

## トンボの羽ばたきと翅翼の揚力特性

菊地 吉郎・鈴木 孝志\*・高橋 力\*\*

### Wing Flapping of Dragonfly and Lift Force Characteristics of Wings

Kichiro Kikuchi · Takashi Suzuki · Tutomu Takahashi

#### 1. はじめに

近年、生物を機械工学の観点から捉える研究が活発に行われている<sup>1)</sup>。さまざまな生物の本来もっている機能は、生物が自分の生活環境において生存していくために最適なものはずであり、いいかえれば高性能である。よって、生物の機能を解明することにより、生物と同様な作用をする創造的な技術を機械工学に取入れることが可能になると考えられる。

生物の飛行に関しては、さまざまな種類の鳥や蜂<sup>2)</sup>の挙動や形態が生態学的観点から報告されている。また、さまざまな生物の抗力・揚力および羽ばたきによる飛行の仕組みについて、航空力学的観点から検討が加えられている<sup>3), 4)</sup>。本報で取上げたトンボの飛行に関しては、Azumaらの実験的および理論的研究が、また須藤らの翅翼の空力弾性特性に着目した実験的研究などが知見される。しかしながら、翅翼についての材料力学的特性、羽ばたき機構の機械力学的特性、羽ばたき飛行、および翅翼そのものの流体力学的特性などは十分に解明されているとは言えない。

そこで、本報ではトンボの羽ばたき飛行のメカニズムを機械工学的観点から解明することを目的として、まずトンボのうちでも身近に多数見られるノシメトンボの翅翼の調査・観察、羽ばたき周波数の計測、高速撮影用9駒多軸カメラによる翅翼の動きの観察を行った。さらに、一様気流中に置いた翅翼の揚力を計測し、揚力特性を実験的に究明した。

\*平成8年度機械工学科卒業生(現東電勤務)

\*\*同上(現トキメック勤務)

#### 2. 翅翼の調査・観察結果

小山高専校内でも7~9月にかけて多く見られるノシメトンボは節足動物門昆虫綱トンボ目に分類される。体形の特徴は、他の昆虫と同様に頭・胸・腹で構成されており、胸の下側には三対の脚、上側には二対の翅翼を備えている。バッタなどの直翅目とトンボ目の翅翼は、羽ばたきとき前後翅翼が重ならない配置になっているため、前後翅翼が独立して羽ばたき。トンボの場合、前後翅翼の動きを巧みに制御することにより、前進・後進・ホバリング・急発進・急停止などの多彩な飛行を行い、餌をとるなど生存するための活動の大部分を占める空中生活に適應している。

翅翼の付け根は、表面が硬い蛋白質でできた胸部を構成する側板の支点の両側で、それぞれ打上げ・打下し用の両筋肉に直接連結されている。すなわちトンボの翅翼は直接筋による羽ばたき機構により羽ばたいている<sup>4)</sup>。しかも、羽ばたきに際して翅翼と相対空気流との関係を巧みに変化させており、運動の一周期で前進力と垂直力を発生している。迎角の制御は、翅翼の弾性変形による部分のごくわずかで、付け根における独立した筋肉による意図的な制御が大部分であるといわれている<sup>8)</sup>。

ノシメトンボの翅翼を写真1に示す。翅翼は翼幅方向に走る翅脈および小室に仕切る二次横脈から成り、小室は透明な薄膜で覆われている。翅脈は前縁付近のものが特に太く、翼弦方向の断面形状は翼弦長半ばまでの凹凸が著しい。材料力学的には翼弦方向に波板構造であり、しかも二次横脈は補強リブに相当する。こ

