飛翔昆虫周りの渦度場の可視化

富川 昌義[○](工学院大院), 中村 瑞木(工学院大院)

萩巢 宏幸(工学院大学), 飯田 明由(工学院大学)

Visualization of vorticity field around a flying insect

Masayoshi FUKAWA, Mizuki NAKAMURA, Hiroyuki OGISU and Akiyoshi IIDA

ABSTRACT

The purpose of this research is to clarify the generation mechanism of aerodynamic lifting force of a flying insect. For this purpose, aerodynamic force and flow field were measured with a micro load-cell system and dynamic PIV system. As a result, negative pressure caused by leading-edge vortices makes large lifting-force in the downstroke process. Although the leading-edge vortices can be observed even in the case of upstroke process, lifting-force was not generated. Because of the distance between the vorticity core and wing was larger than that of the downstroke process. Therefore, the distance between the core and wing plays an important role with aerodynamic force generation.

Keywords: Micro Air Vehicle, Dynamic PIV, Flapping airfoils, Aerodynamic force.

1. 結論

近年、極限環境観察や被災地の調査などにおいて、探索地域を飛び回りながら情報収集ができる小型飛翔体(MAV: Micro Air Vehicle)の開発が望まれている。MAVの運用例として倒壊した建物内での活動を想定した場合、ホバリング飛行や急旋回といった高度な飛行性能を両立することが必須課題である。現在、世界各国で様々なMAVが開発されているが¹⁾、上記の様な飛行性能を両立したMAVは未だ開発させていない。一方で、昆虫に代表されるような羽ばたき翼による飛翔では、実際にホバリング飛行と急旋回を両立している。このことから、昆虫や小型の鳥類を規範としたMAVの開発が勢力的に進められており²⁾、特に低レイノルズ数域における翅まわりの流れについて多くの研究が行われている³⁾。

飛翔昆虫の多くは薄い平板翼を有しており、その前縁が尖っている。そのため羽ばたき運動中は、はく離による安定した前縁渦(Leading-edge vortex)が観測させる。この前縁渦は翅の上面に強い負圧領域を形成し、その力によって昆虫は飛翔していると考えられている⁴⁾。さらに羽ばたき運動では翅を単振動させた場合よりも、羽ばたきと同時にひねり運動を加えた場合の方が大きな力が得られることがわかっている⁵⁾。これらのことから、昆虫の飛翔では羽ばたき運動中の翅と渦の干渉及び翅のひねり運動が重要である。本報告では、実際の昆虫が発生する流体力を非定常に計測するとともに、ダイナミックPIVを用いて翅まわりの流れ場を可視化し、両者の同時計測を行った。これら

の計測結果から、羽ばたき運動中の流体力と流れ場の関係を定量的に評価することを試みる。

2. 解析手法

2.1 解析対象

飛翔昆虫を用いた実験として、トンボの周りの流れ場と流体力の同時計測を行った。飛翔昆虫としてトンボを利用したのは、トンボが比較的大型の部類に属する肉食の昆虫であり、獲物を捕食するため飛行性能に優れているためである。また、トンボの羽ばたき周波数は約30 Hzであり、非定常計測を行うことが比較的容易であることから、MAV用の機構を作成しやすいなどの利点があげられる。

本研究で計測に用いたアキアカネ(学名)は、初夏から晩秋にかけて日本全国に広く生息し、捕獲も容易である。アキアカネの緒言をTable 1に示す。前翅と後翅の干渉を排除し、羽ばたき運動により発生する力を評価し易くするため、前翅あるいは後翅を切除して計測を行った。前翅のみのトンボをType A、後翅のみのトンボをType Bとした。

Table 1 Characteristics of *Sympetrum frequens*

		Type A	Type B
Length of body		43 mm	44 mm
Weight of body		0.24 g	0.28 g
Forewing	Wing span	33 mm	—
	Wing chord	8.3 mm	—
Hindwing	Wing span	—	32 mm
	Wing chord	—	10 mm
Flapping frequency		27 Hz	26 Hz

