

博士学位論文内容要旨および審査結果の要旨

(「博士」号請求論文審査報告書)

いわき明星大学大学院
理工学研究科委員会

「博士」号請求論文審査報告書

- | | |
|---------------|--|
| 1 論文題目 | 飛翔昆虫におけるトンボの翅の機構・機能の特異性 |
| 2 提出者 | 露木 浩二 (1993年3月明星大学大学院理工学研究科機械工学専攻修士課程修了) |
| 3 提出日 | 2006年12月19日 |
| 4 学位審査日 | 2007年12月3日 |
| 5 口頭審査日 | 2007年12月3日 |
| 6 審査委員会 | 主査 教授 五十嵐 三武郎
副査 教授 東 之弘
副査 准教授 安野 拓也
副査 秋田県立大学教授 須藤 誠一 |
| 7 学位の種類 | 博士 (理工学) |
| 8 学位授与の要件 | いわき明星大学学位規程 第4条2項 |
| 9 最終試験 | 審査委員会は、本論文の提出者は、大学院博士課程の修了者と同等以上の学力を有するものと確認した。 |
| 10 理工学研究科の議決 | 2007年12月11日 |
| 11 論文審査の結果の要旨 | |

本論文は、多くの飛翔昆虫の中できわめて高い飛行性能を有するトンボの翅の機構・機能についての研究である。まず、非接触3次元測定装置によるトンボの翅全面にわたる詳細かつ高精度な測定を行って、複雑な立体構造を可視化し、トンボの翅の工学的な意味を明らかにした。さらに、翅表面の微細構造について走査型電子顕微鏡観察によって翅表面における微細な構造と飛行との関連を明らかにした。

次に、トンボの翅まわりの流れを明らかにするために、小型風洞内で、気体中に微粒子としての液体を混合した気液混合流体を用いて可視化し、ステレオPIVシステムを構築して流れ場を定量的に解析するとともに、非接触3次元測定装置によって測定されたトンボの翅をモデル化して3次元流れの数値シミュレーションによる結果との比較を行い翅の特異性を明らかにした。ついで、はばたきによって発生する流れ場についての高速度カメラによる3次元的な翅の時間変化を捉えて、はばたき周波数や翅先端の軌跡を求めた。ついで実験では測定困難な空力特性については、実験データをモデル化し数値シミュレーションによる解明を行った。

以上のように、昆虫の詳細な翅構造や優れた移動手段としての飛行メカニズムを明らかにすることはバイオメカニクスの進展への寄与のみならず、小型飛行ロボ

ットやマイクロスケールの機器等の流れの制御への応用が期待される。

本論文の大略は次の通りである。

第1章は飛翔昆虫に関するこれまでの多くの研究者による研究のまとめと本研究の目的と意義について述べている。

第2章は飛翔昆虫の翅の3次元形状測定と形態構造である。非接触3次元形状測定装置により、トンボの翅は3つの異なる性質を持った次のような構造からなることを明らかにした。翅の付け根付近は前縁脈をはじめとする太い翅脈やV字形の大きな溝で構成されており、はばたき方向の曲げに対して丈夫だけでなく、前後からの衝撃も吸収しやすい構造で、はばたき運動を支える基部として優れた構造になっている。翅の中央付近は翼弦が長く、その方向の中央から後縁にかけて広い翅面を有し、凹凸が小さく、変形しやすい構造である。このため前縁で剥離した渦はどのような迎え角でも翅の後方部で再付着し失速しない空力的に効果的な構造である。翅の先端付近は凹凸の少ない構造をしており、ねじれやすくてわみややすい構造となっている。また上反角がついているので横滑り飛行に対して復元力を持つローリング安定翼となっている。

第3章は飛翔昆虫の翅の微視的形態構造について述べている。まず走査型電子顕微鏡による観察から以下の結果を得た。トンボの翅の前縁に鋸歯状の周期的凹凸があること、これにより大きな渦の発生を防ぐ効果が期待できる。前後縁を除く翅脈上は一定間隔でスパイク状の小刺毛がみられ、ボルテックスジェネレーターとして作用している可能性が示された。またトンボの翅の前縁を構成する翅脈断面形状は一様ではなく、付け根付近で厚く、先端付近で翅の進行方向に尖っており、これが構造的にも空力的にも最適な形状と考えられることを示すとともに、トンボの翅の翅室形態の測定からバーテックス数や翅脈角度による形態形状の特徴を定量的に明らかにした。