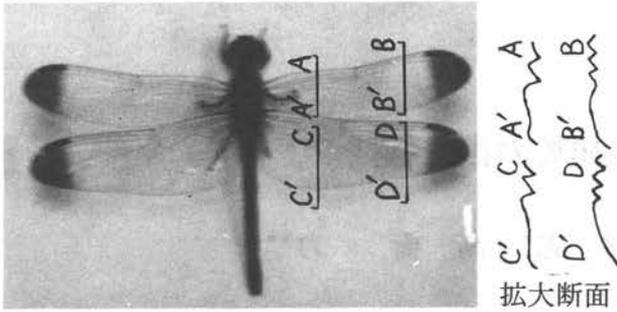


写真1. ノシメトンボの翅翼

のような構造のため、翅翼は翼幅方向の剛性と翼弦方向のしなやかさを保つと考えられる。なお翅脈・二次横脈には、体液や神経が通っている。河内によれば、翼弦長10mm程度のトンボの場合、翅脈の直径は太いもので $100\mu\text{m}$ 、細いもので $10\mu\text{m}$ 、薄膜の厚さは $2\mu\text{m}$ 程度で、高さ1~2mm程度の凹凸がある。このような表面形状は、翅翼そのものの流体力学的特性になんらかの影響を与えていると考えられる。

なお、一つの個体を計測したところによれば、体軸長さ48mm、前翅翼幅36mm、後翅翼幅35mmのノシメトンボの場合、質量は317mg、前翅翼の一枚当りの平均質量は2.5mg、後翅翼のそれは3mgである。ここに質量は分解能1mgの電子天秤で計測した。また翅翼面積は4枚で $1210\text{mm}^2$ である。したがって、(質量/翅翼面積)で定義される翼面荷重は0.26であり、この値はモンシロチョウより大きく、ミツバチよりは小さい。(翼幅の二乗/翼面積)で定義されるアスペクト比は4.8となっており、他の昆虫と比べて大きく、軽飛行機の翼に近い値となっている。アスペクト比が大きいほど多量の空気を動かせ、揚力を大きく発生させることができる。現在のノシメトンボの姿は長い時間を経て進化してきた結果であり、彼らが行動するレイノルズ数が $10^3$ のオーダの世界では優秀な飛行体であることは間違いない。

### 3. 実験装置および方法

#### 3.1 羽ばたき周波数の計測および翅翼の動きの観察

羽ばたき周波数は、羽ばたいているトンボの翅翼にストロボスコープの光を照射しながら周波数を調節し、羽ばたきと同調させて計測した。

翅翼の動きは、高速撮影用9駒多軸カメラにより撮影した。このカメラは図1に示すように、発光制御部・光源部・レンズ・9駒多軸カメラで構成されている。発光間隔の設定は $1\mu\text{s}$ まで可能であり、設定した時間間隔で9コの光源が連続して発光する。光源部とレ

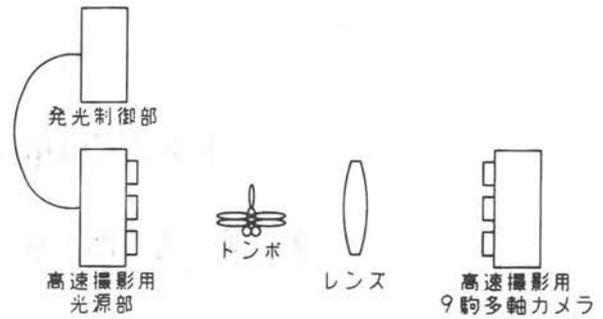


図1. 高速撮影用9駒多軸カメラ

ンズ間に被写体をセットすることにより生じた透過光は、各光源の軸線上に位置する9コのカメラに至り、カメラのレンズ裏側にセットした1枚のフィルム上の9ヶ所で結像する。このカメラはシャッターが開放されているため、暗室で撮影する必要がある。今回の実験では、羽ばたき周波数の計測結果より、発光間隔を3msに設定した。なお、トンボの胸部下側を接着剤を用いて支柱に固定した状態で羽ばたかせ、撮影を行った。

