

特別賞

トンボの飛翔を規範とした超小型飛翔体の開発

東海大学大学院 工学研究科 機械工学専攻
修士課程2年

中 尚義

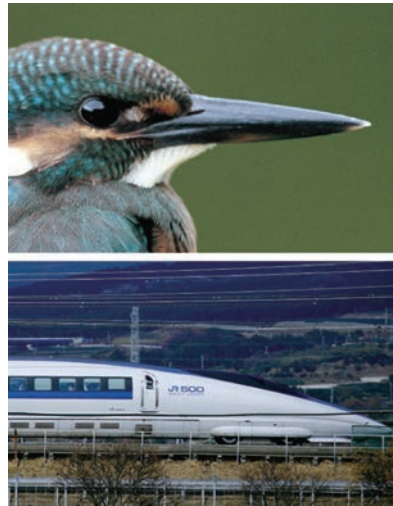
1. 緒 言

18世紀後半の産業革命以降，現代に至るまで人類のテクノロジーは急激な発展を遂げてきた。しかし近年，地球温暖化等の環境問題や化石燃料の枯渇等の資源・エネルギー問題といった多くの問題に直面しており，化石燃料や希少元素に頼ってきた人間の科学技術では解決するのが困難な状況である。こうした問題に対し，その解決方法として注目されているのがバイオミメティクス(生物模倣)技術である[1]。生物は太陽光や化学エネルギー，汎用元素を用い，その生態は当然のことながら自然と調和した低環境負荷を実現している。さらに，長い年月を経て高度に進化した生物の機能や構造は現代の人工物には無い優れた特性を有しており，そのような優れた生物の特性を人工物に模倣，応用することでより良いものを作るのがバイオミメティクス技術である。身近なものでは面ファスナーはゴボウの実，俗に言うひつつき虫からヒントを得て開発された他，500系新幹線「のぞみ」の先頭車両の形状はカワセミのくちばしの形状を模倣することで騒音の低減を実現する等，現代では様々なものづくりで生物模倣が行われている(図1)[2, 3]。このように生物の生態に学ぶことで，更なる科学技術の進歩とともに，省エネかつ低環境負荷のものづくりの実現が進められている。

数ある生物の中でも，ハエやトンボといった飛翔昆虫に着目し，それらをモデルとしたMAV(Micro Air Vehicle)と呼ばれる超小型飛翔体の開発が注目を集めている。MAVは全長15cm以下の小型飛翔体で，災害時の情報収集等での活用が期待されている。しかし，手のひらサイズ以下の小型の物体には寸法効果により強い粘性力が働くため，飛行機やヘリコプターといった従来の飛行形式では飛行が困難となることが知られている。一方，飛翔昆虫は小型・軽量でありながら自在な飛翔を行っており，さらにその飛翔性能は既存の航空機よりも遥かに高い[4]。流れの状態の指標であるレイノルズ数で考えると，従来の航空機はレ



(a)面ファスナーとゴボウの実(引用[2])



(b)500系新幹線とカワセミ(引用[3])

図1 バイオミメティクス技術の例

レイノルズ数が 10^5 以上となるが、昆虫は 10^3 程度となる(図2)。昆虫の飛翔はこのような低レイノルズ数の流れにおいて有効であると考えられている。しかしながら、その飛翔メカニズムは未だ明らかとなっておらず、それらを解明すべく研究が進められている。

トンボは特に飛翔性能の高い昆虫として知られている。トンボは他の昆虫と異なり4枚の翅を個別に制御することが可能で、それにより高速飛行や急旋回、急加減速が可能な高い運動性能に加え、その場で滞空するホバリングやエネルギー消費の少ない滑空など多彩な飛翔を実現している。さらに、種によっては海を越えた“渡り”も可能であることから、エネルギー効率にも優れていると考えられる。こうしたトンボの特性は広範囲の移動と狭小な空間での探索が求められるMAVのモデルに適している。そこで本研究では、トンボの飛翔メカニズムを解明し、それをモデルとしたMAVを開発することを目指している。

