

## イトトンボの飛行解析

佐藤 真知子\*

### An Analysis of Damselfly Flight

Machiko SATO

Free flights of a damselfly, *Ceriagrion melanurum* Selys, are filmed with a high speed video camera and analyzed on a personal computer based image processing system. The observed characteristics of the flight are: 1) The flight speed is rather low. It ranges from 0.4m/s to 0.9m/s in our experiments. 2) The inclinations of the stroke planes are small. It is 10~15 deg for the forewing and 0~30 deg for the hindwing. 3) The flapping amplitude of the wing is almost twice as large as that of a dragonfly for the fore and hindwing respectively. 4) The phase difference between fore and hind pairs of wings is about -100 deg. It is 60~90 deg in the flight of a dragonfly. We use the Fourier analysis to make clear the beating mechanism of wings; the flapping motion can be expressed by the first harmonic of a Fourier expansion series, while the higher harmonics were needed to simulate the feathering motion of the wing.

#### 1. はじめに

トンボの祖先が地球上に現われたのは、およそ3億年前の古生代石炭紀であるといわれているが、その外部形態は、現在に至るまでさほど変化が見られない。しかし、その後の進化により、今日トンボは均翅亜目、不均翅亜目、ムカシトンボ亜目の3群に分類される。

本稿で扱うキイトトンボ (*Ceriagrion melanurum* Selys) は、このうち前、後翅の形状がほぼ等しい均翅亜目に属し、主として平地および丘陵地の挺水植物の多い池沼に生息する。腹長 30 mm 内外、前、後翅長 20 mm 内外の大きさで、オス、メスともに顔は黄色、頭頂と胸の地色は淡緑色で、腹部はオスでは鮮やかな黄色、メスでは鈍い緑がかった黄色を示す<sup>1)</sup>。また、静止の際には、ヤンマ

