

〔連載〕流体力学への招待：日常生活に見られる流体現象

生体・生物は流れをどのように利用しているのか

東洋大学 理工学部

望月 修*

How well do living things use flow?

*Osamu Mochizuki, Faculty of Science and Engineering, Toyo University

*E-mail for correspondence: mochizuki@toyo.jp

1 はじめに

最近の製品によく「バイオミメティクス（生物規範）を応用して作りました」という付加価値をつけたものがあります。バイオミメティクスというのは生物のもつ機能を応用して製品の性能を上げようというものです¹⁾。成功事例として、オナモミからヒント得た面ファスナー、カワセミのくちばしを応用した新幹線のノーズなどがあります。バイオミメティクスの使い方として、生物を観察してヒントを得るのではなく、何を作りたいかどのような機能が必要なのかという目的をもって生物を見るのが大切です。さもないと見えるものも見えないで見過ごしてしまいます。研究も同じで、目的もないのに流れを観察すれば何か見えてくるだろうというやり方では、何も見えないのです。生物と流れの関係のなかで「このことが知りたい」と設定していくつか例にとって見ましょう。

2 アメンボが水面を動き回れるのはなぜか？

アメンボは真ん中の脚をボートのオールのように動かして水面をすいすいと動き回ります。図1に示すように脚が撥水性の剛毛(seta)で覆われているために、その剛毛間の空気層が水面から脚を浮かし直接水面に触れないようになっています。また、足にかかる重みで水面を窪ませます。水面と剛毛面との接触点における表面張力の方向が図のように引き上げる方向となっているために浮いていられます。水面と剛毛との間の空気層がホバークラフトのように脚を浮かせ、摩擦を小さくしています。このためアメンボはまるで氷の上を滑るように進むことができます。

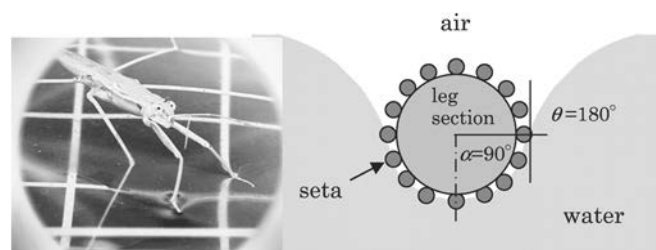


図1 剛毛(seta)でおおわれている脚と水面の間には空気層があり、水面を窪ませている。

水面を進むためにどうやって推進力を得るのでしょうか？ まずスケボーに乗って壁を手で押すことを考えてみましょう。壁を押した方とは逆向きに移動しましたね。誰が押し返したのかというと壁です。自分が押した方向とは逆向きに同じ力の大きさで壁から押し返されたのです。これを作用・反作用の法則といいます。我々が歩いたり走ったりできるのは、地面を蹴った（作用）ので地面が我々を蹴った方向とは逆向きに蹴り返した（反作用）ためです。アメンボもこの反作用の力を使って進みます。

水を蹴って水から反力をもらうためには、水面に動かない壁を作る必要があります²⁾。どうするのか考えてみましょう。人が手で水面をゆっくり押すとずぶずぶと沈んでしまいますね。しかし、勢いよく叩くとどうでしょう。まるで硬い物体を叩いた時のようにパーンという音とともに手のひらが痛くなるくらい水面が硬く感じますね。このとき水面に接する時間が短いと水も動きにくい（慣性力）ので、まるで固体の表面のように変形しにくくなります。この状況は水の中でも同じで、手をゆっくり動かすと抵抗を感じないくらい苦もなく動かしますが、

急にパツと動かそうとすると途端に水は硬く重くなって手を動かすのは大変です。ゆっくり押すのは一定速度で手を動かすことです。これに対して叩くというのは水にとっては急に加速されることになります。物体を流体中で加速運動させると、ある量の水も一緒に加速させる必要があります。これがどのくらいの量の水かというとき動かす物体の形状に依存します。この水の量を付加質量といいます。手を板と考えると、板は自分自身の質量が小さくても動かす水の質量が大きくなります。円板を正面に向けて動かすと、付加質量は同じ半径を持つ球の64%体積分の水を動かすことになります。面白いことに動かすものが球の場合はその50%体積分の水を動かしますことになります。したがって、球を使うより同じ半径の円板を使った方が多くの水を動かすことになります。先の円板と同じ面積を持つ正方形板だと球体の25%体積となります。円板の場合の40%です。同様に1:2の長方形板だと球の31%体積分、1:2の楕円板だと球の58%体積分ということになります。同じ面積であれば円板の場合が最も付加質量が大きいということになります。円板の足で垂直に水面を打ち付けると水を動かすにくいので、硬く感じるということになります。

