあろうが、この掲載件数は他の学会誌に比べて非常に高い割合である。脳や高次知能を工学的に扱おうとする場合に、例えば論理プログラミングを使って意識過程を記述するだけでは不十分であって、複雑系という見方もこのころから徐々に有望だと感じられてきたことにもその高い割合は淵源しているように思える。

さて、経済学の分野に関わる雑誌では、『週間ダイヤモンド』が、1996年11月2日特大号で、「『複雑系』の衝撃」の特集をしている。これは基本的に、サンタフェ研究所の紹介と経済学に関わる複雑系の問題を扱っている。多くのサラリーマンに対する影響という点からみるとこれはなかなか大きいインパクトがあったと思われる<sup>15)</sup>。

思想系の雑誌では、『現代思想』（青土社）が、1994年5月号で「カオス—複雑系のエピステーメ」の特集を行い、1996年11月号で「複雑系」の特集を組んでいる。また、『談』（たばこ総合研究センター編集・発行）は1994年秋号で「複雑系…カオスの辺縁」の特集を行っている。これらの雑誌は新しいキーワードには見境なく飛びつくことによって「知識人」に対する流行を作り出しているのだろう。

#### ま と め

雑誌の特集を中心にした以上の概観から4つのことが理解される。

- ①科学技術の成果や自然の驚異の啓蒙をする雑誌では、複雑系はほとんど取り上げられない。逆に数学プロパーの雑誌ではカオスの紹介はあっても、特に流行している様子はない。いわばその中間の応用数学、数理モデルを扱う雑誌で複雑系に関わるテーマが多く取り上げられている。しかも、いくつかのテーマに関しては外国の成果の紹介にとどまるのではなく、日本でも着実な基礎研究が行われてきている。
- ②日経サイエンスの記事や週間ダイヤモンドの特集記事を中心とした、サンタフェ研究所の紹介を通じて経済界をはじめとする一般の人々の関心を引くようになった<sup>16)</sup>。
- ③複雑系は科学、工学、経済などの多くの分野で扱われている。そこから考えると全てを説明する複雑系というスローガンは、数理モデルの普遍的適用とむすびついているのだろう。

④複雑系と総称されているもののうちのキーワードが取り上げられるかは、各雑誌ごとに、更に言えば各学会ごとに違っている。これはそれぞれの学会が何に関心を持っているかに依存している。その中で、マスコミに対する流行とは少し離れたところで、つまり工学のいくつかの分野で複雑系に関わる概念が割に早いうちから取り上げられていたことは注目に値する。

## 第2節 複雑系の特徴

### 何が複雑系なのか

現在使われている「複雑系、複雑性、complexity」という言葉の一つの源泉は恐らく Warren Weaver の “Science and Complexity” という論文<sup>17)</sup>にあるようにおもえる。そこでの論点は以下のようなものである。

1900年以前の物理科学は主として2変数の「単純性の問題」に関わっていた。一方このころの生命科学は定量的で分析的な性格を持つにいたらなかった。

1900年以後、「組織化されていない複雑性の問題」が扱われることになり、確率論と統計力学がそれを扱う道具となった。この問題は「変数の数が非常に大きく、多くの変数のそれぞれが個別には不規則であるか全く知られていない行動をする問題である」。しかし、個々の変数のそれぞれの行動は乱雑ではあっても、全体としてのシステムはある秩序をもち、分析できる平均的性質をもっている。

「組織化された複雑性の問題」はこの中間段階に存する。つまり古典的な物理的方法も使えず統計的な性質を取り出すだけでは不十分な問題である。つまり、「マツヨイグサの花を咲かせるものは何であるか？」とか「塩水はなぜ湯きを満たさないか？」といった有機体的全体に相関するかなり大きい数の要素を同時に扱わねばならない問題で

ある。これはもちろん生物に限定される問題ではなく、経済に関する問題や労働組合といった組織化されたグループの行動パターンを説明する問題も含んでいる。

ウィーバーは、この組織化された複雑性の問題の扱い方を科学がここ50年以上学ばねばならないと指摘した。そしてそこで使用出来る方法として、コンピュータとORを挙げている。ウィーバーが50年ほど前にこのような指摘をしていたことは非常に興味深い。

サンタフェ研究所の人々も、ウィーバーと同じタイプの分類をした上で、「組織化された複雑性」にあたるものを研究しようとしている。サンタフェ研究所の創立者の一人である George A. Cowan は1995年淡路島で行った講演<sup>18)</sup>でウィーバーと彼の論点を取り上げている。また Scientific American の編集者である R. ラサンはサンタフェ研究所の活動を紹介する論文の中で次のような論点を述べている。

「ニュートンたち18世紀の科学者はすでに、部部分分をすべて解明してそれらの相互作用をすべて調べれば、どんな複雑な系の振る舞いも予測できると期待していた。しかしその期待はすぐについで去ってしまった。

