

「生き物」の力学

石本 健太

以下は連載「ジオラマ行動力学」2として出版された文章の著者原稿版です

「UP」(2024年6月号) Vol. 620 (2024) pp.20-26 (東京大学出版会)

ニュートンが万有引力を発見したとされるのが今から約350年前のことです。当時ロンドンではペストが流行しており、ケンブリッジにいたニュートンも故郷に帰省していたそうです。その創造的休暇とよばれる3年間で、ニュートンの微積分学と力学のアイデアを生み出したと伝えられています。コロナパンデミックの最中に始まった我々の学術変革領域A「ジオラマ行動力学」では、単細胞生物の原生知能を記述する新たな「生き物」の力学を見つけようとしています。ニュートンの頃とは異なり、ネット会議も可能になったこの時代、月に一度の領域運営会議(通称:幹事会)のあと、おなじみとなったのがオンライン呑み会であり、私の毎月の楽しみのひとつでもあります。最近の研究の進捗や他分野の考え方を学んだり、原生知能やジオラマ環境、行動力学といった領域の掲げる新しい概念をみんなで深めるべく、ときに真剣に、ときに心に任せて議論しています。そんな自由気ままな議論の中で、少しずつ自分の中で芽生えてきた生き物の賢さを記述する力学体系のおぼろげな影を、ここで自分なりにまとめて、みなさんと共有できればと思います。

生物流体力学との出会い

子供の頃、特に生物学に強い関心を持った記憶はありませんが、さまざまな物質(化合物)が有機物と無機物に分類されていることに、そして前者の有機物がかつては生命力が宿っている物質だとされていたという話は、中学校の理科の授業のなかでも、なんとなく印象に残っています。炭素の代わりに、同じく4本の共有結合が可能なケイ素で生命は出来なかったのだろうか、そんな研究をしてみたい、と考えながら、化学を専攻しようと京大理学部に入りました。いざ大学に入ってみると、学問の世界の大きさに圧倒され、のらりくらりと周りの級友に流されて学部は物理学(量子物性論)を専攻しました。4回生の夏前、そろそろ身の振り方を真剣に考えなければならないと、京都の鴨川でひとり佇んでいた時のことです。ふと眼前に広がる風や水、雲の流れの脅威的なまでの複雑さと豊かさに、日常スケールのマクロな現象が驚きと不思議に溢れていることに気づきました。細胞スケールから地球宇宙スケールまで、流れるものを普遍的に記述するマクロな理論体系である流体力学を学び、より深く自然を理解できるようになりたいと、大学院進学を決意したのでした。

流体力学はその対象が水であろうが空気であろうが、その内部の分子の相互作用に立ち入らず、マクロの変数で閉じた理論体系を持つ古典力学の一分野です。分子や原子の性質は粘性係数や密度といった物質定数に反映されていますが、流速場と圧力場で閉じた時間

発展方程式としてその運動を記述します。流体力学の基礎方程式であるナビエーストークス方程式は、電子が発見される前に導かれ（1850 年ごろ）、今では人類史上最も成功した数理モデルの一つとして、自動車や航空機の設計から気象予測に至るまで、私たちの社会をさまざまな角度から支えています。

意気揚々と大学院に入ったもののなかなか研究テーマが決まらず、悶々としていた大学院修士 1 年の 6 月頃、指導教員の山田道夫先生から生物流体力学という研究分野があることを教えてもらいました。水中をしなやかに泳ぐ魚の動きや空気中を巧みに移動する昆虫や鳥の動きを調べる際には、その周りの水や空気の運動を記述する流体力学が必要となります。流体力学を極めることができれば、生き物の動きを深く理解することができるでしょうし、例えば、そこからより良い乗り物や輸送機構を見出そうとする研究アプローチは、素朴ながらもとても新鮮に映りました。生物由来の流れの問題は、そうでない非生物の流れの問題と何が異なっているのでしょうか。ひとつには、生き物特有の複雑な形状があります。流れが複雑になり、数値シミュレーション無しには解析が極めて困難になります。しかし、それだけではありません、生物らしさの一つに「自ら変形し動くこと」があります。私たちが走ったり泳いだりするときも、手や足を動かして外部の流体環境に働きかけています。

