

神経行動学からみえる生物教育 —「生物」から「生物学」へ—

東京大学 先端科学技術研究センター 教授 かんざき りょうへい 神崎 亮平

神経行動学とは

わたしたちを取り巻く環境は時々刻々と複雑に変化する。生物は変化する環境下で適切に行動し、その生命を守り、子孫を維持するための「適応能」を獲得してきた。このような生物が獲得した行動発現のしくみを、生物の進化やさまざまな生物との比較を通して、感覚や脳のしくみとして明らかにするのが「神経行動学」である。

さらに、神経行動学で注目すべき点は、生物の行動発現のしくみを感覚入力から行動発現に至る全容、すなわちシステムとして理解しようとすることである（図1）。その意味において、神経行動学は生物学と工学を結びつけるインタフェースとしての役割も大きい。

神経行動学は異分野が融合した学際研究

1960年頃までにヨーロッパでは、コンラート・ローレンツ、ニコ・ティンバーゲン、カール・フォン・フリッシュらにより動物行動

学の基礎が確立された。また、アラン・ホジキンやアンドリュー・ハクスレーらにより、神経細胞（ニューロン）の活動のメカニズム（神経生理学）も次第に明らかになった。そして、これらの2つの分野が融合することにより「神経行動学」が誕生することになる。

動物行動学者は、動物の行動を自然の状態そのままを観察する手法をとる。一方、神経生理学者はニューロンまで細かく分解して、還元論的にその性質を調べる方法をとる。動物行動学と神経生理学という、アプローチが正反対の分野の融合により成立した学際的な研究分野が神経行動学である。

生物から学ぶ環境適応能（知能）

神経行動学は、動物の行動発現のしくみをニューロンのはたらきから明らかにするわけだが、その根底には環境に対する適応能の理解がある。これを別の視点で捉えると、「知能」となる。つまり、神経行動学は生物が進化を通して獲得した「知能」のしくみを明らかにする分野とも言える。

このような生物がもつ知能のしくみは、工学の分野からも注目されている。

人工知能（AI）の1つの研究は、ビッグデータやデータベースに蓄積された膨大な情報をスーパーコンピュータの処理能力を活用することで進められ、世界的に重要な潮流となっている。人工知能とプロ棋士との対戦、東大の入試問題へのチャレンジなど多くの話題を呼び、その性能は日々向上している。一方

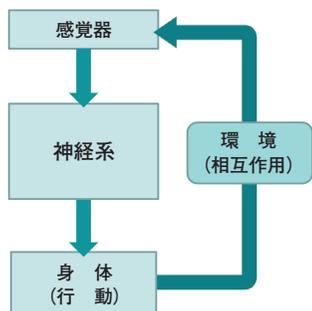


図1 環境と神経系そして行動との相互作用から生まれる適応能（知能）

で、生物が進化により獲得した知能は、変化する環境下でおこるさまざまな課題に対していかに巧みにそれを解決するかを考えるうえで非常に有効な示唆を与えることになる。環境下で生物のようにかしこく、巧みに振る舞うことのできるロボットは非常に魅力的である。

このような環境適応という知能のしくみは、生物に学ぶことが必須のアプローチとなる。それを可能とするのが、神経行動学である。

神経行動学の背景にある系統進化と比較生物学

では、神経行動学はどのような研究アプローチをとるのか。

例えば、ヒトの行動や思考（知能）の背景にある脳のしくみが分かればそれに越したことはない。しかし、ヒトの脳は分析をして理解するには、あまりにも複雑である。そこで、対象とする生物を選ぶことが重要となる。進化集団遺伝学者のテオドシウス・ドブジャンスキーは、「進化的な見方を排した生物学は生物学ではない」と断じている。また、1920年にノーベル生理学・医学賞を受賞したアウグスト・クローグは、「生理学の諸問題を解決するためには問題解決に最も適した動物を厳選することが重要」と強調する。神経行動学には、種の系統的な連続性と比較を通した生物機能の理解という考えが根底にある。

ユクスキュルの環境世界

さて、このようなヒト以外の生物をつかって、感覚・脳・行動のしくみを明らかにしていくうえで、「環境世界」は忘れてはならない概念である。ドイツの生物学者ヤーコプ・フォン・ユクスキュルは、1934年に『生物から見た世界』という著書で、「環境世界」という考えを述べている。ユクスキュルがこの

