トンボの翅の三次元構造とトンボまわりのPIV計測*

露 木 浩 二^{*1}, 須 藤 誠 一^{*1}Three-dimensional Structure of a Wing and Flow Field
around a Flapping Dragonfly with the PIV SystemKoji TSUYUKI^{*2} and Seiichi SUDO^{*2} Department of Mechanical Engineering, Iwaki Meisei University,
5-5-1 Iino, Chuohdai, Iwaki-shi, Fukushima, 970-8551 Japan

In the present paper, studies of dragonfly wing revealed the structural morphology and the aerodynamic characteristics. Some experimental studies on dragonfly wings were performed with a scanning electron micrograph, a three-dimensional curved shape measuring system and a Particle Image Velocimetry (PIV) system. Firstly, the scanning electron micrograph observed the cross section shape of a dragonfly wing. Secondly, the system for the measurement of surface shape measured the surface roughness of a dragonfly wing with μm order accuracy. The results of surface shape measurement revealed there are three regions on a dragonfly wing, which had different function for a wing. Lastly, the PIV system measured the flow characteristics around the dragonfly wing and the flapping dragonfly. The analysis of two-dimensional velocity fields with the PIV system clarified the existence of the large velocity areas over a dragonfly wing and the specific flows around a flapping dragonfly.

Key Words: Biomechanics, Morphology, Biofluid Mechanics, Dragonfly Wing, PIV System

1. 結 言

バイオエンジニアリング,あるいはバイオメカニクスと呼ばれる分野では,動植物の持つ様々な機構や機能について,数多くの調査・研究が行われてきた⁽¹⁾.昆虫は,これら研究対象となる動植物の中でも特徴的な機構や機能を持つ生物である.特に,昆虫の飛行メカニズムの詳細は未だ解明されていない.確認されているだけで100万種近く存在する昆虫の中で,極めて興味深い飛翔を行う昆虫はトンボであろう.トンボは飛びながら小さな昆虫を捕食することから分かるように,優れた飛行性能を有している昆虫である⁽²⁾.そのため,トンボの飛行に関して数多くの研究報告がある.例えば,Brodskyはトンボを含む飛翔昆虫の翅構造やはばたき運動のメカニズムに関する多数の研究報告を自著にまとめた⁽³⁾.Alexanderは,直進飛行,旋回飛行における前翅と後翅の位相関係や,はばたき飛行には一般的に考えられるよりも大きな力が必要であることなどを報告した⁽⁴⁾.また,旋回飛行時におけるトンボの翅の運動に関する研究報告もある⁽⁵⁾.東らは,ト

ンボの定常的なゆっくりとした上昇飛行を撮影し,トンボの飛行について詳細な解析を行った⁽⁶⁾.さらに,風洞内で自由飛行するトンボについて,飛行性能に関する計算を様々な速度に関して行った⁽⁷⁾.WakelingとEllingtonは,トンボの滑空飛行⁽⁸⁾とはばたき飛行⁽⁹⁾について研究し,平均揚力係数の準定常的な解析を自由飛行するトンボに対して適用した⁽¹⁰⁾.岡本らは,トンボの翅で作成されたグライダーモデルの飛行試験を2種類の風洞を用いて行ない,トンボの翅と体の航空力学的特性について研究した⁽¹¹⁾.そして筆者らは,飛行時のトンボの翅構造と空力特性について報告している⁽¹²⁾.

このように数多くの研究報告があるにもかかわらず,トンボの飛行に関しては多くの不明な点が残されている.例えば,トンボの翅表面の凹凸形状や,トンボまわりの流れ場に関する研究は十分とは言えない.トンボのはばたき飛行メカニズムの全容を解明するためには,これらの研究データは必要不可欠である.そこで,電子顕微鏡と非接触三次元形状計測装置によるトンボの翅構造の解析と,PIVによるトンボまわりの流れ場解析から,トンボの翅の持つ航空力学的特性の解明を試みた.

* 原稿受付 2002年6月10日.