やシオカラトンボが前、後翅を左右水平に開くのと異なり垂直に閉じられる (図1)。

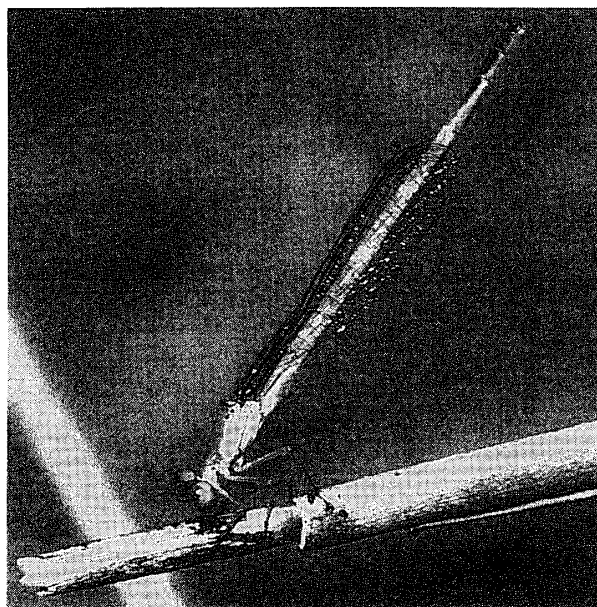


図1. イトトンボ

平成5年8月30日受理

\* 本学画像工学科助教授

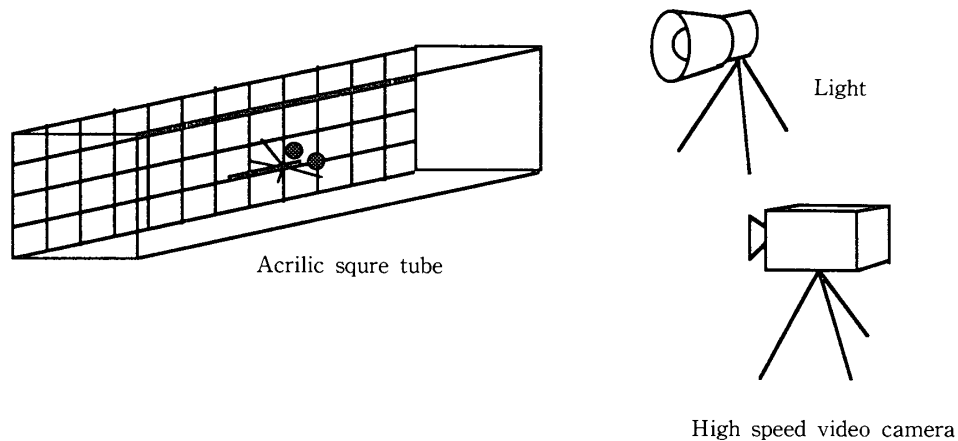


図2. 実験装置

トンボの生息については詳細な研究がなされているが、飛行特性についての報告は少ない。Norberg はルリボシヤンマの静止飛行を野外において撮影し、前翅、後翅はそれぞれ、水平に対して約  $60^\circ$  の傾斜を持つ、ほぼ平行な面内ではばたき、その周波数は  $36\text{Hz}$  であることを報告した<sup>2)</sup>。東らは、文献3)においてアキアカネの上昇飛行を、文献4)においてギンヤンマの水平飛行を撮影解析し、それらの飛行が特殊な非定常空気力を用いたものでないことを示した。

イトトンボの属する均翅亜目は、ヤンマ、アキアカネなどの属する不均翅亜目に比べて活動性が弱いことが知られている。これは羽を動かす翅胸部の発達が悪ることからも推測されるが、その飛行の詳細は明らかでない。本研究では、高速度ビ

デオカメラで、キイトトンボの飛行を撮影し、フレーム毎にデジタル化したものをパーソナリコンピュータ上で作成した画像処理装置を用いて解析した。さらにフーリエ解析を行なうことによって、これを定量化し、飛行特性を明らかにした。

## 2. 実験

図2に実験装置を示す。イトトンボを透明アクリル板で作成した四角柱状の筒の中を自由飛行させ、筒の側面に正対するように設置した高速度ビデオカメラで撮影する。トンボは光に向かって飛行する性質があるので、四角柱の一方の底面近くに光源を置き、直進飛行するようにした。筒の背面には、画面上の長さと実長を対応付けるために  $50\text{mm}$  間隔の方眼を描いてある。また、翼断面の

表1 イトトンボの形状特徴

	units	Damselfly A	Damselfly B	Damselfly C	Damselfly D
Body length	m	$4.15 \times 10^{-2}$	$4.11 \times 10^{-2}$	$4.11 \times 10^{-2}$	$4.00 \times 10^{-2}$
Mass	Kg	$4.50 \times 10^{-5}$	$4.56 \times 10^{-5}$	$5.16 \times 10^{-5}$	$4.20 \times 10^{-5}$
Wing span: forewing	m	$4.40 \times 10^{-2}$	$4.38 \times 10^{-2}$	$4.26 \times 10^{-2}$	$4.20 \times 10^{-2}$
hindwing	m	$4.06 \times 10^{-2}$	$4.00 \times 10^{-2}$	$3.96 \times 10^{-2}$	$4.06 \times 10^{-2}$
Wing area: forewing	$\text{m}^{-2}$	$1.20 \times 10^{-4}$	$1.24 \times 10^{-4}$	$1.18 \times 10^{-4}$	$1.25 \times 10^{-4}$
hindwing	$\text{m}^{-2}$	$1.16 \times 10^{-4}$	$1.18 \times 10^{-4}$	$1.12 \times 10^{-4}$	$1.17 \times 10^{-4}$
Aspect ratio: forewing		16.1	15.5	15.4	14.1
hindwing		14.2	13.6	14.0	14.1
Wing loading	$\text{Nm}^{-2}$	1.86	1.85	2.20	1.74
Distance between the joints	m	$1.4 \times 10^{-3}$	$1.7 \times 10^{-3}$	$1.8 \times 10^{-3}$	$1.3 \times 10^{-3}$

ねじれを測定するために、翼の付け根と先端を結ぶ軸に垂直に翼面にホワイトマーカで線を描いた。なお、撮影は毎秒 1125 フレームの速度で行なった。

撮影された画像はフレーム毎にパーソナルコンピュータに取込み、尖鋭化処理を施した後、飛行および翼運動を特徴付ける点の座標を記録する。

表 1 に実験に使用した 4 匹のイトトンボの形状特徴を示す。

### 3. 翼運動

イトトンボの翼運動は、翼の付け根と先端を結ぶ軸（フェザリング軸）のはばたき運動（フラッピング運動）と、この軸まわりに翼断面をねじる運動（フェザリング運動）によって構成されると考えられる。図 3 に翼の付け根に対する翼の先端の動きを示す。多少のずれはあるものの、翼の先

