Flight mechanism of insect is different from that of our familiar system of aircraft, machinery, or bird. Recent studies quantitatively indicated that many features of insect flight mechanism, such as thin airfoil, high beating frequency, or continuous beating motion, well conform to the fluiddynamic condition given to the insect.

insect flight mechanism / thin airfoil section / beating motion / unsteady aerodynamics / Reynolds number / bio-fluidynamics

1. はじめに

大空を自由に飛翔する鳥や昆虫は、長い間人類を魅了し続けてきた。しかし、一見、楽々と飛翔しているように見えるこれらの生物たちも、強大な重力に打ち勝つために、さまざまな工夫を凝らし、また多大の犠牲を払っている。骨格は軽量化のためにその構造が規定され、食物は食べるや否や排泄に向かい、脳や足もきわめて単純かつ軽量である。飛翔する生物の運動メカニズムが、ほとんど画一的に羽ばたき飛行であり、翼の形状も一見よく似ているのは、この厳しい環境に由来している。海中や水中の生物が、同じ流体中の運動でありながら（つまり、同じ基礎方程式（ナビエ・ストークスの式）に支配されているが）、マグロやサバのように尾ひれを振って前進するもの、ウナギやウツボのように胴体をくねらせて泳ぐもの、エビのように足も使うもの、さらにイカやクラゲのようにジェット推進をするものまで、極めて多様性に富んでいる¹⁾のとは、好対照である。水中では、浮力を使って重力に対抗でき、運動はただ推進力を発生すればよいという制約の穏やかな環境が実現されているからである。

このように重力に対抗しなければならないという厳しい環境が、飛翔する生物の運動メカニズムや運動器官の形状を、飛ぶという目的のためだけに適応させている。逆にいうと、これらのメカニズムや形状は、飛ぶという行動からとらえると非常に理解しやすいものとなっている。この点が生物の飛翔メカニズムを調べる研究の、大きな魅力となっている。

運動器官とその目的が1対1に対応しているという

ことは、現在の科学のレベルから見ると大変ありがたい。たとえば人間の手は、野球のバットも握れば、拳骨という形で殴る道具ともなり、また指を折って数も数える。このようにさまざまな目的に使われていると、その形状や運動メカニズムがどう優れているかを調べるが大変難しい。

2. 昆虫の翅はなぜ薄いのか

2.1 翅の形状

昆虫の翅は一般にきわめて薄い。一例として図1にトンボの翅の平面形状と断面形状を示す。構造の複雑なトンボの翅では、付け根から翼端に向かって網目状の黒色の支脈が走り、その間を透明な薄膜がおおっており、支脈はパイプ状の構造をしている。翼弦長（図1のA-A方向の翼の長さ）は10 mm程度、支脈の直径は太いもので100 μm 、細いもので10 μm 、薄膜の厚さは2 μm 程度なので、細かく見ると翼の表面に50倍程度の凸凹がついていることになるが、これらは翼弦長に比べると無視できるほど小さい。しかし断面形状に示すように、全体に高さ1～2 mm程度のギザギザがついていて、これは翼弦長に比べて有意の大きさとなって翼断面（翼型）を形成

図1 トンボの翅

Flight Mechanism of Insect (From Standpoint of View of Bio-Fluidynamics)

Keiji KAWACHI

Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo

図2 揚力と抗力

している。

一方、我々のよく知っている航空機の翼やタービン翼では、性能のよい翼断面は図2に示すように前縁が丸く後縁が尖り、翼弦長の10～15%程度の最大厚みをもった美しい流線型をしていて、昆虫の翅断面とは似ても似つかない。このような差はそれぞれのサイズにとって最も適した形状をとることにより生ずることが、ようやく定量的に明らかになってきた²⁾。

2.2 流体力と運動器官の大きさ

自然界や人工物の運動・推進器官を、レイノルズ数で整理してみると図3のようになる。レイノルズ数は物体に働く慣性力（圧力）と粘性力の比で、物体の大きさと速度をかけたものを動粘性係数（粘性係数と密度の比）で割った値として計算される。水中と空中の動粘性係数の大きさの違いにより、水中のレイノルズ数は小型や低速の運動器官でも思いのほか大きく、多くの水中生物が大型の陸鳥の運動器官や航空機の翼に近い大きなレイノルズ数（ $Re \sim 10^4$ ）で作動する。一般にサイズの大きな運動器官は、サイズの小さなものより高速で動く。このため、水中と空中の違いを除くと、運動器官のサイズが大きなものから小さなものへと変化すると、レイノルズ数もそれに見合っただけでほぼ同じように変化していく。

