◆2026年12月1日発行（毎月1回1日発行）◆第65巻第13号（通巻825号）

発行：日本工業出版
https://www.nikko-pb.co.jp/

油圧・空気圧技術雑誌

2026 12 油空圧技術

Hydraulics & Pneumatics

825. Vol.65. No.13

特集：自然界と身の回りに関わるフルードの世界①
特集：海底資源を掘り起こすフルードパワー②

油空圧技術
オフィシャルサイト

圧縮空気用 高性能オイルミスト吸着捕捉装置

〔世界が承認〕
日本・欧州・米国・中国 特許取得済

オイルバスター®

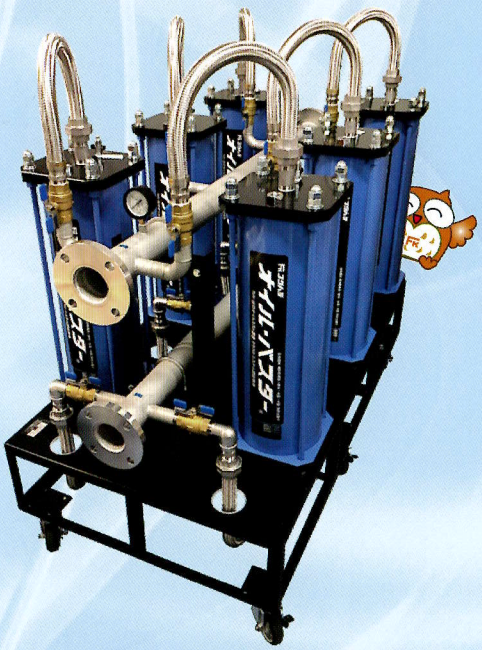
給油式エアーコンプレッサー
オイルフリー化・省エネ・コスト削減の実現

オイルフリーコンプレッサーでも オイルバスターが必要な場合があります



電力費
大幅削減

製品ページ



OB型（最大処理空気量 1,200 ~ 3,000L/min）

OBMP型（最大処理空気量 4,000 ~ 24,000L/min）

給油式コンプレッサーに オイルバスターを使用すれば、オイルフリーの圧縮空気を電力費削減で、安価・簡単に長期間得られます。

国際的認証機関 TÜV(テュフ) オイルミスト濃度「クラス0」システム認証取得

省エネ、環境、
CO_2削減・回収に貢献する

FKフクハラ®
株式会社フクハラ

www.fukuhara-net.co.jp/

Y2608-09

特集

自然界と身の回りに関わるフルードの世界①

生物から学ぶ流体力学

Fluid Dynamics Inspired by Living Organisms

東洋大学　望月　修

1 はじめに

本稿は、よくある「…でもわかる流体力学」と銘打たれた教科書のように、人間より脳の容量がはるかに小さい生物でも理解できる程度にやさしく解説するという生物を見下した入門書の類ではない。人間より地球上に存在している時間が圧倒的に永い生物が海や大気中という「流体」の中で生き延びていくうえで会得した貴重なサバイバル術を、謙虚な気持ちで流体力学的見方で学び取り、人類の未来に応用していこうというものである。そのきっかけとなることを願う。