^{*1} 正員,いわき明星大学理工学部(〒970-8551 いわき市中央台飯野5-5-1).

E-mail: koji@iwakimu.ac.jp

2. 主 な 記 号

- α : 回転ダイヤルの角度
 δ : 翅の高低差
 L : トンボの体長
 l : 翅の付け根から先端までの長さ
 l_w : l 方向に垂直な翅の長さ (翼弦長)
 l_x : l 方向の長さ
 u, v : x, y 方向の速度成分
 U_0 : 一様流速
 V : 2 次元合成速度
 x, y, z : 座標系

3. 実験装置および方法

3.1 トンボの翅の微視的観察 走査型電子顕微鏡 (日立, S-800) による翅脈の断面形状を観察するため, トンボの翅を数枚の小片に切断し, イオンスパッター装置を用いて白金パラジウムを翅表面に蒸着した. 加工した翅を走査型電子顕微鏡で撮影し, コンピュータで処理した後に, 翅脈の各断面形状の比較を行った.

3.2 トンボの翅の三次元形状計測 翅表面全体の凹凸形状を, 非接触三次元形状計測装置 (三鷹光器, NH-3) により詳細に計測した. 本装置は, He-Ne レーザシステム, オートフォーカス顕微鏡システム, サーボ機構を有する高精度 XY-ステージ, および制御用コンピュータ等で構成される. 図 1 に装置の概要を示す. 試料に用いるトンボの翅は半透明であるため, このままではレーザスポットの反射を正確にセンサーが感知することができない. そこで, イオンスパッター装置を用いて翅表面に金蒸着を施し, 翅がレーザ光を十分に反射できるよう加工してから計測を行った. 翅形状を詳細に計測するため, XY-ステージ上に設置した 1 枚の翅は 20 前後の領域に分けて計測した. 計測の精度は μm のオーダーである. トンボの翅全体の形状は, 分割計測した翅の三次元データをコンピュータ上で結合することで得た.

3.3 PIV による流れ場解析 トンボの翅まわりにおける流れ場を, PIV (TSI Inc.), 小型風洞およびポータスモーク (シーディング装置) からなるシステムにより解析した. 本システムの概要を図 2 に示す. PIV は, 2 基の Nd:YAG レーザ, CCD カメラ, フレキシブルアーム, レンズユニット, シンクロナイザーおよびコンピュータで構成されている. イメージキャプチャーおよび解析を行うソフトウェアの INSIGHT は, 時間分解能が 10 ベクトルマップ/sec の性能を持つ. 風洞は, 長さ 300mm, 高さ 200mm, 幅 200mm のテストセクションを持つ全長 1,970mm の小型吸込み型風

Fig. 1 Experimental apparatus for measurements of surface shape of a wing

Fig. 2 Experimental apparatus for PIV system

洞である. テストセクションにおける流れの乱れ強度は, 速度 $U_0 = 10\text{m/s}$ に対し 0.75% rms である. 試料となるトンボの翅は, 図 3 のように木製の架台に取り付けられ, このテストセクションに設置される. 設置した翅に一様気流を与え, 回転ダイヤルの角度を変えながら翅まわりの流れ場を解析した. さらに, 図 4 のように生きたトンボの胸下部を木製の架台に固定したものをテストセクションに設置し, はばたき運動をするトンボまわりの流れ場解析も試みた.