さて、アメンボの脚を円柱とみなすと、円柱による付加質量は円柱と同じ体積の水の重さになります。水面で円柱を動かすとその円柱と同じ体積の水の壁を作ることができます。さて大きな力を水に与えるには形も大事ですが、いかに大きな加速度を出すか、つまりいかに急にパツと動かすかにかかっています。こうすることで水は動きにくくなり、その分水から反力をもらうことができます。余談ですが片栗粉を溶かした水、水田、泥沼などの表面上を小走りに走ることができます。この時強く足を水面に叩きつけるようにするのがコツです。ゆっくり動かしたり、ただ乗っているだけだとずぶずぶと沈みます。このような液体をダイラタント流体といって非ニュートン流体と分類されます。この流体は瞬間的な力を加えて急激な変形をさせると固体のように変形しにくい性質が現れます。手のひらで水面をばしっと叩くとき水も瞬間的な打ち付けに対して固体のように振るまうことを先に紹介しました。これはダイラタント流体と違って、手のひらで押されて動かされる水の量（付加質量）が大きくて動きにくいという慣性の法則によるものです。このことをうまく使ってアメンボは水面を走り回ることができます。

3 数十メートルの巨木が水を吸い上げられる秘密は？

日常生活においてこんなことをする人はまずいませんが、高いところにいる人が啞えたホースで下の床に置いてある容器内の水を吸い上げるとしましょう。さて何メ

ータまで水を吸いあげられるでしょうか？ある高さまでのホース内の水の重さとそれを支える大気圧との釣り合いから10mというのが答えとなります。このことから「水を吸う」木も10mの高さまでと考えられています。しかし、10m以上もあるような高い木はさらに存在しているのは何故か？という疑問がすぐ出てきますね。

この疑問に対して、水が蒸発するときの水分子の引っ張り力が根から水を吸い上げる力だと説明されることがあります。つまり、葉が水を吸い上げると考えるのです。相対湿度が70%ほどであれば葉からの蒸散によって引っ張り上げる力は30MPa程になると言われていますので、計算すると、3000mは持ち上げられる計算になります。また、-444MPaの負圧が葉っぱでは生じているとする計算結果もあります。流体の分野では負圧というのは大気圧からどのくらい低いかという表現なので、最大（真空時）でも-0.1MPa（-1気圧）であることを考えると、この値はにわかには信じがたいところはあります。ちなみに、これで引っ張り上げたとすると、44km上空の成層圏まで木が高くなれる計算となります。どうも現実的でないですね。

さらに、引っ張り上げるには導管の中で水は繋がっていなくてはなりません。たとえば導管内にある水の柱をくさに例えると、葉っぱの上に乗ってこのくさを引っ張り上げるわけですから、もし途中で切れていたら地面からのその切れたところまでのくさはどのように再び揚げればよいのでしょうか。実際に導管内には気泡が含まれているので、水は根から葉っぱまで連続してないことになります。これも引っ張り上げることに対する疑問です。どうすればつじつまの合う説明ができるか、流れのエネルギー保存則を表す基本式であるベルヌーイの式を使って次のように考えてみましょう¹⁾。

この式は流れが持つ運動エネルギーと位置エネルギー、摩擦熱で失う熱エネルギー、流すために流れに加える仕事の和が一定ということを表しています。これによるとある高さの葉っぱ内で流れが生じるためには、その高さまで「押し上げる」力が根で発生していなければならないという結果が得られます。従来の考えでは葉っぱで「引っ張り上げる」だったのですが、これとは全く逆の、根で押し上げるという結果です。たとえば20mの高さでは2気圧、メタセコイアのように100mの高さの木では10気圧が根で発生すれば良いということになります。一般的に、植物細胞内の内圧が7気圧程度といわれていますから、根で発生できる最大でも10気圧くらいの圧力は現実的な値ですね。

では根の細胞がなぜ10気圧もの圧力を生み出せるか考えてみましょう。ここで圧力というのは単位面積当たりの力のことで、ある面積 $A[\text{m}^2]$ に $F[\text{N}]$ の力がかかっ

