

平成 21 年 3 月 25 日現在

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19560182

研究課題名 (和文)

マイクロ加工技術を活用した羽ばたき型マイクロ飛翔体の開発

研究課題名 (英文)

Development of Mechanical Flapping Micro Air Vehicles with MEMS Technology

研究代表者

飯田 明由 (AKIYOSHI IIDA)

豊橋技術科学大学・工学部・教授

研究者番号：30338272

研究成果の概要：トンボの飛翔を模擬した羽ばたき型 MAV を開発し、羽ばたき翼周りの流れと発生する流体力の関係を定量的に明らかにした。また、ヘリウムガスを用いて MAV の機体重量を調整することにより、世界で始めて自由飛翔中の MAV 周りの流れの非定常計測を行い、自由飛翔中のトンボと MAV 周りの流れが相似であることを定量的に示した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,700,000	810,000	3,510,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：流体力学，生物流体，航空力学，小型飛翔体，乱流，非定常流体計測

1. 研究開始当初の背景

我が国は地震や台風などによる自然災害に見舞われることが多い。特に都市部で災害が起きた場合、倒壊したビルなどに負傷者を取り残されてしまうことがある。このような場合、倒壊したビル内に進入し、探査活動が自由に行えるような探査ロボットが必要になる。探査ロボットにはいくつかの種類が考えられるが、昆虫のように小型で自由な飛行が可能な超小型飛翔体 (MAV: Micro Air Vehicle) は、災害時における負傷者を探査するのに優れた技術であると考えられる。

飛翔昆虫はホバリング (空中静止) が可能だけでなく、急旋回や急浮上などの高い運

動性を持っている。飛翔昆虫と従来型の飛行機との違いは羽ばたき翼を使用している点にある。蚊などの非常に小さな昆虫からトンボまで飛翔昆虫の多くは翅を羽ばたかせることによって飛行を可能にしており、羽ばたき運動による非定常流体力と低レイノルズ数流れの性質を活かして、効率のよい飛行を実現しているだけでなく、航空機やヘリコプターでは実現できないような高い運動性を示していると考えられる。このことから世界各国において羽ばたき型 MAV の開発が進められているが、昆虫のような自由に飛翔できる MAV の開発には至っていない。昆虫のような自由な飛翔、特にホバリングを実現するには

昆虫の飛翔を流体力学的に明らかにするとともに、マイクロ加工技術を活用した小型飛翔体の開発が必要となる。

2. 研究の目的

本研究では、トンボの生態を流体力学的に観察し、マイクロ加工技術を用いて簡易ひねり機構を開発し、羽ばたき型 MAV に適用することにより、羽ばたき運動における流体力学的特性を定量的に評価し、世界に先駆けて羽ばたき型 MAV を開発することを目標とする。

特に昆虫の羽ばたき運動における翅のひねり運動と前翅と後翅の位相差を考慮し、効率の良い羽ばたき運動と流体力の制御を実現することを研究期間内の第一の目標とし、MAV の実用化における設計指針を得ることを目標とする。

3. 研究の方法

研究は大きくわけて2つの方法で行った。ひとつは実際のトンボを用いて、昆虫の羽ばたき運動、羽周りの非定常流れ計測、発生する流体力の計測を行い、トンボがどのようにして流体力を発生しているかを明らかにするものである。実験にはウスバキトンボ (*Pantala flavescens*)を用いた。

もうひとつの実験はトンボの運動解析を参考にして製作した羽ばたき機構を用いて流れ場の非定常解析、平均流体力の解析、前後の翅の位相差を考慮した流体力の評価を行った。

(1) PIV 計測装置 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 (SAFEXF2010: DANTEC Co., Ltd.) を用いた。

(2) 流体力計測装置 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-

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。

4. 研究成果

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) があつた。

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わかる。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わかる。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) $|L_f|$ (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 ($|\omega_z \cdot D|/L_f$) 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るとき大きな揚力が発生していることがわかった.

