

立石賞特別賞の受賞記念講演概要

数理情報工学に基づく複雑系数理モデル学の構築と その応用に関する研究

東京大学 特別教授／名誉教授 合 原 一 幸

数学というと、以前は実際の役には立たない学問の典型例のように言われていた。しかしながら、そもそも人類による数字の発明依頼、数学は様々な実用のために積極的に活用され、人類の生活を根底で支えてきている。

そのような実用を意識した現代の数学分野の典型例に、数理工学（Mathematical Engineering）がある。この数理工学は、第2次世界大戦後に東京大学工学部で生まれた、世界的にもとてもユニークな学問分野である。数理工学は、現実の諸問題や諸現象を対象にして、先端的数学を用いて研究する学問である（図1）。そのためには、まず現実の諸問題や諸現象を数学を言語として表現する。これを数理モデリングと呼ぶ。この数理モデリングによって、現実の問題や現象が数理の世界に数理モデルとして写像されるので、それらを数学的に研究することが可能になる。

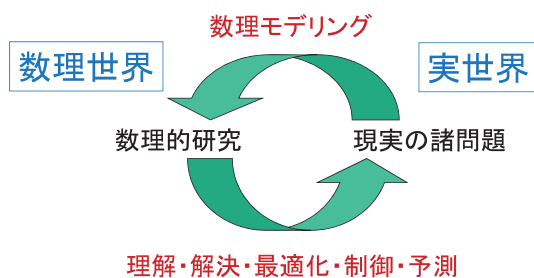


図1 数理工学の方法論

当初は、工学の諸問題や諸現象が数理工学的研究の主な対象であったが、その後の数理工学の進展に伴って、脳、生命、経済等々、工学以外の様々な実在システムと関係する諸学問分野もその応用範囲に取り込み、大きく発展してきている。

数理工学、さらには数理科学と、情報工学、情報科学は一見近そうに見られることが多いが、実はかなり距離がある。ということは、この2つの分野を結び



付けることによって、あらたに魅力的な学問分野を創成出来る可能性があることになる。このような発想で、東京大学大学院に情報理工学系研究科が新設された機会に、数理工学は、数理情報工学へと飛躍した。筆者は、この東京大学大学院情報理工学系研究科創設のためのリエゾン推進室にも在籍していたので、とても懐かしく思い出される。

本稿では、数理情報工学に基づく筆者の研究のいくつかをご紹介します。

数理情報工学が活躍する時代背景

昨今、人工知能（AI）、ビッグデータ、デジタルトランスフォーメーション、メタバース、ブロックチェーンやweb3をはじめとして、科学技術、工学や産業構造が世界レベルで大きく変革しつつある。このような世界的な動きの中で我が国は、日本の企業や大学が有する高度な「技術力」や「研究開発力」を活かして経済発展と社会的課題の解決を両立する人間中心の社会である「Society 5.0」の実現を目指している。この「Society 5.0」実現のためには、先端数理情報工学に基づいてAI技術やビッグデータ解析技術などの諸科学技術を高レベルかつ的確に使いこなすことで、21世紀の様々な複雑課題

を解決して、人間と機械が調和したこれからの社会の発展に資する卓越した研究開発力を実現することが強く求められている。たとえば、2019年3月には、経済産業省、文部科学省によって、数学の産業応用による課題の解決や今後の方向性に関する『数理資本主義の時代～数学パワーが世界を変える～』報告書が取りまとめられている。

複雑系数理モデル学の構築

21世紀に残された重要性の高い研究課題は、脳、生命、免疫などの生体機能、がん、新型コロナウイルス感染症を典型例とする新興・再興感染症などの医学・疫学、エネルギー、電力、通信、交通などの社会経済システム、環境、地震などの安全・安心の確保など多岐にわたるが、これらはいずれも多面的アプローチを必要とする広義の複雑系の問題として捉えることができる（図2）。

