

脳は外部の環境を認識して次の行動を決定する情報処理を行っている。

しかし脳がどのような方程式を用いて情報処理を行っているのか、その普遍的な計算原理は分かっていない。

脳科学総合研究センター 行動・神経回路研究チームのAndrea Benucci^{アンドレア ベヌッチ}チームリーダー（TL）たちは、

マウスの神経活動の計測データを機械学習の数理モデルで解析して

脳が用いている方程式を導き出し、さらに神経細胞の活動を光で操作して

その方程式を脳が本当に用いているか検証する実験を進めることで、

脳の普遍的な計算原理を探っている。

機械学習と実験により、 脳の普遍的な計算原理を探る

■ 脳はどんな方程式を用いているのか？

コンピュータの集積回路には、膨大な数のトランジスタが組み込まれている。情報処理を行うための方程式を、計算手順（アルゴリズム）に従い、それぞれのトランジスタが電気を通す（オン）・通さない（オフ）を1と0に対応させて解いている。

一方、脳では膨大な数の神経細胞がつながり合って複雑な神経回路をつくっ

ている。神経細胞は電気信号を出す（オン）・出さない（オフ）を繰り返して情報をやりとりしている。ただし、脳による外部環境の認知およびそれに基づいた行動の決定が、神経細胞間のどのような情報のやりとりによって実現されているのかは分かっていない。

「脳でも、何らかの方程式を用いていると考えられます。その普遍的な計算原理を知りたくて研究を続けています」と

ベヌッチTLは言う。

■ マウスの自動訓練装置を開発

脳の計算原理を知るには、まず認知の情報処理を行っているときの多数の神経細胞のオン・オフを計測する必要がある。そのためにベヌッチTLたちは、さまざまな実験手法が開発されているマウスを使い、訓練や実験がしやすい視覚情報の認知を主な実験対象にしている。

ただし、マウスに複雑な認知課題を訓練させることは大変だ。従来、1種類の認知課題を学習させるのに、実験者がそばに付いて数カ月以上かけて訓練を行うのが一般的だった。そのため、何十匹ものマウスを訓練して実験を行うには、多くの人手や時間、コストがかかるため、現実的には難しかった。

また、訓練の手法や装置は研究室ごとに最適化されることが多い。そのため、異なる実験者や研究室が行った訓練に基づく実験データを比較することが難しく、再現性も確認しにくいという問題もあった。

ベヌッチTLたちは、マウスに対して複雑な認知課題を自動で訓練する装置をメーカーと共同開発した（図1）。それにより、多数のマウスの訓練の同時並行化、および各個体における学習に要する時間の短縮化に成功した。また、この自動訓練装置を用いれば実験が標準化されるので、異なる研究室で行われた実験データを容易に比較することができる。