2.2 流体力計測

本研究では昆虫が発生する流体力を計測するため、カンチレバー(片持ち梁)とひずみゲージを用いて、トンボを固定した状態で計測を行った。したがって、測定される流体力はトンボが実際に飛行している状態(フリー・フライト)の状態と必ずしも一致するわけではないが、昆虫が羽ばたくことによってどのような揚力が発生するかを調べることは可能である。この状態で流体力を計測した結果、フリーフライトの状態とほぼ等しい揚力(トンボの自重の1.2倍)が得られることを確認済みである。

トンボの自重はおよそ1.96 mN ~ 2.94 mNであり、飛行に必要な流体力は9.81 mN程度であると想定される。このような小さな非定常力を計測する場合、ひずみゲージの感度とカンチレバーの固有振動数が問題になる。トンボの羽ばたき周波数は約30 Hzであることから、レバーの固有振動数は共振を避けるため60Hz以上の周波数が必要になる。しかし、レバーの剛性を上げることで固有振動数を上げると、ひずみゲージの感度が下がってしまう。このことから、相反する2つの条件を両立することが計測上重要になる。そこで、レバーの材質や直径、長さを調整して固有振動数を上げるとともに、ゲージ率の高いひずみゲージを用いて感度を上げ、これらの問題を解決した。開発した流体力計測装置をFig. 1に、レバーの仕様をTable 2に示す。

Fig. 1 Schematics of measurement system of aerodynamic force

Table 2 Specifications of micro load-cell system

Material	Carbon rod
Diameter	1.0 mm
Length	75 mm
Resonance frequency	63 Hz
Gauge factor	104

計測はレバーの先端にトンボを固定して行った。レバーの根元にひずみゲージ(共和電業社製: ゲージ率 104)を貼り付け、トンボが鉛直上向きに発生する力をレバーのひずみとして検出した。検出されたひずみはアンプによって1000倍に増幅し、PCにより記録した。実験では流体力の絶対値が小さいため、ひずみゲージの特性が温度に強く影響する。そこで、ひずみゲージの周囲とブリッジ回路を断熱材で覆い、外気との接触を避ける処置を施した。その結果、0.981 mN ~ 9.81 mN までの力を誤差±1 %以内の精度で計測できることを確認した。また、ハンマリング試験の結果、計測系の固有振動数は63 Hzであり、トンボの羽ばたき周波数の約2倍を確保している。

2.3 ダイナミック PIV 計測

トンボの羽ばたき運動によって生じる渦度場を計測するため、ダイナミック PIV システムを使用した。このシステムでは1秒間に5000コマの撮影が可能であり、30 Hzで羽ばたくトンボの周囲の流れを計測することが可能である。ダイナミック PIV システムと流体力計測システムを同期させることにより、流れ場と流体力の同時計測を実施した。

3. 解析結果

3.1 流体力計測結果

Fig. 2にトンボが発生する流体力及び翅のひねり角の計測結果を示す。Fig. 2 (a) は前翅のみ、Fig. 2 (b) は後翅のみの結果である。計測結果は5周期分の位相平均結果である。羽ばたき運動における翅のひねり運動の効果を確認するため、ひねり角(Feathering angle)を計測した。ひねり角は前縁の軌跡(ストロークプレーン)と翅断面(翼弦方向)がなす角とし、PIVの計測断面の前縁と後縁を時系列に追跡することで計測した。

(a)では、位相80度付近で最大揚力(自重の約3.5倍)を発生し、下死点付近で最低揚力(自重の約1.5倍)を発生した。ひねり運動について見てみると、振り下げ時はストロークプレーンと翅を直角に近い角度(約70度)で一定に保っており、逆に振り上げ時は比較的平行に近い角度(約150度)を保っている。このようなひねり運動を行うことにより、振り下げ時は前縁渦の発生を促進させ、逆に振り上げ時は抑制していると考えられる。揚力の時間平均値は、自重の約0.53倍であった。

(b)の場合、位相120度付近で最大揚力(自重の約1.8倍)を発生し、位相240度付近で最低揚力(自重の約1.1倍)を発生した。ひねり運動について見てみると、振り下げ時はひねり角約30度~70度まで緩やかに翅をひねり、逆に振り上げ時はひねり角を約120度一定に保っている。時間平均値は、自重の約0.18倍であった。

