

Maxwell のデモンと生体 生活工学のための熱力学序論 IX Maxwell Demon and Living System

Introduction to Thermodynamics for Human Environmental Engineering IX

妹尾 学

Manabu SENO

(東京大学名誉教授)

1. Maxwell のデモン

近代科学の原点となった“プリンキピア” (1681 年) の第 2 編物体の運動について、第 5 章流体の密度と圧力についてにおいて、Newton は次のように書いている。

“多くの微小部分からなる流体密度が圧力に比例するならば、各微小部分間に働く反発力はそれらの中心間の距離に逆比例する。” (命題 23・定理 18)

この記述はボイルの法則に基礎をおくものであるが、次のように注釈している。

“流体が実際に相互に反発する微小部分からなるかどうかは、物理学の問題である。私はこの問題を扱うためのきっかけを哲学者に提供するため、このような流体の性質を数学的に示したのである。”

この問題はその後もずっと Newton の頭であり、“光学” (1721 年) では次のように述べている。まず“問い 28”で、光は流体媒質によって伝播される圧力もしくは運動であるという伝説は誤りではないかという疑問を述べ、

“このような媒質を破棄するについては、我々はギリシャやフェニキアの最も古い最も有名な哲学者たちの典拠をもっている。彼らは真空と原子、そして原子に働く重力をその哲学の第一原理とした。ところが後代の哲学者達はこのような原因の考察を自然哲学から追放し、すべてを機械的に説明する仮説を捏造し、他の諸原因を形而上学に委ねてしまった。しかし、自然哲学の主要な任務は、仮説を捏造することなく、まず現象から議論を進め、ついで諸結果から諸原因を演繹し、遂にはまさしく機械的でない真の第一原因に到達することにある。”

と論じ、続く“問い 31”で次のように述べる。“物質の微小粒子にはある能力、効能もしくは力があり、それによってある距離を隔てて光の束に作用して、それを反射、屈折、回折させるばかりでなく、物質粒子同士も互いに作用し合って、自然現象の大部分を生じるのではないか。”

気体は最も単純な構造を持つと考えられ、その構造をイメージするのに最も適していた。Newton は、気体はその構成原子が互いの反発力によって積み重なっている構造を持つと考えていたようである。これはいわば静的モデルに近い。運動の原因となる力に強い関心をもっていただけであろう。

これに対し D. Bernoulli は“流体力学” (1738 年) を著し、容器の中で気体の粒子が飛びまわるというイメージを描いた。いわば動的モデルである。粒子間の力はほとんど無視され、気体粒子はニュートンの運動方程式に従って運動し、容器の壁との衝突によって生じる力が圧力と解釈された。また、J. Herapath (1821 年) はほとんど独学で、気体粒子の運動モデルに基づいて圧力と体積の関係を見出し、J. J. Waterston (1845 年) は自由行路の概念を含む考察を進めたが、これらの散発的な研究は学界の注目をひくことはなかった。現在、気体分子運動論とよばれるこの分野での体系的な研究は、1856 年 Kronig や Clausius の活躍で始まる。彼らは Bernoulli の方法に従って気体の圧力を定式化し、また気体のエネルギーは気体分子の運動エネルギーの総和で与えられるとし、更に理想気体の状態式を援用して温度と運動の激しさ(速度)との関係を論じた。

Bernoulli は気体分子はすべて同じ速さで直進運動すると考えたが、J. C. Maxwell

(1859年)はこの不自然さを正し、分子速度にある分布を想定した。この分布は後に L. Boltzmann (1868年)によって理論化されたので、現在 Maxwell - Boltzmann の分布とよばれている。実は Clausius もこの点に気づき、気体分子は種々の速度をとりうると考えたが、その分布を知ることはできず、ただ平均値をとることで満足した。Maxwell は次のように考えた。気体分子は相互に衝突を繰り返すので、最終的にはその温度での最も可能性の高い速さを中心にしたある定常分布に達するのであろう。この定常分布はランダムな確率分布の形をとるはずだ。こうして速度の2乗の指数関数で与えられる分布則に到達した。