図2に示すように、物体の前進方向（物体に固定した座標で考えると、物体に対する一様流速）に直角方向の流体力を揚力、平行な流体力を抗力という。揚力は慣性力だけから発生し、抗力は慣性力と粘性力の両方から発生するので、図3に示すように、レイノルズ数が大きくなると揚力が卓越し、小さいと抗力が支配的になる。我々のよく知っているレイノルズ数が 10^5 以上の世界（空中ではメートルのサイズ、そして水中では10センチメートルのサイズ）では、よくできた翼型の揚力は抗力の100倍に達する。つまり理論的には、1Nで前へ引っ張ると100Nの重さを持ち上げることができる。

図3 運動器官の大きさとレイノルズ数

したがって、この世界では人工物も生物もほとんどすべての運動器官が揚力を利用している。しかし、物体のサイズが減少し、レイノルズ数が小さくなると、揚力と抗力の比（揚抗比）は急激に低下していく。レイノルズ数が1000のオーダー、すなわち、昆虫の飛行領域では揚抗比は約10倍になり、さらにレイノルズ数が10の領域になると、揚力と抗力は同程度になってしまう。したがって、これ以下のレイノルズ数領域では、翼を使って揚力を発生するよりも、パラシュートのように抗力を使って飛翔するメカニズムが採用されるようになる。タンポポの綿毛やキノコの胞子が風のまにまに漂って風下へ流されていき、風と直角方向の運動ができないのは、このような理由による。したがって、私たちはレイノルズ数10の領域が、翼の最小サイズであると考えており、昆虫の飛行領域はちょうどここに相当する。

2.3 羽ばたき運動

生物にとっても人工物にとっても翼の揚抗比はとても大事である。水平定常飛行をしている航空機では、プロペラやジェットエンジンの発生する推進力と抗力とが釣り合い、重力と揚力が釣り合う。したがって、揚抗比の大きな翼ほど、同じエンジンやプロペラを使って、より重い物体を持ち上げることができる。一方、生物の羽ばたき飛行では、以下に説明するように翼は推進力と上向きの力をともに発生する。翼のある断面を考え、そこに働く空気力を考えよう。図4に示すようにこの場合は生物の前進速度に加えて、羽ばたき運動による翼断面の速度 $r\dot{\beta}$ が生ずる。ただし、 r は翼の付け根から翼断面までの距離、 β は羽ばたき角である。その結果、打ち下ろし中の翼に対しては、斜め下方から上向きに相対速度 V が生ずる。この相対速度に直角に翼断面の揚力が発生し、平行に抗力が発生する。上向きの相対流速

図4 はばたき飛行のメカニズム

のおかげで揚力が前方に傾き、この水平成分を推進力として、また垂直成分を重力に対抗する上向き力としてそれぞれ利用することができる。したがって、揚抗比の大きな翼ほどごくわずかの打ち下ろし速度で、つまり筋肉のわずかな仕事で大きな前進力を発生させることができる。また図に示すように翼端では r が大きいため揚力が前方に大きく傾き、また翼根では傾きが小さい。この結果、羽ばたき翼ではおもに翼端で前進するための推進力を、また翼根では重力に対抗するための上向きの力を発生させている。

2.4 大きさに適した翼型

上述のように翼の揚抗比は重要であるが、昆虫では、レイノルズ数の制約により揚抗比が鳥や航空機に比べてはるかに小さいという宿命をもつ。昆虫が滑空飛行をほとんどせず、常に羽ばたき続けるのもこのためである。揚抗比が小さい翼では滑空飛行の降下率が大きくなり、滑空距離も滑空時間も小さいうちにどんどん高度が失われてしまうからである。しかし、サイズの制約つまりレイノルズ数の制約の範囲内で、できるだけ性能のよい翼断面形状はどのようなものであろうか。そのヒントは、図3に示した類似の作動レイノルズ数をもつ運動器官の形状を調べるにより得ることができる。たとえば、高レイノルズ数領域（ 10^6 以上）の例をあげよう。図5は、NACA（米国航空宇宙局（NASA）の前身）で風洞実験により開発された性能のよい航空機の翼型と、回遊魚の代表としてパチマグロの尾びれの断面形状とを、翼弦長方向の厚み分布をもって比較したものである。両者はきわめてよく一致し、優秀なものを残し不要なものを排除していく風洞実験による翼型の開発手順と、自然淘汰の歴史がよく対応

