最先端研究
開発支援プログラム

最先端数理モデル学を体系化し数学を実社会で活用する

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基礎理論構築とその分野横断的科学技術応用」プロジェクト）

合原一幸　あいはらかずゆき
1954年生まれ。東京大学生産技術研究所教授。
専門は数理工学、カオス工学。
脳神経系など実在する様々な複雑系を対象に、
数理モデルの構築を行っている。

「身近なところに数学が使われているんだと具体的に理解してほしい」と東京大学教授で最先端数理モデル連携研究センターセンター長の合原一幸は語る。

数学は表に出る学問ではない。「縁の下の力持ち」として学問の基盤、あるいは背後で使われる学問だ。だが実は、もっと本質的に、具体的に日常生活に広く役立っていることを理解して欲しいという。

合原らの研究分野は数理工学である。数理工学とは現実の諸問題からスタートする工学分野の一つであり、現実の問題を数理モデルとして表現する。そして、その数理モデル解析のための数理的手法を作り、現実問題の理解、解決、さらには、最適化、制御や予測を目指すのが数理工学だ。

個別性と普遍性

「合原最先端数理モデルプロジェクト」では多くの問題に取り組んでいる。箇条書きにされたテーマを眺めると「低消費電力 AD/DA 変換器」や「前立腺がんの治療法」、「インフルエンザの感染伝搬」などが並ぶ。将来テーマも含めるとその種類はあまりにバラエティに富んでおり、一見、脈絡がないように見える。合原も「面白いことをやれる範囲でなんでもやりたいというのが我々のスタイルだから」と笑う。だがもちろん適当にやっているわけではない。

キーワードは「個別性と普遍性」だ。

数理は実験主体の研究と違って設備はいらない。発想があればどんなテーマでも可能だ。個別の興味で研究を行うと、対象はどんどん広くなる。

だが数理モデルに使われる解析手法や理論は共通している。2003 年 11 月～ 2008 年 10 月まで合原が研究総括として率いていた JST の「ERATO 合原複雑数理モデルプロジェクト」では分岐解析ツールやパターンダイナミクスシミュレータなどを構築し、非線形時系列解析の手法の拡張を行った。これらは横断的に様々なテーマに使える普遍的な理論だ。本最先端プロジェクトではそれらの普遍理論をさらに発展させ、個別テーマに応用し、出口へと橋渡しすることを目指している。

理論の一つの大きな柱が複雑系制御理論だ。この世界のダイナミズムを扱う二つの理論、数学の力学系理論と工学の制御理論、両者の融合が目標だ。

力学系理論は天体運動の解析から始まった学問だ。対象は天体なので制御しようという考え方はもともとない。また、三体問題で既にカオスを生成する。つまり非線形、不安定で制御入力がない自律系が対象だ。いっぽう制御理論は蒸気機関による産業革命に端を発する線形の美しい理論体系から成る。主目的はシステムの安定性を担保することであり、制御入力を駆使する非自律系が対象だ。この相補的な関係にある両者の融合を目指すのである。

二つ目は、全体論でも要素還元論でも理解できない複雑システムの理解のために、全体と要素の間をつなぐ複雑ネットワークを重視した理論の構築である。

三つ目は、非線形時系列解析だ。自然の理解のために、ニュートンは数理モデルも解も数式で表現する方法論を示した。だが非線形現象の多くはモデルの式は書けるが解は解けない。しかし幾何学的解析や近似計算である程度の情報を引き出せる。今はさらに別の手法を使うことができる。第一原理が分からなくても、データが大量に取れれば、コンピュータ内にアルゴリズムで数理モデルを作り、解を数値計算できる。これを非線形時系列解析という。

複雑系制御理論、複雑ネットワーク理論と非線形時系列解析、これらの普遍的な理論を整備して、具体的な個々の対象を扱う。

幅広い数理モデルの具体的な応用範囲

合原が挙げるキーワードが「ハイブリッド力学系」である。エンジンと電池それぞれを使い分けて走るハイブリッドカーのように、異なるダイナミズムを使い分ける系だ。物体の衝突、ロボットや人間の歩行、電