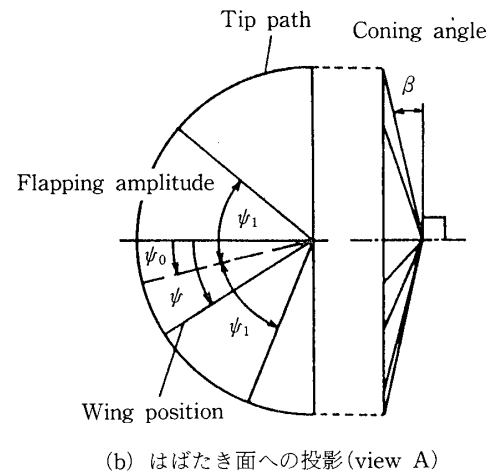
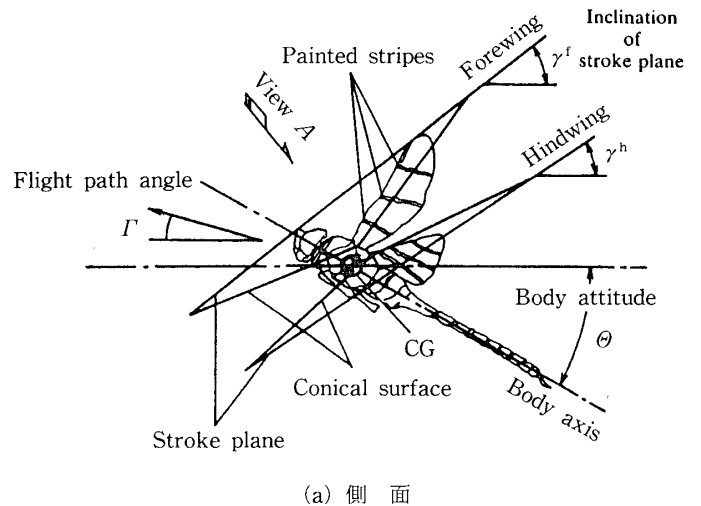


図 4. イトトンボの飛行

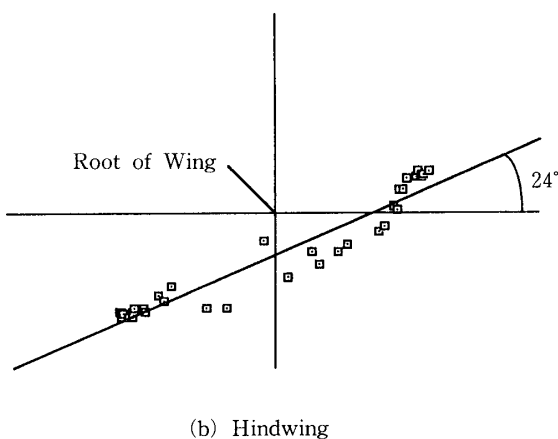
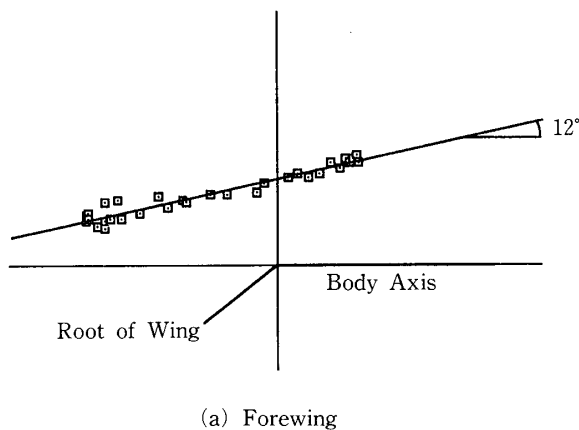


図 3. 翼先端の動き ( $V=0.71 \text{ m/s}$ ,  $T=0.029 \text{ s}$ )

