

羽ばたき翼周りの非定常流れと発生する流体力の関係

飯田明由（豊橋技科大），荻巢宏幸（工学院大），富川昌義（工学院大）

Relationship between unsteady flow around flapping wings and resultant aerodynamic forces

A. Iida^{*}, H. Ogisu^{**}, and M. Fukawa^{**}

^{*} Dept. Of Mech. Eng., Toyohashi University of Technology,

^{**} Dept. of Mech. Eng., Kogakuin University

ABSTRACT

The purpose of this research is to clarify generation mechanism of aerodynamic force of flying insects such as the dragonfly. To understand the mechanism of insect flight is important to develop Micro Air Vehicles (MAV) for rescue inquiry devices of disaster area. The aim of this investigation is a quantitative correlation analysis between vortex structure around a dragonfly and aerodynamic force. Unsteady aerodynamic force and flow field were measured by micro load-cell system and dynamic PIV system. As a result, the continuous vortex tubes were observed such as the U-shaped separation. The topology of the separated flow is almost two dimensional without near wing-tip. When the distance of vortex core was small, the large amounts of aerodynamic forces were generated. The experimental results showed strong interaction between the vortices and wings occurred when the distance of vortex core was almost same as the chord length. We also developed a mechanical flapper based on the experimental results of the flow around a dragonfly. The aerodynamic force of the mechanical flapper was proportional to the second powers of the flapping frequency. The aerodynamic lifting force of the mechanical flapper was 0.68 times of weight the flapper at the flapping frequency of 37.6 Hz. It corresponded to twice of dragonflies' weight, it therefore indicated that the mechanical flapper generated sufficiently large enough to lift of dragonflies.

Key Words: Unsteady flow, Vortex structures, MAV, PIV, Biomimetics

1. 序論

災害地や極限環境において被災者の探査や被害状況の調査に用いられる小型飛行体(MAV: Micro Air Vehicle)の開発においては、昆虫の飛行に見られるようなホバリング飛行（空中静止）を始めとする高度な飛行を実現することが必須課題である。現在、世界各国でさまざまな MAV が開発されているが¹⁾、羽ばたき翼によってホバリング飛行を実現した MAV は未だに開発されていない。このため、昆虫や鳥類の高い飛行性能を規範とした飛行体の開発が精力的に進められている²⁾。特に低レイノルズ数域における羽ばたき翼周りの流れについてさまざまな研究が行われており、MAV 開発に役立てられている。これまでに昆虫の飛行では、翅を羽ばたかせると同時にひねり運動を加えることにより高い揚力を得ていることが明らかにされている。また Arian ら³⁾の計測によって、羽ばたきによって翅まわりには U 字形状の渦が形成されることなども明らかとなっている。

本研究では、飛行昆虫が発生する流体力と羽ばたき翼周りの渦構造を同時計測することにより、羽ばたき運動による流体力の発生に渦構造がどのように寄与する

かを実験的に明らかにした。さらに翅まわりの三次元的な渦構造を定量的に可視化し、渦構造と流体力の関係を定量的に評価することにより、昆虫の飛行メカニズムについて検討した。

これらの知見を元に小型の羽ばたき装置を開発し、羽ばたき周波数と揚力の関係、トンボの翅に作用する流体力と翅のひねりについて実験的に調べた。

2. 昆虫の飛行解析

2.1 計測対象

被災地における探査用 MAV では、ホバリング飛行や急旋回が必要なこと、探査用カメラなどを搭載する必要があることから、飛行性能に優れ、比較的大型の昆虫であるトンボを計測対象とした。トンボは肉食の昆虫であり、捕食のために飛行昆虫の中で最も優れた飛行性能を有している。また、トンボの羽ばたき周波数は約 30 Hz であり、計測を行うことが比較的容易であると同時に、MAV 用の機構を製作しやすいという利点もある。計測にはウスバキトンボ(*Pantala flavescens*)を用いた。

2.2 計測手法

トンボの羽ばたき運動（羽ばたき周波数 30Hz）に伴う非定常流れ場を計測するため、高速度ビデオカメラ（X-Stream VISION XS-4: IDT Co., Ltd.）と赤外線レーザー（XS-IR DPSS Laser Unit: IDT Co., Ltd.）を用いた高速 PIV 計測システムを使用した。フレームレートは 5000Hz であり、トンボの羽ばたき運動を約 1mm ピッチ以下で追跡することが可能である。PIV 計測に用いるトレーサ粒子には代表粒径 $1\mu\text{m}\sim 3\mu\text{m}$ のオイルミスト（SAFEX F2010: DANTEC Co., Ltd.）を用いた。

