

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 15 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560171

研究課題名（和文）

乱気流中で自由に飛翔するマイクロエアビークルの開発

研究課題名（英文）

Development of Micro Air Vehicles to fly freely in turbulence

研究代表者

飯田 明由 (IIDA AKIYOSHI)

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：30338272

研究成果の概要（和文）：

乱気流中において昆虫が自由に飛翔できることの原因を力学的に明らかにするため、風洞中に乱気流を発生させ、羽ばたき型マイクロエアビークル周りの流れ場と流体力の関係を実験的に調べた。固定翼の場合は、主流の乱れによって流れがはく離し、翼に作用する揚力が小さくなるのに対して、羽ばたき翼の場合は、主流の乱れや渦スケールの影響は小さく、乱気流中でも安定した揚力が発生することが確認された。これは羽ばたき翼が翼周りのはく離を利用しており、はく離渦が翼近傍にとどまるという低レイノルズ数かつ羽ばたき速度が飛行速度に比べて大きいという昆虫の飛翔の特徴によるものである。本研究結果から羽ばたき飛行が主流の乱れに強いこと、乱気流中で飛翔するには Wake Capture が重要であり、飛行速度と羽ばたき速度の比を最適化する必要があることがわかった。

研究成果の概要（英文）：

In order to clarify the flight mechanism of insects, effects of incoming flow turbulence on aerodynamic forces of a micro air vehicle were measured experimentally focusing on the relationship between aerodynamic force and flow field around the micro air vehicle with a turbulence generator and the mechanical flapper. In the case of a fixed-wing, the angle of attack of flow was changed by the incoming flow turbulence. As a result, the aerodynamic force is reducing with increasing the intensity of the incoming flow turbulence. On the other hand, in the case of mechanical flapper, the flow fields were almost the same as both of the laminar and turbulent incoming flow. As a result, the aerodynamic lifting forces were almost the constant in turbulent flow. It is because that effect of the low Reynolds number flow and large reduced frequency of the insect's flight. The separated vortices stay around the flapping wings. Therefore, these vortices generate the aerodynamic force act on the wings. There is a small influence for turbulence; therefore this method is advantageous in comparison with a fixed-wing. It reveals that the wake capture is important to control and stable flight of insects. Moreover, it is necessary to optimize the ratio of flapping speed and flight speed for stable flight.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

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：バイオ流体力学，マイクロエアビークル，小型飛翔体，乱流，非定常流体計測

1. 研究開始当初の背景

秋になると多くのトンボが大学キャンパス内を自由気ままに飛んでいる。スペースシャトルや500人乗りの旅客機を設計できる現代においても、昆虫や小鳥がどのようなメカニズムで飛翔しているのか完全に理解できているわけではない。飛行機を設計するための知識を使ってトンボの翅の大きさや羽ばたき運動から飛翔性能を予測し、筋肉・骨格からエネルギー効率などを推定してみると、トンボのように自由に飛翔することは困難という結論が導かれる。このため、トンボのように自由に飛翔できる小型のロボットを作り出すには至っていない。我々の第一の疑問はトンボは何故あのように自由に飛翔できるのかを明らかにすることである。一方、工学部の研究者としての立場として考えると、昆虫のように小型で自由に飛翔可能な超小型飛翔体 (MAV: Micro Air Vehicle) を開発することができれば、都市災害において倒壊したビルなどに残り残された負傷者の探査に応用することができる。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ことから、MAVの開発は国民の安全を守ることに寄与する技術であると考えられる。