Fig. 3 The experimental set-up of a wing for the PIV system

Fig. 4 The experimental set-up of a dragonfly for the PIV system

4. 実験結果および考察

4.1 トンボ ハエやカなどの小型昆虫の捕食者として進化してきたトンボは、一般に他の飛翔昆虫よりも優れた飛行能力を持つようになった。トンボは多くの翅脈と翅膜から構成される前後あわせて4枚の半透明な翅を持ち、直接飛翔筋によってそれぞれを独立に動かす。そして前進、後進、滑空、および空中停止などを行う。このような優れた飛行メカニズムは、工学的観点に立って解明される価値がある。トンボは分類学上、有翅亜綱 (Pterygota) のトンボ目 (Odonata) として位置づけられており、さらに、その形態の違いから、均翅亜目、ムカシトンボ亜目、不均翅亜目の3群に分けられている⁽¹³⁾。本研究は、不均翅亜目のトンボ科 (Libellulidae Stephens) のグループに関して行った。電子顕微鏡観察にはノシメトンボ (*Sympetrum infuscatum*) を、三次元非接触形状計測にはウスバキトンボ (*Pantara flavescens*) とアキアカネ (*Sympetrum frequens*) を、PIVによる翅まわりの流れ場計測にはシオカラトンボ (*Orthetrum albistylum speciosum*) とショウジョウトンボ (*Crocothemis servilia mariannae*) をそれぞれ用いた。なお、これらのトンボはすべて福島県いわき市において採集されたものである。

Fig. 5 Definition of three angles for a dragonfly wing

4.2 翅の回転角 翅の高低差 δ に対する一意的な値を得るため、 δ 計測時における翅の回転角を定義する必要がある。すなわち、図5に示す翅のピッチ、ヨー、ロールの3つの回転角と計測面Aとの関係を定義した。計測面Aが鉛直面内にあるとき、ヨーは翅の肘脈 (Cu) と先端を結んだ線と計測面Aの水平方向の線分とが直交する角度とした。ロールは翅の最も広い部分 (後述する翅の領域II) の最上部の翅脈と計測面Aの鉛直方向の線分とが直交する角度とした。そしてピッチは計測面Aにおける δ の平均値が最小となる角度とした。このようにして翅の回転角を決定した後、翅の高低差 δ を計測した。

4.3 トンボの翅の三次元形状評価 図6はノシメトンボ後翅全体の写真と、前縁脈と亜前縁脈の断面の電子顕微鏡写真を示したものである。翅脈の断面形状を見ると、翅の付け根付近の前縁脈の断面は、進行方向における流れと垂直方向に厚く、結節より先の亜前縁脈の断面は、進行方向に尖った形状をしていることが見て取れる。すなわち、移動量が小さい付け根付近は空力的に有利な形状である必要はなく、むしろ、はばたき運動をしている際の翅にかかる負荷を支えるために、付け根に近い前縁脈は強く丈夫であることが求められる。そして、移動量が多い翅の中央から先端にかけての亜前縁脈は、流れに抗しない形状が求められる。このように、前縁脈、亜前縁脈の断面構造は、翅の運動に対して適切な形状をしていることが、電子顕微鏡写真の観察結果から分かった。

電子顕微鏡を用いることで、前縁脈、亜前縁脈断面の形状について詳細に観察することができた。また、翅の断面形状は凹凸のある非流線型であることがすでに知られている⁽¹⁴⁾。しかし、これらはすべて翅の二次元的な情報でしかない。トンボの翅は航空機の翼形のような流線形ではないため、トンボの翅の航空力学的特性の解明には、翅全体の詳細な三次元形状を把握することが必要不可欠である。にもかかわらず、トンボの翅全面にわたっての詳細かつ高精度な三次元形状

Fig. 6 Hindwing of the dragonfly and the cross sections of the vein

計測は、これまでに行われていない。そこで、ウスバキトンボの前翅を非接触三次元形状計測装置を用いて計測した。その一例を図 7 に示す。(a) は翅の付け根付近、(b) は翅の中央付近、(c) は翅の先端付近である。