解析対象とするトンボが発生させる流体力は、その体重から推定して約 3 mN 程度であると考えられる。本研究ではトンボが発生する微小流体力を非定常に直接計測するため、カンチレバー（片持ち梁）とひずみゲージを用いた微小流体力計測装置を製作した。カンチレバーの共振周波数を、羽ばたき周波数よりも高くするため、カーボンロッド（ $\phi 3\text{ mm}\times 150\text{ mm}$ ）製のカンチレバーと半導体ひずみゲージ（ゲージ率 -114: 共和電業社製）を使用した。このシステムでは、先端負荷約 5 mN での固有振動数がトンボの羽ばたき周波数の 2 倍以上（66 Hz）となることを確認した。対象とする力が微小であるためひずみゲージの温度ドリフトが計測誤差の要因となる。その対策としてひずみゲージ周辺に断熱材を施すと同時に、計測機器周辺環境の温度管理を行った。その結果、本装置では荷重 0.98 mN \sim 49.1 mN において計測誤差 1%以内を確保した。

3. 実験結果

トンボの羽ばたき運動によって発生する鉛直方向および水平方向分力の合力と、それによる推進角度を計測した結果、前翅のみの場合、平均合力は自重の 0.66 倍、推進角度は 51.9 deg であった。同様の解析を後翅のみの場合に対して行った結果、平均値、推進角度とも前翅後翅において大きな差がないことを確認した。

また、翅を除去しない状態で計測した結果、鉛直方向に時間平均で自重の 1.37 倍の力を発生していることがわかった。前翅のみで計測した結果では自重の 0.57 倍、後翅では 0.54 倍であり、前後の翅による差はないものと考えられる。一方で水平方向分力は、両翅で自重の 0.63 倍、前翅のみで自重の 0.59 倍、後翅のみで自重の 0.65 倍であり、これも大きな差は見られない。ただし、翅が二対の場合においては、位相差が約 -65 deg（後翅先行）があった。

図 1 に、羽ばたきの一周期の中で鉛直方向分力が最大になる瞬間および、最小になる瞬間の翅まわりの渦度を示す。鉛直方向の力が最大値に達する瞬間では、翼弦長と概ね等しい直径の渦が翅の上面に形成されている様子が見える。反対に、力が最低値になる瞬間では、渦の直径が大きく、翅からも離脱し始めている様子が見える。またこの場合、下死点から振り上げる状態であるため、翅のひねり角度が 120 deg 程度と大きな値となり、鉛直方向の力がほとんど作用しなくなり、振り上げ時に発生する負の揚力を抑制していることがわかる。

トンボの羽ばたきによって発生する流体力は渦度の強度 ω_z とその面積 D に比例し、渦と翅の距離 L_v に反比例すると考えられる。図 2 にトンボの翅周りの渦度の特性量 $(|\omega_z D|)/L_v f$ （横軸）に対する揚力を示す。縦軸の揚力は自重で無次元化した。翅に影響を与える無次元渦強度渦 $(|\omega_z D|)/L_v$ が大きくなると揚力が増加することがわかる。渦と翅の距離 L_v に対する流体力の大きさを比較した結果、渦と翅との距離が翅の翼弦長程度のとき大きな揚力が発生していることがわかった。

