

昆虫飛翔の3次元計測

Three Dimensional Analysis of Insect Flight

須藤誠一 , 露木浩二

Seiichi Sudo , Koji Tsuyuki

いわき明星大学

Iwaki Meisei University

キーワード： 昆虫飛翔 (insect flight), バイオメカニクス (biomechanics), 航空力学 (aerodynamics),
3次元計測 (three dimensional analysis), 高速度カメラ (high speed camera)

連絡先： 〒970-8551 いわき市中央台飯野5-5-1 いわき明星大学 理工学部 機械工学科 須藤研究室
須藤誠一, Tel.: (0246)29-7185, Fax.: (0246)29-0577, E-mail: sudou@iwakimu.ac.jp

1. はじめに

昆虫は動物の総種類数の70%以上を占め、現在地球上で最も繁栄をとげている動物群であるといわれている。昆虫の体の基本形態は頭部、胸部、腹部の3つの部位からなり、胸部には3対の脚と2対の翅がある。しかし、この基本形態も生活への適用などによって、さまざまな機能を発揮しやすいように変化する。昆虫は地球史上で、空中を飛んだ最初の生物体であり、翅を持つことによって、より速く、より安全に、より複雑な行動をとることができるものとなった。飛翔は、移動のための他のいかなる方法よりも優れており、昆虫の飛翔のメカニズムを調べることは、工学的な意義がある。そのため、昆虫の飛翔に関連する活発な研究が見られる。例えば、著者らによる、トンボの翅の空力弾性特性を調べた研究¹⁾、トンボの翅の走査型電子顕微鏡観察とはばたき周波数に関する研究²⁾、トンボの翅の小室形態やトンボのはばたき特性を調べた研究³⁾などがある。その他にも、トン

ボのホバーリング飛翔時における渦の役割と非定常効果に関する研究⁴⁾、はばたき動物飛行の航空力学的研究⁵⁾、イトトンボの飛行性能を調べた研究⁶⁾などが知見される。しかしながら、はばたき飛翔を行う昆虫の翅の詳しい運動、翅のまわりの流れ場、昆虫の翅の構造力学的な形態などについては未だ多くの不明な点が存在する。

以上のような状況を踏まえ、本報は飛翔する昆虫の全貌を工学的な立場から系統的に解明することを目的として、飛翔する昆虫のはばたき時における翅の運動の3次元解析を行い、走査型電子顕微鏡による昆虫の翅表面の微視的観察結果などとの対応を調べたものである。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置の概略

昆虫飛翔におけるはばたき挙動を解析する場合、昆虫が小さく、また昆虫がどこに飛ぶかわからないため、テザード状態で観察するのが一般的

である⁷⁾。本報では、昆虫の自由飛翔時におけるはばたき挙動解析を目指し、図1に示すような実験装置系を構築した。本実験装置は2台の高速ビデオカメラ、高速カメラ同期装置、2台のビデオ画像記録デッキ、モーショングラバー、2台のビデオモニター、コンピュータ等から構成されている。本解析システムは2台の高速カメラを所定の角度に設定し、現象の同期撮影により昆虫飛翔の3次元解析ができるようになっている。

2.2 実長換算

まず初めに、昆虫が飛翔する試験空間の位置座標データをモニタ画面上に設定された座標系で表わし、この位置座標データを実際の長さに変換する実長換算の作業を行う。本システムにおいては、3次元のDLT法(Direct linear transformation method)によって実長換算を行うように設定してある。実長換算は、コントロールポイントの座標を計算して実長換算係数を算出する過程と、実際に計測座標を実長に換算する過程の2つから構成されている。

係数算出では、図2のように位置座標の実測値(実空間座標)がわかっているいくつかの点(コントロールポイント)をモーショングラバーでデジタイズ計測し、各点に対する計測画面上の座標(画面座標)を求める。この値をもとに、実空間と画面座標との関係から11個の校正換算係数を計算する。実空間座標を (X, Y, Z) 、計測座標を (k, l) 、キャリブレーション係数を C_1, C_2, \dots, C_{11} とした場合、一般式は

$$k = \frac{C_1 X + C_2 Y + C_3 Z + C_4}{C_5 X + C_6 Y + C_7 Z + 1} \quad (1)$$

$$l = \frac{C_8 X + C_9 Y + C_{10} Z + C_{11}}{C_5 X + C_6 Y + C_7 Z + 1} \quad (2)$$

