

細胞遊泳から始める「生き物」の力学



石本 健太

京都大学数理解析研究所
ishimoto@kurims.kyoto-u.ac.jp

物理学の観点から見た「生き物」らしさの要素のひとつとして「自ら運動すること」が挙げられる。地球上の生物の最小単位である細胞も、周囲の流体環境中を移動するために運動装置を備えている。我々ヒトを含む真核生物の場合には、**鞭毛・繊毛**と呼ばれる毛のような細胞小器官がその運動装置である。鞭毛・繊毛はミクロの分子機械であり生物物理学の中心的な研究対象である。化学エネルギーを運動に変換する装置である鞭毛・繊毛、あるいは細胞自身やその集団としての振る舞いはアクティブマター物理学の主要な系となっている。

これらマイクロメートルスケールの物体周りの流体は、低レイノルズ数の**ストークス流れ**でよく記述できる。ストークス方程式は線形の偏微分方程式であるが、生き物が自ら変形して移動するために、複雑な境界条件を有する。これこそ、生き物らしさが生み出す力学の新しい側面であり、面白さの源でもある。特に、慣性の無視できる低レイノルズ数流れにおいては、流体運動は瞬時の境界条件だけで定まる。それゆえ、流体中の生き物の運動も瞬時の「かたち」によって定まることになる。

その象徴的な例が、パーセルの帆立貝定理 (Purcell's scallop theorem) として知られる形状と時間反転の間にある対称性である。帆立貝の貝殻の開閉運動は、形状変化が行き帰りで時間の逆戻しのようにになっているが、このような往復運動 (reciprocal motion) と呼ばれる変形の場合には、行きの変形で得た変位が帰りの変形による変位と打ち消され、元の位置に戻ってしまう。帆立貝定理とは「慣性が無視できる状況では、生物は泳ぐために往復運動でない変形、つまり

非相反 (non-reciprocal) な変形をする必要がある」ことを主張している。

このように、形状変化を指定したときに実際にどのように流体中を泳ぐのか、という問題を運動学的遊泳問題という。しかし、実際の生物は形状変化を制御しているわけではなく、内部の駆動力を制御しているに過ぎない。鞭毛や繊毛の場合には、内部の分子モーターによって変形が駆動され、鞭毛自身の弾性力と周囲の流体からの流体力の釣り合いとして形状が定まっている。このような場合には、物体の柔らかさと流体との相互作用が本質的となり、力学の文脈では、流体構造連成問題と呼ばれる。鞭毛の分子モーターは、その付け根部分だけで駆動されているのではなく、鞭毛全体にわたって内部から駆動されているが、簡単な力学モデルからもそのことが理解できる。

近年、内部の駆動力によって自発的に変形するこのような弾性体を、非相反性を持つ非平衡物質として記述する試みが盛んになっている。これは、ニュートンの第3法則を破る力学が有効理論として成立することを意味している。実際、弾性の相反性の破れである「**奇弾性 (odd elasticity)**」を導入することで、物体は自ら流体中で非相反な変形を行うようになり、これにより帆立貝定理の制限から逃れて遊泳が可能になる。物体の非相反性は、外部環境に対して実行的な仕事を行うという「生き物」らしい能力のひとつを表している。生物物理学の古典的な対象である鞭毛運動は、連続体力学 (流体力学・弾性力学) の新たな展開を生み出し、今なお非平衡系のフロンティアであり続けている。

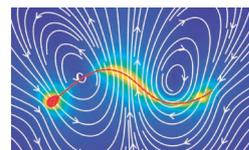
用語解説

鞭毛・繊毛：

真核生物に見られる、太さ $0.2 \mu\text{m}$ 程度、長さが数 μm から数十 μm の細長い紐状の細胞器官のこと。慣習的に、1本から数本が独立して存在している場合には鞭毛、無数に生えている場合には繊毛と呼ばれるが、基本的な構造は同じである。真正細菌 (バクテリア) の鞭毛 (区別のため「べん毛」と平仮名表記されることも多い) とは構造が異なる。そのため、近年は真核生物の鞭毛・繊毛の表記を繊毛に統一しようとする動きがある。

ストークス流れ：

非圧縮ニュートン流体の運動方程式であるナビエ-ストークス方程式に現れる慣性項を無視した方程式をストークス方程式という。粘性項と圧力項の釣り合いの式になっている。



遊泳するヒト精子の鞭毛とその周りのストークス流れの様子。流線を白の矢印で、速度の大きさを色の明るさで表している。精子自体は赤色で示した。

奇弾性：

通常の弾性体では、変位場のポテンシャルから弾性力が決まる。生物系やアクティブな系、あるいは外部駆動がある場合など、ポテンシャルとして記述できない力を記述するために拡張された弾性係数を持つ物体のこと。弾性係数の非対称成分として表現される。