(a) Forewing: Type A

(b) Hindwing: Type B

Fig. 2 Comparison of aerodynamic force and feathering angle

3.2 ダイナミック PIV 計測結果

Fig. 3にトンボの翅のまわりの PIV 解析結果を示す。ここで、(a-1) ~ (b-2)は前翅のみ、(c-1) ~ (d-2)は後翅のみの結果である。

Fig. 3 (a-1), (a-2)は位相角 80 度付近における最大揚力発生時の渦度コンター図と流れ場のベクトル図である。ただし、ベクトル図は翅に対する相対速度を示す。同様に (b-1), (b-2)は下死点付近で揚力が最低となる場合の測定結果である。大きな揚力が得られている(a-1)では、翅の前縁ではなく離れた流れが観察される。トンボはこの前縁渦による負圧により揚力を得ている⁴⁾と考えられる。一方、揚力が最低となる(b-1)においても前縁渦が観察される。前縁渦があるにもかかわらず、揚力が発生しない原因としては、下死点付近で羽ばたき速度が遅くなるため、振り下げにより引きずられてきた流れが翅の上面に衝突するためと考えられる。ベクトル図を見ると、(a-1)では翅に衝突するような流れは観察されないが、(b-2)では流れが翅上面に衝突する様子が観察された。このことが(b-1)において負の揚力を発生させた原因と考えられる。

Fig. 3 (c-1), (c-2)に位相角 120 度付近における最大揚力発生時の渦度コンター図と流れ場のベクトル図を示す。(d-1), (d-2)は位相角度 240 度付近における最低揚力発生

時の結果である。(c-1)と(d-1)から、前翅のみの計測結果と同様に前縁渦が発生していることがわかる。ここで(c-1)は翅の上面に渦があるのに対して、(d-1)では渦と翅との距離が大きくなっている。翅を振り下げている(c-2)では、翅に対して下から上に流れが衝突するため、上向きの力を発生する。一方、振り上げ時(d-2)では翅に対して上から下に押し付ける流れが発生するため、はく離渦による負圧の効果が小さくなり正の揚力は発生しない。

4. 結論

羽ばたき翼による飛行メカニズムを解明するため、トンボが発生する流体力と翅まわりの流れ場を同時計測し、以下の知見を得た。

- (1) トンボは前翅のみの場合平均で自重の約 0.53 倍、後翅のみの場合平均で自重の約 0.18 倍、鉛直上向きの力を発生する。
- (2) 振り下げ時はストロークプレーンと翅を直角に近く保って羽ばたくことにより前縁渦を発生させ、逆に振り上げ時は比較的平行に近く保つことで渦の発生を抑制している。
- (3) 振り下げ時、前縁からはく離れた流れによる前縁渦が翅の上面に付着する様子を可視化した。流体力と比較した結果、トンボはこの渦の負圧により大きな力を得ていると考えられる。

謝 辞

本研究は文部科学省科学研究補助金(16560157)の援助を得て行われた。ここに記して謝意を表す。

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) Richard Ames, Oliver Wong Narayanan Komerath: On the Flowfield and Forces Generated by a Flapping Rectangular Wing at Low Reynolds Number, *Proc. 6th KSME-JSME thermal and Fluid Engineering Conference*, (2005), on CD-ROM.
- 4) Michael H. Dickinson, Fritz-Olaf Lehmann, Sanjay P. Sane, Wing Rotation and the Aerodynamic Basis of Insect Flight, *SCIENCE*, Vol.284, (1999), pp.1954-1960.
- 5) Mizuki Nakamura, et al., Correlation Between Vortex Structures and Aerodynamic Force in Insect's Flight, *Proc. 6th KSME-JSME thermal and Fluid Engineering Conference*, (2005), on CD-ROM.

(a-1) Maximum lift: 80 deg. (Type A: Forewing)

(b-1) Minimum lift: near the BDC (Type A: Forewing)

(c-1) Maximum lift: 120 deg. (Type B: Hindwing)

(d-1) Minimum lift: 240 deg. (Type B: Hindwing)

(a-2) Maximum lift: 80 deg. (Type A: Forewing)

(b-2) Minimum lift: near the BDC (Type A: Forewing)

(c-2) Maximum lift: 120 deg. (Type B: Hindwing)

(d-2) Minimum lift: 240 deg. (Type B: Hindwing)

Fig. 3 Flow fields around a dragonfly (Left: Vorticity contour, Right: Velocity vector)