この結果は当時あまり注目されることはなかったが、物理学にはじめて確率の概念、そして統計的法則を導入したという点で、重要な意味を持っている。それまで力学は決定論的な厳密さを持ち、個々の物体の運動を正確に記述すると考えられてきたのである。しかし、極めて多数の粒子からなる系の運動を問題とするとき、もはやすべての粒子に対して厳密な計算を行うことは事実上不可能となる。それを救うために、統計的な方法が採用され、個々の粒子の運動はただ確率論的に把握されるようになった。これは当初あくまで暫定的で、操作上の問題と考えられた。しかし、時が経つとともに単に操作上とのみ言い切れない、認識上の問題をはらむことに気付いてきた。このことは Boltzmann によるエントロピーの力学的解釈 (1877年)において、より重要な深刻な問題となってくる。ここではこれ以上この問題に立ち入らないが、気体分子運動論は Maxwell によって確固とした理論的基礎をもつことができたのである。

J. C. Maxwell は 1831年6月13日、エディンバラで生まれ、ケンブリッジで学び、1856年アバディーン大学の自然科学教授、1860年ロンドンのキングスカレッジ教授となったが、1865年病のため辞職、数年間所領地のグレインシャーで静養したが、ここでそれまでの研究の成果を“Theory of heat” (1870) および“Treatise on electricity and magnetism”

(1873)にまとめ公にした。1874年ケンブリッジ大学の実験物理学教授に就任し、キャベンディッシュ研究所の設立に関わり、後に所長となったが1879年11月6日に没した。

“Theory of heat”の中で、彼は W. Thomson の熱力学第二法則に関わる宇宙の熱的死の議論に対抗するような形で次のように論じた。“非常に微小な想像上の生きもの”がいると考えて、

“その生きものは非常に俊敏な能力をもち、分子1個の動きを捉えることができる。今、次のように想像してみよう。ある容器があり、小さな隙間をもつ間仕切りによって A, B 2つの部分に分けられている。そしてこの生きものは間仕切りについて、分子の速度を見分け、早い分子を A から B へ、遅い分子を B から A へ行かせるように隙間を開閉する。このようにして、この生きものは熱力学的第二法則に反して、特に仕事をすることなく B の温度を上げ、A の温度を下げるができる。”

これによってエントロピーは減少し、無秩序から秩序がつけられる。Thomson はこの生きものに対して Maxwell のデモンというあだ名を与えた。このパラドックスは活発な論議をよび、歓迎されたり笑いものにされたりしたが、誰もその息の根を止めることができないうまま、かなり長い間生き続けることができた。

1921年になって、M. Smoluchowski はランダムな分子の運動はそれと熱平衡にあるデモンにめまいを起こさせるはずだと論じ、1929年 L. Szilard は、分子の速度を知るためにはまず分子を見なければならず、そのためにはある量の仕事消費され熱となり、エントロピーの増大が起こる。これを含めれば、デモンを含む系全体としてはエントロピーが減少することはないと論じた。

このようにして Maxwell のデモンはとり敢えずその正体をあばかれたのであるが、熱力学第二法則に関わる論議はそれ以降も後を絶たない。Szilard の議論はエントロピーと情報との関係を示唆するものであり、情報を含めてのいわゆる知的な系での第二法則の意味について議論が進められている。一方、

生体にひそむデモニックな要素についての思いも完全には絶たれておらず、生きものの本質の理解のためになおこの問題への追及が必要だという考えもある。この問題について後に改めてふれる。

2. 原子論の系譜

原子の概念は遠くギリシャに淵源をもつという。哲学の祖といわれるイオニアのタレス (640 ~ 546 B. C.) は万物の根源は水と考えたのに対し、アナクシメネス (585 ~ 525 B. C.) はそれは空気だといひ、ヘラクレイトス (535 ~ 475 B. C.) は火のようなものだった。そしてエンペドクレス (495 ~ 435 B. C.) になって万物の根源として、地、水、気、火の4元素を考えた。当然行きつく多元論である。