次に、液滴衝突に対するトンボの翅の機能についての実験を行い、翅が撥水性であること、翅の変形などの柔軟性が翅への衝撃を和らげていること、特に結節における不連続性が大きな役割を担っていることを明らかにした。

第4章は静止したトンボの翅のまわりの流れおよび翅のはばたき運動による流れの解析である。小型風洞の流れの中に微小なトレーサを混入しPIV法によって翅のスパン方向の各断面の速度分布を捉えるとともに、2台のCCDカメラを用いたステレオPIV法を構築して3次元的な流れ場を捉えた。しかしながら、PIV法は翅の凹凸形状近傍の流れを観察することは困難である。そこで測定されたトンボの翅形状データから特徴的な凹凸を適切に表すように、スパン方向に20分割した3次元トンボの翅モデルを構築して数値シミュレーションを行った。実験との比

較はおおむね一致したこと、実験では困難な凹凸部における流れの影響や揚力、抗力についても明らかにされた。また2台の高速カメラを用いてはばたき運動の3次元解析システムを構築して、はばたき運動している連続写真より、はばたき周波数を求めた。またトンボの翅端における軌跡とフェザリング角度の時間変化を測定し、1周期における翅の打ち下ろしの時間と打ち上げの時間を明らかにした。このはばたき運動の軌跡に対して、2つの数学モデルを提起して数値シミュレーションによってはばたき運動の空力特性を明らかにした。

第5章は本研究の結論である。

1.2 論文内容の要旨

【論文の構成】

第1章 緒論

第1節 研究の背景

第2節 研究の目的

第2章 飛翔昆虫の翅の3次元形状測定と形態構造

第1節 飛翔昆虫とレイノルズ数

第2節 非接触3次元形状測定装置の構築

第3節 トンボの翅の3次元形状表示に観察される力学特性

第4節 飛翔昆虫の翅の3次元形状における特異性

第5節 本章のまとめ

第3章 飛翔昆虫の翅に観察される微視的形態構造

第1節 微小流れと表面構造の影響

第2節 翅表面の走査型電子顕微鏡を用いた観察方法

第3節 トンボの翅表面に見られる微視的形態構造の特性

第4節 雨滴衝突に対するトンボの翅の機能

第5節 飛翔昆虫の翅の微視的形態構造における特異性

第6節 本章のまとめ

第4章 飛翔昆虫の翅と気流の相互作用

第1節 はばたき運動をする翅まわり流れのモデル

第2節 2次元および3次元流れ場解析装置

第3節 トンボの翅まわりの流動特性

第4節 数値シミュレーションによるトンボの翅断面の空力特性

第5節 翅のはばたき運動によって生成される流動特性

第6節 トンボの翅断面形状を有する翼型のはばたき運動における空力特性

第7節 本章のまとめ

第5章 結 論

文 献

【論文の概要】

生物の有する機能や機構は主として生物学者によって研究されてきたが、科学技術の発展には工学的な観点から生物をとらえる必要がある。生物にはさまざまな優れた機構や機能が存在するが、中でも飛行機能は人類にとって非常に興味深い機能であろう。鳥の飛行を観察することが航空機の発展に繋がったという側面は見逃せない。すなわち、工学的な観点から生物をとらえることは、新たな技術や産業が生まれる可能性を秘めている。

近年は、ナノ・マイクロテクノロジーの発展により、微小な昆虫の飛行が注目を集めている。優れた移動手段である昆虫の飛行メカニズムに関する研究成果は、たとえば人間の活動が困難な場所において探索、監視、調査などの活動をする、小型飛行ロボットへの応用が考えられる。また、マイクロスケールの流れにおける翼まわりの流動特性は、マイクロポンプ、マイクロ混合器、医用マイクロロボットなどの微小流体制御を必要とする、工業製品への応用が期待できる。