昆虫の飛翔メカニズムについてこれまでにいくつかの研究が行われている。橋本らは昆虫の翅を駆動する飛翔筋の形態に着目し、その運動機構を明らかにしている[6]。Azumaらはトンボの羽ばたき運動を解析し、航空力学の観点からその飛行性能について検討している[7, 8]。Dickinsonらは拡大モデルを用いた実験により昆虫は羽ばたく際に生じる渦を効果的に利用していることを報告している[9]。また、昆虫の飛翔で重要となるのがその翅の特性である。トンボの翅は非常に薄く軽量であるため、羽ばたき時に変形することが確認されており、Nakataらはそうした翅の変形が浮上力の生成に貢献していると述べている[10]。Obataらはトンボの翅がコルゲーションと呼ばれる波型形状をしていることに着目し、トンボの翅は粘性力が支配的となる低レイノルズ数の流れにおいて良い特性を示すことを明らかにしている[11]。以上のように、いくつかの研究により昆虫の巧みな羽ばたき運動やその翅の特性が徐々に明らかとなりつつある。しかし、こうした研究は実際よりもサイズの大きい拡大モデルを用いた実験やコンピュータ上でのシミュレーションによるものが多く、実サイズでの実験は行われていない。小型である昆虫の飛翔を考えるためには実サイズでの実験的検討が不可欠である。そこで、本研究ではこれまでにトンボと同等のサイズで羽ばたき運動を再現した羽ばたきシミュレータを開発し、それを用いて実験を行ってきた[12]。それにより、羽ばたき時に生じる揚力、推力と流れの関係を明らかにしてきた[13]。さらに、著者ら

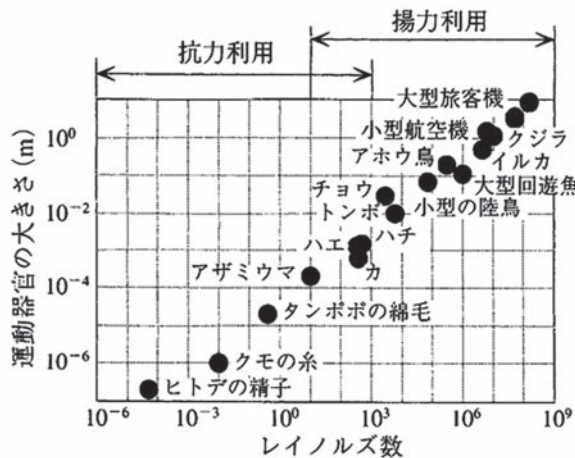


図2 運動期間の大きさとレイノルズ数[5]

の研究によりトンボの翅に特有の翅脈構造が羽ばたき飛翔に適していることを明らかにしている[14]。本論文では、これまでに作製したトンボの羽ばたきを再現した羽ばたきシミュレータとトンボの翅と同様の特性を有する人工翅について述べるとともに、それらの知見を基に実際に飛翔することを目指して開発したMAVについて報告する。

2. トンボの羽ばたきを再現した羽ばたきシミュレータの作製

トンボは生物であるため固定すると通常の飛翔とは異なる羽ばたきをする事等の問題からそのまま実験に用いることは難しい。そのため、本研究ではトンボが自由飛翔している時の羽ばたき運動を再現したシミュレータを用いて実験を行う。

2.1 トンボの羽ばたき運動

大部分の昆虫は翅を4枚持つが、前後の翅を同時に動かし実質2枚の翅として扱う。一方、トンボは他の昆虫と異なり4枚の翅を個別に制御することで高度な飛翔を実現しており、そのため多彩な羽ばたき運動を行う事ができる。本論文ではトンボの羽ばたき運動の中でも多くみられる前進飛翔を対象とする。図3にトンボの前進飛翔時の羽ばたき運動を示す。図中の青い点は翅の前縁部先端の軌跡を、赤い線はその時の翼弦線を示している。トンボの羽ばたき運動は主に上下に羽ばたく運動(フラッピング運動)と翅をねじる運動(フェザリング運動)が組み合わさった複雑な動きをしている。一般的には打ち下ろし時には翅が水平に近い状態、打ち上げ時には垂直に近い状態となるようにフェザリング運動が行われている。トンボの羽ばたき運動を考える際には、フラッピング角度、フェザリング角度、羽ばたき平面角、羽ばたき周波数の4点が特に重要である。フラッピング角度とフェザリング角度はそれぞれ上下に羽ばたく時の振幅とねじりの角度を表わしており、前進飛翔の場合ではフラッピング角度は前翅で約60[deg]、後翅で約80[deg]、フェザリング角度は前翅で約90[deg]、後翅では約100[deg]となる。また、トンボの羽ばたきは進行方向に対し垂直ではなく、少し斜めに羽ばたいている。この進行方向と羽ばたき方向のなす角度を羽ばたき平面角と呼び、飛

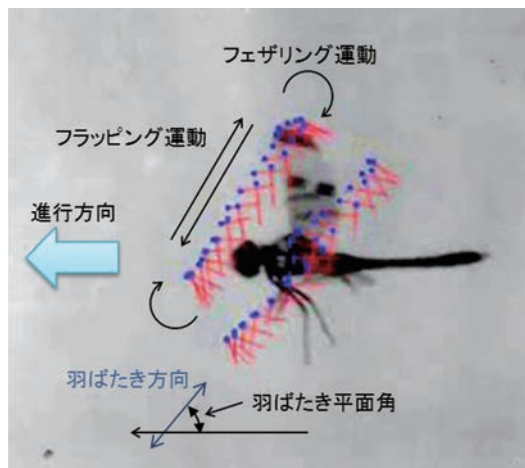


図3 トンボの前進飛翔時の羽ばたき運動

翔パターンによって異なってくる。前進飛翔では約60 [deg]である。さらに、1秒間での羽ばたきの回数である羽ばたき周波数は、一般的な前進飛翔では30 [Hz]程度となる。トンボの羽ばたき運動について検討する場合は、以上の項目が重要となる。

