

3.5 複雑システム区分

3.5.1 複雑系生命科学

(1) 研究開発領域名

複雑系生命科学

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

階層的構造を持つ生命システムの普遍的性質を理解するための新しい学問分野として複雑系生命科学は導入された。特に、全体は部分が集まってできているけれども、各部分は全体の性質で規定されるという複雑系固有の循環を重視し、分子、細胞、個体、生態系といった階層的システムがいかに動的に安定した状態を形成するかに注目して研究が進められている。大自由度の力学系、確率過程、統計力学とイメージングやトランスクリプトーム解析などの定量的生物学と「つくって理解する」構成生物学の実験と密に連携し、複製、適応、記憶、分化、発生、進化における普遍的な原理、法則を明らかにしつつある。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

(3-1) 経緯

分子生物学は、生命の各要素過程の詳細を次々と明らかにし、さらにはゲノム、プロテオームなどの膨大なデータベースを作成し、その結果各要素を組合せた「計算機的な」生命観を形成するに至った。しかし、実際の生物はコントロールされた条件の下でも機械的振る舞いからのずれがあらわれ、大きく揺らぎ時間的に変動することが明らかにされてきた。そもそも個々の細胞反応は、分子の衝突によるものであるから確率的であり、しかも分子数が必ずしも多くはないので、ゆらぎは避けられず、一方で、さまざまな反応がフィードバック過程を含んでいるので、複雑なダイナミクスも生じうる。さらに、分子（遺伝子）の役割は多様であって、一遺伝子が一つの表現型をうむというような一対一の因果関係が必ずしも成り立たず、また、遺伝子の働きは生体が置かれた状況にも依存する。このように、それぞれで揺らぎの多い素過程がたくさん絡みあっているにもかかわらずその総体として生命はうまく機能している。しかし、この漠然とした印象のままでは自然科学にはなりえない。一見曖昧な問題こそ厳密に扱い、動的システムとしての生命のしくみを定量的なレベルで明らかにしなければならない。このような観点でのアプローチが 90 年代後半から、物理生物学、システム生物学、定量生物学などの掛け声で始まってきた。

日本では 90 年代初頭の複雑系研究を踏まえて、日本発の学問分野として「複雑系生命科学」が提唱された。この原点は、1993 年に行われた、国際会議「Complex Systems: Constructive Complexity and Artificial Reality」（沼津）に遡る。そこでは構成的アプローチと大自由度力学系での集団運動、カオスの遍歴、階層をまたがるダイナミクス、多対多の動的関係性などが重視された。それらをふまえて、理論だけでなく細胞生物学の実験も巻き込んで、90 年代後半から複雑系生命科学の研究が推進されてきた¹⁻³⁾。その特徴としては以下の 2 つのポイントがある。

(3-2) 特徴

- ・個々の要素と全体とのダイナミックな相互関係を重視して生命システムの理解を目指す：

一般に生命系は分子（遺伝子）、細胞、多細胞個体、生態系という階層をなすが、階層の各レベルの状態は、互いに影響しつつ、揺らぎ、動的に変化する。その結果、階層の上位が下位の状態に影響を与える。つまり、階層間の関係は双方向でかつダイナミックである。そこで、部分からなる全体の性質が部分を規定する、という複雑系に特徴的な性質⁴⁾が如実に現れる。例えば、組織（つまり細胞集団）は細胞の集団でつくられるけれども各細胞の性質はそれがおかれている組織の性質によって変化させられる。このように各要素とその集合（全体）のダイナミックな循環関係に着目する。ここで、生命の階層をなす各要素は一般に時間的に変化する。例えば細胞であれば分裂して増殖する。そこで階層の各レベルでダイナミックな変化が起こりうる。ただし、生命システムが安定しているのであれば、そのときは上位と下位の関係に整合性がとれて維持されているはずである。このようにダイナミックな要素間の「柔らかな」関係から、いかに部分と全体の関係が安定し整合した状態が生まれるか、そこから生命システムの普遍特性が現われるかを明らかにするのが複雑系生命科学の基本姿勢となる。こうした視点から、生命システムが安定して存在するための条件を求め、それをふまえて、複製、適応、分化、進化の基本的な性質を導くのである。このためには、力学系、多くの要素集団の性質を扱うための統計力学といった、数理、物理で発展した考え方が重要になる。

- ・構成的生物学：

生命現象の普遍的な性質を明らかにするために、今ある生物にとらわれずに、こちら側から基本性質を設定して生命システム固有の性質を構成するという立場がとられる。これは、進化の結果の現存の生物そのままを調べるのではなく、我々の側から条件を設定して、生命の基本的複製過程や発生過程がいかにあらわれるかを調べる立場である。従来の研究のように取り除くとシステムが働かなくなる分子を探る、つまり、生物機能の「必要条件」を探求する、のではなく、こちら側でつくりあげた条件でシステムを構成し、それによってどのレベルの生物機能があらわれるかという十分条件の探求である。これは、進化を通してチューンアップされた「非常によく出来た機械」という面に着目するのではなく、生命が最低限みたす普遍的性質を探ることを意味している。

(3-3) 関連する研究分野との相違

- ・システム生物学と複雑系生命科学

分子の探索でなく、システムとして生命を理解するという立場は、古くからあり、また 20 世紀にはウィーナー、ベルトランフィ達がつとに指摘している。この方向は現在システム生物学として脚光を浴び、数年前には立場は異なりながらもその関連の書籍があいついで上梓された⁵⁻⁷⁾。複雑系生命科学は、システムの観点を重視する点ではシステム生物学の一環とも考えられる。ただし、現在主流のシステム生物学では、網羅的なデータを用い、こみいったモデルを構築して、実験と比較する。その意味では complicated-systems biology とでもいうべきものも多く、部分全体の階層を意識

した complex-systems biology (複雑系生命科学) とは立場を異にする。

その一方で、揺らぎ、動態を重視した物理側からのアプローチも現在盛んで、これもシステム生物学の一環とされることもある。実際、Elowitz らは外部ノイズと内部ノイズに分けて細胞の揺らぎを測る方法を提唱⁸⁾、また Alon はシステム生物学の教科書の中で基本ネットワークモチーフの動態と機能の関係を論じている⁵⁾。これらは、複雑系生命科学にも親和性の高い研究方向である。

・ 構成的 (constructive) 生物学と合成 (synthetic) 生物学

構成的生物学と似た立場で、近年、合成生物学という研究方向も盛んである。どちらも、こちら側である性質を作り出そうという点は共通している。しかし、合成生物学は、何か目標を持って、ある性質 —それが生命システムに必須かは限らない— をデザインするという工学的な志向性を持つ。一方で構成的生物学は、こちらで条件を作って、そこからどのような生命の論理が引き出されるかをみようという発見的志向性を有する。また、合成生物学では通常、少数成分のデザインした遺伝子回路を用い、ある振る舞いを構築しようとする。一方で、構成的生物学では複雑系例えば、固有の大自由度系の性質を重視し、一部だけ切り出した性質よりもそれが全体との循環関係の中でどのように振る舞うかに注目する。この点に関しては、合成生物学の代表的研究として、発現が時間的に振動するように遺伝子回路を設計し、それを大腸菌に埋め込んで、タンパク量を振動させるという実験がある⁹⁾。一方で、構成的生物学にも、双安定な発現を持つ遺伝子回路を埋め込むという、類似の実験がある。しかし、後者では、2つの状態をいれたにもかかわらず、細胞全体の増殖との関係で、一方の適応的状態のみが選ばれるという、デザインした以上の発見がなされ、それをもとにして、細胞の適応の論理がひきだされてくる¹⁰⁾。また、進化に関していえば、合成生物学では、実験室内での淘汰を通して高機能を持つ分子や細胞をつくりだすのを目指すのに対して、構成的生物学では、実験を通して、進化しやすさと可塑性の関係を明らかにし、それをもとに進化の新しい法則を求めている。

(3-4) 国内外の動向

日本では複雑系の国際会議は International Workshop on Complex Systems (1993) に端を発し、その後、複雑系生命科学と関連したものとして Search for Logic of Life as Complex Systems: Constructive, Dynamic, and Developmental Approach (2001)、International Symposium on Complex Systems Biology (2009) などが開催されている。複雑系と生命科学をつなぐ国際会議は欧米でも毎年様々な形で行われている。また、日本における関連した研究会としては、定量生物の会と細胞をつくる会が毎年開催され、若手を中心に活発な研究が進められている。

大型プロジェクトとしては日本では COE 複雑系としての生命システムの解析 (1999-2004)、ERATO 複雑系生命 (2004-2010)、ERATO 動的微小反応場 (2010-2015)、複雑生命システム動態研究教育拠点 (2013-) などが文科省により採用され、世界を先導する研究が行われている。また、理化学研究所には定量生物学に関連した生命システム研究センターが立ち上がっている。

一方、世界各国では、必ずしも複雑系生命科学というわけでもないないけれども、関連分野としてシステム生物学、定量生物学、合成生物学が加速度的に研究され、大きな

予算がつぎこまれている。研究所に関しても、米国では Harvard、Princeton、MIT、California、Rice などの主要大学にはシステム生物、物理生物、定量生物などの研究組織が創設され、また欧州でもデンマーク Niels Bohr 研究所、フランス CNRS (Paris)、スペイン CRG (Barcelona)、ドイツ Max Planck 研究所、Ruhr 大学などで複製細胞構築や物理的生命システムの研究センターが作られ、一方、アジアではインドの Bangalore、中国の北京大学、上海大学などで精力的な研究組織が立ち上がっている。このような組織面では日本は遅れをとっているとも考えられる。

(4) 科学技術的・政策的課題

(4-1) 技術：

基礎科学的な側面が非常に強い研究分野であるが、それゆえに、そこで培われる動態測定方法、データ解析や状態の特徴付けの方法、理論的定式化は、今後の医療や創薬などに対しても長期的スパンにおいて幅広い波及効果をもつと考えられる。例えば、細胞状態のロバストネスと可塑性を支配する状態論の研究は細胞状態コントロール技術の開発に繋がると期待され、細菌の薬剤耐性獲得、細胞のガン化の動態研究は、それを抑制する手法の開発にも繋がるであろう。一方で、複雑系の理論研究が、iPS 細胞の作製以前から遺伝子活性化による分化多能性回復を予言していたにもかかわらず、それが有効に実験に伝わっていなかったことを反省すれば、多能性、分化制御に関して理論と実験のより強いタイアップも望まれる。

(4-2) 社会：

これまで科学の応用という技術的側面が重視されていたけれども文化としての科学、社会システムの発展への知見という形でのフィードバック、例えばシステムの多様性と格差への独自の知見も複雑系生命科学では特に重要である。生命システムがいかに安定して存続、増えられるかという原理を理論的に解明することは、社会システムの安定性の理解にも大きな意義がある。文化としていえば、「生命とは何か？それを創って理解しよう」という方向は若者への夢を与え、国民多くの知的好奇心を高め、わくわくさせるであろう。その意味で、生命システムの普遍特性を表現する複雑系生命科学は具体的かつ直接的応用が明日できるようには一見みえなくても、長期的には、日本国民が人類科学のために果たす意義は大きなものとなる。

(4-3) 教育：

学問、教育の細分化による欠点は数多く指摘されている。システムとしての生物の理解更には現在蓄積されている膨大な生物情報のデータの解析には、数理科学、物理学、化学、生命科学の共同作業が強く要求されている。そのような研究を進めていくためには、これらのうちの1分野を専門としつつも他分野にも十分な素養を持つ人材を育てることが必要である。世界各国ではこうした教育改革が急ピッチで進んでいるのに比して日本では逆に数理、物理の学生と生命科学の学生が分離するという傾向が生じている。このような分野の発展には研究所ではなく、大学内に研究組織をつくり、研究現場に大学生が日常的に接するようにさせることが肝要になる。

(5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

理論、実験、モデリングが三位一体となった複雑系生命科学の進展により、複製、適応、発生(分化)、進化の基本的特性があらわれるための普遍的論理が明らかにされてきた。ゆらぎの中で細胞が複製していく際の普遍統計法則の抽出、ゆらぎを用いた一般的適応、遺伝子発現ダイナミクスと細胞間相互作用による安定した発生-分化の原理、ゆらぎと進化の間の法則の抽出などが行われ、揺らぎの中でしなやかに振舞う生命ネットワークの論理が提示され、枚挙的な生物学とは相補的な知見が得られてきた^{2, 3, 6)}。

- ・ 構成的生物学の大きな夢である、複製細胞系構築に向けて、リポソームが栄養成分をとりこみ、分裂を繰り返していく複製系が完成させられ、一方で、リポソーム内での多段階遺伝子発現なども行われた¹¹⁾。また PureSystem と呼ばれる大腸菌から抽出した数百の反応をミセルの中にもうめこみ進化させることにも大阪大学の四方哲也らは成功している。他方、理論的には細胞複製系の基盤となる触媒反応ネットワーク系の性質が調べられ、特に複製系では少数しかない成分が遺伝を担うようになることが示された。この少数成分による制御はタンパクと DNA を用いた自律複製系実験でも確認されている。
- ・ 触媒反応ネットワーク系からなる細胞が複製を続ける際に、数千もの遺伝子にわたって発現量の分布に普遍的統計則(巾乗則)があることは示され、遺伝子発現実験データで検証された。さらに細胞ごとに各成分の量の対数が正規分布をみたすことも理論と実験で明らかにされた。一方で細胞の各成分のゆらぎと細胞成長の揺らぎの関係が調べられ、細胞状態の統計的理論が研究されている。
- ・ 抗生物質に対して一部のバクテリアが生き残る Persistence 現象が、遺伝子変化でなく細胞状態(タンパク質の量)の揺らぎにより生じることを実験的に検証され¹²⁾、揺らぎが集団としての生存に有効であることが明らかにされた。
- ・ シグナル伝達系という精巧な仕組みを使わなくても、成長する細胞では一般にゆらぎを利用して外界への適応が生じることが実験、理論で示された。これは適応には進化によって準備されたシグナルネットワークがなくても最低限適応が起こるという、一般的概念を提供したことになる^{10, 13)}。
- ・ 細胞内の遺伝子発現の動態と細胞間相互作用によって分化が進行するという自発的な細胞分化理論が提唱され、発生過程の安定性と分化の不可逆性の理論的基盤が議論された。特に初期に不規則な振動が生じるとその細胞が多能性を持ち、その細胞が分裂するにつれ、細胞分化が決定していくことが示され、さらには複数の遺伝子を強制的に発現させることで、分化多能性が回復することが予言された。90年代の提唱当時はこの理論は真剣にはとりあげられなかったが、2009年に京大影山らには遺伝子発現の振動が確認され、脚光を浴びつつある¹⁴⁾。
- ・ 粘菌で1細胞内の cAMP のダイナミクスと多細胞集団での相互作用を同時に計測することで、粘菌細胞が細胞内の振動と細胞間のやりとりを通して部分と全体の関係をつくって集合化する過程が明らかにされた¹⁵⁾。これは1細胞と集団をつなぐ組織化の原理の解明への一歩であろう。
- ・ 進化の構成的実験により、表現型(タンパク蛍光量)のゆらぎが大きいほど進化しやすいことが見いだされ、このことは、物理の揺動応答理論を拡張した、表現型ゆらぎ

と進化速度の一般的比例関係として定式化された。これをふまえて、発生過程でのノイズによる表現型の分散と遺伝子変異による分散との間の比例関係が進化シミュレーションにより確認され、その起源がノイズに対する表現型安定性と遺伝変異に対する安定性の間の相関にあることが示された。現在、進化における遺伝的变化と表現型変化を結びつけるマクロ状態論の構築が進んでいる。このような考え方を背景にして、理化学研究所生命システム研究センターの古澤力らはバクテリアの抗生物質耐性進化が数自由度の空間で表現できることを示し、これは進化の予測への新しい分野を開いている¹⁶⁾。以上は漸進的な進化に関するものであるが、表現型可塑性と遺伝的同化に基づく種分化理論も提唱されている。こうした流れで、進化における可塑性をシステム生物学の立場で研究する新しい分野も提唱されている¹⁷⁾。この中には、進化と発生の関係という、古来の難問を、力学系の進化で考える方向も含まれている。

大規模プロジェクト関連の動向としては、(3-4)でも述べたように、日本では生命動態に関するプロジェクトやセンターなどが立ち上がっている。揺らぎ、動態と生物のロバストネスや可塑性を結びつける研究が盛んに行われており、細胞分化、進化に関して Waddington が数十年前に予見した描像¹⁸⁾が定量的かつ理論的な形で発展させられている。

(6) キーワード

複製、適応、記憶、細胞分化、発生、進化、状態論、可塑性、ロバストネス、揺らぎ、力学系、確率過程、統計力学

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・ COE複雑系としての生命システムの解析（1999-2004）、ERATO複雑系生命（2004-2010）、ERATO動的微小反応場（2010-2015）、複雑生命システム動態研究教育拠点（2013-）などが文科省により採用され、世界を先導する研究が行われている。 ・ 理化学研究所には定量生物学に関連した生命システム研究センターが立ち上がっている。 ・ 階層間の整合性のダイナミクス、ゆらぎの積極的意義、可塑性や進化可能性と動態との関係、などは日本発の研究テーマである。
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・ システム生物学を進める上での1細胞長期計測装置、微細加工技術などの開発が進んでいる。また、抗生物質耐性のしくみ、また進化の方向の制御など、応用の基盤となる研究が進みつつある。
	産業化			
米国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・ Harvard、Princeton、MIT、California、Riceなどの主要大学にはシステム生物、物理生物、定量生物などの研究組織が創設されている。
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・ システム生物学、合成生物学などを医薬へ応用する研究が始まっている。
	産業化			

欧州	基礎研究	◎	↗	・デンマークNiels Bohr研究所、フランスCNRS（Paris）、スペインCRG（Barcelona）、ドイツMax Planck研究所、Ruhr大学などで複製細胞構築や物理的生命システム関連の研究センターが設置されている。
	応用研究・開発	○	↗	・システム生物学を医薬へ応用する研究が始まっている。
	産業化			
中国	基礎研究	○	↗	・北京大学、上海大学など多拠点で生命システム研究に関連した研究組織が設置され、米国で活躍していた研究者を呼び戻し、また膨大な研究資金が投入されている。
	応用研究・開発			
	産業化			
韓国	基礎研究	△		
	応用研究・開発			
	産業化			

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

（8）引用資料

- 1) 金子邦彦編. シリーズ・ニューバイオフィジックス II-7：複雑系のバイオフィジックス. 共立出版, 2001.
- 2) 金子邦彦. 生命とは何か－複雑系生命科学へ－. 東大出版会, 2003, 2009（第2版）.
- 3) 金子邦彦. “複雑系生物学－ゆらぎ、安定性、可塑性と適応、進化、発生”. 現代生物学入門 8：システムバイオロジー. 浅島誠, 黒岩常祥, 小原雄治編. 岩波書店, 2010, p. 75-113.
- 4) Kaneko, K.; Tsuda, I. Complex Systems: Chaos and Beyond. Springer, 2001.
- 5) Alon, U. An introduction to systems biology: design principles of biological circuits. CRC Press, 2006.
- 6) Kaneko, K. Life: An Introduction to Complex Systems Biology. Springer, 2006.
- 7) Palsson, B. O. Systems biology. Cambridge University Press, 2006.
- 8) Elowitz, M. B.; Levine, A. J.; Siggia, E. D.; Swain, P. S. Stochastic gene expression in a single cell. Science. 2002, vol. 297, no. 5584, p. 1183-1186.
- 9) Elowitz, M. B.; and Leibler, S. A synthetic oscillatory network of transcriptional regulators. Nature. 2000, vol. 403, no. 6767, p. 335-338.
- 10) Kashiwagi, A.; Urabe, I.; Kaneko, K.; Yomo, T. Adaptive response of a gene network to environmental changes by attractor selection. PLoS ONE. 2006, vol. 1, e49.

