

## 昆虫の視覚情報と運動制御を知りロボットの世界に迫る

コーディネーター 巖佐 庸

昆虫の体は、飛翔するために随分コンパクトにできている。体だけではなく、体を動かす神経系や脳についてもそうである。

たとえばカマキリが餌を狙う場合にも、餌までの距離を測り、攻撃をする。飛翔する昆虫では、飛びながら高さを測ったり、地面にぶつからないように適切な距離を保ったりを正確に遂行せねばならない。ヒトなどの哺乳類や鳥類ならば、大きな脳に情報を集めてそこで計算をして、どう行動すべきかを決められる。しかし小さくてよく動く昆虫では、もっと簡単なメカニズムで素早く判断を下す必要がある。よく考えて組んだ実験を行うと、その原理が明らかになってくる。そのような研究の面白さを、著者の山脇兆史さんは自らの経験とともに魅力的に語ってくれる。

第1章では、昆虫の研究に至った経緯が書かれている。昆虫少年だったわけではなく、むしろコンピュータでプログラミングをするのが好きな子どもだったとのこと。生物をコンピュータで解明することに惹かれて大学院に進学したものの、最終的には動物行動学者に転身する。そしてカマキリの視覚の研究に取り組んで研究の面白さに開眼した。

第2章から第6章まで、昆虫の運動制御のさまざまな側面について述べ、著者自身の研究も含めながら、昆虫が小さな脳を用いて精妙な運動制御を行うことを、さまざまな面から明らかにする。第2章では、視線を一定に保つ視覚運動制御や、自らの姿勢を保つ補償

運動について説明する。ミツバチやハエの飛翔制御（高度や速度の維持機構）の例が紹介される。第3章では、目標に合わせて自らの動きを制御するという視覚定位を述べ、カマキリのサッカーや追従運動が詳しく説明される。ハナアブが雌を追いかけたり、ハンミョウが走っては止まったりを繰り返すこと、寄生バエがホストを追いかけたりすることなどのすべてが定位の例なのだ。第4章では、目標に合わせて自らの動きを制御する目標志向型運動を説明する。例として、コオロギのアンテナ定位運動、バッタの引っかき運動、カマキリの捕獲行動などを挙げる。第5章は、動くタイミングを決める仕組みということで、バッタの衝突回避、カマキリの防御行動などを紹介する。

第6章からは、より一般的な動物の運動に関する生物学で、筋肉や運動ニューロンが働く仕組み、関節や筋肉の弾性、慣性の法則、重力の影響について述べる。筋肉と神経細胞の基本を、哺乳類と昆虫とを対比させながら説明する。第7章においては、中枢神経における処理を説明する。鳥や哺乳類など他の動物での情報処理のあり方にも触れながら、昆虫での処理の特色を浮かび上がらせている。中枢で周期的なパターンにより歩行のリズムを作り出すとか、反射だとか、姿勢の維持のために頭部の動きを耳石で検出することなども説明する。

最後の第8章はロボット学への応用である。私には、この章が特に魅力的だ。ここ数年、自動車の自動運転とかが世界中で注目を浴びている。すごい情報処理が必要と思えるが、意外にも簡単な機構で制御が実現していることもある。

本書のあちこちで、山脇さんは現在の研究に辿りついた経緯について語っている。京都大学の大学院では、最初にDNAの配列をコンピュータで比較することによって進化を探る分子進化学グルー

プに所属した。しかしゲノムの塩基配列に向き合う日々には飽き足らず、動物行動学の研究室に移り、コンピュータスクリーンに視覚刺激を示す手法でカマキリの視覚情報処理に取り組んだ。今では、九州大学において教鞭をとりながら、昆虫の運動制御や視覚情報処理の理解に迫っている。

最初から〇〇の研究者になりたい（そこにはロボットとか、ゲノムとか、代数学とかが入る）、というふうにして、その希望の通りに進んだ人もいるかもしれないが、山脇さんのように試行錯誤しながら、生涯取り組む課題を見つけた人もいる。たぶん、最初から動物行動をと決めていた人以上に、のちの研究に役立つ技術や概念を身につけることができ、山脇さんの独自性、研究上の力になっていると思われる。

本書を生物学の書物として見た時には、3つの際立った特色がある。その第1は、取り上げている対象である。

ここ数十年間の動物行動の研究は、大きく2つの流儀に分かれる。1つは、行動の適応的意義を探るもので、行動生態学ともいわれる。野外での詳細な観察や操作実験によって観測される行動が、他の行動に比べて適応度を改善するものとの仮説を検証する。最適化やゲーム理論などに基づいた数理モデルをふんだんに用いる。他方は、行動の神経基盤を、さらには分子メカニズムを探るものであり、いわゆる神経脳科学といわれる分野である。

山脇さんの研究の中心はこれらのいずれでもなく、それらの中間を狙うものである。山脇さんは「アルゴリズム」を知りたいのだと表現している。それは問題を解くためのやり方のことである。

たとえば音が左から聞こえてくるか右から聞こえてくるかはどうして知ることができるだろう？ それには音が左右の耳に到達した時間のずれ、左右に到達する音の強さの違い、音の位相の違いなど

を使ったり、指向性のある感覚器で音源方向を特定したりもする。これらは同じ目的のための異なるアルゴリズムなのだ。視覚情報から対象までの距離を知ることにも、異なるやり方がある。基本的には両方の眼で見てそれらの画像のズレ具合、つまり両眼視差からわかる。しかし片眼だけでも、ピントを合わせるのにレンズの調整をするので少しはわかるはずだ。対象の大きさがわかっていると、見え方の大きさが距離に関する情報を与えてくれる。