2. 研究の目的

ヘリコプター型の飛翔体はホバリング性能に優れているが、周囲気流の状況により飛翔が制限される。昆虫は乱気流中でも自由に飛翔できることから、非定常羽ばたき翼は乱気流中においても安定した飛翔が可能な飛行方法と考えられる。本研究の目的は、乱気流を発生させることが可能な風洞を用いて、乱気流中における羽ばたき飛翔周りの流れと流体力の関係を明らかにすることである。さらに、それらの知見を元に、実用的な MAV の開発指針を得ることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 風洞中に乱気流を生成するため、図1に示す乱流発生装置を開発した。乱流発生装置は縦横6本ずつの格子に矩形翼を取り付け、各軸に取り付けられたsteppingモータによって矩形軸の振動を制御し、風洞中に大規模な乱れを発生させる装置である。この装置を用いて風洞気流中に大規模な乱れを発生させ、MAV および固定翼周りの流れ場がどのように変化するかを調べる。図2に乱流発生装置によって風洞気流中に生成した乱流場の一例を示す。横軸に主流速度に対する乱

れ強度を縦軸に乱流中の渦スケール (積分特性距離) を示す。主流乱れ強度は5%から15%の範囲で変化させることができる。また、渦スケールは20mm~70mm程度の範囲で変化させることが可能である。乱流発生装置を使用しない場合の主流の乱れ強度は1.6%以下、渦スケールは1mm程度と推定される。

MAVの翼幅が100mmであることから渦スケールの最も大きい場合は、MAVの翼幅に相当する渦が風洞気流中に形成されることがわかる。

図3に乱流発生装置によって生成した流れ場の一次元スペクトルを示す。乱流場には慣性小領域が観察されることから、局所等方性乱流場が形成されていることがわかる。

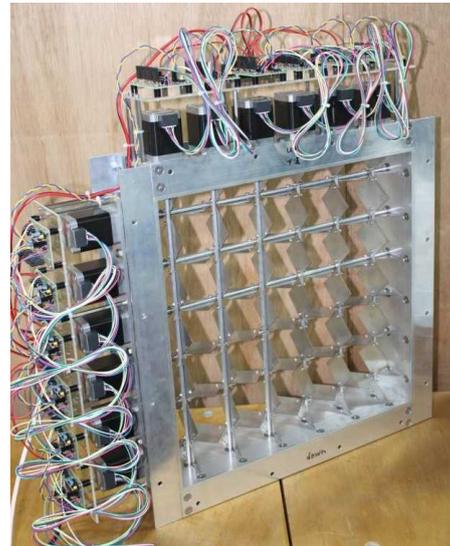


Fig. 1 Schematics of active turbulence generator

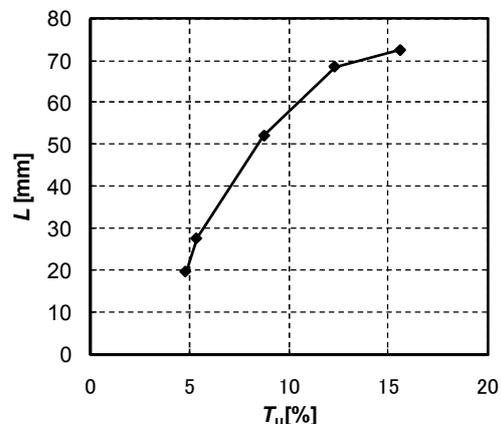


Fig. 2 Intensity of turbulence versus integral scale of turbulence generated by active turbulence generator