- 11) Rasmussen, S. et al., eds. *Protocells: bridging nonliving and living matter*. MIT Press, 2008.
- 12) Wakamoto, Y.; Dhar, N.; Chait, R.; Schneider, K.; Signorino-Gelo, F.; Leibler, S.; McKinney, J. D. Dynamic persistence of antibiotic-stressed mycobacteria. *Science*. 2013, vol. 339, no. 6115, p. 91-95.
- 13) Furusawa, C.; Kaneko, K. A generic mechanism for adaptive growth rate regulation. *PLoS Computational Biology*. 2008, vol. 4, e3.
- 14) Furusawa, C.; Kaneko, K. A Dynamical-Systems View of Stem Cell Biology. *Science*. 2012, vol. 338, no. 6104, p. 215-217.
- 15) Gregor, T.; Fujimoto, K.; Masaki, N.; Sawai, S. The onset of collective behavior in social amoebae. *Science*. 2010, vol. 328, no. 5981, p. 1021-1025.
- 16) Suzuki, S.; Horinouchi, T.; Furusawa C. Prediction of antibiotic resistance by gene expression profiles. *Nature Comm*. 2014, vol. 5, 5792.
- 17) Soyer, O. S. ed. *Evolutionary systems biology*. Springer, 2012.
- 18) Waddington, C. H. *The strategy of the genes*. Routledge, 2014.

3.5.2 複雑系脳・神経科学

(1) 研究開発領域名

複雑系脳・神経科学

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

本研究領域は複雑系科学の発展の中で新領域として位置づけられてきたが、本研究領域の発展が逆に複雑系科学に新しい研究のトレンドを提供するとともにその中から多様な分野への本質的な寄与が与えられるような分野横断的な成果が見られたことに特徴がある。特に、初期においては本領域の研究成果が計算理論に大きな影響を与え、その後人工知能の研究開発にも新しい方向性を提起し、最近では複数の脳の相互作用を研究するコミュニケーション神経情報学が起ることで発達障害への介入、教育への対応、人と共生するロボットの開発などへも影響を与え始めている。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

1940年代から1950年代にかけてのノーバート・ウィーナーのサイバネティクス研究領域の開発と確立の過程において、神経生理学者のウォーレン・マッカロと数学者のウォルター・ピッツが共同研究によって神経細胞の活動を最も簡単でかつ本質的にとらえることが可能な形式ニューロンモデルを提案した。サイバネティクスは複雑系研究の第二期に属するとみなされている¹⁾ので、形式ニューロンとそのネットワークの計算論的研究が複雑系研究の流れの中での脳・神経系研究の始まりと言ってよかろう。実際、彼らは形式ニューロンのネットワークが万能チューリングマシンと同等な能力を持つことを証明し、脳機能研究の基礎を作った。

複雑系研究はその第三期において著しい発展を遂げた。すなわち、1960年代以降の自己組織化論と非線形非平衡統計力学の研究動向の中でヘルマン・ハーケンのシナジェティクスやイリヤ・プリゴジンの散逸構造論、ルネ・トムのカタストロフ理論を経て、1970年代から1980年代にかけてカオス理論、フラクタル幾何学などの新しい領域が確立されたことが領域の飛躍をもたらした。これが契機となり、自然科学、数学、工学、人文社会科学をも巻き込んだより広範な複雑システムの研究が希求されるに至った。このような研究動向の中で金子邦彦²⁾が発見したカオス結合系や振動子結合系を用いて多くの同期現象や高次元のカオス現象が発見され、複雑系の有力な研究ツールの一つが確立された³⁾。さらに、結合が弱い弱結合系に関しては蔵本由紀によって位相縮約を基盤にした精密な理論体系が構築された⁴⁾。

脳・神経系のダイナミクスの研究は計測技術の進歩とともに多くの研究者の視野に入るようになった。ウォルター・フリーマンがラットやウサギの嗅球においてカオスの挙動を発見し、その機能的意味を明らかにしたことがダイナミクス研究への一つの動機づけを与えた。脳・神経系におけるカオスの挙動については、さらにレスリー・ケイが嗅覚系の広範囲にわたる遷移現象を発見し、チャールズ・グレイとウォルフ・シンガーらが視覚野で同期・脱同期の非周期的遷移を発見するなど、様々な領野で発見されたが、近年ではデフォルトモードネットワークのダイナミックな挙動とも関係づけられ議論され始めた。さらに、ヒトの認知活動における脳活動のダイナミクスに見られる同期・

脱同期現象がバレラらによって発見され、引き込み協調と遷移ダイナミクスが注目された（総説としてフリーマン⁵⁾が参考になろう）。

さらに、1970年代以降、甘利俊一が神経回路網の数理⁶⁾を確立する中で、理論的には神経回路のダイナミクスに注目が集まり、例えば甘利の連続連想記憶の学習ルールなどの研究がその後の複雑系脳・神経科学における脳のダイナミクスの理論研究を先導した。これに呼応して、合原一幸と松本元がヤリイカの神経において周期的信号に対するカオスの応答を発見し、林初男と石塚智がイソアワモチの神経において周期的信号や直流信号に対してカオスの応答を発見することで、神経系におけるカオスの存在が実証された。その後、合原らのカオスニューロンネットワークのダイナミクスの解析と津田一郎らの非平衡神経回路のダイナミクスにおけるカオスの遷移現象の解析はともに従来の連想記憶モデルを動的な方向に拡張し動的連想記憶の神経機構の解明に寄与した。さらに、津田らはカオスの遍歴概念を脳・神経系の動的遷移過程を理解するための基礎概念として導入し、多くの非定常的で非周期的な脳活動の機能的な意味の解明に適用している⁷⁾。他方で、合原らはカオス力学系とカオスニューラルネットをもとにした複雑系の工学応用を‘カオス工学’と名付けて発展させた⁸⁾。

また、脳のダイナミックな情報処理に関する研究は1970年代に塚田稔らが神経発火の時系列のマルコフ連鎖解析を行いその後の動的脳の研究を先導した⁹⁾。世界的な潮流として特殊なタスクに対して応答する特殊な神経細胞の発見が主流を占めていた時代にあつて、脳のダイナミクスに着目した研究は極めて少なく、塚田らの研究は特筆に値する。当時の潮流であつた静的脳観はわが国では津田が動的脳観を提案した1984年、1990年においてもなお主流を占め、21世紀に入ってようやく、動的脳観が静的脳観にとってかわるようになった。それは、次の事情によるところが大きい。塚田、藤井宏、奈良重俊、津田、合原の5名がダイナミックブレイングループを形成し、海外ではJapanese Gang of Fiveと呼ばれるようになり、複雑系脳・神経系のダイナミクス研究をけん引した。特に、彼らはダイナミックブレインフォーラム (DBF) をほぼ毎年世界のさまざまな都市で開催し、動的脳観の研究を世界に広めていき、世界中で多くの賛同者が現れ、脳のダイナミクスの研究が一つの潮流となった。ルビン・ワンとファンジー・グーらはこの研究動向の影響を強く受け、さらに規模の大きな国際会議である International Conference on Cognitive Neurodynamics (ICCN) を組織し、この分野の国際学術誌である Cognitive Neurodynamics の発刊を行い、成功させた。甘利をはじめ、フリーマンや上記5人組も editor に名を連ねた。

脳ダイナミクスに関する実験データが共通して示していることは、脳ダイナミクスは非定常、非周期的だが決してランダムではなく複雑な秩序構造を内包するカオスの挙動であり、また、過渡的な引き込みによる同期・脱同期遷移がみられるなど臨界的な秩序状態が内包されているといった、遷移的、臨界的、準定常的な性質を有する点である。これらの観点で、脳ダイナミクスと脳機能との関係が理論と実験の協働研究によって徐々に明らかにされつつある。ダイナミックな記憶に関しては、ラットやヒトで研究が進んだ。また、サルやチンパンジーの思考や学習実験も複雑系研究の中で進展している。さらには、一個体の脳活動の研究にとどまらず、複数個体間のコミュニケーションに伴う脳ダイナミクスの解析とコミュニケーションの神経機構の解明に関する研究が複雑系

数理科学の観点から進んでいる。コミュニケーションで重要になる要素の一つである脳のボトムアップ・トップダウン情報処理に関する検証実験がラット、サル、人間などを用いて研究されている。また、脳神経の持つ自律的なダイナミクスとして、状態間の転移的变化、固有振動数を持つ状態の生成崩壊、神経部位同士の結合の動的変化などが、ヒトを含む哺乳類の脳の異なる部位で見つかっており、*metastable brain* の観点で研究が進んでいる¹⁰⁾。これらは脳内の異なるダイナミクスの相互作用による情報生成の機構を解明する上での重要な手がかりを与えると考えられる。さらに、脳内ダイナミクスには引き込み協調が起こりうるということが知られている^{11, 12)}。

文部科学省科学研究費補助金新学術領域研究「ヘテロ複雑システムによるコミュニケーション理解のための神経機構の解明」では、コミュニケーションをしているときのペア脳のダイナミクスを同時測定し、それを複雑系数理理論に基づく数理モデルで解析した。そこにおいて、複雑系脳・神経科学の観点からコミュニケーションに伴う脳神経機構の解明が著しく進み、‘コミュニケーション神経情報学’という新領域が確立された（特集号^{13, 14)}を参照のこと）。また、上記のように海外でもこの数年、複数の脳の相互作用の研究がコミュニケーションパラダイムのもとに展開されている。例えば、スコット・ケルソーやエマニュエル・トグノリらは、二人の人間がタッピングなどの簡単な運動を互いに統制する過程の脳活動を脳波レベルで研究し、特定の周波数領域の脳波の過渡的で臨界的な引き込みがみられることを発見し、脳の準定常状態仮説を提案した¹⁰⁾。世界的にもコミュニケーションの時の脳活動の研究が盛んになってきている。我が国においては山口陽子のグループが類似のタッピング課題で特定周波数脳波の同期・脱同期転移を発見している¹⁵⁾。また近年、水原啓暁と乾敏郎は脳波と機能的MRIを併用する技術を開発し、それによって異種領野間の同期現象を観測し、コミュニケーションにおける様々な周波数の引き込み協調の役割を解明した¹⁶⁾。さらには、無意味記号の交換による意味の生成過程における脳活動研究においても特定周波数の脳波の引き込みが観測されるなど、脳の機能の一部が複雑系の解析手法によって明らかになっている。今後もこの方向での研究の発展が国の内外で期待されている。

（４）科学技術的・政策的課題

・科学技術イノベーション総合戦略との関係性

複雑系脳・神経科学領域は、「科学技術イノベーション総合戦略」（平成 25 年 6 月 7 日閣議決定）中の‘国際社会の先駆けとなる健康長寿社会の実現’における重点的取り組みとして挙げられたブレイン・マシン・インターフェース（BMI）研究と関係している。本領域では変動する環境に対して柔軟な機能を発揮するための機能分化によるデフォルトネットワークの生成原理やそのダイナミクスが研究されており、この原理に基づく即時適応を行うロボットの開発研究や、創造性を発揮すると考えられる脳領域のTMSやtDCSによる研究に発展することで、近未来のBMI開発に関与する可能性がある。さらには、これらを応用して脳神経系の障害者支援ツールの開発研究や人と共生しコミュニケーションできる発達ロボットの開発へと発展する可能性がある。

・健康・医療戦略との関係性

「科学技術イノベーション総合戦略」に記載され、「健康・医療戦略」（平成 25 年 6 月 14 日関係閣僚申し合せ）にも記載されている iPS 細胞などの分化万能性を持つ幹細胞の研究は新しい再生医療の道を開くと期待されている。特に、iPS 細胞による神経回路の再生は様々な脳疾患、認知症の原因解明と根本治療への道を切り開くものとして期待されている。本領域における細胞分化、機能分化に関係する研究成果は、再生医療の基本となる分化万能性に共通する数理構造を明らかにする可能性がある。この数理モデルは臓器への分化に適用可能であり、脳の欠損を補う再生ネットワークの数理モデルとしても応用可能である。また、健常者と自閉症児の脳波活動の比較研究なども本領域で研究されているが、これらの研究は自閉症の治療への道につながる可能性を秘めている。このように、本領域研究の成果は、わが国の健康・長寿社会の実現に数理科学の立場から貢献すると期待される。

・その他、政府戦略との関係性

第 4 期科学技術基本計画（平成 23 年 8 月 19 日閣議決定）において、科学技術の共通基盤の充実、強化が謳われ、特に領域横断的な科学としての数理科学の役割の重要性が指摘された。これを受けて、文部科学省研究振興局基礎研究振興課に数学イノベーションユニットが新設され、数学と諸科学の連携研究によるイノベーション創出に期待が寄せられている。本領域研究においては、わが国の健康・長寿社会が抱えるさまざまな社会的課題のうちコミュニケーションの脳内機構を数理科学的に解明する研究もおこなわれている。このように、本領域は数理科学の力で社会の要請に応えようとする国の研究指針とも合致している。

（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

脳神経系のダイナミクスの研究は単一脳の研究からペア脳の研究へと進んでいる。コミュニケーション課題や社会的な状況設定における脳内ダイナミクスはペア脳に課される拘束条件によって個々の脳が新たな機能を発現するという点に注目が集まっている。それらは個々の脳に存在するデフォルトモードネットワークの機能的結合によって新たな機能が瞬時に分化し発現するために新しいシステムの制御原理が内在していると見られ、この開発が注目される。その根本原理が解明されることで、適切な学習と不適切な学習に関するアルゴリズムが開発され、さらには過酷環境下で即時に機能分化し適応するロボットの構築が期待される。

さらに、本領域は次の新学術領域研究とも関係する。

平成 26 年度—平成 30 年度：

行動適応を担う脳神経回路の機能シフト機構（小林和人代表）；認知的インタラクションデザイン学：意思疎通のモデル論的理解と人工物設計への応用（植田一博代表）；脳内身体表現の変容機構の理解と制御（太田順）

平成 25 年度—平成 29 年度：

こころの時間学 —現在・過去・未来の起源を求めて—（北澤茂代表）

平成 24 年度—平成 28 年度：

構成論的発達科学—胎児からの発達原理の解明に基づく発達障害のシステムの理解—

（國吉康夫代表）

平成 23 年度—平成 27 年度：

予測と意思決定の脳内計算機構の解明による人間理解と応用（銅谷賢治代表）

平成 22 年度—平成 26 年度：

メゾスコピック神経回路から探る脳の情報処理基盤（能瀬聡直代表）；質感認知の脳神経メカニズムと高度質感情報処理技術の融合的研究（小松英彦代表）

平成 21 年度—平成 25 年度：

ヘテロ複雑システムによるコミュニケーション理解のための神経機構の解明（津田一郎代表）

また、本領域は平成 21 年度発足の JST CREST

脳神経回路の形成・動作原理の解明と制御技術の創出（小澤瀨司代表）

において展開されている研究とも関係している。

海外の動向として、米国のブレイン・イニシアティブ（Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies; BRAIN）は神経科学で新たに発展が期待される神経テクノロジーによって脳機能解明を目指すものとして、本領域の成果が応用される可能性がある。

（6）キーワード

複雑系数理理論、数理モデル、脳ダイナミクス、動的脳観、非線形力学系、カオス、フラクタル、非線形振動子、引き込み、コミュニケーション、ペア脳、数理モデリング

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↑	・第4期科学技術基本計画に数理科学の振興が入ったことで、従来の脳神経科学に数理科学、特に複雑系数理科学が必要との認識が広まっている。しかし、優秀な若手が安定した職に就けないなどの問題が多々認められ、近い将来には人材不足による急降下が危惧される。
	応用研究・開発	○	→	・科学技術イノベーション総合戦略、健康・医療戦略などにおいてBMI研究やiPS細胞による幹細胞研究などが言及されている。
	産業化	×	—	・そもそも行われていないと思われる。
米国	基礎研究	◎	↑	・ブレイン・イニシアティブによる脳神経科学研究の振興。オバマ大統領の一般教書演説で数学・数理科学振興に力を入れることが力説されている。
	応用研究・開発	◎	↑	・パーキンソン患者の脳へのチップの埋め込みと複雑系科学を応用したチップへのシグナル印加などすでに、医療、治療にまで踏み込んでいる。NeuroprosthesisとBMIの融合を試みているように見える。
	産業化			
欧州	基礎研究	◎	↑	・英国、ドイツを中心に複雑系科学を振興する傾向がいまだに続いている。
	応用研究・開発	○	→	・Neuroprosthesisを主導し、英国、ドイツ、スイスなどに大きな研究室があり活発に研究が進められているが、飛び抜けて優れた成果が聞かれない。
	産業化			

中国	基礎研究	△	↗	・一部成果が見え始めているので、今後は大きな成果が出る可能性がある。
	応用研究・開発			
	産業化			
韓国	基礎研究	×	→	・基本的に日本の科学技術政策に追従しているため、新しいものが出るのは純粋に個人の力によるだろう。ただし、最近では日本人をはじめ優秀な外国人が大学、研究所のポジションにつき始めているので、今後は伸びる可能性を秘めている。
	応用研究・開発			
	産業化			

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) ハーバート A・サイモン. システムの科学. 稲葉元吉, 吉原英樹訳. パソナルメディア, 1999. (サイモンはこの本で、複雑系は人工物であるととらえている。サイモンとは反対に、複雑系を生命系として捉え、数理科学の立場から解説したものに、岩波「数学辞典第4版」中の「複雑系」の項、ならびに大野克嗣、非線形な世界、東京大学出版会、2009年がある。)
- 2) 例えば、Kaneko, Kunihiko. Clustering, coding, switching, hierarchical ordering, and control in network of chaotic elements. Physica D. 1990, vol. 41, p. 137-172.
- 3) 例えば、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.
- 4) Kuramoto, Yoshiki. Chemical Oscillations, Waves, and Turbulence. Dover, 2003.
- 5) ウォルター J・フリーマン. 脳はいかにして心を創るのか. 浅野孝夫訳. 産業図書, 2011.
- 6) 例えば、甘利俊一. 神経回路網の数理. 産業図書, 1978.
- 7) Tsuda, Ichiro. Toward an interpretation of dynamic neural activity in terms of chaotic dynamical systems. Behavioral and Brain Sciences. 2001, vol. 24, no. 5, p. 793-847. カオスの遍歴は、池田研介、金子邦彦、津田一郎、ピーター・デイビスによって1990年前後に提案された高次元（ベクトル場では4次元以上）力学系のカオス的な遷移現象の総称である。最近の特集号として、Kaneko, Kunihiko; Tsuda, Ichiro. eds. Focus Issue on Chaotic Itinerancy. Chaos. 2003, vol. 13, no. 3. また脳神経系におけるカオスの遍歴の最近の総説は Tsuda, Ichiro. Chaotic itinerancy. Scholarpedia. 2013, vol. 8, no. 1, p. 4459.; Tsuda, Ichiro. Chaotic itinerancy and its roles in cognitive neurodynamics. Current Opinion in Neurobiology. 2015, vol. 31, p. 67-71.
- 8) 合原一幸. 応用カオス. サイエンス社, 1994.; 池口徹, 小室元政, 山田泰司, 合原一幸. カオス時系列解析の基礎と応用. 産業図書, 2000.