そこで本研究は、飛行昆虫のはばたき飛行における機構・機能を工学的な立場から系統的に明らかにすることを目的として、飛行性能の優れたトンボを中心に、飛行昆虫の翅における形状特性、翅表面に観察される微視的構造、翅のはばたきにより発生する流れの特性などの特異性について解明した。

本論文は全部で5章からなり、第1章では、これまでに他の研究者によってなされてきた飛行昆虫に関する研究を総覧し、本研究の目的と意義について述べた。

飛行に関するメカニズムを論ずる上で、翼型の形状が重要な構成要素となることは間違いない。そこで第2章では、はばたき飛行の重要な器官である翅の形状について述べた。飛行昆虫の翅はきわめて小さく複雑な形状をしているため、形状測定は容易ではない。そこで、レーザを用いた非接触による測定装置を応用した測定システムを構築した。これにより、さまざまな飛行昆虫の翅の複雑な3次元構造(図1参照)を詳細に測定し、飛行昆虫のサイズや構成される器官により最適な形状が異なることなどを、3次元形状の測定結果から明らかにし、以下のような知見を得た。

- (1) ウスバキトンボやアキアカネの前翅は、その形状の違いによって3つの領域に分割することができる。領域I(付け根付近)は太い翅脈とV字形の大きな溝があり、丈夫な構造となっている。領域II(中央付近)では翅の幅が最も広く、かつ高低差も大きい。領域III(先端付近)は領域IIと比べて鉛直上方に沿っている。すなわち、領域IIに対して上反角がついている。

- (2) 領域 I は前縁脈をはじめとする太い翅脈やV字形の大きな溝で主に構成されており、はばたき方向の曲げに対して丈夫だけでなく、前後からの衝撃も吸収しやすい構造となっている。すなわち、はばたき運動を支える基部として工学的に優れた構造となっている。
- (3) 領域 II は中央から後縁にかけて広い翅面を有しており、主に揚力の生成を担当していると考えられる。この領域は翼弦が長く、付け根や前縁に比べて凹凸が小さくなっており、変形しやすい構造となっていた。このような構造は、前縁で発生した剥離渦がどのような迎え角でも後方において翅に再付着することができるため、容易に失速しない空力的に効果的な構造である
- (4) 領域 III は他の領域と比べて凹凸の激しくない領域となっており、ねじれやすくてわみやすい構造をしている。さらに、翅には上反角が見られ、横滑り飛行に対して復元力を持つローリング安定翼になっており、飛行の安定性を高めている役割を担当していることが考えられる。
- (5) 翅構成がそれぞれ異なるトンボ、セミ、アブの3次元構造を比較した結果、翅断面の高低差は、トンボとセミの間には相関関係がほとんど無く、セミとアブの間に高い相関があることがわかった。