#### 3.2 翅翼の揚力の計測

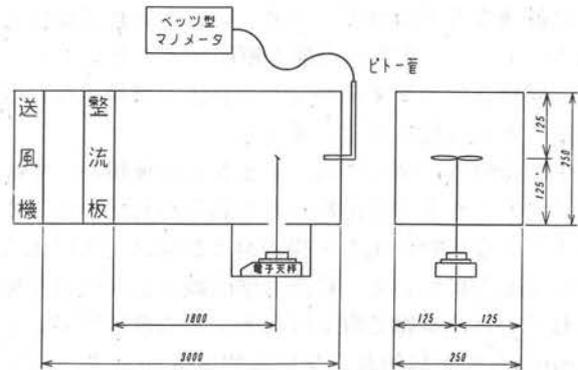


図2. 揚力測定用風洞装置

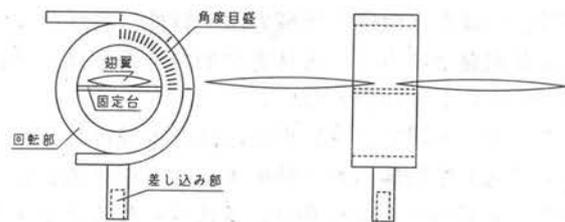


図3. 翅翼取付け装置

図2に揚力計測用の風洞装置を示す。送風機により発生した空気流は、ハニカム状の整流板によって整流された後、翅翼を通過しピトー管に至る。揚力は分解能1mgの電子天秤を用いて計測した。またピトー管お

よびベッツ型マノメータにより差圧を計測し、計算により流速を求めた。

翅翼取付け装置を図3に示す。差し込み部は翅翼固定棒に差し込まれ、円筒状の回転部が自由に動き、あらかじめ目盛ってある角度に翅翼取付け部を合わせることで翅翼の迎角を任意に設定できる。翅翼は一对づつ回転部の中心の翅翼固定台に接着剤を用いて水平に固定した。なお、この装置は単体で揚力が発生することはない。

#### 4. 実験結果および考察

##### 4.1 羽ばたき周波数

計測に供したノシメトンボの羽ばたき周波数は30Hz付近であった。この値はすでに報告されている値と一致する。しかしながら、計測結果には同一の個体でも3 Hz程度の幅があるようである。

##### 4.2 翅翼の動き

写真2(a)~(i)は翅翼の動きを3 ms間隔で撮影したものである。(a)は打下しの開始である。(b)~(e)より、

まず後翅翼を打下し、(d),(e)より、続いて前翅翼を打下している。両翅翼ともに斜め前方に打下されており、しかも前縁は下向きに振られている。更に重要な知見は、後翅翼の打下しは(a)~(e)の間、すなわち12ms程度で完了しているのに対し、前翅翼の打下しは(d),(e)の間、すなわち3 ms程度で完了している。(e)は打下しの完了であり、同時に打上げの開始である。(f),(g)より、まず後翅翼が打上げられ、(h)より、すぐ続いて前翅翼が打上げられ、(i)を経て両翅翼ともにほぼ同時に打上げを完了し、(a)に戻っている。両翅翼ともに斜め後方に打上げられており、しかも前縁は上向きに振られている。

これらの結果より、ノシメトンボの翅翼の動きは上下運動であるフラッピング、振り運動であるフェザリング、および前後運動であるリード・ラグからなることが高速撮影した写真という形で明確に示された。更に重要な点は、両翅翼の打下し速度に大きな差があるという知見である。流体力学的観点に立てば、後翅翼の打下しに伴い発生した前翅翼下方での上向き空気流に対し、前翅翼を大きな速度で打下すことにより相対