19世紀になると、相互作用をすべて考慮することは、たとえ不可能ではないとしてもとても現実的ではないことに、カルノー(Sadi Carnot)たちは気づいていた。相互作用する系はほとんどの場合、無限に近い数のパーツ(部分)で構成されているからだ。しかし、パーツ間の相互作用が弱い理想的な系については、系の振る舞いは統計的に予言できる。彼らはこのことを発見した。このように統計的に予言する方法はその後、熱力学の法則として体系づけられた。熱力学の法則により、気体分子が容器の中で熱せられると圧力と温度が増加する、といったことが説明できるようになっ

た。しかし、カルノーも知っていたことだが、複雑な系のほとんどは熱力学を用いて完璧に記述・表現することができない。気体分子がお互いに強く引力を及ぼすなど、複雑な系は相互作用を無視できないことが多く、このとき、熱力学は無力となるからだ。]<sup>19)</sup>

ここには科学の課題が述べられている。今までのような仕方では物理的な研究を行ってもよく分からない対象があるということの確認である。そのため、生物に似た有機的、つまり組織化された複雑性の研究を、「還元主義」ではない方法で行う必要があると言うのだ。

物理学者や化学者の関心の移行もそこに示されている。例えば、日本物理学会の会長に就任した米沢富美子は「森羅万象の営みを複雑にしているさまざまな原因の中から、表面的な複雑さを取り除き、単純な本質をとらえる」ことを、私たちは物理屋として骨の髄まで教育されてきました。湯川先生も「自然は単純なはずだ。だから、複雑でこみいった理論はどこか間違っているにちがいない」といつも言うておられました。]<sup>20)</sup>と述べている。物理学者としてはこのような考えを基本的にもっている。しかし、「複雑液体という対象を通して、物理学の従来のパラダイムで何がどこまで説明できるのか、そのパラダイムが破れをみせるところがあるのか、もしそうだとしたらそれはどこなのか、などをはっきりさせたい」]<sup>21)</sup>という問題設定を行っている。また複雑系を扱うようになった理由の一つを福井謙一は次のように述べている。つまり、今世紀には量子力学、相対論、DNAの二重らせん構造の発見という3大発見があった。しかしそのような普遍的原理があっても、そこからは論理的に演繹することが極めて難しい高温超伝導のような現象がみつかった。「つまり自然のもっている特殊性と私は言うておりますが、その自然というのは非常に普遍的な法則に支配されて

いるようでありますが、その実非常に特殊なものである。その特殊性の発見ということにサイエンスが大きなエネルギーを使うように変化していく、そういう傾向が見られるのではないかと思うわけであります。]<sup>22)</sup>つまり、普遍的法則を発見してもそれだけでは説明のできない高温超伝導とカーボン60という複雑な現象に福井は注目している。

プリゴジンやハーケンといった人々や生物系の人々は、「組織化された複雑性」に着目した研究を行っている。つまり、世界は熱力学第二法則（エントロピー増大則）に従うはずだ、即ちすべてのものは秩序を失う方向に変化していくはずなのに、生物は秩序を作っているように見える。この理由を考えて行こうとする。

また、ウィーバーの論文は、経済学者 F. A. Hayek が 1964 年に発表した “The Theory of Complex Phenomena” という論文<sup>23)</sup>にも影響を与えている。この論文でハイエクは、ウィーバーの論文を参照しつつ、組織化された複雑性（ハイエクの言葉では、パタンの複雑性）を統計学は扱えず、社会現象の分野では「関連性のあるデータをすべて探知することが不可能」だという実践的限界を強調する。したがって彼は、生命現象や社会現象が「結局は」物理的出来事の複合だという還元主義は認めても、そこから物理法則だけで社会現象を実際に予測できはしないと結論する。

また、H. A. Simon も、“The Sciences of the Artificial”<sup>24)</sup>の中で、ウィーバーの上掲の論文を引用しつつ複雑なシステムについて語っている。そこで彼は、組織化された複雑性についてこの論文では論じると断った上で、「複雑性に直面すると、原理的還元主義者も実際的な全体論者になるものである」]<sup>25)</sup>と述べる。彼は複雑なシステムの多くが階層構造になっていて、「ほとんどのものが、他のほとんどのものと弱い関係しかもってい

ない」とする準分解可能性 nearly decomposable という性格をもつものと見なす。この見方によって大多数の複雑なシステムの挙動を理解しようとする。

さて、ハイエクの考えとサイモンの限定された合理性と結び付けることも可能である<sup>26)</sup>。サイモンは1940年代から50年代にかけて、経営学の分野で人間の組織という複雑なシステムについて考え、そのころ既に「限定された合理性 bounded rationality」という概念を提出している。ここで両者を結び付けることのできる概念が計算量 complexity の理論<sup>27)</sup>である。すべての情報が与えられておらずそれを完全に処理する能力もないままに、人間は世界に適応している。この意味で、限定された合理性とは、この世界が人間にとっては複雑系として現れてくるということだ。