端は前、後翅とも、それぞれ平面内を移動していると考えてよい。フェザリング軸の長さが一定であることを考えれば、これは翼のフラッピング運動が、図 4 a に示すような翼の付け根を頂点とする円錐面に沿って行なわれていることを示すものである。従って、翼の先端が運動する平面は円錐の底面に相当し、これをはばたき面と呼ぶ。図 4 b は、はばたき面を A 方向から見たものである。この時、ある時刻における翼のフェザリング軸は、円の半径に投影されるので、翼の位置は、これが基準の半径となす角度、 $\psi$  によって表される。これを方位角と呼ぶ。

図 5 は 1 周期の間方位角の変動の例である。翼のフラッピング運動は、ほぼ正弦波的に行われていることがわかる。また、運動は、前翅が先に

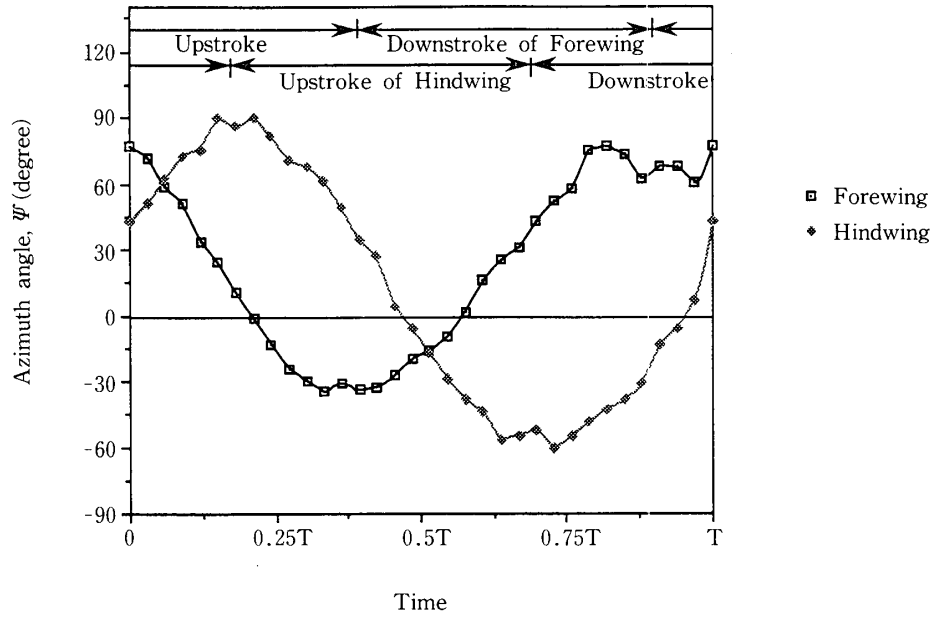
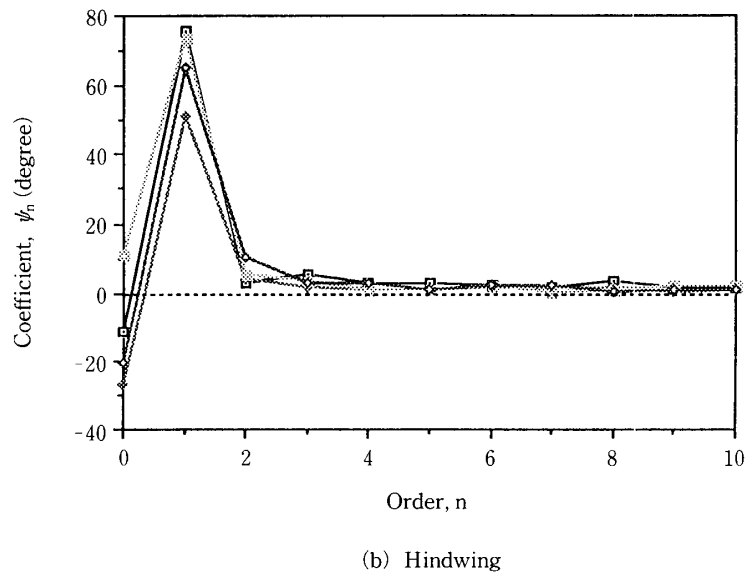
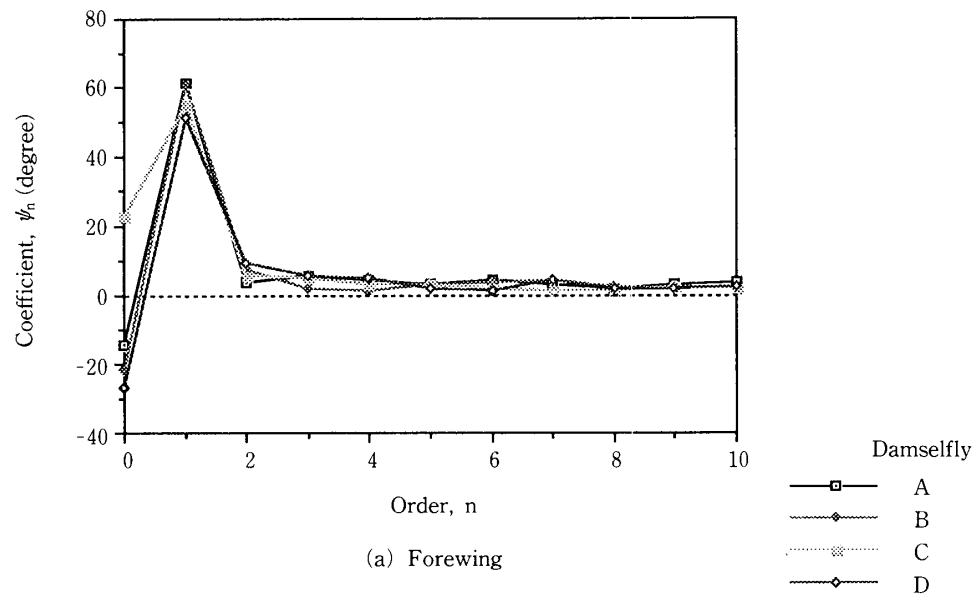
図 5. 方位角の変動 ( $V=0.71 \text{ ms}^{-1}$ ,  $T=0.029 \text{ s}$ )

