

〔特集〕 乗り物の流体力学

揚力と抗力

Lift and Drag

*東大・先端研 河内 啓二†
Keiji KAWACHI

1 揚力と抗力

流体中を移動する物体に働く流体力成分には、揚力と抗力があることはよく知られている。揚力は図 1 に示すように対気速度に対して直角方向の力であり、平行な力は抗力と定義される。物体が一定速度で飛行している、いわゆる定常状態では、翼の揚力や抗力について、膨大・精密な測定データベースがある¹⁾。代表的な揚力係数、抗力係数の迎角に対する変化を示すと図 2 のようになる。これから、揚力は迎角に敏感で、迎角によって制御しやすい量であり、抗力は迎角に鈍感で、迎角変化によりその大きさを変えにくい量と言える。また揚力係数と抗力係数は同じ物理量によってそれぞれ無次元化されているので、ある迎角における物体の揚力と抗力の比（揚抗比）は、そのままそれぞれの係数の比となり、図 2 の例では揚抗比が 100 に達することが読みとれる。これは 1 N で翼を前方へ引っ張れば、100 N の重さを持ち上

げることができるという途方もない話である。

歴史を眺めると、人類はまず最初に抗力に気づいたらしい。速く走った時に空気の抗力を肌で感じたり、強い風で風下に吹き飛ばされそうになったりした経験があれば、当然抗力の存在に気づくだろう。歴史上最初に記録に現れた風車は 10 世紀のペルシャの事典に記録されたものであり、抗力を利用して²⁾。図 3 に示すように平らなブレードをわらで作り、垂直軸の回りに回転させ、根本において回転軸の運動を小麦の脱穀に利用した。何もしなければ、風に正対する左右のブレードの抗力は等しくなって回らないので、風

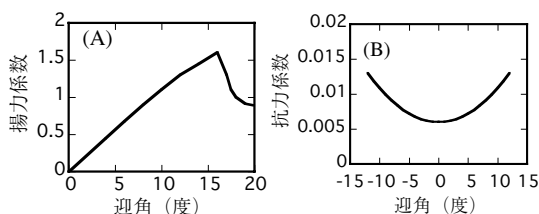


図 2 揚力と抗力の迎角による変化

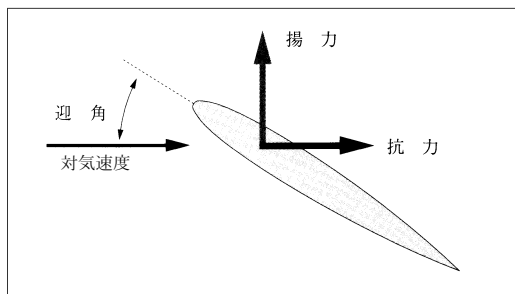
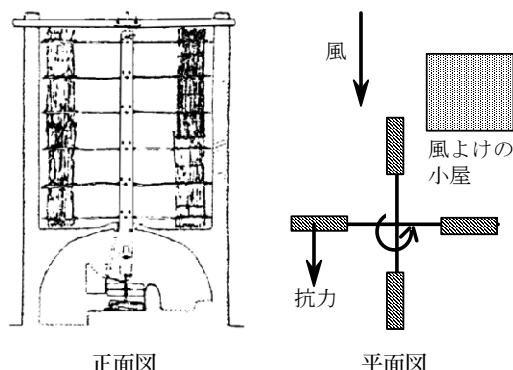