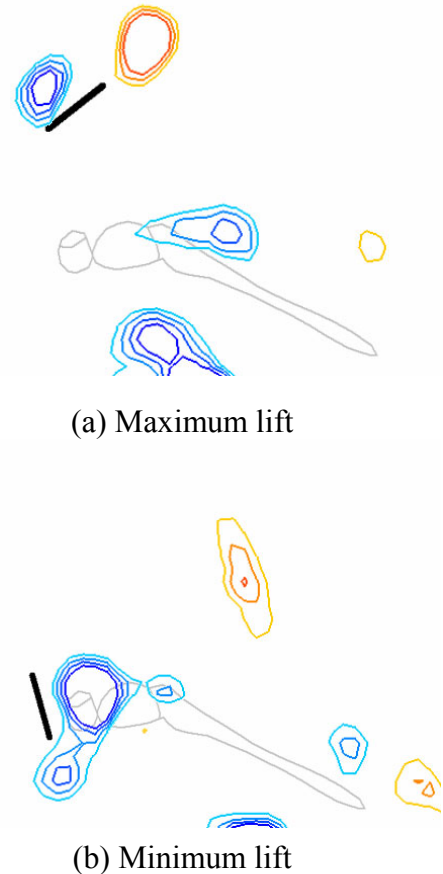


Fig. 1 Vortex structures around a flapping airfoil of a dragonfly

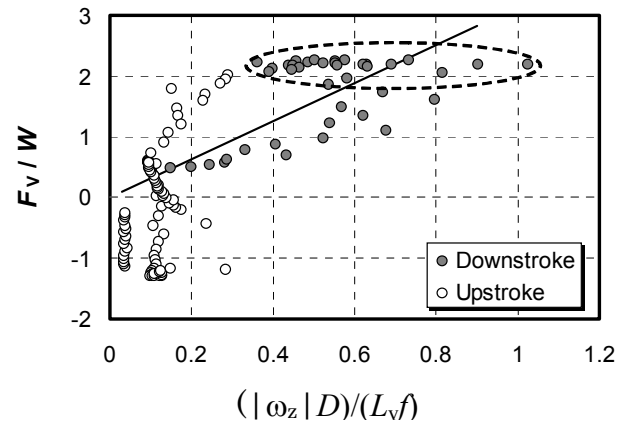


Fig. 2 Correlation between vortex structures and vertical force

トンボの羽ばたきにより翅まわりに生じる三次元的な渦構造を可視化した結果を図3に示す。翅中腹付近の前縁から発生した渦と、翅の先端から発生した渦の組み合わせによって、翅上面に半 U 字形の渦が形成されていることがわかる。

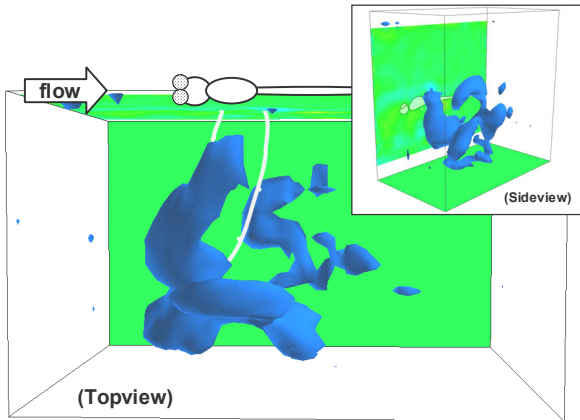


Fig. 3 Three-dimensional vortex structures around a dragonfly

4. 羽ばたき型 MAV

トンボを用いた羽ばたき翼周りの実験結果から得られた知見を元に製作した羽ばたき型 MAV を図4に示す。羽ばたき飛行で重要な翼のひねり運動については、翼に回転軸を取り付け、羽ばたき機構のリンク部に適度な摩擦を設けた軸受けを取り付けることにより、運動に伴う回転角度を制御して、トンボの羽ばたきに近くなるように工夫した⁽⁴⁾。

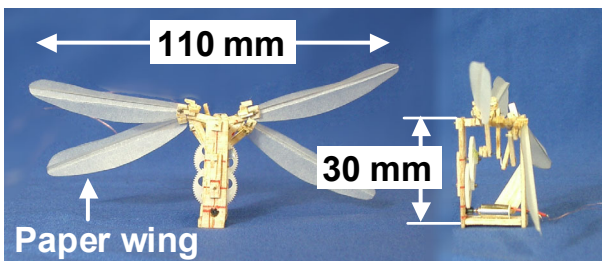
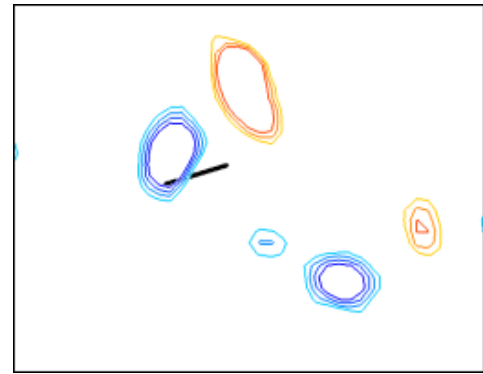