たとすると、圧力 p [Pa] は $p = F/A$ で表されます。細胞の寸法を 10 マイクロメートル (= 10×10^{-6} m) とすると、細胞内の代表面積 A は 102 平方マイクロメートル (= 102×10^{-12} m²) です。したがって、 $p=10$ 気圧 (= 1 MPa) の圧力を生じるためには $F = pA$ より、 $F = 0.1 \times 10^{-3}$ N の力がかかるだけということになります。この力を重さに換算すると重力加速度 9.8 m/s^2 で力を割ればよいので、 0.01×10^{-3} kg と求まりますから 10 mg ということになります。一円玉が 1g ですから、その 1/100 の重さです。逆に、このくらいの重さのものが植物細胞に乗ると細胞がつぶれないためには 10 気圧で細胞内部から押ししていないといけないということになります。10 気圧というと約 100m の水深に潜ったときに受ける圧力なので、もの凄い圧力のように感じられますが、意外と簡単にこの圧力が出てしまうことがわかります。ちなみにハイヒール一本のヒールの底面積 (約 1×10^{-4} m²) で体重 50kg を支えるとすると、圧力は $p = 5 \times 10^6$ Pa ですから、つまり 50 MPa です。これで踏まれたら、さぞかし痛いでしょうね。

どんな樹木でも根はおおよそ 50cm くらいの深さのところまで張っています。土の密度は約 $2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ です。50cm の深さに掛かる土の重さによる圧力は 10kPa と計算できます。この値は 0.1 気圧相当ですから、根の細胞内圧から見たら 1/100 です。根が土の中でつぶれないわけですね。逆に、もし土の重さで押されて根の圧力が発生する、と考えるには小さすぎます。そこで、根における浸透圧はおおむね 6 気圧といわれていますのでこれが根によって発生させる圧力の源と考えられます。根で「押し」ということであれば図 2 に示すような葉の縁にある水孔から出てくる水玉 (出水) も、茎を切ったと頃から水が出てくることも納得できます。

根からの圧力だけで水が上がっているとすると、切り花が水を吸い上げることが説明できなくなります。すな



図 2 葉の縁にある水孔からしみ出し水滴となっている (出水)

わち、水をあげるのに根が押しすることだけではないことを意味しています。植物ははなにか損傷が生じて他の方法で補ういわゆるフェイルセーフ機能を持っています。この水の輸送に関わるのは、先に述べた根による押し上げ、葉からの蒸散による水の凝集力、毛管力、浸透力です。それぞれがどのくらいの割合で寄与しているか根の押し上げを考慮しなくてもよいように切り取った葉っぱに関して調べた結果、蒸散力 57%、毛管力 35%、細胞間への浸透力 8% でした。蒸発が重要であることがわかりました。最初にも述べたように、葉っぱからの蒸散も水の吸い上げに関わっているのです。ただし、切り花の茎を切るときに空気を入れないよう水の中で切るのは導管の中で水が繋がっていないと引っ張り上げられないからです。

葉脈: 葉脈の流れについて見てみましょう³⁾。羽状葉脈 (網状脈) 形状の葉において、葉脈内の流れをフルオレセイン水溶液で色付けして可視化したものを図 3 に示します。葉柄部分を水に浸しているの、根から押し上げる圧力はないので、気孔からの蒸散による引き上げだけが関わると考えられます。羽状葉脈は、中央に走る主脈、そこから横方向に分岐する支脈、その支脈からさらに分岐して縁に向かうとともに先端方向に集約されていくようなネットワーク構造になっています。図 3 から、葉柄近くの太めの葉脈 (主脈) から染料が満たされていき、その後主脈より細めの支脈に入り、葉の縁に向かって染料が満たされていきます。図 3 のパターンは吸い始めから 4 時間経った時のものです。この葉脈のパターンであれば葉の縁付近に気孔が集中していても良さそうですが、実は葉の裏側に一様に分布しています。つまり葉脈の終端という概念はなさそうなのです。葉脈は単なる管ではなく、水を葉っぱのどの部分にもまんべんなく行き渡らせるための装置と考える方がよいように思われます。たとえば、よく葉っぱに虫食いの穴が見られますが、途切れた葉脈の先にも水が供給され葉っぱ全体が枯れることはありません。もし管で繋がっているとすると切れた途端にその先への供給が止まってしまうからです。葉脈を電子顕微鏡で観察すると、管壁面に小さな穴 (壁孔) が見られます。これは裸子植物における仮道管に見られるものと同じと考えられます。被子植物であっても葉っぱの葉脈に裸子植物における水の通し方の名残だと思われれます。葉脈は管のネットワークのように見えますが、実際は管同士が壁孔で繋がっているのだから壁のない、葉全体が微細な穴で繋がったスポンジ状の構造になっているものと考えられます。このため、一部が損傷しても全体に行き渡っている状態は変わらないのです。