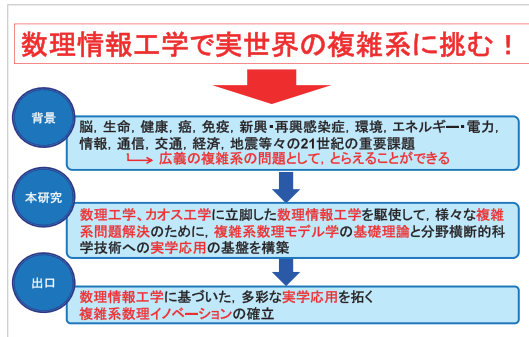


図2 実世界の複雑系に挑む

筆者は、大学院生時代から現在に至るまで一貫して、現実の様々な複雑系を数理的に解析して最適化・制御・予測するために、「数理工学」と「数理情報工学」、および筆者が世界に先駆けて提唱した、カオス、フラクタル、複雑ネットワークなどを工学的立場で研究する「カオス工学（Chaos Engineering）」の観点から、「複雑系数理モデル学」の構築とその具体的な分野横断的科学技術への応用研究に取り組んできた。特に、科学技術振興機構のERATO合原複雑数理モデルプロジェクト（図3）や内閣府／日

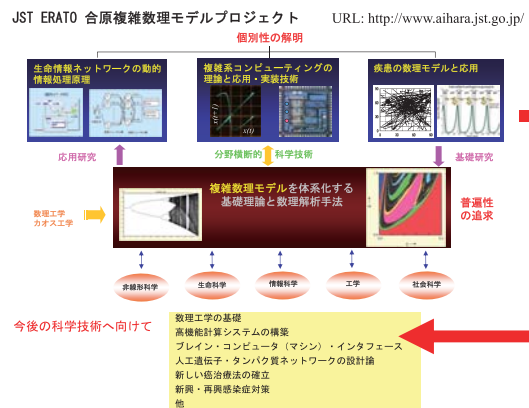


図3 ERATO合原複雑数理モデルプロジェクトの概要

本学術振興会のFIRST合原最先端数理モデルプロジェクト（図4）など様々な大型プロジェクトを通じて、多くの数理研究者のみならず実験研究者とも協働して、複雑系の階層的ダイナミクスを制御に結び付ける「複雑系制御理論」、複雑系のネットワーク構造を最適化に結び付ける「複雑ネットワーク理論」、複雑系から観測されるビッグデータを予測や数理モデリングに結び付ける「非線形データ解析理論」や「データ駆動型モデリング理論」などを軸に「複雑系数理モデル学」の理論的プラットフォームとしての数理的基礎理論を体系化した（図5）。そして、この複雑系数理モデル学の基礎理論を駆使して多様な応用技術を広く展開し、それまで実学とは無縁であった複雑系科学を、人間と機械が調和する社会実現のために応用する技術基盤を開拓してきた（1）-（7）。

未病の数理情報工学研究

筆者が現在プロジェクトマネージャーを務める内閣府／科学技術振興機構・ムーンショット型研究開発事業目標2の「複雑臓器制御系の数理的包括理解と超早期精密医療への挑戦」プロジェクトでは、様々な疾患の超早期の診断と治療に基づく超早期精密医療を目指して大規模な研究開発を行っている。