キャリブレーション係数の算出式は

$$C_1 X + C_2 Y + C_3 Z + C_4 - C_5 k X - C_6 k Y - C_7 k Z = k \quad (3)$$

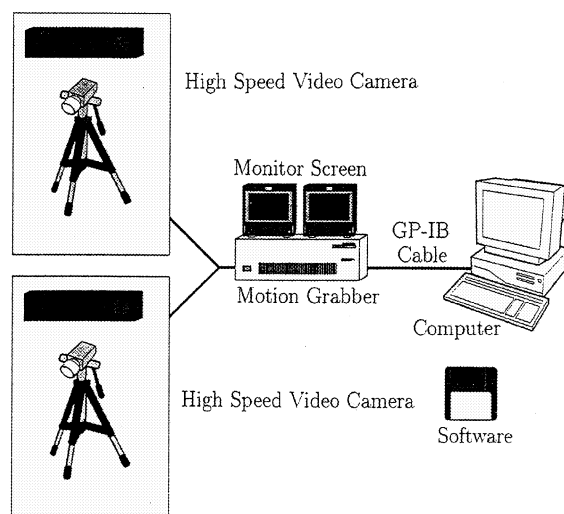


Fig. 1 Schematic diagram of experimental system.

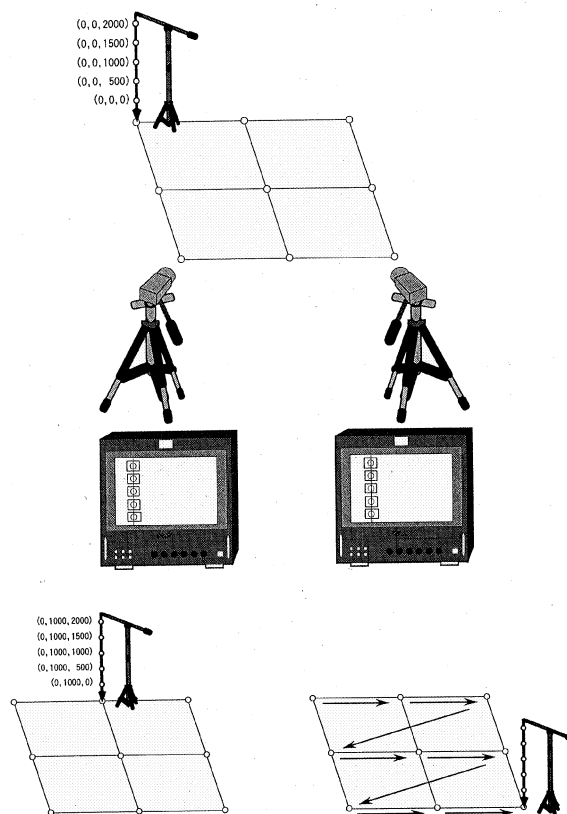


Fig. 2 Digitize for calibration.

$$C_8X + C_9Y + C_{10}Z + C_{11} - C_5lX - C_6lY - C_7lZ = l \quad (4)$$

実座標算出式は

$$(C_1 - C_5k)X + (C_2 - C_6k)Y + (C_3 - C_7k)Z = k - C_4 \quad (5)$$

$$(C_8 - C_5l)X + (C_9 - C_6l)Y + (C_{10} - C_7l)Z = l - C_{11} \quad (6)$$

のように表わされる。

2.3 昆虫の飛翔

上記の試験空間に昆虫を放つことによって昆虫飛翔の3次元解析を行う。昆虫の飛翔は、昆虫を閉じ込めた小さな箱の蓋を開放することによって行った。飛翔挙動の解析に先立ち、図3に示すように昆虫の体の各部にナンバーを付した。解析は昆虫の各部位の座標の時間変化を調べることによって行った。すなわち、これらの座標を処理することによって様々な情報を得ることができる。例えば、5と6、および8と7を結ぶ直線はそれぞれ単純化された右翅と左翅を表わし、4と9を結ぶ直線は単純化された昆虫の体軸を表わす。このようにして昆虫の飛翔の3次元解析を行うことができる。

