A 2 0 9

ダイナミック PIV による羽ばたき翼周りの流れの可視化

治田 真一[○] (工学院大学), 中村 瑞木(工学院大学)
富川 昌義 (工学院大学), 正 飯田 明由(工学院大学)

Visualization of flow around flapping airfoils with dynamic Particle Image Velocimetry

Shinichi Jida, Mizuki Nakamura, Masayoshi Fukawa, Akiyoshi Iida

ABSTRACT

The purpose of this research is to clarify generation mechanism of aerodynamic force of flapping airfoils imitating insect's flight. Hovering flights are important to develop micro air vehicles(MAV) for rescue inquiry devices of disaster area. In order to understand hovering flight of insects, a flapping machine was developed by using real insect's wings and link and motor mechanism. Flow field around the flapping machine was visualized by using smoke-wire method and dynamic PIV. Experimental results showed the down flow shed from the airfoils impinged to the airfoil, which reduced aerodynamic force of down stroke process. On the other hand, upper flow was generated in up stroke process, which made lifting force of flapping airfoil near the top dead center.

Keywords: PIV, MAV, Flapping Airfoil

1. 緒 論

災害地や極限環境における探査に用いる小型飛行体(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)及び急旋回等の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 MAV¹⁾が開発されているが、ホバリング飛行と急旋回等の高度な飛行性能の両立を実現した MAV は未だ開発されていない。これに伴い、実際にホバリング飛行と高度な飛行性能を両立している昆虫や小型の鳥類の飛行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多くの研究が行われている³⁾。

多くの飛行昆虫は薄い平板の翅を有しており、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と考えられている⁴⁾。翅のひねり運動は翅の弾性変形による効果を利用しているため、MAV の開発では軽量で適度な弾性変形が可能な翼の開発が必要である。本研究では飛行昆虫の羽ばたき翼による流体力の発生メカニズムを解明するため、本物の昆虫の翅を用いた羽ばたき機構を開発した。製作した装置を用いて、昆虫を模擬した羽ばたき翼周りの流れ場を可視化するとともに、ダイナミック PIV 計測による定量的な評価を行った。

2. 解析手法

2.1 羽ばたき機構

本研究では、飛行昆虫の中でも特にトンボに注目した。トンボは2対の薄い翅を羽ばたかせることでホバリング飛行や急旋回といった高い飛行性能を発揮している。また、トンボは初夏から初冬まで全国各地で幅広く生息しており、実験のために採取することが比較的容易であるという利点もある。実験に用いたトンボは、体長約50mm、体重約300mgのシノメトンボ(*Sympetrum infuscatum*)である。羽ばたき周波数は34Hzである。

実験には上述したトンボの翅を用いた羽ばたき機構を使用した。モーターの回転運動をリンク機構によって往復運動に変換することで羽ばたきを模擬した。モーターとリンク機構の大きさは、たてよこ24mm×9mm、高さ13mmである。また、腕部先端にパイプを通して軸周方向に自由度を設け、昆虫の羽ばたき運動の特徴であるひねり運動を模擬した。重量1.2gの小型モーター(定格回転数6000rpm)を用いることにより、トンボの羽ばたき周波数に相当する34Hzを実現した。羽ばたき機構の全重量は1.68gであり、トンボに対して5倍強の重量である。このため、今後さらなる軽量化が必要である。

Fig. 1, 2に製作した羽ばたき機構を示す。

Fig. 1 Flapping machine with insect's wings

Fig. 2 Link and motor mechanism

2.2 流れ場の可視化

羽ばたき翼周りの流れ場がどのように変化するかを調べるため、Fig. 3に示す実験装置を用いてスモークワイヤ法による流れ場の可視化を行った。撮影には Photron 社製の高速カメラを使用し、フレームレート 2000fps、シャッタースピード 1/3000s、画像の解像度 512×256 pixels で撮影した。光源は発熱のほとんどない白色 LED を採用し、LED を 336 個使用することで 3000 ルーメンの光を得た。ワイヤは、煙が等間隔に流出するようにするため、 $\phi 0.2\text{mm}$ のニクロム線 2 本をらせん状にしたものを使用した。印加電圧は約 5V である。

2.3 PIV 計測

スモークワイヤ法による可視化は流れ場の大きな様子を調べるには適しているが、定量的な評価を行うことは難しい。PIV 計測はトンボの周囲のような複雑な流れ場の計測に適しているが、非定常計測が難しいという問題があった。そこで本研究では非定常計測が可能な PIV システムを構築するため、赤外線レーザーを利用したダイナミック PIV システムを作成した。赤外線レーザーは低価格でありながら 4W と高出力である利点を持つ反面、シート幅が厚い、通常の高速度カメラではフィルターでカットされている波長であるという問題がある。そこで赤外線の波長に対応し、外部からのパルス信号で簡単に

Fig. 3 Schematics of smoke wire method

Fig. 4 Schematics of dynamic PIV System

制御できる IDT 社製の高速カメラを利用し、パルス信号発生器と併せることでダイナミック PIV 計測システムを作成した。Fig. 4に実験装置を示す。トレーサには粒径約 $3\mu\text{m}$ のオイルミストを使用して主流速度 0.2m/s で実験を行い、フレームレート 2000fps、シャッタースピード 1/2000s で撮影した。