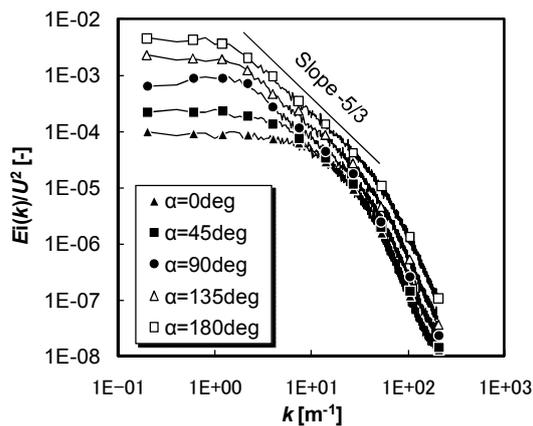


Fig. 3 Energy spectrum of turbulence generated by active turbulence generator

(2) 羽ばたき位相差と流れ場の渦構造、流体力の関係についてトンボを用いた実験を行ってきたが、生物を使った実験では実験の再現性やトンボの個体差の問題もあり、系統的な調査が難しい面があった。トンボを使った実験は羽ばたき翼周りの流れ場の基本的な構造を調べる上では有効であるが、より定量的で系統的な評価を行うには、繰り返し実験が可能な羽ばたき機構を用いる必要がある。そこで、これまでの実験データを参考にウスバキトンボ (*Pantala flavescens*) をモデルとした羽ばたき型 MAV を作成した。図 4 に作成した羽ばたき型 MAV を示す。作成した MAV は翼幅・翼弦及び翼面積や羽ばたき周波数はトンボと一致させてあり、羽ばたき角・ひねり角はホバリング時のトンボの運動と一致させてある。前翅と後翅の位相差は 15 度毎に変えられるようにした。本報告では、前翅と後翅を同時に羽ばたかせた位相差 0 度の場合と前翅と後翅の位相差が 90 度の場合について調べた。また、前後の翅の影響を調べるため、前翅のみの場合の計測も行った。羽ばたき周波数は 20Hz とした。

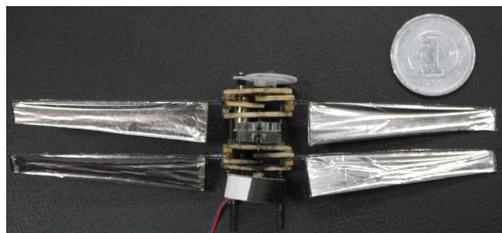


Fig. 4 Picture of flapping MAV

(3) 高速 P I V と流体力計測装置を組み合わせ、羽ばたき翼周りの非定常流れ場の瞬時渦構造と流体力の同時計測を可能とした。この装置を用いて、MAV 周りの流れ場と流体力の関係について定量的に調べた。実験装置の概要を図 5 に示す。座標系は流れ方向を X、鉛直方向を Y、X 軸と Y 軸に直交する方向を Z とした。オイルミストを混入した低速回流式風洞 (主流速度 0.2m/s) 内で MAV を羽ばた

かせ、高速度カメラと赤外線レーザーを使用して翼周りの流れ場を撮影した。撮影速度は MAV の羽ばたき周波数 20Hz に対し、100 倍の 2000fps に設定した。レーザーの発光時間を調整し、1 フレーム内の粒子移動量を 0.85pixel とした。また、フレーム間での平均的な粒子移動距離は 4pixel に設定した。

流れ場の三次元渦構造を取得するため、羽ばたき角度を検出し、各羽ばたき位相毎にデータを取得し、位相平均データを求めた。計測は翼の根元から翅のスパン方向に 5mm ずつトラバースして行った。各断面の計測結果を位相平均することにより三次元渦構造を構築した。

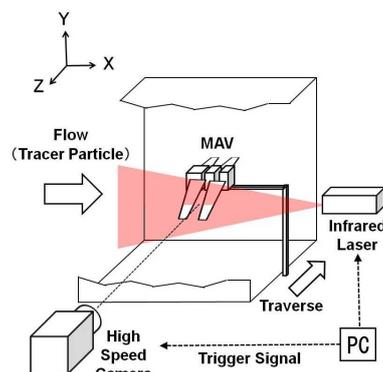


Fig. 5 Schematics of experimental apparatus for flow visualization

MAV の流体力計測にはカンチレバーを用いた。カーボンファイバー製のカンチレバーの一端に MAV を取り付け、他端を固定し、固定部の歪を半導体式歪ゲージで測定した。カンチレバーの固有振動数は MAV の羽ばたき周波数の約 2 倍の 52Hz になるように調整した。分銅を用いた校正結果から流体力の測定誤差は $\pm 4\%$ 以内である。図 6 に固定翼の測定結果を示す。平板翼を用いた実験結果は水槽実験を用いた結果とも良く一致し、装置の精度を確認することができた。また、トンボの翅を用いた実験結果と平板翼の実験結果も良く一致することがわかった。