一方、デモクリトス (460 ~ 370 B. C.) は原子説を唱えた。これはなにものも無から生まれず、無に帰ることもないという観察から生まれたもので、どんなものも細かくしていくとそれ以上分解できないアトム (原子) に達するという思想である。これはいわば普遍性を求める一元論の立場である。多元論から一元論への進展はある意味で化学から物理学への思想の流れを思わせるもので、我々はもう一度このような流れに出会うことになる。

アトムの存在を考える以上、そのまわりの空虚を認めざるを得ない。アリストテレス (384 ~ 322 B. C.) は“自然は空虚を嫌う”という事実から、空虚したがってアトムの存在を否定した。アリストテレスの権威によって原子説は勢いをそがれた。

しかし、エピクロス (341 ~ 270 B. C.) は原子説の立場に立って思索を深め、その学派はヘレニズムの時代を生き抜く。ローマの時代になってルクレティウス (99 B. C. ~ 55頃) は原子論の立場から長編の叙事詩“物の本質について”をうたいあげた²⁾。これは今読んでも面白い。勿論、科学の本とは到底いえないが、もし物が原子からできているならば、どのようなことが起き、また自然の現象をどのように説明できるか、つぶさに述べている。ただこのように考えていくと、あらゆること

があらかじめ定められたようにただ機械的に起こっていき、偶然がでる場がない。この点を考慮してか、ルクレティウスは次のように言う。

“原子は自身の有する重量により空間を下方に向かって一直線に進むが、その進んでいくときに、全く不定なときに、また不定な位置で進路を少しそれ、運動に変化をもたらすといえるぐらいのそれ方をする。もし原子が斜に進路をそれがちだということがなければ、すべて原子は雨滴のようにただ真下へ落ちていくばかりで、互いにお互い合うこともなく、自然は決してなにも生み出すことはなかったであろう。”

この原子の斜傾運動はエピクロスにはなく、ルクレティウスが考え出したものであるといわれる。若きマルクスがこの問題を取上げ詳細に論じたのは、有名な挿話である。

近代に入って、原子論は J. Dalton (1803年) によって復活した。それより前 1789年に A. L. Lavoisier は“化学要論”を著し、物質の基本的要素として化学元素の概念を確立した。後に、化学革命の年とよばれる。化学反応の前後で全質量は不変であること (質量保存の法則, Lavoisier, 1774年) が確かめられ、化合物はそれを構成する元素が一定の質量比で結合した物であること (定比例の法則, Proust, 1799年) も明らかになり、これらの結果を説明するものとして、J. Dalton はそれぞれの元素に対応する原子があり、それぞれ固有の質量をもつという化学的原子論を提唱した。そして化学反応の前後の関与する元素の質量の測定から、各化学原子の質量の相対値が定められた。

また、気体反応の法則 (Gay - Lussac, 1808年) に基づいて、A. Avogadro は窒素や酸素を作る粒子はそれぞれの原子が2つ結合した分子であることを提唱した。この説は長い間普及しなかったが、1858年、S. Cannizzaro の努力によって広く認められるようになった。そして数多くの、特に有機化合物の分子の原子組成が明らかにされ、1865年には F. A. Kekule によってベンゼン分子の原子構造が提出されるなど、化学を学ぶ者にとってよく知られた歴史が続いた。

これらの努力によって、19世紀末には少なくとも化学の分野では原子・分子の概念は十分に定着し、この概念に基づいて物質の構造や化学反応の仕組みが論じられるようになった。同時に物理の分野でも、既に述べたように Clausius や Maxwell によって基礎づけられた気体分子運動論は、気体の粘性なども十分に説明し、分子の平均速度、平均自由行程ばかりでなく、分子の数（アボガドロ数）も評価できるようになった。さらに Boltzmann によって熱力学第二法則の解明が進められ、1877年にはエントロピーの確率論的解釈として知られるボルツマンの公式に到達したのである。

