

# 生物の飛翔・遊泳時に発生する渦とその反作用の力

Vortex rings and the reaction forces occurring at flight or swimming occasion concerning creatures

工学院大学工学部機械工学科 伊藤慎一郎

Shinichiro ITO

Department of mechanical engineering, Kogakuin University

ito@cc.kogakuin.ac.jp

## 1. 序

我々は鳥が空を飛ぶのは当たり前と考え、魚が泳ぐのは当然と考えている。彼らはどのように飛翔し、遊泳できるのだろうか？通常、これら生き物の移動には「揚抗力」によって定量的に説明することは可能であるが、生き物の周りを流れる水や空気の流体との作用反作用でも定性的な揚抗力の類推が可能である。本解説では流れを可視化することによっても、流体から作用する力の関係を把握することが可能であることを説明する。

## 2. 揚抗力の発生原理

翼に働く揚力は通常、ベルヌーイの定理により上面、下面の流速差によって生ずる圧力差によって論じられることが多い。定性的にはこの方法によって揚力を計算する。しかし流体との運動量の交換（作用反作用）でも説明が可能である。翼を通過した流れは Fig.1 に示すようなダウンウォッシュという主翼より後ろの気流が下向きになる流れが生ずる。下向きの流れはすなわち翼によって流入流体が下向きに押し込まれたために生ずるものである。その流体を押し込む反作用として翼には揚力が生じる。

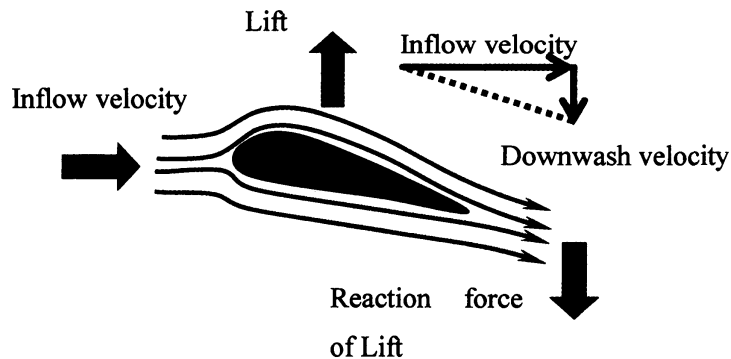


Fig.1 Relation between lift and reaction of downwash

抗力・推進力も同様に Fig.2 に示すように流れが加速されたか減速されたかを見ることによって作動物体に作用する力を判断することができる。力が作動物体に作用する場合、ニュートンの第 2 法則によって物体は加速する。 $(f=ma>0, a>0)$  物体が流体を押し進める場合、その反作用で、流体には力が加わり、流れには推進する反対方向に加速流が生じる。逆に物体に抗力が生じる場合は、物体後流は減速流となる。Fig.3(a)に示す物体後方に生ずるカルマン渦列は末広りの減速流を生じさせる。そのためカルマン渦列を発生させている円柱には抗力が作用していることがわかる。遊泳する魚の尾びれ後方に生ずる逆カルマン渦列（カルマン渦列とは逆回転の渦列）は Fig.3(b)に示すように先細りの流れとなり、加速流であることがわかる。すなわち遊泳する魚には推進力が生ずる。このように流れの様態を把握することにより、移動する生物に掛かる力を定性的に把握できる。