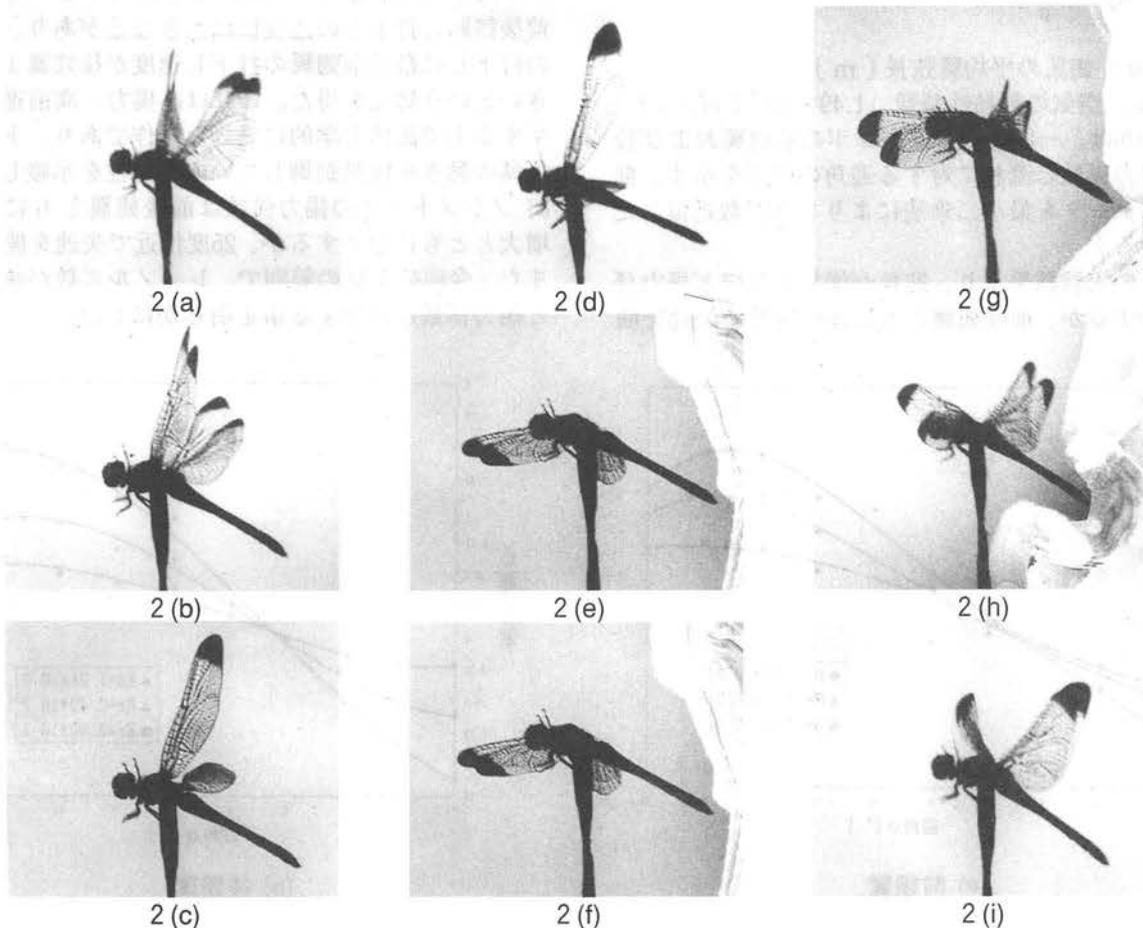


写真2. ノシメトンボの翅翼の動き

速度は増大し、揚力増大および揚力の前方傾斜の増大すなわち前進力の増大が図れる。打上げに際しては、両翅翼の速度に大きな差がなく、負の揚力の増大を抑制している。すなわち、ノシメトンボは単純に30Hz程度の周波数で羽ばたいているのではなく、翅翼の動きをかなりの割合で能動制御している可能性を示唆するものであり、今後の研究課題といえる。

4.3 翅翼の揚力係数

風洞実験で計測した揚力を用い、次の式で揚力係数  $C_L$  を計算した。

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho U^2 A}$$

ここに、 $L$  : 揚力 [N]

$\rho$  : 空気の密度 1.205 [kg/m<sup>3</sup>]

$U$  : 流速 [m/s]

$A$  : 翅翼面積 [m<sup>2</sup>]

また、レイノルズ数  $Re$  は次のように定義される。

$$Re = \frac{Ud}{\nu}$$

ここに、 $d$  : 翅翼の平均翼弦長 [m]

$\nu$  : 空気の動粘性係数  $1.49 \times 10^{-5}$  [m<sup>2</sup>/s]

図4(a), (b)は、一匹のノシメトンボの前翅翼および後翅翼の揚力係数と流れに対する迎角の関係を示す。曲線は計測データを最小二乗法により3次関数近似したものである。

これらの実験結果より、迎角が増加するほど揚力係数は増加するが、前後翅翼ともに25度付近で失速を開始する。

始することが分る。また、レイノルズ数が減少するにつれて揚力係数は増加している。すなわち前縁の鋭く上がった平板状の翅翼は、 $Re = 10^3$  のオーダーの領域では低レイノルズ数になるほど優位性を発揮する翼型であるといえる。この結果は、大きなレイノルズ数の領域で使用される前縁が丸みをおびた航空機の翼の場合とは全く異なるものである。