図5 マグロの尾びれと飛行機の翼

図6 揚力係数と翼の厚み

していることを示している。ただし、この結果は最もよく一致した箇所のデータを示したものであり、同じ個体でも尾びれの他の断面ではもう少し差異が大きい。

さて、この流線型の翼について、翼の厚みと揚力の関係を迎角（翼と相対速度のなす角、図2参照）に対して示すと、レイノルズ数 10^6 の領域では図6のようになる³⁾。図中の記号（NACA00**）はNACAで開発された翼型を示すもので、最後の2文字は最大翼厚と翼弦長の比をパーセントで表した数字である。図からわかるように、この範囲内では厚い翼ほど大きな揚力を発生する。しかし、翼のサイズが小さくなってレイノルズ数が 10^4 のオーダーになると、厚みによる差はほとんどなく

図7 トンボの翅の断面形状

なり、昆虫の飛行領域である 10^3 のオーダーになると薄い翼ほど良好な性能を示すようになる²⁾。また、同じ平均厚みをもつ翼では、流線型よりも単なる平板の方が大きな揚力を発生できる。ただし、翼のレイノルズ数が 10^6 から 10^3 へと小さくなるにつれ、最大揚力は急激に低下する。

メートルサイズ(レイノルズ数 10^5 以上)の翼型については従来より膨大な研究が行われ、詳細なデータベースが得られているが、昆虫の飛行領域ではこれまであまり研究が進んでいなかった。我々は種々の翼型をレイノルズ数 10^3 の領域で実験的に調べ、薄ければ薄いほど、そして適度の反りのあるものが優れた特性をもっていることを見出した。また、上下にギザギザのついたものは、同じ厚みをもつ平板と比べるとやや揚抗比が悪化するが、ギザギザがあると翼端方向の曲げ剛性とねじり剛性がともに増加するので⁴⁾、同じ剛性をもつ平板と比べると、ギザギザの翼のほうがはるかに薄くなり、その結果空力特性も優れてくる。図7に、飛行中のトンボの翅の1断面をレーザーシートによって可視化し、その形状の変化を観察した結果を示す⁵⁾。この図から、実際の昆虫も上に記した優れた翼断面の形状をすべて備えており、さらに打ち下ろしと打ち上げで翼断面のねじりを大きく変えるとともに、反りの向きを反対向きに制御していることがわかる。このような翼型の制御により、打ち下ろし時には大きな上向きの力を発生でき、そして打ち上げ時には下向きの空気を極力少なくするとともに前進方向の大きな空気を発生できる。

3. 昆虫の翅の非定常空力

昆虫の羽ばたき運動の周波数はきわめて大きい。トンボで約20～30 Hz、ハチやハエでは100～200 Hz、蚊になると300～1000 Hzに達する。羽ばたき運動では翅が静止状態から加速し、最大速度に達した後、減速し静止して打ち下ろし過程を終了し、再び打ち上げ過程で同様の加減速を繰り返してようやく1サイクルの運動となる。このため、翅の迎角も、空気に対する相対速度も、羽ばたき運動の1サイクルで大きく変動する。このような変動のある翅に働く空気力の大きさを簡単に見積もるには、準定常の方法を用いる。これは一定の迎角と相対速度に対する翼の空力(これを定常空力と呼ぶ)を実験や理論により求めておき、羽ばたき運動のような非定常運動に対しては、その時々刻々の迎角と相対速度に対応する定常空力の値を用いて1サイクルの空力を推定しようというものである。これまで述べてきた説明は、理解を容易にするためにこの準定常の方法に基づいている。しかしWeis-Foghは、1970年代にコバチのホバリング飛行を調べ、準定常の方法の約2倍もの空力が働いていることを見出し、新しい非定常空力発生メカニズムを提案した⁶⁾。これは、従来、航空機の分野で知られていた非定常運動に対する空力(非定常空力)の常識⁷⁾を覆すものとして大きな注目を浴びた。

