

数学で脳の原理を解く

甘利俊一 AMARI Shun-ichi

脳科学総合研究センター 脳型計算論研究グループ
甘利研究ユニット ユニットリーダー

脳科学総合研究センターのセンター長も務める甘利俊一ユニットリーダーの研究室には、脳の計測装置や化学薬品もなければ、実験用のマウスもない。その研究手段は、数学だ。「実験によって、神経細胞の活動や、脳で働く遺伝子やタンパク質が次々と明らかになっています。ただし、それだけでは脳の仕組みは分かりません。サイエンスとは、物理や化学のように、実験に基づく事実の発見から出発して、たくさんの事実の背後にある本質をつかみ、最終的にはそれを数学的に表現するものです。脳の仕組みも、必ず数学で表現できるはずです」。こう語る甘利ユニットリーダーは、脳の数学理論を40年にわたり追い求めてきた。脳の仕組みを解き明かし、人間とは何かを数学で理解できる日は来るのだろうか。

脳の情報処理の仕組み

甘利ユニットリーダーは、脳の驚くべき能力を次のような例で説明する。「私たちは、人の顔を見てすぐに誰だか思い出せますよね。ずいぶん前に会った人で、前よりちょっと太ったりしていても、すぐに思い出せます。それをコンピュータにやらせるのは、情報処理のステップ数がとても多くなってしまい、大変なことなんです」

情報の処理速度では、脳はコンピュータの100万分の1以下と格段に遅いが、とても少ないステップ数で、瞬時に顔の認識ができる。それができるのは、なぜか。

「数の力です」と甘利ユニットリーダーは答える。ヒトの脳全体には1000億個以上の神経細胞があり、それぞれの神経細胞は、ほかの1万個ほどの神経細胞とつながっている。

「膨大な数の神経細胞が並列的に働き、情報をやりとりすることで、瞬時に情報処理を行っているのです。このとき、それぞれの神経細胞は、コンピュータ素子のように正確ではなく、相当いいかげんに働いています。しかし神経回路全体としては、最終的にきちんとした答えを導き出すことができます」

このような複雑なシステムを、甘利ユニットリーダーは数学を使って解明しようとしてきた。「数学



は、物事の本質を理解するための手段として人類が築き上げてきた文化です。いま私たちは、生命現象、特に脳という複雑なシステムを目の前にして、数学でこれを理解しようとしています。ただし、これまでの数学では歯が立たないので、新しい数学が必要になります。生命現象や脳を理解しようとするのが、新しい数学や科学を生み出す原動力にもなるはずですよ」

学習の本質とは何か

「脳を理解するための新しい数学をつくるといっても、すぐにはできないので、従来の数学理論だけに頼るのではなく“数学的センス”を総動員して研究を進めてきました」と語る甘利ユニットリーダー。その具体的な研究テーマの一つは、学習である。

例えば、手書き文字の判別。「これはA、これはB」と、さまざまな手書き文字の例題を示して訓練する。「すると、ここが不思議なところなのですが、脳の中に“何らかの感覚”ができてきて、例題とは少し違ったAとBも見分けることができるようになります。つまり人間はいろいろな例題から、その背後にある法則性や仕組みを学び取ることができる、それが学習の本質です」

このとき脳では何が起きているのか。訓練するに従って、神経細胞同士のつなぎ目である「シナプ

ス」で、情報が流れやすくなったり流れにくくなったりして、神経回路の情報の受け渡し方が変わる。こうして、ある課題の学習が進むと考えられている。

では、たくさんの神経細胞からできた複雑な神経回路ほど学習は速く進むのか。どのくらいの数の例題を訓練すればよいのか。

「神経回路があまり複雑だと、調整が必要なシナプスの数が非常に多くなってしまいます。また、訓練する例題の数が少ないときに複雑な神経回路を総動員すると、例えば、例題で示された手書きのAとBは完璧に見分けられるが、例題以外のAとBが出てくると見分けられないという現象が起きます。細かい部分を詳しく見過ぎて、法則性を見いだせないのです。このような回路の複雑さや例題数と学習の進み方の関係を、私たちは数学的に分析して、一般的な法則を導き出そうとしています。数学的に抽象化された法則は、人間だけでなくコンピュータにも適用できるはずです」