図 1 揚力と抗力



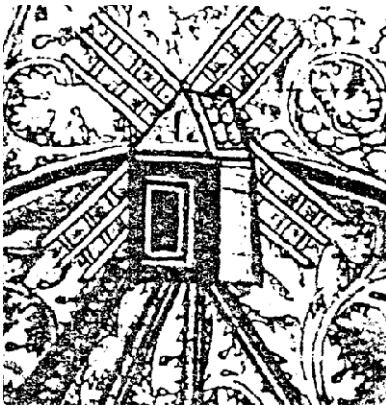
正面図

平面図

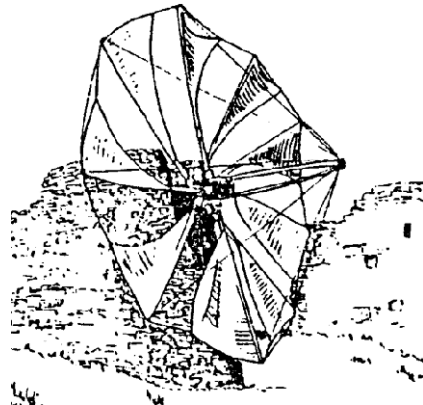
図 3 抗力利用型風車 (10 世紀)²⁾

* 〒153-8904 目黒区駒場 4-6-1

† E-mail: ukeiji@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp



(A) 西欧 (13 世紀)



(B) 地中海 (15 世紀)

図 4 揚力利用型風車²⁾

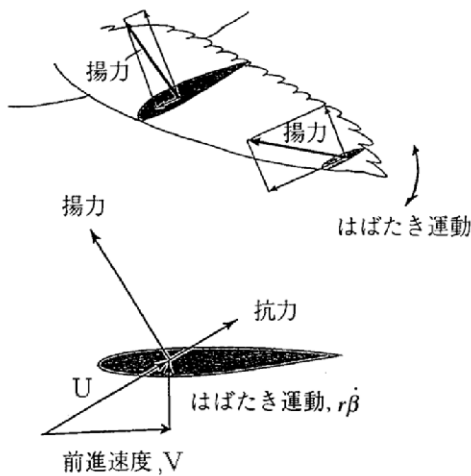
車の風上に小屋を作って風よけにして、片側のブレードの抗力を弱めトルクを生じさせる。この型式はそのまま受け継がれ、20 世紀の後半になってもイランやアフガニスタンで実際に見られたそうである。風車に対して抗力の代わりに揚力を使うこと、そして揚抗比の大きな翼の形状に人々が気がついたのは、記録が残っているところでは 13 世紀である。木製のブレードでできた水平軸プロペラ型の風車のスケッチが西欧に残っている(図 4 (A))。一方、この技術とは全く無関係に、地中海の島々においては、図 4 (B) に示すような布とロープでできた別の水平軸プロペラ型の風車が発達した。こちらはナイル川や地中海を航行した帆船の帆から、揚力の利用を思いついたのではないかとされている。日本のかざぐるまでも見られるこの水平軸プロペラ型では、風に直角方向の力すなわち揚力でブレードが回転する。ブレードの揚抗比が大きければ、抗力利用型よりずっと小さな風車で、同じ大きさのトルクを発生することができる。西欧で発生した木製ブレードの水平軸プロペラ型風車の技術は、オランダの風車を産み、今日の風力発電用風車に綿々と受け継がれている。

同様の抗力から揚力への転換は、船の推進機でも生じている。フルトンの世界で初めての蒸気船が外輪船であったことはよく知られている。外輪船のブレードでは、対気速度と平行な流体力すな

わち抗力で船を推進させる。これに対してプロペラ(スクリュー)では、ブレードの進行方向と直角方向の流体力(揚力)で船を推進させる。ここでも風車と同様に、揚抗比の大きな翼型を使えば、同じトルクを与えてもスクリューの方がはるかに大きな推進力を発生できる。かくして、外輪船は少数の例外を除いてスクリューに置きかわっていった。

2 生物の推進

揚抗比は生物の推進にとっても重要である。生物は通常、はばたき飛行により重力に対抗する上向きの空気力と、全体の抗力に対抗する前向きの推進力を発生する。図 5 に示すように水平に飛行する生物を考えると、もしはばたき運動をしていないと、どんなに揚抗比の優れた翼を持っていたとしても、揚力は真上に、抗力は真後に発生するので、抗力に対抗する推進力が発生できず飛行速度は徐々に減少し、飛び続けられなくなってしまう。はばたき運動を行うと、翼の断面では水平前進速度成分 V に加えて、上下運動 $r\dot{\beta}$ (r は関節から翼断面までの距離、 $\dot{\beta}$ ははばたき角速度) が発生し、翼の対気速度 U が斜めに傾く。その結果、揚力は対気速度に直角に発生するので前傾し、水平方向成分が生じ、それを推進力として全体の抗力に対抗して飛行し続けることができる。翼端では $r\dot{\beta}$ が大きいので揚力は大きく前傾して推進力を、