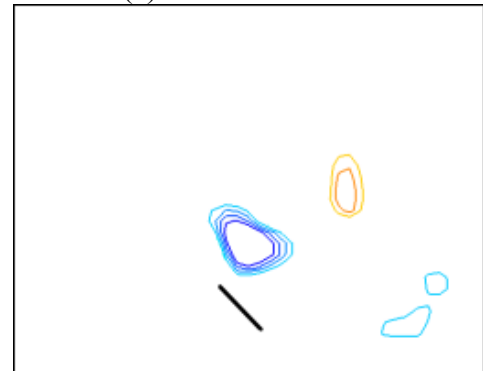
Fig. 4 Schematic of mechanical flapper for Micro Air Vehicle

図5に羽ばたき型 MAV 周りの渦度場を示す。図1と同様に、羽ばたきの一周期の中で鉛直方向分力が最大になる瞬間および、最小になる瞬間の翅まわりの渦度を示している。振り下ろし時に強い離渦を発生させ、上向きの揚力を発生させていることがわかる。また、揚力が最小になる瞬間は渦の負圧が翅の上方に作用しないように翅をひねり、流体力を制御していることがわかる。このようにトンボの羽ばたきを模擬することにより、羽ばたき機構周りの流れはトンボの羽ばたき運動と流体力学的にはほぼ相似にすることが可能である。

羽ばたき機構による流体力を測定するため、羽ばたき機構を上皿天秤の一端に取り付け、翅を静止させた状態で天秤をつりあわせ、羽ばたき運動にともなう天秤の変異量をレーザー変位計により計測して流体力を求めた。



(a) Maximum lift



(b) Minimum lift

Fig. 5 Vortex structures around a flapping airfoil of a mechanical flapper

図6に羽ばたき機構による流体力 F_v と羽ばたき周波数 f の関係を示す。最大流体力は、羽ばたき周波数 37.6 Hz で自重 (0.9 g) の 0.68 倍であった。この流体力はトンボの自重の2倍に相当する。羽ばたき周波数がトンボの羽ばたき周波数と等しい 30 Hz の場合は、トンボの自重に相当する流体力を発生させることができることを確認した。このことから、開発した羽ばたき機構は、トンボの運動を模擬できているものと考えられる。

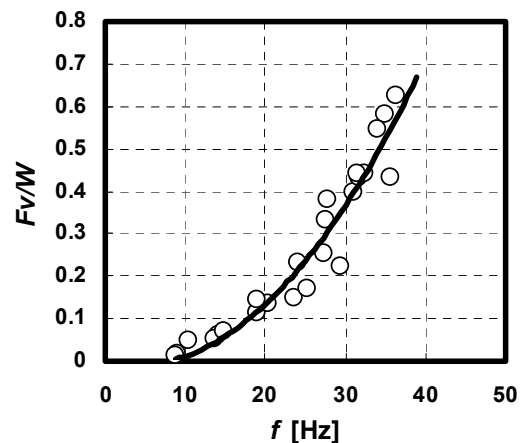


Fig. 6 Relationship between aerodynamic force and flapping frequency.

羽ばたき機構はトンボに比べて自重が重いいため、このままでは飛行することができない。実際にトンボと同じように飛翔できるかを確認するため、図7に示すように

羽ばたき機構にヘリウムガスを詰めたバルーンを装着し、バルーンによる浮力を利用して羽ばたき機構がほぼトンボと同じ重量になるようにした。図8に飛翔実験の様子を示す。この状態でヘリウムガスの量（浮力）と羽ばたき周波数を変えて流体力を測定した結果を図9に示す。先に示した固定実験と同様、流体力が羽ばたき周波数の2乗に比例することが確認された。また、バルーンによって調整された実質的な機体重量と羽ばたきによる流体力が釣り合っているものとして揚力を求めた結果、固定実験の結果とほぼ一致する結果が得られた。このことから、機体の軽量化を行うことにより羽ばたき飛行が可能になるものと考えられる。