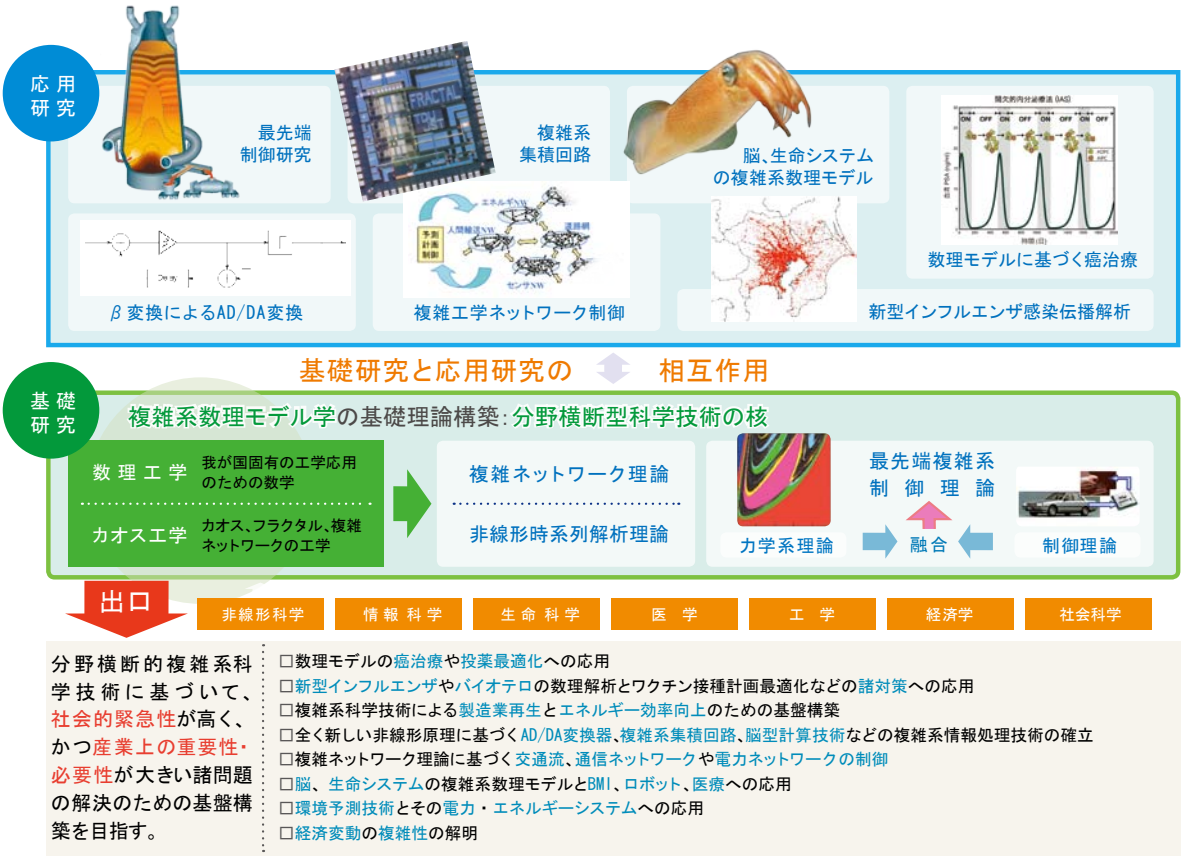

図1：合原最先端数理モデルプロジェクトの研究計画概要

力ネットワークのスイッチング、脳のなかの神経細胞ネットワーク、細胞内の遺伝子やたんぱく質ネットワークの挙動など、多くの対象がハイブリッド力学系として数理モデル化できる。

この成果の一つに、数理モデルに基づく前立腺がんの治療がある。前立腺がんは男性ホルモンによって増殖するため、薬で男性ホルモンを減少させてがんの増殖を抑えるホルモン療法が広く使われている。そのときにPSA（前立腺特異抗原）の値をマーカーとして測る。この治療において、個々人のPSA値の時系列データから前立腺がん増殖特性を記述する数理モデルを作ることで、もっとも効果的な投薬の開始と中断のタイミングを決められることが分かった。ホルモン療法を最適に制御することでテーラーメードの治療法が患者に過度の負担をかけることなく行える。この手法は病気の動態を観測するマーカーと何らかの良い治療薬があれば他の病気の治療にも広く用いる事ができる。既に7年近く研究を続けていることもあって手法はほぼ確立している。

溶鉱炉の数理モデリングの研究も長年行ってきている。溶鉱炉はコークスと鉄鉱石が何層にも重なり、燃焼に従って中で崩れたりもする。だから数理モデル化は難しい。しかしながら様々なセンサーで大量の時系列データを取る事は可能だ。そこで複雑系制御理論と非線形時系列解析の出番だ。式は作れなくても数理モデル化はできる。観測データから一定の時間遅れ毎の差分による時間遅れ座標系でシステムの状態空間を作り、ふるまいの軌道を描く。それを使って制御や予測ができるかもしれない。製鉄会社とも共同で研究を進めており「単に綺麗に理論化するだけではなく、使えるものを目指している」という。