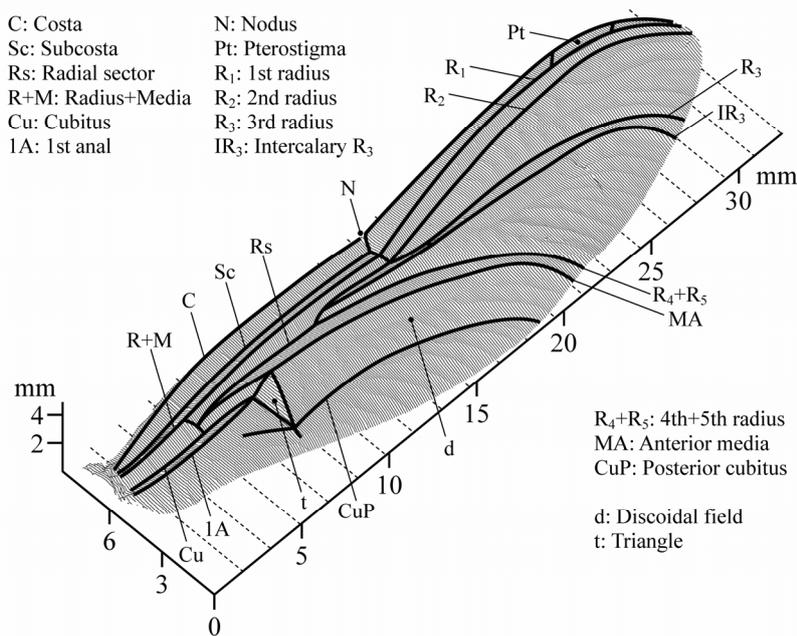


図1 アキアカネ左前翅の3次元形状測定結果と主要部位の名称

マイクロスケールの流れ場において、また、はばたき飛行という特別な飛翔形態

においては、翅表面における微細な構造は渦の剥離や揚力の増大などに大きな影響を与えることが考えられる。そこで第3章では、前章までの測定システムでは得ることのできない翅の微視的な構造について、走査型電子顕微鏡を用いて調べた結果（図2参照）について述べた。すなわち、異なる昆虫間における翅表面に見られる微少な刺の特性、翅脈の構造とそれによる空力特性などを明らかにし、以下のような知見を得た。

- (1) トンボの前翅には鋸歯状の周期的凹凸構造が見られた。しかしながら、後縁にはこのような構造は見られないため、大きな渦の発生を防ぐ効果が考えられる。また、前縁と後縁を除く翅脈上には一定間隔でスパイク状の小刺毛が見られ、ボルテックスジェネレータとして作用するなどの制御を行っている可能性が考えられる。
- (2) はばたきでは常に前縁が流れの先端となり、上下対称な形状もまた、はばたきにより向きが変わることを想定している。
- (3) トンボの前縁脈の断面形状は、付け根付近でははばたき方向に厚く、先端付近では翅の進行方向に対して尖っている。すなわち、トンボの翅の前縁を構成する翅脈断面形状は一様ではなく、構造的および空力的に最適な形状と考えられる位置による変化が認められる。
- (4) ハエやカなどの小型サイズの昆虫には、総じて微少な刺が翅面に密生しており、大型のトンボやセミには微少な刺が翅面には存在しないことがわかった。

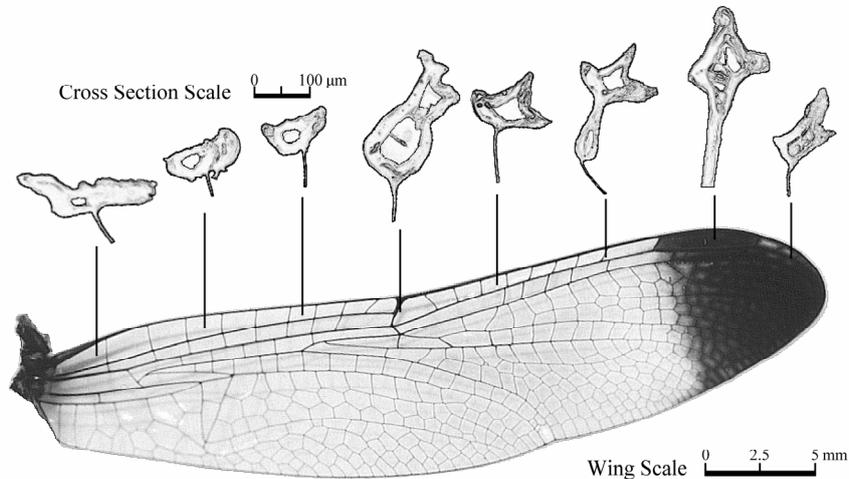


図2 ノシメトンボ右前翅前縁における翅脈断面の位置による形状変化

飛行において、翼まわりの流れの特性は飛行性能を決定するきわめて重要な要因

である。そこで第4章では前章までの翅形状の研究結果をふまえ、飛翔昆虫の翅のはばたきにより発生するまわりの流れ場を解析した。サイズの小さな飛翔昆虫用に小型風洞とPIVシステムを用いた解析システムを構築し、昆虫や翅まわりの詳細な速度分布を得た。また、ステレオPIVシステムを新たに構築することで、流れを2次元のおよび3次元的に解析し、流れのグローバルな数値データを得た。さらに、第2章で測定したトンボの翅の3次元形状を利用し、数値シミュレーションによる固定翼モデルまわりの流れと、はばたきまわりの流れについても解析し、実験結果と比較、検討した(図3参照)。これらの実験結果から、飛翔昆虫の翅形状と流れの関連性、はばたき運動により発生する渦の特性などを明らかにし、以下のような知見を得た。