本研究開発プロジェクトは、筆者らによるDNB（Dynamical Network Biomarkers: 動的ネットワークバイオマーカー）理論が出发点に

内閣府 最先端研究開発支援プログラム

複雑系数理モデル学の基礎理論構築とその分野横断的科学技术応用

東京大学 最先端数理モデル連携研究センター

複雑系数理モデル学の分野横断的科学技术応用研究

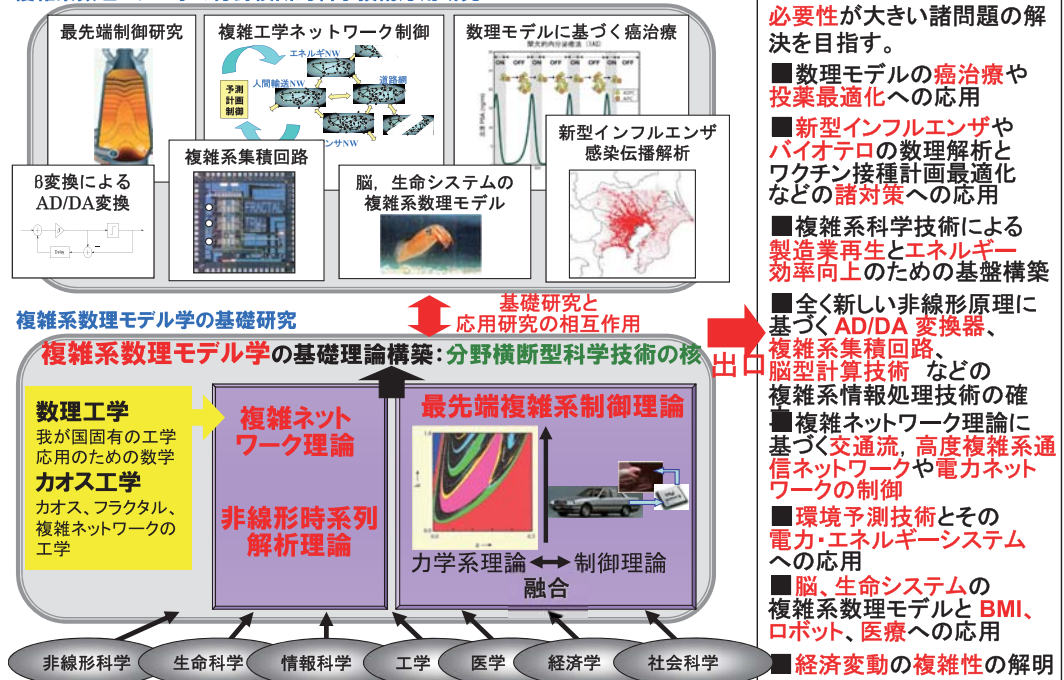


図4 内閣府／日本学術振興会のFIRST 合原最先端数理モデルプロジェクトの概要



図5 複雑系数理モデル学の理論的プラットフォームとしての数理的基礎理論

なっている。この DNB 理論は、ムーンショット目標 2 の「2050 年までに、超早期に疾患の予測・予防をすることができる社会を実現」するための基盤となり得る、疾病の発病前に発病の予兆を検出するまったく新しいバイオマーカーの概念である。筆者らは、数学の分岐理論解析に基づいて、発病の予兆が検出される発病前の状態、すなわち発病を回避して健康状態へまだ後戻りできる状態を「疾病前状態」と呼んだが、この疾病前状態は超早期に疾病を予測出

来る状態であり、我々の「未病」の定義でもある。

昨今、未病の概念が早期医療による健康社会の実現につながるものとして、世の中の興味を広く集めている。しかしながら、多くの場合、健康と病気の状態といったようなあいまいな定義で未病をとらえているため、未病状態の検出が実際にはほとんど不可能であり、このことが未病の科学的研究のためのネックとなっている（図 6）。したがって、現状のままでは残念ながら未病の科学的研究の十分な進展は期待できない。

未病の定義



図6 未病の定義と DNB 理論

これに対して筆者らは、上述のようにこの未病状態を、発病直前ではあるがまだ発病していない、健康状態に後戻り出来る「疾病前状態」として余次元1局所分岐理論を用いて数学的に定義し、その検出のための数理的手法であるDNB理論を構築することによって、未病を定量的に検出し超早期かつテーラーメードに治療する可能性を拓いた(図6, 7)。このDNB理論によって、生体ネットワークのいくつかの

ノード変数から成るサブネットワークが発病前に強相関で大きくゆらぐ動的ネットワークバイオマーカー(DNB)を、数理モデルやネットワーク構造に関する先見的情報なしで、計測された超多変数ビッグデータのみから完全にデータ駆動的に検出する数理データ解析手法が利用可能となった。このDNB理論に関するこれまでの研究により、メタボリックシンドロームやH3N2型インフルエンザなど、いくつかの疾病の発病前の未病状態をマウスやヒトの実データを用いてすでに見出し、超早期の先制精密医療を実現する道筋の糸口が得られており、今後本研究開発を強力に推進する予定である。