3. 解析結果

3.1 流れ場の可視化

Fig. 5(a)~(d)にスモークワイヤ法による羽ばたき翼周りの流れ場の可視化画像を示す。(a)~(d)はそれぞれ上死点近傍、振り下ろし過程、下死点近傍、振り上げ過程での流れ場の様子である。まず(a)の上死点近傍では、翼をひるがえすことにより、振り上げ過程で発生した渦が後方へ放出される様子が確認できた。(b)の振り下ろし過程では、振り下ろしの中腹付近で前縁から渦が発生し、その渦が下死点に近づくにしたがい成長している様子が観察された。また後縁からは周期的にカルマン渦が放出される様子が確認された。次に(c)の下死点近傍では、振り下ろし時に前縁から発生した渦が翼をひるがえすこと

で剥離し、翼上面に付着する様子が確認された。(d)の振り上げ過程では、振り下ろしと同じように後縁からカルマン渦の放出が観察できたが、前縁から発生する渦は確認できなかった。今回の実験結果を富川ら⁵⁾が行ったトンボの翅周りの流れ場の可視化実験と比較すると、全体的な流れ場の特徴は、羽ばたき機構周りの流れとおおよそ一致していることがわかった。

(a) Near the top dead center

(b) Down stroke process

(c) Near the bottom dead center

(d) Up stroke process

Fig. 5 Flow visualization around a flapping machine

3.2 PIV 計測結果

Fig. 6(a)~(d)に撮影された画像を元にした PIV 解析結果を示す。(a)は、前翅が振り下ろし過程の中腹付近にある時の渦度コンター図である。この解析結果から前縁及び後縁の両端から渦が発生し、前縁から発生している渦の方が強いことがわかる。また、時系列に沿って解析すると、後縁からの渦は(b)の下死点まで振り下ろした時点で剥離し、後流に放出されているが、前縁からの渦は振り下ろしの時点で剥離した渦が振り上げ時に翼上面に再付着し、(c)の振り上げ過程で翼上面に付着したまま、(d)の上死点付近で剥離し後流に放出されていることがわかった。前縁から発生した渦と後縁から発生した渦を比較するため、最大渦度と時間平均渦度を羽ばたき周波数で無次元化した値を算出し、定量的な評価を行った。後縁から発生する渦の時間平均渦度は $\omega_{ave}=5.42$ 、最大渦度は $\omega_{max}=8.76$ 、前縁から発生する渦の時間平均渦度は $\omega_{ave}=7.06$ 、最大渦度は $\omega_{max}=10.1$ であり、常に前縁から強い渦が発生していることがわかった。昆虫の飛行は羽ばたく際に前縁から発生した渦の負圧を利用して飛ぶことが知られているが⁴⁾、今回の計測で前縁渦の挙動を明確にすることができた。

富川ら⁵⁾が行ったトンボの流体力計測では、下死点直前で翼が振り下ろし状態にあるにも関わらず負の揚力が発生している。また上死点直前の振り上げ時にも反対に正の揚力が発生している。この現象が起きている下死点および上死点直前での流れ場を調べた。振り下ろし時の下死点直前での流れ場のベクトル図をFig. 7に、振り上げ時の上死点直前での流れ場のベクトル図をFig. 8に示す。下死点付近では羽ばたき速度が減速するため、羽ばたきによって引きずられてきた down flow が翼上面に衝突している様子が確認できる。このため翼が振り下ろし過程にあるにも関わらず、それ以上の速度で後流が翼を下方へ押し、負の揚力が発生する。一方、上死点直前では振り上げ過程とは反対の現象が起こっており、振り上げ過程であるにも関わらず upper flow が翼下面にぶつかるため、正の揚力が発生していると考えられる。このことから羽ばたき翼が後流を捕獲していることがわかる。

4. 結論

昆虫の飛行メカニズムを解明するため、トンボをモデルとした羽ばたき機構周りの流れ場をダイナミック PIV 計測により定量的に評価し、以下の知見を得た。

- 羽ばたき機構を用いた可視化実験では、上死点・下死点・振り下ろし過程・振り上げ過程において、トンボと同じような現象が確認された。
- 昆虫の羽ばたき飛行特有の現象である前縁渦の発生を詳細に確認することができた。また、飛翔昆虫の飛行の特徴である後流捕獲の現象を確認することができた。

(a) Down stroke process

(b) Near the bottom dead center

(d) Up stroke process

(d) Near the top dead center

Fig. 6 Vorticity contour of towing vortex

Fig. 7 Down flow from previous down stroke

Fig. 8 Upper flow from previous up stroke

謝 辞

本研究は文部科学省科学研究費補助金(16560157)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, AIAA(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, AIAA(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 Fluids 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) Masayoshi Fukawa, *et al.*: 飛翔昆虫の流体力計測と流れ場の可視化, 第 83 期 日本機械学会流体工学部門 講演会講演予定(2005)