学習の特異点

甘利ユニットリーダーは、数学の中でも、図形や空間の性質を研究する幾何学を重要な手段として用いる。神経回路と学習の関係も図形空間で表現して、その法則を見いだそうとしている。

例えば神経回路の中で、情報の流れ方の変化が学習の進展に及ぼす影響が大きいシナプスでつながった神経細胞同士の距離は広がっている、逆に影響が小さいシナプスでつながったもの同士は距離が縮まっていると表す。すると神経回路全体は

シナプスの数と同じ次元を持つ多次元の、“曲がった(変形した)”空間として表現される。神経回路の複雑さや例題の数、学習の進展によって、この空間はさまざまに変形する。

「このような空間を相手に、神経回路と学習の関係を探っています。今、私が夢中になって研究しているのは、空間の1点が極端に縮んだ“特異点”ができる現象です(表紙下段)。これは、あるシナプスの情報の流れ方をどのように変えても、学習がまったく進まないことを意味しています」

手書き文字を見分ける例でいえば、あるシナプスを流れやすくしても、逆に流れにくくしても、判別の能力が変わらない。どのように変えればいいのか分からず、学習が止まってしまう現象を発見したのだ。

実際に、コンピュータの画像認識システムでは学習が進まなくなる現象が知られていたが、その原因が分からなかった。「原因は特異点ができることだったのです。数学で特異点ができない条件を導き、対策を考えることができるようになりました」

「情報幾何」の提唱

神経細胞とは電気信号を出す細胞で、ほかのたくさんの細胞から信号を受け取り、その信号の強さがある一定の値を超えると、電気信号を発する(図1)。これを「発火」という。発火は情報処理にどのようなかかわっているのだろうか。

「例えば、同じ図形を繰り返し見せる実験を行うと、個々の発火の仕方はいつも同じではなく、かなりでたために見えます。しかしまったくのたためではなく法則性があります。私たちは、その法則性を解く鍵は“確率”だと考えています。例えば、1回発火するとすぐ次に発火する確率が高かったり、ある時間間隔を置いて発火する確率が高かったりします」

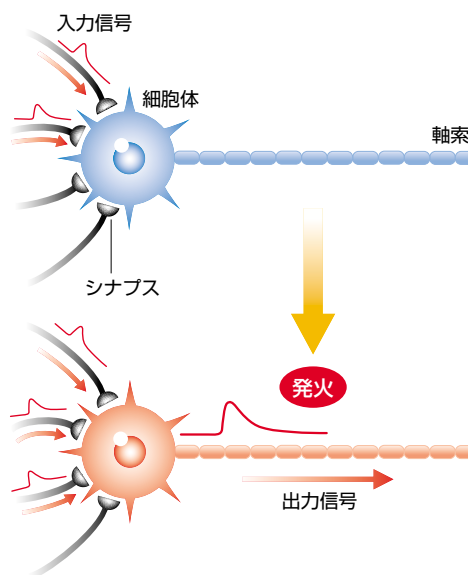
発火の回数や時間間隔は、情報を表現する手段になっていると考えられている。例えば、筋肉に“強い力を出せ”という情報を伝える場合には、たくさんの神経細胞が短時間に何回も発火し、弱い力しか出さない場合には、発火の回数は少ない。規則的な時間間隔で発火するか、不規則に発火するかでも、違った意味の情報になると考えられる。

また、例えば3個の神経細胞があったとき、そのうちの2個ずつを比べるとバラバラに活動しているように見えるが、3個を同時にとらえると関係性が見えてくる場合がある。

このような神経細胞の活動を解析するには、確率や統計といった数学理論が有効だ。ここでも甘

図1 神経細胞の発火の仕組み

一つの神経細胞は、約1万個の神経細胞とシナプスでつながっていて、信号を受け取る。その入力信号を足し合わせた強さが、ある一定の値を超えると発火し、ほかの神経細胞へ信号を伝える。



利ユニットリーダーは、確率分布や統計分布の形を幾何学で解析する研究を進めてきた(図2)。

「1980年代、さまざまな数学理論を統合して情報を扱う幾何学、“情報幾何”をつくらうと私は言いました」

なぜ、幾何学なのか? 「現象を図形空間で表現する幾何学が、数学の中で最も直観的で、イメージが浮かびやすいんですよ」と語る甘利ユニットリーダーは、国際神経回路学会の創立理事、会長などを歴任、脳の理論研究を世界的にリードしてきた。