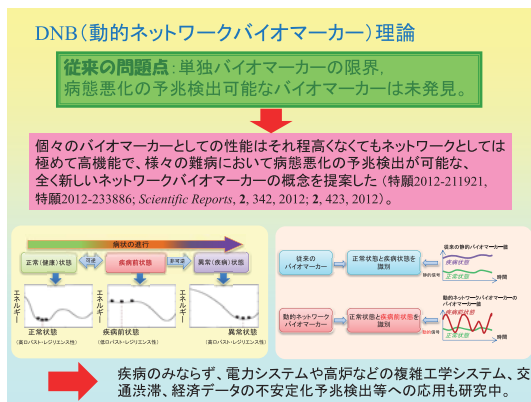


図7 DNB理論の概念図

ニューロインテリジェンスの展望

筆者が現在副機構長を務めている東京大学国際高等研究所ニューロインテリジェンス国際研究機構(International Research Center for Neurointelligence: IRCN)では、実験的・臨床的脳科学と数理情報工学などの理論研究との連

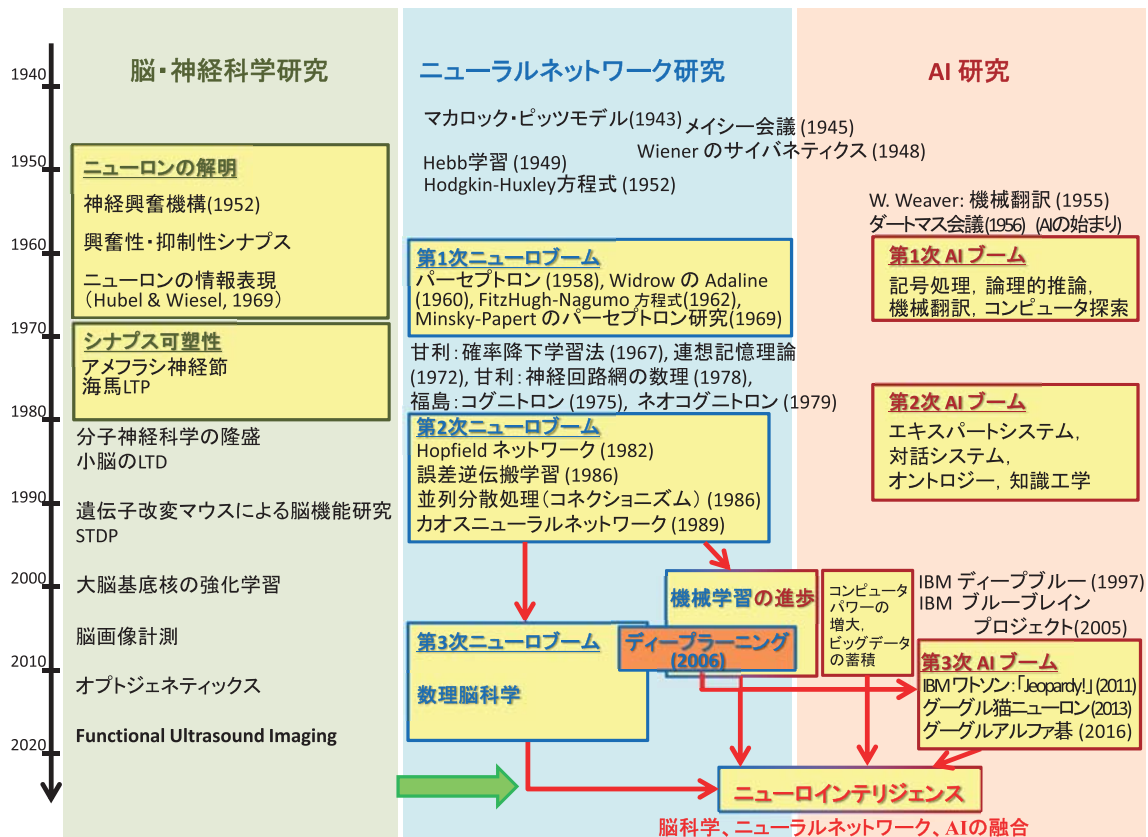


図8 脳科学、ニューラルネットワーク、および人工知能の発展の歴史

携によって、ヒト脳の知性の発生のメカニズムの解明、精神疾患などの治療への応用、さらには脳に学ぶニューロインスパイアードな次世代人工知能技術の基礎理論とハードウェア実装技術の開発を目指している。