もう一つ、別の分野を取り上げよう。それは人工知能の分野である。これは、ニューロ・コンピュータというキーワードに大きく関わり、セルラー・オートマトンや遺伝的アルゴリズム、人工生命などもある程度のつながりをもっている。

さて、「究極の複雑系「脳」<sup>28)</sup>と言われる。そこで、非常に単純化してこの分野を概観してみる。実は生物の適応や更には知能の研究も、戦後すぐにはフィードバックやサイバネティクス<sup>29)</sup>を中心とするシャノンやウィナーの「情報理論」の考えを基にして研究が進められていた。しかし、これらは、制御理論や反射運動の説明には役立ったが、単なるハードとしての神経系のモデルの研究では高次知能の実現には遠かった。そこで、1970年ごろから、マッカーシーやミンスキーを中心とする「情報処理」の考えが中心となって、人工知能の研究が進んだ。これは、ニューエルとサイモンの物理記号系仮説として捉えられる。人間の知能を目的に向かう探索過程と捉え、それをコンピュータ内に適切に表現しプログラムしようとし

た。つまり、ハードでなくソフトの論理構造の分析を武器として、人間の知能、推論過程という高次知能を解明しようとした。しかし、この方針で人工知能を作ろうとしても余りよい成果が生まれなかった。日本の第五世代コンピュータのプロジェクト(1982-92)が終わるとともに、人工知能バブルも終わった。そのあたりから<sup>30)</sup>、論理主義の人工知能研究からニューロ・コンピュータの方向や行動による知性、また生体としての脳の研究に視点が移ってきた<sup>31)</sup>。つまり、有望だと思えるアプローチが変化していった。例えば、脳の高次情報処理機能を理解するためには、一本のニューロンの働きを調べるだけではすまず、脳神経系のある程度広い領域の(数理)モデルを作る必要が生じた。これが、ニューロ・コンピュータの研究である。

企業では人工知能研究室が、多くはマルチメディア研究室に様変わりしているようだが、特徴的なのは「情報処理学会」の中の一つの研究会有る「人工知能研究会」が「知能と複雑系研究会」<sup>32)</sup>と名称を変更し研究内容も少し変わってきたということだ。このとき注目されているアイデアが経済の分野でも出てきた「限定された合理性」だ<sup>33)</sup>。これは、論理主義批判という意味では、ニューロ・コンピュータの試みに一致するが、ソフトウェアをもとにして知能を実現しようとするアプローチを維持する点が違っている。

#### 複雑系の扱い方

さて、サンタフェ研究所は1984年に法人化された非営利組織だ。この研究所には様々な人々が属していてそれぞれ独自の研究を行っている。このうちの2人の仕事を概観することによって、彼らの方法を見ていく。

ラントンの提唱した人工生命は、複雑に見える生命の振る舞いが、実は簡単なルールの集合として表現できるという考えに基づいている。つまり、



ここでの仮定は、「アリが複雑な地形をうまく歩いているのはアリに高い知能があるからではなく、実は単純なルールに従っている」というものだ。そう考えた上で、コンピュータ内で局所的なルールを組み合わせることによって、生命的なパターンが現れるのを見ようとしている。①予めの計画（知能）なしに秩序が生じる、②シミュレーションによって具体的にパターンが提示できる、この2点が重要である。

グレイグ・レイノルズの「ボイド」というプログラムは、鳥の群れの運動のシミュレーションだ。それは「群れをまとめようとする力」「群れが同じ速度で動くように調整する力」「鳥同士が互いに近寄りすぎたときに離れる力」という3種の単純なルールだけを使うと、群れの自然な運動がシミュレーションできるというものだ。個々の鳥を中央制御しなくても群れの自然な運動が見られる<sup>34)</sup>。彼らは、生物の特質と思える、組織化された複雑性の問題を、要素が多く相互作用の強い系の特徴だとみなしてシミュレーションを使った研究をしている。

問題になるのは、多数の要素が相互作用したときに、全体として何が生じているかを理解できないことである。そのため、一つの方法として、要素の基本的な運動をプログラムして、そこから全体としてどのようなパターンが現れるかを見ていくとする。

さて、これとは違う方法がある。相互作用が強いときの系の研究は、ポアンカレによる3体問題の研究に始まり、現代ではカオス理論と呼ばれるものに結実している。3体問題は、強い相互作用の下での多くの物体の運動の典型ともいえる。この運動をカオスと特徴づけ、数学的にその特性が調べられている。この意味で、複雑系を扱えるある種の方法論が見つかったことになる。