ネットワークには生活のインフラである水道網、電気網、ガス網、交通網、インターネット網などがありますが、葉っぱのこのような構造に学ぶと、災害でどこかが

損傷を受けても途切れることがないロバストなネットワークの構築方法が見つかるかもしれません。

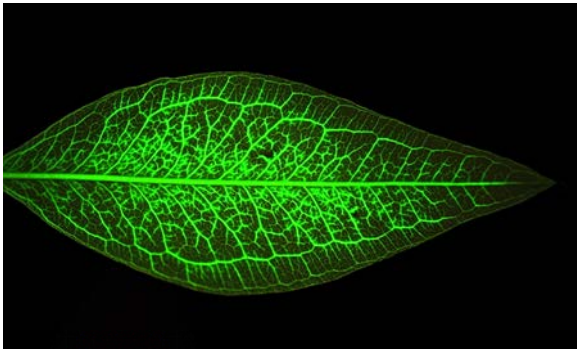


図3 葉脈内の流れの可視化（蛍光染料）

4 芭蕉の俳句で詠われた蛙の正体は？

松尾芭蕉の有名な俳句「古池や蛙飛び込む水の音」のカエルはどんなものだったのでしょうか。ただし、何を詠んだのか、何を表現したかったのかということに関しては諸説あるようですが、大体は静かな情景を詠んだということになっています。カエルが古池に飛び込んだ音を聞いて静かさがより強調されたという感じです。工学的にこの句を見てみると、1)古池というのはどのような状態の水をたたえた池のことか、2)蛙とはどのような蛙か、3)なぜ飛び込んだ？どのくらいの位置から水面に飛び込んだのか、4)水の音とはどのような音かなど、疑問が出てきます。一つずつ考えてみましょう。1)古池というのは忘れ去られたような昔から手も加えられずにある池という感じであるので、水はフレッシュではなく水草や藻などが水面を覆っている感じです。したがって石でもそこに投げ込むと気柱が閉じるときのトポツというような感じの音になると想像できます。2)俳句が読まれた1686年江戸にいたであろう蛙はヒキガエル、アマガエル、トウキョウダルマガエル、ツチガエル、アカガエルです。このなかで俳句に読む際のイメージとしてカワイイ感じがするのはアマガエルとトウキョウダルマガエルです。ダルマガエルは同じアカガエル科のトノサマガエルとよく間違えられますが、トノサマガエルに比べて口が丸みを帯びています。ちなみにトノサマガエルは関西に生息しています。3)、4)この2種類の蛙が飛び込んだときにどんな音を立てるのか実験をしてみました。さて、真水(古い水ではなく普通の水)を張った水槽内に飛び込み台を設け、そこから水面に向かって飛び込んでいくトウキョウダルマガエルの様子を高速カメラで撮影するとともに、水面に突入する際の音を同時に計測しました。その結果、図4aに示すように腕を脇

腹に付け、頭からスポツと水に入っていくのが観察されます。トウキョウダルマガエルは水辺にいる蛙なので、飛び込みは上手です。この過程において、まず顔先が水面に当たる高周波の「ポツ」という音が観察されたあと、わずかに取り込まれた気泡の振動による音「チャン」という音が観察されます。これらが連続してポチャンと聞こえます。この音は小さく、30cm くらいの距離で聞いてやっと聞こえるくらいです。よほど周囲が静かでないと聞こえません。これに対して、これに対して図4bに示すアマガエルは陸生のカエルで飛び込みはうまくなく腹打ちです。大きなしぶきを上げ沢山の気泡も入ります。このため色々な周波数を含むバシヤという感じです。