- 9) Tsukada, Minoru; Ishii, N.; Sato, R. Temporal pattern discrimination of impulse sequences in the computer-simulated nerve cells. *Biol. Cybernetics*. 1975, vol. 17, no. 1, p. 19-28.
- 10) Kelso, J. A. S.; Dumas, G.; Tognoli, E. Outline of a general theory of behavior and brain coordination. *Neural Networks*. 2013, vol. 37, p. 120-131.
Tognoli, E; Kelso, J. A. S. The metastable brain. *Neuron*. 2014, vol. 81, p. 35-48.
- 11) Gray, C. M.; Konig, P.; Engel, A. K.; Singer, W. Oscillatory responses in cat visual cortex exhibit inter-columnar synchronization which reflects global stimulus properties. *Nature*. 1989, vol. 338, no. 6213, p. 334-337.
- 12) Rodriguez, E.; George, N.; Lachaux, J.P.; Martinerie, J.; Renault, B.; Varela, F. Perception's shadow: Long-distance synchronization in the human brain. *Nature*. 1999, vol. 397, p. 340-343.
- 13) Sakaguchi, Y.; Aihara, T.; Dominey, P. F.; Tsuda, I., eds. Communication and Brain: Emergent Functions through Inter-Neuron and Inter-Brain Communications. Special Issue of *Neural Networks*. 2015, vol. 62, p. 1-118.
- 14) Tsuda, Ichiro; Yamaguchi, Yoko; Hashimoto, Takashi; Okuda, Jiro; Kawasaki, Masahiro; Nagasaka, Yasuo. Study of the neural dynamics for understanding communication in terms of complex hetero systems. *Neuroscience Research*. 2015, vol. 90, p. 51-55.
- 15) 川崎真弘, 北城 圭一, 山口 陽子. 人と人のタッピング同期に関連した2者間の脳波リズム同期. *信学技報*, 2012, vol. 112, no. 176, p.73-78.
- 16) Mizuhara, Hiroaki; Inui, Toshio. Is mu rhythm an index of the human mirror neuron system? A study of simultaneous fMRI and EEG. *Advances in Cognitive Neurodynamics*. 2011, p. 123-127.

3.5.3 複雑系数学

(1) 研究開発領域名

複雑系数学

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

伝統的な数学においては簡明な構造をもつ図形の上の幾何学や解析学が展開され、応用されてきた。より複雑な図形については、早くから遭遇していたが、数学研究の対象になり始めたのは 20 世紀とくにその後半からである。他方、21 世紀に入り、諸分野からの複雑な系の数学的な理解と解析に対するニーズは一段と高まり、既存数学の発掘・応用とともにその本質を捉える数学的革新が期待されている。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

(3-1) 数学的な背景

しばしば例えられるようにチョコ・ブラーエの観測データ（当時のビッグ・データ）の中に法則性を見たのは古代ギリシャ伝来の二次曲線論を知っていたケプラーであった。カオスにおいては永らく多くの人々が不規則現象を見ていながらそれに気付くことはなかった。複雑な系は多数存在し、それぞれの（既存あるいは成立途上の）分野において解明したい代表的な複雑な系は存在するが、複雑系の定義はまだない¹⁾。概念の形成されていないものを見るのは至難の業である。

おそらく数学における複雑な図形との最初の遭遇は極小曲面の問題であろう。この問題は、18 世紀変分法の創成期に Euler、Lagrange と共に始まり、石鹼膜で実験してみせた物理学者名を冠して Plateau 問題とも呼ばれる。そこでの複雑な図形は泡状の膜であり、その数学的記述形式が確立されたのは 20 世紀後半の varifold の理論や幾何学的測度論であった。

次の大きな遭遇は 19 世紀、場所は Navier-Stokes 方程式、複雑系は乱流であろう。その解は弱解（Leray-Hopf 解）として定式化されているが、その存在問題は未解決で 2000 年クレイ研究所による 7 つのプレミアム懸賞問題のひとつとなった。

現在の複雑系研究につながる「自己相似性」をもつ図形には、20 世紀初頭にかけて発見された Cantor 集合、Peano の「空間を埋め尽くす」（space-filling）曲線、Koch の雪片、Sierpinski の鏟等や Poincare による自己漸近 (homoclinic) 軌道があり、さらに、「いたるところ微分不可能な」曲線（Weierstrass や高木貞治他）もある。その背景には Cantor による集合論の成立とそれに基づく無限の理解があった。（余談ながら、それまでの欧州の伝統では無限は専ら神の領域に属するものであり、人の営む研究の対象ではなかった。）

(3-2) 幾何学・解析学

物質科学、生命科学等々において複雑な形状をもつ対象の把握とその解析に対する期待は急増している。そのような対象は自己相似図形を手掛かりにすることが多い。現在では、そのような図形に対しては Mandelbrot 以来フラクタルという用語が定着し、Hausdorff 次元（その簡易版がフラクタル次元や箱数次元）も広く知られている。中でも、木上淳により定式化された p.c.f.有限分岐自己相似集合は幾何学的構造が比較的明快

で数学的研究が最も進んでいる。そこでも直接微分を定義して微積分を展開するには困難があるが、確率解析における福島正俊たちの Dirichlet 形式論が活用できて、その上の熱伝導や拡散などの現象を記述し、解析することができる。なお、フラクタル図形は見える人だけが見ることのできるものの例である。実際、その数学的実在を知っていれば、コンピュータによって好きなだけの精度の近似図形を描くことができるが、知らなければ、ただややこしい図形を見るだけで終わる。余談ながら、フラクタルな境界をもつ領域におけるラプラス作用素の固有値分布の研究 (Weyl の公式の一般化) の源流のひとつ (G. Papanicolau) が現場から持ち込まれた波消しブロックの問題であったことは示唆的である。また、多粒子系や大きなグラフ (ネットワーク) は複雑系であろうが、現在までのところ、サイズ無限大でのスケール極限 (例えば、流体力学極限) や特殊解の構造 (例えば、ソリトン) あるいは特殊な自己相似性 (例えば、scale-free network) の観点からの研究は進んでいるが、サイズ有限の大規模系そのものの数学解析は格段に難しく、今後の大きな課題である。

(3-3) 力学系

複雑な系の記述形式として、現在までのところ、最も汎用性があるのは力学系の概念である。力学系 (dynamical system) とは、一言でいえば、状態空間の上の時間発展を定める規則である。言い換えれば、時間発展の数学的な定式化である。力学系理論は、整数論、幾何学、解析学から確率論、応用数学に及ぶ横断的な領域であり、位相力学系、微分可能力学系、保測力学系、複素力学系 (complex dynamics。複雑系と混同しやすい伝統的な数学用語であり、要注意。) などに分類され、研究されている。拡散過程等の確率過程もセル力学系 (セル・オートマトン) も力学系の一種である。

(3-3-1) アトラクタ

アトラクタ (吸引集合) の概念は力学系という記述形式のもつ第一の強みであろう。そのもっとも簡単な例は不動点 (固定点) であり、平衡状態を記述するものとして、周期点と共に 20 世紀初頭以来多くの研究がある。1960 年代後半からカオス現象が注目されるようになり、コンピュータの能力の向上と共に、さまざまな「状態」が観察され、それらは、奇妙なアトラクタを始めとして、アトラクタとして把握される。Lyapunov の安定性理論に始まる伝統的なアトラクタに関しては十分な数学研究の蓄積があり、確立した数学概念である。しかし、諸現象を記述するにはそれだけでは事足りず、いわゆる Smale のアトラクタなど微妙な構造をもつアトラクタの諸概念が提唱され、数学的研究が進みつつある。なお、時間反転したときのアトラクタがレペラ (反撥集合) であり、安定方向と不安定方向の双方をもつ不変集合が双曲型集合である。一様双曲型集合に関しては 1960 年代の Smale の馬蹄形、1970 年代の Pesin の一般論以来の十分な数学的蓄積がある。統計力学における臨界現象の理論では、くり込み群 (renormalization group) が双曲型不動点をもち、その不安定方向が 1 次元であることから、普遍法則等を導いている。しかし、非一様双曲型集合についての研究は進んでいるが未成熟である。とくに 1 点のみで退化する双曲型集合は間欠的カオスなど間欠性の数学モデルとして有望である。

(3-3-2) 分岐理論

力学系のもつ第二の強みは分岐理論である。分岐の出発点は 1930 年代の Birkhoff に始まる標準形である。連続時間／離散時間に依らず、微分可能力学系の不動点は線形化写像の Jordan 標準形に応じて中心、渦心、鞍点等に分類される。これは非退化な不動点における標準形が Jordan 標準形により決まることを利用している。力学系がパラメータとともに動くとき、標準形が様変わりする(消失や出現も含めて)ことが分岐であり、非退化な不動点の分岐については十分な数学的蓄積がある。Hopf 分岐は非線形振動論の中心的な問題である。またハミルトン力学系における標準形理論から KAM (Kolmogorov-Arnold-Moser) 理論が誕生した。さらに、連続時間の場合の周期運動を離散時間の不動点の場合に帰着して解析するのが Floquet の理論である。不動点から分岐したものがさらに分岐するとき、2 次分岐という。2 次分岐(さらにより高次の分岐)については意欲的な個別研究は進み、成果もあげている。また起こり得る現象の選択肢を与えるには役立つ。しかしながら、数学理論としては未成熟で、(実/数値)実験結果の解釈や理解に必須というレベルに留まり、予見能力は不十分である。「動く」記述方式という観点からは今後の大きな課題である。

(3-4) 応用解析

大規模な系の考察は 19 世紀後半の Boltzmann に始まる。そこでは熱力学の法則を分子運動の統計力学で説明したいという「夢」があった。20 世紀後半 Turing は形態形成を化学反応から捉えることを提唱した。現在、Boltzmann の流れを汲むものの代表例として確率論を基礎とした流体力学極限の研究がある²⁾。Turing の流れでは、分岐理論を基礎とした反応拡散系の研究などを挙げることができる。また、Navier-Stokes 方程式を始め、各種の偏微分方程式の研究も進んでおり、その応用研究も展開しつつある。

(4) 科学技術的・政策的課題

複雑系数学には、2 つの方向が必須である：

- ① 課題解明に向けた既存の数学・数理的手法の活用
- ② 課題に即した新たな数学手法の発掘と展開

①は、課題そのものもしくはそのモデル化が既存の馴染みある数学・数理的手法の適用範囲に入っていること(もしくは入るような設定が可能なこと)を想定し、創意工夫により問題を解明しようとする方向である。その際の流れは以下のようにまとめることができよう。

- ・大きなデータの収集・整理
- ・数理的な問題と察知し、問題を提起する能力
- ・問題を理解し、数学・数理の問題と認識する能力
- ・数学的定式化あるいは数理モデリング
- ・数学的あるいは数理的な解明の能力(数値解析、数値実験等の技法を含む)
- ・数学・数理的な結果の吟味、フィードバック

モデリングが成功し、使い慣れた道具で済めばその波及も速く、効率的である。そのためには既存の数学手法の発掘と的確な応用手法の開発は不可欠でありそれを担う人材あるいは橋渡しをする人材の育成が急務である。

②は、課題が馴染みある数学・数理的手法の適用範囲外の場合である。これについてもこの流れはほぼ当てはまるが、各項の内容は異なる。数学・数理的な手法の発掘は、課題に直面する側と数学・数理科学側との協働作業である。上述の Smale のアトラクタや高次分岐など数学内部の課題についても、データの収集においては諸分野からのさまざまな実験データの提供が不可欠であるが、見ても見えていない場合は協働なくして提供されることはない。特定の（単独または複数を組み合わせた）手法が発掘された段階では、課題に適用できる形に整備し、理論を展開する必要がある。また既存の手法がない場合には新たな手法の開発が必要となる。さらには新たな概念や記述形式の創出が必要となる。それらは通常長い時間を要する。

①、②いずれの方向も、数学者・数理科学者と諸分野の研究者が問題意識を共有し、協働する場を設置する必要がある。従来からの研究所、センター等の設置と共に、JST における研究領域の設置が数学・数理科学においても一定の成果をもたらすことが証明されつつある。また有能な若手研究者も育ち始めている。欧米に比べて数学・数理科学の出身者の活躍の場が狭く、人材も不足しているが、このような流れが 1 世代以上の期間継続すれば、必要な人材の育成・養成も可能となり、我が国でもひとつの数学文化として定着することが期待される。しかしながら、期限付きのプロジェクトは、若手研究者の使い捨てにつながる恐れがある。使い捨てはまた、経験豊富な人材、目利きのできる人材の養成の中断・放棄でもある。アカデミア、民間を問わず、キャリア・パスへの政策的な配慮が必須である。

複雑系の数学に関する研究は米国では Los Alamos National Laboratory³⁾、Santa Fe Institute、Duke University⁴⁾、Brown University⁵⁾、Georgia Tech⁶⁾、University of Texas at Austin⁷⁾、University of Illinois⁸⁾、The New England Complex Systems Institute⁹⁾、Boston University¹⁰⁾、The Pennsylvania State University¹¹⁾、University of Michigan¹²⁾などで複雑系の研究が行われている。また SIAM Activity Group¹³⁾は毎年国際研究集会を開催し力学系に関する最新の研究成果を発信している。

わが国では、複雑系数学に関係の深い研究が、北海道大学大学院理学研究院数学部門、東京大学大学院数理科学研究科、京都大学数学教室、京都大学数理解析研究所、大阪大学理学部数学科、九州大学マス・フォア・インダストリ研究所などで行われている。力学系に関する研究集会が数多く開催されており、研究者の交流が活発である。また FIRST 合原複雑数理解モデルプロジェクトでは力学系理論と制御理論の融合など複雑系数理に関する多くの成果を得ている。

（5）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

永らく日本の数学者は応用に興味をもたず、理学部の数学と諸分野とが分離する傾向のあったことは、文部科学省政策研究所「忘れられた科学——数学」¹⁴⁾でも指摘されたところである。しかし、その後の文科省や JST による施策もあり、諸分野との協働に対して当初の予想以上に数学界の反響は好意的であり、いくつかの大学では数学と諸分野の協働や連携を謳った研究所等の設置が始まっている：

- ・ JST 「数学と諸分野の協働によるブレークスルーの探索」領域（西浦研究総括）
- ・ JST 「現代の数理科学と連携するモデリング手法の構築」領域（坪井研究総括）

- ・北海道大学数学連携センター
- ・京都大学統合複雑系科学国際研究ユニット
- ・九州大学マス・フォア・インダストリ研究所（共同利用・共同研究拠点）
- ・明治大学先端数理科学インスティテュート（共同利用・共同研究拠点）
- ・東北大学原子分子材料科学高等研究機構（WPI-AIM）数学ユニット
- ・文部科学省数学協働プログラム（統計数理研究所、北海道大学、東北大学、東京大学、明治大学、名古屋大学、京都大学、広島大学、九州大学）

（6）キーワード

力学系・エルゴード理論、位相幾何学、微分幾何学、離散幾何学、偏微分方程式論、応用解析、数理工学、現象数理学、非線形科学、カオス、フラクタル、大規模系、複雑ネットワーク、数理モデリング

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・北海道大学大学院理学研究院数学部門、東京大学大学院数理科学研究科、京都大学数学教室、京都大学数理解析研究所、大阪大学理学部数学科などで複雑系の数学に関わる研究が行われている。 ・力学系に関する研究集会在数多く開催されており、研究者の交流が活発である。 ・FIRST合原複雑系数理モデルプロジェクトでは力学系理論と制御理論の融合など複雑系数理に関する多くの成果を得ている。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・北海道大学数学連携センター、東北大学原子分子材料科学高等研究機構、京都大学統合複雑系科学国際研究ユニット、統計数理研究所、明治大学先端数理科学インスティテュート、東京大学生産技術研究所最先端数理モデル連携研究センター、東京大学生命動態プロジェクト、早稲田大学複雑系高等学術研究所、九州大学マス・フォア・インダストリ研究所、などで複雑系の数学の様々な分野への応用研究が行われている。 ・革新的シミュレーション研究センターではシミュレーション技術開発とソフトウェア解析を行っている¹⁵⁾。 ・渋滞学、定量腫瘍学など数学をベースとした新しい学術領域が展開されている。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・新日本製鐵住金では数理工学技術を研究開発の基盤技術に取り込み、製品・プロセス開発の高度化を実践している。
米国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・複雑系の研究グループが多数組織されており活発な活動を行っている。 ・Duke UniversityのThe Center for Nonlinear and Complex Systemsは工学系、生物系、数学系など様々な分野の専門家からなる研究グループ。複雑系の研究と教育双方が充実している。 ・Georgia TechのApplied Chaos Laboratoryは1982年から非線形力学に関する研究集会Dynamical Days USを毎年開催しており研究者の交流が盛んである。 ・University of Texas at AustinのCenter for Nonlinear Dynamicsでは複雑系の応用研究が盛ん。 ・The New England Complex Systems Instituteでは複雑系を対象として基礎・応用研究および教育活動を行っている。 ・SIAM Activity Groupは毎年国際研究集会を開催し力学系に関する最新の研究成果を発信している。 ・Los Alamos National LaboratoryのCenter for Nonlinear Studiesは1980年設立以来、力学系とカオス研究が盛ん。ワークショップ、研究集会を毎年多数開催している。 ・Santa Fe Instituteでは複雑系の分野横断的研究が盛んである。 ・DSWeb¹⁶⁾は米国、英国の力学系研究に関する最新動向（研究集会、研究グループ、ソフトウェアなど）を公開している。 ・Society of Chaos Theory in Psychology & Life Science¹⁷⁾は複雑系、カオスの理論研究および応用研究に関する最新の研究成果を発信している。