さて、このカオスという科学用語<sup>35)</sup>は、リーと

ヨークという数学者による「周期3はカオスを意味する」<sup>36)</sup>というタイトルの論文に由来している。そしてこの論文は気象学者 E. N. Lorenz の天気予報モデル<sup>37)</sup>のアイデアに由来し、生物学者 Robert May は彼が扱っていた「ロジスティック・モデル」に生じる「奇異な現象」をリーとヨークの論文が解決できることに気づいた<sup>38)</sup>。生物学者や気象学者という複雑な現象を扱う人々が関心をもった関数を応用数学者が定理のかたちにとりあげて、その関数の性質を解明したのがカオス理論の始まりである。そして、カオス理論は数学的には確定した理論になっているため、高次元カオスという視点から複雑系を理解しようとする試みもある<sup>39)</sup>。

結局、ウィーバーと共通の問題関心が大勢を占めていた。つまり、生物を典型とする組織化された複雑性が関心の的になっていた。しかし、人工知能の研究にも見られるように生体としての脳に対する関心はただ昔に戻ったことを意味するのではない。それを扱う方法論が新たに提案され、それがある程度研究プログラムとして有望だと考えられている点が昔とは違っている。(経済系の人々は、複雑な現象に気づいてはいても、それを説明する一般論を作り上げるよりも、複雑な現象の特徴の抽出とそこからの帰結を見出す方向に向かっていた。)また、数学系の人々は、多くの非線形現象と出会い、それを扱う方法である「カオス」を発展させてきた。この場合、非線形微分方程式は解析的に解けず、数値解法が必要になる。そこで大きな力をもつのがコンピュータであった。そしてまた別に、人工生命の実例でも分かるように、個々の要素の運動の仕方が分かっているにもかかわらず、相互作用のために全体として何が起きるかは予め予想できない。そのため、このタイプの相互作用を扱えるコンピュータ・シミュレーションが用いられるようになった。(この節の初めに述べたように、

ウィーバーが既に複雑系の研究にはコンピュータが大きな役割を果たすと述べていた。)このようにして、何らかの要素の存在やある種の普遍的法則を認めた上で、複雑系の研究が行われてきたのだ。

### 第3節 4つの帰結

複雑系は生氣論ではない。

複雑系に関しては要素還元主義の批判という論点一般である。しかし、その論点については、多様である。一方では、複雑系は全体論だとされ、ホロンの概念の使用が強調されることがある。「ホロンの発想も複雑系の科学もその契機は生物学である。」<sup>40)</sup>そして、生きた経営やいのちが重視される場合もある。

それに対して第2節での概観からも理解されるように、現代の状況は実は少し違う。サイモンはこの点をうまくまとめている。彼は<sup>40)</sup>、複雑性に対する関心の移りゆきを第一次大戦後3つの時期に分けて説明している。

- ①第1次大戦後では、「全体論 holism」,「ゲシュタルト Gestalts」,「創造的進化 creative evolution」がキータームであり、
- ②第2次大戦後では、「フィードバック feedback」,「サイバネティックス cybernetics」,「情報 information」という用語が好まれ、
- ③現代では、「カオス」,「適応系」,「進化アルゴリズム」,「セルラー・オートマトン」という言葉と結びついている。

第一の時期は「全体は部分を超える」という還元主義に完全にコミットした。第二の時期は、「フィードバック」や「ホメオスタシス」が複雑な系を維持するという点を問題にしたが、還元主義であるか否かについては強い主張をしなかった。第三の時期、現代では、複雑系を作り維持する「メカニズム」や、それを分析記述する「道具」に関心が移っている。

第二期以降、還元主義は基本的にはとれない。ただ、全体を扱うという点や、全体において新しい性質が発現するという点を強調することによって、還元主義の否定がいわれることがある。しかし、この発現のメカニズムが問題になる限り、(そしてサンタフェはその統一理論を目指そうとしている)実は還元主義を取り入れている。サイモンの言葉では、「弱い全体論」である。つまり、これはある意味で還元主義を認めた上で、その総合、組み合わせ、相互作用が新しい性質を生じるというものだ。つまり、法則が線形でない場合があり、多数の要素が組み合わせられた場合には、何が起こるか予想できないので創発も生じうるといふものだ<sup>42)</sup>。

複雑系は全くの混乱を意味しているのではない。

「組織化された複雑性」はそれ独自の秩序パターンを示すことがある。つまり、要素に分析することは困難でしかも不必要でもあるが、それ独自の性質が見られることがある。「自己組織化」と言われるものなどがその例である。サンタフェ研究所では複雑適応系として理解されているものだ。このタイプの秩序の発見が時に強調される。

また、そのような秩序を示さなくてもカオスや複雑系は、その現象が「手におえない unmanageable」ということを意味しない。ほとんど秩序を示さない非線形現象である「乱流」を予測することは、詳細までは不可能である。しかし、飛行機や船は乱流の中を航行している。短期的な予測は、かなり良いものが得られるからだ<sup>43)</sup>。

「ニュートン以来、天文学者は相互に引力を及ぼし合っている2物体のシステムの運動を計算できた。3つ以上の物体に関しては、その運動の近似以上のものは得られなかった。そして実際、一般に、太陽系も含めて、3物体以上の重力系がカオス的だと信じる十分な理由がある。しかし、そのカオスから困った帰結を予想する理由はない。つま