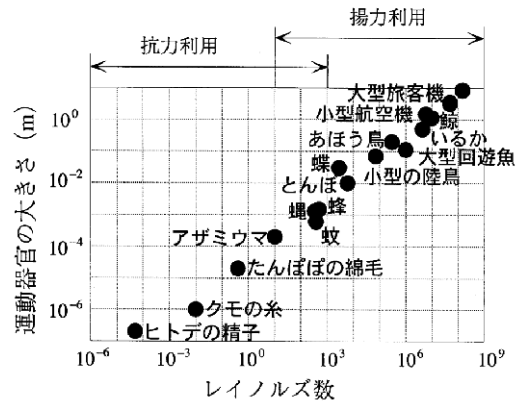
図5 鳥の羽ばたき飛行⁸⁾

翼の付け根では $r\dot{\beta}$ が小さいので揚力はあまり前傾せず上向きの力をそれぞれ発生し、重力と胴体の抗力にバランスしている。もし翼の揚抗比が大きかつ翼以外で発生する抗力が小さいと、わずかな翼運動すなわち小さな $\dot{\beta}$ で充分な推進力が発生でき、はばたき運動に必要な筋肉の仕事量は小さくて済む。一方、翼の揚抗比が小さいと、飛行し続けるために大きな翼運動が必要となり、筋肉の仕事量は大変なものとなる。

魚の尾びれの左右運動も同じことと考えられる。ただし水中では浮力が利用できるので、魚は重力に対抗する上下方向の力は浮力にまかせることができ、尾びれはただ推進力だけを発生すれば良い。揚抗比の大きな尾びれを使用すれば、ごくわずかな尾びれの左右運動で前進し続けることができる。ところが、揚抗比の小さな尾びれでは前進するためには素早い左右運動が不可欠となり、大きな筋肉パワーが必要となる。魚の尾びれの平面形状のアスペクト比により揚抗比が大きく変化することから、魚の尾びれの性能と魚の生態の関係が翼理論によりきれいに説明されている³⁾。

3 物体の大きさと揚抗比

揚力と抗力は微細に見ると物体表面の圧力と粘性力の総和である。揚力は圧力だけから発生し、抗力は圧力と粘性力の両方から発生する。圧力

図6 運動器官の大きさとレイノルズ数⁸⁾

と粘性力の比はレイノルズ数と考えられるから、レイノルズ数を翼弦長（前縁と後縁の間の距離）と対気速度 U で定義すると、 $[\text{レイノルズ数}] = [\text{翼弦長}] \times [\text{対気速度}] / [\text{動粘性係数}]$ となるので、レイノルズ数の大きいところでは揚力が卓越し、小さいところでは抗力が大きくなる。つまり揚抗比はレイノルズ数とともに増減する。自然界や人工物の運動器官の大きさ（翼弦長）とレイノルズ数を図示すると、図6のようになる。水中では動粘性係数が空中より一桁小さい（粘性は約100倍だが密度は約1000倍）ため、水中のレイノルズ数は大きく、大型の回遊魚や鯨の尾びれは航空機と類似のレイノルズ数で作動する。効率の良い飛行や泳ぎに適した生態を持つ生物（例えば回遊魚や渡り鳥）にとっては、揚抗比は重要であるから、それぞれのレイノルズ数においてできるだけ揚抗比の大きな形状に運動器官が進化している。従って、大型の回遊魚の尾びれの断面と風洞実験により見出された良好な翼型との一致がいくつか報告されている⁴⁾。これらの翼型はレイノルズ数 10^5 以上であるため、よく知られているように前縁が丸く後縁がとがり翼弦長の10～20%の最大厚みを持った流線型をしている。

