

脳の物理学

豊泉太郎

■脳の物理

脳は知覚・記憶・感情・意識など様々な機能を担っている。近年の実験技術の進歩で、脳活動を高精度で記録し、神経活動を操作できるようになった。それでも脳の機能はまだ多くの謎につつまれている。脳の理解に物理学はどのように貢献できるだろうか。脳科学の世界で物理学的な見方は少数派である。しかし、現象の背後にある本質的特徴を抽出し、モデルを構築し、その解析で普遍的な理論を導くアプローチは脳科学でも有用だ。本稿では、物理学的な視点から脳を研究した例をご紹介します。

■力学系を使って脳を理解する

脳は外界と動的に相互作用することで機能するという考えがある。外界から完全に遮断されると、脳は正常な機能を維持できない。また、外界との相互作用を極力排除した高価なロボットが不自然にしか歩けないのに対し、振り子の先に足を取り付けた簡易な装置は自然な二足歩行 (passive walk) ができる。この結果は、大脳を切除した猫でも、トレッドミルの上に乗せると、その速度に合わせて自然に歩行・走行パターンを切り替えるという知見とも合致する。脳は外界との相互作用に応じて、適宜、情報処理を切り替えているのかもしれない。一方で対立する仮説として、脳の機能は脳内のニューラルネットワークの入出力関係によって外界とは無関係に決まっているという考えもある。例えば、計算機の機能はあらかじめ組み込まれた関数の入出力関係で決まる。脳を理解する上でどちらの考え方が有用だろうか。

実は、力学系の初歩を知っていれば系の振る舞いが、一般に、入力だけでは決まらないことに気づく。簡単なフィードバック制御の例を考えてみよう。例えば、エアコンは制御対象である部屋の温度を観測し、その観測値を目的の状態へ近づけるように風量などを調節する。エアコンがうまく機能している時の動作を記録しておき、後日、部屋の温度を無視して、そっくり同じ動作を繰り返してもうまく温度調節できない。制御する部屋の統計的性質が同じでも、熱揺らぎ (ヤカオス) による違いが徐々に蓄積して違いを生じてしまう。フィードバック制御はリアルタイムで行うことが重要である。この話で、部屋の温度を脳活動に、エアコンを外界に、そして風量を脳への感覚入力と置き換えてみると、脳活動は感覚入力だけでは決まらないだろうと気づく。この類推において脳の動作を変えるのは外界の性質である。つまり、脳の活動は脳内のニューラルネットワークと感覚入力だけでは決まらず、外界が行動の影響をどの程度感覚入力として反映するかによって依存すると考えられる。

上記の予想を検証するために、我々は Ahrens らの魚の脳活動データを解析した¹⁾。Ahrens ら²⁾は体を麻痺させた魚の稚魚をバーチャル空間で行動させる実験を行った。末梢運動神経の活動を計測し、運動信号があったらバーチャル空間の魚の位置を前進させ、それに合わせて魚に提示する視覚刺激を変化させる設定だ。魚は、通常、水に流された分だけ流れに逆らって泳ぎ、自分の位置を保とうとするが、バーチャル空間でも同様の行動が見られた。我々はこのデータを解析し、運動信号がリアルタイムに視覚刺激に変換される環境（バーチャル環境）と、その実験の際に記録しておいた視覚動画を後になってそっくりそのまま提示した環境（リプレイ環境）で脳活動が異なることを示した。上記の議論から、この違いは外界が担う感覚フィードバックの違いで説明できるのではないかと期待できる。そこで、観測された個別の神経細胞について「前進した後の視覚応答」と「その細胞が活動したことによる運動信号の影響」をモデル化し、それを元に、バーチャル環境とリプレイ環境で、それぞれの神経細胞がどのくらい活動するべきかを理論的に予測した。この理論予測は実際に観測された二つの環境下の活動強度の違いをうまく説明することができた。つまり、外界の感覚フィードバックの強さの違いによって脳の入出力関係の変化を説明できた。