翅の付け根から三角室付近の計測結果である図 7(a) を子細に観察すると、前縁脈をはじめとする太い翅脈の断面、V 字形の大きな溝、前縁脈に繋がる翅膜が比較的水平的であること、後縁近傍の小室に分割されている翅膜の幅が比較的狭いことなどが見て取れる。このような構造は、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。三角室から結節付近における計測結果の図 7(b) には、図 7(a) の場合と同じく、比較的太い翅脈の断面や V 字形の溝が、前縁部から断面中央にかけて観察できる。しかし、図 7(a) とは異なり中央から後縁までの翅膜は広い。そして、翅の幅もこの領域が最も広がっている。このような構造は、中央から後縁までの部分が前縁付近に比べてたわみやすいため、はばたき運動の際に大量の空気を包み込むように搔くことが可能となる。すなわち、トンボが飛行するために必要とされる揚力の生成は、この領域で得ていることが考えられる。結節付近から翅の先端までの計測結果である図 7(c) からは、図 7(a)、(b) と比べてさらに異なる形状が観察できる。翅脈の断面は細く、V 字形の溝も小さいため、他の領域と比べて凹凸の激しくない領域となっている。したがってこの領域は他の領域よりもねじれやすい構造をしていることがいえる。また、図 7(b) の領域に対して先端が上に沿っており、上反角がついているという特徴がある。このような構造は、はばたき飛行時の回転安定性を高めていると考えられる。このようにトンボの翅は、特徴的な形状によって 3 つの領域に分割され、空力的に有効な形状をしていることが分かった。

(a) A part of region I

(b) A part of region II

(c) A part of region III

Fig. 7 The three-dimensional display of the surface roughness of the part of dragonfly wing

図 8 にウスバキトンボの前翅を全面にわたって三次元形状計測した結果を示す。図 8 からは、3 つの特徴的な領域が滑らかに結合されて翅全体を構成している様子がよく分かる。図 9 は同トンボに対する視点を変更して示した図である。(a) は付け根から先端に向けた場合であり、(b) は視点を先端から付け根に向けた場合である。このような視点で翅を観察すると、特徴的な 3 つの領域がさらに際立ってくる。すなわち、先端付近は上反角がついていること、付け根付近と先端付近の凹凸の違い、前縁から中央までと中央から後縁までの翅膜の違いなどが明確である。

Fig. 8 The surface roughness of the dragonfly forewing and three regions on the wing

Fig. 9 The three-dimensional display of the surface roughness of the dragonfly wing along the veins

図 10 は、ウスバキトンボ ($L = 50.81\text{mm}$, $l = 43.15\text{mm}$) とアキアカネ ($L = 39.81\text{mm}$, $l = 32.51\text{mm}$) の前翅の高低差 δ の分布を示している。(a) は実スケールによる図、(b) は翅の長さで規格化した図である。個体差や翅の状態によって、高低差は若干変化するものと考えられるが、サイズの異なるトンボの翅においてもトンボの翅が 3 つの領域に分割されることは図 10 から明らかである。図 10 で示された曲線の下に凸である部分を境界として 3 つの領域の範囲を求めると、ウスバキトンボとアキアカネの各領域の範囲は次の通りである。

ウスバキトンボ

領域 I : $l_x/l = 0 \sim 0.14$

領域 II : $l_x/l = 0.14 \sim 0.70$

領域 III : $l_x/l = 0.70 \sim 1.0$

アキアカネ

領域 I : $l_x/l = 0 \sim 0.22$

領域 II : $l_x/l = 0.22 \sim 0.72$

領域 III : $l_x/l = 0.72 \sim 1.0$

図 10 からは、翅を支える領域 I では実スケールがほぼ同じであること、主に揚力を発生させていると考えられる領域 II ではサイズの大きいウスバキトンボの方が実スケールでは長くなっているが、翅の長さ比ではこの差は小さくなること、飛行安定性を制御している

(a) Case of real scale for wing length

(b) Case of non-dimensional scale for wing length

Fig. 10 Distribution of the elevation for two wings

と考えられる領域 III は実スケールではサイズの大きいウスバキトンボの方が長い、翅の長さ比では両者ともにほぼ同じであることなどが分かる。ただし、このような特徴がすべての（少なくとも不均翅亜目トンボ科の）トンボに適用されるかはまだ明らかではない。