図 6. 方位角のフーリエ級数展開結果

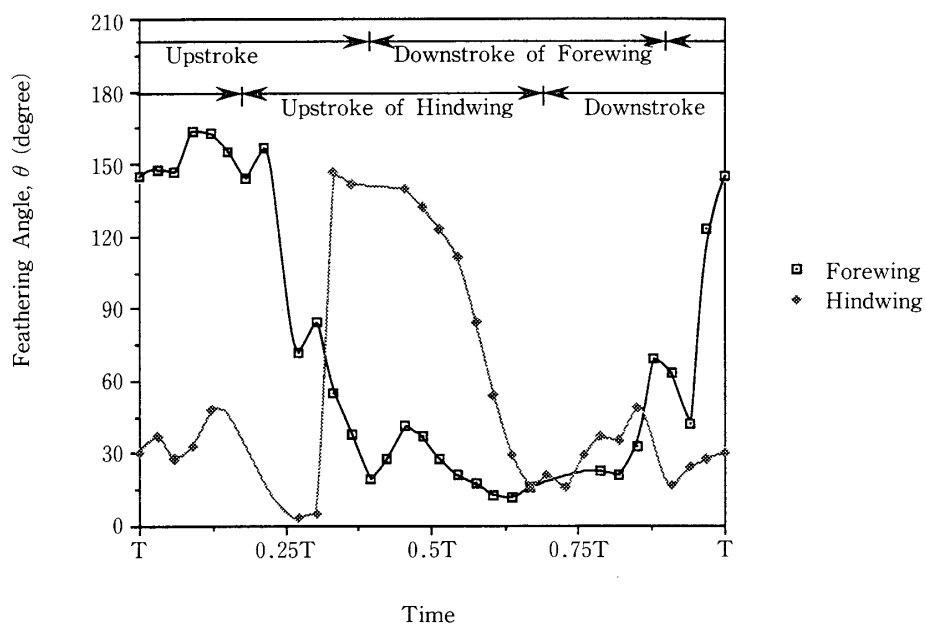


図 7. フェザリング角の変動 ( $V=0.71 \text{ ms}^{-1}$ ,  $T=0.029 \text{ s}$ )