ような考えを提唱するまで、環境はすべての生物を取り囲む客観的な状態であり、あらゆる生物にとって同じものと考えられてきた。ところが、ユクスキュルは全く異なる視座を持っていた。つまり、それまでのように客観的な視点から環境を捉えるのではなく、生物自身を中心にして意味を与えるものが本来の環境であると考えたわけだ。

感覚の世界：これを現在の科学から捉え直すと次のようになる。生物は外界の情報をその生物がもつ感覚器（センサ）で捉える。目で光を、鼻で匂いを、そして耳で音を捉える。外界にはさまざまな感覚情報が潜むが、実は動物によって捉えることのできる情報には限りがある。例えば、ヒトは、400nmから800nmの光（電磁波）を目（網膜）で捉え、青から赤の色として検出する。ところが、400nmより短い光（紫外線）は検出できない。しかし、ミツバチの複眼はそれを色として検出できる。ミツバチはこの紫外線を使って、花の蜜のありかを探す。

音にしても、ヒトは、20Hzから20,000Hzの音波を音として聞き分けるが、20,000Hzを超えるような超音波は検出できない。しかし、コウモリやネズミ、イヌ、ある種の昆虫などは超音波をコミュニケーションに使う。このように同じ環境下にあっても、動物によって検出できる情報は異なる。動物は検出できる範囲の感覚情報を脳に伝え、脳はその情報を使って、外界の世界を脳内に再構築する。これを「環境世界」という。つまり、環境世界は動物によって異なることになる。

時間の世界：さらに、一瞬の時間も生物によって異なる。例えば、蛍光灯は実は一秒間に100回または120回点滅しているが、私たちには連続して光っているように見える。ヒトが区別できる点滅の頻度は40Hz程度である。一方、ミツバチは300Hz以上の光の点滅を見分けることができる。光の点滅頻度を増やしていくと、ある頻度以上からは連続して光っ



図2 個体を起点としたシステムとしての生物

ているように感じる。このときの頻度を臨海融合頻度 (Critical Fusion Frequency ; CFF) という。CFFはヒトでは15~60Hz, ハトで150Hz, ハエで60~260Hz程度と、生物により一瞬の世界は異なっている。

サイズ世界：もう一つ重要なことは、サイズの問題だ。物体の体積は長さの3乗に比例し、表面積は2乗に比例する。したがって、長さが短くなると、体積に対する表面積の比が相対的に大きくなる。その結果、表面に作用する力の影響が体積に作用する力よりも相対的に大きくなる。これを「スケール効果」という。つまり、小さくなるにしたがい、支配する力が体積で利く慣性力から、面積で利く摩擦力や粘性力に変わることになる。小さな昆虫では、われわれ以上に摩擦力や粘性力が相対的に大きくなり、空気もねばねばしたハチミツのような状態になる。サイズの小さな生物は、私たちとは全く異なる力関係の世界に生きていることになる。

このように私たちからみると同じ環境であると思っても、生物によってその感覚の世界、時間の世界、そしてサイズにより支配される力の世界はみんな違うわけだ。環境世界が違えば、私たちの直感や経験がほとんど役に立たなくなってしまう。私たちは、自分の感覚や感性を信じて生活をし、それを基準にさまざまな判断をするが、それは主観の世界にすぎないのだ。

神経行動学からみえる生物教育：「生物」から「生物学」へ

これまで述べてきたように、神経行動学の成立、その背景にある考え、さらにはヒト以外の生物を対象とすることから生まれる「環境世界」の違いは、生物を考え、知識として

の「生物」から、より身近で体系的な「生物学」への転換を図るうえで、さらには生物教育においていくつかの重要な示唆を与える。

以下では、神経行動学から筆者自身が学んだ生物教育の一指針について述べる。

個体を起点としたシステムとしての生物

生物を学ぶ学生は少なからず物理の世界に触れ、世界がそれなりの秩序だったルールのもとで、システマティックに構築されていることを学ぶ。基礎方程式をもとにその先のことでも完全ではないにしろ、ある程度は予測できるということを学んでいる。