	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> University of Marylandのカオス研究グループ¹⁸⁾は1970年半頃からカオス力学系の理論と実験の融合研究を推進している。 力学系モデルを解析する様々なソフトウェアが開発されている¹⁹⁾。
	産業化	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> MathWorks社のMatlab/Simulink、Wolfram社のMathematica、Maplesoft社（カナダ）のMapleなどの科学技術計算を支援する統合開発環境が世界中で広く利用されている。 汎用工学シミュレーションソフトであるCOMSOL社のCOMSOL Multiphysics、SIMULIA社の3D SIMULIAは複雑現象のシミュレーション計算を得意とし、製造業分野で利用されている。
欧州	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> Max Planck Institute of Mathematicsでは複雑系の研究を行っている。 英国にはThe University of Warwick（力学系・エルゴード理論に強い研究グループがある²⁰⁾）やThe University of Bristolをはじめ様々な大学で複雑系研究グループが組織されている²¹⁾。 Complex systems society²²⁾は複雑系に関する国際会議をテーマごとに開催しており研究者の交流が盛んである。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> Max Planck Institute for dynamics and self-organizationでは複雑系の応用研究を行っている。 University College London、Centre for Mathematics、Physics and Engineering in the Life Sciences and Experimental Biology²³⁾では複雑系のbiologyとmedicineへの応用研究が盛んである。 University of Oxfordの研究グループ「The Oxford Centre for Industrial and Applied Mathematics (OCIAM)」²⁴⁾では流体解析や非線形システムを含む数学研究を産業諸分野への応用を念頭に行っている。 FyDiK²⁵⁾、iDMC²⁶⁾などはじめ力学系モデルを解析する様々なソフトウェアが開発されている。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> Smith Instituteは数学の産業諸分野への応用に取り組んでいる。
中国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 北京大学、中国科学技術アカデミー、復旦大学、香港城市大学²⁷⁾などで複雑系の研究を行っている。
	応用研究・開発	×	→	<ul style="list-style-type: none"> 不明。
	産業化	×	→	<ul style="list-style-type: none"> 不明。
韓国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 2005年に設立された国立数理科学研究所（NIMS）では、次世代ネットワークモデルや脳機能の数学をベースとした研究を行っている。
	応用研究・開発	×	→	<ul style="list-style-type: none"> 不明。
	産業化	×	→	<ul style="list-style-type: none"> 不明。

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

（8）引用資料

- 1) 日本数学会編. 岩波数学辞典. 第4版, 岩波出版, 2007.
- 2) 舟木直久, 内山耕平. ミクロからマクロへ (2) 流体力学極限. 丸善出版, 2012.
- 3) Los Alamos National Laboratory, Center for Nonlinear Studies.
<http://cnls.lanl.gov/External/>
- 4) Duke University, The Center for Nonlinear and Complex Systems (CNCS).
<http://www.math.duke.edu/cnsc/index.html>
- 5) Brown University, Lefschetz Center for Dynamical Systems.
<http://www.dam.brown.edu/lcds/>

- 6) Georgia Tech, Applied Chaos Laboratory. <http://www.cns.gatech.edu/>
- 7) University of Texas, Center for Nonlinear Dynamics. <http://chaos.utexas.edu/>
- 8) University of Illinois, The Applied Dynamics Laboratory.
<http://danko.mechanical.illinois.edu/index.htm>
- 9) The New England Complex Systems Institute. <http://necsi.edu/>
- 10) Boston University, Mathematics & Statistics. The Dynamical Systems Group.
<http://math.bu.edu/dynamics/faculty.html>
- 11) The Pennsylvania State University, Department of Mathematics, Center for Dynamical Systems and Geometry. <http://www.math.psu.edu/dynsys/>
- 12) University of Michigan, Center for the Study of Complex Systems.
<http://www.lsa.umich.edu/cscs/>
- 13) SIAM Activity Group. <http://www.siam.org/activity/ds/>
- 14) 文部科学省研究振興局, 数学イノベーション委員会中間報告.
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu17/002/
- 15) 革新的シミュレーション研究センター. <http://www.ciss.iis.u-tokyo.ac.jp/index.php>
- 16) DSWeb. <http://www.dynamicalsystems.org/hp/hp/>
- 17) Society of Chaos Theory in Psychology & Life Science.
<http://www.societyforchaostheory.org/>
- 18) Dynamical System Software. <http://www.dynamicalsystems.org/sw/sw/>
- 19) University of Maryland. <http://www.chaos.umd.edu/>
- 20) The University of Warwick.
<http://www2.warwick.ac.uk/fac/sci/math/research/dynamics/>
- 21) A list of research sites maintained at the University of Warwick.
<http://www.maths.warwick.ac.uk/dynamics/links.html>
- 22) Complex systems society.
<http://css.csregistry.org/tiki-index.php?page=wiki&redirectpage=homepage>
- 23) University College London, Centre for Mathematics, Physics and Engineering in the Life Sciences and Experimental Biology. <http://www.ucl.ac.uk/complex>
- 24) University of Oxford. <https://www0.maths.ox.ac.uk/groups/ociam>
- 25) FyDiK. <http://fydik.kitnarf.cz/>
- 26) iDMC. <https://code.google.com/p/idmc/>
- 27) City University of Hong Kong, College of Science and Engineering, Centre for Chaos and Complex Networks. <http://www.ee.cityu.edu.hk/~cccn/assoccentres.htm#Japan>

3.5.4 複雑系物理学

(1) 研究開発領域名

複雑系物理学

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

物理的手法に基づく複雑系の計測手法開発と情報抽出、法則の発見。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

物理学には、素粒子物理学のように物質を極限まで分解して理解しようとする分野もあるが、それだけでは複雑な自然現象の理解は不可能である。我々を取り巻く自然現象は、多くの要素からなり、それらが複雑に相互作用しながら、時には秩序を、時には乱れを創り出している。この世界は、不断にエネルギーや物質の流れが存在する非平衡の世界であり、その理解のためには、複雑系を統計力学や非平衡物理学の視点から解きほぐす必要がある。物理学の本質は、理論と実験を両輪に、現象の奥に潜む法則やメカニズムを明らかにし、それらを元に予測や制御を行うことにある。複雑系に関する物理学が発展し、その理論や観測方法が進歩することで、新物質の開発や新たな計測技術などの新技術につながるとともに、実社会に偏在する様々な秩序とゆらぎに潜む法則の発見や制御技術の発達を促す可能性がある。

統計物理学は伝統的に多数の要素から成る系が、少数の変数で記述でき、さらにはマクロな法則に従うことを明らかにしてきた。その成果は、現代の物質科学や情報科学、エネルギーの科学を支える基盤となっている。しかし、これらの成果は多くの場合、熱平衡系に限られており、それに比べて非平衡系の統計力学はいまだ発展途上にある。そのメインストリームの一つは、ミクロな力学を出発点にして、非平衡系への拡張を目指すものであり、近年は、ゆらぎの定理の発見など非平衡系特有のゆらぎが満たす法則が明らかになっている。また、非平衡系に特徴的な自己組織化や乱れなどの構造形成の原理とメカニズムを明らかにしようとする潮流は、現在、マイクロスケールからナノスケールの現象までその対象を広げている。また、統計力学の手法を情報の世界に適用し、大自由度系の確率ダイナミクスを扱う情報統計力学と呼ばれる分野も近年発達してきている。

これらの非平衡統計力学、あるいは非平衡物理学、さらには情報統計力学を総合した分野を「複雑系物理学」と呼ぶことにする。「複雑系物理学」は、自然界の基本的な物理法則に立脚し、物質や対象の違いを超えて、(1) 多数の要素から成る系のゆらぎや応答の従う法則を明らかにし、(2) 非平衡状態で対称性を破って現れる自己組織構造や乱れの生成原理と性質を解き明かし、それらを元に、(3) ゆらぎから情報を得る計測技術や複雑系の制御方法の開発、さらには情報処理分野における統計力学手法の応用までを視野に入れた研究分野とすることができる。その対象は、非平衡状態にある固体、液体、ガラス、ソフトマターなど様々な凝縮系物質に始まり、非平衡状態としての生命現象や、動き回る要素集団であるアクティブマターや交通流、群衆モデルにまで及んでいる。また、手法としては、ミクロレベルの記述としての力学やメゾスケールでの確率過程による記述、マクロレベルでの連続体モデルによる記述などに立脚しながら、系の

時間発展法則や統計的性質を明らかにすることが主眼となっている。そこでは、しばしば単純なモデルによる記述が実際の物質や現象と定量的にも一致し、それが物質や系の違いを超えて同じ性質を持つという普遍性とと呼ばれる現象が現れることがあり、物理的アプローチの強みが明らかとなる場合がある。以下では、複雑系物理学の最近の発展について、少し具体的に見てゆくことにする。

物質の性質を定量的に測定、分類し、特徴づけることは、物質科学の基本であり、物質の利用においては欠かせない重要なステップである。特に、電気伝導率、帯磁率、熱伝導率、粘性率などの輸送係数の同定は重要である。熱平衡のゆらぎと応答の関係を最初に明らかにしたのは、1905年の Einstein によるブラウン運動の理論であり、電気伝導に関しては、1927年に Johnson と Nyquist により、抵抗の電圧ゆらぎと抵抗値の関係が明らかにされた。これらの理論を、NMR (核磁気共鳴) 信号の解析や量子系にも適用できる形に一般化し、線形応答理論という理論にまとめたのは、久保、富田、中野、中嶋を始めとする日本の統計力学研究者達であった¹⁾。特に、Green-Kubo 公式と呼ばれる関係式は、輸送係数を決定する方法として物質科学のあらゆる場面で用いられており、特に、物質設計シミュレーションでは欠かせない方法の一つである。線形応答理論は、熱平衡の近傍でのみ成立つ関係式であり、ゆらぎは基本的にガウス分布に従う。しかし、平衡から遠く離れると、駆動力と応答の関係は非線形となり、ゆらぎも非ガウス分布となる。このような非平衡ゆらぎの研究は多方面で行われてきた。中でも、抵抗に電流を流した場合のゆらぎであるショットノイズは、電子の粒子性が現れる最も単純な非平衡ゆらぎの一つである。ショット雑音では、ファノ因子を測ることにより、電気伝導に関与する電荷の素量が分かる。これを利用して、分数量子ホール効果の検証が行われ、1998年のノーベル物理学賞にもつながったことは記憶に新しい。量子ホール効果は、電気抵抗の標準(約 10 桁)などにも用いられる重要な現象である。近年では、計測技術の進歩により、これらの量子現象が単電子ナノデバイスなどでも測定可能になってきており²⁾、電流ゆらぎ一つを取っても、非平衡ゆらぎの測定が物質の基本特性を明らかにするばかりでなく、今後も新現象の検出や電気標準の革新に結びつく技術となる可能性がある。

線形応答理論を越えて、非平衡状態で現れる熱ゆらぎの性質を理論的に明らかにしようとする試みは、統計力学分野で伝統的に行われてきたが、1993年に始まる「ゆらぎの定理」の発見³⁾、1997年の Jarzynski 等式の発見⁴⁾により大きく進展した。ゆらぎが観測しやすい小さな系を対象とするため、1分子計測やナノデバイス、単電子デバイスなど、小さな系の非平衡現象を扱う上で、不可欠の理論となりつつある。具体的には、RNAの1分子をレーザーピンセットや AFM (原子間力顕微鏡) で伸張させた場合のエネルギー変化やエントロピー生成をゆらぎの分布から測定することが可能である⁵⁾。同様のことは、ブラウン粒子のレーザー操作や⁶⁾、量子干渉デバイスの非平衡ゆらぎを測定するなどの状況にも適用可能である⁷⁾。このように設定が一般的なため、様々の実験系に適用できる可能性を持っている。実際にこの理論の出現により、1分子計測でも熱測定が可能となったことは特筆すべきであろう。通常、物質の比熱や相変化に伴う自由エネルギーには、マイクロカロリーメータなどを用いるため、少なくとも数 ml 程度の物質がないと測定は不可能であるが、1分子操作における仕事のゆらぎを測定し、Jarzynski

等式を用いれば、必要な物質の量はカロリメータの 10^{20} 分の 1 程度ですむことになり、微量な生体分子を測定する方法として今後用いられる可能性がある。Einstein 関係式や Green-Kubo 公式では、ゆらぎの相関関数と応答が一致するというゆらぎ-応答関係式が成立つが、非平衡状態では一般にこの等式が破れる。Harada-Sasa (HS) 関係式は、この破れの大きさが熱散逸率に等しいことを表している。このことは、1 分子計測やナノシステムにおいて、通常の方法では測定不可能な微量の発熱やエネルギー移動、さらには熱と仕事の変換効率などの計測を可能にするという大きな意義を持っている。このような観点から、小さな系における発熱やエネルギー収支を計測する実験が Toyabe 等により行われた⁸⁾。

これらの 1 分子計測における新しい非平衡関係式を用いた熱測定技術は、今のところデモンストレーションにとどまっているが、将来的に MEMS や近接光測定、蛍光測定技術などと組み合わせることで、同時に複数の分子を操作できれば、多種の分子を同時並行かつ大量に熱計測できる大きな可能性を秘めている。

(4) 科学技術的・政策的課題

- ・複雑系の物理を物質科学や工学に応用するためには、非平衡現象に関連したダイナミクスの理解、分岐理論や非線形動力学、非平衡の熱統計力学、非平衡相転移など基礎科学の十分な発展と理解が必要である。物質科学への応用には、非平衡輸送現象に関する理解を深化させ、電氣的応答、磁氣的応答、構造形成や構造変化に関する知見として、連続体の弾性変形、塑性変形、破壊力学、欠陥の動力学などに分岐理論や秩序形成の理論を拡張して適用できる可能性がある。
- ・欧米では、複雑系科学を目的とした研究機関が多いため、基礎研究から応用研究までを見通して研究体制を整備したり、新しい研究動向が把握しやすい環境にある。複雑系科学に携わる研究者や研究グループが、世界の動向を迅速に知り的確に研究が展開できるよう、日本でも新たな研究所の創設が望まれる。

(5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

- ・文部科学省の新学術領域研究 (研究領域提案型) では、「ソフトインターフェースの分子科学」(H20-H24)、「コンピューティクスによる物質デザイン: 複合相関と非平衡ダイナミクス」(H22-H26)、「感覚と知能を備えた分子ロボットの創成」(H24-H28)、「ゆらぎと構造の協奏: 非平衡系における普遍法則の確立」(H25-H29)、「生命分子システムにおける動的秩序形成と高次機能発現」(H25-H29) など、凝縮系物質や超分子集合体、生命を模倣した分子システムやロボットに至るまでを非平衡ダイナミクスや自己組織化の観点から理解し、実現しようとする大規模な共同研究プロジェクトが続けて採択され、ファンディングが加速するとともに、この分野の裾野が拡大しつつある。
- ・物理現象には量子限界、熱力学的限界などの様々の限界が存在する。これらの限界は、測定や標準の精度限界や、熱機関の効率の限界、物質の冷却限界、計算における最小発熱などを決めているが、これらの限界が本質的な限界であるのか、新しい技術で限界を破ることができるのかは、常に物理学者の議論の的となってきた。情報の世界で

- は、類似の概念として、通信路容量の上限を決める Shannon 限界や計算量理論における P/NP 問題などがある。近年、これらの理論的限界に関する理解が進み、限界に近い状態を有限時間で近似的に実現する技術や、操作的方法や新技術によって克服できる可能性が見えてきている。熱力学第二法則に関する Maxwell demon や計算の発熱限界に関する Landauer 原理をより精密に議論することを可能にした情報熱力学は、測定とフィードバックにより部分系ではこの限界が破れることを明らかにした^{9, 10)}。
- MRI や AFM (原子間力顕微鏡)、レーザーピンセットのデータ処理と解析には、熱ゆらぎによる揺動と散逸の関係を表す揺動散逸定理が使われている。通常は、熱雑音や量子ゆらぎが測定の限界を与えている。これに対して、古典ゆらぎに関しては、ゆらぎを測定し、フィードバックによりノイズを低減する方式が提案されている。例えば、加速器に於ける Stochastic Cooling 法¹¹⁾は、ゆらぎ情報のフィードバックによる冷却である。ちなみにこの実験手法は、1984 年のノーベル物理学賞のウィークボソンの発見につながったとされている。量子系では、レーザー冷却などが原子のゆらぎ情報に応じた制御を行っており、同様の技術として捉えることができる。
 - 2014 年の数学のフィールズ賞は、Hairer Martin の確率微分方程式の研究に与えられた。これは、成長するランダム界面の方程式である KPZ (Kardar-Parisi-Zhang) 方程式の厳密解の研究が近年急速に進んだことと、液晶の実験においてそれを検証する結果が得られたことに大きく影響を受けているとされている^{12, 13)}。
 - コロイド結晶は、フォトニック結晶の製作方法などに応用されているが、近年はコロイド粒子の一つ一つに構造の異方性や極性を導入することで、より複雑な構造を自己組織化する試みが行われている。オランダ、ユトリヒト大学の Soft Condensed Matter Group や、ニューヨーク大学の Center for Soft Matter Research では、新たな異方性コロイドの製作方法の開発が行われ、それらを用いたコロイド結晶やコロイド膜などの作成が試みられている。
 - バイオミメティック材料の開発において、ナノスケールからマイクロスケールの領域で構造を自己組織化することで、超撥水、構造色、サメ肌、イモリの粘着毛を模した材料の開発が行われている。
 - ImPACT 「しなやかなタフポリマー」のプログラム・マネージャー伊藤耕三等の環動ゲル、片岡一則のドラッグデリバリーシステム (DDS) における高分子ミセルは、いずれもソフトマターの自己組織化原理を用いた機能性高分子の製造方法である。
 - 世界的には、非平衡効果の産業応用も活発化している。ドイツでは、非平衡クロス効果の一種であるソーレ効果を利用して、高感度の生体分子認識や医療検査に使える計測器のベンチャービジネス (Nano Temper Technology) が立ち上がり、具体的成果をあげつつあるほか、ノルウェイでは、海水と真水を利用した浸透圧発電の実用化試験が行われ、フランスでも浸透圧発電を目指したナノチューブを用いた新しい半透膜の開発が始まっている¹⁴⁻¹⁷⁾。
 - 多くの境界領域分野で、ナノスケールからマイクロスケールまでの物理、化学現象を階層的に取り入れたマルチスケール、マルチフィジクスモデリングが実用化されつつある。
 - 世界的に、アクティブマターと呼ばれる研究分野が大きく成長しつつある。これは、

自己駆動コロイドや生体分子モーター、運動する細胞集団、昆虫や鳥、魚の群れに至るまで自ら動く粒子集団の振る舞いを理論・実験の両面から明らかにする研究であり、物理、化学、生物、工学など多くの分野の研究者を巻き込んで研究が開始されており、関連した国際会議や論文の数も急激に上昇している。ここでも、統計物理モデルが実際の系の本質を良く表していることが明らかになりつつある¹⁸⁻²⁰⁾。