3. 実験結果および考察

3.1 昆虫の飛翔性能

翅をもつ昆虫は、翅をはばたかせることによって、自ら航空力学的な力を作り出す。一般に、はばたき動物飛行の航空力学的取り扱いプロペラの翼素理論に基づいている¹⁾。すなわち、幅 dx_w の翼部分に作用する力 F' は図4に示すように揚力 L' と形状抗力 D' の合力である。

$$L' = \frac{1}{2} \rho c U_x^2 C_L \quad (7)$$

$$D' = \frac{1}{2} \rho c U_x^2 C_D \quad (8)$$

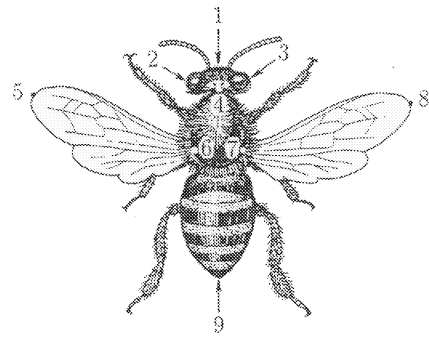


Fig. 3 Digitized point of the bee.

ここで、 ρ は空気の密度、 c は弦長、 U_x は相対速度成分、 C_L は揚力係数、 C_D は抗力係数である。式(7)と式(8)は翼の長さに沿って積分され、さらに、1周期にわたって平均化されたもので評価される。

3.2 昆虫の翅の運動解析

昆虫は胸部背側に2対あるいは1対の翅をもち、上述のように翅をはばたかせることによって揚力を発生させ、空を飛ぶ。図5はケブカクロバエの飛翔時における翅の運動の3次元解析結果の一例を示している。ただし、この場合のハエは試験空間内にとどまるようにするため、右最後肢を軽い糸で連結したテザードの状態にある。そのため、図5はハエが XZ 面に背を向けて X 座標方向において正の方向から負の方向に向かって飛行している最中のはばたきを示している。実線はハエの翅の付け根と翅端を結ぶことによって得られた単純化された右翅を表わしており、点線は左翅を表わしている。これらの直線の各々の時間間隔は $1/13500s$ である。図5より、ハエの飛翔時における翅運動のパスラインが明らかである。このハエのはばたき時における翅端の変位成分を図6に示す。図5および図6は対応しており、はばたきのおよそ1周期半を示している。図中の L はハエの体長、 l はハエの翅長を表わしている。図7は図6に対応する翅

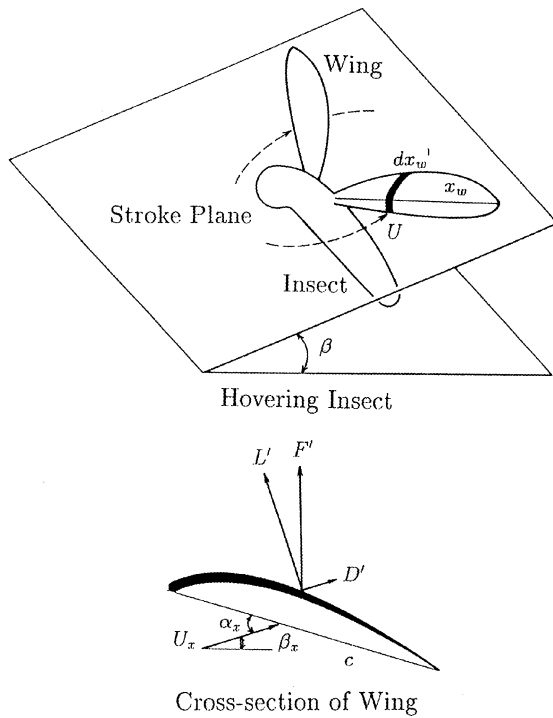


Fig. 4 Diagram of movements during hovering.