しかしここで難問が待ちかまえていた。化学そして気体分子運動論における赫々たる成果にも拘わらず、その基本となる原子、分子の存在はなお想像上の仮定にすぎず、それらの存在は確証されていないというのである。当時、化学は自然科学の中でも最も先端的であり、染料や医薬品、そして種々の産業資材を提供するなど、応用面でも非常に重要な地位を占めており、その化学の体系化によって原子・分子の概念は不可欠のものであった。この概念を使わずに、化学当量で通す方法があったが、多くの元素について化学当量はただ一つに定まらず、体系化は非常に複雑になり、見通しのよいスキームを得るのは困難であった。

反対派の旗手 E. Mach は次のように言っている³⁾。

“近年の原子論は、物体を絶対永続的なものとみなした段階と同様、実態概念を極めて素朴かつ未熟な形のままで物理学上の基本的描像に仕立て上げようとする一つの試みである。その発見法上および教育上の意義はその具象性にあり、学校教師を職とした Dalton が古い原子論に再び生気を与えたという事実は、いかにももつともである。しかし、原子論はその稚拙かつ冗漫な副次的描像ともども、現代物理がこれまで成し遂げてきた哲学面での発達とは奇妙に対立している。真の事実を表す本質的な概念上の核心を原子論からえぐり出し、副次的な描像をはぎとることは必ずや可能

になるであろう。”

当時の状況からみて、化学の分野では原子・分子の存在はなかば自明の理であった。しかし、原子はなお想像上のものに過ぎないという反駁に抗する証拠はなかった。科学は確実な客観的証拠をもつ事実の上に組み立てられなければならないという確信がある以上、原子が客観的実在であるという具体的な証拠がどうしても必要だったのである。

3. Perrin とブラウン運動

この難問を解決したのが J. B. Perrin であった。“物質の不連続的構造に関する研究、とくに沈降平衡に関する発見”と題される業績によって、彼は1926年ノーベル物理学賞を受けた。彼の業績の詳細については他にゆずるが⁴⁾、その骨子は、半径数百 nm のよく揃ったコロイド粒子を調製し、まずその沈降平衡を測定し、次にブラウン運動を観測し、その結果が Einstein の理論式に精確に従うことを示し、さらにこれらの結果から十分妥当と思われるアボガドロ定数を求めたことである。

Perrin の実験的研究は1906～9年パリ大学で行われ、その結果は1909年“ブラウン運動と分子の実在性”と題して報告された。試料として植物性樹脂のガンボージと乳香が選ばれ、粒径の揃った球形粒子が調製された。まず、これらの試料粒子の水中での沈降平衡を顕微鏡下で直接測定することを試みた。試料の乳濁液の1滴を深さ0.1 mmの平らな角型セルに入れ、カバーガラスでおおう。十分静置した後、顕微鏡下で粒子数を数える。高倍率の対物レンズの視野は非常に浅いので、深さを変えて粒子数を数えることができた。たとえば半径212 nmのガンボージ粒子で、深さ5, 35, 65, 90 μmの水平面にある粒子数は100, 47, 22.6, 12の比率であった。

大気圧と高さの関係は以前から知られており、圧力比は分子の数密度 n の比に等しいとおいて、

$$\ln \frac{n}{n_0} = -\frac{mgNA}{RT}h \quad (1)$$

となる。ここで、 m 分子の質量、 h 基準点（ここで $n = n_0$ ）からの高さ、 T 温度、 g 重

力加速度, N_A アボガドロ定数, R 気体定数である. これから圧力したがって数密度が半減する高さ $h_{1/2}$ は

$$h_{1/2} = \frac{RT}{gM} \ln 2 = \frac{176}{M} \quad [\text{km}] \quad (2)$$

となる. ここで $M = mN_A$ は分子量である. $h_{1/2}$ は H_2 気体で 88 km, N_2 気体で 6.3 km となり大気の場合とよく一致する. Perrin はこの関係が試料のコロイド粒子に対しても成り立つと考えた. 事実, 測定結果は浮力を補正すればこの関係をよく満たし, これからアボガドロ定数 N_A は $6.82 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ と求められた.