一例として、ベヌッチTLたちは、その自動訓練装置を用いて、マウスに「垂直」という概念を学習させて、認知課題

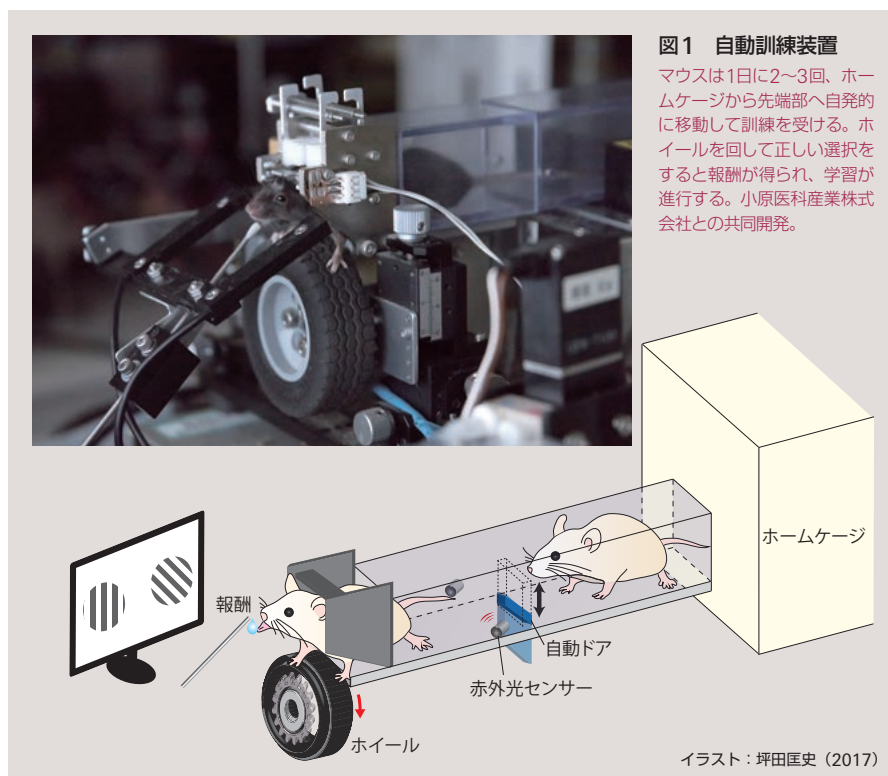


図1 自動訓練装置

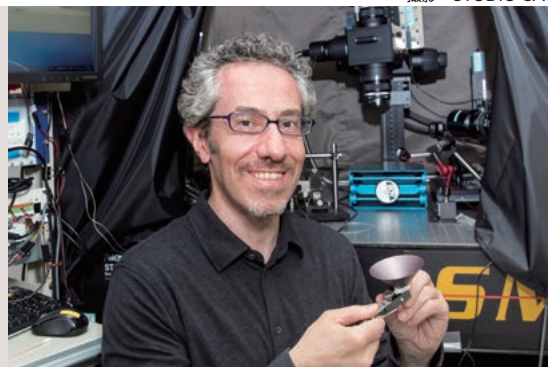
マウスは1日に2～3回、ホームケージから先端部へ自発的に移動して訓練を受ける。ホイールを回して正しい選択をすると報酬が得られ、学習が進行する。小原医科産業株式会社との共同開発。

Andrea Benucci

(アンドレア・ベヌッチ)

脳科学総合研究センター
行動・神経回路研究チーム
チームリーダー

スイス連邦工科大学チューリッヒ校とチューリッヒ大学の連携プログラムにて神経科学分野でPh.D.取得。ユニバーシティ・カレッジ・ロンドン（英国）での上級リサーチ・アソシエイトなどを経て、2013年より現職。



を行わせている（図2）。異なる角度で傾いた二つのしま模様を見せる。右のしま模様が垂直に近ければ右を、左が垂直に近ければ左を選べば正解とする。正解するとマウスは報酬がもらえる。

外部の環境を認知するとき、過去の記憶と照らし合わせるケースや、暗かったり一瞬しか見えなかったりなど不十分な情報から答えを推論しなければならないケースがある。ベヌッチTLたちは、二つのしま模様を見せた後、しばらく時間を置いてから選ばせる記憶力が必要な実験や、マウスに見せるしま模様になどとノイズを加えて、情報が不十分な状況で推論させる実験を行っている。注意力の違いで認知にどのような差が出るのか調べる実験も行っていく予定だ。

「状況に応じて、認知に関わる神経細胞の領域や情報処理の仕方は違ってきます。複雑な認知活動では、脳の広い領域の神経回路が複雑な階層構造を形

成しつつ関与するので、単一の階層に属する小さな領域の少数の細胞を見るだけでは駄目なのです」

しかしこれまで、脳の広い領域のたくさんの神経細胞の活動を同時に調べることは難しかった。「私たちは、個々の神経細胞の活動度に応じて明るく光るように遺伝子を改変したマウスを用いて、脳の広い領域の数百個もの神経細胞の活動を計測しています」（図3）

■ 機械学習で脳の方程式を導き出す

ベヌッチTLたちは、得られた実験データをもとに、神経回路が視覚情報をどのように認知して意思決定しているのか、その数理モデルを導く研究を同時に進めている。

1940年代から、ニューラルネットワークと呼ばれる数理モデルの研究が始まった。脳の神経回路を模した計算モデルをつくり、課題を与えて学習させること

で正解を出せるようにするものだ。しかし20世紀のコンピュータの計算速度は遅く、ニューラルネットワークの研究はなかなか進展しなかった。

21世紀に入り、コンピュータの計算速度は飛躍的に高速化し、さらに数理研究の進展もあり、ニューラルネットワークの研究は機械学習や人工知能（AI）と呼ばれる分野に発展を遂げ、さまざまな領域で応用されている。

「機械学習やAIは、脳の計算原理を理解するための数理モデルを提供してくれるようになりました。私たちは、マウス脳の神経回路を模した数理モデルを『再帰型ニューラルネットワーク』を使って作成し、認知課題を行っているときのマウスの神経活動のデータを学習させています。それにより、再帰型ニューラルネットワークが自身のパラメータを調整して、マウスの神経細胞活動の時間変化の特徴的な性質を抽出できるようにな

