

トンボの羽ばたき飛行

Wing Flapping Flight of Dragonfly

菊地 吉郎

Kichiro KIKUCHI

1. はじめに

数多くの飛行昆虫のなかで、トンボは最も鮮やかな飛行をするものの一つに数える事ができる。餌を捕らえたり外敵を回避するなど、生きていくために行う飛行は実に巧みであり、急加速・急減速・急旋回・後進・ホバリングを自在に行う。よって、トンボを機械工学の立場から見れば、羽ばたき機構、翅の構造、翅に作用する空気力、飛行の制御およびエネルギー消費と効率など学ぶべき点が豊富にあると考えられる。

著者らは、橋本らの翅振動のモデリングによる理論的研究¹⁾、須藤らの翅の空力弾性特性と翅の構造に関する実験的および理論的研究^{2)・3)}、また Azumaらの航空力学的観点からの羽ばたき飛行に関する実験的および理論的研究^{4)・5)}などを参考とし、トンボの羽ばたきの解析^{6)・8)}を行うとともに、羽ばたき飛行体の製作を試みたが、実現できなかった。

最近、様々な飛行体の模型が市販されるようになってきた。これは、モータ・電池・制御器の軽量化技術の進歩に負うところが大きい。劉は生物型飛行の力学シミュレーターを開発し、鳥や昆虫サイズの小型飛翔体のためのブレークスルーとなる設計指針の創出が期待されると報告⁹⁾している。著者らが羽ばたき飛行体の製作を再び研究テーマとしてとり上げたのを機会に、著者らのこれまでの一連の研究を参考資料とする目的で本報告にとりまとめた。

2. 羽ばたきの動画像解析

2. 1 解析装置および方法

動画像解析装置のシステム構成を図1に示す。構成機器はハイスピードビデオカメラ (フクロ、FASTCAM-hvc-1)、ビデオデッキ、モニターテレビおよびパーソナルコンピュータであり、パーソナルコンピュータにはイメージ解析ボード (ライブラリ、ひまわり55) が装着されており、汎用画像処理メニュー (EASY32) および動画計測ソフトウェア (Move-TR) により動画像解析を行う。機器の主な性能として、ハイスピー

ドビデオカメラの最高撮影速度は2100 μ /sであり、イメージ解析ボードは512 $\times$ 512画素でモノクロ96フレームのフレームメモリを持つ。

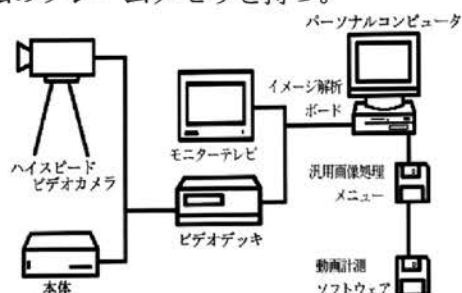


図1 動画像解析装置のシステム構成

撮影の方法は、透明アクリル製正方形断面 (250 $\times$ 250) の風洞内に垂直に立てられた固定棒上部に、生きたトンボの胸下部を接着剤を用いて固定し、カメラを側面に固定して映像を撮影した。今回の撮影条件は風速3.2m/s、撮影速度480 μ /sとした。

次に、映像をいったんビデオテープに録画し、解析対象部分のみをイメージ解析ボードに取り込み、ターゲットを翅の付け根と先端として動画像解析を行い、翼幅中央部での変位、速度、加速度を算出した。また、モニターテレビ画面上で1 μ ごとに翼幅中央部でのピッチ角を解析した。なお、速度の算出及びピッチ角の解析の時間間隔は2.08msである。

2. 2 解析結果

2. 2. 1 基礎データ

今回の解析に用いたノシメトンボの体形の計測結果を表1に示す。またストロボスコープを用いて羽ばたき周波数を計測した結果、30Hz付近であった。

表1 ノシメトンボの体形

	前 翅	後 翅
翼 幅 (mm)	38	36
翼 面 積 (mm ²)	550	694
平均翼弦長 (mm)	7.2	9.1
質 量 (mg)	297	
体軸長さ (mm)	45	