- CG の物理シミュレーションでは、自由界面や分裂、合流する複雑な流体シミュレーションに物理保存則を満たしつつ、境界条件の扱いが容易な SPH (Smooth Particle Hydrodynamics) モデルが多用されるようになってきている。
- Craig Reynolds が提案した BOID モデルは、単純なアルゴリズムにより、生物集団の動きを自然に近い形で再現することに成功した。このモデルは、バットマンやジュラシックパークなどの映画における CG 自動作成などで使用され、今日の CG の基礎となっている。
- スパースモデリングや圧縮センシングは、大規模データから少数の変数で記述できるモデルを抽出したり、少ないデータから背後にある本質的な構造を抽出する手法であるが、この解法には情報統計力学の手法が使われており、現在研究が活発化している。こうした研究は MRI や NMR の検査時間短縮、さらには宇宙探査データや生命情報などの解析にも効果的と考えられている。
- 情報統計力学手法を用いた情報ネットワークの性能評価、アルゴリズム開発が進められている。例えば、携帯電話、スマートフォンなどの通信機器に用いられている CDMA (Code-Division Multiple Access) などのスペクトラム拡散通信方式において、多数のユーザーの通信データを正しく復号化する問題では、NP 完全問題とも関係して、有限時間で解を見いだす近似アルゴリズムなどが使用されている。そのため理論的な性能限界などの性能評価が欠かせない。情報統計力学では、ベイズ推定の一種である MAP (Maximum A Posteriori) 法や MPM (Marginal Posterior Mode) 法などを用いて信号の推定を行い、レプリカ法などを用いてこれらの性能評価を理論的に行うことができる。
- ゆらぎから秩序を形成する原理として、物理系における自由エネルギーの最小化や、情報分野における評価関数の最小化などがあるが、これらに関連した多体問題の解を求めることが必要な場面が多く存在する。タンパク質フォールディング問題などにおいては、マルチカノニカル法やレプリカ交換法などが効率的に基底状態を求めるアルゴリズムとして使われている。また、ベイズ推定などの様々の統計的推定では、求める統計分布のサンプリングを行うため、マルコフチェーンモンテカルロ法 (MCMC 法) などが使われている。散逸系でアトラクターが存在する場合やポテンシャルの最小化問題では、シミュレーテッドアニーリング法が広く用いられており、最近では、量子アニーリング法などが世界初の実用的量子コンピュータである D-Wave にも採用されている²¹⁾。
- ネットワーク科学は、物理学者の A. Barabási 等により創設されたが、フラクタルやスケール不変性などの自然現象に見られる概念をインターネット空間やタンパク質の相互作用などあらゆる種類のネットワークに普遍的に見られる構造に着目することで、分野の境界を越えて拡大しつつある分野である。

- ・アクティブマターの研究は、鳥や魚の群れのモデルとして出発したが、現在では分子モーターや自己駆動するコロイド粒子、細胞集団の運動など広範な現象の普遍的な性質を扱う分野に拡大しつつある。数理科学分野では Crowd Dynamics の用語で呼ばれ、人間や動物の群集ダイナミクスの数理モデルを扱う分野と関連している。また、情報科学との関連では、群れ運動や Crowd Dynamics は、集合知や Decision Making の問題とも関連している。
- ・欧州の ERC (European Research Council) の Advanced Grant (AdG) で Critical Phenomena in Random Systems や、Complex structure and dynamics of collective motion、The Physics of Active Particle Suspensions などの大型予算が採択され、FP7 の International Research Staff Exchange Scheme (IRSES) では、SoftActive—Non-equilibrium dynamics of soft and active matter が採択され、仏独日の交換プログラムがスタートするなど、複雑系物理学に関するファンディングが行われている。

(6) キーワード

複雑系、複雑系物理学、統計力学モデル、熱力学第二法則、非平衡ゆらぎ、自己組織化、力学系、非線形科学、非平衡ソフトマター、アクティブマター

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・北海道大学電子科学研究所、同大学院工学研究科応用物理学専攻、東北大学大学院理学研究科物理学専攻、同情報科学研究科応用情報科学専攻、東京大学大学院理学系研究科物理学専攻、同総合文化研究科、東京工業大学大学院理工学研究科物性物理学専攻、同総合理工学研究科知能システム科学専攻、京都大学大学院理学研究科物理学・宇宙物理学専攻、同情報学研究科複雑系科学専攻、大阪大学大学院理学研究科物理学専攻、広島大学大学院理学研究科数理分子生命理学専攻、九州大学大学院理学研究院物理学部門、早稲田大学先進理工学部、中央大学理工学部物理学科、明治大学先端数理科学インスティテュートなどで、複雑系の物理と関係した教育・研究が行われている。 ・科学研究費補助金の新学術領域研究で「ゆらぎと構造の協奏：非平衡系における普遍法則の確立」(H25~H29)が発足し、非平衡系の統計力学の観点からソフトマター、量子凝縮系、生命機能に関する研究が展開されている。また、「スパースモデリングの深化と高次元データ駆動科学の創成」(H25~H29)では、情報統計力学の研究が展開されている。 ・JST さきがけ事業「数学と諸分野の協働によるブレークスルーの探索」では、多くの若手の物理系研究者が採択され成果をあげた。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ・産業技術総合研究所ナノシステム研究部門では、複雑系物理・化学に基づく非平衡材料やナノシステムへの応用研究が行われている。 ・「世界トップレベル研究拠点プログラム(WPI)」では、東北大学原子分子材料科学高等研究機構(AIMR)において物理と数学の材料科学への応用や自己組織化原理に基づくバイオメタリック材料の研究が行われている。 ・北海道大学大学院先端生命科学研究院先端融合科学研究部門、山形大学大学院理工学研究科機械システム工学専攻、東京大学大学院新領域創成科学研究科物質系専攻などで、複雑系物理のソフトマターへの応用研究が行われている。 ・JSTのImPACTプログラムで「超薄膜化・強靱化「しなやかなタフポリマー」の実現」(伊藤耕三プログラム・マネージャー)が採択され、非平衡科学や自己組織化の応用開発が開始されている。 ・東京大学の片岡一則等が開発している抗がん剤などのドラッグデリバリーシステムは、高分子PEGを用いた高分子ミセルの自己集合効果を応用した技術である。

	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 株式会社豊田中央研究所、株式会社ブリヂストン、花王株式会社などで、自己組織化に基づくソフトマターの産業化研究が行われている。
米国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 米国の多くの大学で、統計力学、ソフトマター、生物物理学の基礎研究が展開されるとともに、Santa Fe Institute や Los Alamos National Laboratory、Rockefeller大学、Princeton大学などでは、物理、生物の分野融合により世界をリードする複雑系科学の研究が展開されている。 プリンストン高等研究所では、新たに理論生物学のグループを立ち上げ、S. Leibler、A. Libchaber、Simon Levinなどの有力な物理学者が核となり研究を展開している。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> D-Wave Systems, Inc.は、東工大の西森秀稔等の提案した量子アニーリングの原理を使用して、量子コンピュータの開発を行っている。
	産業化	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> CGにおいて物理法則に従い運動する物体や流体、生物の群れなどの生成アルゴリズムは、物理運動シミュレーションと呼ばれ広く普及している。 Wolfram社の商用ソフトウェアMathematicaは、物理学者であったS. Wolframが開発し、世界的に普及している数式処理システムである。
欧州	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ドイツでは、複雑系関連の研究施設がMax Planck Institute (MPI)の中に少なくとも4つ存在し、欧州を代表する複雑系研究が行われている。MPI for the Physics of Complex Systems (Dresden)、MPI for Dynamics and Self-Organization (Göttingen)、MPI for Dynamics of Complex Technical Systems (Magdeburg)、MPI for Polymer Research (Mainz)などで、物理学をベースに流体科学、非線形動力学、システム生物学、ソフトマターなどの複雑系の研究が大規模に行われている。 ドイツのFritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft (Berlin)では、G. Ertl (2007年ノーベル化学賞)によって創始されたグループが化学反応拡散系に関する実験と理論研究を行っている。また、国立研究所Forschungszentrum Jülichには、Institute of Complex Systemsが設置されており、理論と実験グループがそれぞれソフトマターと生物物理の複雑系研究を展開している。 フランスは、数学、物理、生物学などの基礎科学に強い伝統を有し、それらを融合した分野として、アクティブマターや非線形動力学の研究が精力的に行われている。 英国は数理、物理、生物学のレベルが高く、生物流体の研究が精力的に行われている。 ドイツ科学財団 (DFG) による大型共同研究プロジェクトであるSFB (Sonderforschungsbereich) で“Physics of Colloidal Dispersions in External Fields” (SFB, TR 6, 2002-2013) が採択・実施され、ドイツ、オランダを中心としてコロイドの自己組織化と非平衡科学の基礎研究が大規模に行われた。 DFGによるPriority Programme “Microswimmers – From Single Particle Motion to Collective Behaviour” (SPP 1726, 2014-2016) が採択され、ドイツ国内での大規模な共同研究と教育研究が推進されている。
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 欧州では、エネルギー問題に対する理論研究者の関心も高く、海水と真水を利用した浸透圧発電などのブルーエナジーにも関心が高まっており、ノルウェイで実用化試験が行われたほか¹⁴⁾、フランスでもナノチューブで起こる非平衡現象を利用した新しい半透膜の開発も始まっている¹⁵⁾。
	産業化	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ドイツでは、非平衡クロス効果の一種であるソーレ効果を利用して、高感度の生体分子認識や医療検査に使える計測器のベンチャービジネス (Nano Temper Technology) が立ち上がり、具体的成果をあげつつある^{16), 17)}。
中国	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 北京大学、上海交通大学、復旦大学、中国科学アカデミーの物理学研究所などで、複雑系物理学の基礎研究が行われている。 中国の計算科学分野の中心的研究所であるBeijing Computational Science CenterのComplex Systems Divisionでは、統計力学に基づいた複雑系物理学の研究が行われている。 中国は1000 Talents Planにより海外から有力な研究者を呼寄せている。その一貫として、北京大学には、Center for Quantitative Biology、Center for Theoretical Biologyなどの研究所が新設され、物理学手法による定量生物学研究が開始された。 アクティブマターの研究は最近、中国政府が関心を寄せており、これらを対象とした研究が今後増えていくと期待される。

	応用研究・開発	○	↗	・国家自然科学基金委員会の2014年の重点研究 ²²⁾ として、「高性能科学技術計算と計算可能モデリング」が取り上げられ、非定常の流体運動や大気現象に関する研究が重点化されている。
	産業化	×	→	・特筆すべき活動・成果は見られない。
韓国	基礎研究	○	→	・ドイツ Max Planck Institute を目指して、Institute for Basic Science では、すでに10以上の研究センターが新設されている。その中で、Center for Theoretical Physics of Complex Systems、Center for Self-assembly and Complexity、Center for Soft and Living Matter などでは、複雑系物理学の観点から研究を行っている ²³⁾ 。 ・アメリカとの交流が盛んであり、ネットワーク科学の研究者数が多い。
	応用研究・開発	○	→	・サムソンは、医療技術や医薬産業に多くの投資を開始している。
	産業化	×	→	・特筆すべき活動・成果は見られない。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) 中島貞雄. 線形応答理論の成立. 日本物理学会誌. 1996, vol. 51, no. 10, p. 699-705.
- 2) Sela E.; Oreg, Y.; Oppen, F.; Koch, J. Fractional shot noise in the Kondo regime. Phys. Rev. Lett. 2006, vol. 97, 086601.
- 3) Evans, D. J.; Cohen, E. G. D.; Morriss, G. P. Probability of second law violations in shearing steady states. Phys. Rev. Lett. 1993, vol. 71, p. 2401.
- 4) Jarzynski, C. Nonequilibrium Equality for Free Energy Differences. Phys. Rev. Lett. 1997, vol. 78, p. 2690.
- 5) Liphardt, J. et al. Equilibrium Information from Nonequilibrium Measurements in an Experimental Test of Jarzynski's Equality. Science. 2002, vol. 296, no. 5574, p. 1832-1835.
- 6) Wang, G. M. et al. Experimental Demonstration of Violations of the Second Law of Thermodynamics for Small Systems and Short Time Scales. Phys. Rev. Lett. 2002, vol. 89, 050601.
- 7) Nakamura, S. et al. Nonequilibrium Fluctuation Relations in a Quantum Coherent Conductor. Phys. Rev. Lett. 2010, vol. 104, 080602.
- 8) Toyabe, S. et al. Nonequilibrium Energetics of a Single F1-ATPase Molecule. Phys. Rev. Lett. 2010, vol. 104, 198103.
- 9) Sagawa, T.; Ueda, M. Minimal Energy Cost for Thermodynamic Information Processing: Measurement and Information Erasure. Phys. Rev. Lett. 2009, vol. 102, 250602.; Sagawa, T.; Ueda, M. Generalized Jarzynski Equality under Nonequilibrium Feedback Control. Phys. Rev. Lett. 2010, vol. 104, 090602.

- 10) Toyabe, S.; Sagawa, T.; Ueda, M.; Muneyuki, E.; Sano, M. Experimental demonstration of information-to-energy conversion and validation of the generalized Jarzynski equality. *Nature Physics*. 2010, vol. 6, p. 988-992.
- 11) Möhl, D.; Petrucci, G.; Thorndahl, L.; van der Meer, S. Physics and technique of stochastic cooling. *Physics Reports*. 1980, vol. 58, p.73-102.
- 12) 舟木直久. フィールズ賞業績紹介 : ハイラー. 数学セミナー. 2015, 1月号.
- 13) Takeuchi, K. A.; Sano, M. Universal Fluctuations of Growing Interfaces: Evidence in Turbulent Liquid Crystals. *Phys. Rev. Lett.* 2010, vol. 104, 230601.
- 14) <http://www.power-technology.com/projects/statkraft-osmotic/>
- 15) Siria, A.; Poncharal, P.; Bianco, A. L.; Fulcrand, R.; Blase, X.; Purcell, S. T.; Bocquet, L. Giant osmotic energy conversion measured in a single transmembrane boron nitride nanotube. *Nature*. 2013, vol. 494 no. 7438, p455-458.
- 16) Baaske, P.; Wienken, C. J.; Reineck, P.; Duhr, S.; Braun, D. Optical Thermophoresis for Quantifying the Buffer Dependence of Aptamer Binding. *Angewandte Chemie*. 2010, vol. 49, p. 2238-2241.
- 17) <http://www.nanotemper-technologies.com/>
- 18) Ramaswamy, S. The Mechanics and Statistics of Active Matter. *Annual Review of Condensed Matter Physics*. 2010, vol. 1, p. 323-345.
- 19) Vicsek, T.; Zafeiris, A. Collective motion. *Physics Reports*. 2012, vol. 517, p. 71-140.
- 20) Marchetti, M. C. et al. Hydrodynamics of soft active matter. *Rev. Mod. Phys.* 2013, vol. 85, p. 1143.
- 21) Kadowaki, T.; Nishimori, H. Quantum annealing in the transverse Ising model. *Phys. Rev. E*. 1998, vol. 58, p. 5355.
- 22) 国家自然科学基金委員会, 2014年重大研究計画項目.
<http://www.nsf.gov.cn/nsfc/cen/xmzn/2014xmzn/07/index.html>
- 23) <http://www.ibs.re.kr/eng.do>

3.5.5 複雑系数理モデル学

(1) 研究開発領域名

複雑系数理モデル学

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

複雑系を解析するための数理モデリングとその数理解析手法の研究開発。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

複雑系は、一般に多種多様な非線形要素が非線形相互作用するシステムであり、要素群と全体の間には階層的フィードバックを生じる。したがって、要素還元論的理解も全体還元論的理解も、どちらか一方だけでは複雑系を理解するためには不十分である。

このような複雑系に対しては、数理モデルによる研究手法が有効である。すなわち、非線形要素および要素間の非線形相互作用をモデル化して数学的に複雑系を構成し、その数理モデルを理論的に解析することにより、複雑系を理解しようという方法論であり、「構成（もしくは、合成）による解析（analysis by synthesis）」と呼ばれる。この「構成による解析」という研究手法自体は、多種多様な構成要素を組み合わせることで複雑なシステムを構築することが不可欠な工学分野で早い時期に発想されたものと思われるが、特に数理モデルによる「構成による解析」は様々な問題で大きな効果を発揮するため、科学技術はもとより人文科学、社会科学を含めて多くの研究領域で活用されている。このように、多様な複雑系を数理モデル化して数理的に解析する研究分野を「複雑系数理モデル学」と呼ぶ。「複雑系数理モデル学」は、様々な構成要素から成る複雑システムの数理モデルを、(1) ネットワーク構造と最適化機能に関わる複雑ネットワーク理論、(2) ダイナミクスと制御機能に関わる複雑系制御理論および(3) 観測ビッグデータと予測機能に関わる非線形データ解析理論の3つの基礎理論から成る理論的プラットフォームに立脚して、構築・設計し解析することを可能にしている¹⁾。

複雑系においては、要素→要素間の相互作用→全体→さらに要素へのフィードバックという階層的フィードバックを生じるので、その数理モデリングにおいては、要素、要素間の相互作用、全体という3つの階層に留意する必要がある。上記の理論的プラットフォームを活用する場合にも、この3つの階層を考慮することが不可欠である。たとえば、(1) 複雑ネットワーク理論は、複雑系の構造という観点では3つの階層の中間レベルの「要素間の相互作用」のモデル化と最も密接に関係するが、どのような要素を想定するかといった要素レベルの問題、さらには全体を考えた最適化などの全体レベルの問題を考慮することも必要となる。同様に、(2) 複雑系制御理論は、たとえば、交通流制御のように渋滞低減を全体レベルの目標として定め、各要素である車両に対して、その相互作用を道路網というネットワーク構造上でモデル化した制御問題を取り扱う。一方、(3) 非線形データ解析理論は、要素レベルのデータ解析のみではなく、要素間の相互作用によるネットワーク構造の観測データに基づいた構造推定や、脳から計測した脳波、脳磁界データ、脳画像の解析や生物の行動データ解析のように複雑系の全体レベルの問題も取り扱う。

「複雑系数理モデル学」は、「自然の書物は数学の言語によって書かれている」とい

う意味の言葉を述べたと伝えられるガリレオ・ガリレイの思想を、複雑系を対象にして現代の科学技術に適用するものである。その基盤となる物理現象を超えた様々な実現現象の数理モデル研究は、特にわが国で精力的に開発されてきたものである。まず、第2次世界対戦後にGHQによって東京大学工学部航空学科が廃止されたことがひとつの契機となって、東京大学工学部で生まれた「数理工学」²⁾がある。また最近では、三村昌泰によって提唱された「現象数理学」³⁾が同様の方向を指向している。数理工学や現象数理学においては、様々な実現現象を数理モデルで記述し、その数理モデルを数学的に研究する。端的に言えば、複雑系数理モデル学は、複雑現象や複雑システムを対象にして数理工学や現象数理学の観点から研究する学問の総称である。