4.4 トンボの翅まわりの流れ場解析 トンボが飛翔するときの翅の動きは非常に多彩である。トンボは直接飛翔筋で 4 枚の翅をそれぞれ独立して動かし、前進、後進、空中停止、滑空飛行、左右の旋回などの飛行を自在に行う。このようなトンボの飛行メカニズムを解明するには、実際の翅の動きやそのまわりの流れ場を詳細かつ丹念に観察することが重要である。そこで、トンボの翅まわりおよびはばたき運動時のトンボまわりの流れ場を PIV により解析し、トンボの飛行性能の評価を試みた。

トンボの飛行性能評価の第一段階として、まず最初に翅そのものの空力特性を調べる必要があると考え、シオカラトンボ ($L = 52.53\text{mm}$, $l = 40.41\text{mm}$) の前翅を小型風洞内に設置し、翅に対し一様な気流を与えたときの翅まわりの流れ場解析を行った。図 11 は一様流速 $U_0 = 2.4\text{m/s}$ における翅まわりの二次元速度ベク

トル図、図 12 はその二次元速度分布図である。図 11, 12 の黒い点線は、翅断面における前縁と後縁を結んだ線で、およその翼弦長 l_w を表している。 $z = 20\text{mm}$ 面における翼弦長は $l_w = 9.2\text{mm}$ である。なお、速度 V は x 方向の速度成分を u 、 y 方向の速度成分を v として次式より求めた。

$$V = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (1)$$

解析は、翅を目視で水平にした位置を基準 ($\alpha = 0^\circ$) とし、 $\alpha = 0^\circ$, $+10^\circ$, -10° の場合について行った。図 11(b) の速度ベクトル図を見ると、翅の前縁脈付近に見られる V 字形の溝によって、流れは乱されことなくスムーズな流れを翅のまわりに形成しているのが分かる。図 12(b) の速度分布からは、翅の上部に流速の速い部分が観察されるため、このとき、トンボの翅は揚力を得ているものと考えられる。ただし、水平面に対する迎角が大きくなると、図 11(c), 図 12(c) のように翅の後の流れが乱れる様子が観察された。図 11(a) のように水平面に対する迎角がほとんどない状態の翅まわりの流れはスムーズである。しかし、翅まわり速度分布の変化位置が、(b), (c) の場合とは異なっている状態が観察できる。すなわち、翅上部における速度の変化する境界が前縁脈の位置ではなく、亜前縁脈の位置となっていることである。図 12(a) において、前縁脈から亜前縁脈までの翅膜は流れに対して平行となり、亜前縁脈より後の翅膜が流れに対して垂直に近くなっていることから、本解析結果は、周囲の流速を変える、すなわち揚力を生成するために、V 字形の溝が利用されていることを示唆している。

最後に、図 4 のようにテザード状態にした生きたショウジョウトンボ ($L = 45.56\text{mm}$, $l = 37.39\text{mm}$) を風洞内のテストセクションに設置し、はばたき運動時における翅まわりの流れ場解析を試みた。その結果の一例を図 13 に示す。図 13 は一様流速 $U_0 = 2.5\text{m/s}$ 、翅の付け根から $z = 14\text{mm}$ の面における 2 次元速度ベクトル図である。(a) は、前翅を打ち上げている途中で、後翅は最上部付近にある。(b) は、後翅を打ち下ろし、前翅を回転させた後に打ち下ろそうとしている瞬間である。(c) は、前翅を打ち下ろし、後翅を最下部付近より回転させながら打ち上げようとする瞬間である。このとき、翅の後には小さな反時計回りの渦が確認できる。また、この状態のとき、前翅と後翅はあたかも一つの翅のようになっており、その上部の流速は一様流速に比べ速くなっているのが分かる。(d) は、前翅が最下部付近にあり、後翅は打ち上げている途中である。前翅と後翅の間には流速の速い流れが発生している。

Fig. 11 Velocity vectors around a wing with PIV system at the plane for $z = 20\text{mm}$ ($U_0 = 2.4\text{m/s}$)

Fig. 12 Velocity contours around a wing with PIV system at the plane for $z = 20\text{mm}$ ($U_0 = 2.4\text{m/s}$)