2. 2. 2 翅の動き

動画画像解析を行い、翅の先端部の軌跡および翅の付け根と先端をスティックでつなぎ、スティック表示した結果を図2に示す。スティック間隔は解析分解時間2.08msに対応し、映像17コマで羽ばたき1周期を完了していたので、1周期は33.3msであり、従って羽ばたき周波数は30.3Hzとなり、ストロボスコープでの計測結果と一致する。図中の○印は前翅と後翅の同一時刻での位置を示し、矢印は翅の動く方向を示している。本例の場合、打ち下ろし開始の時点で比較すると、後翅は前翅よりおよそ4.16ms先行して羽ばたいていることが分かった。

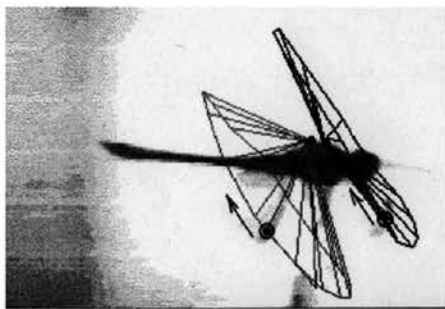


図2 翅の動きのスティック表示

動画画像解析装置は2次元を対象としているので、図2は翅の動きを体軸を含む垂直平面上に投影したものを表している。実際の翅は図3に示すように、付け根が関節で保持されたユニバーサルジョイント機構と考えることができ、羽ばたきはフラッピング、リード・ラグおよびフェザリングに分解でき、軌跡は球の表面上で極めて扁平した楕円となる。

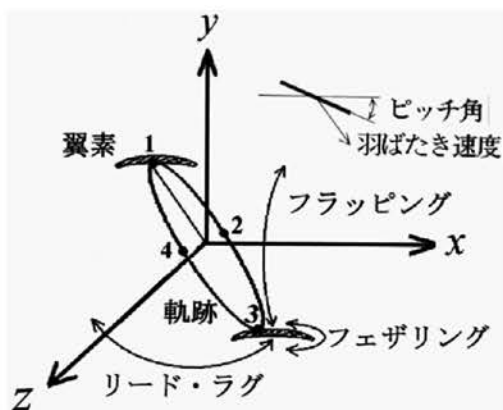


図3 翅の動きと座標系

本研究では、トンボの進行方向(x軸)および重力と反対方向(y軸)からなるx-y平面での力の釣り合いを考えることを前提に、フラッピングに伴う力のz軸成分は一对の翅で打ち消しあう、リード・ラグに伴う翅の流れに対する傾斜角の変化による揚力の違いはないという仮定のもとに、

以降の解析を進めることになる。

2. 2. 3 羽ばたき速度

図2の平面上でターゲットの変位により算出された翼幅中央部の羽ばたき速度を図4に示す。翼幅中央部としたのは、翅の付け根は速度を持たないので、翅全面への流入速度の値をその位置での羽ばたき速度で代表させるためである。横軸は前翅の打ち下ろし開始を $t/T=0$ とし、横軸の速度は打ち下ろし時が正として表示してある。この結果から、前翅と後翅の羽ばたき速度に大きな差は見られず、打ち下ろし時と打ち上げ時の速度変化にも大きな差は見られない。羽ばたき速度は正弦波的变化をしており、後翅は前翅に比べて位相が進んでいる。

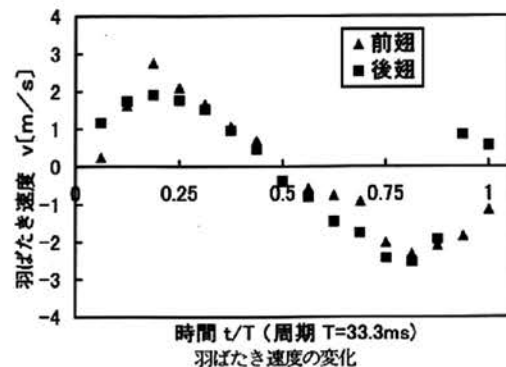


図4 羽ばたき速度の変化

2. 2. 4 翅のピッチ角

モニターテレビにハイスピードビデオカメラで撮影した映像を1コマずつ再生し、画面上で解析した翼幅中央部でのピッチ角を図5に示す。翼幅中央部としたのは、ピッチ角は翼幅方向に変化するが、翅全面の値をその位置でのピッチ角で代表させ、羽ばたき速度と考え方を統一するためである。横軸は前翅の打ち下ろし開始を $t/T=0$ とし、縦軸のピッチ角は水平より上向きを正としている。今回の計測では、前翅のピッチ角は打ち下ろし期間は負、打ち上げ期間は正の値であるが、後翅のピッチ角は打ち下ろし後半