彼の計算は昆虫の重量、羽ばたき翼の運動面積、翼の半径と羽ばたき周波数という当時でも信頼性の高い計測データだけに基づいた優れたものであり、その後の研究の出発点となった。現在でも、ホバリング中の昆虫の発生する空力は、準定常空力の約2倍ということが多くの研究から確かめられ続けており、「マルハナバチは飛べない」という有名なジョークの源になっている。しかしWeis-Foghの提案した非定常空力発生メカニズム自体は、その後の研究により修正が必要になってきたように思える。Weis-Foghのメカニズムは、図8に示すように、左右の翅を開いた瞬間に空気がその間に流れ込み、翅の回りに回転する流れ(循環Γ)を形成し、その後の羽ばたき運動による速度 v が生じたとき、上面の流れが下面より速くなり、上面の圧力が下面より低下して付加的な空力が発生するというものである。しかし、単独の2次元翼を静止状態から加速度運動させても、図9に示すように準定常の方法(破線)の約2倍の流体力が発生すること、またこの結果は航空機に適用される非定常理論(一点鎖線)では説明できないことが明らかになった⁸⁾。さらに、チョウの翅のようにずんぐりとした平面形状(低アスペクト比)の羽ばたき翼の回りの流れは、図10に示すようにWeis-Foghメカニズムによるものとはまるで違っており、こ

図8 従来の非定常空気力発生モデル

図9 加速度運動中の流体力⁸⁾

図10 低アスペクト比翼の渦⁹⁾

の流れを考慮した理論計算結果は、流体力の計測結果や実際のチョウの低速飛行とよく一致していることが確かめられた^{9), 10)}。また、2枚の2次元の翼を閉じ合わせておいてから急激に開いて加速度運動を行うと、運動の初期にはWeis-Foghモデルのように付加的な流体力が認められるが、その効果はすぐに消失してしまうことも明らかになった¹¹⁾。そして、単独の翼にサイン波状の並進運動と回転運動を組み合わせを行わせても、準定常の方法の約2倍の流体力が発生する¹²⁾。一方、ミクロ的に見ると羽ばたき運動中の翼には、安定な前縁渦が形成され、この部分で強い負圧領域が観察される¹³⁾。したがって、昆虫が準定常理論値の約2倍の空気力を発生させて飛行している主原因は、羽ばたき運動のもつ激しい加減速運動とねじり運動そして羽ばたき運動中に発生する渦と翼との干渉であろうと思われる。この付加的な流体力は単独の翼でも発生するので、ヘリコプタの空気力の研究で見出された動的失速のモデル¹⁴⁾との整合性も考慮すると、2枚の翼の干渉にその主因を求めたWeis-Foghモデルの修正は避けられないものと思われる。

4. まとめ

人類の作った航空機の飛行メカニズムと大幅に異なる昆虫の飛行メカニズムは、そのサイズの小ささや羽ばたき運動の激しい加減速特性を巧みに利用した優れたものであることが、定量的に明らかになってきた。これらのメカニズムを工学的に応用することは大変魅力的であるが、まだ現状では、簡明な物理モデルで昆虫の飛行メカニズムの長所を説明することさえ充分にはできていない。

文 献

- 1) Azuma, A. (1992) The Biokinetics of Flying and Swimming, Springer-Verlag, Tokyo.
- 2) Sunada, S., Sakaguchi, A. and Kawachi, K. (1997) *J. Fluids Eng.*, ASME **119**, 129-135.
- 3) Abbott, I.H. and Doenhoff, A. (1958) Theory of Wing Sections, Dover, New York.
- 4) Sunada, S., Zeng, L. and Kawachi, K. (1998) *J. Theor. Biol.* **193**, 39-45.
- 5) Weygandt, J., Kawachi, K. and Ohnuki, T. (1995) Proc. of 48th Annual Meeting of the American Physical Society, EK7.
- 6) Weis-Fogh, T. (1973) *J. Exp. Biol.* **59**, 169-230.
- 7) Bisplinghoff, R.L., Ashley, H. and Halfman, R.L. (1955) *Aeroelasticity*, p.251-272, Addison-Wesley, Mass.
- 8) 砂田 茂 (1992) 東京大学大学院工学系研究科学位

論文.