2.2 羽ばたきシミュレータ

前節で述べたトンボの羽ばたき運動を基に、図4に示す羽ばたきシミュレータを作製した。羽ばたきシミュレータはクランク・リンク機構によりモータの回転運動を往復直線運動に変換し、それをフラッピングスライダにより往復円弧運動とすることで翅をフラッピング運動させている。また、翅の根元に連結ピンを取り付け、それを同様の往復円弧運動を行うフェザリングスライダに接続し、その運動の位相をずらすことでフェザリング運動を実現している。図5にトンボの直線飛翔時と作製した羽ばたきシミュレータの前翅と後翅のフラッピング角度およびフェザリング角度を示す。横軸は後翅の打ち下ろし始めから打ち上げ終わりまでの羽ばたき1周期を示している。羽ばたきシミュレータの運動はフラッピング、フェザリング共にトンボの運動とほぼ一致しており、トンボの羽ばたき運動を高精度に再現できているといえる。羽ばたき周波数については最大で40 [Hz]まで駆動させることが可能で、トンボと同様の30 [Hz]は問題なく駆動できる。羽ばたき平面角については羽ばたきシミュレータを斜めに設置することで再現する。

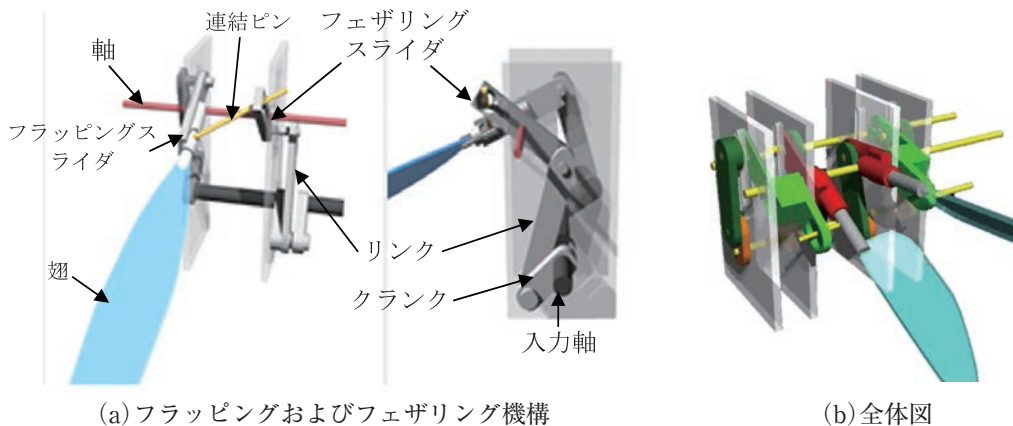


図4 羽ばたきシミュレータの機構

3. トンボの翅を基にした人工翅の作製

3.1 トンボの翅の変形特性の測定

トンボ型 MAV に適した人工翅の設計指針を得るため、まずトンボの翅の特性について検討する。本研究では翅の変形特性に着目し、図6に示す羽ばたき試験機を用いて羽ばたき時に生じる翅の受動的な変形を測定する。羽ばたき試験機は前章で説明したフラッピング機構と同様にクランク・リンク機構により翅を上下に羽ばたかせるものである。これにトンボの翅を取り付け、トンボと同様に30 [Hz]で羽ばたかせた際の翅を高速度カメラで撮影し、撮影した画像から翅の基部、中央部、先端部の3点(図7)で変形量として水平面と翼弦のなす角度を求める。

図8に羽ばたき1周期のトンボの翅の変形を示す。トンボの翅は先端部において大きく変形するが、基部ではあまり変形しないという特徴的な変形特性を示した。このような大きな翅の変形は当然空力特性に影響すると考えられる。この特徴的な変形が生じる理由を検討するため翅の変形を詳細に観察したところ、トンボの翅は結節と呼ばれる部分からねじれるようにして変形していることが明らかとなった。結節はトンボのみに存在する特有の翅脈構造