この結果は、脳の機能を理解するためには、脳が置かれている環境の動的な性質を理解する必要があることを示唆している。脳が最も密に相互作用する系は身体である。上記のアプローチの自然な拡張として、身体がどのくらい鋭敏に脳からの信号に応答するかに応じて脳の入出力関係が変化すると予想される。実験で、じっとしてヒゲを止めているネズミでは、ヒゲの触覚情報を担当する細胞の活動が大きく揺らぐのに対して、ヒゲを動かしている時は、活動の揺らぎが減少することが報告されている³⁾。また、動いているヒゲを弾くと止まったヒゲを弾くより神経細胞の応答が小さいが、動いているヒゲが物体に当たった時には大きな応答が観測されている³⁾。これらの実験結果は、じっとしている時とヒゲが物体表面に当たって動かない時には、身体が脳からの信号に応答しないが、空中でヒゲを動かしている時には、身体が脳からの信号を受けて負の感覚フィードバックをかけていると考えるとうまく説明できる。つまり、ヒゲが動かせる時には身体による負のフィードバックの影響で神経細胞の応答が減少し、ヒゲが動かさない時にはその負のフィードバックが外れて神経細胞の応答が大きくなるという理論だ。更に、神経細胞集団とヒゲの機構をモデル化することで、より定量的に実験結果を再現できる¹⁾。

■脳と AI

近年は脳の構造にヒントを得たニューラルネットワークと誤差逆伝搬学習則を組み合わせた AI が注目され、AI が人間の能力を上回る場面も増えた。しかし、大規模 AI の働きを理解する為には、脳の機能を理解するのと同様の困難が生じる。物理学の視点はそれらの問題解決に有用である。また、脳はタスクを解釈しそれを他者に伝える学習も行うことから、そのような機構を脳に習って取り入れる研究⁴⁾も進んでいる。更に、脳と機械をつなぐブレイン・マシン・インターフェースの分野も発展している。感覚を補助し、脳活動でロボットを操作し、機械で学習を補助し、てんかん発作を検知して介入する結果が報告されている。このような研究を通して、脳と AI の特徴がより明確になり、AI が発展するとともに脳の理解が進んでいくと期待している。

参考文献：

- 1) C.L. Buckley and T. Toyoizumi: PLoS Comput Biol 14, e1005926 (2018).
- 2) M. Ahrens et al.: Nature 485, 471 (2012).
- 3) S. Crochet and C.C.H. Petersen: Nat Neurosci 9, 608 (2006); S. Crochet et al.: Neuron 69, 1160 (2011).
- 4) Z. He and T. Toyoizumi: arXiv:2101.02879

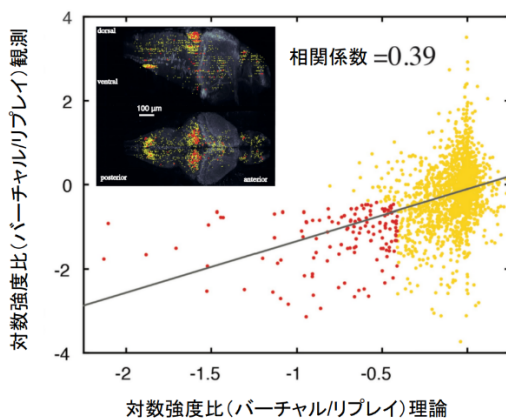


図1：感覚入力が同一のバーチャル環境とリプレイ環境での魚の脳活動の違い。二つの環境で0.01-0.15 Hzの周波数帯の神経活動強度を比較した(縦軸)。各点が一つの神経細胞に対応。外界の性質(感覚フィードバックの強度)を考慮した理論で二つの環境の神経活動強度の違いを説明できた(横軸)。赤点は負の感覚フィードバックを受けてバーチャル環境で活動強度が減少した細胞。黄点はそれ以外の細胞。挿入図は脳内での細胞位置。[1]より抜粋。