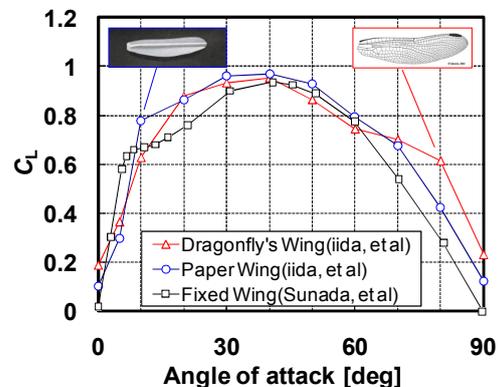
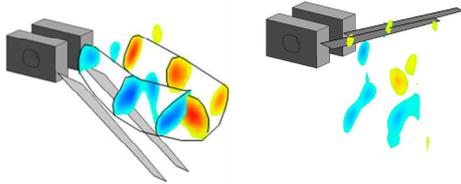


Fig. 6 Comparison of aerodynamic lifting force of fixed wings

4. 研究成果

図7にPIV計測より求めた羽ばたき翼周りの位相平均渦度場を示す。(a)は振り下げ時、(b)は振り上げ時である。振り下げ時には翼前縁で大きな剥離渦を発生させ、翼面上に上向きの流体力を発生させるのに対して、振り上げ時は翼の捻り角を調整して渦の発生を抑制し、渦による下向きの力が発生しないようにしている。この渦構造はトンボのものと基本的に一致する。また、前縁渦と後縁渦は翼端部でつながっており、ドーナツ状の形状をしていることが確認された。



(a) down-stroke (b) up-stroke

Fig. 7 Three dimensional vortex structure around a mechanical flapper

図8に固定翼を風洞中に設置した場合の流体力計測結果を示す。主流乱れの小さな ($Tu = 1.6\%$) の場合を基準として、乱流発生装置を用いて主流の乱れを大きくした場合の揚力の変化を示す。図より主流乱れの増加とともに流体力が低下することがわかる。主流乱れ強度が16%になると、主流乱れの小さいときに比べて揚力が40%低下することがわかる。このため、固定翼の場合は、主流の乱れが大きくなると飛行が困難になると予想される。このことは競技用のライトプレーンが主流の乱れに敏感なことに対応している。一方、図9に示した羽ばたき型MAVの流体力計測結果から、羽ばたき型MAVの場合は、主流の乱れが大きくなっても、流体力がほとんど変化しないことがわかる。ここで、◆は前翅と後翅の位相差が0の場合、□は前翅と後翅の位相差が90度の場合である。位相差が0の場合は、主流の乱れが大きくなっても流体力が低下せず、若干大きくなる傾向を示している。一方、位相差90度の場合はわずかに流体力が低下するものの10%以内であり、羽ばたき翼の場合、主流の乱れの影響が小さいことがわかる。このため、トンボなどの昆虫は主流が乱れた乱気流中においても自由に飛翔できるものと考えられる。

図10に固定翼周りの渦度場と流線を示す。主流乱れが大きくなると前縁からの剥離が大きくなることがわかる。時系列データを観察すると主流中の渦と翼からの剥離渦が干渉し、剥離渦の規模が非定常に変化していることがわかる。乱れが大きくなると剥離が大きくなるため、流体力が低下するものと考えられる。