綺麗な静かな音という観点から、芭蕉が聞いた水の音を発生させた蛙は水辺に住むトウキョウダルマガエルであると言えます。そうすると音はポチャンであり小さいものです。静かな環境で近くによらないと聞こえないことから、芭蕉は水辺を散策しているときに彼の接近に気がついた蛙が逃げるために飛び込んだという状況が考えられます。古地図から庵のあった深川付近の水辺は隅田川と小名木川の合流付近であるので、芭蕉は川縁を歩いていたこととなります。ということは「古池」は芭蕉が思い浮かべた心象風景ということになります。川縁を歩いているとポチャンと言う水の音が聞こえ、どこかで見た古い池を思い出したということ詠ったと解釈すると、単なる写実世界を詠んだ句だという単純なものから、幽玄な世界が現れてきますね。

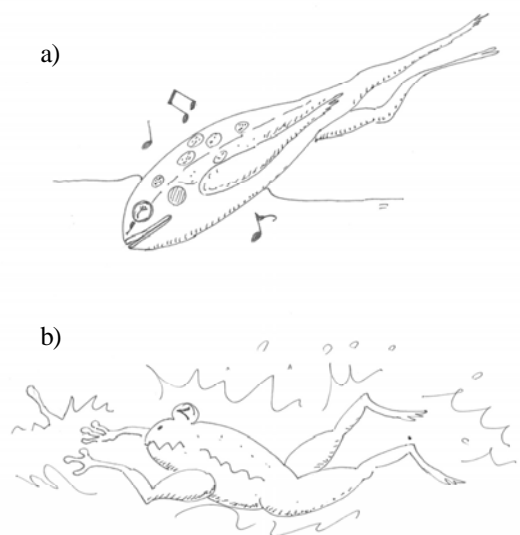


図4 a)トウキョウダルマガエルと b)アマガエルの飛び込み方の違い

5 おならの音を消す方法は？

おならの音とはどのような音なのか考えてみましょう。基本的には乾いた感じのプーとかブボツといった音と湿った感じのベチャとかビタビタといったものがあります (m(,)m)。もちろんこれらのバリエーションとして長い時間続くものと単発ではなく複数回繰り返されるものもあります。録音されたオナラの音の波形を 500 ケースほど解析すると周波数はおおむね 350Hz で音階でいうと「ファ」の音になり、記号では F と表します。また、日本語の音階の呼び方にすると「へ音」です。また、英語でおならのことを **fat** といいます。なぜか F の音はおならに深い結びつきがあるようですね。大発見だと思いませんか？

これらの音には外肛門括約筋で調整できる開口部分とその先にある臀部が関わります。臀部を開いて出す場合を考えましょう。直腸と肛門の関係はヘルムホルツ型共鳴器と同じ構造となっているので、肛門から気体が噴射されれば、渦輪が周期的に発生します。ただしこれによる振動が開口部分の寸法と直腸の容積に依存する共鳴周波数からずれていけば、スーツという気流音となります。運悪く共鳴するとボーツという瓶の口を吹いた時に出てくるような音となります。口笛と異なる点は肛門の開口をあまり自由にコントロールできないので音楽を奏でるようなことがしにくいことです。なお、気流そのものから発生する振動の他に、肛門が震えやすいので噴射の際この振動で気体が区切られます。そのため低周波数のプーという音になります。最後は締め気味にするために流速が早くなり振動数が高くなり、音は高音寄りに変調します。以上から、お尻の片側をちょっと浮かすようにして臀部を開いた場合、直腸との共鳴が起らないように、穴を開き気味にして気流速度を速めて噴出させるようにします。ただし、直腸内が詰まっている状況では共鳴周波数が高いので穴を閉じ気味にして注意しながらゆっくりと吹き出させます。いわゆる「すかし尻」となります。

これに対して、座っていて臀部が閉じられている場合、気体は臀部のすき間を通り最終的には空間に開放されます。その時、拍手と同じように瞬間的に気体を押し出すときのパチンと弾けるような大きな音となります。腸内の圧力は大気圧より 0.1 気圧ほど高く、一回に噴出すおならの量は平均で 200ml ($0.2 \times 10^{-3} \text{m}^3$) 程度です。これが臀部の隙間に噴きだされると、気体の状態方程式に則り臀部の締め付けの強さに応じた大きさ (体積) の気体だまりができます。締め付けが強いと腸内圧力との差が小さく少ししか出ないのでそのたまりは小さく、逆に弱いと大きくなります。できた気体だまりの圧力は臀部の締め付け圧力と同じになりますので、0.1 気圧以下です