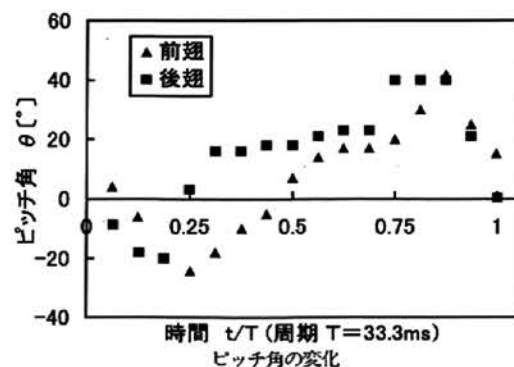


図5 ピッチ角の変化

以降は正の値となっている。

2. 2. 5 羽ばたき方向角

図2の翅の軌跡の水平となす角度を羽ばたき方向角として図6に示す。打ち下ろしと打ち上げで水平にたいする角度、および前翅と後翅に大きな差はない。

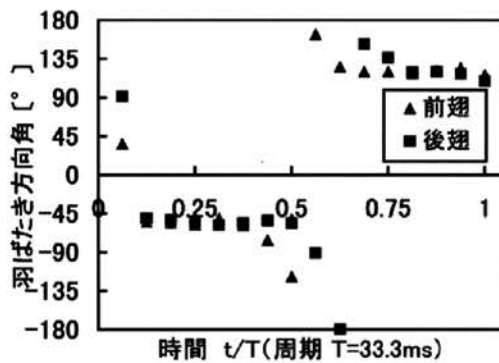


図6 羽ばたき方向角

3. 揚力係数の計測と動的揚力の評価

3. 1 揚力係数の計測

3. 1. 1 計測の方法

図7に揚力計測用の横型風洞装置を示す。送風機により発生した空気流は、ハニカム状の整流板にて整流されたのち固定棒上端の翅を通過する。一対の前翅および後翅は付け根が水平になるように固定棒上端部に接着されており、翅は流れの方向に直角、かつ固定棒は揚力計測用の電子天秤上に垂直に設置されている。

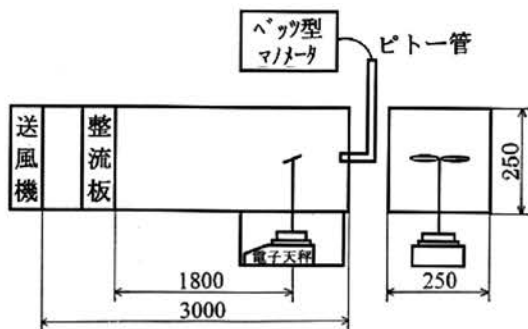


図7 横型風洞装置

迎角の変更は翅接着部の水平に対する角度を調整して行い、流速はピトー管およびベッツ型マノメータにて差圧を計測し、計算により求めた。なお、電子天秤の分解能は1mgである。

3. 1. 2 揚力係数

計測した揚力を用い、次の式で揚力係数 C_L を計算した。

$$C_L = L / (\rho u^2 A / 2)$$

ここに、 L ：揚力[N]

u ：空気速度[m/s]

A ：翅面積[m²]

ρ ：空気密度 (1.205) [kg/m³]

またレイノルズ数 Re は、次のように定義される。

$$Re = u d / \nu$$

ここに、 d ：翅の平均翼弦長[m]

ν ：空気の動粘性係数

(1.49×10^{-5}) [m²/s]

計測に使用した翅は表1の通りである。

前翅および後翅の迎角に対する揚力係数の計測結果を図8および図9に示す。これらの結果により、前翅と後翅の揚力特性に大きな差は認められず、迎角が正の方向に増加するとともに揚力係数は大きく増加し、40度付近から減少している。また、迎角が負の方向に増加するとともに揚力係数は減少するが、絶対値は迎角が正の場合よりも小さい。なお、今回の計測の範囲内ではレイノルズ数の違いによる揚力係数の変化は小さい。