りカオスが存在するという事は、天文学者がかなり長期に渡った天体の正確な位置を予測しようとする試みにおいて挫折してしまうということの意味するにすぎない。それは、天気を予報しようとするときに気象学者が経験する困難と同じ程度にがっかりさせるものか、それ以下のダメージを与える困惑程度のものである。

最後に、ストレンジ・アトラクターの内部を動くカオス系を、望ましい性質を持つ小さな近傍に制限することによって、カオスを「飼い慣らす」フィードバック装置を発明するという実質的な進歩があった。するとカオスは単なる我慢のできるノイズになってしまう。そのような装置は予測をコントロールに代替する実例を与える。<sup>44)</sup>

つまり、複雑系の基本となる要素や法則を見つけても、それだけでは全体像を理解したとはいえず、しかも将来の予測は実際問題として可能とはならない。しかし、台風の進路は詳細には予想できず不安定であるが、短期的には十分安定であるために、我々は天気予報を見て、遠出をやめたり窓を補強したりして対処しようとする。このような意味で、工学的には複雑系は我々の手におえないものではない。

### 複雑系は何でも説明できるか

自然誌とか博物学というような仕方では自然を見るのではなく、複雑系の研究は自然のモデルを提案しようとしている。基本的に数学モデルの話になっている。しかもカオスは複雑な現象を、多数の変数を仮定しなくても説明できるという意味で「よい」モデルだ。カオス理論の説明力も、その理論を多様な現象に適用できることを基礎にしている。また、要素の単純なふるまいを決めた上でシミュレーションをしている。それが、現実の複雑な現象と同じように見えることが重要である<sup>45)</sup>。そして、現在の複雑系研究は、このようなモデルを使えば複雑な現象の基本的な部分は解明で

きるという見通しの下で行われている。

ただし、シミュレーションを行ったときにそれが現象の「正しい」シミュレーションになっているかということは難しい問題を含む。何となく似ているだけならば、テレビゲームを作ったのと同じだろう。それだけでは、この世界を解明したとはとても言えない。

同様に、カオス理論はどのような意味での説明力をもつかが問題だ。具体的現象を説明するものであるのか。例えば、一般に微分方程式は世界に起こる変化をすべて説明する「能力」を持つかもしれない。しかし、手に持つ紙を落としたときにそれがどこに落ちるかという問題について、それがどのような微分方程式で書けるとかそのときの初期値を決定することは難しいだろう。一般の微分方程式でもこんなことは生じるので、現実の複雑な現象が、カオスと本当に呼びうるものになっているかを確認することは、いくつかの判定条件があってもなかなか難しい。

構成的方法は、ある意味でAIにおけるトイプロブレムを解決しようとしているのに似ている。そのため、科学理論の正当化という面から考えると、難しいことになる。いわゆる複雑系の研究が、物理学でないと言われたりするの、構成的方法が理論の検証という面では弱いことにも関わっているのだろう。しかし、複雑系の研究者がただ好き勝手なアナロジーを言っているだけとも思えない。問題は、彼らが今用いている方法以外に差し当たり要素を総合した複雑系を扱えないことにある<sup>46)</sup>。

もう一つのタイプの普遍性の問題がある。それは、カオスがこの世界に普遍的な現象だ、というタイプの主張と関わっている。まず、部分を総合した場合の「機械論」的な考えに反対する場合がある。つまり、歯車の組み合わせということを超えた、相互作用やフィードバックがある場合に

いて考えている。(このときには、組織化された複雑性は特殊な領域だと見なされている。)しかし、その次に、差し当たり無視していた、熱の発生や摩擦の影響などが、多数の構成要素を組み合わせることによって生じてくる。つまり、理想化によって線形近似することによって普遍的法則を得てきたのにそれがうまくいかなくなるという問題だ。

(こう考えると組織化された複雑性は普遍的なものを見なされる。)だから理想化ができない実学において問題が提出されることになる。例えば基礎医学に対する臨床医学、経済学に対する経営学である。特に、科学に対する工学が重要だと私は考える。

#### コンピュータの必要性

複雑なものは、一つには組織化された複雑性のように対象がそれ自身複雑だということがある。もう一つの観点として、人間の知性、合理性が限定されているというものがある。

このとき、後者の観点では複雑系を扱ううまい方法論はないという結論になる。ただ、今までの理論の問題点をつくという意味での説明力とインパクトはもっている。ここでは、計算時間や計算量が制限されていることが大きな意味をもってくる。前者の観点では、方法論として、カオス理論やシミュレーションがある。カオスの理論は非線形力学の研究から生じている。面白いことにこれも、コンピュータによる数値解法によって成立してきたものである。つまり非線形の微分方程式は解析的に解けない。つまり基本的には可積分でない。しかし、積分しなければ微分方程式が与えられても、将来を具体的に予測することはできない。従って、数値積分が行われた。ここで活躍するのがコンピュータだ。結局、現象に応用できる数学、つまり非線形微分方程式が重要であり、それを扱う手段として数値計算が行われている。