(締め付け圧力が腸内圧力より大きいと気体が腸内から出てこられないため)。例えば 0.1 気圧差で臀部後方から瞬間的に噴出すとその流速は 130m/s にもなり、その時の音はブチンという感じの爆発音となりその強さは 1m 離れた位置で瞬間的に 145dB (デシベルと呼ぶ) にもなります。これは至近距離の落雷の音の大きさに匹敵します。締め付け圧力を半分にすると 6dB の減となりますから 139dB、5 分の 1 にすると 14dB 減ですから 131dB、さらに十分の 1 の締め付け圧力では 20dB 減ですので 125dB となります。これでも音は相当の大きいことになります。気体だまりを作るときにブツ、臀部に挟まれたものが解放されるときにボツと鳴るので全体でブボツと聞こえることとなります。締め付けをさらに弱くすると気体だまりが幾つかに区切られるのでブブブという断続的な音となり、締め付け圧力も小さいので音はだいぶ小さくなります。出さないようにしようと臀部で挟み込むことによって出てくるのを抑えようとするのが高まり逆効果ということになります。これらのことから音を出さないようにするためには、座っているときに尻を浮かせるように臀部の締め付けを弱くして、気体だまりを作らないようゆっくり気体を解放するようにしましょう。これをなんなくできるようになると「こんなことは屁の河童」と言い放ちましょう。

6 おしっこの飛散をなくすには？

排尿時では膀胱を取り巻く平滑筋が収縮し、膀胱出口の括約筋が弛緩することで約 300ml の尿が尿道を通過して健康な男性であれば 20 秒程で排出されます。したがって、20 秒掛かるとすると $1.5 \times 10^{-5} \text{m}^3/\text{s}$ が流量となります。図 5 に示すように尿道の直径 d を 4mm とすると、この断面積で流量を割ると流速 u が求められます。速度 $u = 1.5 \times 10^{-5} / (4 \times 10^{-3} / 2) \times 2\pi = 1.2 \text{m/s}$ です。高さ $h = 0.7 \text{m}$ のところから放出されたとしても水平距離 x_d がどのくら

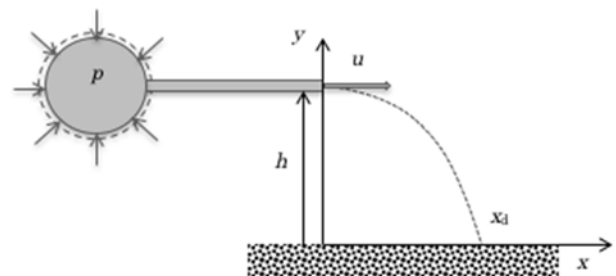


図 5 おしっこでつくる放物線

いになるのか試算してみましょう。空気抵抗が無視できる自由落下だとすると h の高さを落ちるのに要する時間 t_h は $t_h = \sqrt{2h/g}$ ですから $t_h = 0.38$ 秒と求まります。水平方向には速度 $u = 0.39 \text{ m/s}$ でその時間進むので $x_d = 1.2 \times 0.38 = 0.46 \text{ m}$ です。これは爪先から 46cm 前方の位置になります。

さて、尿道出口断面形状は丸ではなくどちらかというのと長楕円形です。このような出口から液体が出ると始めは出口の断面形状の長楕円形なのですがそのうち長軸と短軸が入れ替わります。これをアクシススイッチングといいます。このため、ねじれ棒のような形状の噴流となります。この現象が液噴流の界面不安定性を刺激して、出口からある下流位置で液滴に分裂します。これを液噴流崩壊と呼びます。これは円形水噴流でも表面の不安定性で起きますが、長楕円形の場合よりアクシススイッチングが起きない分液噴流崩壊は遅れます。なお、これが噴出口からどの位置 x_0 で起こるのかは慣性力と表面張力の比を表すウェーバー数 We ($=$ 慣性力/粘性力) に依存します。ちなみに速度 $u = 1.2 \text{ m/s}$ のとき $We = 79$ です。このときの液噴流崩壊長さ x_0 は $x_0 = 8.51 \times d \times We = 0.32$ で与えられます。これより、 $x_0 = 14 \text{ cm}$ となります。この液滴に分裂するときの飛沫がトイレを汚す原因となるということで、分裂前に便器の壁面に当てるようにマーキングが施されているものもあります。これらの位置を念頭に自分の立つ位置に気をつけましょう。

7 原形質流動がおこるのは?