古典力学（連続体力学）における物質（matter）とは、質量密度と呼ばれる正の量を有する空間内の領域（で体積を持つ）と定義されます。そして、その運動は質量と運動量の保存則を満たすという公理のもと支配方程式が得られます。ただ、これだけでは、その物体が流体なのか、ゴムのように流れずにも元の形状に戻る弾性体なのか、はたまたそのどちらでもない物体なのか、を記述することはできません。物体の変形に対する応答の仕方を表す関係式を構成方程式といいます。その物体が流体なのか弾性体なのか、流体だとして、どんな性質の流体なのか、を定める式のことです。ある意味、生命らしさを徹底的に排除することで、ルネサンス期の自然科学は、物質の機械的な運動の仕組みを理解することに成功し、ついには運動の法則にまで到達しました。さて、マクロで閉じた力学体系で生き物（living matter）の運動はどのようにすれば数理的に記述できるのでしょうか？ そもそも、生き物らしさを力学の枠組みに取り込むことはできるのでしょうか？

微生物流体力学と帆立貝定理

生物流体力学を数理解析する、という魅力的な響きに、すっかりその気になったものの、具体的にどのような問題に取り組めば良いのか、当時修士 1 年だった私には皆目見当もつきませんでした。ナビエーストークス方程式は非線形の偏微分方程式で、その数学的な性質の証明には 100 万ドルの懸賞金が掛かっているような超のつく難問を含んでいます。数値シミュレーションの経験も薄かった私は、ナビエーストークス方程式を線形化したストークス方程式であれば、なんとか手が届きそうに感じました。ストークス方程式は、粘性効果の強い流れをよく記述する流れの式で、生物であれば、裸眼では見えないような小さな微生物が住む世界の流体方程式です。

この場合、生き物らしさは、流体力学の境界条件として理論的に取り入れることができます。生き物の形は、周りに流体がないとした仮想的な環境で定義します。その変形体

は、流体中では力を受けて瞬時の速度と回転角速度が生じます。これによって微生物は流体中を泳げるわけです。ここでは、生物は各時刻で形状は異なるものの運動の自由度は剛体（変形しない物体）と等しくなっています。ストークス流れが実現する状況では物体の慣性はなくなっており、流体中の物体の構成方程式に依存しない、流体側で閉じた理論体系になっているのです。ストークス方程式は時間反転対称性をもつ線形の偏微分方程式であり、この数学的な構造に起因する、強い力学的な制限が生物運動に加わります。パーセルの帆立貝定理（scallop theorem）として知られている事実です。帆立貝の貝の開閉運動のような、行きと帰りの形状変化がピッタリ逆戻りになっている変形（相反的な変形）をすると、その変形の1周期で生物の位置は向きも含めてピッタリ元に戻ってしまい、どこにも泳いで行くことができない、というものです。クラミドモナスの平泳ぎも、精子鞭毛の波状変形も、ゾウリムシのシンクロした集団的な鞭毛パターンであるメタクロナル波も、帆立貝定理から逃れるように微生物が生み出した遊泳方法と言えます。この帆立貝定理の面白さは、生き物側の物質構成にかかわらず、その周囲にある流体側の方程式の対称性による点です。微生物の誕生よりも水の方が先に地球上にあったわけで、原生生物の不思議で多様な形や動きも、力学の法則から逃れることはできません。

微生物の環境連成力学

次に生き物の構造を力学に取り入れてみます。例えば、鞭毛や繊毛といった原生生物の運動器官は細長いムチのような棒状の物体ですから、力を加えると曲がり、力を取り除くとまっすぐに戻るような弾性棒として構成方程式を立てることができそうです。実際そうすることで、流体の方程式と同様に、質量と運動量の保存則から、弾性棒の運動方程式を導くことができます。ここでは、生き物らしさである自発的な変形は内部駆動力として取り入れることが多いです。実は、これも周りに流体がないとした仮想的な環境で生き物の変形を定義することと同じことになっています。この理論的アイデアの背景には、成長する物体の力学理論があります。生き物の流体中の自己変形と同様に、生き物の形態形成（発生生物学）の文脈で定式化が行われました。例えば、植物の茎は、鞭毛と同様細長い棒として記述できそうですが、その棒は日々成長し、長さや質量が変化しています。ここでは、流体力学や弾性体力学の公理とされてきた質量の保存則はもはや成り立たなくなります。分子レベルでは当然、化学反応の過程で質量保存則は成り立っていますが、マクロの力学変数で記述しようとする、実効的に破れてしまいます。