次に同じ試料粒子を用いてブラウン運動を観測した. ブラウン運動は, 1827年 R. Brown が水に浮かぶ花粉粒子が活発にでたらめに動きまわるのを見出したことに始まり, 数々の詮索の結果, マクロな粒子が周囲のミクロな溶媒分子の無秩序な分子運動による衝突をうけて, 全く不規則に運動するのではないかと考えられるようになった. この考えを理論的に検討し定式化したのが, 1905年の A. Einstein の論文である. いつまでも止まることのないランダムな熱運動をする溶媒分子の大海の中にもまれるマクロな粒子の運動は, P. Langevin (1908年) が定式化した形を借りれば,

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -\zeta \frac{dx}{dt} + f(t) \quad (3)$$

で表される. 右辺第1項は粘性抵抗力, 第2項は不規則な力, 揺動力を表す.

実際にブラウン運動を観測すると, ブラウン粒子のみかけの平均速度は 10^{-6} m/s の程度で, 熱平衡にある溶媒分子の熱運動の速度に比べて圧倒的に小さい. これは, 粒子の運動は速さ・方向ともにいつも急激に変化するため, 観測の時間間隔をいくら短くとっても真の速度は求められない. この状況は Einstein の理論の背景とよく合致する. Einstein は統計的な考察から, ブラウン運動による粒子の変位の平均二乗 $\overline{x^2}$ が次式で与えられることを示した⁵⁾.

$$\overline{x^2} = \frac{RT}{3\pi\eta a N_A} t \quad (4)$$

ここで a は粒子の半径, η は溶媒の粘性率である. ある点を出発点として時間 t 経過後の位置を記録し, 変位 x を求める. 多数の測定値の平均二乗 $\overline{x^2}$ を求めると, これは時間 t に比例することが確かめられた. その係数から上式によってアボガドロ定数 $N_A = 6.95 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ が求められた. 粒径をいろいろ変えた試料についての値もほぼ一致し, 最確値として $N_A = 6.85 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ が得られた. この値は前述の沈降平衡から求めた値とも非常によく一致する.

Perrin の実験は顕微鏡下であるが, 直接目で見た結果に基づいている. 原子を直接見ることはできなかったが, 沈降平衡の結果は, マクロな粒子と同じように大気の底に沈降する気体分子の様子を明らかに想像させるし, ブラウン運動の結果は, 溶媒分子のランダムな熱運動の結果としての粒子の変位を, 直接目で見ていることを示している.

“それ故, 分子の客観的実在性を否定することは困難になった. 同時に分子運動は我々にとって見られるものとなった. ブラウン運動は分子運動の忠実な映像にほかならない.”⁶⁾

物理学は深淵な思想に基づくものと思われがちであるが, 実際には直接我々の感覚によって確かめられた事実を基礎として作られた合理的な体系であることを, この例はよく示しているようである.

4. 筋収縮のメカニズム

ここで話は現代に飛ぶ. 前回VIIIで生体でのエネルギー変換の例として筋肉の運動を取り上げ, これが ATP の化学エネルギーにより駆動されることを述べた⁷⁾. 筋肉の収縮はアクチンフィラメントの上を動くミオシン分子のすべり運動で起こる. この運動の仕組みを知るためには, まずその運動の詳細をつぶさに観測しなければならない.

原子・分子を直接観察する手段として電子

顕微鏡があるが、真空中での観察という限界がある。1980年代に開発されたSTM（走査型トンネル顕微鏡）は表面にある原子を大気中や液体中でも観測できる画期的な手段であり、原子操作も可能であり、ナノテクノロジーの基幹的なデバイスとして利用されている。一方、生体分子の機能観察には、長い歴史をもつ光学顕微鏡がなお有力な手段となっている。その分解能から見て原子、分子を直接識別することはできないが、試料を蛍光色素でラベルすることによってその挙動を観察する手法は、生体分子の働きを広い視野の下で見るのに適している。たとえば、ファロイジンなどの蛍光色素でラベルしたアクチン分子を蛍光顕微鏡でみると、ブラウン運動で揺れ動くアクチンフィラメントがみえる。またカバーガラスの表面にミオシンを一様に吸着させ、この上に蛍光ラベルしたアクチンフィラメントを乗せると、静止した像がみられるが、これにATPを加えると、一方向に進む滑り運動を起こすことが観察される。