経済現象の解析も行っている。いま注目しているのはリーマンショック前後のデータだ。経済市場のデータは取引が成立するたびにデータが発生する。ただこ

れは研究者が一般に扱う時間と共に値が連続的に変化していくデータではなく、時間的に不均一に値が発生するデータである。売り手と買い手の間で値段が成立したときに値が決まるからだ。ここに合原らがこれまで解析していた脳の神経パルスの発火データの解析経験が生きる。経済の高頻度データがコンピュータで解析できるようになったことで、経済現象の不安定性や複雑さのメカニズムなど従来見えなかったものが見えてくる可能性がある。

理論だけではなく、実装も目指している。集積回路でハードウェア化ができれば様々な産業応用も容易だ。このプロジェクトではβ変換という力学系を応用したAD/DA変換器の実装などを目指す。「基礎研究なんだけど、技術戦略、さらには出口も見据えてやることが大切なんです」

理論研究者内での連携、コラボレーション

さらに今回のプロジェクトでは、メタレベルで目指していることが二つある。一つは、最初に述べたように数学が社会に役立つことを具体例で明示的に示すことだ。もう一つは数理のコラボレーションである。理論研究は一人でもできる。だが敢えてチームで研究することで「一種の非線形効果」を期待するという。

例えば分岐理論はシステムのふるまいが変わる境目をきちんと求めようという研究だ。いっぽう制御理論にはシステムが変わっても安定性を保つためのロバスト制御がある。その安定性を保つか保てないかのぎりぎりのところはいわば分岐集合になっている。分岐理論とロバスト制御を組み合わせると、全く新しい展望が開けるという。

「そういう種類のテーマが他にもたくさんあるんです。だからメンバーには是非いろんな人と連携して研究してみて、理論における共同研究の楽しさを知ってくださいと言ってます。素晴らしいメンバーを集められたので、面白い成果がコラボレーションで生み出されてくると僕は思ってます」

写真1：ロジスティック写像の分岐図を用いたドレス
（ファッションデザイナーの松居エリ、アーティストの木本圭子と共同で製作した）

理論と実験のコラボレーションはこれまでも試みられて来た。だが合原は、一歩踏み込んだ、理論の中のコラボレーションを狙っている。

「たとえば数学は定義から始める。だが物理は定義できたら終わりみたいなところがある。お互いに話をしていて、今びっくりしているところなんですよ。日本はいろいろな分野において組織で強味を発揮してきた。数学や理論もうまく異分野の共同研究の組織を作れば機能するんじゃないか。日本人だからこそできるんじゃないかと思ってるんです」

新しい数学の可能性を脳に求めて

合原は若い頃から脳の数理モデルの研究を行ってきている。最後に脳について聞いてみた。脳の数理モデルはできるのか。少し考えたあとに合原は「百年経ってもそんなに進んでないようにも思う」と語った。

「『わかった』と思うのはメカニズムを理解したときですよね。それがどういう形なのか……。ちょっと見当もつかない」

自然界の背後には数理モデルがある。それは合原の信念でもある。しかし脳に関しては、全体としてのシステムをどのように記述すればいいか分からない。「いろんな数理手法を試して脳に迫ろうとしていますが、今の方法論では記述できないんじゃないか。何らかのジャンプが必要なのかなとも思います。ニュートンが微積分を考え出したように、ひょっとしたら脳を深く見る事で新しい数学が出てくる可能性があるかもしれない。そこが数理工学者として脳に惹かれ続ける理由かもしれないですね」（本文中敬称略）

Q&A

――研究者にとって必要なことは？

私のモットーは「一日一生、日々これ修行」です。学問は日々の積み重ねです。

――進学を希望する学生が学んでおくべきことは？

二つあります。一つは自然を見る目。現象の数理モデルを作りますから、現象をどれだけ深く見られるかが重要。もう一つは基礎的な数学の能力です。

――研究者を目指す人へ一言。

自分の好きな研究をやりなさい。論語にもありますが「知る」より「好む」が上で、さらに「楽しむ」までいってほしい。僕自身も毎日楽しんでいます。

――師匠から学んだことは？

僕の師匠は４人、宇都宮敏男先生、松本元先生、甘利俊一先生、小谷誠先生。宇都宮先生はスマートな先生でスマートなお酒の飲み方も教えていただいた。松本先生からはターゲットを決めたら絶対それをやりとげるタフなところ。甘利先生は楽しんで学問をするお手本です。小谷先生からは忘れる能力です。忘れないと頭がパンクしますからね。僕は先生には恵まれました。４人の先生について学べたのは良かった。

――研究で感動する瞬間は？

非線形効果ですね。分岐図ドレス(写真1)のように、共同研究で思いもかけなかったことが出てくることです。

――心にのこる本を１冊挙げるとすると？

内山興正の「座禅の実際　生命の実物」柏樹社です。（現在は大法輪閣から改題改訂した「坐禅の意味と実際　生命の実物を生きる」として刊行）

もっと知りたい人に

1 ― 合原一幸 編著：「脳はここまで解明された 一内なる宇宙の神秘に挑む」，ウェッジ（2004）.