運動器官が小さくなるとレイノルズ数が低下するため、どんなに優れた翼型でも揚抗比は低下する。昆虫の翅の作動レイノルズ数は1000の領域であるが、そこでは揚抗比はせいぜい10である⁵⁾。翼を動かさない滑空飛行では、径路角（水

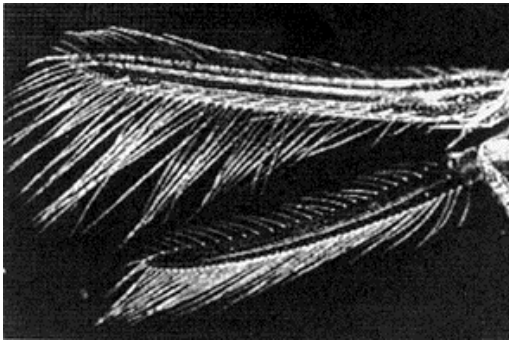
平線と飛行径路のなす角)は揚抗比に一致するので、高レイノルズ数 ($> 10^5$) で飛行する大型の鳥類が優雅に滑空飛行をするのに対し、昆虫が絶えず翅を動かし続けなければならないのはこの理由による。翅を止めて滑空飛行に移れば、たちまち高度は低下してしまうからである。レイノルズ数が変わると優れた翼型すなわち最大の揚抗比を与える翼型も変化する。昆虫の飛行領域では翼は薄ければ薄いほど、そして反りとギザギザがついた形状が優れた翼型と言える⁵⁾。昆虫の翅や紙飛行機の翼は、これらの特徴をよく捕らえている。トンボの翅では透明な膜の厚みは約 $2\mu\text{m}$ であり、黒色の支脈は直径 $10\sim 100\mu\text{m}$ のパイプ構造をしている。従って翼弦長 1cm に対して膜の部分の翼圧比は 0.02% である。レイノルズ数 1000 の領域では翼周りの流れはひたすら層流で、翼表面上に少々工夫をしても流れを乱流に遷移させることは難しい。その結果、レイノルズ数 10^4 領域で有効である遷移を利用した翼性能の向上の方法、例えば前縁をとがらせたり表面を粗くしたりする方法は、レイノルズ数 1000 の領域ではほとんど効果が期待できない。筆者達のグループはこれまであまり知られていなかったレイノルズ数 1000 の領域の翼型空力性能を実験と理論の両面から調べ、結果をデータベースとて構築した⁶⁾。微小機械の設計等で詳細をお知りになりたい方は、ホームページを参照されたい。

昆虫の飛行領域を詳細に眺めると、図 6 から読みとれるように運動器官の大きさが大きく変化してもレイノルズ数はほとんど変化しない。これは翼の対気速度にはばたき運動の速度 $v\beta$ が寄与しているためで、昆虫は一般に翼が小さくなるほどはばたき周波数が増加する。トンボやチョウでははばたき周波数が 10 数 Hz であるのに対し、ハチやハエでは 200Hz を越え蚊に至っては $500\sim 1000\text{Hz}$ になる。ここまで周波数が高くなると翅の流体力の変動が可聴領域に達し、蚊の飛行音はいわゆる翅の空力騒音を聞いていることになる。筆者の目には小さな昆虫はレイノルズ数の低下による揚抗比の減少を避けるため、必死ではばたき

周波数を上げているように映る。このため昆虫はかなりの無理(工夫)をしている。生物の筋肉は通常神経の 1 パルスまたは複数パルスによって 1 収縮を起こす同期筋であり、筋肉の収縮のタイミングを神経パルスによって正確に制御する。ところがはばたき周波数が約 100Hz を越えると、昆虫は 1 パルスによって数回 ~ 10 数回の筋肉収縮を起こす非同期筋と呼ばれる特殊な筋肉を発達させ、神経制御の速さを越えたはばたき周波数を実現している。また大きなはばたき周波数により翅に働く遠心力は増大し、蚊の翅の翼端では 1000G という大変な値に達している。