波状変形をする鞭毛運動も、マクロ変数だけで閉じた力学記述を行うと、ニュートンの第3法則（作用反作用の法則）を実効的に破ることになります。鞭毛波形を生み出す内部駆動力は、数式上は外部から加える力と区別することはできません。細胞に内在する性質としてその駆動力を記述する方法は無いのでしょうか？ そのアイデアの一つが奇弾性（odd elasticity）と呼ばれるアクティブな物質を表現する新しい概念です。例えば横1列に繋がった無数のバネの系を考えてみます。ある場所でのバネの長さを変化（すなわち形を変化）させると、それに応じた力が発生し、横につながった左右のバネに伝わっていきます。鞭毛の場合には、内部の分子モーターが力を加えて波を前方から後方へ伝えるわけですが、これをバネの系に当てはめると、バネの変形は片側だけに伝わることに対応します

が、通常のパネではこのようなことは起こりません。しかし、自己変形する生物の場合には波が一方方向だけに伝わるという対称性の破れも可能で、実際これは内部駆動力による非相反な相互作用に起因しています。パネの間の相互作用に注目すると、ある場所を押したら逆向きに押し返してくるのではなく、むしろ逃げるような相互作用になっており、この意味で作用反作用の法則も破れています。この非相反性を表現する指標が奇弾性と言えるでしょう。帆立貝定理の制限から生物は非相反な変形をする必要があり、そのため生物には奇弾性が備わっているという見方も自然です。最近、鞭毛に内在する奇弾性を実際に定量化できるようになってきました。その力学的な意味や、生物学的な意味について、現在さらに研究を進めているところです。

このように、成長や自己変形といった生き物らしさをマクロの力学法則に取り込もうとすると、質量保存則や運動量保存則といった金科玉条の法則を拡張していく必要性が生じます。

生き物の中に飛び込む

生き物の環境適応的な行動を記述する力学を目指すのであれば、さらに細胞内で起こる無数の複雑な化学反応ネットワークの結果を、マクロの状態変数で記述する必要があります。これを仮に内部状態変数と呼ぶことにしましょう。当然、この変数が外部環境に応じて変化します。例えばホヤ精子であれば、卵から放出される化学物質を感知して、方向転換をする走化性が知られています。外部の卵子吸引物質の濃度によって細胞内部のカルシウムイオン濃度が上昇し、波形が変化します。この場合、内部状態変数としてカルシウムイオン濃度をとり、それによって変形が決まる（奇弾性係数が決まる）という見方が良さそうです。クラミドナスのような微細藻類の走光性であれば、内部変数として光受容体の状態が使えそうです。この場合、環境の変数は光源に対する向きで決まるので、内部状態としては、細胞の慣性座標系での向きを取れば良いでしょう。内部状態によって、左右の鞭毛の運動が決まっているとすれば、マクロの変数で閉じた方程式系でモデル化することができます。

内部状態変数に何を取れば良いか、環境からの入力と出力の関係はどうなっているのか。この2つが細胞の原生知能を炙り出すために必要になります。ジオラマ行動力学では、この2つをマクロの変数でつないだ関係式を行動力学方程式と呼びます。そして、この行動力学方程式の定式化には、細胞内で幾重にも重なって存在する環境応答の仕組みが鍵となります。そのために、環境側がある程度の複雑性を持っていること、そして、同時にこれを人間側でコントロールする必要があります。それこそが「ジオラマ」の言葉の意図だと、遅ればせながら理解し始めました。どこまで生き物の中に踏み込めるのか、原生知能に近づけるか、私自身とても楽しみにしています。

(いしもと・けんた 応用数学・流体力学・数理生物学)