- (1) シオカラトンボの前翅まわりの流れをPIVシステムにより解析し、翅まわりの速度分布図を得た。これにより、シオカラトンボは翅全体で滑空飛行に必要な揚力を生成していたことがわかった。また、翅は負の迎角でもある程度の揚力を生成することができるが、滑空飛行を行うときは迎角が正の値をとる方が効果的である。
- (2) シオカラトンボの翅断面の位置により翅まわりの速度分布は異なる。翅上面の流れにおいて、一様流速より大きい高速領域は翅の付け根や先端よりも中央部分において大きかった。
- (3) シオカラトンボの前翅まわりの流れをステレオPIVシステムにより解析し、翼端渦による誘導抗力によって翅端部の有効迎角は小さくなることが確認された。また、固定された状態にあるトンボの翅は迎角がおよそ 20° を越えると翅端側から失速することがわかった。
- (4) モデル化した翅を用いた数値シミュレーションを行った結果、トンボの翅にあるV字形の溝を中心とした翅の凹凸構造が効果的に利用されるときに、揚力が効率よく生成されることがわかった。
- (5) 翅の3次元モデルを作成して数値シミュレーションを行った結果から、速度場に関して実験と数値シミュレーションとの結果はよく一致していた。また、トンボの翅に特有の詳細な流れ場が明らかにされ、それに伴う揚力・抗力曲線が示された。
- (6) はばたいているショウジョウトンボやオオシオカラトンボまわりの流れ場を可視化し、詳細な速度ベクトル分布図を得た。トンボは前翅と後翅の打ち下ろしおよび打ち上げのすべての過程において、航空力学的な力を発生させていることが明らかになった。
- (7) 高速度ビデオカメラから構成される3次元運動解析システムを用いたトンボの

はばたき運動の実験的解析により、トンボ前翅の翅端の軌跡とフェザリング角度の変化を明らかにし、2つの数学モデル（直線近似モデルとフーリエ級数モデル）を提起した。

- (8) 実際のトンボの翅に近似した翅型モデルと平板モデルを用いて空力特性を計算した結果、直線近似モデルでは、打ち下ろしで大きな垂直力を、打ち上げで大きな推進力をそれぞれ生成した。このとき、翅型モデルは平板モデルの約1.2倍の垂直力を生成した。フーリエ級数モデルでは、打ち上げで大きな推進力を生成することはできなかったが、打ち下ろしで直線近似モデルよりも約1.2倍の大きな垂直力を生成した。

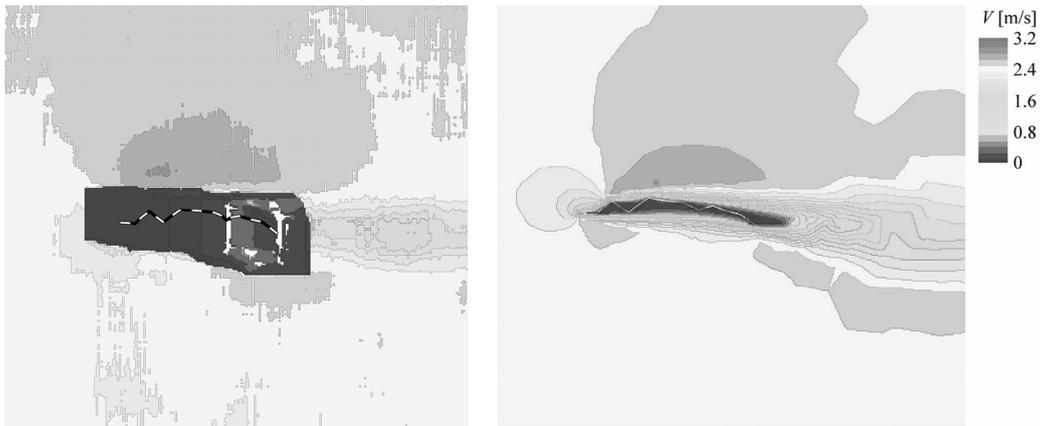


図3 アキアカネ左前翅まわりにおける速度の等値面図（実験と数値シミュレーションの比較）

以上の研究結果を第5章で総括した。