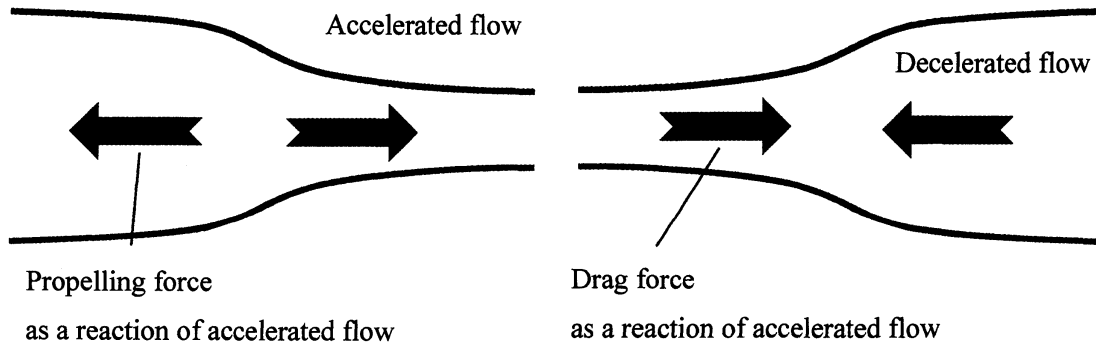


Fig.2 Reaction forces with accelerated / decelerated flows

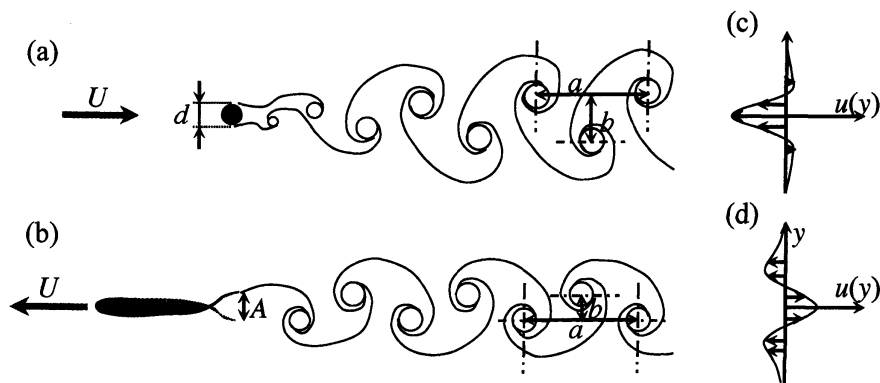


Fig.3 Von Kármán Vortex Street and Reverse Von Kármán Vortex Street,  
(<http://www.vortexpowerdrive.com/Science.html>, rewrote and modified)

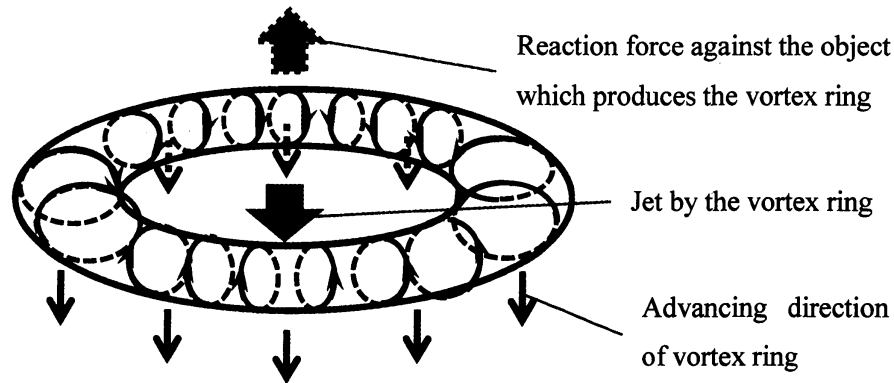
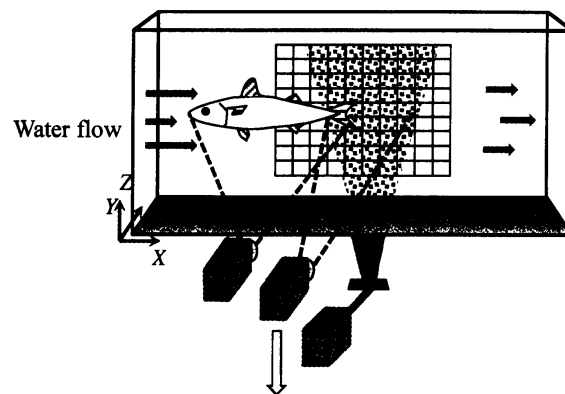


Fig.4 Jet of vortex ring and advancing direction of that

同様に Fig.4 に示すように渦輪が存在する場合，渦輪の直径で対をなす渦の互いの誘導速度によって渦輪は進行する．渦輪によって形成される質量による移動で渦輪には運動量が生ずるが，その反作用で渦輪を形成に携わった物体には力が作用する．それはあたかも渦輪中心の流れによって加速された流れ（ジェット）の反作用のように見えるが，物理的には渦輪の進行に伴う運動量の交換（作用反作用）によるものである．

前述したように魚の尾びれからは逆カルマン渦列が放出されることは知られていた．Nauen ら[2002]は Fig.5 に示すように推進するサバの尾びれ後方の流れを PIV（Particle Image Velocimetry）によって詳細に解析した結果，Fig. 6 に示すように x-y 平面，y-z 平面，z-x 平



**Analysis of Particle image velocimetry :**

Particle Image Velocimetry (PIV) is a whole-flow-field technique providing instantaneous velocity vector measurements within the plane defined by the laser light sheet. The fluid is seeded with particles which are generally assumed to faithfully follow the flow dynamics. The velocity information is calculated by taking two seeding images shortly after one another and calculating the distance individual particles traveled within this time.

Fig. 5. Mackerel caudal fin wake PIV system using a front-surface mirror. [Nauen et al, 2002, rewrote and modified.]