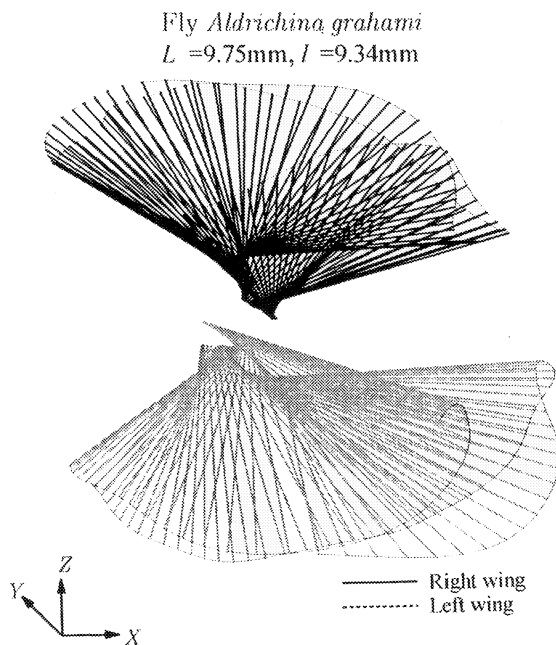


Fig. 5 A three dimensional view of the wing motion for the tethered fly.

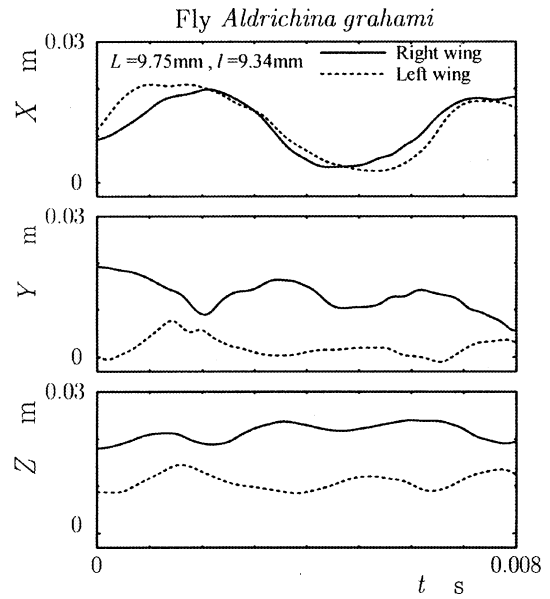


Fig. 6 Three components of the wingtip displacement.

端速度を表わしている．翅端速度は最大でおよそ 16m/s 程度にまで達していることがわかる．また，右翅および左翅の速度は必ずしも同じとは限らず，変動の振幅や位相を別々に変化させてはばたいていることも明らかである．図7における u, v, w は各々， X, Y, Z 方向の速度成分であり，また， V は式(9)で示す3次元速度を表わしている．

$$V = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \quad (9)$$

すなわち，ハエは翅の運動を止めることなく，はばたいていることが図7より明らかである．

同様に，ハチやアブなどの自由飛行時における3次元運動解析を行った．

3.3 昆虫のはばたき周波数

前述のような昆虫の自由飛行時の3次元運動解析，スケルトン振動の計測，風洞実験による昆虫のはばたき変動の非接触光学変位計を使用しての直接計測などによって様々な昆虫のはばたき周波数 f_i を計測した．その結果の一例を，図8に示す．図8における横軸は翼面荷重 P を表わし，昆虫の翼面荷重 P の増加とともにばたき周波数 f_i の増