2 アメンボはなぜ水面を自由に動き回れるのだろう？

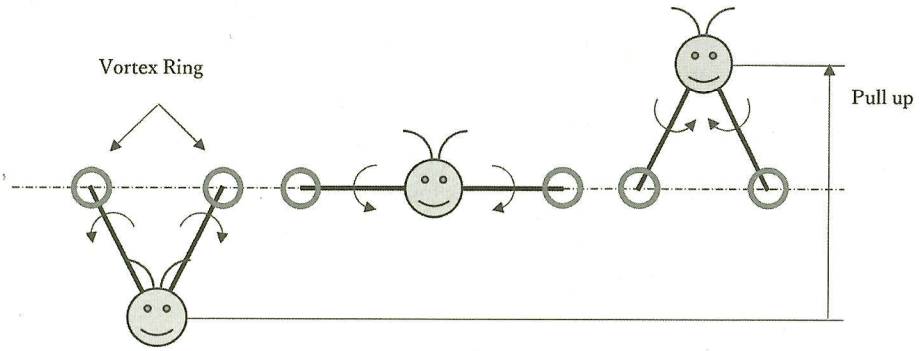
彼らは水面に落ちて動けなくなった蛾、ハエや蜂などの昆虫の体液を吸って生きている。この時点で水面を自由に動き回れるアメンボ（捕食者）と水面で動けなくなる昆虫（被食者）が存在する。アメンボは水面に浮き、氷面を滑って進むスケーターのごとく移動できる。よく見ると足先はあたかも薄いゴム幕の上に乗っているように水面を窪ませ、その反発力で体は水中に沈むことなく水面上に脚で支えられている。ちなみに、アメンボに重りを巻きつけて、その重りの重さを増やしていき、ある重さ以上になると、もはや水面で支えられなくなって体ごと水中に沈む[(1)]。そうなるとアメンボは水中では呼吸できずに溺れる。つまり支えられる限界が存在することを意味している。

さて、水面に接している物体の大きさが小さいほど表面張力が支配的となる。水面に円柱が接している状態であれば表面張力は水平方向にしか作用しない。このことから水面を窪ませて表面張力を上向きの力に変えて体の重さを支えるだけの力を得る工夫が必要である。そのために、水面と接触する部分は細い毛で覆い、その毛は撥水性でなければならない[(2)]。このような撥水性の細い毛の特性を利用して、水に濡れずに水面に浮く衣服を作ることができるかもしれない。昨今の異常気象により水害が多発するなか、溺れることから身を守る技術を見いだせればと期待される。

アメンボが水面をすいすいと動くための推進力は真ん中の一対の長い脚で水面の窪みを蹴ることによって得る。一回の蹴る角度が小さくても、その長さのおかげで体の移動量は大きくなる。これも工夫であろう。また、ゆっくり蹴るのではなく素早くけることによって水の慣性力を利用して窪みの一端を壁のようにすることでその点を支点として体を動かすのである。この推進方法は蝶の飛ぶ原理にもつながる（第３章参照）。

3 蝶はなぜ飛べる？

蝶は古来から不死不滅の象徴、また、魂や祖霊の化身としてとらえられて、デザイン化もさ



第1図
蝶は渦輪を使って上昇する。

れてきた。ひらひらと飛ぶ様子を見るとどこへ向かうのか予想もできなく、風に翻弄されているようでどこか頼りなく、つかみどころのない不思議を感じたに違いない。

蝶の大きさだと慣性力と粘性力の比であるレイノルズ数は約100程度であるから、「すーっ」と滑空もでき、さらにUFOの動きのような急に方向転換する「ひらひら」と飛ぶこともできる微妙な領域にいる。このような領域で、羽ばたくことによってなぜ推進できるかを次に示す。

第1図に示すように羽を打ちおろすときに発生する前縁からはく離する渦の低圧で羽の先端を空中に固定し、体操の吊り輪で体を持ち上げるように、体を持ち上げる[(7)]。次に羽を打ち上げる時には、体を垂直に起こして羽を打ち上げる際に先端に発生するはく離渦で羽先端を固定し、体を前に押し出し前進する。飛ぶというよりは体を引き寄せて移動するといった方がよさそうである。はく離渦の低圧によって先端を固定し、それを「てこ」の支点として移動する。

実は蝶の羽は薄い板のようであり、これを上下に羽ばたかせると、体は上がったり下がったりするだけになる。打ち下ろしと打ち上げで差を付けないと移動できないので、蝶の場合は体を水平にしたり、垂直にしたりして階段状に移動していく。これがひらひらと見える理由である。なお、薄板を急に動かすと、その先端は特異点となって真空状態になる。これで先端が固定されるのである。この方法はボートやカヌーのパドリングにもみられる。

これに対して、滑空時には、羽を開いてある角度（迎角）に固定し羽をあたかも薄い板翼のようにして揚力を得る。絶妙な低レイノルズ数領域であるからこそ、成せる業であろう。