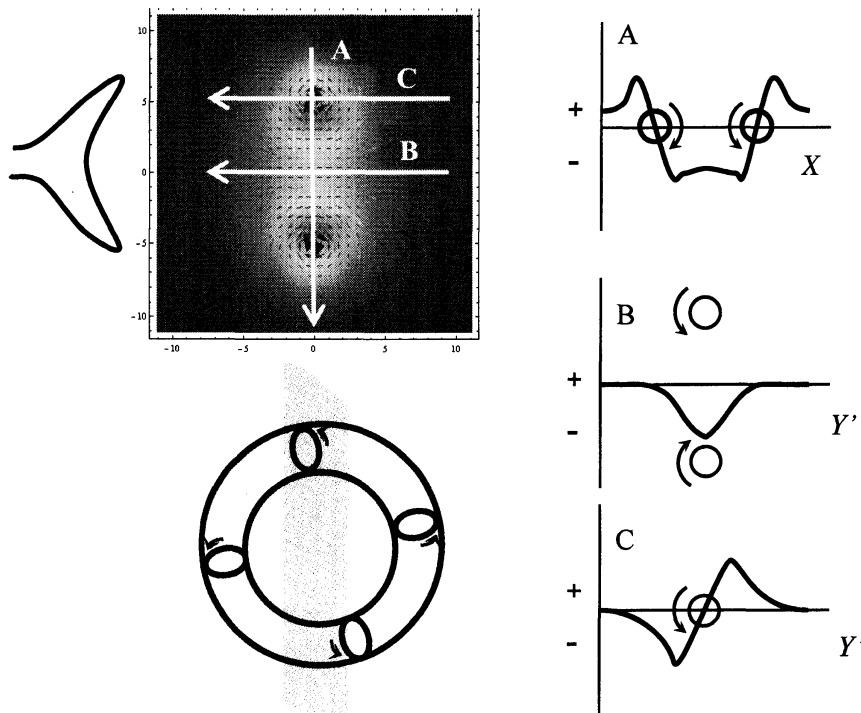


Fig. 6 Velocity profiles across every planar sections predict the existence of isolated vortex rings shed from the caudal fin. [Nauen et al, 2002, rewrote and modified.]

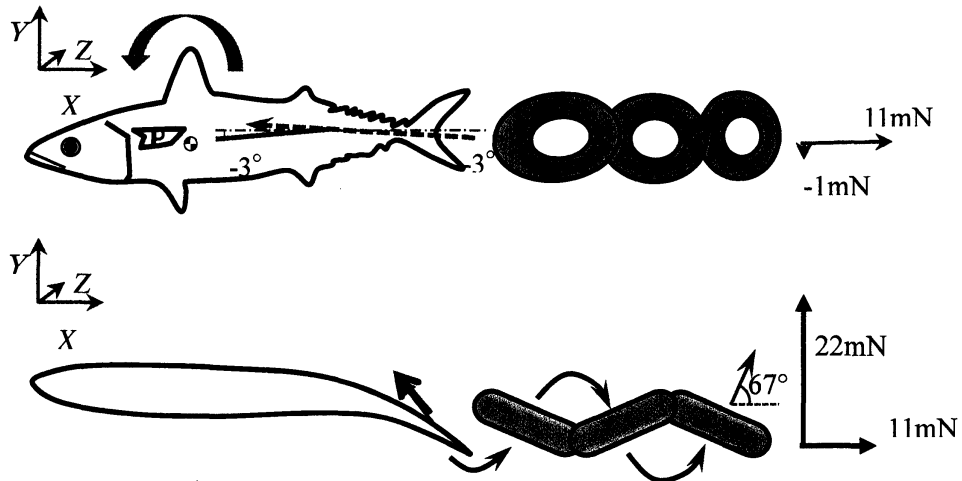


Fig.7 The reaction force at the caudal fin has a lift component that acts over the lever arm of body length to the center of mass (black-and-white checked circle) to rotate the head down (green arrow). Lift generated by abducted pectoral fins (P), such as has been observed in previous kinematic studies, could counterbalance lift generated at the caudal fin. [Nauen, 2002, rewrote and modified.]

