

科学の
峰々

80

取材日：2014年7月16日
日本科学機器協会会議室

東京大学 生産技術研究所 教授

あい はら かず ゆき
合原 一幸 先生 に聞く数学と“脳・複雑系・
カオス理論”の研究 上

聞き手：柴田 眞利 日本科学機器協会 広報副委員長
 山口美奈子 同 広報委員
 藏満 邦弘 同 専務理事
 岡田 康弘 同 事務局長
 (取材・撮影・編集協力：クリエイティブ・レイ(株) 安井久雄)



合原 一幸先生のプロフィール

1977年 東京大学工学部電気工学科卒業
 1982年 東京大学大学院工学系研究科電子工学専攻 博士課程修了
 1982年 日本学術振興会奨励研究員(東京大学工学部計数工学科)
 1983年 東京電機大学工学部 助手
 1986年 東京電機大学工学部 専任講師
 1988年 東京電機大学工学部 助教授
 1993年 東京大学工学部計数工学科 助教授
 1998年 東京大学大学院工学系研究科計数工学専攻 教授
 1999年 東京大学大学院新領域創成科学研究科複雑理工学専攻 教授
 2003年 東京大学生産技術研究所 教授
 現在 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長(兼任)
 東京大学大学院情報理工学系研究科数理工学専攻 教授(兼任)
 東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻 教授(兼任)

〈研究テーマ〉

「複雑現象の数理解析」

複雑系数理モデル学、カオス工学、複雑系ビッグデータ解析(経済データ、地震データ、感染症伝播データ、風況・日射量データなど)、カオス計算論

「脳情報システム理論」

神経回路網の数理、脳・神経時空間データの非線形解析、
脳の学習・自己組織化理論、量子ニューラルネットワーク論

「疾病の数理解析と治療への応用」

ガンや HIV などの難病の数理解析と治療への応用
に基づくテラーモードな最適化治療手法や分岐理論解析に
基づく動的ネットワークバイオマーカー(DNB)を用いた
複雑疾病の未病(疾病前)状態の超早期診断手法

「複雑ネットワークの工学・産業応用」

社会インフラシステム、スマートグリッド、コミュニケーション
ネットワーク、交通流などの工学分野の複雑ネットワークの
数理モデル化とその工学・産業応用

少年時代からの夢は 昆虫学者になること

——合原先生は数学を用いて、脳、複雑系、カオスなどの諸問題の研究に取り組まれていると伺っています。そこでまず、数学を専門とされるようになった経緯やきっかけなどから、お聞かせください。

合原 出身は福岡県の北九州市です。実家の隣が浄土真宗のお寺で、そのお寺が経営する幼稚園に通っていました。幼稚園が隣にあるとけっこう便利なもので、家の風呂場のドアを開けると、そこに幼稚園の廊下の窓があり、雨の日などは濡れることなく、そこから幼稚園に行っていました。

子供にとって、隣のおじさんやおばさんというのは生まれて初めて出会う他人だと思いますが、そのおじさんとおばさんが幼稚園の園長さんと副園長さんだったわけです。こういう環境のために先生というものが身近な存在だったこともあり、こうして今教員という仕事に就いているのも、そんな幼少期の経験が少なからず影響しているのかなと思っています。

仏教系の幼稚園だったことから、子どもの頃から自然と仏教には親しんでいましたが、大人になってから仏教の本を熱心に読むようになりました。僕は仏

教オタクでもあるのです(笑)。

子どもの頃の思い出をもう1つ話すと、僕らの世代には昆虫少年が多かったのですが、僕も昆虫採集に夢中で、将来の夢は昆虫学者になることでした。ただし、僕が普通の人とちょっと違うのは、50歳を過ぎててもまだ昆虫学者になることを本気で夢見ていた点です。しかし、2007年にカナダのバンクーバーで開かれたある国際会議を契機に状況が変わりました。

僕の取り組んでいる研究分野のメインテーマの一つは、脳の働きの数理モデリングです。そのほかガン、免疫、感染症、経済、地震、電力システム、環境問題など、複雑系といわれる様々な現象の数理モデルを作り、それによって個々の現象を理解したり、問題を解決したり、最適化・制御・予測しようというものです。

その一環として、カナダのブリティッシュコロンビア大学の医学部の先生たちと共同研究を行ってきました。具体的には前立腺ガンの患者さんの数理モデルを作り、テーラーメイド医療と呼ばれる、その患者さんにとって治療を最適化しようという研究です。