なお、ハチなどでは翼のコード長（翼幅）が短いので、羽ばたきの打ち下ろしと打ち上げで羽の軸をひねって、あたかも8の字を描くようにして差を付ける。こうすることで羽ばたきの間常に揚力を常に上向きに発生させることができる[(8)]。羽の寸法を基準にしたレイノルズ数は小さいので、蜂は滑空はできない。したがって、常に羽ばたき続けなければならない。

蚊やハエを捕まえようとしても急に見失うのは急激な方向転換ができるからである。羽ばたきだからできる技である。ちなみに複眼で360°立体視できるので、彼等には死角がなく、また高いフリッカー融合頻度を持っているために、我々の動きをスローモーションで見ていることと微毛で空気の動きを察知するために、危険から素早く回避することができる。このような回避行動ができるのは、低レイノルズ数環境で羽ばたきを使っているためである。

4 サメやクジラはどうして速く泳げるのだろう？

サメは50km/hで泳ぐことができる。クジラの最高速度は30～45km/hである。海水の動粘性

係数は$1.10\times10^{-6}m^2/s$であるから、サメの体長を5m、クジラの体長を16mとすると、それぞれのレイノルズ数はサメが6.3×10^7、クジラが1.5×10^8である。表面近くの速度境界層はどちらも乱流である。境界層流れでは粘性によって表面上での速度0という条件（滑りなし境界条件）の縛りがあるので、表面上の速度勾配から摩擦力を求めることができる。表面近くの境界層の速度分布として実用的な近似式として乱流の1/7乗則速度分布を用いると、摩擦抵抗係数はそれぞれ、サメの場合が0.0020、クジラの場合が0.0017と求められ、サメの方がわずかに大きい。乱流境界層では乱れの元である細かな渦が主流のエネルギーを表面近くまで輸送するために、速度勾配が大きくなり乱流境界層の摩擦力は大きくなる。さらに、表面近くの縦渦によるレイノルズ応力も加わるので、摩擦力はさらに大きくなる。

サメの鱗に着目すると、鱗の一枚一枚に山脈のような突起が流れと平行に並んでいる構造―リブレット―を表面に付けると乱流境界層の摩擦抵抗を低減する効果がある[3]。レイノルズ応力を発生させる表面近くの流れ方向に軸を持つ縦渦であるストリーク構造がこのリブレットの山頂に固定され、乱れを押さえるとともに、表面近くの速度勾配を緩くする効果を発揮する。そのため摩擦抵抗が減るのである。

クジラは哺乳類であるので、サメのような抵抗低減効果のある鱗は無い。その代わり、柔軟な多層皮膚（コンプライアント壁）が流れに直行した方向の皺を作る。この皺の間に渦ができて、まるでコロのように表面近くの流れを滑らせ摩擦抵抗を減少させている[4]。また柔らかい表面は変動のエネルギーを吸収するために表面のごく近くでは再層流化がおこり、速度勾配が緩くなるために摩擦抵抗が減るとも考えられる。

サメの鱗のリブレット構造はヨットの船底、水着に応用され、摩擦抵抗低減の成功事例である。また、最近では航空機にもリブレット付きフィルムを張ったり、直接塗装でリブレット構造をつけて、燃費向上を図る試みがなされている。ただ、燃料費用と表面のメンテナンス費用との費用対効果は長距離路線を飛ぶ大型機において圧倒的にプラス（黒字）になるよう設計されているようである[5]。

サメやクジラの遊泳するための推進力は両者とも翼型断面をした尾ひれである。尾ひれの動きによって揚力を得てそれが推進力となる[6]。したがって、クッタ・ジュコブスキーの定理から、揚力を得るのに常に動き続けている必要がある。時々、クジラが湾や浜近くで動けなくなったので救出したといったニュースを耳にするが、流れの遅いところで止まると揚力を発生できなくなり、推進力を得られなくなるからである。