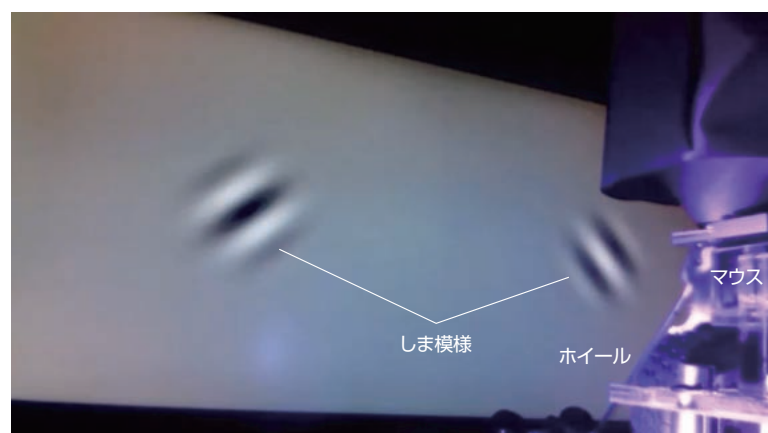


図2 垂直の概念を用いる認知課題

スクリーンに映る二つのしま模様のうち、垂直に近い方を選び、選んだ方へホイールを回転させる。

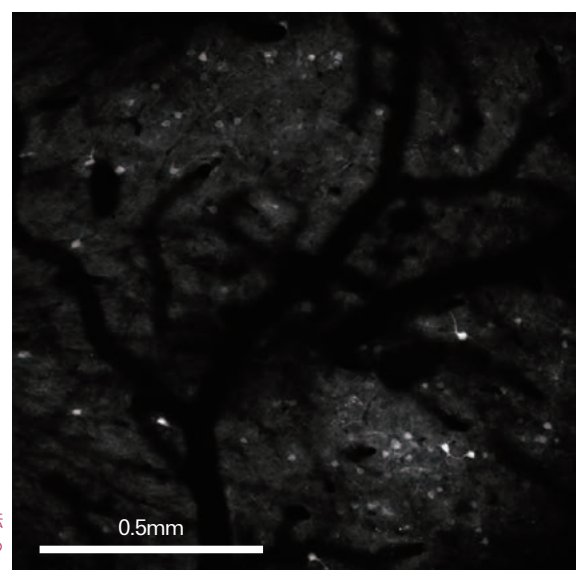


図3 脳の広い領域の神経活動の計測

神経細胞の活動の強さに応じて明るく光るように遺伝子を改変したマウスを用いて、認知課題を行っているときの数百個もの神経細胞の活動を計測している。

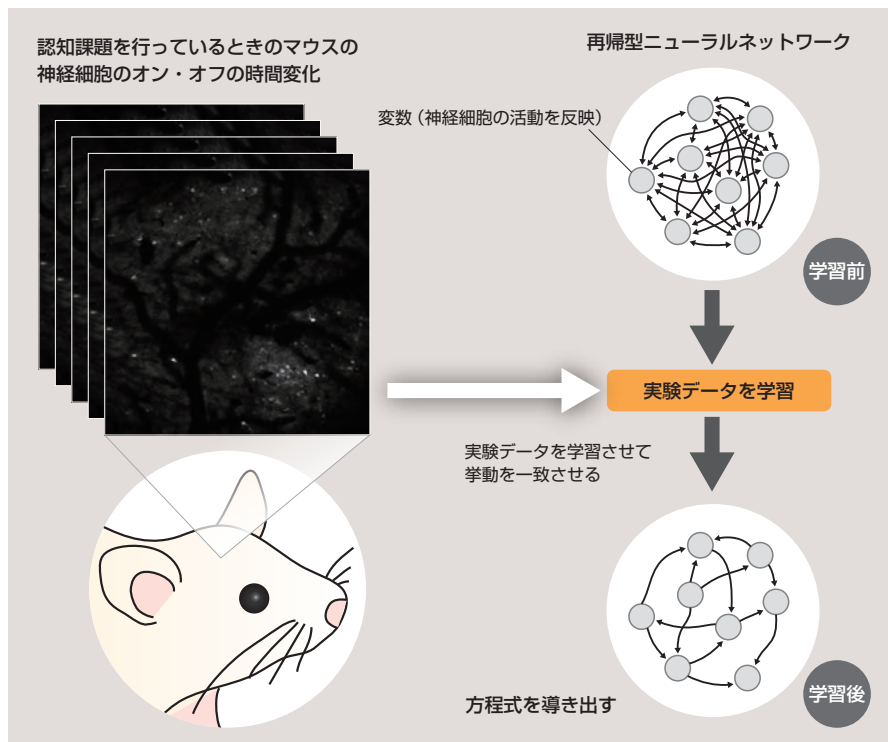


図4 実験データによる再帰型ニューラルネットワークの学習

学習前は、方程式の全ての変数が双方向に結合し、変数間の情報の伝わり方はランダムな状態。実験データを学習させると、マウスの神経細胞のオン・オフの時間変化と再帰型ニューラルネットワークの挙動が一致するように、方程式のパラメータ値が調整され、変数間の情報の伝わり方が変わる。