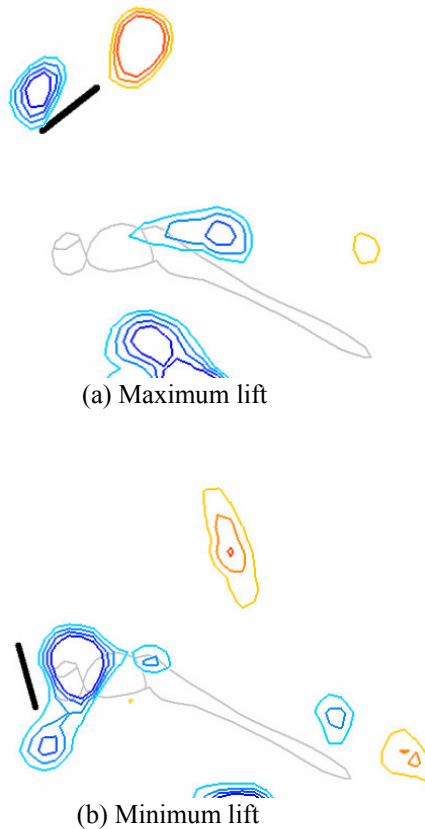


Fig. 1 Vortex structures around a flapping airfoil of a dragonfly

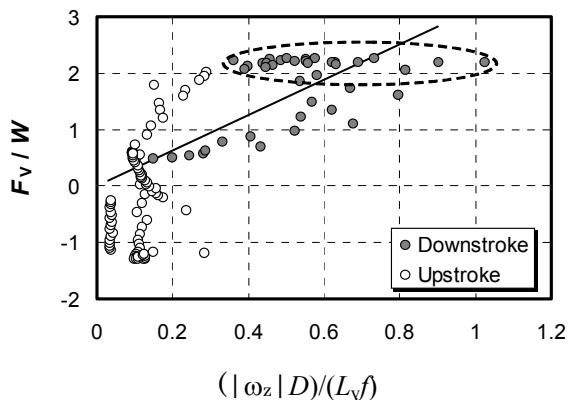


Fig. 2 Correlation between vortex structures and vertical force

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.

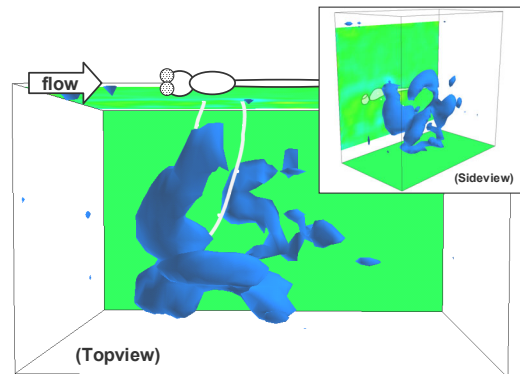


Fig. 3 Three-dimensional vortex structures around a dragonfly

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).

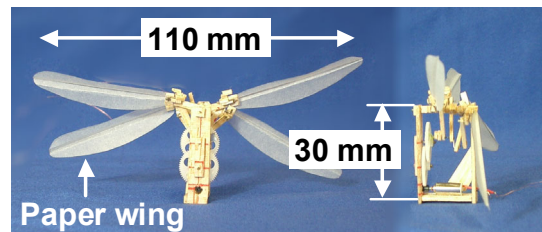
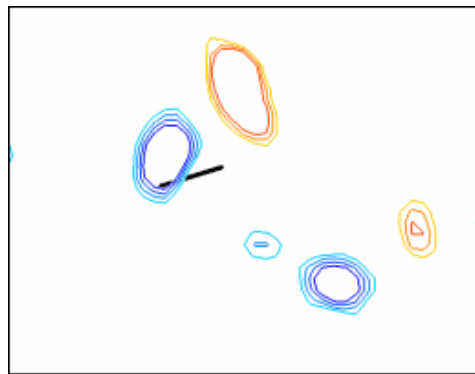


Fig. 4 Schematic of mechanical flapper for Micro Air Vehicle

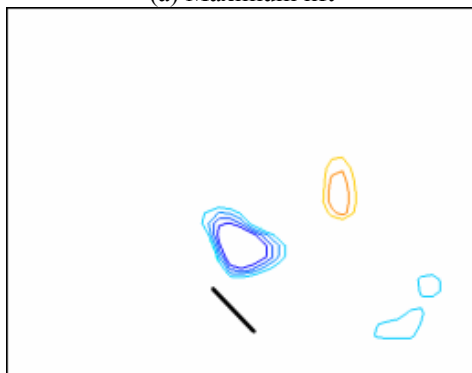
図5に羽ばたき型 MAV 周りの渦度場を示す. 図1と同様に, 羽ばたきの一周期の中で鉛直方向分力が最大になる瞬間および, 最小になる瞬間の翅まわりの渦度を示している. 振り下ろし時に強い離渦を発生させ, 上向きの揚力を発生させていることがわかる. また, 揚力が最小になる瞬間は渦の負圧が翅の上方に作用しないように翅をひねり, 流体力を制御していることがわかる. このようにトンボの羽ばたきを模擬することにより, 羽ばたき機構周りの流れはトンボの羽ばたき運動と流体力学的にほぼ相似にすることが可能である.