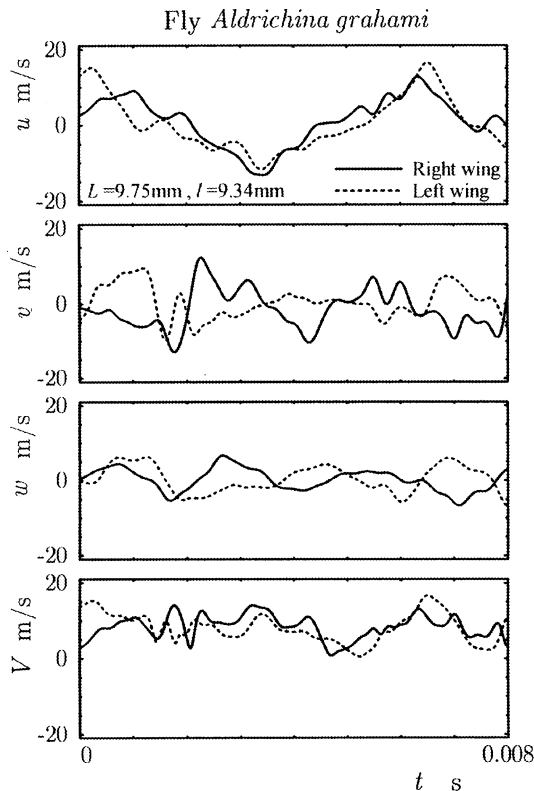


Fig. 7 Velocity variations of the wingtip motion.

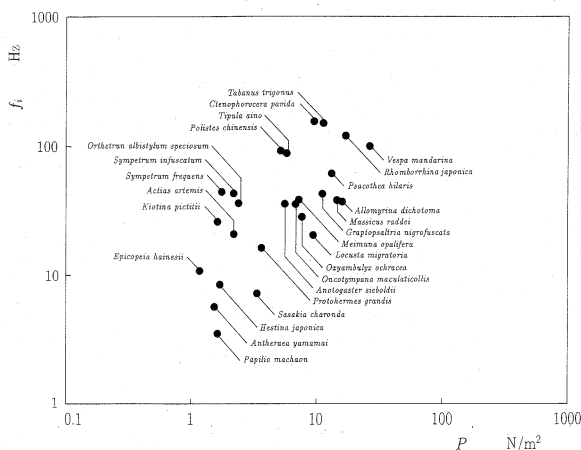


Fig. 8 Flapping frequency plotted against wing loading.

加が認められる．一般に昆虫のはばたき周波数は式(10)によって表わされる²⁾．

$$f_i = Km^{-\frac{1}{6}} \quad (10)$$

ここで， K は昆虫の種類によって異なる比例定数である．すなわち，昆虫のサイズが小さいほど翼面荷重が増加する．

3.4 昆虫の翅の電子顕微鏡観察

さまざまな，昆虫の翅を走査型電子顕微鏡によって観察し，昆虫の翅表面には多くの微毛状突起のあることを確認した．また，これらの突起は比較的傾いているものが多く，昆虫の翅まわりの微小流動との関連が示唆される．

4. おわりに

数種類の昆虫のはばたき飛翔時における翅の運動の3次元計測を行い，はばたき特性を究明した．また，走査型電子顕微鏡によって昆虫の翅を観察し，はばたきとの対応を試みた．

参考文献

- 1) 須藤 誠一，橋本 弘之，太田 福雄，片桐 一成: 飛行昆虫の挙動解析(トンボのはばたき特性)，日本機械学会論文集(B編)，**60**-579，3600/3606(1994)
- 2) 須藤 誠一，露木 浩二，橋本 弘之，片桐 一成: トンボの翅構造に関する研究，日本機械学会論文集(B編)，**62**-599，2674/2678(1996)
- 3) 須藤 誠一，露木 浩二，井小萩 利明，太田 福雄，信田 重成，谷 順二: トンボの翅構造に関する研究(第2報，トンボ翼とはばたき)，日本機械学会論文集(C編)，**64**-625，3526/3533(1998)
- 4) S. B. Savage: The role of vortices and unsteady effects during the hovering flight of dragonflies, J. exp. Biol., **83**, 59/77(1979)
- 5) C. J. Ellington: The aerodynamics of flapping animal flight, Amer. Zool., **24**, 95/105(1984)
- 6) M. Sato and A. Azuma: The flight performance of a damselfly *Ceriagrion Melanurum* Selys, J. exp. Biol., **200**, 1765/1779(1997)
- 7) J. M. Zanker: The wing beat of *Drosophila melanogaster* I. Kinematics, Phil. Trans. R. Soc. Lond., **B327**, 1/8(1990)