- 9) Sunada, S., Kawachi, K., *et al.* (1993) *J. Exp. Biol.* **183**, 217-248.
 10) Sunada, S., Kawachi, K., *et al.* (1993) *J. Exp. Biol.* **183**, 249-277.
 11) Dickinson, M.H. (1994) *J. Exp. Biology* **192**, 179-206.
 12) 松本有史, 砂田 茂他 (1996) 日本航空宇宙学会第

34 回飛行機シンポジウム講演集, 537-540.

- 13) Liu, H., Kawachi, K., *et al.* (1998) *J. Exp. Biol.* **201**, 461-477.
 14) McCroskey, W.J., Carr, L.W. and McAlister, K.W. (1976) *AI AA J.*, **14**, 1, 57-63.

【書評】日本分光学会 測定法シリーズ38

超解像の光学

河田 聡 編(学会出版センター)

B5 版, 227 ページ, 本体4,600 円, 1999 年

半導体産業の基盤技術である光リソグラフィーの進歩に象徴されるように、光解像技術は「回折限界」に達し、それをいかに超えるかという努力が続けられている。本書のタイトルにある「超解像 (super-resolution)」とは、光の回折限界を「超える」ことを意味している。このように書くとニアフィールド光学を連想する人が多いと思うが、本書は、ニアフィールド光学の専門書ではない。「超解像」を広義にとらえ、正攻法であるニアフィールド光学はもちろんのこと、ファーフールドで波長の限界を超えるためのさまざまな努力が紹介されている。本書は、(1) 超解像の概念と理論、(2) 変形光源と変形瞳による超解像、(3) 共焦点顕微鏡の超解像、(4) ニアフィールド光学の超解像、(5) 非線形光学による超解像、(6) デジタル超解像、(7) 超解像光リソグラフィー、(8) 超解像光メモリー、(9) X線顕微鏡、(10) 短波長光源、(11) ベクトル回折理論、の各章から構成されている。「生物物理」の読者が興味を持つと思われる第1章から第6章の内容を以下に紹介する。第1章では、「超解像」とは何かを要領よく概説している。一読しただけでは難しいが、各論を読んだ後でもう一度読むとなるほどと思わせる(それでも分らなかったら、各論をもう一回読み直しましょう)。第2章では光源・瞳操作が結像特性(解像度)に及ぼす効果を説明しており、例えば「斜め照明」の効果が理解できる。第3章では、共焦点顕微鏡の原理の説明と、最近のレーザーフードバック顕微鏡、4 共焦点顕微鏡が紹介されている。「共焦点光学系は超解像なの?」という共焦点顕微鏡ユーザにはお奨めの章である。第4章では、微小開口によるエバネッセント波の

発生原理と、これを利用したニアフィールド光学顕微鏡が解説されている。そして、走査型トンネル顕微鏡、原子間力顕微鏡との統合など、ニアフィールド光学の展望が述べられている。ニアフィールド光学の解説書は少なく、微小開口のニアフィールド解析を本書のように詳説した書物を他に見たことがない。本章だけでも手元に置く価値は十分にある。第5章は、第2高調波や2光子励起顕微鏡などに代表される非線形効果を利用した顕微鏡技術が紹介されている。第3~5章の特徴として、最近考案されたさまざまな手法が紹介されている。その中には、使えそうもないものと並んで、将来、有効に利用できそうな手法もチラリと顔をのぞかせている。顕微光学の研究開発者にとっては、その原石探しも楽しいかも知れない。第6章の内容は、デジタル処理による信号回復技術とも呼ぶべきものであり、他の光学的な超解像技術と相補的に両立できる手法である。この技法は、画像処理を扱うさまざまな分野で応用可能であり、画像を扱う研究者にお奨めの章である。本書の全体を通して、フーリエ変換などの数式が頻繁に登場する。生物系の研究者には読みにくいと思われるが、図が豊富なので、内容の骨格は理解できると思う。「超解像」を統一的に論じた書物は少ない。本書は、限界を超えようとする顕微光学の研究者にとっては必読の書である。たとえ、限界を超えようとは思っていないくても、実は多くの読者は、知らないうちに「共焦点顕微鏡」のような超解像技術を使っているのである。本書は、通常のテキストで顕微鏡の原理を学んだユーザーが、違った角度から顕微鏡を学習し直すのに適した本である。