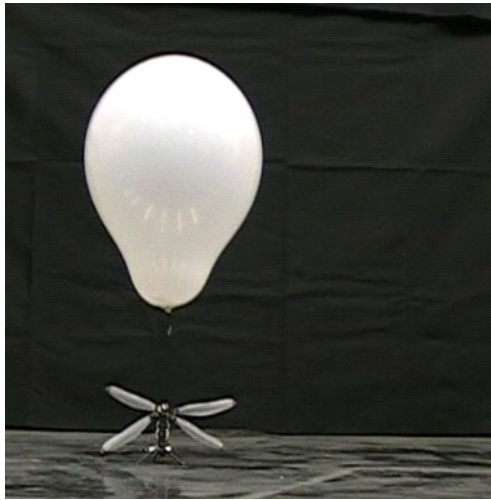


Fig. 7 Picture of mechanical flapper with balloon

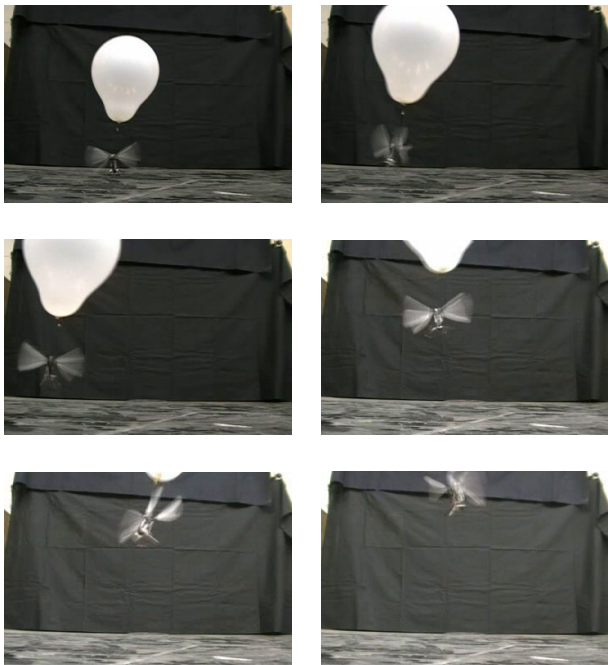


Fig. 8 Flight test of mechanical flapper with balloon

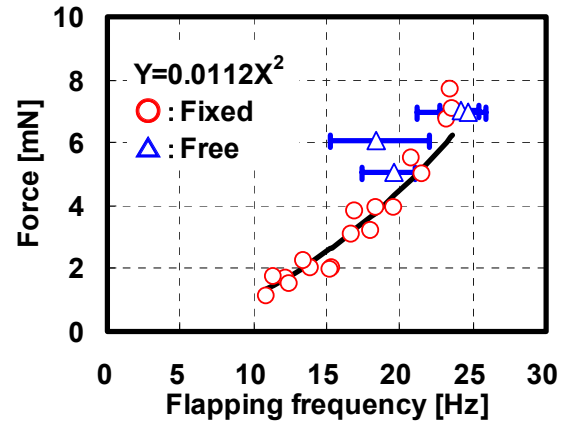


Fig. 9 Relationship between aerodynamic force and flapping frequency

5. 結言

トンボの飛翔メカニズム解明のため、トンボが発生する非定常流体力と翅まわりの流れ構造解析の同時計測を行い、以下の知見を得た。

- (1) トンボのまわりの渦構造と流体力との同時計測結果から、渦と翅の距離が最も近く、渦の直径が翼弦長以内の強い渦度の場合、発生する力が最大になることがわかった。
- (2) トンボの羽ばたきによって翅周りにU字型の渦が形成されることを確認した。
- (3) トンボの羽ばたき運動を参考に、羽ばたき機構を試作した結果、トンボの羽ばたきとほぼ同様な流れ場を形成することができることを確認された。また、羽ばたき機構が発生させる流体力は、羽ばたき周波数の二乗に比例することを確認した。
- (4) ヘリウムガスを用いて機体重量を調整し、飛翔実験を行った結果、トンボの自重と同定の機体を浮上させることができることがわかった。

本研究は文部科学省科学研究費補助金（19560182）の援助を受けて行われた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- (1) Joel M. Grasmeyer, Matthew T. Keennon, Development of the Black Widow Micro Air Vehicle, *FIXED AND FLAPPING WING AERODYNAMICS FOR MICRO AIR VEHICLE APPLICATIONS*, Amer Inst of Aeronautics, Vol.195, (2001), pp.519-535.
- (2) Akira Azuma, Masato Okamoto, Kunio Yasuda, Aerodynamic Characteristics of Wings at Low Reynolds Number, *FIXED AND FLAPPING WING AERODYNAMICS FOR MICRO AIR VEHICLE APPLICATIONS*, Amer Inst of Aeronautics, Vol.195, (2001), pp.341-398.
- (3) Adrian L. R. Thomas, *et al.*, Dragonfly flight: free-flight and tethered flow visualizations reveal a diverse array of unsteady lift-generating mechanisms, controlled primarily via angle of attack, *The Journal of Experimental Biology*, Vol.207, (2004), pp.4299-4323.
- (4) 治田・他3名, トンボを模倣した羽ばたき翼周りの流れ計測, 日本機学会関東支部第12期総会講演会, (2006)