最近の人工知能技術の進展は著しいが、そこでの主役は脳の神経回路網を極端に単純化した多層フィードフォワード型ニューラルネットワークを用いたいわゆる深層学習である。甘利俊一東京大学名誉教授による1960年代の研究を源流とする深層学習は、今日の強力な計算機パワーと膨大な学習用デジタルデータに支えられて、現在様々な分野で大きな成果を上げて実用化されている。他方で、多層フィードフォワード型ニューラルネットワークと深層学習は、脳の数理モデルとしても学習則としても、実際の脳とは大きく異なっているため、実際の脳に学んだあらたな人工知能へ向けた進展への期待が高まっている。

そこで、東京大学ニューロインテリジェンス国際研究機構では、特に脳の臨界期に着目した発達機構の研究をはじめとした実験・臨床脳科学の最先端の研究成果とニューラルネットワーク理論、人工知能理論とを統合して、まったく新しい、より脳に近い次世代人工知能開発のための基礎研究を行っている（図8）。特に、脳の臨界期の神経回路構造と非線形ダイナミクスの変化、実際の神経細胞における新規の可塑性機構などの新しい実験事実は、数理情報工学から見てとても魅力的な研究分野になっており、それらの数理モデリングが重要な研究課題となってきた。

この世の中の非線形ダイナミクスへの挑戦

上記の未病やニューロインテリジェンスの研究もそうであるが、筆者の研究は、この世の中に実在する非線形ダイナミクスに着目するものである。筆者の研究においては、これらの動的現象を、人間と機械が真に調和する最適な社会環境の実現に向けて役立てるために、数理情報

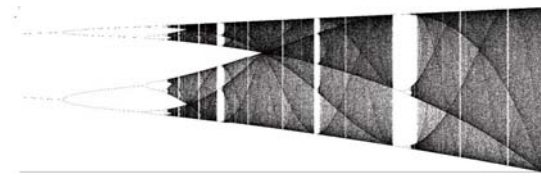


図9 2次関数で表される写像の安定解の分岐図



図10 エマ理永さんらによる、図9の分岐図のドレスへの応用

工学がそれらの間を橋渡しをする役割を担っている。

非線形ダイナミクスの世界は、実に多彩である。最も単純な非線形ダイナミクスとも言える1変数の2次関数写像でも、その安定解の変化を表す分岐図は実に複雑で美しい（図9）。この分岐図は、ファッションデザイナーのエマ理永さんとコンピュータグラフィクスデザイナーの本本圭子さんらによって、素晴らしいドレスに応用された（図10）。

このような実用性と美を合わせ持つ非線形ダイナミクスに立脚しながら、これからも人間と機械の調和に貢献出来るような、数理情報工学研究による挑戦を続けていきたいと覚悟をあらたにしている。

[文 献]

- 1) 合原一幸（編著）：「社会を変える驚きの数学」, ウェッジ（2008）.
- 2) 合原一幸, 神崎亮平（編著）：「理工学系からの脳科学入門」, 東京大学出版会（2008）.
- 3) K. Aihara, J. Imura, and T. Ueta (Eds.): "Analysis and Control of Complex Dynamical Systems: Robust Bifurcation, Dynamic Attractors, and Network Complexity," Springer（2015）.

- 4) 合原一幸（編著）：「暮らしを変える驚きの数理工学」，ウエッジ（2015）。
- 5) 合原一幸（編著）：「人工知能はこうして創られる」，ウエッジ（2017）。
- 6) 酒井邦嘉（編著），合原一幸，辻子美保子，鶴岡慶雅，羽生善治，福井直樹：「脳と AI —— 言語と思考へのアプローチ」，中央公論新社（2022）。
- 7) 西浦 博（編著），小林鉄郎，安齋麻美，合原一幸，ナタリー・リントン：「感染症流行を読み解く数理」，日本評論社（2022）。