その研究のために、しばしばバンクーバーのブリティッシュコロンビア大学を訪ねていました。2007年に訪問した際、ちょうど運よくニューロエソロジーの国際会議が開かれていました。

ニューロエソロジーとは、日本語では神経行動学と訳され、生物の脳を調べることによって、その行動を理解しようという学問です。興味深いテーマだったこともあり、その会議にも出席してみることにしました。

驚いたことに、その会議には現代の昆虫学者たちが出席していて、ニューロエソロジーについて議論していました。

昆虫学者というと、未開のジャングルに行き、珍しい虫を捕まえて、標本箱を飾るというのがそれまでの僕のイメージでした。ところが、その会議で出会った昆虫学者たちは、そんなことは全くしていませんでした。彼らは昆虫の脳を研究することによって、昆虫の行動を理解しようという研究をしていたのです。

つまり、現代の昆虫学者は脳の数理モデルを作っている今の自分とよく似たことを研究していたのです。僕の昆虫学者のイメージが古くて現実と違っていたので気がつかなかっただけで、僕の子どもの頃からの夢が知らないうちに叶っていたわけです。

それ以来、若い学生たちには、「子供の頃の夢はいろいろな事情で叶わないことはあるが、諦めなければ、僕のように思わぬ形で叶うこともあるから夢は捨てない方がいい！」と言うようになりました。

**家業を継ぐつもりで
大学は工学部電気工学科へ**

— そんな昆虫少年が、なぜ、大学では工学部へ進まれたのでしょうか。

合原 実は、僕の実家は九州で電気設備業の会社をやっていて、工場やプラントなどの大規模な電気工事などを主な仕事としています。僕は本来ならその三代目になるはずでした。そのため小さい頃は、酔っ払った電気工事士のおじさんたちから「三代目!」と呼ばれたりしていました。

僕自身もやがては家業を継ぎ、三代目になるのだと自覚していたので、大学は東大の工学部電気工学科に進みました。そこで4年間勉強し、卒業後は家業を継ぐはずだったのですが、たまたま試験を受けずに推薦で大学院に進学できるということもあり、5年間だけ好きな研究をやりそうと思って大学院に入りました。

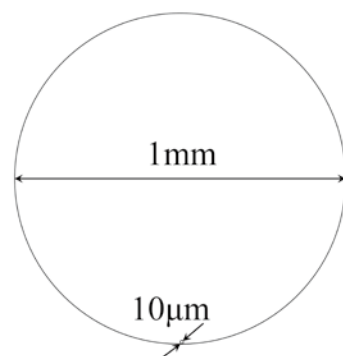
た。ここが、僕にとって人生の大きな分かれ道でした。大学卒業後すぐに家業を継いでいた方が、今よりもっとずっとリッチな生活がおくれたんじゃないかと思います(笑)。

**ヤリイカを使った実験で
「カオス現象」を発見**

— 大学院ではどのような研究に取り組まれていたのでしょうか。

合原 当時、生体工学という、生物を工学的に研究する分野があり、その研究室に入りました。そこで、生物の脳と数学を結びつける研究を始めました。そのとき実験に使ったのがヤリイカです。

ヤリイカは地球上の生物の中で最も図太い神経を持っていて、その太さは1mm近くあります。しかも、その巨大な神経を2本も持っています。それに対し、人間の脳の神経の太さは、数ミクロン～数十ミクロンしかあり



太さ1mmと10μmの違い

ません(1ミクロンは1000分の1mm)。

ヤリイカは太い神経を持っているため実験がしやすく、当時、世界中でヤリイカの神経を使った実験が行われていました。

— ヤリイカを使うことによって、脳のメカニズムはどのくらい解明されているのでしょうか。

合原 ヤリイカの巨大神経に関しては、かなり解明されています。

研究の歩みをお話すると、1952年にイギリスのケンブリッ



高校の友人たちと（左から3番目）



昆虫採集に熱中していた高校時代（右側）

ジ大学のホジキン博士とハクスリー博士が、ヤリイカの神経のデータを使って、その数理モデルを作りました。この研究で2人は1963年にノーベル生理学医学賞を受賞しています。その数理モデルは微分方程式なのですが、微分方程式でノーベル生理学医学賞をもらったのは、おそらく彼らだけだと思います。