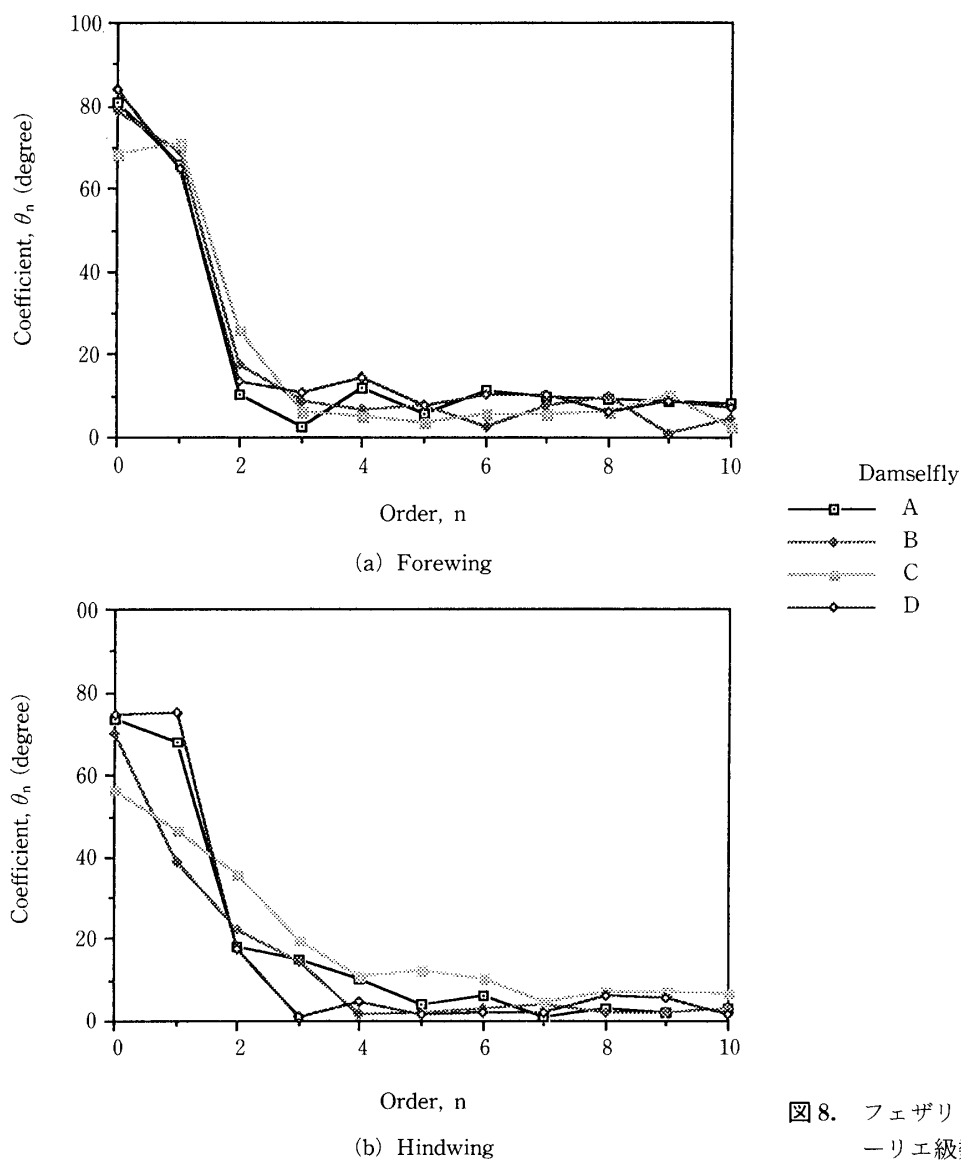


図 8. フェザリング角のフーリエ級数展開結果

すすみ、後翅がそれを追いかける形になっている。このことをより詳細に調べるために、方位角の時間変化をフーリエ級数

$$\Psi = \Psi_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \Psi_n \cos(n\omega t + \delta_n) \quad (1)$$