実際には、体の大きさや動きの速さ、生息環境の障害物の多さなどによって効率的に使えるアルゴリズムが変わってくる。そのため、どのアルゴリズムを主として用いるかは種によって異なる。哺乳類ではたぶん、これらのアルゴリズムが複数同時に用いられているだろうが、昆虫ではその1つが強調されていて、研究するに都合がよい面もある。

アルゴリズムに対比されるものとしてハードウェアがあり、力を出す筋肉、情報処理をする神経や脳などを意味する。さらに追求すると、細胞の中での情報処理を担っている分子、記憶だとかシナプスの機能を担っている分子メカニズムもハードウェアの問題だ。アルゴリズムが具体的にどのような神経機構や分子メカニズムで実現しているかはさておき、どういう原理で目的を実現するかを考えたい、それこそが山脇さんの取り上げる研究対象なのだという。

第2の特色は、本書には、アルゴリズム、計算理論、シミュレーション、モデル、フィードフォワード、制御など、数理的、工学的な用語が随所に出てくることである。子どもの時に、両親からコンピュータを与えられたことが、自らの研究の一番大事なきっかけだったと述べる山脇さんは、もともと理論的研究への興味を強くもっていた。ホジキンとハックスレーが、実験の結果を神経細胞の数理モデルとしてまとめ、ノーベル医学生理学賞を受賞したという歴史

的成功体験のためかもしれないが、神経科学では数理的解析に対する期待が強い。しかし現時点の生命科学全体で見ると、それは決して一般的ではない。

第3に、ロボティクスへの応用がある。人間にしかできないと考えられてきた知的な作業や判断が、機械によって人間以上に遂行できることがここ数年で急速に注目されるようになった。人工知能がチェスの名人に勝ったとか、自動車が公道で自動運転することが現実的になってきたとか。第8章においては、昆虫の運動制御のアルゴリズムを応用した機械がいくつも紹介されている。たとえば歩行するロボットや、音源を探し当てるロボット、偏光で方位を知って通った経路の情報を正確に理解し巣に帰れるロボットなどもある。

20年ほど前のことだったが、私はベルリン高等研究所で1年を過ごした。数名の研究者がチームを組んで共同研究をするシステムになっており、私自身は性の進化の理論研究のグループを4名ほどで構成し、ゲノム刷り込みや配偶者選択について毎日議論をした。隣の部屋では、コンピュータビジョンのチームが集まっていた。画像解析の専門家、動物の機能を探るサイバネティクスの人、そしてミツバチの行動を研究してきたスリニバサンである。スリニバサンの研究は本書の第2章で詳しく紹介されている。ハチがトンネルを飛ぶ時に、左右の眼のオプティカルフローをバランスさせることで真ん中を飛んでいることについて、トンネル内のパターンを変えたり、ベルトコンベアで動かしたりすることで証明した。それが本当に面白くて、こんな分野の研究をしている人が日本の生物学者にもいるのだろうかと思った。帰国したら、私のオフィスの隣にある藤義博教授率いる動物生理学研究室が一番近い研究室だったことがわかって驚いたものである。

ベルリンの研究所で何より私が感銘を受けたのは、昆虫の視覚処理の専門家とロボット工学や人工知能の専門家が密に共同研究を進めて新しいことに取り組んでいたことだった。現在、自動車の自動運転や人工知能が具体化されつつある。工学は工学、生物学は生物学と、学問をタコソボ化するのではなく、違った分野の研究者が共同して新しいテーマに取り組むのはとても重要なことだ。

オブティカルフローを使って、地面や壁にぶつからないようにドローンや自動車を制御することはすでに実装されているようだ。これらの機械が動物のような神経系をもっているはずはないが、共通したアルゴリズムを使うことはできる。ここでも山脇さんのハードウェアとアルゴリズムとの区別は納得できる。

神経系や脳の生物学的理解は、心理学の基盤を理解し、人文科学や社会科学にも寄与することが期待される。今世紀の中頃には、人文社会科学から生命科学、そして物質科学や数理科学、さらにはロボティクスなどの工学に至る幅広い学問分野を、神経生物学が基盤になって統合する可能性さえあるといえよう。

過去数十年の生命科学においては、1つの分子を見つけることがその分野の理解を大きく前進させる経験をしてきた。分類学的には非常に遠い動物の間でも、初期発生を見ると、そこに出てくる重要な遺伝子を共有していることが多い。それらの動物は、同じ目的のために共通のアルゴリズムを用いており、さらにはそのアルゴリズムを実現する上で、同じ分子メカニズムを使用していたということになる。その場合、重要な遺伝子や鍵となるタンパク質を捉えることが全体を理解する上で最も重要だ。実際、私が学部生の頃には神秘的とも思えた発生現象や免疫生物学が、詳細にはまだ解明すべきことが残るにせよ、基本はよく理解できたと思えるまでになってきたのは、分子生物学の大成功を物語るものである。

それらに比べると神経科学には、基本的な事柄への理解に未だに困難が残っているようだ。もしかするとその理由の1つは、同じ目的のために複数のアルゴリズムが用いられているからなのかもしれない。もし同じ目的でいくつものアルゴリズムがあり、また1つのアルゴリズムが異なる分子メカニズムで実現されているとすれば、分子を捉えただけでは本質的な理解には至らないだろう。だとすると、まずはアルゴリズムを捉えることが神経系の生命現象の基本を理解する上で最も重要な道になる可能性がある。ひたすらカマキリ、ハンミョウの情報処理や、運動制御の方式を追いかける山脇さんのアプローチが、神経系や脳を理解する上で最も適切なものとなるのかもしれない。