植物細胞内を顕微鏡で覗くとあるものが動いていることが観察されます。細胞内の液体が流れているように見えることから、このことを原形質流動といっています。しかし、液体が流れているのか、粒状のものが動いているのか区別が付きません。植物細胞の大きさは $5 \sim 100 \mu\text{m}$ 程度です。細胞壁と細胞膜で囲まれた中の細胞質基質というタンパク質と水の混合のゾル状液体中に細胞小器官、繊維のネットワーク、細胞核が集まって細胞を形成しています。細胞小器官にはミトコンドリア、葉緑体、小胞体、ゴルジ体、リソソーム、液泡等があります。細胞内顆粒は糖質、脂肪、タンパク質、分泌顆粒、色素、結晶質、異物、細菌、ウイルス等を袋状の中を含む粒状のものです。繊維状のネットワークを形成するものは細胞骨格と呼ばれます。運動を司るタンパク質繊維には直径 7 nm の微小繊維と直径 25 nm の微小管があり、形を保つための骨組み構造体としては直径 10 nm の中間径繊維があります。

植物細胞は外から栄養(無機物, 有機化合物)を取り込み, 化学反応を用いた代謝によって生命活動を恒常的に行っています。ミトコンドリアは呼吸によってグルコ

ース ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) を酸化し, 二酸化炭素と水に分解します。このとき, 1 モルのグルコースから 38 モルの ATP が生み出されます。ちなみに, ATP のエネルギーは 30 kJ/mol なので 38ATP のエネルギーは 1140 kJ (271 kcal) となります。もともと, 1 モルのグルコースが持つエネルギーは 2808 kJ なので, ミトコンドリアは 41% のエネルギー変換効率で, グルコースから生体内で使えるエネルギーを生み出していることとなります。

葉緑体は光のエネルギーを使って二酸化炭素と水を合成し, グルコースやデンプン ($\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$)_n などの有機物と酸素を生産します。光合成は光化学反応+カルビン回路の2段階のステップで行われます。この反応に必要な光エネルギーは 1260 kJ です。二酸化炭素と水が持つエネルギーにこの光エネルギーを足してグルコースを作り, 化学エネルギーとして蓄えます。

原形質流動は, 生命活動を行うための材料を細胞小器官に送る必要性から生じるものです。ミトコンドリアにはグルコースに代表される糖や炭水化物, 水, 酸素を, 生成物を必要としているところには二酸化炭素, 水, ATP を送らなければなりません。また, 葉緑体には二酸化炭素と水を送り, 生成物のグルコースをミトコンドリアに送らなければなりません。ATP はいろいろな場面で使うので, これも細胞内に散らばらせる必要があります。

このように, 物質をどこかへ輸送する必要がありますが, どのようにこの流れを起こしているのでしょうか。輸送の方法としては, 拡散と移流が考えられます。拡散は, 例えばコップの水にインクを静かに一滴落としたとき, かき混ぜることなく静かにそのままにしておくとそのうち水はインクの色に染まります。これを拡散といいます。かき混ぜるといふ機械的仕事を加えなくても混ざるのは, インクが水分子の運動によって四方八方に飛び散られるからです。

定常状態の拡散はフィックの法則という法則に従います。濃度を c_2 点間の距離を L と書くと, 拡散流束(単位面積を通過する量) J は, 濃度勾配 $(c_2 - c_1)/L$ に比例し, その比例係数 D [m^2/s] を拡散係数といいます。ここで, 2 点間の距離, 時間 $t=0$ のときの濃度 c_0 を使うと $J = \sqrt{D/\pi t} c_0$ のように表されます。つまり, 拡散流束は時間の逆数の平方根で減少します。 $x=0$ の点で観察していると, 時間が経つほど拡がる量が少なくなるということを意味しています。また, 拡散速度は D の値が大きいと速く, 小さいと遅くなります。

拡散係数 D の値は 25°C の水中における CO_2 は $D = 1.70 \times 10^{-9}$, ショ糖は $D = 5.22 \times 10^{-10}$ です。これらを比較すると, 同じ濃度勾配のとき CO_2 はショ糖の 3 倍速く拡散します。またショ糖の場合をみると, 10 cm の深さの容器に角砂糖を入れた場合, 表面まで拡散してくるのに $0.12/D = 2$

$\times 10^7$ s かかります。1日は86400秒なので、231日(約8か月)の時間を要します。一方で、細胞の大きさを $10 \mu\text{m}$ とすると $(10 \times 10^{-6})^2/D=0.2$ s となり、 CO_2 では $(10 \times 10^{-6})^2/D=0.06$ s です。したがって、細胞内では一瞬で細胞内に拡散してしまうことがわかります。