翼の揚抗比が 1 となるのは、レイノルズ数が 10 の領域である。従ってこれ以下の大きさでは揚力の利用は優位性を失い、自然淘汰の歴史を経た生物は、ほとんど例外なく抗力利用の推進方法を採用している。前述したように、抗力はその大きさを迎角で制御することが難しく、またこれを利用した運動は風のまにまに風下へ流されて行く形態をとることが多いため、目的地に確実に着くことが難しい。自然界ではこれに対応してタンポポの綿毛やキノコの胞子のように、個体の数を増やして確率的に目的地へ達する戦略を採用していると考えられる。

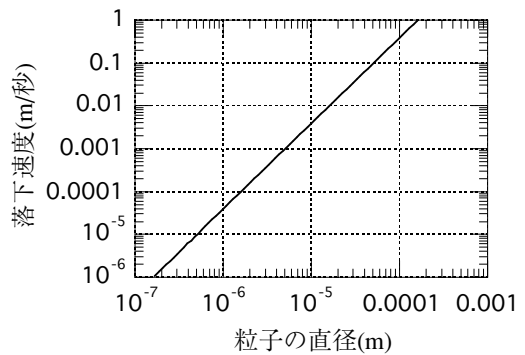
以上のことから抗力から揚力へ機械類が発達した人類の歴史はその大きさがメートルサイズだからこそ起こったのであり、微小な機械では必ずしもそうはならない。また最小の翼は 0.1mm 程度であり、その作動レイノルズ数は約 10 であると言える。この最小の翼のあたりに図 7 に示すような支柱と毛でできた翼(毛翼)で飛行する一群の昆虫がいる。アザミウマやタマゴバチ等がこの独特の翼を持ち、毛と支柱が 1 枚の翼を構成していると仮定すると、はばたき面に直角方向の流体力すなわち揚力を用いて飛行していることが確認された⁷⁾。この研究では筆者らは高速度ビデオでアザミウマの自由飛行を精密に撮影し、重心の移動と翼の運動のデータから翼に働く空気力ベクトルを苦労して推定した。全ての解析が終わった後、始めて結果を聞いた筆者の恩師の東昭先生は

図7 アザミウマの翅⁷⁾

一言、「もし抗力で飛行するなら支柱は図7で毛の真ん中にある筈だ」。わかっている人は最初からわかっているのである。この毛翼と膜翼の優劣は膜翼と流線形翼のように明確ではなく、現在、解明が進んでいる。

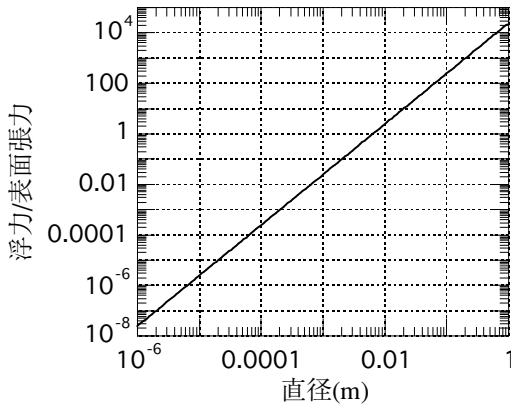
4 さらに小さな物体では

物体の大きさがマイクロメートルのサイズになると、生物は特別な運動器官が無くても、抗力だけを利用して長時間空中に滞ることができる。生物の比重は共通にほぼ1であるので、生物の形を球と仮定すると重力は l を直径、 g を重力加速度とすると $(1/6)\pi l^3 g$ で与えられる。一方、この作動レイノルズ数では、抗力はほぼ粘性力だけとなるので、落下速度を V とするとストークスの定理により抗力は $D = 3\pi\mu V l$ で与えられる。生物の比重が空気密度に比べて充分重いので浮力は無視でき、重力と抗力を等置することにより落下速度が $V = l^2 g / (18\mu)$ と求まり、図8のようになる。落下速度が直径の2乗に比例するので、生物が小さくなると急激に落下速度は遅くなり、小さな生物では何もしなくても極めてゆっくりとしか落下しない。室内のように極めて静かな空間でも微小な流れがあるので、ほんのわずかな上昇気流に乗って、小さな生物は長時間空中に漂うことができる。このことは、比重1の微小な水滴が雲や霧となって長時間空中に浮かぶ様子からも容易に理解できる。室内で容易に見い出せる上昇気流のレベルである10cm/秒以下の落下速度になるた