そうした研究がベースになって、生物と数学を結びつけるといふ、僕の研究がスタートしました。

大学院の博士課程でヤリイカの神経を研究しているとき、規則に従って不規則な現象が生み出される「カオス現象」を神経から発見したことで、次の研究へとつながっていったのです。

——合原先生の研究は、工学部というより、医学や生物学という印象を受けます。

合原 それはたいへんポイントをついています。大学院時代の工学部の指導教官からは「君は学部を選択を誤ったね」とよく言われました。

大学院で入った研究室の教官だった宇都宮敏男先生は、とてもおおらかな方で、僕のやりたいように研究をさせてくれました。そのため宇都宮研究室にいながら、実験はヤリイカの飼育に世界で初めて成功した松本元先生に師事し、理論は甘利俊一先生に議論していただきました。この

ように各分野の先生方と自由に研究ができたことは、僕にとってはとても幸せな環境でした。

太い神経を持つヤリイカは人工飼育が難しい

——ヤリイカの人工飼育というのは、難しいものなのでしょうか。

合原 松本元先生は、世界中で誰もできなかったヤリイカの人工飼育に初めて成功し、輝かしい業績を残されました。

ヤリイカを実験に使うとき、漁師さんに頼んで取ってきてもらっています。しかし、取ってきたヤリイカを水槽に入れておくと、2、3日の間に、次々と死んでしまいます。

そのため、世界中のヤリイカ巨大神経の研究者は海のそばで実験を行っていたらしいです。アメリカではウッズホール、イギリスではブリマスに有名な海洋研究所が海のそばにあり、東大も神奈川県のお油壺に海洋実験所を持っています。

ヤリイカの人工飼育の先駆者である松本先生は、内陸でも実験を可能にするためにヤリイカの人工飼育に取り組んでおられました。最初のうちは、失敗の連続で、ヤリイカを次々と死なせてしまったそうです。その反面、死んだヤリイカを使って神経を切り出す練習がたくさんでき、先生はゴッドハンドと呼ばれるまでに神経切り出しの技術

に習熟されました。

——ヤリイカの人工飼育は、どのような点が難しいのでしょうか。

合原 ヤリイカは最終的に酸欠によって死んでしまいます。そこで海水中の酸素濃度を上げてみても、やはり死んでしまう。松本先生は研究を続けていくうちに、ヤリイカは代謝が活発で大量のアンモニアや二酸化炭素を出していて、これらがある程度のレベルに達すると、エラから酸素を取り込めなくなってしまうことを発見しました。

そこで松本先生は、アンモニアと二酸化炭素を除去する装置を作ることによって、人工飼育を可能にしました。3年半かかった研究です。

これは本当にすごい業績で、成功した当時、世界中の研究者たちが見学に訪れたほどです。今では世界中で松本方式によるヤリイカの人工飼育が行われています。

——合原先生はヤリイカの研究をいつごろまで続けておられたのでしょうか。

合原 この研究は大学院の頃から、ポストドクターをしていた1年間、そして東京電機大学に移った最初の頃までを合わせて、約10年取り組んでいました。

実験で使ったヤリイカを 酒の肴に論文を書く

——ところで、実験を行った後、ヤリイカはどうするのでしょうか。

合原 ヤリイカが獲れる時期は、東京の近海では11～5月頃までです。ヤリイカの人工飼育ができるようになったとはいえ、実験をするのは基本的にこの時期に限られるので、睡眠時間を削って、ひたすら実験を行い、データを取っていました。

そして、神経を切り出したヤリイカを捨てるのはもったいないので、冷凍保存しておきます。11～5月以外はオフシーズンになるので実験はせず、冷凍しておいたヤリイカを刺身や天ぷらにし、それを肴に酒を飲みながら、ひたすら論文を書くというめり張りのきいた研究生生活、それが松本グループの研究スタイルでした(笑)。