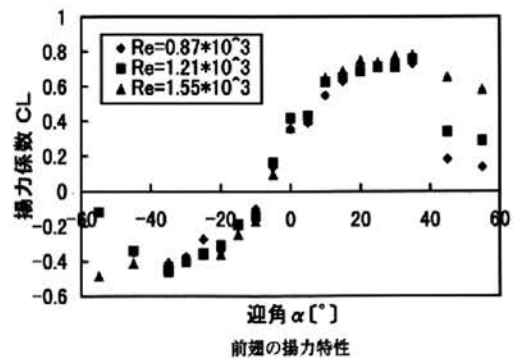


図8 前翅の揚力特性

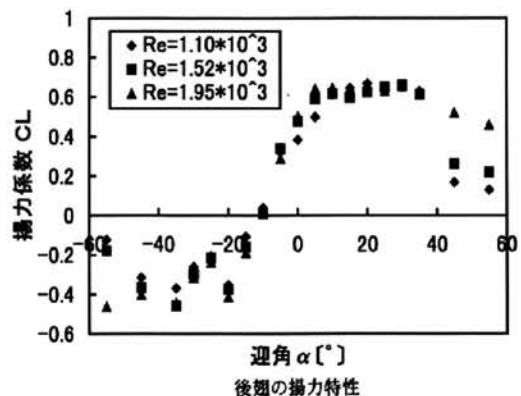


図9 後翅の揚力特性

3. 2. 動的揚力の評価

羽ばたきにより発生する空気力は、打ち下ろしの場合で示すと、図10のようになる。

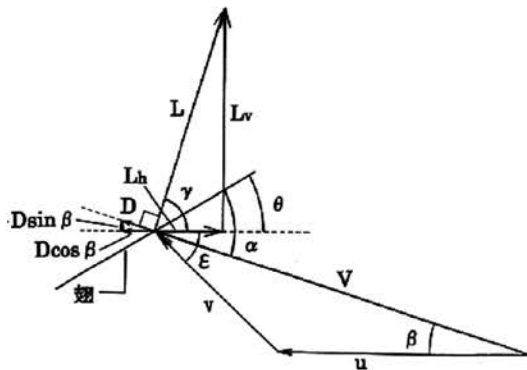


図10 羽ばたきにより発生する空気力

ここに、

V : 流入速度[m/s] u : 進行速度[m/s]

v : 羽ばたきによる流入速度[m/s]

θ : ピッチ角[°] β : 流入角[°]

α : 迎角[°] ε : 羽ばたき方向角[°]

L : 揚力[N] D : 抗力[N]

L_v : 揚力の上向き成分[N] L_h : 揚力の前向き成分[N]

D_v : 抗力の上向き成分[N] D_h : 抗力の後ろ向き成分[N]

であり、次の関係式が成立する。

$$V = (u^2 + v^2 + 2uv \cos \varepsilon)^{\frac{1}{2}}$$

$$\beta = \sin^{-1} ((v/V) \sin \varepsilon) \quad \alpha = \theta + \beta$$

$$\gamma = 90 - \beta$$

$$L = \rho V^2 A C_L / 2 \quad L_v = L \sin \gamma$$

$$L_h = L \cos \gamma$$

$$D = \rho V^2 A C_D / 2 \quad D_v = D \sin \beta$$

$$D_h = D \cos \beta$$

計測した揚力係数を用いて、先ず揚力のみの評価を行った。羽ばたきの動画像解析で得られた風速3.2m/sにおけるノシメトンボの翼幅中央部で代表させた羽ばたき速度とピッチ角および羽ばたき方向角の値を用いることにより、解析分解時間2.08 msごとの流入速度と迎角が計算でき、揚力係数を用いて揚力が求まり、したがって揚力の上向き成分および前向き成分を評価しうる。すなわち、解析分解時間ごとに定常状態と見なして計算しているという意味で準定常的方法といえる。

ところで、揚力係数を求める迎角は翼幅中央部で代表させた値を用いて計算している。図8および図9は翅の付け根の水平に対する角度で表示しているため、翼幅方向への捻れの影響で、