面それぞれの平面での渦速度分布から、彼らは魚の尾びれ両端を直径とする渦輪が尾びれから放出されていることを突き止めた。そして Fig. 7 のように渦輪の運動量の反作用をま

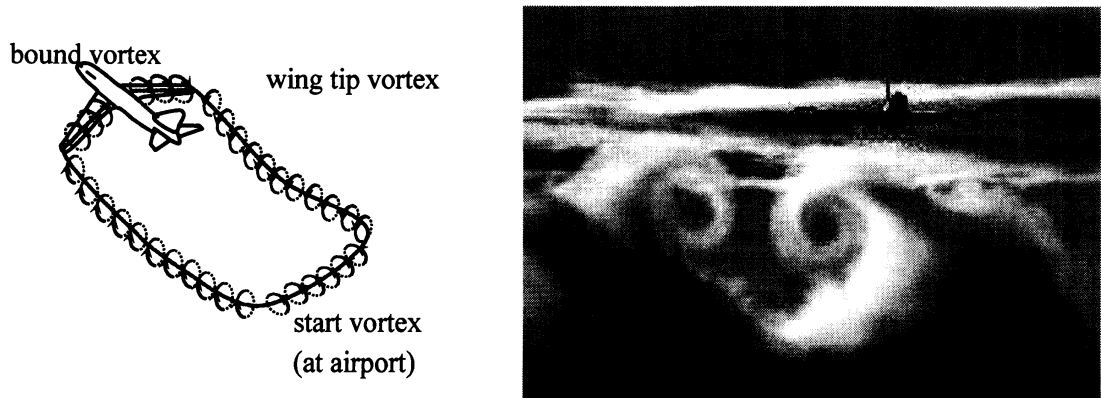


Fig. 8 Big 3D vortex ring which the airplane produces and wing tip vortices behind an airplane.

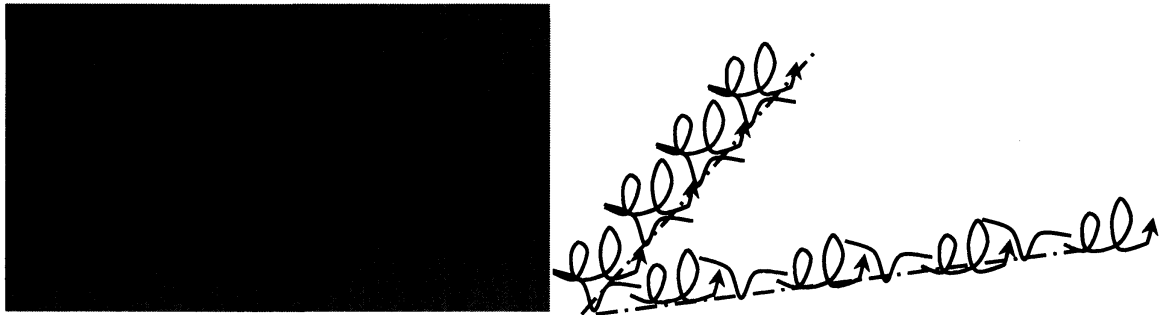


Fig.9 V-shaped flight formation of the migratory bird.

とめると、推進方向の力を推測するとその結果は妥当なものとなった。これら尾びれ渦輪群は、水平面でカットした2次元断面で観察すると、従来知られていた魚の尾びれから放出された Fig.3(b)のような逆カルマン渦列であると言い換えられる。

ヘルムホルツの法則により、渦は始点終点がなく繋がっているものである。すなわち必ず渦輪が形成されるのであるが、このような渦輪の放出は尾びれの運動、羽ばたきなどの非定常運動で観察される。定常状態での渦輪は Fig.8 に示すように翼端渦となる翼表面にできる束縛渦から放出される渦とスタート渦をつなげた大きな渦輪が形成されていると考えられる。翼端渦は上面と下面が接する翼端において、揚力発生の原因である上面が下面よりも圧力が低いことによって生ずる気流の巻き込み渦である。飛行機の翼端からは Fig.8 に示すように大きな翼端渦が発生していることが知られている。同様に飛翔する鳥からも翼端渦は発生する。渡り鳥が V 字編隊飛行をするのは前を飛ぶ鳥の翼端渦による上昇気流を捉えて、省エネ飛行をするためである。翼端渦はその存在によって発生させる物体に誘導抵抗が発生する。誘導抵抗の概念が難しければ、渦は気流に乱れを与えるものであるからエネルギーを捨てる現象と置き換えて考えても良い。翼端渦が大きいことは大きなエネルギーロス=抵抗となる。長時間飛翔する鳥達には Fig.10 に示すように翼端部分の形状を変化さ