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。

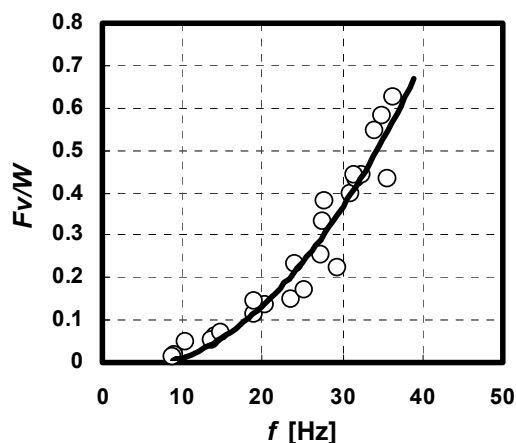


Fig. 6 Relationship between aerodynamic force and flapping frequency

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 30Hz 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羽ばたき機構はトンボに比べて自重が重いため、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充填したバルーンを取り付けて自重を調整することにより実際に機体を浮上させて実験を行った。実験結果を図 8 に示す。この方法ではヘリウムガスの量 (浮力) と羽ばたき周波数を変えて流体力を測定することにより、発生する流体力を評価することができる。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、揚力の絶対値は固定実験の結果とほぼ一致することがわかった。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。図 9 に飛翔実験の様子を示す。

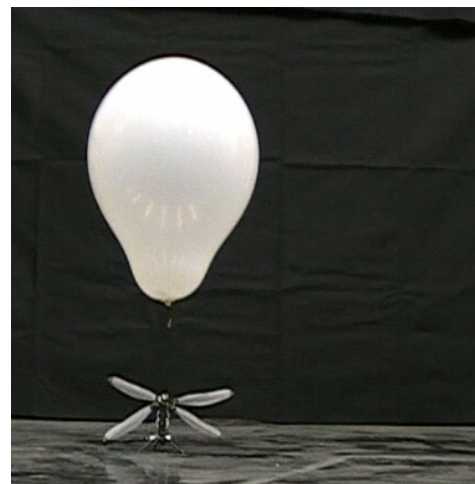


Fig. 7 Picture of mechanical flapper with balloon

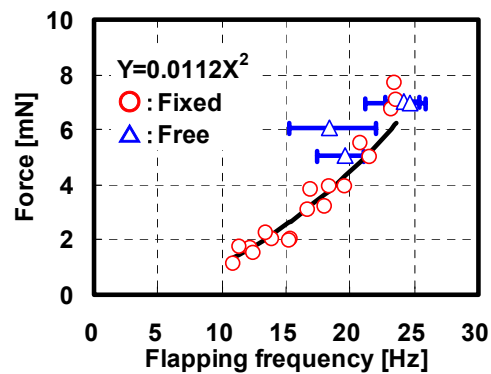


Fig. 9 Relationship between aerodynamic force and flapping frequency

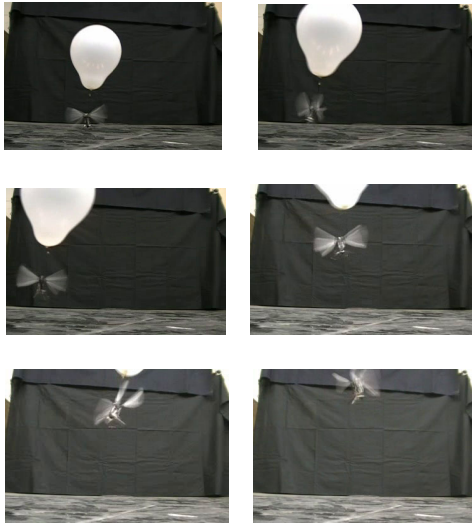


Fig. 9 Flight test of mechanical flapper with balloon

図 10(a)は MAV を風洞に固定した場合の流れ場, (b)は自由飛翔中の MAV 周りの流れ場である. 実際に飛翔している状態の羽ばたき型 MAV 周りの非定常流れ計測を世界で始めて実施することができた.