迎角0度において正の値をとっている。翼幅中央部で代表させた迎角を用いるとすれば、迎角0度において揚力係数が0となるように補正することには大きな不都合はないと考える。よって、図8では6度、図9では10度座標値を減じて揚力係数を求めた。

3. 2. 2 動的揚力

算出した前翅と後翅の揚力の上向き成分を図11に示す。時間 t/T は前翅の打ち下ろし開始を0として表示してあり、後翅は前翅よりおよそ4.16 ms（データ2つ分）先行して羽ばたいている。前翅と後翅ともに打ち下ろしで大きな力を発生しており、打ち上げでは下向きの力をも発生するが、その時間は短く値も小さい。なお、前翅と後翅の揚力の上向き成分の合計の時間平均値は $2.48 \times 10^{-3} \text{N}$ であり、トンボに質量に作用する重力 $2.91 \times 10^{-3} \text{N}$ と大きな差はない。

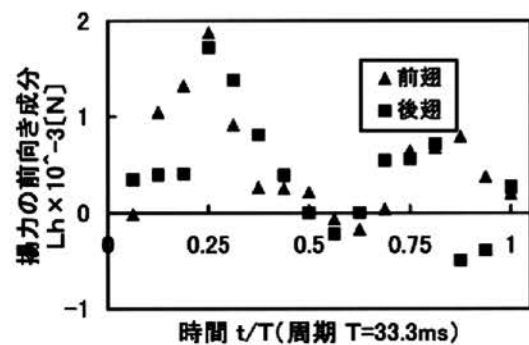


図11 揚力の上向き成分

次に、算出した前翅と後翅の揚力の前向き成分を図12に示す。前翅と後翅ともに打ち下ろしで大きな前向きの力を発生し、打ち上げの大部分の時間でも前向きの力を発生している。なお、前翅と後翅の揚力の前向き成分の合計の時間平均値は $0.93 \times 10^{-3} \text{N}$ である。これらの結果より、トンボの翅のピッチ角は、下向きおよび後ろ向きの力が小さくなるように羽ばたきながら変化しているといえる。

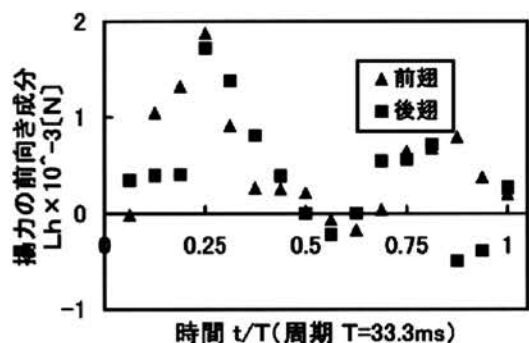


図12 揚力の前向き成分

4. 抗力係数の計測と動的空気力の評価

4. 1 抗力係数の計測

4. 1. 1 計測の方法

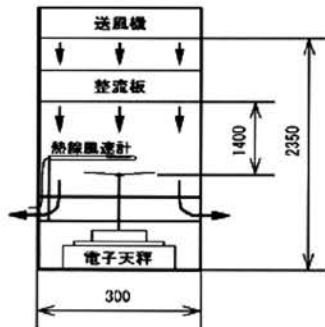


図13 縦型風洞装置

図13に抗力を計測するために使用した縦型風洞装置の概略を示す。送風機により発生した空気流は、ハニカム状の整流板にて整流されたのち一對の翅を通過し、矢印に示す通り風洞の脇から抜けていく。抗力は分解能1mgの電子天秤で計測し、風速は熱線風速計で計測した。電子天秤の上方には翅を固定する棒を伸ばすための貫通穴のある仕切り板をおき、計測値への空気流の影響を除いている。

4. 1. 1 抗力係数

計測した抗力を用い、次式で抗力係数 C_D を計算した。

$$C_D = D / (\rho u^2 A / 2)$$

ここに、 D ：抗力[N] ρ ：空気密度(1.205) [kg/m³]

u ：空気速度[m/s] A ：翅面積[m²]

また、レイノルズ数は次のように定義される。

$$Re = u d / \nu$$

ここに、

d ：翅の平均翼弦長[m]

ν ：空気の動粘性係数(1.49×10⁻⁵) [m²/s]