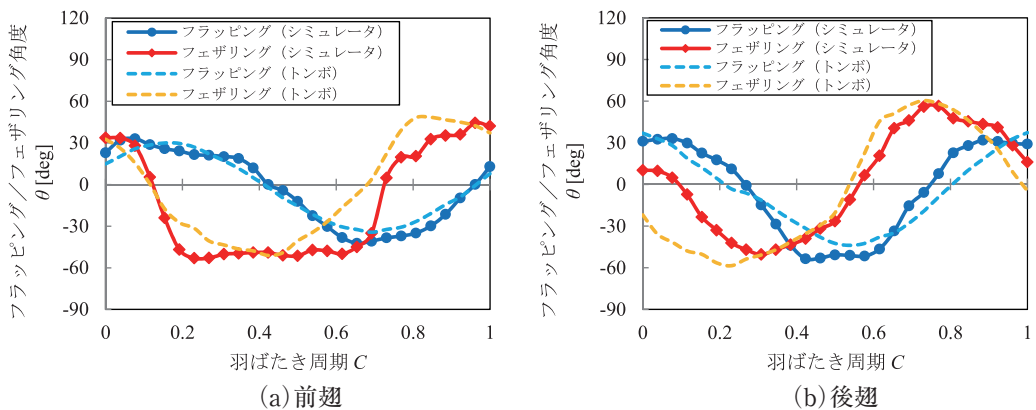


図5 トンボおよび羽ばたきシミュレータのフラッピングおよびフェザリングの推移



図6 羽ばたき試験機

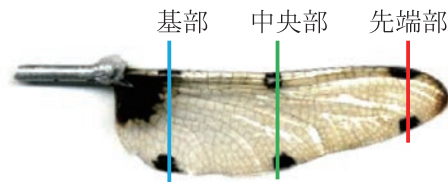


図7 測定箇所

で、前縁部の中央付近に存在する(図9)。結節より基部側では翅脈が3本あるが、結節より先端側では翅脈が2本に減少するため、この部分より先端側がねじれ変形しやすくなっている。このことから、トンボの翅の変形は特有の翅脈構造である結節が重要だと考えられる。また、翅は前縁部を中心としたねじれのような変形を起こしたが、これはトンボの行うフェザリング運動と同様の動きとなる。したがって、トンボは翅の受動的な変形がフェザリング運動の一部を担うことにより、余分なエネルギーを使わずにフェザリング角度を大きくしていると考えられる。

3.2 結節模倣翅の作製と羽ばたき時の空力特性の測定

前節で明らかとなったトンボの翅の結節による先端部の変形が空力特性に与える影響を検討するため、結節を模擬し先端部を変形しやすくした人工翅である結節模倣翅を作製した。図10に結節模倣翅の構造を示す。結節模倣翅はカーボンロッドの前縁部とPETフィルムの膜部から構成される。前縁部と膜部を接着する際に、中央より基部側では直接接着するのに対し、中央より先端側では前縁部と膜部を直接接着せず、暖簾のように膜部を前縁部に巻いて固定する。これにより、先端側でのみ膜部が前縁部を中心とした変形をしやすくしている。図11に前節と同様に羽ばたき試験機により結節模倣翅の変形を測定した結果を示す。結節

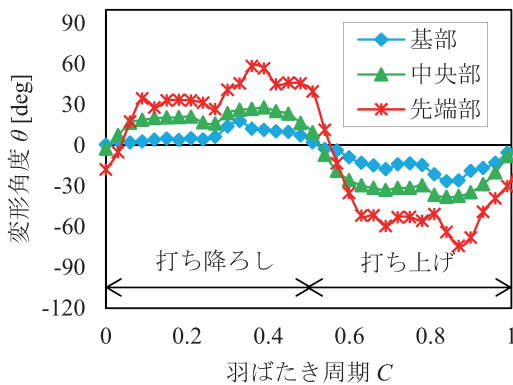


図8 トンボの翅の受動的変形

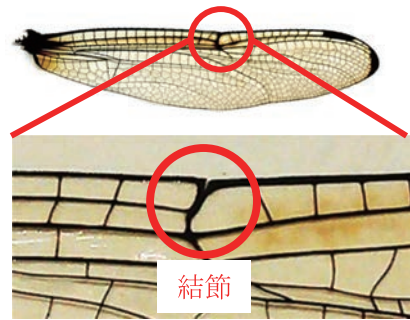


図9 トンボの翅の結節

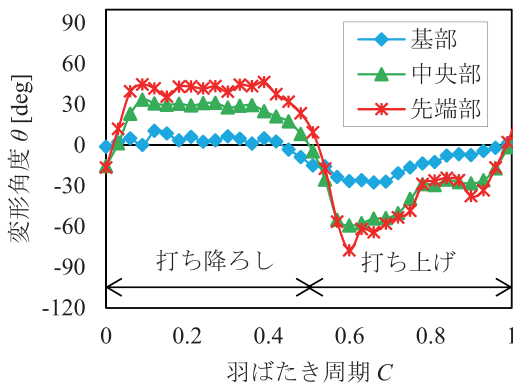


図11 結節模倣翅の受動的変形

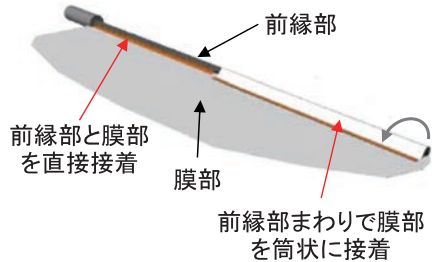


図10 結節模倣翅

模倣翅はトンボの翅と同様に基部では変形が少なく、先端部では変形が大きくなった。また、その変形量もトンボの翅と同等であり、結節模倣翅はトンボの翅の変形特性を良く再現できているといえる。