また別に人工生命や「ボイド」を扱う方法とし

てシミュレーションが行われる。ここでのシミュレーションは、局所的な法則をプログラムしておいて、全体として創発する行動を理解しようとするものである。構成要素を認めた上でその相互作用の複雑さを考えている。この複雑さの生じるのは自己言及によっても言える。一般的には、フィードバックがかかっているということだ。プログラムはこのような再帰的な定式化をうまく表現できる。しかも倦まずに繰り返し行うのがコンピュータの長所だ。そのために、コンピュータが必要になる。

このように見てくると、コンピュータの限界、計算量の限界が結局は問題だ。可積分ではなくても近傍は分かる。どれだけ先の将来まで計算できるかが問題だ。そして、創発はこのあたりにあると見なされている。

#### 第4節 まとめ

複雑系の研究では、生物をその典型とし生体への関心は高まっている。しかし、前節で見たように、単純に生氣論に帰ろうということと、この世界は手のつけられないほど複雑だと絶望することとは、複雑系の現在の流行とはまったく関係がない。

つまり、複雑な世界を方法論を用いて探求しようとしている。その一つが、カオスであり、その複雑な挙動を理解する道具としてのコンピュータによるシミュレーションである。

結局、現代の複雑系は、特殊な種類の相互作用を扱おうとしている、とまとめられる。まず第一に、三体問題(という意味での相互作用)の研究からカオス理論が出発している。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変化してきている。第二に、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、その相互作用によってそこからどのような秩序がで

きるかをシュミレーションしようとする。第三に、経済学で限定された合理性をモデルにした人間を考えることによっても、相互作用が重要になる。他人に影響されない自律的個人（完全な合理性のモデル）においては人間同士の相互作用を特に考える必要はなかった。しかし、限定された合理性モデルでは、慣習や制度のような他人の振る舞いを考慮するという意味での相互作用が重要になる。第四に、物理や化学や生物で基本粒子や基本法則だけではだめだと言っているのも、粒子の存在は認めた上で、その相互作用をうまく捉える方法を探しているように思える。

このとき複雑系における認識論的問題は、コンピュータの位置づけに関わる。つまり、我々が問題にすべきことは、構成に関わる問題である。分析についてはいろいろ研究されてきた。公理論、DNA、素粒子はみな分析を中心とした考えである。分析によって究極の粒子や法則が分かってもそれですべてがうまく行くともしえない。昔の全体論に戻ってもそれだけなら研究も何も進まない。そのとき、複雑系の研究で提案されている構成による理解という方法はどういう意味で正当化されるのだろうか。彼らは単なるコンピュータゲームや生命活動のアナロジーを提出しているに過ぎないのか。そして我々の生きている世界が基本的に複雑系と見なせるのなら、この認識論的問題は大きな意味をもつ。ただ、工学は要素同士の相互作用を認めた上で全体を構成するというものを古来行なってきた。この意味で工学は複雑系の問題をある程度は実際に解決しているように思える<sup>47)</sup>。

方法論の正当化は差し当たりうまくいっているとはいえないにしても、研究すべき複雑な対象があることは事実だし、それを単純な分析方法で扱えないことも事実である。その意味で複雑系の認識論における未来は開かれている。

\*複雑系に関する文献については、初校（6月初旬）の際に補足した。

## 注

- 1) 『複雑系』M. ミッチェル・ワールドロップ 田中三彦・遠山俊征訳 新潮社
- 2) 「週間ダイヤモンド」1996年11月2日特大号
- 3) サンタフェ研究所についての直接の情報については、<http://www.santafe.edu>を参照。
- 4) 『複雑系』の訳者である田中三彦がダイヤモンドの特集にも大きく関与している。
- 5) P. バック、陳侃「大地震や経済恐慌を説明する数学理論」山口昌哉・木坂正史訳 in 「日経サイエンス」1991年3月号 pp. 22-31 原題名Self-Organized Criticality 原論文掲載誌 Scientific American January 1991
- 6) p. 51「経済学者が解く「複雑系」としての経済」塩沢由典・西山賢一・吉田和男 in 「週間ダイヤモンド」96・11・2 塩沢の発言
- 7) 金子邦彦「複雑系 カオスのシナリオから生命的シナリオへ」p. 86 in 「現代思想」1996年11月号
- 8) ロジャー・リューインは邦訳『複雑性の科学 コンプレキシティへの招待』糸川英夫監修 徳間書店 (Roger Lewin: Complexity Life at the Edge of Chaos Macmillan Publishing Company (1992)) で、サンタフェ研究所の紹介を行っている。そしてこの本の邦訳の帯にも「恐竜の絶滅から細川政権誕生まで、あらゆる謎を解き明かす鍵が、ここにはあった!」という刺激的なキャッチコピーが書いてある。ただし、邦訳の出版が1993年10月と少し早かったために日本での流行の起爆剤にはならなかった。
- 9) 『Newton』1994年3月号 「特集 脳と心の不思議」
- 10) それも、論文誌と区別されたいわゆる学会誌であり、学会誌しかない場合にはその中の解説論文を中心に見ていく。論文誌においてはまたは研究論文においては、もちろん先駆的な業績が述べられている。しかし、そのアイデアが流行につながり主流になっていくか、単発的に終わってしまうかは分からない。その点学会誌、しかもその中の解説論文は、確かに紹介記事としては時期的に少し遅れぎみではあるが、専門家からみてその学会に貢献しそうなアイディ

- アを取り上げようとしている。これが特に学会誌や解説論文を取り上げる理由である。
- 11) 『日本物理学会誌』第51巻1996年
  - 12) 例えば、フラクタルについての研究者の一人である高安美佐子は、彼女の研究が年配の先生には「君のやっているのは、それは物理ではないよ」という反応を示されたたと述べている。(「若手座談会「若手研究者の夢と現実」」in『日本物理学会誌』Vol. 52, No. 1, 1997)
  - 13) ちなみに、機械学会は20の部門に分かれ、複雑系に関わるこのようなキーワードを含む部門は、「ロボティクス・メカトロニクス部門」だ。つまり、ロボットに代表される知能や制御を扱う部門だ。
  - 14) 例えば機械学会では、1997年の6月から7月にかけて、複雑系のキーワードを含むシンポジウムが3つも開かれることになっている。
  - 15) その他、毎日新聞は1992年12月3日と5日に、「日米知のシンポジア」という題で講演会を行った。ここでは、サンタフェ研究所の紹介と複雑適応系の概念の重要性が論じられた(毎日新聞1993年1月21日朝刊、毎日新聞1993年1月28日朝刊に関連記事)。また、新しくは日本経済新聞が、1997年1月4日朝刊で複雑系の科学のブームについて大きく紹介している。
  - 16) 週間ダイヤモンド(1996年11月2日特大号)の内容を中心とする著書も、早くも1997年2月には出版されている。『複雑系の経済学』ダイヤモンド社
  - 17) Warren Weaver : Science and Complexity American Scientist 36; 536-44(1948)
  - 18) George A. Cowan : "A Return to Breadth, the Science of Complexity", Complexity & Chaos シンポジウム(淡路島)資料(1994) pp. 36-41 (この講演原稿は東大の合原一幸助教授のおかげで手に入った。)なお、コーワンは、ウィーバーの言葉で言う organized complexity を、ordered complexity と表現している(p. 37)。
  - 19) p. 106「広がる複雑適応系の研究」R. ラサン in 「日経サイエンス 1993年3月号」
  - 20) p. 109f. 『複雑さを科学する』米沢富美子 岩波科学ライブラリー
  - 21) p. 117 同上書
  - 22) p. 91「自然界の特殊性に注目」福井謙一 in 『日経サイエンス』1995年6月号
  - 23) F. A. Hayek : The Theory of Complex Phenomena "The Critical Approach to Science and Philosophy : Essay in Honor of K. R. Popper" ed. M. Bunge (The Free Press)1964 邦訳「複雑現象の理論」フリードリッヒ・A・ハイエク 杉田秀一訳 in 『現代思想』1991年12月号 pp. 122-139
  - 24) H. A. Simon : The Sciences of the Artificial MIT Press 第1版は1969年に出版。ただし、ここで問題にしている章 "The Architecture of Complexity" は、もともと Proceedings of the American Philosophical Society, 106 (December 1962) : 467-482 に発表されたものである。
  - 25) H. A. Simon : The Sciences of the Artificial MIT Press 2nd p. 195 ハーバート・A・サイモン『新版システムの科学』稲葉元吉・吉原英樹 訳 パーソナルメディア株式会社 p. 267 (ただしこれは第2版の訳である。版ごとに原文も少しずつ変更されている。)
  - 26) 塩沢由典が『市場の秩序学 反均衡から複雑系へ』筑摩書房(1990)の第7章と第8章で説得的に論じている。
  - 27) 数学では、オートマトンの理論の下位範疇として「計算量の理論(計算の複雑さの理論)」が成立した。これは、1960年代後半には既に教科書が書かれるぐらいに発展した。従って、数学の分野で complexity というキーワードで検索するとほとんど computation というキーワードもついてくる。また、計算量の理論はコンピュータの発展に伴って出てきた。これは、永遠の真理を扱うと自負する純粋数学の内部ではあまり問題にもならなかったことだろう。
  - 28) 津田一郎「究極の複雑系「脳」」in 『SCIA&S』(この雑誌は『科学朝日』の新版だ) 1997. 04. 04
  - 29) ウィナーは『サイバネティクス』の中で、動物と機械に共通する通信、制御、情報処理の問題を扱おうとした。そしてこの本の中には「最近の複雑系の科学の本質的な部分がすべて書かれている」(p. 105『複雑さを科学する』米沢富美子 岩波科学ライブラリー27)とまで言われることもある。また、人工生命についても「サイバネティクスの吊い合戦」だと日本の人工生命研究の第一人者である星野力に述べているようだ。(『人工生命というシステム』佐倉統・北野宏明 ジャストシステム の中で北野の発言

- p. 62)
- 30) 『情報処理』で「脳における情報処理機構」が特集されるのは1989年2月号であり、『電子情報通信学会誌』においては「脳における情報処理」が1990年2月号で特集された。高次知能の問題に関してこのごろから生体としての脳に関心が移ってきている。
  - 31) 知的な行動をとらせるために、行動の可能なパターンのうちどれが最適であるかを探索するプログラムを書こうというのが、人工知能の基本的なアプローチだった。ただし、行動の可能性を予め規定した上で、目的の達成を行わせるようにプログラムすることはできても、実はそれだけでは何が起こるか分からない現実の世界には通用しなかった。いわゆる、おもちゃの世界の問題を解くことはできても、実世界でうまく動くロボットを作ることはできなかった。(チェスのような限定されたゲームの世界では、計算スピードや記憶容量を増すことを中心に改良を進めると人間の世界チャンピオンに活用にまでなった。しかし、小さな子供でもできるちょっとしたお手伝いをするロボットはなかなかできそうにない。)このため、実世界でうまく適応し、何らかの知性を示している生物や人間の脳に関心が移ったのだ。
  - 32) 知能と複雑系研究会は、「知能の本質は、不完全情報を不完全ながら合理的に処理することである、という観点にたち、人工知能、複雑系の情報処理、人工社会、人工生命などを扱う」研究を行う。
  - 33) 中島秀之、有馬淳、佐藤理史、諏訪正樹、橋田浩一、浅田稔「新しいAI研究を目指して」in『人工知能学会誌』1996年9月号 pp. 37-48
  - 34) 「生命の自己組織—適応する生命力」沢田康次 in『日経サイエンス』1994年5月号
  - 35) p. 157「科学はどこへ行く⑨ 合原一幸 — カオス研究のトップランナー」田原総一郎との対談 in「中央公論」1996年9月号 合原一幸の発言
  - 36) Li, Tien Yien & Yorke, James A. : Period Three Implies Chaos The American Mathematical Monthly 82 (1975), No. 10, pp. 985-992
  - 37) ローレンツには、例えば”Deterministic Nonperiodic Flow” Journal of the Atmospheric Sciences 20 (1963), pp. 130-41 をは
- じめとする一連の論文がある。「彼は、大気の挙動は乱流であり、その流れは非線形の方程式によって決まるということにはじめて気づいた。しかも不安定性をしめし、ちょっとした変動にも大きく左右されるから、天気予報はやっかいなものだと直感した。」p. 106「天気の腫はくるくる変わる」ティム・パーマー in『カオスの素顔』ニーナ・ホール編 宮崎忠訳 講談社 Blue Backs
  - 38) このあたりの経緯については、李天岩「李—ヨークの定理とカオス発見余話」 in『数学セミナー』1988年10月号 pp. 44-47 に記されている。
  - 39) 金子邦彦「生成—崩壊のダイナミクス」 in『数理科学』1996年6月号 この立場を取れば複雑系は明確に規定され、複雑系という専門分野が成立するかもしれない。ただし、以上に概観してきたような多くの分野の人々の関心に応えるものとなるかどうかは未定である。
  - 40) 『複雑系の企業論』佐藤修 in『複雑系の経済学』ダイヤモンド社1997
  - 41) Herbert A. Simon : The Sciences of the Artificial 3rd ed. Ch. 7 Alternative Views of Complexity MIT Press (1996)
  - 42) 第2節で見たように、経済学者ハイエクもこの論点を認めている。
  - 43) 合原一幸は、カオス工学という言葉を使って、複雑系の予測やコントロールを目指している。
  - 44) p. 179 Herbert A. Simon : The Sciences of the Artificial 3rd ed. MIT Press (1996)
  - 45) 例えば、『複雑系のカオス的シナリオ』金子邦彦・津田一郎 朝倉書店 p. 32ff. では、「複雑系探求の方法論」について論じている。ここでいう構成的方法は単純にモデルの検証のようなことを考えているのではない。複雑な現象を、それとよく似たパターンを生成するシステムを作ることによって理解しようとする。
  - 46) 例えば、John Horgan : From Complexity to Perplexity Scientific American June 1995 邦訳「岐路に立つサンタフェ研究所」J. ホーガン in『日経サイエンス』1995年8月号においてもすべての現象を説明するという論点には無理があるという説得的な批判がなされている。
  - 47) 例えば、拙論「工学はどういうタイプの学問か」 in『近世哲学研究』第2号1995年12月発行