これに対して、移流というのは密度差あるいは温度差である方向に流体が動くことをいいます。スケールが小さい場合は拡散で十分な物質移動が得られるが、大きい場合は混ざるまでに時間がかかりすぎてしまいます。シャジクモという藻の一種では一つの細胞が 10 cm 程度になるため、拡散のみで端から端まで輸送させるには先程の計算でいえば8か月かかることとなります。図6に示すシャジクモの原形質流動の速度は $5 \mu\text{m/s}$ と計測されており、これは20,000秒(=5時間半)で端から端まで移動させる流れが生じていることとなります。拡散とは別に流れを生じさせている仕組みが原形質流動という形で見えているのです。

アクチンレールと呼ばれる繊維状組織である細胞骨格の上をミオシンという運動性タンパク質が顆粒を担いで走ることによって、この流れを起こしていると考えられています(図7)¹⁾。なお、アクチンレールは細胞膜の内側に分布している葉緑体の上に形成されています。また、ミオシンに付いているこの顆粒が水車の羽の役割を担い、液体を動かしていると考えてみましょう。顆粒は小さく $\text{Re}=10 \times 10^{-6}$ 程度なので、顆粒が動いた影響は粘性によって伝わり、摩擦力だけで周囲流体を引っ張ります。このとき、動粘性係数 ($\nu=\mu/\rho$) は拡散係数と同じ役割です。水の場合 $\nu=1.0 \times 10^{-6}$ ですから、粘性の影響が $10 \mu\text{m}$ を伝わるのにかかる時間は $(10 \times 10^{-6})^2/\nu=1.0 \times 10^{-4}$

s です。動いた影響が一瞬で細胞内に伝わることを意味しています。細胞内の物質輸送では、大きさが $10 \mu\text{m}$ より小さい領域では拡散という方法のほうが有利ですが、逆に大きさがそれ以上だと移流を使うほうが速く、細胞内に物質・エネルギーを運ぶことができます。運動できる組織であるアクチン-ミオシンが流体の粘性を使って流動を起こさせています。

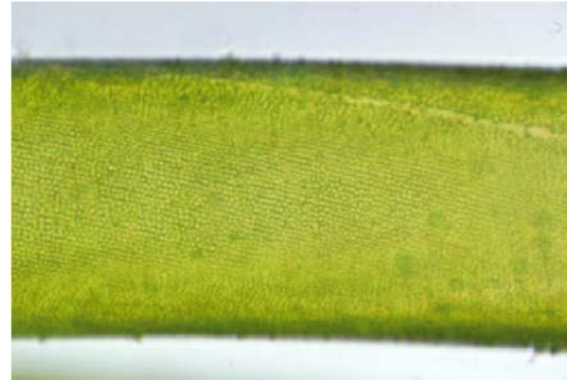


図6 シャジクモ内にみられる原形質流動

引用文献

- 1) 望月 修: 物理の眼で見る生き物の世界 (コロナ社, 2016) 1-178.
- 2) 望月 修, 市川誠司: 生物から学ぶ流体力学 (養賢堂, 2010) 144-152.
- 3) 佐藤慧拓, 窪田佳寛, 望月 修: 葉脈のネットワーク構造, 日本機械学会論文集, Vol.82, No.833 (2016) 1-10.

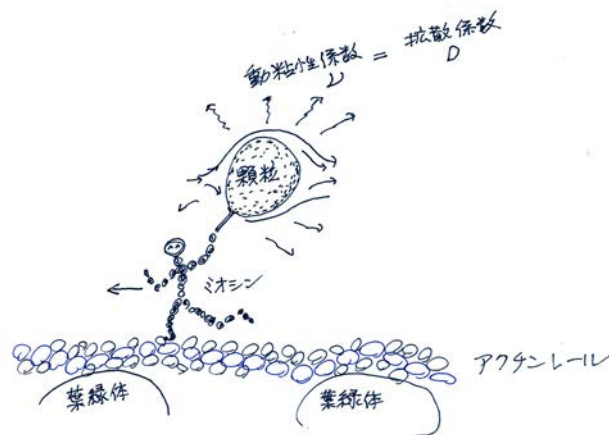


図7 ミオシンの移動により原形質流動を起こす