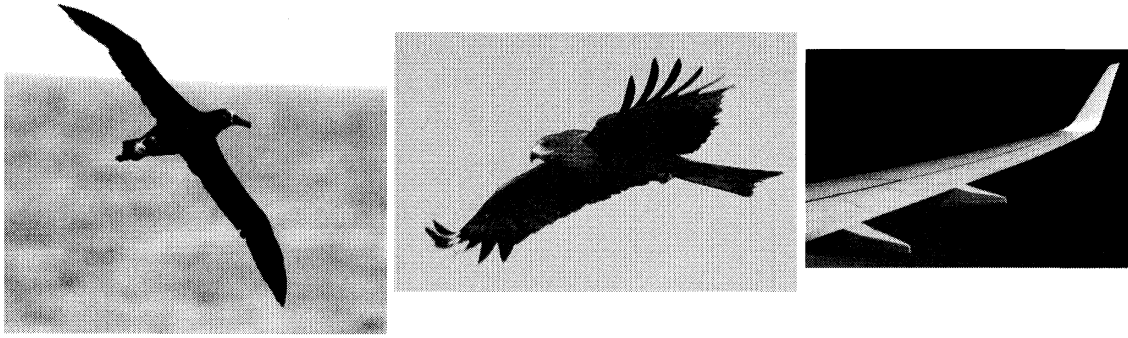


Fig.10 Birds which have tip vortex reduce system: albatross as pointed wing, kites as wing tip slots and winglet which mimic hawk's wing to reduce the tip vortex.

せることによって翼端渦を小さくあるいは拡散させて弱くするものもいる。大海を渡るアホウドリ、オオミズナギドリのような大きな鳥達は、翼端渦をできるだけ少なくするためにその先端は Pointed Wing と呼ばれる点状の翼端形状となっている。一方、海と陸の端境領域に暮らす鳶や鷹のような猛禽類の翼端はバサバサの翼端を持っている。これは翼端渦を拡散し、翼端渦によって発生する誘導抵抗を減らす効果があると考えられている。これを飛行機に応用したものが Winglet である。

### 3. 定常状態と非定常状態

さて、飛翔する生き物を見るとミバエのような小さな生き物ほど羽ばたき回数が大きく、

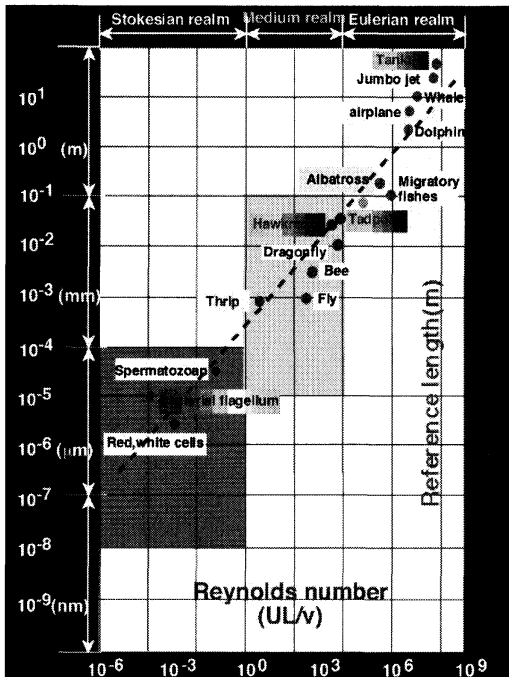


Fig.11. A schematic diagram of relationship between organ size and Reynolds number. Most swimming and flying with a representative length on the order of centimeter are observed over a range of intermediate Reynolds numbers from order of 100 up to order of  $10^4$ , where inertial and viscous forces are equivalent, generally resulting in large-scale vortex structure [Liu, 2002.]

オオミズナギドリのような大きな生き物は殆ど羽ばたかないことに気付く。これらは揚力の発生機構が身体の大きさによって違うためである。飛行に関する身体の大きさは、飛行速度と一緒に考えると飛行生物達の分類はより鮮明になる。Liu[2002]は Fig.11 に示すように生物を大きさとレイノルズ数で区分している。横軸をレイノルズ数、縦軸を身体の大きさにとって対数表示すると微生物から、クジラ、飛行機に至るまで直線で表される。この関係の中で小さな飛行生物達は羽ばたき回数が大きく、大きな飛行生物は殆ど羽ばたかないことに気付く。すなわち非定常揚力を使っているか、定常揚力を使っているかになるが、その区分はレイノルズ数ではなく Wagner のフラッターの研究[1931]によって提案された無次元周波数  $k$  によって分類される。Wagner 効果と呼ばれる。無次元周波数 (Reduced Frequency)  $k$  はストローハル数  $St$  とほぼ同等のものであるが、翼弦長  $c$ 、角振動数  $\omega$  と飛行速度  $U$  によって  $k = \omega c / U$  と表される。この無次元周波数  $k$  を用いると  $k < 0.1$  の場合は非定常性は無視しえて、 $k > 0.2$  では非定常性の効果が認められ、 $k > 1$  では非定常性が顕著であるとされる。

これらを用いると通常の鳥達の羽ばたきでは  $k < 0.1$  となり非定常性は認められず、 $k > 0.2$  昆虫の羽ばたきでは非定常性が顕著となる。この非定常性揚力は定常揚力の 2 倍程度とされるが、これがどのような要因で発生するかというと 2 次元的には前縁剥離渦 (LEV: Leading Edge Vortex) の発生が主因となる。LEV の Vortex Core に存在する低圧部分によって翅の上面の圧力が下がり、それが非定常性揚力の揚力増加につながると考えられている。