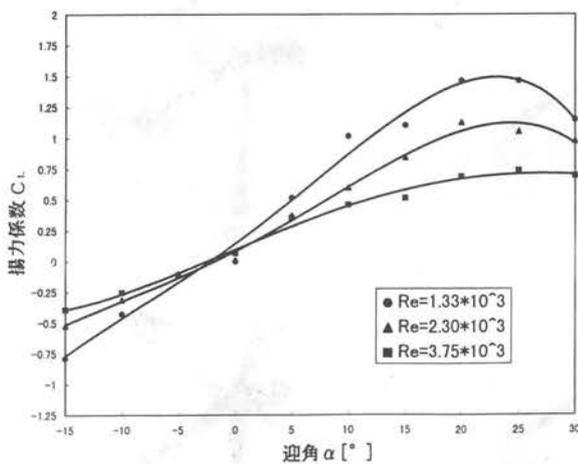
今後の研究課題としては、微少量である抗力の計測あるいは羽ばたいているトンボの揚力・抗力の計測が残されている。また当然の事ながら、翅翼の動きと揚力係数を組合せた解析を行い、飛行のメカニズムの解明にも取り組む必要がある。

5. まとめ

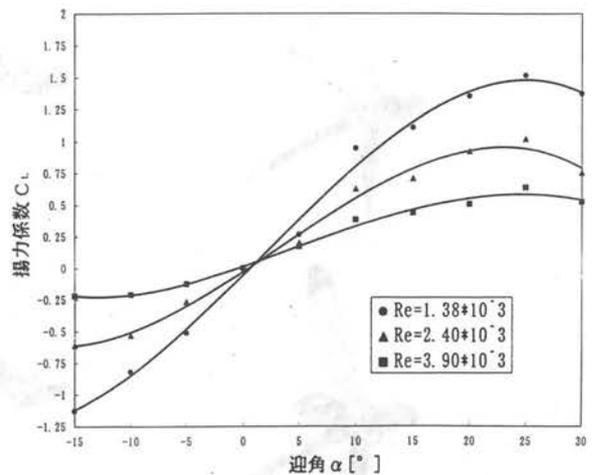
1) ノシメトンボは30Hz程度の周波数で羽ばたいている事を確認した。しかしながら、同一の個体でも計測結果には3 Hz程度の幅がある。

2) 高速撮影装置を用いてノシメトンボの翅翼の動きを撮影し、その動きがフラッピング、フェザリングおよびリード・ラグの運動から成る事を写真という形で明確に示した。また、その結果を分析することにより、前後翅翼の打下しの速度には大きな差があり、後翅翼の打下しに続く前翅翼の打下し速度が後翅翼よりも大きいという知見を得た。これは高揚力・高前進力を発生する上で流体力学的に妥当な動作であり、トンボは翅翼の動きを能動制御している可能性を示唆した。

3) ノシメトンボの揚力係数は前後翅翼ともに迎角の増大とともに増加するが、25度付近で失速を開始する。また、今回の実験の範囲で、レイノルズ数が減少すると揚力係数は増加する事を明らかにした。



(a) 前翅翼



(b) 後翅翼

図4. 揚力係数と迎角の関係

6. 参考文献

- 1) 日本機械学会、生物と機械、(1992)、1、共立出版.
- 2) Alexander, R. M.、生物と運動、(1992)、90、日経サイエンス.
- 3) 東、生物の飛行、(1979)、127、講談社.
- 4) 東、生物・その素晴らしい動き、112、共立出版.
- 5) Azuma,A.,Azuma,S.,Watanabe,S.and Furuta Biol.,116 (1985),79.
- 6) Azuma,A.and Watanabe,T.,J.exp.Biol.,83 (1979),59.
- 7) 須藤・橋本・太田・片桐、機論、60-579、B (1994)、3600.
- 8) 河内、第32回飛行機シンポジウム、航空学会、(1994)、383.

(受理年月日 1997年9月30日)