今回実験に用いたノシメトンボの翅面積は、前翅2枚で546mm²、後翅2枚で714mm²であり、平均翼弦長は前翅7.2mm、後翅9.8mmであった。図14と図15に前翅と後翅の迎角に対する抗力係数の変化を示す。

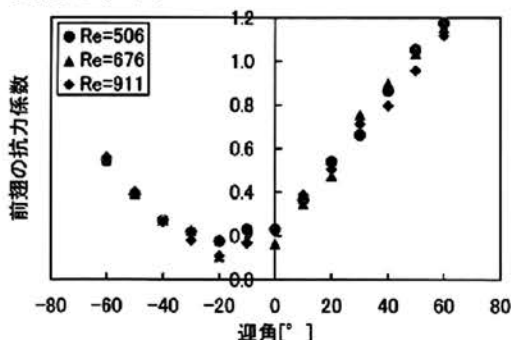


図14 前翅の抗力特性

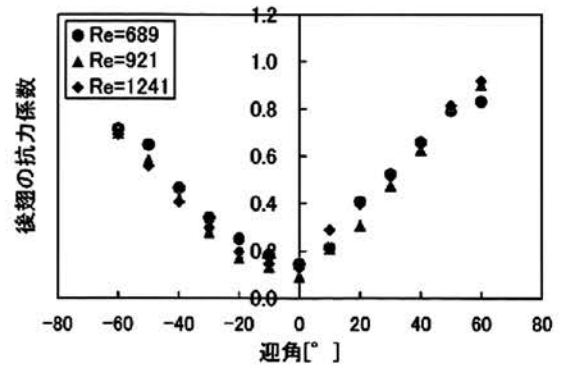


図15 後翅の抗力特性

これらの図より、トンボの翅は前翅、後翅ともに正負に関わらず迎角が増加すると抗力係数も増加し、レイノルズ数が変化しても抗力係数の変化は少ないということが分かる。また、縦型風洞装置でトンボの翅無しの形状抵抗も計測したところ、0.05×10⁻³Nと非常に小さな値であった。なお、揚力の計算は翼幅中央部での値で行っているため、考え方を統一するために、抗力の計算において座標値を前翅で-20°、後翅で-15°補正した値を用いた。

4. 2 動的抗力の評価

図10にすでに示してある関係と計測した抗力係数を用いて、揚力と同じ方法で抗力を評価した。

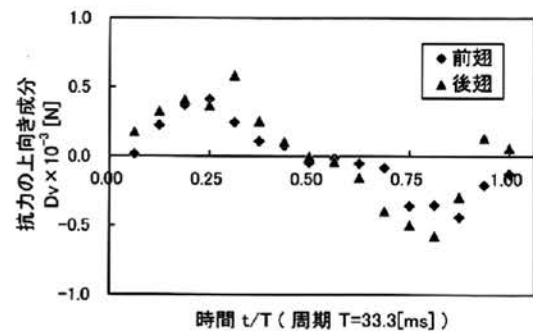


図16 抗力の上向き成分

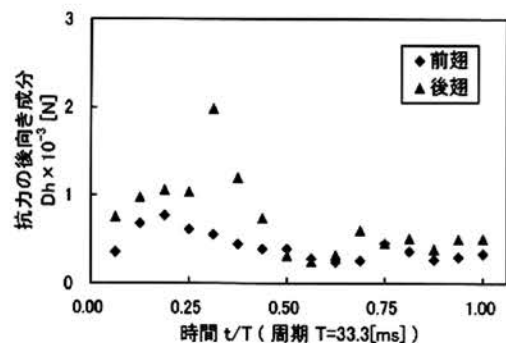


図17 抗力の後ろ向き成分

算出した抗力の上向き成分を図16、後ろ向き成分を図17に示す。上向き成分の変化は前翅と後

翅の位相差にかかわらず同じような曲線を描いている事が分かる。時間平均は前翅と後翅合わせても $0.02 \times 10^{-3} \text{N}$ と他の空気力に比べて微少であるため、上向き成分はトンボの飛行にはほとんど影響が無いとみなす事ができる。後ろ向き成分は後翅が $t/T=0.25 \sim 0.375$ で大きな値をとる。これは後翅が打ち下ろしから打ち上げに入る時期であり、この時に最も大きな後ろ向きの空気力が働く事が分かる。それ以外では、前翅と同じようにほぼ同一の曲線を描く。前後翅合計の時間平均は $1.15 \times 10^{-3} \text{N}$ であり、揚力の前向き成分の時間平均 $0.93 \times 10^{-3} \text{N}$ と大差がない。