に展開した。表1に示した4匹のイトトンボについて第10次高調波までの振幅を図6に示す。この図より、フラッピング運動においては、第1次高調波が支配的であることが裏付けられる。また、5次以上の項についてはサンプル間に相関が見られないため、測定誤差による影響を強く受けているものと考えられる。以上より、翼の位置のみが意味を持つような問題、すなわち飛行のシュミレーションなどにおいてはフラッピング運動のモデルとして

$$\Psi = \Psi_0 + \Psi_1 \cos(\omega t + \delta_1) \quad (2)$$

を用いれば十分であることがわかる。ただし、翼に働く空気力などを求める場合には角速度が問題になるため高次項を考慮する必要がある。

図7は、一周期の間のフェザリング角 $\theta$ (翼断面がはばたき面と平行で前縁が頭の方を向いている時 $0^\circ$ 、尾の方を向いている時を $180^\circ$ とする)の変動を示したものである。フェザリング角は前述のようにフェザリング軸回りの翼断面のねじれを表すものである。したがって翼断面の位置、すなわちフェザリング軸上の位置の関数となるが、これは、ほぼ70%翼幅位置で測定した値である。方位角に比べて、測定値のばらつきが大きく、また測定不能点の数も多いが次の様な傾向が読み取れる。

- 1) フェザリング角の時間変化は正弦波から、かなり逸脱している。
- 2) 前、後翅とも打ち下ろしではフェザリング角は $90^\circ$ 以下である場合が多く、打ち上げでは $90^\circ$ を超えている場合が多い。つまり、翼の前縁は必ず、翼の進行方向を向いている。

方位角の場合と同様に、実験に用いた4匹についてのフェザリング角の時間変化をフーリエ級数展開

$$\theta = \theta_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \theta_n \cos(n\omega t + \varphi_n) \quad (3)$$

した結果を図8に示す。第1次高調波の振幅に対して、第2, 3, 4次高調波の振幅がかなり大きな割合になっていることがわかる。5次以上についても、この値は減衰することなく残っているが、これは方位角の場合と同様に測定誤差によるものと考えられる。したがってフェザリング角のモデルとしては

$$\theta = \theta_0 + \sum_{n=1}^4 \theta_n \cos(n\omega t + \varphi_n) \quad (4)$$

を用いることとする。また、この図より定数項( $\theta_0$ )の値は $60 \sim 80^\circ$ で飛行中トンボは、翼を垂直より少し前に倒した状態を中心として、翼断面をねじっていることがわかる。なお、 $\theta$ は翼断面の位置の関数であるが、トンボの翼の関節が1個であることから、ある時刻におけるねじれはフェザリング軸にそって線形に変化すると考えられるので、任意の位置でのフェザリング角は

$$\theta_1 = c(x - 0.75) + \theta_{1,0.75} \quad (5)$$

として計算する。ただし、 $x$ はフェザリング軸上の位置で、翼の付け根を0、先端を1とする。また、 $\theta_{1,0.75}$ は $x=0.75$ での $\theta_1$ の値、 $c$ は定数である。

#### 4. 飛行特性

表2に4匹のイトトンボの飛行実験の結果を示す。これより以下のことがわかる。

飛行速度はかなり低いと思われる。われわれの実験で観測された最高速度は $0.87 \text{ m/s}$ である。飛行可能な最高速度は、飛行の際に翼を動かすのに必要なパワと筋肉が出し得るパワとの関係によって決まるので、観測値のみから、飛行速度を論ずることは必ずしも正しくないが、ギンヤンマが実験で数 $\text{m/s}$ の速さで飛行していることを考えれば、飛行速度は、これに比べてかなり低いと考えてよい。

はばたきの周波数は $25 \text{ Hz} \sim 35 \text{ Hz}$ の間にあり、ギンヤンマと同程度の値となっている。また、飛行速度との相関は見られない。

はばたき面の傾きは、前翅よりも後翅の方が大きい場合が多く、その値はかなり小さい。実際の値は最大値が $30^\circ$ で、ゼロあるいは負の値をとることさえある。ギンヤンマで観測された値が