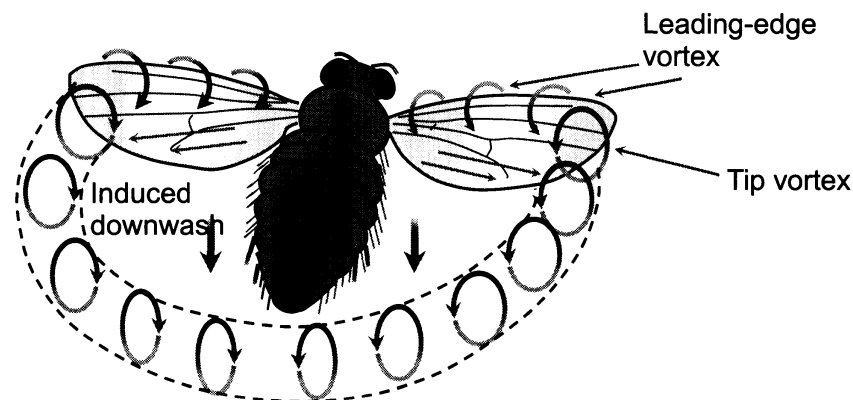


Fig. 12 Patterns of airflow during the downstroke of a hovering insect. Airflow over the leading edge of the wing rolls up into a leading-edge vortex (LEV). LEVs contain a low-pressure core that enhances lift, but they are unstable and tend to detach, causing a rapid reduction in lift. The presence of a strong vortex at the wing tip and downwash behind the wing may stabilize LEVs by reducing the effective angle of wing attack (the angle between the wing and the oncoming air). [Lauder, 2001, rewrote and modified. ]

#### 4. 非定常状態での飛翔原理

前縁剥離渦 (LEV) は 3 次元的にみると Helmholtz の定理により渦輪を形成する. すなわち前縁剥離渦の発生は渦輪の発生につながる. そしてその渦輪によるダウンウォッシュある