図8 比重1の粒子の落下速度⁹⁾

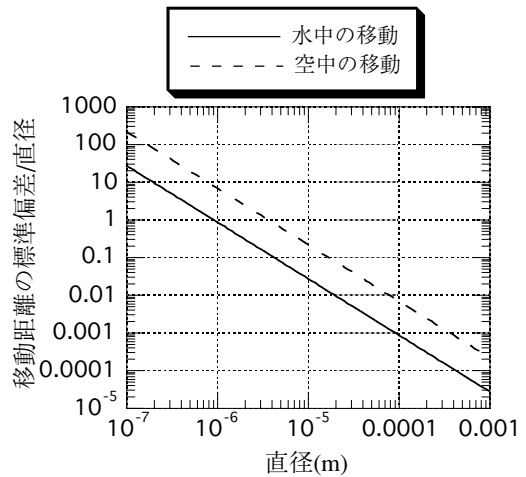
めには、直径が100 μm 以下であれば良い。さらに、細菌などのサイズである直径が1 μm 以下ならば、落下速度は40 $\mu\text{m}/\text{秒}$ に低下する。1mの高さの人の口から飛び出した細菌は、全く上昇気流のない環境でも地上へ達するまでに約7時間かかることになる。一方、アザミウマほどの小型の昆虫でも胴体のサイズは約1mmであるので、落下速度は約40m/秒に達する。従って、小型昆虫でも飛行するためには充分な上向きと前向きの流体力を発生する必要がある、そのための運動器官が不可欠である。

水の分子では電荷が局所的に偏在するので、分子同士が引き合う。その結果、水の表面では表面張力が働くことになる。浮力は物体が押しのけた水の体積に比例するので、物体が完全に水没した状態では、浮力は l^3 に比例する。一方、表面張力は物体と水面の接触線の長さに比例するので、 l に比例する。従って表面張力と浮力の比は $1/l^2$ に比例し、物体のサイズが小さくなると急激に表面張力の割合が大きくなる。物体の形状を球と仮定して、そこに働く水の最大の表面張力と、物体が完全に水没した時の浮力の比を求めると図9のようになる。ただし水と物体の接触角は、撥水性のアクリルと同等の75°と仮定している。メートルサイズの物体では浮力が圧倒的に大きい。両者は約7mmの直径の時等しくなり、マイクロメートルのサイズでは表面張力が卓越する。アメンボや水ゲモなどの微小生物の一群が、水面上で繁栄できるのは、これにふさわしい大きさで

図9 表面張力と浮力⁹⁾

あるからである。アメンボの足の直径はおおよそ $100\mu\text{m}$ である。

物体が小さくなってゆくと流体の連続体の仮定が崩れ、流体の分子の運動を考えなければならないが、その最初の影響はブラウン運動として表れる。微小粒子が分子の平均自由行程よりはるかに大きく、微小粒子の周辺を流体分子がぎっしりと取り囲んだ状況でも、分子の熱運動の不均一さにより微小粒子が振動する。そして粒子がひとたび動き出すと、その粒子に働く抗力が連続体を仮定した流体モデルで取り扱うことができる領域が存在する。振動のエネルギーの期待値は微小粒子のあらゆる方向の並進運動および回転運動で等しく $k_B T$ (k_B はボルツマン定数、 T は絶対温度) であり、そのエネルギー量は微小粒子の大きさによらない。図10は球形の粒子が 15°C の温度中でブラウン運動をした時、1秒後の移動距離の標準偏差を粒子の大きさで無次元化して、粒子の大きさに対して示したものである。この量は粒子の位置のバラツキの大きさを示すものであり、粒子の大きさの $3/2$ 乗に逆比例するので、粒子径が小さくなると急激に増大する。これにより、物体が自分のサイズの何倍の距離をブラウン運動により単位時間に移動するかの目安をつけることができる。粘性係数の違い、すなわち抗力により流体が吸収するエネルギー量の違いにより、同一の温度で同一の大きさの物体がブラウン運動すると、空中では水中よりも約8倍標準偏差が大きい。また水中