2 ― 合原一幸編著:「社会を変える驚きの数学」，ウェッジ（2008）.

3 ― 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）.

4 ― 太田 光，合原一幸，田中裕二:「爆笑問題のニッポンの教養 脳を創る男 カオス工学」，爆笑問題のニッポンの教養 27，講談社（2008）.

5 ― 合原一幸，今井浩，樋口知之，三村昌泰：「[座談会]いまモデル化が求められる理由」，科学(2010年12月号).

6 ― 山口昌哉:「カオスとフラクタル」（合原一幸:解説 「カオスとフラクタル」今昔），ちくま学芸文庫 Math & Science，筑摩書房（2010）.

7 ― Kazuyuki Aihara:"Chaos in Neurons," Scholarpedia, 3(5):1786 (2008).

8 ― Luonan Chen, Ruiqi Wang, Chunguang Li, and Kazuyuki Aihara: "Modeling Biomolecular Networks in Cells: Structures and Dynamics," Springer, London (2010).

9 ― Kazuyuki Aihara(Ed.): "Theory of Hybrid Dynamical Systems and its Applications to Biological and Medical Systems," Philosophical Transactions of the Royal Society A, Vol.368, No.1930 (2010).

10 ― （被紹介記事）合原一幸:「前立腺がん内分泌療法は数理モデルで決まる」，日経メディカル Cancer Review(2010年6月号).

11 ― （被紹介記事）合原一幸:サイエンスインタビュー「複雑な現象を解きほぐす複雑系数理モデル学」，Milsil，Vo.3，No.1，pp.3-5，国立科学博物館刊行（2010）.

12 ― （被紹介記事）合原一幸:大学探検隊「現象の本質をモデル化し、問題解決の数理的・科学的手法を創造する問題解決学！」，SUNDAI ADVANCE，VOl.3，pp.22-26（2009）.

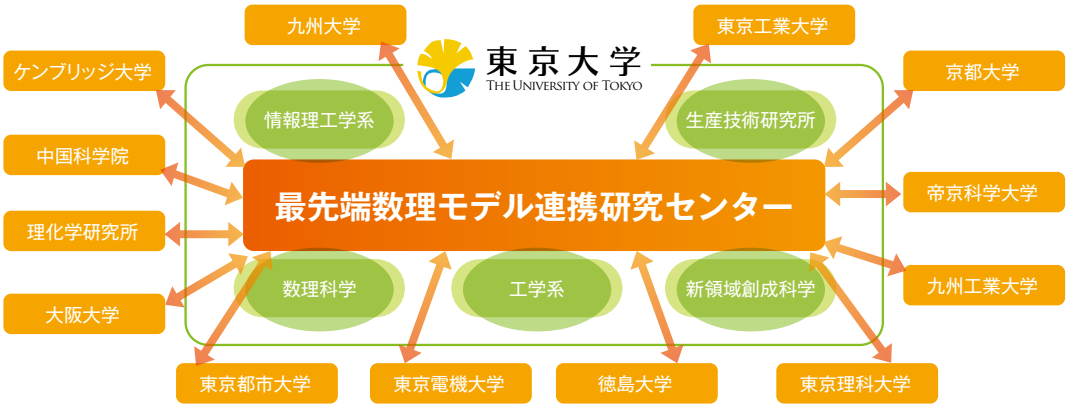

図2:研究連携組織図

［プログラムのグループ概要］

中心研究者――合原一幸

「複雑系数理モデル学の基礎研究」グループ

グループリーダー――井村順一(東京工業大学・大学院情報理工学研究科・教授)

「複雑系数理モデル学の工学応用研究」グループ

グループリーダー――堀尾喜彦(東京電機大学・工学部・教授)

「基礎研究と応用研究の融合による
複雑系数理モデル学の体系化」グループ

グループリーダー――合原一幸(東京大学・生産技術研究所・教授)

ウェブサイト――http://www.sat.t.u-tokyo.ac.jp/first/

執筆――森山和道＋「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術応用」プロジェクト

［取材者紹介］
森山和道(もりやま・かずみち)
サイエンスライター。1970年生。広島大学理学部卒。NHKディレクターを経て
現在、科学技術分野全般を対象に取材執筆を行う。特に脳科学、ロボティクス、インターフェースデザイン分野。
研究者インタビューを得意とする。共著書に『クマムシを飼うには』(地人書館)。
ホームページ:http://moriyama.com/

発行――「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術応用」
プロジェクト／科学技術振興機構