意識と無意識の間で進む思考過程

甘利ユニットリーダーは、今後の目標を次のように語る。「例えば、単純な生物でも外から刺激があったとき、逃げたり、近づいたり、自分で行動を決めるわけです。その思考過程で情報がどのように表現されていて、情報処理がどのように進み、最終的に判断を下すのか、そのダイナミクスを記述できる数学理論をつくりたいのです。さらに人間の思考過程のメカニズムを探るには、意識や心の問題も避けては通れないでしょう」

人間の思考過程は、意識の領域で情報処理をしている部分と、無意識の領域で処理している部分がある。例えば、手書き文字の判別は無意識の領域で行っていて、どう判別しているのか言葉だけでは言い尽くせない。

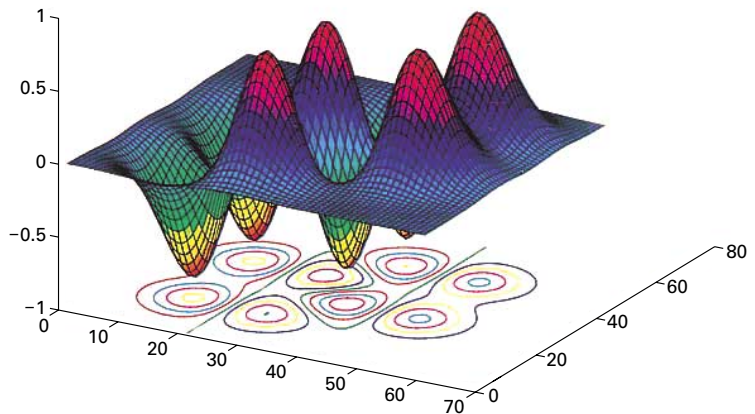
「数学の問題を解く場合でも、こうやれば解けそうとか、ここで行き詰まっているとか、いろいろなことが意識の領域に上がってきます。脳は無意識の領域で情報処理を行い、その結果を意識の領域に上げているのです。ただし答案用紙には、意識の領域で論理的に考えたことしか書けません。コンピュータには、その論理で書ける部分だけを取り出してきてプログラムをつくり、情報処理をさせています。人間の場合は、もちろん論理的な情報処理もできますが、論理では書けない無意識の領域で行っている情報処理が大事なんです」

脳研究の未来

脳の数学理論の研究が進展すれば、脳のようなシステムには何ができて、何ができないのかが明らかになるだろう。それは、人間とは何かを理解する大きな手段になるとともに、工学的に脳のようなシステムをつくることにも応用できる。例えば、人間のように、さまざまな状況を的確に判断して行動できるロボットをつくることもできるだろう。研究

脳のように複雑なシステムでも、
人間には、その本質を見抜く能力があると
私は信じています。

図2 神経細胞の発火の時空間パターンの研究例



は今後どのように進んでいくのだろうか。

「物理学では、相対論も量子論も、最終的には一つの方程式に行き着いたわけです。しかし脳の数学理論は、そうはいきません。ミクロからマクロまで、脳のさまざまな側面をとらえる重層的な理論をつくり、それを体系化する必要があると思います」

最後に甘利ユニットリーダーは、今後の展望を次のように力強く語った。「脳の数学理論は、遅くとも今世紀半ばには完成できると思います。現在は3~4合目まで来たところでしょうか。急速に進展している脳研究は、これから難しい局面に差し掛かり、ブレークスルーが必要です。ただし最近、理論と実験の研究が急速に結び付きつつあり、展望は明るいと思っています。私が楽観的なのは、人間には複雑な現象でも、その本質を見抜く能力があると信じているからです。物理でも化学でも、いくら複雑に見えても、数学的に体系化することに成功してきました。脳についても、きっとできるはずです」

関連情報:

- 「脳における偶然と必然」『数理科学』2006年1月号
- 「脳の情報数理科学」『脳21』Vol. 8 No. 3 (2005)
- 「特異モデルの学習理論」『電子情報通信学会論文誌D-II』Vol. J88-D-II No. 2 (2005)
- 「脳の中身が見えてきた」岩波書店(2004)