歴史的には、複雑系数理モデル学の重要な背景となったのは、1948年に出版されたW. Weaverの論文である⁴⁾。Weaverはこの論文の中で、17世紀以降の自然科学研究を、以下の3つに分類した。

- ① 17世紀から19世紀にかけて主として行われた、少数変数の決定論的法則を研究する「単純さの問題」(Problems of Simplicity)。
- ② 1900年前後から行なわれた、無数の変数からなる系の平均的挙動の確率・統計的法則を研究する「組織されない複雑さの問題」(Problems of Disorganized Complexity)。
- ③ この論文が出版された1948年の時点において今後本格的に研究すべき問題として挙げられた「組織された複雑さの問題」(Problems of Organized Complexity)。

この③の「組織された複雑さの問題」が、今日的意味での複雑系の研究に対応している。Weaverは、その具体例として、生命システム、経済システム、社会システムなどを上げるとともに、その研究のためには、第2次世界大戦中に開発が加速された電子計算機が重要な役割をはたすだろうと述べている。

実際、複雑系数理モデル学にとって、コンピュータの貢献は極めて大きい。なぜならば、複雑系は多くの場合大規模な非線形システムとして記述され、数学的な解析には大きな困難を伴うため、近似的数値計算やシミュレーションが本質的に重要な役割を果たすからである。

このこととも深く関係するが、数理モデル学のパラダイムの変遷は以下の3つに大別することができる。

- ① ニュートン・パラダイム (17世紀～19世紀) : 数理モデルもその解もともに式で表現する研究。
- ② ポアンカレ-ルンゲ-クッタ・パラダイム (1900年前後) : ポアンカレによる幾何学的・定性的解析、たとえば、「システムは安定か?」、「時間が経過するにつれて、周期的状態へ漸近するか?」、「パラメータ値が変化した時、解の力学構造がどのように変化するか?」といった問題を、解の式自体は明示することなく解析する研究 (ただし、数理モデルの式は与えられる)、およびルンゲやクッタによって始められた、数値計算によって式が与えられた数理モデルの解を近似的に求める研究。
- ③ アルゴリズム的モデリング・パラダイム (1981年以降) : 数理モデルも解もともに、力学系の埋め込み定理に基づいて、コンピュータを用いてデータからアルゴ

リズムとして近似的に構成する研究。

この③のアルゴリズム的モデリング・パラダイムは、コンピュータの高性能化とビッグデータの集積によってはじめて本格的活用が可能になったものであり、第一原理からのモデル化が難しい複雑系研究にとって不可欠な手法になりつつある。特に最近のビッグデータ研究の活発化によって、今後益々重要になることが予想される。

複雑系数理モデル学の研究は、米国では Santa Fe Institute、欧州では Max Planck Institute for the Physics of Complex Systems などを中心に行われている。さらに、米国には、複雑系全般を研究対象とする教育・研究機関が数多くあり、複雑系を対象とする国際学会や専門学術誌も豊富である。大学と企業の産学連携も盛んであるため、実社会に役立つ複雑系研究も活発に行われている。また、欧州にも、複雑系を謳う研究センターが数多く存在し、欧州各国の複雑系の研究機関の連携を促進するグループが形成されている⁵⁾。また、複雑系に関する国際会議 (ECCS) が毎年行われており、最新の研究が発表される⁶⁾。さらに、複雑系科学における研究・教育を促進し、研究・高等教育機関をつなぐ国際的なネットワークの設立を目的として、UNESCO UniTwin network for a Complex Systems Digital Campus⁷⁾のプログラムが2013年8月より開始されている。アフリカや中南米諸国を含めて、多くの国 (Algeria, Argentina, Belgium, Brazil, Cameroon, Chile, Colombia, Cuba, France, Germany, India, Israel, Italy, 日本, Lebanon, Mexico, Morocco, Mozambique, Peru, Poland, Portugal, Senegal, Spain, Switzerland, 台湾, Tunisia, 英国, Venezuela) の大学や研究所が参加している。中国や韓国などのアジア諸国には、まだ大きな存在感のある複雑系の教育・研究機関は見られない。

わが国では、複雑系数理モデル学に関係の深い研究として、科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業 (ERATO)⁸⁾において、山本量子ゆらぎプロジェクト⁹⁾、今井量子計算機構プロジェクト¹⁰⁾、合原複雑数理モデルプロジェクト¹¹⁾、金子複雑系生命プロジェクト¹²⁾、湊離散構造処理系プロジェクト¹³⁾、河原林巨大グラフプロジェクト¹⁴⁾などが、また内閣府/日本学術振興会の最先端研究開発支援プログラム (FIRST)¹⁵⁾として、情報エネルギー生成基盤プロジェクト¹⁶⁾、量子情報処理プロジェクト¹⁷⁾、最先端数理モデルプロジェクト¹⁸⁾などが行われた。また、「世界トップレベル研究拠点プログラム (WPI)」では、東北大学原子分子材料科学高等研究機構 (AIMR)¹⁹⁾および東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構 (Kavli IPMU)²⁰⁾において数学をベースとした研究が行われている。特に、平成15年度から20年度まで行われた科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業 ERATO 合原複雑数理モデルプロジェクト¹¹⁾および平成21年度から25年度まで行われた FIRST 最先端数理モデルプロジェクト¹⁸⁾において、複雑系数理モデル学が体系化された。これらのプロジェクトでは、複雑系を対象とする様々な基礎的モデリング・解析手法が開発されると共に、幅広い分野への応用研究が行われた。基礎理論では、それまで独自に発展してきた力学系理論と制御理論を融合して複雑系制御理論が構築され、たとえば両理論の概念を組み合わせたロバスト分岐という新しい概念が生み出された。また、複雑ネットワーク理論、非線形力学系理論、非線形データ解析などの異なる手法を組み合わせた研究が大きく進展した。たとえば、新しく提案された動的ネットワークバイオマーカーは、サンプル数の少ない遺伝子やタンパク質の大規模発現

データから疾病前状態（未病）を同定する新しい理論で、疾病の早期診断や病態悪化の予兆検出に応用できることが示された。この理論は、適用条件を満たせば、疾病以外の複雑ネットワーク不安定化の予兆検出に広く応用できると見込まれ、今後の水平展開が期待されている。

さらに、北海道大学数学連携研究センター、東京大学生産技術研究所最先端数理モデル連携研究センター、東京大学複雑生命システム動態研究教育拠点、統計数理研究所、明治大学現象数理学研究拠点、明治大学先端数理科学インスティテュート、九州大学マス・フォア・インダストリー研究所などで複雑系の数理モデルが活発に研究されてきている。

（４）科学技術的・政策的課題

- ・ 複雑系の数理モデル化のためには、構成要素の数理モデル化とその相互作用の数理モデル化の両方が必要である。特に、複雑系に固有な要素還元論的理解も全体還元論的理解も単独では不可能な性質が、その数理モデル化をチャレンジングなものとしている。また、生命システム、経済システム、社会システムなど第一原理がいまだあきらかではない対象が多いので、数理モデル化に際しては、定性的数理モデルから定量的数理モデルまで様々なスペクトラムの数理モデルの構築が可能であるため、どのような目的でどのレベルで数理モデル化するかを十分に検討することが求められる。さらに、複雑系数理モデル学は広範囲の実現象を対象とするため、数理モデルの理論解析のためには、既存の数理解析手法のみでは不十分である。したがって、数理モデル化のみではなく得られた数理モデルの理論解析手法の開発も同じく重要である。
- ・ 一般に複雑系の数理モデルは大規模な非線形システムになるため、数値計算やシミュレーションの計算量は大きい。また、力学系の埋め込み定理に基づいてデータからのアルゴリズム的数理モデリングを行う際にも、ビッグデータを活用する場合はやはり計算量が問題になる。特に、GPS データやスマートグリッドなどを用いた、人間関係のネットワークや需要者側をも取り込んだ電力システムの数理モデル化に際しては、個人情報への取扱いに十分注意した上で行う必要がある。
- ・ 上記とも関連するが、通信情報、地理空間情報、生体計測情報、人間行動情報などのビッグデータが計測可能になってきており、それらを用いて複雑現象の数理モデリングを行うことが期待されている。しかし、そのような対象を扱うには、一般に高次元のシステムや大量の未知パラメータが必要となる。アルゴリズムと計算資源があれば機械学習の手法によってシステム同定は可能であるが、そのようなアプローチではシステムの本質を理解することは困難である。ビッグデータ解析においても求められていることであるが、情報の取捨選択に関する方法論を確立することは、複雑系数理モデル学にとって重要な課題である。
- ・ 地震、異常気象、感染症流行、発病などは、社会的にきわめて重要な現象であるが、1 回性の高い極端な事象であるため、その推定や予測を行うことが困難である。それらを目的とする数理的技術を改良していくことは、災害予防や疾病予防に大きく貢献すると考えられる。
- ・ スマートフォンや携帯デバイスの発達により人間の社会活動に関するデータが取得

できるようになってきたことを受けて、社会科学や心理学の研究対象だった複雑現象が数理モデリングの対象になってきている。流行現象や意見形成の数理モデルは産業界においてマーケティング戦略に、暴動や社会体制の変化などの数理モデル解析は社会現象の理解に、それぞれ貢献している。今後は、実用性の高いモデリング技術の発展が期待される。将来的には、適用範囲がさらに広がり、法学や政治学に関連する現象の数理モデリングも行われる可能性がある。

- ・数理モデルと実現象との間には、必ずモデル化誤差を生じる。複雑系においては要素と全体の間での階層的フィードバックが循環するため、このモデル化誤差が大きな影響を与える可能性がある。このことが、複雑系の数理モデル化の難しさの一つの要因となっている。この解決に向けて、ロバスト分岐解析理論のように数理モデルの不確かさを力学系理論に取り込むことが重要であろう。
- ・複雑系数理モデル学を実際の現象や問題に応用するには、異分野の研究者との対話と連携が重要である。したがって、数理モデリングの研究者にとっては、異分野の知識を身に着けることや、複雑系数理モデリングの技術的な面を非専門家にわかり易く伝えることが必要となるが、そのような訓練を行う教育現場が不足している。
- ・欧米では、複雑系科学を軸とした研究機関が多いため、日常的に新しいプロジェクトの発足や研究動向が把握しやすい環境にある。数理モデリングに携わる研究者や研究グループが、全世界の社会的重要な課題を敏感に察知できるような体制作りが望まれる。また、日本と諸外国の研究機関の連携もさらに進める必要がある。

(5) 注目動向 (新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

- ・我が国の「第4期科学技術基本計画」(平成23年8月19日閣議決定)において、「数理科学」を、「科学技術の共通基盤」、「複数領域に横断的に活用することが可能な科学技術」と位置付け、それに関する研究開発を推進することが明記された。2014年度には、科学技術振興機構のCREST「現代の数理科学と連携するモデリング手法の構築」²¹⁾と同さきがけ「社会的課題の解決に向けた数学と諸分野の協働」²²⁾、さらには内閣府・革新的研究開発プログラムImPACT「量子人工脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の実現」²³⁾、厚生労働科学研究委託費・新興・再興感染症に対する革新的医薬品等開発研究事業「感染症対策及び予防接種行政に資する数理疫学研究」などがあらたに発足し、この分野のファンディングが活発化している。
- ・米国のブレインイニシアチブ²⁴⁾やHuman Connectome Project²⁵⁾、また欧州のHuman Brain Project²⁶⁾には巨額の予算が投じられている。多方面から脳の基礎的な仕組みを理解し、それを疾病の予防や治療、また脳型計算へと応用する研究が行われている。その一端として、脳の数理モデリングと解析技術の発展が期待されている。
- ・高品質のデータの再利用を目的とする学術雑誌Nature Scientific Dataが2014年に創刊され、複雑系の数理モデリングに役立つデータがオープンに使用可能になっていくと期待される。
- ・米国のJames S. McDonnell Foundationでは、2014年から複雑システム研究に対する競争的資金の提供を行っている²⁷⁾。

(6) キーワード

複雑系、複雑系科学、数理モデル、力学系、数理工学、現象数理学、非線形科学、複雑ネットワーク、複雑系制御理論、非線形データ解析

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> 公立はこだて未来大学システム情報科学部複雑系知能学科、東京大学大学院新領域創成科学研究科複雑理工学専攻、京都大学大学院情報学研究科複雑系科学専攻、名古屋大学大学院情報科学研究科複雑系科学専攻などで、複雑系の数理モデルと関係した教育・研究が行われている。 内閣府最先端数理モデルプロジェクト（平成21-25年度）が実施され、複雑系数理モデル学の基礎理論研究が行われた。また、複雑系数理モデル学を様々な社会的重要な課題に応用した。さらに、日本科学未来館常設展示「1たす1が2じゃない世界ー数理モデルのすすめ」で、複雑系数理モデル学のアウトリーチ活動が行われて約20万人が来場した。 JST戦略的創造研究推進事業CREST「現代の数理学と連携するモデリング手法の構築」および、さきがけ「社会的課題の解決に向けた数学と諸分野の協働」が2014年度に発足した。社会における支配原理・法則が明確でない諸現象を数学的に記述・解明するモデルの構築を目指すものである。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> 「世界トップレベル研究拠点プログラム（WPI）」では、東北大学原子分子材料科学高等研究機構（AIMR）¹⁹⁾および東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構（Kavli IPMU）²⁰⁾において数学をベースとした研究が行われている。 北海道大学数学連携研究センター、東京大学生産技術研究所最先端数理モデル連携研究センター、東京大学複雑生命システム動態研究教育拠点、統計数理研究所、明治大学現象数理学研究拠点、明治大学先端数理科学インスティテュート、九州大学マス・フォア・インダストリー研究所などで、複雑系数理モデル学の様々な分野への応用研究が行われている。 前立腺がんをはじめとする疾病のバイオマーカー値から数理モデルに基づいて患者個々の病状推定や予後予測を行う基礎技術が確立され、プロトタイプとなるソフトウェアが開発されている。 渋滞学という新しい数理モデルベースの研究分野が創成されており、渋滞解消などを通じて交通システムの効率化に応用されようとしている。 地震の予測や災害に強いインフラの設計に応用できる数理モデル研究に注目が集まっている。
	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> トヨタ自動車株式会社、新日鐵住金株式会社、旭硝子株式会社などで、複雑系数理モデル学の最先端産業化研究が行われている。 ネット広告の投資効果予測に数理モデルを活用する研究が企業等において活発に行われている。 文科省・科学技術試験研究委託事業「数学・数理学と諸科学・産業との協働によるイノベーション創出のための研究促進プログラム」において、さまざまな産業分野の複雑数理モデル研究に関する研究会が行われている。

米国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> • Santa Fe Institute や Los Alamos National Laboratory で、世界をリードする複雑科学の研究が行われており、数理モデリングも重要な役割を果たしている。 • オバマ大統領のBRAINイニシアチブ中間報告において、NIHは本研究領域に対して2014年に40億円の研究費を投じることを期待、その重点領域の一つとして、モデリング学、統計学、計算論などと脳実験の融合を掲げている⁵⁾。 • 脳の数理モデルとそのロボティクスへの応用研究に関して世界をリードしている。 • ブログやツイッターなどのソーシャルメディアのデータから人の社会行動（民主化運動の広まりなど）、会話やメールを通じた人のコミュニケーションの特徴、文化の発達などの数理モデルを構築する研究が精力的に行われている。 • NSFやNIHが癌研究に多くの予算を投じており、医療応用を目指した腫瘍成長の数理モデリングが広く行われている。 • 分子生物学とバイオインフォマティクスの進展を受けて、システム生物学において遺伝子・タンパク質ネットワークおよび細胞・免疫系の数理モデリングが盛んに行われ、医薬・医療への応用を目指して資金的にも力を入れている²⁸⁾。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> • New England Complex Systems Institute において、複雑系数理モデル学の応用研究が行われている。 • 力学系モデルを解析するフリーソフトウェアAUTOが世界的に普及している。 • 企業の研究所や海軍などでも最先端の数理モデル技術を用いたアルゴリズムの開発やシミュレータの開発が盛んに行われている。
	産業化	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> • D-Wave Systems, Inc. (拠点はカナダ) は、NASA や Google と共同で量子コンピュータを開発している。 • 米 IBM は、ヒトの脳の情報処理機構を模倣した半導体技術を開発している。 • 多くのIT企業、製造業、金融機関などで数理モデルが開発されソフトウェア等の形で実用化されている。 • Mathwork社の商用ソフトウェアMatlabは世界的に科学技術計算に広く用いられ、信号処理システム等のモデリングに便利なSimulinkというツールを備えている。 • Wolfram社の商用ソフトウェアMathematicaは世界的に普及している数式処理システムである。
欧州	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> • 複雑系科学における研究・教育を促進し、研究・高等教育機関をつなぐ国際的なネットワークの設立を目的として、UNESCO UniTwin-Complex Systems Digital Campus が 2013年 8月に発足した。 • ドイツのMax Planck Institute for the Physics of Complex Systems やフランスの国立科学研究センター (CNRS) において、ヨーロッパを代表する複雑系科学の研究が行われており、数理モデリングも重要な役割を果たしている。 • 各国の数理モデル研究者の交流が盛んである。European Conference on Complex Systems (ECCS) という会議では、毎年レベルの高い研究発表およびサテライトシンポジウムが企画されている⁶⁾。 • 英国は数理生物学のレベルが高く、生態系、感染症、がんなどの数理モデル研究が精力的に行われている。 • ドイツ・フランス・イタリアのグループの連携により、新しいセンシング技術で得られる大量の人の接触データから感染症や人の行動パターンの数理モデリングが研究されている²⁹⁾。 • 2013年に開始した、欧州FETの二大プロジェクトの一つであるHuman Brain Projectには、10年間で1200億円が投じられ、神経細胞の数理モデルに基づいて脳全体の活動のシミュレーションシステムの構築が目標とされている²⁶⁾。 • 英国やドイツでは細胞やその遺伝子制御ネットワークのシステムバイオロジー研究のプロジェクトが推進されている²⁸⁾。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> • Italian Society for Chaos and Complexityでは、特に複雑系の制御の観点からの応用研究を指向している。 • ドイツは自然エネルギー導入に熱心で、エネルギー問題に対する理論研究者の関心も高く、数理モデリングに注目が集まっている。