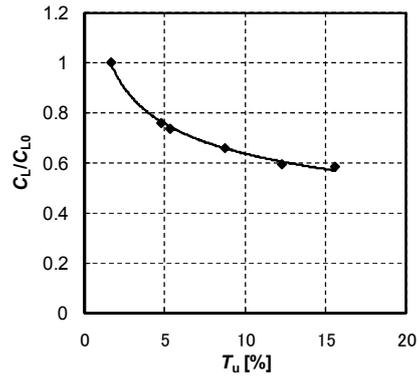


Fig. 8 Effect of turbulence on aerodynamic lifting force at fixed wing

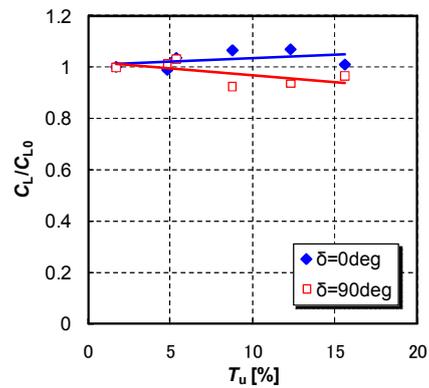


Fig. 9 Effect of turbulence on aerodynamic lifting force at mechanical flapper

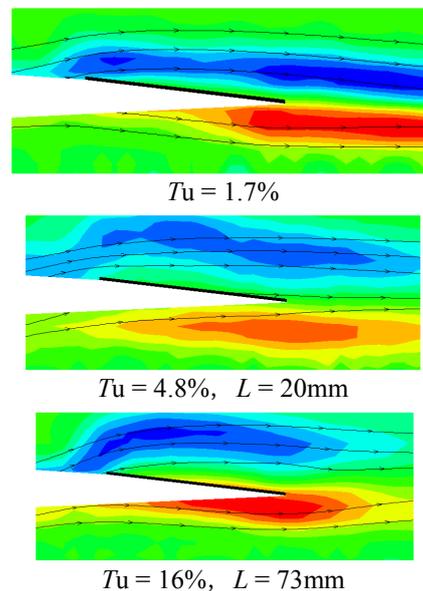


Fig. 10 Distributions of vorticity and stream lines around a fixed wing

図11に羽ばたき型MAV周りの渦度場を示す。羽ばたき翼の場合、渦の強さに違いは見られるが渦の配置は主流の乱れが変化してもほとんどかわらない。羽ばたき翼の場合、もと

もと翼の運動にともなう非定常剥離渦を利用しているため、主流の乱れによる非定常渦の影響が小さいものと考えられる。これは羽ばたき翼の移動速度が大きいため、流れ場の非定常特性よりも運動に伴う渦の生成のほうが速いためとも考えられる。このため、より正確に羽ばたき翼の性質を調べるにはヘリコプターのような回転翼との比較も必要になると考えられる。

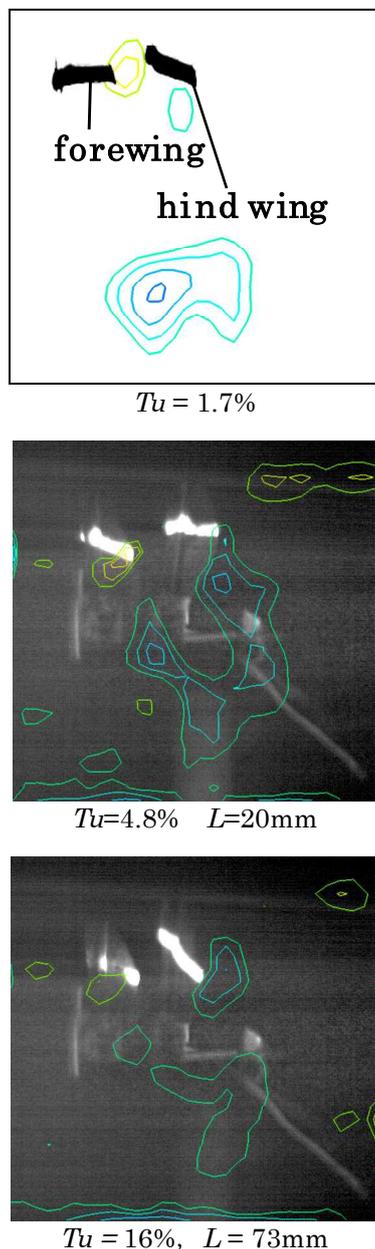


Fig. 11 Distributions of vorticity around a mechanical flapper

探査用MAVの開発は災害時における人命救助などに活用することができるという実用的な研究意義のほかに流体力学的な特性が生物の進化にどのようにかかわってきたかという基礎科学の面からも重要である。本研究では

