



村瀬雅俊

〈京都大学基礎物理学研究所 606-01 京都市左京区北白川追分町〉

生命現象は、物質・エネルギー・情報の流れを伴った開放系における、一種の散逸構造として理解される。しかし同時に忘れてはならないことは、現存する生物システムが生命の誕生以来数十億年におよぶ進化過程を経た歴史的産物である、という事実である。どんなに些細に見える生命現象であっても、その生物学的意味を十分に吟味することが必要である。この点が、これまでの物理学・化学・工学等において行なわれてきた無生物システムにおける散逸構造の研究との大きな違いである。本稿の目的は、機械的に屈曲運動する真核生物の鞭毛・繊毛を、「機械」としてではなく「生き物」として捉えてモデル化することである。そのために特定の現象にだけ着目して、それを定量的に再現するモデルを模索することは行なわない。むしろ、様々な現象に秘められた真理をモデルの構築を通して追求し、その生物学的意味づけを行なうことが狙いである。

## 1. はじめに

オランダ人 Leeuwenhock は、原生動物が多数の細胞器官を使って泳ぎ回っているのを、顕微鏡下ではじめて観察した。今から 300 年以上前の、1675年のことである。<sup>1)</sup> この細胞器官が繊毛 (cilia) と呼ばれたのは、それから 100 年余り後のことである。さらに 100 年程経て、同じ細胞器官に対して鞭毛 (flagella) という用語も使われるようになった。現在では、細胞当たり存在する細胞器官の数とその運動機能の違いをもとに、二つの用語が区別して使われている。すなわち、多数の細胞器官が非対称的な屈曲運動をする場合には繊毛と呼ばれ、少数の細胞器官が対称的な屈曲運動をする場合には鞭毛と呼ばれている。ただ、このような区別はあくまで便宜的なものである。重要な点は、基本的には同じ構造を持ちながら、種によって多様な機能が見られるとともに、同一種が環境の変化に応じて多様な機能を示すことである。(大腸菌やサルモネラ菌などの細菌にも鞭毛がある。<sup>2)</sup> これら原核生物の鞭毛は、その根本にある回転モーターによって回転しているだけで、本稿で扱う真核生物の鞭毛・繊毛に見られるような屈曲運動は起こらない。もちろん構造においても、両者は全く異なる。)

ところで、魚やヤツメウナギのような多細胞生物においても、屈曲運動が見られる。この場合には、二つの自律系すなわち神経系(様々な神経細胞の集団)と運動系(異なる筋肉の組み合わせ)が、外部環境(運動系が働きかける場である流体の状態)の拘束のもとで相互に制御しあいながら、全体として統合された運動状態を示している。これに対して、鞭毛・繊毛には神経も筋肉も存在しない。その

かわりに、細胞器官そのものが自律的な運動機能を持っており、この細胞器官が環境と相互作用することによって、運動状態が出現するのである。このように多細胞生物と鞭毛・繊毛とでは、環境と相互作用する自律系が二つであるか一つであるかといった違いはある。しかし、どちらの場合も、トップダウン的な指令系によって運動が発現しているのではなく、ボトムアップ的に運動状態が自己組織化しているという共通な特徴がある。ここで、トップダウンとは、全体としての運動状態が念頭にあって、局所的な運動則を規定していくことを意味しており、逆にボトムアップとは、局所的な運動則だけを規定しておき、全体としての運動状態は環境との相互作用を通して自己組織化していくことを意味している。

このような視点は、モデルの設計に際して特に重要な意味を持つ。つまり、モデル設計者はモデルの局所的な運動則のみを与えるだけで、全体的に運動の自由度を制限するような制御機構を導入しないように心掛ける必要がある。そのように心掛けることにより、モデルにはいくつもの内部状態が可能となる。この多重な内部状態の存在を通して、私達は、同一環境下でも異なる振舞をする生物種の違い、あるいは、同一種が異なる環境に応じて示す運動機能の多様性を解釈することができる。そのために、個別な現象をばらばらに取り扱うのではなく、むしろ、多様性そのものに隠された基本原理を追求することが、鞭毛・繊毛という生物システムの理解につながると考えられる。本稿では、このような視点に立って、筆者らが行ってきた鞭毛・繊毛運動に関する理論的研究の成果を解説する。