5 フクロウはなぜ音を発することなく獲物に向かって飛べるのか？

獲物に気づかれずに空から「すーっ」と音もなく襲い掛かるための静音の仕組みが、羽根の前縁に付いているセレーション（鋸歯状）と呼ばれるギザギザにある。蚊や蜂などは「ぷーん」といった羽音が聞こえる。これは羽ばたきではく離渦を発生させたことによる渦音である。したがって、一秒あたりの羽ばたきの回数が音の周波数となる。メスの蚊は約400Hzなので、楽器の基準音として使うラの音（440Hz）に近い。北風が吹いている様子を“オノマトペ”で「ピューピュー」と表現する。この音は通り過ぎる風によって木の枝や電線（円柱と見做せる）から規則的に発生するはく離渦に起因する。つまり渦が単位時間に何個発生するかが音の周波数になる。円柱の代表直径をD、風速をUとすると、発声する音の周波数fは、$f=0.2\times U/D$となる。たとえば、10mm（=0.01m）の直径の棒に風速10m/sの風が吹きつけると200Hz（低いソ（G3））、2mmの棒では中央のドより２オクターブ高いドに近い1,000Hzの音（ピーと聞こえる）が出る。枯れ木の枝を吹き抜ける時いろいろな直径の枝からいろいろな周波数の音が出るわけである。

さて、フクロウの羽根は流線形なので、通常状態で水平に飛ぶときははく離は起きない。しかし獲物を捕らえるときは降下の角度が大きく、

すなわち翼に当たる風の角度（迎角）が大きくなり、たとえ断面形状が翼型の流線形であっても翼の前縁ではく離泡と呼ばれるはく離流線が盛り上がった「こぶ」が発生する。この部分は円柱の上半分と見做せるので、そこからはく離渦が周期的に発生し音がでることになる。さてフクロウの羽の前縁にはセレーションが付いていたことを思い出そう。これによって細かな縦渦が発生し、それがはく離泡を羽のスパン方向に細かく分断するので、こぶが無くなり翼型となってはく離が起きず、音の発生が無くなるのである。

航空機の翼上面に「ハの字」の突起が付いているものがあるが、それはボルテックスジェネレータ（VG：縦渦発生器）と呼ばれる。これは翼のはく離を防ぎ、失速しないようにするものである。まさにセレーションと同じ働きをするものである。また、新幹線のパンタグラフの架台にこのセレーションをつけて静音化したことで有名である。はく離を防止することで空気抵抗も小さくなり、省エネにもつながる技術なのである。

6 毛細血管網、葉脈、翅脈など細い管のネットワークになぜ流体を流せるのか？

針の付いた注射器から液体を出すときに、ピストンを押すのに結構な力がいることを想像できるであろう。これは電気抵抗が銅線の長さに比例し、太さに反比例するということがらも想像できるように、管内の流体抵抗もこれと全く同じ法則で針が細ければ細いほど大きな抵抗となることに起因する。

毛細血管は平均直径が8μm、全部をつなぎ合わせるとその全長は10万キロメートルにも及ぶと言われている。そのような管に血液を流すには心臓のパワーが大きくないと流れそうにもない。ところが、人間の心臓で押し出す圧力は0.1気圧程度、流量は一分間に５リットルほどであるから、パワーは１ワット程度なのである。昔の蛍光灯さえ一本当たり20ワットである。ヘアドライヤーに至っては1,500ワットなどというものもある。これらに比べると心臓のパワーは小さい。

それにも関わらず、毛細管ネットワークに流し、体の隅々から回収してまた心臓に戻してくるのは驚きである。しかし、次のように考えてみるとなるほどと納得できる。つまり、大動脈の断面積は$7.1\times10^{-4}m^2$、毛細血管のそれは$2.0\times10^{-11}m^2$、分岐回数が30回とすると毛細血管の数は1.1×10^9本となり、毛細血管の総断面積は毛細血管一本の断面積×毛細血管の数であるから、$0.02m^2$となる。つまり、大動脈の断面積の28倍にも広がっているのである。したがって、心臓から見ると細い管に高い圧力で押し込んで流しているのではなく、広い空間にゆっくりと放出するようなものなので、高い圧力は必要としないのである。分岐して断面積を広げ、体積流量一定（連続の式）の式から推定できるように、広がったところでは速度は遅くなる。