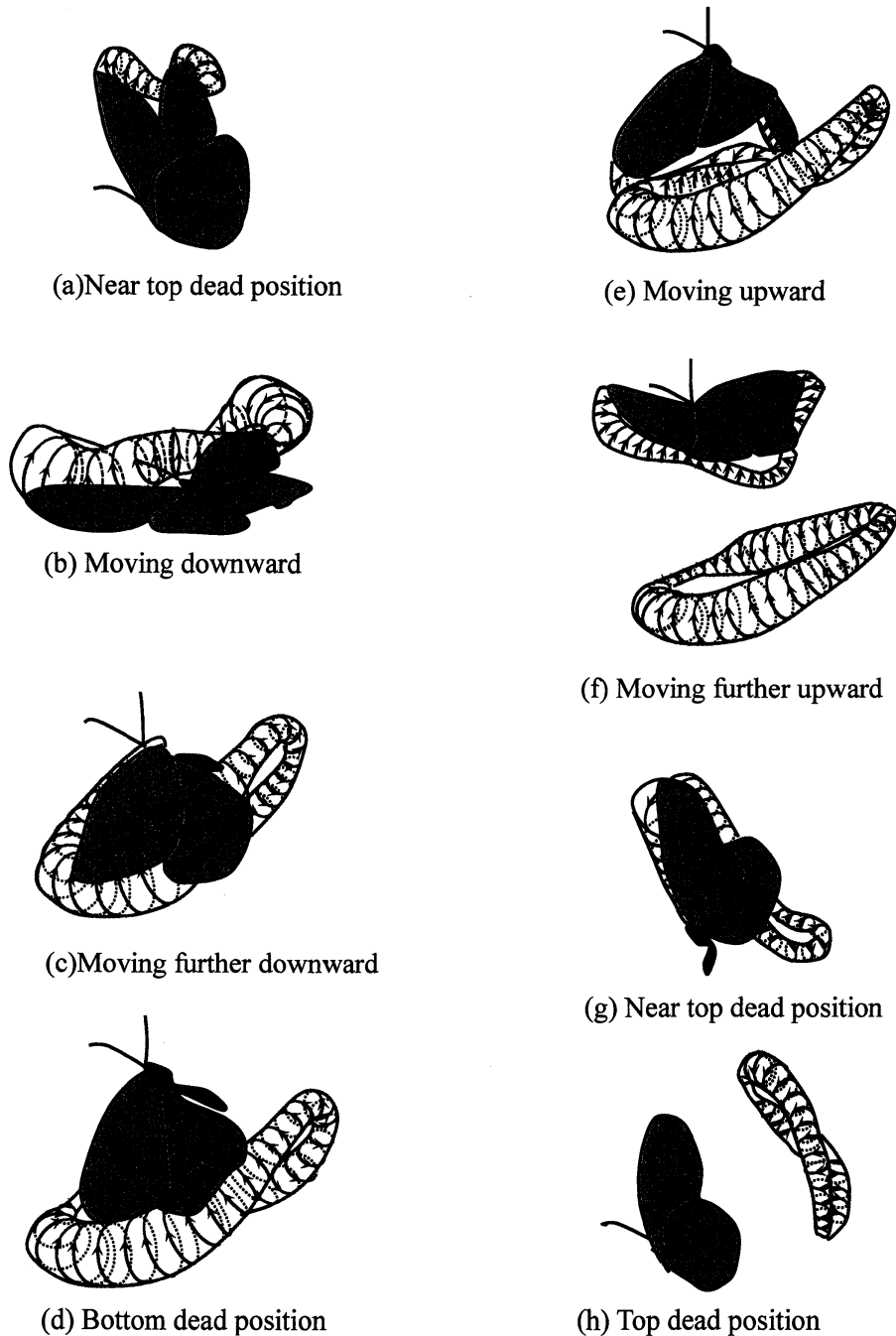


Fig. 13 Pattern diagrams of the vortex on the wings of *Idea leuconoe* for flapping motion of the wings from (a) to (h). Downward vortex ring generates lift force as a reaction on downstroke. Upward vortex ring produces propelling force as a reaction on upstroke. [Fuchiwaki et al, 2013, rewrote and modified.]



いは渦輪の進行による運動量の交換（作用反作用）が揚力を産むと考える。Lauder [2001]は Birch ら[2001]のハエの翅模型による実験から Fig.12 に示すように渦輪の生成が安定的な非定常揚力の生成に寄与しているとしている。Fuchiwaki ら[2013]はヒメアカタテハ、オオゴマダラの蝶の羽ばたきによって生成される LEV から発達する渦輪を PIV 計測により捉えている。Fig. 13 に示すように打ち降ろし時には渦輪が水平下方に移動することによって揚力が発生し、打ち上げ時には渦輪が鉛直に近い状態に向きを変え後方に移動し、推進力を発生する様子が分かる。それらによって蝶々は姿勢を変えヒラヒラと飛ぶのである。定常状態での揚抗力は  $Lift=C_D \times 1/2 \rho A v^2$ ,  $Drag=C_L \times 1/2 \rho A v^2$  で表され、翼面積と流入速度の 2 乗に比例する。昆虫の翅のようにレイノルズ数 100 程度の流場では定常流による揚力では昆虫は自重を支えることができない。前述したように揚抗力は周りの流体に与える運動量の反作用である。渦は Helmholtz の原理で示されるように「不滅」であり安定的である。昆虫のように翼面積も流入速度も小さい生物は、LEV を作り出すことによって自らと同等サイズの渦輪によって作り、その渦輪の移動による反作用で安定的な揚力、推進力を産みだし、駆動流体を 2 倍にするという方法で飛翔していることになる。その方式で得られる揚力と消費エネルギーとはトレードオフの関係にあるが、小さな生物達はその身体の大きさで得られる最大限の揚力を得ている。レイノルズ数の小さな範囲で活動する生物達にとっては LEV を効率的に作り出せるかは必要なポイントである。そのため、準定常状態で剥離を生じさせない状態で飛ぶ鳥達の翼とは異なり、昆虫たちの翼はナイフエッジ状の鋭い先端を持たせることにより、積極的に剥離を起こし LEV の発生を容易にする。かつ高い振動数