4. 3 動的空気力の評価

動的揚力と動的抗力の合計、すなわち動的空気力を算出した。図18は垂直成分、図19は水平成分であり、それぞれ上向き、前向きを正とした。

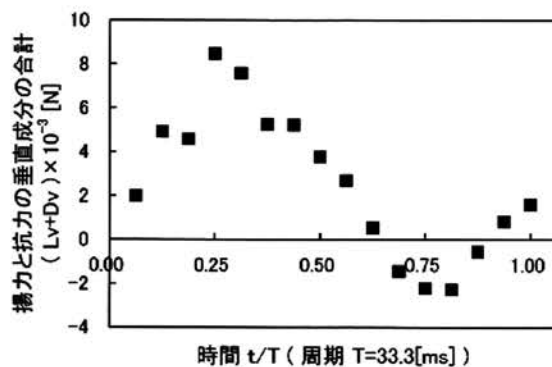


図18 揚力と抗力の垂直成分の合計

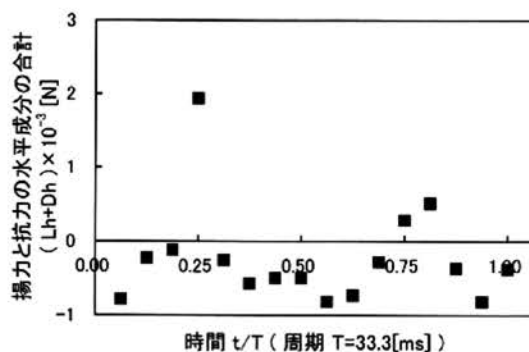


図19 揚力と抗力の水平成分の合計

垂直成分の時間平均は $2.50 \times 10^{-3} \text{N}$ である。これはトンボに作用する重力 $2.91 \times 10^{-3} \text{N}$ と大差がない。つまり、トンボは翅の打ち上げ時($t/T \approx 0.50 \sim 1.00$)にも迎角を調整して下向きの力を最小限に抑え、上向きの力を発生させ、自身が浮くに足りうる空気力を得ている事が分かった。また、水平成分の時間平均は $-0.22 \times 10^{-3} \text{N}$ であり、前述したトンボの形状抵抗 $0.05 \times 10^{-3} \text{N}$ と合計した推進力は小さく、等速飛行に近い状況にあること分かった。

5. まとめ

本研究では、次の事を行った。

- 1) 風洞内で胸下部が固定された状態で羽ばたいているトンボをハイスピードビデオカメラで撮影し、動画画像解析により羽ばたきに関する基礎データを得た。
- 2) 横型風洞装置を用いて翅の揚力係数を計測した。
- 3) 縦型風洞装置を用いて翅の抗力係数を計測した。
- 4) 準定常的に翅に作用する動的空気力を評価した。

その結果、本研究のトンボの飛行状態では次の事が分かった。

- 1) 揚力と抗力の垂直成分の合計の時間平均はトンボに作用する重力と大差がない。
- 2) 揚力と抗力の水平成分の合計の時間平均と形状抵抗を考慮した推進力は小さく、ほぼ等速飛行をしているとみなせる。

参考文献

- 1) 橋本他、機論、63-607,C(1997),723.
- 2) 須藤他、機論、60-579,B(1994),3600.
- 3) 須藤他、機論、62-599,B(1996),2674.
- 4) Azuma,A.,et al.,J.exp.Biol.,116(1985),79.
- 5) Azuma,A.,et al.,J.exp.Biol.,137(1988),221.
- 6) 菊地他、機講論集、No.990-2(1999),55.
- 7) 菊地他、機講論集、No.99-37(2000),61.
- 8) 菊地他、機講論集、No.000-2(2000),69.
- 9) 劉、機学誌、Vol.109,No.1049(2006),265.

(kikuchi@oyama-ct.ac.jp)

「受理年月日 2008年9月26日」