作製した結節模倣翅の性能を測定するため、前章で説明した羽ばたきシミュレータに結節模倣翅を搭載し、羽ばたき時の揚力および推力の測定実験を行った。実験では結節模倣翅と比較対象として前縁部と膜部を全面で直接接着した平板翅の2種類を用いる。また、前節でトンボの翅の変形はフェザリング運動を代替している可能性が示唆されたことから、結節模倣翅を取り付けた際は羽ばたきシミュレータの連結ピンを取り除き、フェザリング運動を行わずフラッピング運動のみとした。平板翅では同様にフラッピング運動のみとフェザリング運動も行う場合の2種類で測定を行った。表1に羽ばたき周波数30 [Hz]での羽ばたき1周期の平均揚力および推力とそこから算出した合力を示す。結節模倣翅を搭載することにより、平板翅と比べ大きな力が生成できることが確認された。合力で比較をするとフラッピングのみの平板翅の約3倍、フェザリングを行う場合と比べても約1.6倍の値となった。平板翅の結果を見るとフェザリング運動をしている場合はフラッピング運動のみの場合と比べ合力が約2倍と大きくなっていることから、フェザリング運動により生成される空気力は大きくなるといえる。よって、結節模倣翅は受動的な変形がフェザリング運動を代替し、大きな空気力を生成したと考えられる。

実際にMAVに搭載することを考えた場合には空気力の大小だけでなくその生成効率も重要となる。MAVは小型であるため多くのバッテリーを搭載することができないためである。そこで、羽ばたきシミュレータの消費電力を測定し、空気力の生成効率として単位消費電力当たりの合力を算出した。図12に羽ばたき周波数を変化させた場合の空気力の生成効率を示す。図より、結節模倣翅を搭載した場合は平板翅と比べ非常に高い空気量の生成効率を示した。一方、平板翅では空気力の生成効率が低く、またフェザリング運動の有無に関わらずほぼ同等の値を示した。前述したように平板翅ではフェザリング運動を行った場合にフラッピング運動のみの場合と比べ約2倍の大きな空気力を生成したが、能動的にフェザリング運動を行うために消費電力も増加し、生成効率ではほぼ同等になった。それに対し、結節模倣翅の場合は能動的にフェザリングを行わず受動的な変形で代替したため、消費電力を増やさずに空気力が大きくなり、生成効率が高くなった。

表1 羽ばたき時に生成される平均揚力および推力

	平均推力 T [mN]	平均揚力 L [mN]	合力 F [mN]
結節模倣翅 (フラッピングのみ)	39.5	10.8	40.9
平板翅 (フラッピングのみ)	12.9	2.9	13.2
平板翅 (フラッピング +フェザリング)	13.3	21.9	25.6