葉脈や翅脈を見ると、全て分岐が見られる。毛細血管網から想像するに、それらの中を液体を流すのは意外と小さな圧力で済むのである。

7 カワセミは飛び込んでもなぜ魚に気づかれないのか？

カワセミが飛び込んで魚をくわえて飛び上るのをみると、「なぜ魚は天敵が飛び込んでくる衝撃に気が付かないのだろう？」と不思議に思う。水中の音速は空気中のそれに比べて速く、1,500m/sである。魚が水面から50cm下を泳いでいるとすると、カワセミが飛び込んだ衝撃が魚に伝わるのは0.3msであるから、魚はすぐに異変に気付くはずなのである。しかし魚が気づいたとしても魚の反射神経が応答するまでには2msかかる。つまり、カワセミが魚を捕えるために必要な時間は最大でも0.3＋2=2.3msである。よって、カワセミは50cmを最低でも2.3msで進んでこないと魚に逃げられることになる。その速度はなんと217m/sにもなる。

しかし、カワセミがダイブする速度は時速100kmほどと言われるので、秒速では28m/sである。この速度で水中を進んだとすると、2.3msでは6.4cmの水深にいる魚しか捕まえられないということになる。50cmの水深にいる魚を捕まえようとすれば、カワセミが飛び込んでから50cmの水深に到達するには28m/sの速度では18msかかるので、飛び込んだことにも、近づいていくことにも魚に気付かれないようにしなければならない。つまり、カワセミはダイブ時と水中を進むときには少なくとも魚にとって異変となるような圧力波を生じさせないようにしなければならないのである。

カワセミは嘴からダイブするので、突入速度に対して、嘴が周囲の水を押しのける速度が緩慢であれば衝撃は生じない[9]。このことを利用したのが、新幹線のノーズ形状である。トンネルに入るときの衝撃圧力の発生を和らげる形状としてカワセミの嘴形状が採用されている。

水面に突入前は羽を体に密着させ流線形となって進んでくるためにはく離による音の発生はないので、飛んできているという状況も水中には伝わらない。また、水面に入る瞬間は嘴の形状で衝撃が発生しないので、これも気づかれない。水に入る瞬間に羽を広げ、羽にも空気をまとわせる。空気層が摩擦抵抗を下げるので、羽を広げていても飛び込み時のスピードを保ったまま高速で進んでくるのであろう。したがって、カワセミの体全体が薄い空気の層で包まれて水中を高速で進んでくるために魚は気が付かない[10]。魚をとらえた後、すぐに、まとった空気の浮力で水面まで戻る。したがって、常に空気の膜で覆われているために、水面に出て飛び上るときは羽は濡れていない。空気の膜がカワセミを魚から見えなくし、魚にとっては大きな泡が入ってきたとしか認識しないのであろう。

8 おわりに

ここにあげた例はほんの一部である。生物を見たから何かヒントが得られるのではなく、何が欲しいか知りたいかということを明確にして、自分の専門を基準にして生物を見ると気づくことが多い。

＜参考文献＞

(1) 望月・市川：「生物から学ぶ　流体力学」、養賢堂、pp. 144-152 (2010)
(2) 望月・菊地：「アメンボはなぜ浮けるのか？」、可視化情報 Vol. 30 No. 119、pp. 28-33 (2010年10月)
(3) Walsh, M. J., Turbulent boundary layer drag reduction using riblets, AIAA Paper 82-0169, (1982)
(4) Zheng, S., Liang, X., Li, J., Liu, Y., Tang, J,. Drag reduction using bionic groove surface for underwater vehicles, Front. Bioeng. Biotechnol., 25, pp. 1-13 (2023)
(5) https://aerospaceglobalnews.com/news/austrian-airlines-aeroshark-boeing-777-fuel-saving/
(6) 望月・市川、「生物から学ぶ　流体力学」、養賢堂、pp. 119-122 (2010)
(7) 望月、市川：「生物から学ぶ　流体力学」、養賢堂、pp. 137-143 (2010)
(8) Goldsworthy, G. J., Wheeler, C. H., Insect Flight, CRC Press Taylor & Francis Group, (1989)
(9) 望月、市川、「生物から学ぶ　流体力学」、養賢堂、pp. 98-100 (2010)
(10) https://www.youtube.com/shorts/Lu5EZWTU8og

筆者紹介

望月　修
東洋大学　名誉教授
＜主なる業務歴および資格＞
生物に関わる流体力学に関する研究
工学博士