	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> • The Smith Institute for Industrial Mathematics and System Engineering で、産業応用を目的とした複雑系数理モデル学の研究が行われている。 • ライブラリのパーツを組み合わせることで、複雑な物理現象等のモデリングとシミュレーションを行うことのできるソフトウェアが開発され、自動車会社等の産業界で利用されている。
中国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> • 北京大学、復旦大学、中国科学アカデミーの応用数学研究所、システム科学研究所などで、複雑系数理モデル学の基礎研究が行われている。 • 中国政府は数学研究予算を増加しており、複雑現象の数理モデリング研究を担う人材が今後増えていくと期待される。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> • 国家自然科学基金委員会の重点研究^{28, 30)}として、「高性能科学技術計算と計算可能モデリング」が取り上げられている。 • 計算知能分野に研究人口が多く、複雑適応系などの観点から研究を行う人材が育っている。
	産業化	×	→	<ul style="list-style-type: none"> • 特筆すべき活動・成果は見られない。
韓国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> • ソウル国立大学 Statistical Research Center for Complex Systems、POSTECH Nonlinear and Complex System Laboratoryなどで、複雑系の数理モデルと関係した教育・研究が行われている。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> • 数理科学の応用を目指して国立数理科学研究所（NIMS: National Institute of Mathematical Sciences）が2005年に設立されている。
	産業化	×	→	<ul style="list-style-type: none"> • 特筆すべき活動・成果は見られない。

(註 1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註 2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註 3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) 合原一幸編著. 暮らしを変える驚きの数理工学. ウェッジ, 2015.
- 2) 杉原正顕, 杉原厚吉編著. 数理工学 最新ツアーガイド. 日本評論社, 2008.
- 3) 三村昌泰編. 現象数理学入門. 東京大学出版会, 2013.
- 4) Weaver, W. Science and Complexity. American Scientist. 1948, vol. 36, p. 536-544.
- 5) Complexity Net. <http://www.complexitynet.eu/about/Pages/default.aspx>
- 6) European Conference on Complex Systems. <http://www.eccs14.eu/index.php?lang=en>
- 7) Complex Systems Digital Campus. <http://unitwin-cs.org/>
- 8) 科学技術振興機構 ERATO. <http://www.jst.go.jp/erato/index.html>
- 9) 山本量子ゆらぎプロジェクト.
http://www.jst.go.jp/erato/research_area/completed/yry_PJ.html
- 10) 今井量子計算機構プロジェクト.
http://www.jst.go.jp/erato/research_area/completed/irkk_PJ.html
- 11) 合原複雑数理モデルプロジェクト.
http://www.jst.go.jp/erato/research_area/completed/ahs_PJ.html

- 12) 金子複雑系生命プロジェクト.
http://www.jst.go.jp/erato/research_area/completed/kcs_PJ.html
- 13) 湊離散構造処理系プロジェクト.
http://www.jst.go.jp/erato/research_area/ongoing/mrk_PJ.html
- 14) 河原林巨大グラフプロジェクト.
http://www.jst.go.jp/erato/research_area/ongoing/kkg_PJ.html
- 15) 日本学術振興会 FIRST. <http://www.jsps.go.jp/j-first/>
- 16) 情報エネルギー生成基盤プロジェクト.
<http://www.tkl.iis.u-tokyo.ac.jp/FIRST/home.php?>
- 17) 量子情報処理プロジェクト. <http://www.nii.ac.jp/qis/first-quantum/>
- 18) 最先端数理モデルプロジェクト. <http://www.sat.t.u-tokyo.ac.jp/first/>
- 19) 東北大学原子分子材料科学高等研究機構（AIMR）.
<http://www.wpi-aimr.tohoku.ac.jp/jp/index.html>
- 20) 東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構（Kavli IPMU）.
<http://www.ipmu.jp/ja/>
- 21) 科学技術振興機構 CREST 「現代の数理科学と連携するモデリング手法の構築」領域.
http://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research_area/ongoing/bunyah26-1.html
- 22) 科学技術振興機構 さきがけ 「社会的課題の解決に向けた数学と諸分野の協働」.
http://www.jst.go.jp/kisoken/presto/research_area/ongoing/109mathcollabo.html
- 23) 内閣府・革新的研究開発プログラム ImPACT 「量子人工脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の実現」. <http://www.jst.go.jp/impact/program12.html>
- 24) NIH, BRAIN Initiative Interim Report.
<http://acd.od.nih.gov/presentations/BRAIN-Interim-Report-Presentation.pdf>
- 25) Human Connectome Project. <http://www.humanconnectomeproject.org/>
- 26) Human Brain Project. <https://www.humanbrainproject.eu/>
- 27) James S. McDonnell Foundation, Studying Complex Systems Program.
<https://www.jsmf.org/programs/cs/>
- 28) 八尾徹. システムバイオロジーの内外動向. 日本バイオインフォマティクス学会, 2011.
http://sysbioevo.org/conference/JSBi_1st_ASB/Yao20110228.pdf
- 29) SocioPatterns. <http://www.sociopatterns.org/>
- 30) 国家自然科学基金委員会. <http://www.nsf.gov.cn/nsfc/cen/xmzn/2013xmzn/04/06.html>

3.5.6 複雑系社会学

(1) 研究開発領域名

複雑系社会学

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

複雑系社会学という言葉が自覚的に用いられることはなく、「社会学と複雑科学」ないし「複雑系と社会学」という表現が用いられているのが現状である。複雑系社会学という表現が用いられていない理由のひとつに、そもそも社会学はその誕生以来、「複雑性」をあつかう学問であり続けてきたことにある。社会学理論における主流は有機体論であり、機械論とは異なり、社会は人びとの複雑な相互作用により編成された全体であり、その性質は個人に還元できないもの（全体は部分の総和以上）であることを強調してきた。このことは複雑系の科学のねらいと基本的に同じである。ただ、あえて複雑系社会学という表現を用いるとすれば、複雑系社会学とは人びとの相互作用により個人個人の性質には還元できない創発特性をもたらすシステムであり、予測を不可能にするような不安定状態を内在的に持っている、あるいは不安定に揺らぎつつも新たな秩序を生み出す可能性を持っている社会システムを解明する学問であるといえる。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

複雑系の科学運動が高まっている背景には、近代科学が金科玉条とする方法的立場に対する不信感が存在する。要素還元論の立場、および認識主体の認識対象に対する優位を前提とし、対象に認識作用や秩序形成能力を認めようとしなない立場に対する不信感である。

ニュートン流の近代科学では、要素還元主義、決定論、時間の可逆性、均衡（平衡）、安定性等が強調されてきた。そして、この世界から秩序（≒ 法則）を取り出すことが科学の使命とされた。そこには、混沌から切り離され、区別され、混沌とは別個に存在する《秩序》を分節化できるとする発想があった。

これに対し、1970年代末から台頭してきた、ゆらぎ・自己組織化・オートポイエーシスおよび1990年代から注目されるようになったカオスや複雑系やエージェントベースのシミュレーションなどは、創発特性主義、非決定論、時間の非可逆性、不均衡（非平衡）、不安定性、認識対象の自律性等を強調する。そこには、混沌からの秩序形成、秩序と混沌の相互浸透こそが世界の本質であるとする発想がある。つまり、世界は秩序と混沌の境を揺れ動く非定常系に他ならないとする科学観である。複雑系社会学はこうした新しい潮流を受け入れることをねらいとするが、まだその取り組みが始まったばかりである。

社会学で複雑性の概念が明示的に用いられたのは初期のルーマンである。彼はサイバネティクスのアシュビーが定式化した「最小多様度の法則 (law of requisite variety)」¹⁾ (訳 7、11 章参照) に準拠して社会学理論を定式化した。初期ルーマン理論の中核をなす概念枠組は、世界で営まれる体験や行為には、現実化されうる以上の可能性が常に存在するという意味での「複雑性 (Komplexität)」 (ルーマンは多様度を複雑性と読み替えている) と体験や行為が環境条件に依存して期待されたとおりに生起しない可能

性があるという意味での「不確定性 (Kontingenz)」、およびこれらの問題に対処してそれを制御するような「体験加工の構造」である²⁾ (訳 p. 38)。

社会システムは体験や行為が期待はずれに終わる不確定性にみずからをゆだねることはできない。システムが環境とのあいだで境界を維持していくには、「複雑性の縮減 (Reduktion von der Komplexität)」(つまり不確定性を制御できるような方策をシステムが備えること、たとえば法整備や制度設計)によって行為の可能性のなかから実現可能な一部を選択し、それに対する期待を確実にする必要がある。複雑性の縮減によって体験や行為を一定のパターンに制限しそれらが実現される期待値を高める(すなわち制御する)ことが初期ルーマン理論のエッセンスである。この複雑性の取り扱い、対象(環境)を制御することで社会システムの均衡を維持するというサイバネティクスの枠内にある。複雑性の縮減という考え方はトップダウン型の社会政策や社会計画にとって親和的である。

1990年代半ばに米国で設立されたサンタフェ研究所から発せられた複雑系の科学は、複雑性をア prioriに制御の対象とする発想を持たない。不確定性、ゆらぎ、非平衡を積極的なものとして位置づける。そして、複雑系社会学に共通する問題意識は、人びとの相互作用に原因する不確定性やゆらぎ、非平衡からいかに社会的なるものが創発してくるのか、さらに一般化していえば社会生成がなされるかを探究することにある。

従来の科学観では、平衡(均衡)状態に焦点をあててシステムの挙動を定式化することが重視された。そして、均衡状態から乖離する現象は攪乱、逸脱、ゆらぎなどと呼ばれ、システムにとって望ましくないもの、統制すべき対象とみなされた。しかし、非平衡系の研究が進むことで、ゆらぎの積極的な意義が認識されるようになった。たとえば、生命工学(バイオホロニクス)では、ゆらぎは「生きていることの証」とされる。また、熱力学の分野でも、ゆらぎが増幅するなかから、新たな構造が形成される(たとえば、ランダムな熱伝導から対流構造を組織される)ことが明らかにされている。さらに、ゆらぎは快適さの源泉であるとする研究も進んでいる(F分の1ゆらぎ)。社会学でも、1980年代半ば以降、さまざまな領域でゆらぎ現象が取り上げられるようになった。近代家族のゆらぎ、法制度のゆらぎ、世界システムのゆらぎ、近代性のゆらぎとポストモダンなど、従来、価値が認められ、社会的に正当性が与えられ、違背に対する制裁基準が存在していた制度の基盤がぐらついていることを表す概念として多用されるようになった。そして、ゆらぎをつうじた秩序形成という視点から、社会がみずからを内発的に変える自己組織化の兆候として把握する試みがなされている。

自己組織性は複雑系社会学にとって重要な研究領域であり、これはシステムが環境との相互作用を営みつつ、みずからの手でみずからの構造をつくり変えていく性質を総称する概念である³⁾。自己組織化の過程はトップダウン式の過程ではなく、制御センターを持たないボトムアップ式の過程である。局所的な構成要素が、局所的なルールに従い、相互作用によって新たなレベルの複雑性を創発する。ゆらぎは自己組織化に必要な内発的要因であり、これを秩序に変換する仕組みとして、再帰性(reflexivity)あるいは自己言及(self-reference)がある。

1970年代後半、生物化学や熱力学において、自己組織性へのアプローチ法が登場した。具体的には、プリゴジンらの「散逸構造の理論」⁴⁾およびこれとほぼ同一の論理を持

つハーケンの「シナジェティクス（協同現象論）」⁵⁾、ヴァレラとマトゥラナの「オートポイエーシス（自己創成論）」^{6, 7)}等である。これらの理論に共通する点は、自己触媒、自己回帰、円環的因果に代表される自己言及性をあついていること、およびオートポイエーシスを除いてゆらぎの増幅を自己組織化の重要な要因としてあついていることである。複雑系社会学では、自己組織性論は近代性の脱構築や経営組織の変革と活性化、コミュニティの権力構造の再編、国際法社会のあり方、文化とコミュニケーションの変容などの研究に用いられている。

複雑系社会学にとって特異な位置を占めるのがオートポイエーシスである。ヴァレラとマトゥラナが提唱するオートポイエーシス（self-production）の理論は、生体系の自律性を定式化する試みである。この理論では、従来のシステム論における入出力図式は採用されない。オートポイエティック・システムとは、構成上は入力も出力もない組織的に閉じた円環的なネットワークである。そして要素を生産する要素が円環的なネットワークによって再帰的に自己にかかわり、自己を再生産しつつシステムを維持する⁶⁾（p. 12-15）。また、オートポイエーシスは、従来の科学の方法であるシステム外部からの観察者の視点ではなく、システム内部からの当事者の視点を取り入れる。社会を外から観察して定式化するのではなく、観察者本人が観察される対象でもある自己言及性を前提とした社会の記述と説明をめざす。

後期のニクラス・ルーマンは、このオートポイエーシスに依拠して社会システム論を展開し、社会学界に多大の影響を与えた。彼は社会システムを、コミュニケーションを要素とするオートポイエティック・システムとして定式化した⁸⁾（1984: chap. 4; 1988: chap. 2）。社会システムの要素は、人間ないしその行為ではなく、コミュニケーションである。コミュニケーションがコミュニケーションを誘発すると同時に他に接続し、これが延々と続いてネットワークが形成される。社会システムは自己産出的なシステムであり、個人や役割あるいは行為から成るのではなく、コミュニケーションから成るといふ新しいテーゼを打ち立てた。複雑系社会学はコミュニケーションのコミュニケーションによる意味システムとして社会の解明をめざす。

複雑系社会学では社会を複雑適応系とみなす研究も進められている。この系は多様な構成要素の相互作用からなり、自身でみずからの構造や機能を変える能力を備えている。またそれは環境に対して開かれているだけでなく、システム内に対しても開かれており構成要素間の相互作用によってそれ自身の性質に変化をもたらす、ひいてはシステム全体の変化をも帰結する。アイデアの相互交換や創造的な学習、社会集団により生みだされた計画は、関係する個々人ならびに役割構造へ影響を与え、適応的な変化を引き起こす。フィードバック制御ループは自己制御だけでなく自己方向づけ（self-direction）ないし環境適応を可能にする。そしてこれによりシステムは自身の構造を変化させる⁹⁾。

複雑な現象は多数の要素の相互作用からなるが、これを表現した数式を解析的に解くことは不可能に近い。ところがコンピュータが大容量化することで、解析的に解けなくてもシミュレーションによって系の振る舞いとその帰結を知ることができるようになった。エージェントベースのシミュレーションは、複雑な人間関係や社会ダイナミクスについての解明をめざし、個々の異質なエージェントの相互作用から巨視的な社会秩序や形態が生成される様子を、ボトムアップにかつプロセス遡及的なかたちで明らかにする

試みである。こうしたシミュレーションによって社会秩序の形成や都市化のメカニズムが解明される可能性がある。

このアプローチは、個人と社会をつなぐミクローマクロリンクの問題に解決の手掛かりを与えてくれる可能性がある。これまで個人をベースに相互作用を表現することで社会を表現する方法（方法論的個人主義）と、個人には還元されない社会の特性にもとづいて個人の行為や個人間の相互作用を解明する方法（方法論的集合主義）のあいだには大きな溝があり、これを埋めることは至難の業とされてきた。ミクロ（個人）からマクロ（社会）の特性を導出することは、マクロ水準での創発特性のゆえに、ほぼ不可能とみなされてきた。実際、社会学理論でミクローマクロリンクが問題化され、これに対する取り組みがなされてきたが、みるべき成果はいまだあがっていない。このアポリアの解決への期待が複雑系社会学にむけられている。

（４）科学技術的・政策的課題

ゆらぎの具体的な指標化を進めることが重要である。社会のゆらぎについての可視化が求められる。たとえば、人びとの生活を改善するために、かつて「生活の質」指標の体系化が試みられた。生活領域を、新国民生活指標にならって、「住む」「費やす」「働く」「育てる」「癒す」「遊ぶ」「学ぶ」「交わる」の8領域に分けて、各領域でゆらぎの指標化を試みることである。ゆらぎの指標化およびその値の計測基準は、「価値観の崩れ」「社会的正当性の衰退」「制裁基準の弛緩」の3側面からなされるべきである。社会を非平衡状態に導いている（可能性がある）生活項目をエビデンスベースでチェックすることが求められる。

また、地域社会の自己組織化力を高めるための諸施策を考察することが期待される。現在、創造的地域社会を実現することが急務となっているが、このためには複雑系社会学の大きな柱である自己組織性の理論に基づき、創造的地域社会を議論するための数理計量的な枠組みを考えることが求められる。すなわち、まず地域社会の創造性を評価する軸（尺度）を設定・計測して、創造的地域社会を実現するための課題を整理することである。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

冷戦構造が崩壊し、欧米を中心として新たな国際秩序が摸索されているなか、やっかいなゆらぎが多発している。国際社会に吹き荒れている民族主義の嵐がそれである。イラクのクウェート侵攻によるアラブ民族主義の高まり。スペインのカタロニア地方やバスク地方における、スペインからの分離運動。イギリスにおけるアイルランド人の民族的抵抗およびスコットランドの独立運動。さらに、ルーマニア、ハンガリー、ブルガリア、ユーゴスラビアなど東欧諸国でも民族問題が噴出している。

民族主義の嵐は冷戦後の国際社会にとって最大のゆらぎである。現在の国際社会は、このゆらぎによって破壊を蒙むらない程度に、信頼性と冗長度を備えていよう。問題は、このゆらぎから異質な文化や民族固有のアイデンティティへの包容力を備えた新しい国際秩序を形成できるかにある。現在のところ、それがどのような秩序なのかまだ見えてこない。だが、国際社会のなかに、このゆらぎに注目し、諸民族の主張を取り込む受信

網と対話のためのコミュニケーション回路を増やすような、自己組織化を実現しなければならないことだけは確かである。これは複雑系社会学ひいては複雑系の科学の試金石でもある。

（6）キーワード

創発特性、複雑適応系としての社会、ゆらぎ、自己組織性、オートポイエーシス、自己言及

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	・かつての一般システム理論運動と同様に、諸科学を包括する運動として複雑系科学が登場したため、また文理融合アプローチが中心であるため、社会学ではマイナーな領域として位置づけられている。しかし、社会システム論の分野で自己組織性、オートポイエシス、ゆらぎ、エージェントベース・シミュレーションなどに対する取り組みが若手を中心に高まりつつある。
	応用研究・開発	×	→	・応用研究に取り組める状況にない。
	産業化	×	→	・学問的性格からして産業化の対象になるような取り組みはない。
米国	基礎研究	◎	↗	・サンタフェ研究所に刺激されて、Sociology and Complex Science (SACS) グループづくりをはじめとして、次代の社会学理論の開拓へ向けて熱心な取り組みがなされている。
	応用研究・開発	○	→	・SACSツールキットと呼ばれる社会システムをモデル化するための新しい方法など、応用研究へ向けた取り組みが見られる。
	産業化	×	→	・学問的性格からして産業化の対象になるような取り組みはない。
欧州	基礎研究	◎		・散逸構造論やシナジェティクスを生んだドイツを中心に、複雑系と社会学に関する研究が進められている。また、オートポイエーシスを社会学に取り込んだルーマンを記念して、複雑系学派の形成の動きの兆しがみられる。
	応用研究・開発	×	→	・基礎研究が中心であり、応用研究については不明である。
	産業化	×	→	・学問的性格からして産業化の対象になるような取り組みはない。
中国	基礎研究			
	応用研究・開発			
	産業化			
韓国	基礎研究			
	応用研究・開発			
	産業化			

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 引用資料

- 1) Ashby, W. Ross. *An Introduction to Cybernetics*. London: Chapman & Hall, 1956. (篠崎武, 山崎英三, 銀林浩訳. サイバネティックス入門. 宇野書店, 1967.)
- 2) Luhmann, Niklas. *Soziologie als Theorie sozialer Systeme*. *Kölner Zeitschrift für Soziologie und Sozialpsychologie*. 1967, vol. 19, p. 615-644.
- 3) Imada, Takatoshi. *Self-Organization and Society*. Springer-Verlag, 2008. (今田高俊. 自己組織性と社会. 東京大学出版会, 2005.)
- 4) Nicolis, Gregoire; Prigogine, Ilya. *Self-Organization in Nonequilibrium Systems: From Dissipative Structures to Order through Fluctuations*. New York: John Wiley & Sons, 1977. (小島陽之助, 相沢洋二訳. 散逸構造—自己秩序形成の物理学的基礎. 岩波書店, 1980.)
- 5) Haken, Herman. *Synergetics: An Introduction, Non-equilibrium Phase Transitions and Self-Organization in Physics, Chemistry and Biology*. Springer-Verlag, 1976 (1978: 2nd ed.). (牧島邦夫, 小森尚志訳. 協同現象の数理—物理, 生物, 化学系における自律形成. 東海大学出版会, 1980.)
- 6) Varela, Francisco J. *Principles of Biological Autonomy*. New York: North Holland, 1979.
- 7) Maturana, Humberto R.; Francisco J. Varela. *Autopoiesis and Cognition: The Realization of the Living*. Dordrecht, Holland: D. Reidel Publishing Co, 1980. (河本英夫訳. オートポイエーシス—生命システムとはなにか. 国文社, 1991.)
- 8) Luhmann, Niklas. *Soziale Systeme: Grundriß einer allgemeinen Theorie*. Frankfurt am Main: Suhrkamp, 1984. (佐藤勉監訳. 社会システム理論 上・下. 恒星社厚生閣, 1993.)
- 9) Buckley, Walter. *Society-A Complex Adaptive System: Essays in Social Theory*. Amsterdam: Gordon and Breach, 1998.