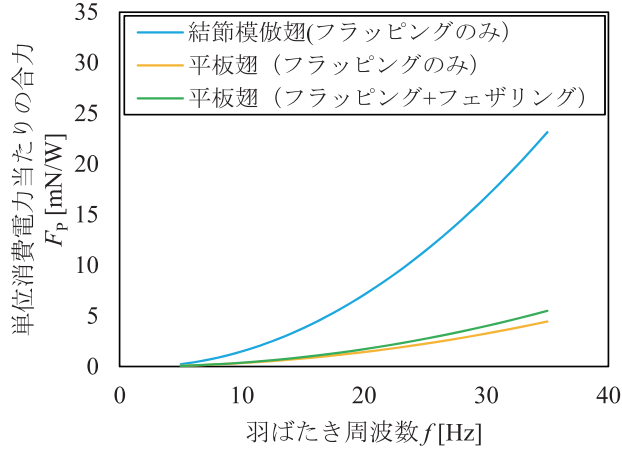


図12 空気力の生成効率

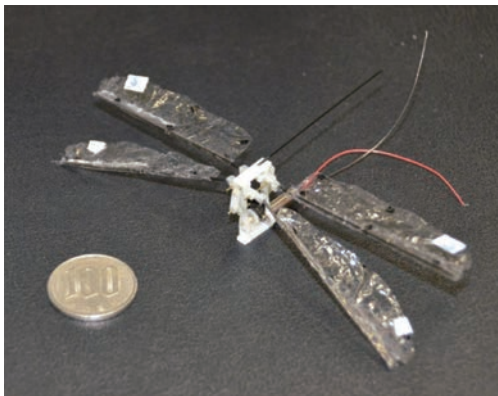
以上の結果より、トンボの翅の変形特性を模擬した人工翅を使用することで変形がフェザリング運動を代替し、省エネルギーで大きな空気力を生成できることが明らかとなった。したがって、トンボ型 MAV に搭載する人工翅においても同様の設計を行うことでより長時間の飛行が可能になる。しかしながら、表1より揚力を比較すると能動的なフェザリング運動を行う場合に最も高い値を示している。本実験では受動的な変形でフェザリング運動を全て代替するものとしたが、実際のトンボは能動的なフェザリング運動も併せて行うことで力の方向を制御できるものと考えられる。そのため、今後は受動的な変形と能動的なフェザリング運動を併せて検討することで、省エネルギーで飛行を制御することが可能になると考えている。

4. 飛行可能な超小型飛行体 (MAV) の開発と飛行実験

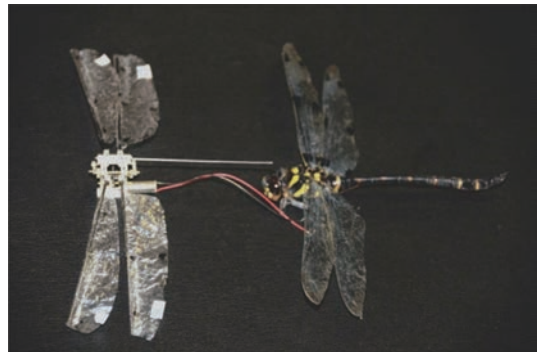
第2章で述べた羽ばたきシミュレータは実際のトンボと同様の羽ばたきを実現しているが、重量が重く、実際に飛行することはできない。そこで、これまでに得た知見を基により軽量化し実際に飛行可能な MAV の試作を行った。図13に試作したトンボ型 MAV を示す。MAV の機構は羽ばたきシミュレータを基にしている。フレーム部は高速で駆動し摩擦を生じる部分が多いことから、一般的なエンジニアリングプラスチックで金属との摩擦係数が小さいポリアセタール樹脂で作製した。軸には黄銅線を用いた。アクチュエータには小型モータを用い、トルクを確保するため歯車により減速比9.8で減速させている。羽ばたき運動はクランク・リンク機構によるフラッピング運動のみとし、フェザリング運動は機構の軽量化のために除いた。そのため、人工翅として前章で作製した結節模倣翅を搭載することで、翅の受動的な変形によりフェザリング運動を代替するものとした。結節模倣翅は前翅、後翅を左右各2枚の計4枚を搭載し、前翅はトンボと同様に約10 [deg] のリード・ラグ角 (前進角) をもたせた。また、第2章で述べたとおりトンボの羽ばたきは垂直ではなく少し上を向くように傾いているため、MAV においても少し頭を上に向けた状態で羽ばたく必要がある。そのため、後方に重りを取り付けられるようにカーボンロッドを伸ばし、空中での姿勢を制御

するものとした。大きさは全幅120mm, 全長60mm, 全高20mmとなった。重量については本体(モータを含む)は1.6[g]であるが, 姿勢制御の重りを約2[g]取り付けたため, 本飛翔実験における総重量は3.6[g]となった。なお, 電源については外部電源から有線で供給する。駆動実験の結果, 羽ばたき周波数は最大で30 [Hz]となりトンボの前進飛翔と同様の羽ばたきを達成した。

上記の結果を踏まえ, 実際に飛翔が可能か実験を行った。飛翔実験では MAV を少し頭を上に向けた状態で台に置き, 静止状態から外部電源により MAV を駆動させ, その羽ばたきにより離陸および前進が可能かを確認した。飛翔実験の結果を図14に示す。作製した MAV は静止状態からの離陸および前進に成功した。特に, 多くの羽ばたき機がハンドランチ(手投げ)による離陸を行う中で静止状態からの離陸を達成した意義は大きいといえる。本飛翔実験では継続した飛翔には至らなかったが, MAV の姿勢制御のために本体以上の重量の重りを取り付けたことにより総重量が3.6[g]とトンボと比較して重いため, 重りを除いた状態で姿勢を保つように設計をすることで継続した飛翔も可能であると考えている。