詳細な運動の機作をみるために、アクチンフィラメント1本の動きを見る必要があるが、1分子イメージングは通常の光源では背景光が強すぎて難しい。そこでしみ出す光とでもいえるエバネッセント光を用いる方法が開発された。エバネッセント光のしみ出しの深さは100~150 nmで、これを光源としてガラス表面上にある蛍光分子だけを励起し、その挙動を観測することが可能となる。以下に、これらの方法を用いたアクチン-ミオシン系の観測の結果を辿ってみよう⁸⁾。

スライドガラス上に固定したアクチンフィラメントに蛍光ラベルしたミオシンをATPとともに加えると、ミオシン1分子が滑らかに運動する様子が観測される。次にATP分子にも蛍光ラベルをつける。ATPは小分子なのでフリーのとき活発なブラウン運動のため輝点として観測できないが、ミオシンに結合すると静止した輝点として観測できる。結合したATPはADPに変化しミオ

シンを離れるが、このときまた見えなくなる。結合したATPの加水分解反応とミオシン分子の運動とのカップリングの様子を知りたいのであるが、そのためには距離や時間の精度を上げる工夫が必要となる。1 nm, 1 nsに迫る分解能が必要でこのためにはnmの精度での操作が可能とならなければならない。その詳細には立入らないが、nm計測にはたとえばミオシン分子に μm オーダーのビーズのような目印をつけ、これを追跡する方法がとられ、nm操作には光ピンセットの方法が用いられた。光ピンセットで捕捉されたビーズは0.1 pN/nm程度のバネ定数をもつ光のバネとして働く。1 nmの変位が測れれば、これにより0.1 pNの力が検出できる。また、直径1 μm のビーズを用いれば、時間分解能は0.1 msまで下げられる。

測定は次のように行われた。アクチンフィラメントの両端にビーズをつけ、それを光ピンセットで捕捉しアクチンフィラメントを水中に張る。それをガラス表面に固定したミオシンとATPを含む水中で相互作用させる。アクチンの運動はビーズの動きとして観測される。アクチンフィラメントは階段状に立ち上がり、しばらくその変位を保ち、やがて階段状にもとに戻るといった動きを繰り返す。ATPの結合・解離を同時に測定することができるので、その結果、ATPのミオシンへの結合がアクチンが原点に戻る階段と対応し、ADPのミオシンからの脱離がアクチンの変位の立ち上がりと対応することがわかった。すなわち、ミオシンはATPと結合していないときアクチンフィラメントと強く結合し、ATPが結合するとミオシンはアクチンから離れ、ミオシン頭部でATPの加水分解が起きる。生成したADPがミオシンから離れると、ミオシンは再びアクチンフィラメントと結合する。

1分子のミオシンが1分子のATPと結合して出す力の大きさは最大で数pN、変位は無負荷で10~30 nmの程度である。たとえばミオシンVについての測定の結果では、力

の大きさ 2 pN, 変位 36 nm と報告されている。したがって仕事量は 72 pN·nm である。ATP の加水分解の自由エネルギー変化は通常の筋肉細胞中の条件では約 60 kJ mol^{-1} で 1 分子当たり 10^{-21} J あるいは $80 \text{ pN}\cdot\text{nm}$ であり, エネルギー変換効率は 90% に達する。

ミオシンの動きを直接観測することによりさらに興味深い結果が得られた。ADP の脱離に伴うミオシンの変位の立上がりは一度に起こるのではなく, いくつかのステップを含み階段状に起こる。各ステップの大きさは必ず 5.5 nm で, これが 1~5 回起こって 1 つの変位となる。1 つの変位に含まれるステップの数は確率的で, 1/10 程度の確率で逆方向のステップも起こる。1 ステップの大きさ 5.5 nm はフィラメントをつくる隣り合うアクチン分子間の距離に等しい。負荷がかかるとステップ数が減り速度が減少する。この関係は筋肉で見られる張力~収縮速度の間の反比例の関係と一致する。また, 興味深いことに, 複数のステップからなる 1 回の変位は 1 分子の ATP の加水分解と対応しているが, 個々のステップと加水分解反応の生起とは直接対応せず, また ADP の脱離と変位とは必ずしも同時ではなく, 脱離からかなり遅れて変位が起こることもある。これらの結果はミオシンの各ステップの運動は ATP の加水分解エネルギーを直接使って起こるわけではないことを示唆し, 大沢らの化学反応と力学的変位との間のルーズカップリング説の根拠となる。