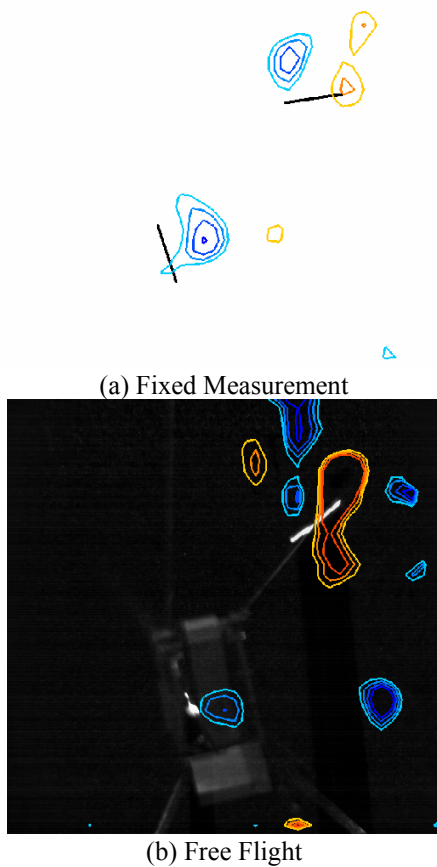


Fig. 10 Flow pattern around a mechanical flapper

図 11 に前後の翅の位相差を変える機構を示す. この装置を用いて翅の位相差を変えた場合の流体力 F_R と作用角 Ψ の計測結果を図 12 に示す. 流体力 F_R は前翅と後翅の羽ばたき位相差 δ に依存し, 作用角 Ψ は平均ひねり角 $\bar{\theta}$ に依存することがわかった. したがって, 羽ばたき周波数や姿勢を変えなくとも, 流体力の大きさや作用角を制御することが可能である. また, 流体力 F_R は平均ひねり角に関らず, $\delta \approx 0 \text{deg.}$ で最大となる. すなわち, 前翅と後翅が同時に羽ばたくことにより, より大きな剥離渦が発生し, 大きな流体力が得られるものと考えられる. このことは, トンボが離陸時やホバリング時に前翅と後翅の位相差を小さくし, 大きな流体力を得ているという計測結果⁽¹⁾とも一致する.

平均ひねり角 $\bar{\theta}$ と平均作用角 $\bar{\Psi}$ の成す角は, 約 175deg. で一定であり, ひねり角を変えることにより作用角を制御できることがわかった. これらのことから, 羽ばたき位相差とひねり運動を変化させることによりトンボのように流体力を制御することが可能である.

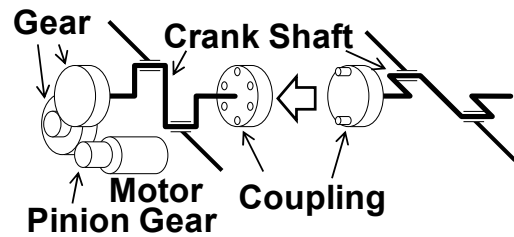


Fig. 11 Schematics of flapping and feathering mechanism

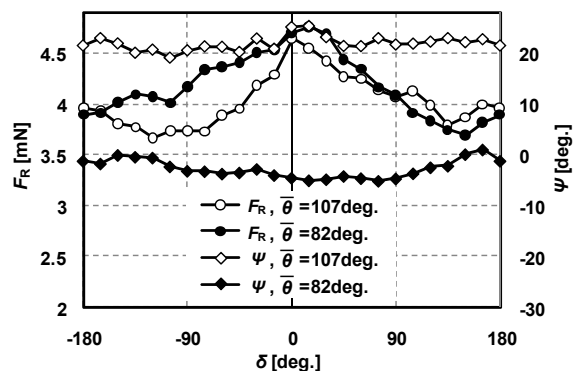


Fig. 12 Effect of phase difference of fore and hind wing on aerodynamic force and force direction

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が確認された。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、飛行実験を行った結果、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。
- (5) 羽ばたき位相差とひねり運動の範囲を変化させることにより流体力の大きさ、作用方向の制御が可能である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- (1) 飯田 明由・他 5 名, 飛しょう翔昆虫の非定常流体力と流れの相関解析, 日本機械学会論文集 B 編 73 巻 732 号 (2007), pp. 1781-1789 (査読有)
- (2) 飯田 明由, 飛翔昆虫を規範とした小型飛翔体の開発, 防衛技術ジャーナル 27 巻 No. 2 (2007), pp. 38~45 (査読無)

[学会発表] (計 6 件)

- (1) 萩巢 宏幸・富川 昌義, 飯田 明由, 水野 明き哲, 羽ばたき型 MAV の流体力計測, 第 85 期 日本機械学会流体工学部門 講演会, 2007 年 11 月 17 日, 広島大学
- (2) 新居 達也, 萩巢 宏幸, 飯田 明由, トンボの羽ばたき位相差に着目した小型飛翔体の開発, 機械学会東海支部講演会, 2009 年 3 月 15 日, 岐阜大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

飯田 明由
豊橋技術科学大学・工学部・教授
研究者番号 : 30338272

(2) 研究分担者

水野 明哲
工学院大学・工学部・教授
研究者番号 : 80133320

金野 祥久
工学院大学・工学部・准教授
研究者番号 : 17760649

(3) 連携研究者