生物の講義は通常、分子や細胞レベルから始まる。このような学生に分子生物学の用語がうごめく世界から生物の講義をはじめ、DNAがすべての生命の基本であると説き、ミクロからマクロな方向へと話を進めても、学生自身が身をもって体験しているもっとも身近で起点となるはずの個体としての生物からは乖離した世界となる。つまり、ミクロからマクロな方向へと話を進めると、学習の起点がその都度変わるため、体系的な理解が困難になる。個体レベルを不動の起点とし、マクロとミクロな世界を展開することで、それらが身近になるとともに、生物が1つのシステムとして機能していることがより理解しやすくなると考えている (図2)。

神経行動学では、分子から細胞、行動・生態に至るさまざまなレベルの現象を分析するが、常に個体の行動を起点とし、感覚入力から行動発現の背景として、それらの現象を捉えることとなる。

生物の体系化

生物のように複雑でそのしくみを一筋縄で説明できない対象には、分析 (アナリシス) によって得られた結果を統合 (シンセシスと

いう) すること, また同時に全体から常にその結果を見渡すことが重要となる。

要素の分析を積み重ねて全体を考えることをボトムアップ, そして全体からその内部に潜むしくみを推定することをトップダウンというが, このような両方向から生物をみる力をつけることが涵養である。つまり, 分子生物学は分子レベルの世界にとどまるのではなく, その先の細胞や個体までも念頭に入れ, 逆に生物個体を学ぶ時にも遺伝子のしくみをも考慮することが大切になる。

生命現象をいかに分子から個体へ, あるいは個体から分子へと階層間で関連づけながら体系的に学ぶことがポイントとなる。特に, 工学志向の学生にとっては, 第一原理からものごとを組み立てることに慣れており, 分析結果(知識)だけにとどまる生物は無機質なデータの蓄積にすぎなくなる。工学の基本は, 知識を統合することで, モノを作り, 意味を持たせることである。この手法は, 複雑な生物の理解にも有効である。

学際領域としての生物学

現在, 世界中で異分野融合が積極的に進められている。これは異分野を融合した学際的領域から, 科学技術の新しい開拓, すなわちイノベーションの創出が期待されるからである。現在の生物学は, 学際的領域のまさに中心に位置するものと言える。このような生物学の科学的な立ち位置を学生に伝え, それを認識させることは, 生物学の面白さと社会的重要性を伝えるうえで, さらに少し飛躍になるが, 日本の将来の科学技術イノベーションの創出を担う若い頭脳を育てるうえでも重要である。

現在の生物学が, 物理学や化学の世界と密接に関連した領域であることを伝え, それを体験させ, 考えさせる教育や教材を提供することが求められる。

生物を計ることの重要性

計測装置というのは, わたしたちが自前の感覚器だけでは感じ取れない信号を, ヒトの五感で感じることができるよう増幅や変換するものである。コウモリやイルカが発する超音波もわたしたちが聞き取れる20Hzから20,000Hzのレベルまで落としてしまえば, 彼らの会話や交信の様子を聞くことができる。高速度撮影装置を使って毎秒300コマで撮影すれば, ミツバチの時間の世界を垣間見ることもしよう。

神経や筋肉は電気信号によって活動する。それらは私たちの体の中で発生しているはずである。しかしそれを感じることはない。教科書では活動電位はイラストで波形として示されている。これを見た学生のうちどれだけの学生が, それがいっただいどういものであるかを理解できるのだろうか。生物の醍醐味は実体としてのモノがそこにあることであり, それに触れることができることである。計測装置があれば, 筋肉の電気活動でさえ見ることができる。実際に計測する機会がなければ, 生体をもつ電気は教科書に書かれた1つの画像としての知識にしかすぎなくなってしまう。生物を計ることにより生物はより身近に感じられるようになる。

終わりに

筆者が神経行動学を通して学んできたことから, 生物教育の一私見を述べた。筆者の一貫した考えは, 生物の醍醐味は実体としてのモノがそこにあることであり, それに触れることができることにつくる。

(1) 個体を起点としたシステムとしての生物, (2) 生物の体系化, (3) 学際領域としての生物学, (4) 生物を計ることの重要性, を再考することで, 知識としての「生物」から, より身近で体系的な「生物学」への転換が図られるものと思う。この転換は生物教育にも重要な示唆を与えるものと思う。