3.5.7 複雑系経済学

(1) 研究開発領域名

複雑系経済学

(2) 研究開発領域の簡潔な説明

この領域の研究者の多くが共通に持つ願望は、一言でいえば、社会・経済の現象を他の自然科学の対象と同じように研究を進めたいということに集約される。従来、社会・経済の現象は、まず、定量的な観測が困難であり、実験もできない場合が多く、さらに、個人レベルの感情や思想までもが影響を与えるということから、自然科学の対象とは考えられてこなかった。しかし、近年、社会の高度情報化に伴い、いわゆるビッグデータによって、自然現象を越えるほどの膨大な社会・経済データが集まっており、それらを丁寧に分析することで普遍的と言えるような法則性が確立される事例が報告されてきている。また、複雑系数理モデルに基づくシミュレーションによって数値実験もできるようになっており、同じように実験が不可能な地球惑星科学や宇宙科学と同様に、観測とシミュレーションを並行することで社会・経済現象の研究を進められる土台ができてきている。

最も研究が進んでいる金融市場の研究を例に挙げれば、千分の1秒刻みで市場に入ってくるひとつひとつの注文が全て観測できるようなデータを分析し、そもそも、なぜ、どのように市場価格が変動するのかということに対して定量的に答えられるような定式化ができてきた¹⁾。金融市場に関する先行研究である金融工学は市場価格の変動がランダムウォークに従っているという仮説に基づいた応用主体の学問体系であるが、そもそもどのような場合にはランダムウォーク仮説が妥当であり、どのような場合にはその仮説が破れるのかもデータに基づいて判断ができるようになり、暴騰や暴落時には金融工学に代わる数理モデルを使うことが必要であることも明らかになっている。この分野で開発された日本発のデータ解析ツールの中には金融の実務家がアプリとして使える環境になっているものもあり、今後の展開が有望である。

研究対象は、膨大で詳細なデータが揃っていればほぼどのようなものでも分析し、モデル化することができると期待されており、ビッグデータのブームも後押しする形で、金融市場以外でも、ソーシャルメディアにおけるブログやツイッターの書き込み記事の特性分析から、日本国中の約100万社の企業が形成する巨大な取引ネットワーク構造の解析、さらには、世界貿易から国の発展の動力学にまで研究対象が広がっている²⁾。

(3) 研究開発領域の詳細な説明と国内外の動向

複雑系の中の重要な基本概念である『フラクタル』は、拡大しても縮小しても同じように見えるような複雑な現象を総称する言葉として、マンデルブロによって1975年に創出された³⁾。フラクタルは、1980年代にあらゆる科学の分野に応用されるほど大きなブームになり、複雑系の研究が大きく進展する推進力となった。また、フラクタルは、コンピュータグラフィックスなどを通し、広く一般市民にも知られるようになり、デザインなどにも応用された。極めて広範に応用されたフラクタルであるが、創始者のマンデルブロ自身は、1960年代に市場価格の変動のデータ解析をしている中からフラクタル

の発想を得ており、同時に、市場変動はベキ乗のすそのを持つ分布であり、無視できない頻度で桁違いに大きな変動が発生することをいち早く報告していた。ベキ乗のすその持つ分布はベキ分布とよばれ、平均値がサンプル数とともに発散するなど統計学としては扱いにくい、地震現象や破壊現象などでは普遍的に現れる分布であり、1980年代からの様々な複雑系の研究によって、ベキ分布の事例はフラクタルと同様に広範な現象において確認されている。

複雑系の中のもう一つの重要な概念である『カオス』は、1960年代から数理モデルや時系列解析を通して生まれて来たものであり、1980年代には、市場価格の変動や社会の変動をカオスの視点からモデル化する研究が散見されるようになった。米国に1984年に設立されたサンタフェ研究所⁴⁾は、そのような流れから生まれた非営利研究所であり、その後の複雑系の研究に大きな影響を及ぼした。このころから、いち早くヘッジファンドなどを通して市場価格変動の研究の成果を実利に結び付ける研究者も現れた。そのような試みの多くは実務では低迷したが、中には実際にリアルタイムのデータ解析に基づく自動的な売買だけでファンドを大きく成長させ、偶然以上の確率で市場変動の予測が可能であることを実証した事例もあった。

1990年代に入ると、複雑系の研究者の中から、アカデミックな観点から市場変動に関心を持つ研究者が集まり、経済物理学という新しい研究分野が生まれた⁵⁾。そのころから入手可能になった市場の詳細なデータを用いた解析により、市場の変動が正規分布からは大きく乖離しベキ分布に近い特性を持つというマンデルブロの発見が再確認され、様々な市場について広く成立する普遍性の高い事実であることが確認された。また、市場変動に関して観測できない部分を補う手法として、仮想的な戦略を持つディーラーをコンピュータプログラムで用意し、それらのディーラーが取引をし合う仮想市場の研究が始まり、どのような場合に市場の価格変動がベキ分布に従うようになるのか、という基本的な問題が研究された。その結果、トレンドフォローとよばれる直近の価格変動の平均的な動きを追従する行動がベキ分布の発生に直接寄与しており、市場の暴騰や暴落もそれによってかなり説明可能であることが明らかになった。この分野での研究では、日本が世界をリードしている。

また、金融市場の価格変動の他に、企業の売り上げなどの財務データも研究用として入手できるようになり、データ分析に基づく企業の成長に関する研究が始まった。企業の売り上げがベキ分布に従うことがまず経験則として確認され、それを説明するための数理モデルもいろいろと提案された。また、1990年代の後半から、このような分野の国際会議が頻繁に開かれるようになり、研究が世界的に加速された。

2000年代からは、さらに様々な社会・経済データが入手できるようになり、研究の対象が大きく広がっていった。不動産・コンビニやスーパーマーケットなどの一般の商品・ネット販売される家電製品、などの様々な価格の変動、企業間の取引ネットワーク構造の解析、ソーシャルメディアにおける書き込みの分析、などデータも多様化し、解析手法も多様化している。学術的にも、例えば、日本や欧州では、物理学会の中の分野のひとつとして社会経済物理学という領域ができるなど、研究が定着してきている。

従来の経済学や社会学のアプローチとの違いは、まず、扱うデータが極めて詳細で膨大になり、エクセルファイルに入らないようなビッグデータを扱うことが挙げられる。

次に、データ分析の手法が回帰モデルに頼らず自然科学全般や複雑系科学の様々な手法を駆使していること、また、シミュレーション手法も観測事実と整合するように緻密に作られることが多いことも特徴である。研究成果としては、普遍的な事象に注目し、論文は物理学など理系の学術誌に掲載されることが多く、個別のケーススタディーに関してはあまり積極的とは言えない。

経済学や社会学の分野との協力関係は年々強化されており、この分野で育った若手研究者が経済学や社会学の分野で職を得ることも増えており、それらの分野との境目は次第に薄くなっている。ケーススタディーは既存の学問分野で行われることが多く、普遍性を追求する研究や冒険的な先端研究をこの研究開発領域が担うようになってきているといえるかもしれない。

この研究開発領域で教育された学生・大学院生は、3分の2程度は民間企業に就職しているが、昨今のビッグデータ解析ブームを支えるデータサイエンティストとして実務の場で活躍している。学位を取得した後も、アカデミーあるいは民間企業でほぼ100%職を得ることができている。他分野で教育を受けた博士研究者でも、この研究領域の研究を手掛けると就職先の可能性が大きく広がり、いわゆるオーバードクター問題の解決にも貢献できる可能性が高い。

（4）科学技術的・政策的課題

この研究開発領域は、ビッグデータに対する社会全体のニーズの高まりとともに実施すべき課題が年々増大している。情報技術によって集められた社会・経済のビッグデータから、実際に役立つ情報を抽出する技術を作り出し、未来予測をするためのシミュレーション手法を開発する役割を担うのがこの研究開発領域だからである。ビッグデータ解析は、現状では、民間企業の方が進んでいるが、その理由は、大学などのアカデミックな分野ではデータの入手が困難であるからである。民間企業では、どのような業種であっても企業活動とともに膨大なデータが日々蓄積されており、それらを活用できるかできないかで未来が大きく変わるという意識を持っている。しかし、現状では、既存のデータ解析手法をビッグデータに適用しているに留まっており、大きな成功につながった事例はまだあまりない。この研究開発領域で開発してきたデータ解析手法やモデル化手法を応用すれば、これまでよりも質も量も高いビッグデータ解析とシミュレーションを行うことができるようになると期待される。今、アカデミーにとって最も必要なのは、研究費の乏しい研究者でも使えるようなビッグデータセンターのようなものを設立することである。研究者の理論は緻密で技術は高くても、実際のデータで実践しなくてはその理論や技術をさらに洗練されたもの発展させることはできない。例えば、公的な機関が民間企業の持つデータを典型的なビッグデータのサンプルとして買い取り、研究者に無料あるいは廉価に提供できれば、研究者はパソコンがあるだけで、アイデアを試す研究開発を行うことができ、この分野の研究の多様性は大きく発展する。

近年、大学院の定員枠が拡大したが、オーバードクター問題が広くマスコミでも報道されるようになり、研究者への道に進むことを躊躇する優秀な人材を多く見かける。また、学位を取得したあと有期の研究職についてはいるが、職を繋げることが難しい状況に陥る若手研究者も多い。このような人材を、社会のニーズが高いビッグデータ解析と

社会経済シミュレーションの方向に転換することができれば、高度な科学的な思考力を直接社会の役に立てることができ、研究者にとっても社会にとってもメリットがある。若手研究者には、入り口で選んだ専門分野をそのまま継続するだけでなく、広く社会経済を見渡して、全く別の分野の研究開発にも挑戦してみることが強く勧められる。政策的にこれを推進するためには、専門転換のための研究費を提供することが想定される。従来の研究費は、ほとんどが専門をさらに進めるためにお金を出す形であるが、専門以外の研究をすることを促すような形で研究資金あるいは生活資金を提供するのである。研究者として大成している人の中にも、研究人生の途中で大きく専門分野を転換し、その結果大成功に至った事例は枚挙にいとまがない。分野転換には大きな勇気が必要だが、国が政策としてそれを後押しするような形を見せることができれば、ハードルが低くなり、分野転換を選ぶ若手が増加するはずである。広い視野で見渡せば、研究者不足で困っているような学術分野もあるので、オーバードクター問題に直面している博士取得者が才能を活かせる場は必ず見つけられる。

（５）注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

金融の現場で実務についている人達にとっては、金融工学が前提とするランダムウォーク仮説が破れていることは、日常的に体験していることであり、金融工学の仮定を鵜呑みしている人はほとんどいない。しかし、金融業にとって重要な金融派生商品の値付けや設計においては、金融工学がこれまで唯一の実務的な手段だったため、利活用しているのが実情である。複雑系経済学研究で開発している PUCK ツールや変化点検出手法などのデータ解析手法は、与えられた時系列データとランダムウォーク仮説とのずれを定量化するものであり、これまで、実務家が現実と理論の間に感じていたギャップを埋める役割を果たすようになってきている。例えば、変化点検出を使えば、市場の変動の統計的な特性が変化したことをいち早く自動的に察知することができ、素早い対策を打つことが可能となる。また、これらの手法を駆使することで、市場が大変動する前兆を捉えることができるようになる見込みがあり、津波が来る前に避難するというような行動をとることもできる。

このような研究の延長線上に期待されるのが、市場変動観測所の設置である。現在、金融の現場では、多数の市場を常時モニターしているが、それはあくまで、利益追求のためである。そうではなく、市場変動を、あたかも地震現象や気象現象あるいは宇宙線のような自然現象として客観的に捉え、全地球的な規模での経済変動を丸ごと観測し、分析し、危険な大変動の予兆を検出した場合には注意を促し、金融危機の発生を未然に防ぐことで社会に寄与するという狙いである。このプランは、日本学術会議の中の巨大プロジェクトのひとつとして提案されており、学術的な必要性は承認されている。世界的にも、このような観測プロジェクトに賛同する研究者は多く、小規模ではあるが、スイスではチューリッヒ工科大学が金融市場バブル観測所を開設しており、米国では、ノーベル経済学賞受賞者のエングルらが市場のボラティリティ観測所を開設している。国や民間企業と大学が協力するような形で、市場変動観測所を構築することができれば、研究者を活性化し、社会にも大きな寄与ができるものと期待される。

金融市場の研究はこの研究開発領域で最も先進的であり、そこでの事例と同様のこと

が今後、他の研究対象においても追従されることと想定される。社会の中のビッグデータは多種多様であるが、その中から重要なものを集中的に観測するような観測所を構築し、データを収集する方法の研究開発、データから有益な情報を抽出する方法の研究開発、予測や制御につながるシミュレーション手法の研究開発などのコアとして活躍するような組織となり、国家や複数の企業のサポートで維持運営される、という未来図が描かれる。このような観測所ができてくれば、上述のオーバードクター問題対策として有効に機能し、この組織を通して、専門転換した研究者を民間企業に送り込むというような人的な流れも想定される。

（6）キーワード

経済物理学、経済ネットワーク解析、エージェントモデル、システミックリスク、ソーシャルメディア分析

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 外国為替市場や企業ネットワークなどの研究では他にない質と量のよいデータに基づいた重要な基礎研究を行い、世界をリードする成果を挙げている。 若手向けの研究予算がつくようになり活性化している。 この分野の国際会議を何度も開催し、世界から研究者を集めている。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 市場の変動を再現する仮想的な市場モデルは、世界に先駆けて、基本的な市場変動の特性を再現することができるようになっており、日銀の介入などの特異的なイベントも再現できるようになっている。 インターネットのロコミ解析による市場の雰囲気分析などの先駆的研究が企業と大学の実務的な共同開発によって進められている。
	産業化	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> 日本で開発された市場変動がどの程度ランダムウォークから乖離しているかを定量的にリアルタイムで評価する手法がブルームバークプラットフォームのアプリとして採用されるなど、実務家が利活用する段階になってきた。 日本で開発された企業の取引ネットワークから取引金額を推定する手法が実務で使用されるようになってきた。
米国	基礎研究	○	↓	<ul style="list-style-type: none"> 基礎研究では、先行したが、期待されたほど研究者人口はそれほど増えず、また、基礎研究を深める研究はあまり勢いが無い。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> 分野をまたがるような研究費がとりにくいようで、すその広い研究開発は期待されるほど進んでいない。
	産業化	◎	↓	<ul style="list-style-type: none"> 基礎研究で成果を挙げた研究者は、ヘッジファンドなどの形で実務に入るケースが多く、クォンツとよばれる人材も多く金融業界に輩出している。 基礎研究から起業したプレディクションカンパニーが欧州系の金融機関に買収され、主導していた研究者が欧州の大学に移籍するなど、最近では欧州に吸収されている。
欧州	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> スイス・イギリス・ハンガリーなどでは新しい学問基盤として教育から研究までを進める体制が作られており、若手が数多く育てられている。 分野や国をまたがる研究費が出やすいようで、研究会も数多く開催されている。
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> 情報系や経済学者との交流も多く、応用を目指す研究が根づいている。 金融機関の連鎖的な危機であるシステミックリスクの研究などに強みがある。

	産業化	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・1990年代に複雑系モデルに基づく自動売買で大きく成長したヘッジファンドもあり、また、欧州系の金融機関は理系のポストドクレベルの人材を大量に雇用しており、表には見えにくい形ではあるが、実務的に活躍していると思われる。 ・産業というわけではないが、政策などにも影響を与えるような発言力を持つポジションについているこの分野の研究者もいる。
中国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ・この分野の研究者人口が増加し、研究所も作られている。また、中国市場のデータは利用者ID付のものが研究に使われており、他の国では入手できないレベルの研究につながっている。
	応用研究・開発	△		
	産業化	△		
韓国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ・この分野の国際会議を開催し、一定数の研究者を維持している。 ・複雑ネットワークに絡んだ経済現象の研究では若手の活躍が目立つ。
	応用研究・開発	△		
	産業化	△		

（註1）フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

（註2）現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3）トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

（8）引用資料

- 1) 高安美佐子. 金融市場－経済物理学の観点から. 岩波講座・計算科学 6・計算と社会, 第2章. 2012.
- 2) 高安美佐子, 田村光太郎, 三浦航. 学生・技術者のためのビッグデータ解析入門. 日本評論社, 2014.
- 3) B.マンデルブロ. フラクタル幾何学. 広中平祐監訳. ちくま学芸文庫, 2011.
- 4) サンタフェ研究所. <http://www.santafe.edu/>
- 5) 高安秀樹. 経済物理学の発見. 光文社新書, 2004.