1 分子の ATP の加水分解エネルギー 60 kJ mol^{-1} は常温での 1 自由度当たりの熱エネルギーの高々 20 倍程度に過ぎないという事情もある。ミオシン分子は周囲の水分子の熱運動の影響を強く受けているであろう。これらの事情は, 筋肉の働きは ATP の化学エネルギーを使ってブラウン運動を変調し(バイアスをかけて)一方向性の運動を引き起こしているという可能性を暗示した。果たしてブラウン運動から一方向性の運動を生み出すことが可能であろうか。これは 1 で述べた

Maxwell のデモンの問題である。

5. Feynman の爪車

非対称な歯形をもつマイクロの爪車 (ラチェット) を用いれば, ランダムなブラウン運動から一方向性の運動を取り出すことができそうにもみえる。もしこれが可能であれば, Maxwell のデモンとなって熱力学第二法則を破ることになる。E. Feynman はこの問題を "Lecture on physics" の中で論じている⁹⁾。図 1 のように爪車の軸に羽根をつけ, また爪車の歯を押さえるようにバネ付きの歯止めをつける。羽根の温度を T_1 , 爪車の温度を T_2 とする。

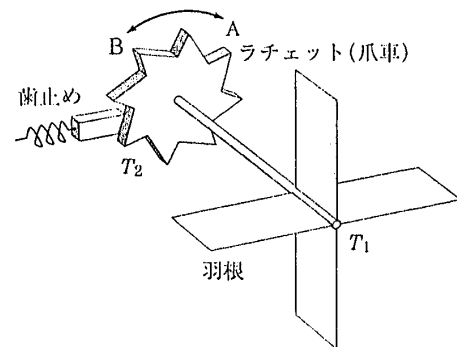


図 1. Feynman の爪車

羽根は十分に小さく周囲の気体分子の熱運動を受けブラウン運動をする。羽根のランダムな運動は軸を通して爪車に伝わるが, 非対称な歯形のために回転の方向に偏りを生じるであろう。ゆるい斜面に沿って動く順方向の回転では徐々に歯形の頂点に達し, これを越して回転する。これに必要なエネルギーを ϵ とすると, 順方向の回転の確率は $\exp(-\epsilon/kT_1)$ に比例する。一方, 逆方向の回転は温度 T_2 でエネルギーのゆらぎ ϵ があるときに起こるので, その確率は $\exp(-\epsilon/kT_2)$ に比例する。

したがって, もし $T_1 = T_2$ であれば, 両方向への回転の確率は等しくなり, ランダムな回転が起こる。すなわち, 爪車の非対称な歯形があっても, これのみでは一方向性の運動は取り出せず, 第二法則に背馳しない。一方向性の運動を取り出すためには, T_1 と T_2 が等しくないことが必要で, $T_1 > T_2$ であれば順方向, $T_2 > T_1$ であれば逆方向の運動が起こりうる。

このモデルを筋肉の問題に適用するため

に、羽根をアクチン、歯止めをもつ爪車をミオシンと考え、歯止めの温度 T_2 が羽根（環境）の温度 T_1 より十分高く保持されれば、爪車は羽根のランダムなブラウン運動のエネルギーを受けて逆方向にまわることになる。 T_2 を T_1 より高く保つために ATP の化学エネルギーが用いられる。ここで温度 T_2 は必ずしもマクロな温度を意味しない。ミオシン分子の複数の自由度がからむ高エネルギー状態とみなすことも可能であろう。前述したように、複数のステップから成るミオシンの変位で 1/10 程度の確率で逆向きのステップが見られることから、 $T_2/T_1 \cong 3$ と想定される。