(a) 外観



(b) トンボとの比較

図13 トンボ型 MAV

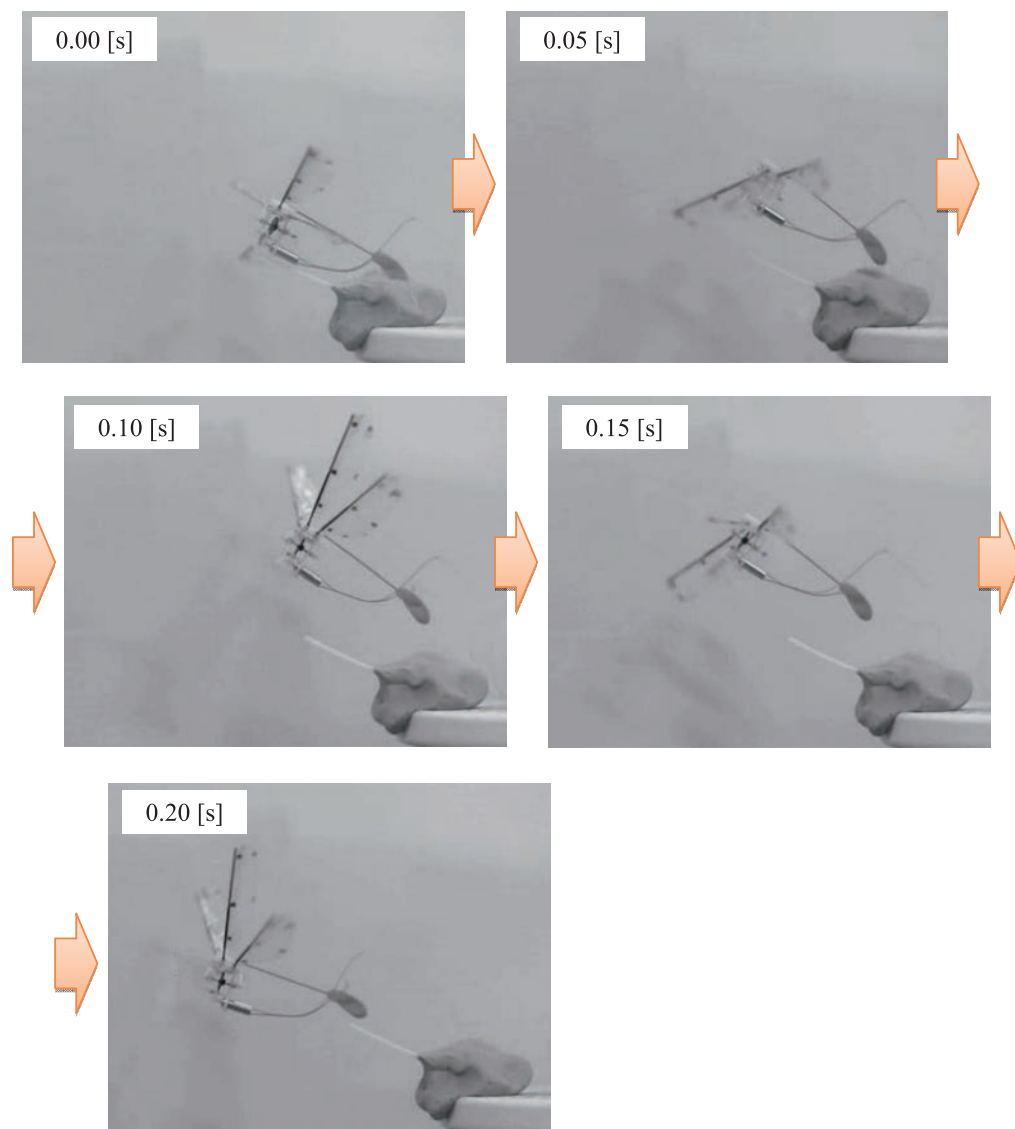


図14 飛翔実験

5. まとめ

本研究ではトンボの飛翔を規範とした MAV を開発することを目指し、トンボの羽ばたきを再現したシミュレータとトンボの翅と同様の変形特性を有する人工翅を作製し、それを用いてトンボの飛翔メカニズムについて検討した。さらに、それらの知見を基により小型のトンボ型 MAV を作製し、飛翔実験を行った。その結果を以下にまとめる。

- (1) トンボの直線飛翔時のフラッピング運動とフェザリング運動を再現するシミュレータ

を作製し、羽ばたき時の空気力測定等を行えるようになった。

- (2) トンボの翅は羽ばたき時に先端部のみが大きく変形する特徴的な変形特性を有することを明らかにした。さらに、その変形特性にはトンボの翅に特有の翅脈構造である結節が影響していることを発見した。
- (3) トンボの翅の結節による変形を再現した人工翅として結節模倣翅を作製し、それを用いることで羽ばたき時の空気力の生成効率が大幅に向上することを明らかにした。これは、翅の変形がフェザリング運動を代替することが可能であるためと考えられる。
- (4) トンボと同サイズで結節模倣翅を搭載したトンボ型 MAV を開発し、羽ばたきによる静止状態からの離陸および前進に成功した。