表2 イトトンボの飛行特性

Damselfly		A	B	C	D
Velocity	$V(\text{ms}^{-1})$	$6.8 \times 10^{-1}$	$8.7 \times 10^{-1}$	$7.1 \times 10^{-1}$	$3.9 \times 10^{-1}$
Flight path angle	$\Gamma(\text{deg})$	20	6	2	20
Body attitude	$\Theta(\text{deg})$	11	0	1	16
Beating frequency	$f(\text{Hz})$	27.5	31.3	34.1	33.1
Stroke plane inclination					
forewing	$\gamma^f(\text{deg})$	3.4	22	12	4.7
hindwing	$\gamma^h(\text{deg})$	2.2	30	24	10
Flapping motion					
amplitude of forewing	$\psi_1^f(\text{deg})$	61	60	55	51
amplitude of hindwing	$\psi_1^h(\text{deg})$	76	51	74	65
phase difference	$\delta_1^h - \delta_1^f(\text{deg})$	-100	-112	-111	-109
Phase difference between flapping and feathering					
forewing	$\phi_1^f - \delta_1^f(\text{deg})$	-72	-82	-80	-77
hindwing	$\phi_1^h - \delta_1^h(\text{deg})$	-62	-51	-87	-59

40° から 70° の範囲にあるのと比べると違いは明らかである。はばたき面の傾きは飛行速度に密接に関係しており、その値は前進速度が大きくなるにつれて、大きくなることが予想される。表2にもこの傾向が見られるが、イトトンボはギンヤンマに比べて飛行速度が遅いために、はばたき面の傾きは全般に小さくなっている。

翼のフラッピング運動の振幅は 50° から 80° の範囲にあり、飛行速度との相関はみとめられない。ギンヤンマでの値が 20°~40° であることを考えれば、これはほぼ 2 倍に相当する。この理由は次のように説明される。生物が飛行するためには体を空中に浮かせるための空気力を翼によって作り出す必要があるが、その大きさは翼の空気に対する相対速度の 2 乗に比例する。前進速度の大きいギンヤンマでは、翼自体の運動速度はそれほど大きくなくても全体としての速度が大きくなるため、体重を支えるのに十分な空気力が得られるが、イトトンボは前進速度が小さいので、翼自体の運動によって速度を得なければ体重を支えきれない。このためにフラッピング運動の振幅を大きくして翼の速度を増しているのである。また前翅と

後翅のフラッピング運動の位相差は飛行速度に関係なく -100° 前後で、前翅の方が先に進み、後翅が追いかける形になっている。ギンヤンマでは、この関係は全く逆で、後翅を前翅が追いかける形でフラッピング運動が行なわれる。

フラッピング運動とフェザリング運動の位相差は -50° から -90° の範囲にあり、飛行速度との相関は見られない。前節でも述べたとおり、これは翼の前縁が常に翼の運動方向に向くように翼をねじっていることに相当する。

## 5. おわりに

本研究では、高速度ビデオカメラとデジタル画像処理技術を用いて、イトトンボの前進飛行を解析した。その結果、イトトンボの飛行により、1) 翼のフラッピング運動の振幅が大きい 2) はばたき面の傾きが小さい 3) フラッピング運動は前翅が後翅より約 1/4 周期進んでいる。などの特徴があることが明らかになった。今回の解析結果から実験外の飛行条件での飛行パラメータを推定することは容易である。したがってイトトンボの飛行をシミュレートすることが可能となった。ま

た、現在、実験データを空気力学的側面から解析する作業を進めており、興味深い結果を得ているが、これについての報告は次に機会に譲りたい。

なお、本研究は東京工芸大学平成4年度重点研究“生物体の運動解析およびCGによるシミュレーション”の一環として行なわれたものである。

### 謝辞

データの解析を担当していただいた平成3年度卒業研究生，大久保則彦，菅野真幸，桑野尚，平成4年度卒業研究生，坂本有香，佐藤財久，西垣健の各氏に感謝いたします。

### 参考文献

- (1) 石田昇三：原色日本昆虫生態図鑑II トンボ編，大阪，保育社，1969.
- (2) Norberg, R. Ake.: Hovering flight of the dragonfly *Aeschna juncea*: kinematics and aerodynamics, *Swimming and Flying in Nature*, Vol. 2, PP. 763-781, New York, Plenum Press, 1975.
- (3) Azuma, A. et al.: Flight mechanics of a dragonfly, *J. exp. Biol.* 116, pp. 79-107, 1985.
- (4) Azuma, A and Watanabe T.: Flight performance of a dragonfly, *J. exp. Biol.* 137, pp. 221-252, 1988.