現在、このようなモデルの妥当性を確かめるための努力が続けられているが、まだ結論は得られていない。生命の現象は物質の組織が示す性質であって、組織をつくる物質の性質ではないといわれる。上の問題も組織を特徴づける性質の一つとしての温度に関わる問題ということもできよう。

Feynman はさらに議論を続ける。上の装置で軸（シャフト）に錘を吊せば、熱機関として作動する。たとえば、 $T_1 > T_2$ として順方向の回転を考える。1 段階進むと角度 θ 進みトルクを L とすると、このとき必要なエネルギーは $\varepsilon + L\theta$ で進む速度はこのエネルギーをうる確率 $\exp\{-(\varepsilon + L\theta)/kT_1\}$ に比例する。逆方向の回転では歯止めを上げるのに必要なエネルギー ε が必要で、速度は $\exp\{-\varepsilon/kT_2\}$ に比例する。ここでは $L\theta$ の仕事が放出され、 $-(\varepsilon + L\theta)$ のエネルギーが羽根に伝えられる。

さて、可逆の条件は両方向の速度が等しいとして与えられる。すなわち、

$$\frac{\varepsilon + L\theta}{T_1} = \frac{\varepsilon}{T_2} \quad (5)$$

たとえば順方向 ($T_1 > T_2$) の運動で、爪車を系と考え、高熱源 T_1 から得た熱 $Q_1 = \varepsilon + L\theta$ のうち低熱源 T_2 へ熱 $Q_2 = \varepsilon$ が放出されたので、

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\varepsilon + L\theta}{\varepsilon} = \frac{T_1}{T_2} \quad (6)$$

最後の式は (6) から得られる。あるいは羽根から取り出された熱 Q_1 に対する系がした仕事 $W = Q_1 - Q_2$ の比は

$$\frac{W}{Q_1} = \frac{L\theta}{\varepsilon + L\theta} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (7)$$

これはよく知られたカルノーの原理である。

この装置が順方向に動くとき、歯止めに与えられたエネルギー ε は熱となって爪車に伝わる。もし爪車（系）が孤立していれば、これによって T_1 は上がり T_2 に近づく。 $T_1 = T_2$ となったとき、爪車は平衡点の前後でゆらぐのみで仕事はしない。したがってこの熱機関は（第 2 種）永久機関として作動することはない。

Feynman はこの議論の最後に次のように述べている。

“爪車と歯止めのような単純化された理想化されたものでさえ、究極的には宇宙のほかの部分とある接触をするからこそ、一方向性の運動を起こしうるのである。このことは爪車が宇宙の一部であるという事実と関係がある。宇宙の一部であるというのは、それが宇宙の物理法則に従うということだけではなく、その一方向性の運動が全宇宙の一方向性という性質と結びついているということである。このことの完全な理解は、宇宙の歴史の始まりの秘密が科学的理解の対象になって初めて可能になるであろう”

このことはもちろん生体についても言えることであろう。

【参考文献】

- 1) 早川光雄, 金田一真澄訳, 「カルツェフ, マクスウェルの生涯」, 東京図書 (1976).
- 2) ルクレティウス著, 樋口勝彦訳, 「物の本質について」, 岩波文庫 (1961).
- 3) マッハ著, 高田誠二訳, 「熱学の諸原理」, p.437, 東海大学出版会 (1978).
- 4) 妹尾 学, 表面, 42, 97 (2004).
- 5) 米沢富美子, 「ブラウン運動」, 共立出版 (1986).
- 6) ペラン著, 玉虫文一訳, 「原子」, 岩波文庫 (1978).
- 7) 妹尾 学, 生活工学研究, 8 巻 1 号, p.74 (2006).
- 8) 柳田敏雄, 「生物分子モーター (岩波講座物理の世界)」, 岩波書店 (2002).
- 9) ファインマン物理学 II 光・熱・波動 (富山小太郎訳), p. 284, 岩波書店 (1986).