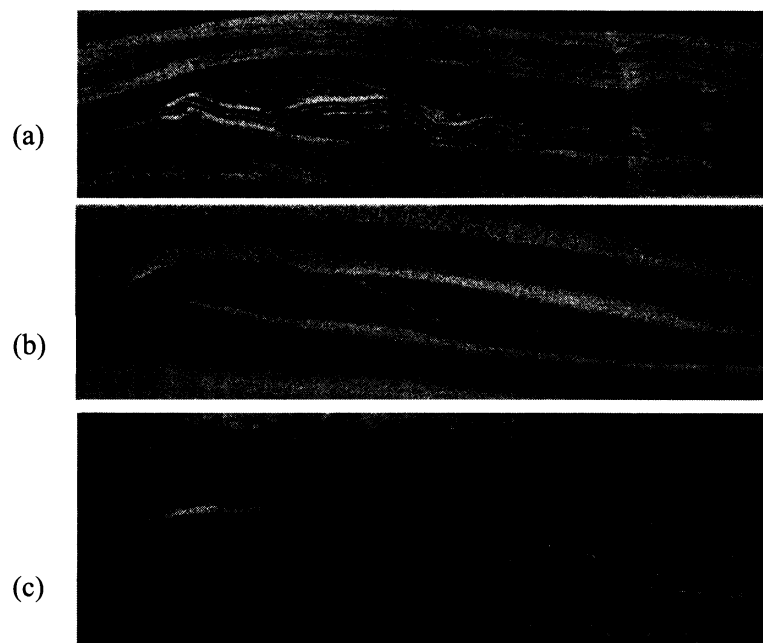


Fig. 14 Vortex trains around a corrugated airfoils on (a)  $Re=2000$  and (b)  $Re=7000$ . Flow around a cambered airfoil before acceleration(c). [Obata et al, 2009, modified.]

で羽ばたくには、慣性モーメントをできるだけ小さくしなければならない。そのために昆虫たちが獲得した翅は翼前縁がナイフエッジ状に鋭く、薄い膜と固い翅脈からなる凹凸のある軽量のコルゲート翼である。Obataら[2009]はレイノルズ数  $10^4$  台におけるトンボのコルゲート翼模型回りの流れを可視化した。鳥の翼と比べると凹凸が激しく抗力が大きそうなコルゲート翼も、Fig.14に示すように翅脈間の凹凸空間に渦状の淀みが発生することによってコルゲート翼全体として2次元翼形状をなし、低レイノルズ数においてはコルゲート翼は滑らかな表面を持ち、反りのある翼と同等の性能を持つことを示した。

トンボは高速飛行、ホバリング、急旋回も可能な高度な運動性能を有する昆虫である。レイノルズ数に直すと  $10^3 \sim 10^4$  オーダーでの飛行を行っている。これらの状態では無次元周波数  $k$  から渦輪の生成による非定常揚力を用いていることが想像できるが、羽ばたきも行わない滑空も可能である。これらからトンボの飛行レイノルズ数  $3 \sim 5 \times 10^3$  程度が定常、非定常で飛ぶ生物の境界値であると筆者は考えている。一方定常状態で飛行する鳥にも急旋回が可能なアマツバメは翼端の前縁がナイフエッジ状の固い羽を持ち、LEVを発生させることでそれが可能となるとの報告[Videler, 2004]もある。すなわちある程度大きな生物でも流体中の機敏な動作にはLEVの発生が必要となる。

## 5. まとめ

遊泳・飛行する生き物の移動原理についてまとめた。従来は2次元的にそしてベルヌーイの定理を中心に考えられていた揚抗力の発生原理も、作用反作用の原理ですべて説明でき、かつその理解には可視化が有効であることを示した。

生き物は彼らの生活環境によって移動速度と大きさによるレイノルズ数で翼、翅、尾びれなどの推進器官の形状を変化させ、推進方法、原理も変化させる。長時間飛行する鳥は翼端渦を小さくすることで省エネを図るが、レイノルズ数300以下で活動する小さな生き物は、前縁剥離渦(LEV)の発生による非定常性を利用して3次元的な渦輪を生成することにより、大きな揚力をもたらしている。

かように渦の生成は流体中で生きる生物には重要なファクターであることを示した。

## 参考文献

- Birch, James M. & Dickinson, Michael H., Spanwise flow and the attachment of the leading-edge vortex on insect wings, *NATURE*, VOL 412 (2001), 729-733.
- Liu, H., Computational biological fluid dynamics: digitizing and visualizing swimming and flying, *Special issue on Dynamics and Energetics of Animal Swimming and Flying, Integrative and Comparative Biology*, 42 (5), 1050-1059, 2002.
- Lauder, George V., Flight of the robofly, *NATURE*, VOL 412 (2001), 688-689.
- Fuchiwaki, M., Kuroki T., Tanaka K., Tabata T., Dynamic behavior of the vortex ring formed on a butterfly wing, *Experiments in Fluids* (2013), 54:1450,

- Nauen, Jennifer C. and Lauder, George V., Hydrodynamics of caudal fin locomotion by chub mackerel, *Scomber japonicus* (Scombridae), *J. Experimental Biology* 205, 1709–1724 (2002)
- Obata A. and Sinohara, S., Flow Visualization Study of the Aerodynamics of Modeled Dragonfly Wings, *AIAA Journal*, Vol. 47, No. 12 (2009), 3043-3046.
- Videler, J. J., Stamhuis, E. J. and Povel, G. D. E., Leading-Edge Vortex Lifts Swifts, *Science*, Vol.306(2004), 1960-1962.
- Wagner H., Über die Entstehung des dynamischen Auftriebes von Tragflügeln, *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik* 5(1925), 17-35.