再帰型ニューラルネットワークは、情報が一方の変数から他方に伝わるだけでなく、フィードバックされるという特徴を持つ。そのため今の状態に過去の状態を反映させるモデルが構築でき、神経細胞集団の時間変化を表現する方程式を導き出せる。

で、多くのことを学ぶことができるでしょう。最近、機械学習やAIの研究者により、脳の計算原理の理解に役立つ、新しい数理モデルが次々と生み出されています。その新しい数理モデルを使ってマウスの計測データを解析することも可能でしょう」

ります。このようにして、脳が用いている方程式が導き出されるのです」(図4)

■ 光遺伝学で方程式を検証する

さらにベヌッチTLたちは、その方程式が本当に脳で使われているかを検証する実験を進めている。そのために、光の照射によって神経細胞のオン・オフを操作することを可能とする光遺伝学という技術を用いている。

「私たちは、数百個の神経細胞それぞれを独立に操作する技術を確立しました。神経細胞Aをオンにした後、Bをオンにして、次にCをオンにするといった一連の操作をミリ(1,000分の1)秒の精度で行うことができます。多数の神経細胞の活動をこのような高い精度で操作する技術を持つ研究室は、世界的にも限られています」

ベヌッチTLたちの再帰型ニューラルネットワークは、脳の神経細胞の構造を模したもので、方程式の各変数は、脳の神経細胞と対応関係がある。もし、その方程式が脳で使われていれば、方程式のある変数を操作することで生じる再帰型ニューラルネットワークの挙動の変化を調べることで、対応する神経細胞を操作して生じる全神経細胞のオン・オ

フの時間変化を推定できるはずだ。

「例えば、マウスに二つとも水平なしま模様を見せます。この場合、正解がないので、マウスはホイールをどちらに回せばよいか分かりません。そのとき、右に回す意思決定に対応する神経細胞活動を再帰型ニューラルネットワークから予測し、それら神経細胞を操作すれば、右に回すことが正解だとマウスに認識させることができるはずだ。そのとおりにマウスが右に回せば、脳でその方程式が用いられていることの証明になります」(図5)

行動・神経回路研究チームには、マウスの訓練や実験、神経活動の計測から、機械学習による計測データの解析まで、脳の計算原理を探るために必要な技術と人材がそろっている。「数理や生物学など異分野の研究者たちが連携しながら研究を行っている点が、私たちの研究チームの大きな特徴です」とベヌッチTL。

もし、再帰型ニューラルネットワークが導き出した方程式が、マウスの脳で使われていないと分かったら、研究をどのように進めるのか。「その場合、方程式の予測と実際の神経活動のパターンがどのように違うのかを調べること

■ 人工知能 vs 脳

例えば、私たちはネコをどのように認識しているのか、その視覚的な概念を言葉で言い尽くすことは難しい。しかし、私たちはネコとイヌを簡単に識別することができる。

ベヌッチTLたちが訓練したマウスも、垂直という視覚的な概念を学習して、それにより二つのしま模様で垂直に近い方を選ぶことができるようになった。

最近ではAIも、「ネコの顔」などの視覚的な概念を学習できるようになっている。「ただし、そのような概念の学習には、多くの電力を消費するスーパーコンピュータが使われています。一方、マウスの脳のサイズはわずか1cmほどで、その消費エネルギーはごくわずかです。概念を学習するための方程式は、AIと脳で似ていると私は予測しています。ただし、計算素子はトランジスタと神経細胞とは異なり、AIと脳では異なるアルゴリズムを採用していることは明らかです。その違いを具体的に明らかにしていきたいと思います」