——ヤリイカの神経はとても太いということですが、スルメイカとか、昨今話題のダイオウイカなどの神経も同じように太いのでしょうか。

合原 スルメイカの神経はそれほど太くはないと思います。ダイオウイカについては、どうなっているのか、僕も見てみたいです。

——合原先生はヤリイカを実験に使われましたが、先生のお好きな昆虫の脳については、どのような研究が行われているのでしょうか。

合原 昆虫の脳に関しては、今でも次々と面白い発見があります。ただ、脳の神経細胞数は高等動物と比べるとたいへん少ないです。

昆虫の脳の中では、たぶんかなりきちんと配線が遺伝的に決まっていて、あまり学習はしなくても、高度な働きを実現して

いるのではないかと考えています。

たくさんの神経が集まる 複雑な脳の数理モデルを作る

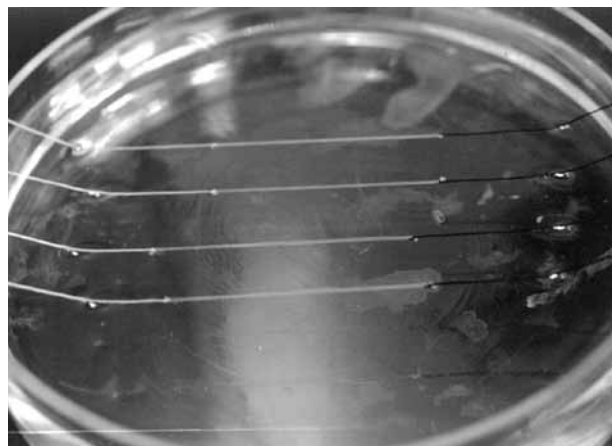
——合原先生が提唱しておられる「カオスニューラルネットワーク」について、ご説明していただけますか。

合原 人間の脳は、1000億の神経細胞からできています。1コの神経細胞については、ヤリイカの実験でかなり解明されて、神経細胞がカオス的振る舞いをすることも分かりました。「カオス現象」とは、ある規則に従って起こる、不規則な振る舞いのことです。それは一見、ランダムに見えますが、ホジキン博士とハクスリー博士の提案した微分方程式で説明することができます。

しかし、脳のように神経がたくさん集まっていると、そのネットワークを解析しなければい



大学院時代の共同研究者たちと（左から2番目）



松本先生が切り出したヤリイカ巨大神経



東京大学生産技術研究所で開催された国際シンポジウム：
International Symposium on Innovative Mathematical Modelling で
J.A. Yorke教授とディスカッションする合原教授

けなくなります。ただし、1コの神経に関するホジキン博士とハクスリー博士の微分方程式でもたいへん複雑なもので、それをたくさんつなげると、数学的に見通しの悪い研究になってしまいます。

そこで、ヤリイカの実験を通して僕が発見した神経のカオスを説明する、なるべく単純な数理モデルを作ることが、僕の次の研究テーマになりました。その研究の結果、ネットワークを解析する数理モデルができあがりました。それが「カオスニューラルネットワーク」です。

工学のさまざまな分野の研究者が集まる組織

—現在、合原先生が所属されている東大生産技術研究所について、ご説明していただけますか。

合原 生産技術研究所の始まりは戦時中の1942年までさかのぼります。理系の学生が足りなくなり、それを補うため、東大工学部に第二工学部が創設されたのが、はじまりです。終戦後1949年に第二工学部から生産技術研究所へと変わりました。

最初は千葉にありましたが、そこから六本木を経て、現在の駒場に移転しました。初めに作られた場所は千葉大学の近くで、今でも生産技術研究所の千葉実験所があります。

生産技術研究所のファカルティスタッフは100人ちょっとで、東大工学部のいろいろな学科から先生が来ています。ある意味、東大工学部のミニチュア版といった感じです。100人ほどの比較的小さな組織なので、互いにどんな研究をしているのかが分かるため、いろいろな分

野を学ぶには良いところだと思います。

—先生はどのようなきっかけで、生産技術研究所に移られたのでしょうか。

合原 僕は東大・本郷キャンパスの工学部で、日本発の応用数学である、計数工学科の数理工学の教授だったのですが、生産技術研究所の先輩方から「君は、生産技術研究所に向いている」と誘われたのがきっかけです。一度、研究所を経験してみたかったこともあり、生産技術研究所に移ることに決めました。移って約10年が経過しました。

—生産技術研究所に向いていると言われたのは、どのような点だったのでしょうか。

合原 生産技術研究所は、研究に集中して1つの大きなプロジェクトに取り組むことができる環境があり、1つの研究にとことん没頭する先生方がたくさんいらっしゃいます。僕もそういうタイプだと先輩方が私に感じていたんでしょうね。

次号「科学の峰々」では
合原一幸先生
数学と「脳・複雑系・カオス理論」
の研究（下）
を引き続きお話しいたします。