6. 今後の展望

最後に、本研究の将来展望について述べる。MAV の活用先として特に期待されているのが前述の通り災害地等の人立ち入ることのできない危険かつ狭小な空間での情報集活動である。現在ではマルチコプターに代表される比較的大型の UAV が導入され始めているが、高価であるため複数台の投入はできず、一台でできることは限られてくる。一方、MAV は小型であるため多くのセンサー等は搭載できないが、昆虫のシンプルな構造を規範とすることで安価かつ大量生産が可能であると考えられている。これにより一度に複数台を投入し、広範囲を素早く探索することが可能となる。実際、本研究で試作したトンボ型 MAV の材料費は1000円程度であり、非常に安価なモデルでも飛翔が可能であることを示している。このため、今後は羽ばたき運動だけでなくトンボの羽ばたき機構(飛翔筋等)に学ぶことで、よりシンプルな構造の MAV を開発することが求められていくと考えられる。

また、大量生産した場合には墜落機等のゴミの問題が出てくるが、こちらも生物を模倣し、材料に生分解性プラスチック等を用いることで自然に還る MAV とすることで解決できる。MAV は非常に小型であるため分解も比較的短時間で行うことが可能である。

しかしながら、昆虫の飛翔には未知の部分がまだ数多く存在する。近年ではトンボの翅に100 μ m 程度の微細な突起が存在することが明らかとなり、この微細突起は低レイノルズ数流れにおいて圧力抗力を低減する効果があることが報告されている。このように生物には様々な未知の機能・構造が存在しており、本研究においても様々な視点から研究を行い、羽ばたきだけでないトンボの優れた機能を明らかにしていくことで科学技術の発展に貢献していけるものと考えている。

7. 謝 辞

本研究を行うにあたり、ご指導、ご鞭撻を賜りました指導教員である橋本巨教授(東海大学)に心より感謝を申し上げます。また、様々なご指導、ご助言を頂きました東海大学の落合成行准教授および砂見雄太助教(東海大学)には厚く御礼申し上げます。さらに、所属研究室の研究メンバーの皆様には研究に関する議論や提案等、様々なご協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

8. 参考文献

- [1] 下村政嗣, 生物の多様性に学ぶ新世代バイオメテック材料技術の新潮流, No. 110, (2010), pp. 9-28
- [2] COMZINE ニッポン・ロングセラー考, Vol. 102, NTT コムウェア, (2011), (オンライン), (http://www.nttcom.co.jp/comzine/no102/long_seller/)
- [3] 沢辺有司, [まねから生まれた新技術]生き物の巧みな機能をヒントに, Science Window, Vol. 3, No. 4, (2009), pp. 21-22
- [4] アンドレイ K. ブロドスキー, 小山重郎訳, 小山晴子訳, 昆虫飛翔のメカニズムと進化, 築地書館株式会社, (1997)
- [5] 河内啓二, 昆虫の飛行メカニズム: 流体力学的視点から, 生産物理, Vol. 39, No. 5, (1999), pp. 279-284
- [6] 橋本巨, 石本早霧, 昆虫の飛翔筋をモデルとしたバイオニック・デザイン(第1報, 翅の振動メカニズム), 日本機械学会論文集(C編), Vol. 63, No. 607, (1997), pp.723-721
- [7] Akira AZUMA, Soichi AZUMA, Isao WATANABE, Toyohiko FURUTA, Flight Mechanics of a Dragonfly, J. exp. Biol., Vol. 116, (1985), pp. 79-107
- [8] Akira AZUMA, Tadaaki WATANABE, Flight Performance of a Dragonfly, J. exp. Biol., Vol. 137, (1988), pp. 221-252
- [9] 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
- [10] Toshiyuki Nakata, Hao Liu, A fluid-structure interaction model of insect flight with flexible wings, Journal of Computational Physics, Vol. 231, Issue 4, (2012), pp.1822-1847.
- [11] Obata, A. and Shinohara, S., Flow Visualization Study of the Aerodynamics of Modeled Dragonfly Wings, AIAA Journal, Vol. 47, No. 12 (2009), pp. 3043-3046.
- [12] 永井智, トンボの翅間隔を有する羽ばたきシミュレータの開発, 年次大会講演論文集 2009(4), pp.105-106
- [13] Hisayoshi NAKA, Hiromu HASHIMOTO, Aerodynamic Force Measurement of Dragonfly Flapping Flight, Proc. 3rd International conference on Engineering Applied Sciences, and Technology, (2013)
- [14] Hisayoshi NAKA, Hiromu HASHIMOTO, Effects of deformation and vibration characteristics of wings on flapping flight, Mechanical Engineering Journal, Vol. 2, No. 1, (2015), p.14-00262