図10 ブラウン運動による移動⁹⁾

では物体の直径が約 $1\mu\text{m}$ 以下に、空中では $4\mu\text{m}$ 以下になると、単位時間に自分の大きさ以上の距離を動く可能性が約30%になる。一方、物体のサイズが $100\mu\text{m}$ 以上になると、ブラウン運動による移動は物体のサイズの1%以下となり、ブラウン運動の観察が難しくなる。このような環境は生物の形態や運動にも当然大きな影響を与える。 $1\mu\text{m}$ 以下のサイズの生物ではブラウン運動による外乱が大きくなるので、エサと出会う確率も捕食者から逃げる確率もその努力にかかわらず、ほとんど偶然によって支配される。運動の目的地を詳細に定めたり、特定の姿勢を保ち続けることも難しい。メートルサイズの常識に従ってこのような外乱を制御しようとするのはとても無謀と思われる。微小な生物はこの環境を生かし、この環境に適応する生活形態を作っている。個々の生物個体ではなく、かなりの数の個体に分裂して統計的に生き延びようとする。どちらの方向からエサが来ても大丈夫のように、あらゆる方向にほぼ均一に取り込み手段を持つ。移動は流体の大きな外乱に妥協しつつ、直線的ではなく平均的にゆっくりと漠然とした方向を目指す。

5 おわりに

本稿では図らずも、筆者の研究対象の移り変わりがそのまま本解説の進みに重なった。筆者の研

究はメートルサイズの飛行力学から出発し、ようやくマイクロメートルの入り口にさしかかったところだが、世の中の動きは思いの外早く、楽しみながら研究テーマをつまみ食いしているうちに、筆者を追い越しそうな勢いである。それぞれの分野の専門家にお知恵を拝借して研究のスピードアップを図るのが良いのだろう。読者諸兄の御助言を頂ければ幸いである。本稿の個々のテーマを巡る詳しい内容は、本誌の特集号として既にまとめられており、生物流体については21巻第2号(2002年)で、また微小サイズの流体については20巻第2号(2001年)で優れた貴重な解説が行われている。

引用文献

- 1) 例えば Abbott, I. H. & Doenhoff, A. : Theory of Wing Sections, Dover, New York (1958).
- 2) Drees, J. M. : One thousand years of rotating wing, Fifth European Rotorcraft and Powered Lift Aircraft Forum, Amsterdam, The Netherlands, Sept. (1979).
- 3) Azuma, A. : The Biokinetics of Flying and Swimming, Springer-Verlag, Tokyo (1992).
- 4) 例えば 神部勉 : 動物の流体力学的運動, 日本航空宇宙学会会誌 **277** (1997) 53–62.
- 5) Sunada, S., Yasuda, T., Yasuda, K. & Kawachi, K. : Comparison of wing characteristics at an ultralow Reynolds number, J. of Aircraft **2** (2002) 331–338.
- 6) <http://157.82.67.25:8080/sdb/>
- 7) Tanaka, S. : Analysis of Thrips Flight, *Proc. of Workshop on Insect Flight* (Tokyo, 1995).
- 8) 河内啓二 : 昆虫の飛行メカニズム(流体力学的視点から), 生物物理 **225** (1999) 279–284.
- 9) 河内啓二他 : マイクロマシーン(第5章第4節マイクロフライト), 産業技術サービスセンター (2002) 231–239.