、乱気流中におかれた昆虫や羽ばたき型のMAVが一般的な固定翼機に比べて、何故安定した飛翔が可能なのかを明らかにし、羽ばたき型MAVの高性能化、小型航空機の安定性に関して検討を行った。特に、本学で開発された乱流発生装置を用いて風洞中に様々な乱れ強さの流れを実現することにより、飛翔昆虫が実際に飛んでいる自然界の流れに近い流れ場を作り、流体力学的な特性について調べたことに特色がある。

研究結果から、以下の知見を得た。

- (1) 羽ばたき翼の周囲には前縁と後縁によって形成された強い剥離渦がドーナツ状に分布している。
- (2) 固体翼の流体力は主流乱れの増加に伴って低下する。また、主流の乱れが大きくなると前縁からの剥離も大きくなる。
- (3) 羽ばたき翼の場合、主流の乱れが大きくなっても流体力の低下はほとんど見られない。また、流れ場の渦構造も基本的に変わらない。これらのことから羽ばたき翼の場合、生成する流体力に及ぼす主流乱れの影響が固定翼に比べて相対的に小さいことがわかった。
- (4) (3)の結果が昆虫が乱気流中でも自由に飛翔できる一因と考えられる。

これらの実験結果からさらに以下のことが明らかとなった。トンボなどの飛翔昆虫の羽ばたき運動速度と飛翔速度の比であるReduced Frequencyは人工的な飛翔体に比べて非常に大きい。一方、羽ばたき翼周りのレイノルズ数は小さいため、トンボの周囲にある渦は羽ばたきの一周内では翼の近傍に滞留する。このような渦を利用して流体力を得るため、周囲の乱流の影響が小さい。したがって、乱気流中で安定した飛翔を行なうには、Reduced Frequencyを最適化することが必要となる。飛翔体のサイズ、飛行速度を元にReduced Frequencyを考慮した設計によりMAVの最適化が可能となる。

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0件)

〔学会発表〕(計8件)

- (1) 飯田明由, 横山博史, 羽ばたき型MAVの空力性能に関する主流乱れの影響, 第49回「乱流遷移の解明と制御」研究会, 2011年9月22日, 同志社大学
- (2) 飯田明由, 横山博史, 新居達也, MAVの飛翔性能に対する主流乱れの影響, 日本流体力学会年会2011, 2011年9月7日, 首都大学

東京

(3) 新居達也, 横山博史, 飯田明由, トンボ型 MAV 周りの三次元渦構造の可視化, 可視化情報全国講演会 2010, 2010 年 10 月, 霧島市国分シビックセンター

(4) 飯田明由, 新居達也, 羽ばたき翼周りの流れの可視化, 日本流体力学会年会 2010, 2010 年 9 月, 北海道大学

(5) 今村尚人, 新居達也, 飯田明由, 時系列 PIV を用いた羽ばたき翼まわりの三次元渦構造の評価, 日本機械学会東海支部講演会, 2010 年 3 月 8 日, 名城大学

(6) 新居達也, 飯田明由, 昆虫の飛翔を模擬した MAV の開発, 日本機械学会バイオエンジニアリング講演会, 2010 年 1 月 10 日, 岡山理科大

(7) 飯田明由, 自由飛翔中の羽ばたき翼周りの流れの可視化, 日本流体力学会年会 2009, 2009 年 9 月 4 日, 東洋大学

(8) 新居達也, 飯田明由, 羽ばたき型 MAV の前翅と後翅の位相差が流体力に及ぼす影響, 日本機械学会年次大会, 2009 年 9 月 15 日, 岩手大学

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

飯田 明由 (Akiyoshi Iida)

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 30338272

(2) 研究分担者 ()

研究者番号:

(3) 連携研究者 ()

研究者番号: