

複雑系——物理学の新しい地平

津田 一郎 〈中部大学創発学術院 tsuda@isc.chubu.ac.jp〉

複雑系研究の流れ：個人的経験を踏まえて

1970年代後半から物理学、特に非線形非平衡統計物理学分野を中心に複雑系研究への期待が高まった。これは世界的傾向であった。平成に入り90年代になるとその傾向に拍車がかかり世界中で複雑系狂想曲が鳴り響いた。流行は物理全般に、さらに化学、数学、社会・経済学、言語学にまで及んだ。しかし、複雑系の本質は流行が及ばなかったかに見えた生物学の方にあることがすぐに明らかになった。日本においては、金子邦彦、池上高志、伊庭幸人らと企画した基礎物理学研究所の長期研究会「複雑系」が大盛況で、基研の階段教室の通路や廊下まで参加者で溢れかえった。物理学会の複雑系関連のシンポジウムも超満員であった。平成2年には複雑系関係で初めて池田研介を代表として提案した科学研究費補助金が採択された。また、日本でも複雑系に関する国際会議が開催された。¹⁾ 数学では北海道大学数学教室を中心に複雑系研究会が行われ、多くの研究者が分野を超えて参加した。北大数学教室で開催された「複雑系セミナー」は平成も終わりを迎えようとする2016年まで続き163回を数えた。その記録は北大数学教室のホームページに残っている。私たちは複雑系とは何かという根本的な問いや複雑系研究の方法論を真剣に考えていたが、他方ですさまじい勢いで各大学に複雑系の名を冠した組織ができていった。

複雑系の流行の背景にはカオスやフラクタルの研究の進展があったことは言うまでもない。蔵本由紀が主催したカオスとフラクタルの本格的な国際会議²⁾が1983年に京都大学で開かれたが、そのほんの3年前にエドモントンで開かれたStatphys 14ではこれらは一分野として認識されておらず、“miscellaneous”に分類されていた。マンデルブロー(B. Mandelbrot)も「種々雑多」の一般講演だった。カオスやフラクタルは統計力学ではなくむしろ流体力学の中で評価されていった。他方、アンダーソン(P. W. Anderson)が“More is Different”という標語で複雑系を表現しようとした。そして、Complex Systemsという言葉が非線形非平衡統計力学の枠組みを超えて広く一般の化学反応や生物現象、さらには社会現象にまで拡張して使われ始めた。³⁾

複雑系の定義は難しいが、英語ではComplex Systemsと表現し、Complicated Systemsではないとする。それは単に入り組んだものや複合的なものであれば、それを解きほぐし部分系に分解して理解可能であるが、複雑系はそうはいかないことが本質であることを含意しているからである。そこで、「複雑系では系を部分に分解することで系のダイ

ナミクスに関する関係性が失われるゆえに要素還元が不可能である」ということを複雑系原理とすることで研究が始められた。したがって複雑系研究は自然現象において近代物理学が典型的に確立した方法論では必ずしも十分にすくいとることができない事象や系を必然的に問題にすることになる。自然科学では生命系が典型的であり、さらに生命系のように構成論的方法論を採用する情報系、制御系などの工学系や社会科学系が含まれる。このような複雑系原理による複雑系研究は20世紀初頭から研究者の間で意識され始めたようである。その後ウィーナー(N. Wiener)のサイバネティクスを契機に自己組織化、機械学習と人工知能など今日的な問題が議論された。以下、本特集の趣旨に鑑み平成以降の複雑系研究の一部を振り返り、現在の地平を眺める。紙数の都合で多くの関連研究には触れられないので、さらに理解を深めたい読者は複雑系関係の日本で最初の学術書⁴⁾、数学辞典第4版の「複雑系」の項目⁵⁾、JST発行の「研究開発の俯瞰報告書」⁶⁾などを参照してほしい。

科学研究には次の2種類があるだろう。

1. 非自明なことを自明にする。
2. 一見自明に見えることの中に非自明なことを見出す。

項目1は通常の研究であり、これなくして科学は発展しない。あえて言えば、科学は自明な命題の集合である。しかし、科学研究の役割はこれに留まらない。項目2の作業が科学を豊かにしていく。複雑系研究の意義は当然項目1にもあるのだが、項目2の役割が特に大きいと思われる。すなわち、新しい問題や視点の発見である。

カオス発見の意義

すでによく知られているように、カオスは複雑で予測が困難な時空パターンであるが簡単な決定論的方程式で記述される。カオスの発見はポアンカレ(H. Poincaré)の制限3体問題にまで遡る。さらには粒子のカオス的な運動は統計力学の基礎であるエルゴード定理の成立要件とも関係する。しかしながら、保存系では“最後のKAM(Kolmogorov-Arnold-Moser)”の崩壊以前ではカオスとトーラスが共存するためにエルゴード性が、またカオスの存在により量子古典対応が概念的な困難に直面する。これはアインシュタイン以来の問題であり、現在も活発に研究されている。

保存系だけでなく散逸力学系においてもカオス現象が出現することが明確に認識されたのは1960年代になってからである。その研究が盛んになったのは昭和の終わりから平成の初めにかけてであり、すでに述べたようにカオス研

究が複雑系研究の大きな契機となった。主に流体乱流、化学乱流、光乱流、電気回路の不規則現象、生態系の人口変動との関係において研究された。散逸系のカオス運動を構成する幾何学的構造はしばしばストレンジアトラクターと呼ばれる。このストレンジアトラクターの構造にフラクタルが現れる。決定論的であるにも関わらず予測不能な運動が可能であるためにはカントル集合のようなフラクタル構造が必要になるのである。カオスの発見以前は、予測不能で複雑な現象の解明に対して、ウィーナーが構築した確率解析が唯一有効な方法であった。ところがカオスの発見によって、予測不能でランダムに振る舞う現象の背後には決定論的法則が存在している可能性が認識されるようになり、それに伴って埋め込み理論が解析手法になっていった。カオス研究によって単純な規則の繰り返しによる複雑性・多様性の出現の機構が明らかになった。

カオスの遍歴の複雑ネットワークでの役割

平成の初めにカオス力学系の研究は大きく様変わりする。それまでの少数自由度の力学系から大自由度力学系の研究へと展開していく。複雑系を構成論的に理解するための道具として、すでに理解が深まっていた少数自由度力学系を結合した結合力学系が研究されるようになった。結合写像格子 (CML)、大域結合写像 (GCM)、ニューラルネットなどである。また無限次元系として遅延微分方程式や偏微分方程式が生み出す複雑な現象も研究されるようになった。その中で、GCM、時間遅れを持つ光学系、非平衡ニューラルネットにおいてはほぼ同時に類似の特徴を持つ遷移現象が発見され、カオスの遍歴⁴⁾と命名された。これは高次元の相空間における低次元のアトラクター痕跡間の遷移現象であるが、アトラクター痕跡への滞在確率が高く、遷移自体が高次元空間を使ったカオス的なものだという特徴を持つ。その後カオスの遍歴の数学研究も開始されるようになり、カオスの遍歴が起きるいくつかのシナリオが提案された。⁷⁾ 国際的な学術誌でもカオスの遍歴の特集が組まれ、類似の高次元遷移現象が多様に存在することが明らかになりカオスの遍歴の普遍性が示された。⁸⁾ さらに、ヒトや哺乳動物の記憶過程においては記憶痕跡間のカオスの遍歴が現れることで学習が促進されるという理論と数理モデルが提案され、動物実験で実証されるなど特筆すべき応用例も現れた。⁹⁾

平成に入って、数学者のエルデーシュ (P. Erdős) が始めたランダムグラフの理論が拡張され、いわゆる複雑ネットワーク理論へと発展した。脳神経ネットワーク、インターネットなどの情報通信ネットワーク、パーコレーションなどへの応用が広がっている。また、インターネットの発展によりインターネットを介してあらゆるものが結びつく

IoTの時代になり、環境自体が複雑系になってきた。それ以前の環境というのは周期的振る舞いをする外力、あるいはランダムな振る舞いをする雑音として扱えるようなものであった。物理学での“環境項”もまさにそのような観察に基づいて導入された。今や環境そのものが複雑系であり、システム (情報論的な主体であるエージェントを含む) はこの環境から有用な情報を得られるような“うまい”相互作用を見つけなければ、環境そのものに埋没する存在になることが明らかになってきた。すなわち、複雑系は複雑な環境と相互作用する中で自ら機能分化することによって環境からより多くの情報を効率的に取得することができるといことがわかってきた。上述の複雑系原理に基づいて生命に目を向け、生命的な機能を持つ人工物 (AI や A-life) も併せ考えると、複雑系においては、系が環境との相互作用の中で生じる様々な拘束条件を満たすように機能分化することで要素が機能を持つようになるということ、すなわち拘束条件付き自己組織化による部品の生成⁷⁾という視点が重要であると思われる。従来の自己組織化原理では取り扱えなかった機能分化、⁷⁾ 細胞分化、¹⁰⁾ AI と一体化した拡張人間 (Augmented Human) の原理を明らかにすることが期待されている。このように、令和が始まろうとする現在の複雑系研究の特徴は機能分化の創発原理にあるといえるだろう。この分化を実現する必須の要因としてカオスの遍歴のような高次元の遷移機構が再び注目されているのである。物理学会の若手研究者から複雑系研究を飛躍的に発展させる人たちが現れることを期待する。

参考文献

- 1) 例えば, Complex Systems: constructive complexity and artificial reality, Physica D **75** (1-3), 1-450 (1994); Proc. of Oji Seminar, organized by K. Kaneko, Numazu, 1993.
- 2) *Chaos and Statistical Methods*, ed. Y. Kuramoto (Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1984).
- 3) *Complex Systems-Operational Approaches*, ed. H. Haken (Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1985).
- 4) 金子邦彦, 津田一郎, 『複雑系のカオスのシナリオ』(朝倉書店, 1996); K. Kaneko and I. Tsuda, *Complex Systems: chaos and beyond* (Springer-verlag, Berlin, Heidelberg, 2001); 金子邦彦, 池上高志, 『複雑系の進化的シナリオ』(朝倉書店, 1998).
- 5) 日本数学会編, 『岩波 数学辞典 第4版』(岩波書店, 2006年) 391 (XXII-11) 複雑系.
- 6) 科学技術振興機構研究開発戦略センター, 「研究開発の俯瞰報告書 システム科学技術分野 (2015年)」(JST, 2015) 3.5 複雑システム区分, pp. 238-289.
- 7) 津田一郎, 『脳のなかに数学を見る』(共立出版, 2016).
- 8) Focus Issue on Chaotic Itinerancy, ed. K. Kaneko and I. Tsuda, *Chaos* **13**, 926 (2003).
- 9) I. Tsuda, *Curr. Opin. Neurobiol.* **31**, 67 (2015).
- 10) 金子邦彦, 『生命とは何か: 複雑系生命科学へ』(東京大学出版会, 2009).

(2018年8月30日原稿受付)