小型で低エネルギー消費の脳で使われているアルゴリズムが分かれば、それはAIの発展にも大きく貢献するだろう。「私は、IT企業のAI研究者や脳科

学者とも密に連絡を取り、連携を深めています」

■ 脳の普遍的な計算原理の解明へ向けて

ベヌッチTLたちは、主に視覚について研究を進めているが、聴覚や触覚などほかの認知システムは、どのような計算原理を用いているのだろうか。

「認知を行う大脳皮質において、視覚や聴覚はそれぞれ異なる領域で処理されています。しかし神経細胞の種類や並び方、つながり方などを顕微鏡で観察すると、大脳皮質ではどの領域もほとんど同じ構造です。視覚でも聴覚でも、認知の普遍的な計算原理は同じであることを、これまでの多くの研究が示唆しています。従って、垂直という概念を認知するといった特定の認知課題の計算原理が分かれば、それは脳の認知システムの普遍的な計算原理である可能性が高いのです」

マウスの脳の計算原理は、ヒトの脳の

理解に役立つのだろうか。「マウスで見つけ出そうとしている大脳皮質の計算原理が、ヒトに至るほかの哺乳類の大脳皮質にも共通していると期待しています。1980年代にネコを用いた実験によって、脳には神経細胞の活動の過度な興奮や抑制を防ぎ一定の範囲内に制御する仕組みがあることが発見されました。その後、ほかの研究者たちにより、その仕組みがショウジョウバエやマウス、サルなどでも働いていることが確かめられ、その仕組みは多くの生物に共通していることが分かりました。私たちがマウスの大脳皮質で働く計算原理を発見できれば、それがほかの哺乳類の大脳皮質にも共通しているかどうか、大きな大脳皮質を持つ霊長類のマーマセツなどの研究者が確かめようとするでしょう」

■ 脳と機械を直接結ぶ研究にも貢献

ベヌッチTLたちの研究は将来、医療にも貢献できる可能性がある。「人工網

膜などが最初の応用例になるでしょう」

現在、網膜が機能不全になった人のために、CCD（電荷結合素子）で捉えた視覚情報を脳に送り視力を回復させる人工網膜の開発が進められている。ただし現状では、明るい点がおぼろげに見える程度だ。

前述のように、ベヌッチTLたちは、機械学習で導き出した方程式を検証するために、特定の神経細胞を操作してマウスの認知が方程式の計算どおりに変化するかどうか調べる実験を進めている。その技術や知見を応用し、CCDで捉えた視覚情報に基づき、的確に視覚領域の神経細胞を操作することで、より鮮明な画像が見えるように視力を回復させることができる可能性がある。

脳波などの脳活動の情報を読み取り、機械を操作するブレイン・マシン・インターフェース（BMI）の研究も進み、脳の疾患で手足が不自由になった人のリハビリや、精神疾患の診断・治療への応用も期待される。

「私たちの研究は将来、脳と機械が直接コミュニケーションを行うブレイン・マシン・インターフェースの研究にも貢献できるでしょう。ただし、具体的な応用に役立てるには、まだ多くの研究ステップが必要です」とベヌッチTL。

行動・神経回路研究チームの世界的にも独創的な研究は、脳科学のみならず、AIやブレイン・マシン・インターフェース、医療などにブレークスルーをもたらす可能性を秘めている。

（取材・執筆：立山 晃／フォトンクリエイト）

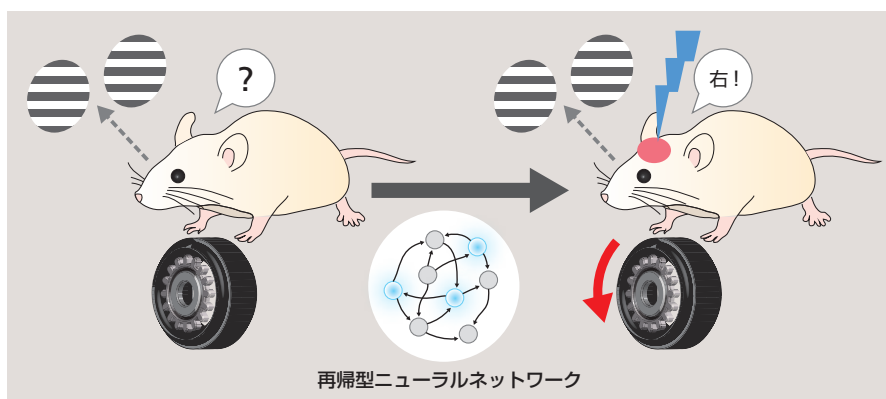


図5 光遺伝学による検証

学習させた再帰型ニューラルネットワークの挙動を調べれば、例えば、ホイールを右に回すときに活動する複数の変数が特定できる。マウスに二つとも水平なし模様を見せて判断がつかない状態にしておき、特定した変数に対応するマウスの神経細胞を光で刺激する。右に回す行動が誘発されれば、再帰型ニューラルネットワークで導き出した方程式が脳で用いられていることの証明になる。