これらの図より、トンボが翅を打ち下ろした後に反時計回りの渦を翅の後ろに発生させていること、翅を打ち上げた後にその渦が消失していることが分かった。

本実験においてトンボはテザード状態にあるため、実際に大空を飛翔するトンボのはばたき運動との相違は避けられない。しかしながら、はばたきによって後方に生成される流れを可視化し、数値化された速度分布を得たことは、トンボの飛行メカニズム解明のための重要な一歩であると考えられる。

5. 結 論

数種のトンボに関して、走査型電子顕微鏡、非接触三次元形状計測装置、およびPIVを用いた実験計測を行い、トンボの翅の持つ航空力学的特性の解明を試みた。得られた結果をまとめると以下ようになる。

(1) ノシメ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。はばたき運動を行うトンボに

とて、このような前縁脈の形状は空力的に最適な形状である。

(2) 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。

(3) PIV解析により、シオカラトンボの前翅まわりの流れを可視化した。可視化した翅まわりの速度分布図から、揚力発生のために前縁脈付近のV字形の溝が利用されていることを示唆する結果を得た。

(4) はばたいているショウジョウトンボまわりのPIV解析によって、ショウジョウトンボの後に発生する渦を含んだ流れを可視化し、詳細な速度ベクトル分布図を得た。

Fig. 13 Velocity vectors around a flapping dragonfly at the plane for $z = 14\text{mm}$ with PIV system ($U_0 = 2.5\text{m/s}$)

文 献

- (1) Alexander, R. M., *Exploring Biomechanics: Animal in Motion*, W. H. Freeman and Company, (1992).
- (2) 石川良輔, 昆虫の誕生, 中公新書, (1996)
- (3) Brodsky, A. K., *The Evolution of Insect Flight*, Cambridge Univ. Press, (1994)
- (4) Alexander, D. E., "Unusual phase relationships between the forewings and hindwings in flying dragonflies", *J. Exp. Biol.*, Vol. **109**, (1984), pp. 379–383
- (5) Alexander, D. E., "Wind tunnel studies of turns by flying dragonflies", *J. Exp. Biol.*, Vol. **122**, (1986), pp. 81–98
- (6) Azuma, A., Azuma, S., Watanabe, I. and Furuta, T., "Flight mechanics of a dragonfly", *J. Exp. Biol.*, Vol. **116**, (1985), pp. 79–107
- (7) Azuma, A. and Watanabe, T., "Flight performance of a dragonfly", *J. Exp. Biol.*, Vol. **137**, (1988), pp. 221–252
- (8) Wakeling, J. M. and Ellington, C. P., "Dragonfly flight: I. Gliding flight and steady-state aerodynamic forces", *J. Exp. Biol.*, Vol. **200**, (1997), pp. 543–556
- (9) Wakeling, J. M. and Ellington, C. P., "Dragonfly flight: II. Velocities, accelerations and kinematics of flapping flight", *J. Exp. Biol.*, Vol. **200**, (1997), pp. 557–582
- (10) Wakeling, J. M. and Ellington, C. P., "Dragonfly flight: III. Lift and power requirements", *J. Exp. Biol.*, Vol. **200**, (1997), pp. 583–600
- (11) Okamoto, M., Yasuda, K. and Azuma, A., "Aerodynamic characteristics of the wings and body of a dragonfly", *J. Exp. Biol.*, Vol. **199**, (1996), pp. 281–294
- (12) Sudo, S., Tsuyuki, K., Ikohagi, T., Ohta, F., Shida, S. and Tani, J., "A study on the wing structure and flapping behavior of a dragonfly", *JSME Int. J.*, Vol. **42**, (1999), pp. 721–729
- (13) 石田昇三, 石田勝義, 小島圭三, 杉村光俊, 日本産トンボ幼虫・成虫検索図説, 東京大学出版会, (1988)
- (14) 東昭, 生物の動きの事典, 朝倉書店, (1997)