蚊の羽ばたき飛行に関する実験的研究*

甲斐 誠^{*1}, 大場 謙吉^{*2}

Experimental Study of Beating Motion of Mosquito

Makoto KAI and Kenkichi OHBA^{*3}^{*3} Kansai University, Dept. of Mech. and Systems Engrg., Yamatecho 3-3-35, Suita, Osaka, 564-8680 Japan

The purpose of this study is to investigate flow pattern around a mosquito's wing while it is beating. Reynolds number and Strouhal number when mosquito was flying were calculated by an analysis of pictures from a high speed video camera and a microphotograph. Beating motion showed three types; a flapping motion in which wing was moved up and down, a lead-lag motion in which wing was moved back and forth, and a feathering motion in which wing was twisted. Those motions were observed using the high speed video camera. An enlarged scale model testing was carried out using a very low speed wind tunnel under the condition that Reynolds number and Strouhal number were set to be equal to those of real mosquito. Phenomena of periodic vortex growth and its release from a wing model moving up and down were visualized with a smoke method. By changing wing's attack angle, vortex pattern was changed. The vortex was analyzed and the circulation was calculated from visualized pictures.

Key Words: Mosquito, Flapping, Wind Tunnel, Enlarged Scale Model

1. 緒言

昆虫は羽ばたきによって飛行を実現しているが、その揚力の発生メカニズムは固定翼の理論では説明できない。本研究ではそのメカニズムについて調べることが目的とし、実験対象として昆虫の中でも比較的サイズの小さい蚊を選んだ。蚊は飛行時の Re 数が 10^2 程度であり、その羽ばたき周波数も数百 Hz というその小さい体からは想像もつかない羽ばたきを実現している。

一般的に昆虫の羽ばたきは上下方向のフラッピング運動、前後方向のリード・ラグ運動、ねじり方向のフェザリング運動をしており、その動きによって非定常な渦を発生させ効率よく羽根上面に圧力の低い領域を形成し揚力を発生させているが、高速ビデオカメラによる蚊の羽ばたき撮影からも、それらの動きをしていることを確認することができた。

また、蚊は双翅目に属しており、羽根が普通の昆虫とは違って2枚しかなく、後ろの1組は平均棍とよばれる平行感覚をつかさどる器官に進化している。そして、羽根を動かす筋肉の形態は間接飛翔筋の共振によって羽ばたいているので、羽根は一定の決まった動きしかできない。

本研究では羽根の顕微鏡写真および高速ビデオカメラによる羽ばたき撮影から蚊の形態学的パラメー

タを測定し、それから得た値をもとに飛行時の Re 数と St 数を算出した。さらに、それらの2つの値が等しくなるように微風速風洞を用いて羽根の拡大モデル実験を行い、煙を使って羽根の周りを可視化することで、羽ばたきによってできる非定常渦について評価を行った。

2. 主な記号

u	: 羽根の対気速度	m/sec
c	: 平均翼弦長	mm
ν	: 動粘性係数	m^2/sec
f	: 羽ばたき周波数	Hz
l	: 翼長	mm
r	: 翼の残存率	
A	: 翼面積	mm^2
Re	: レイノルズ数	
St	: ストロールハル数	
Γ	: 渦の循環	m^2/sec
Γ_{le}	: 羽根拡大モデル前縁での渦の循環	m^2/sec
Γ_{tr}	: 羽根拡大モデル後縁での渦の循環	m^2/sec
d	: 渦の直径	m
v	: 渦の回転速度	m/sec
α	: 羽根のピッチ角	deg.
θ	: 羽根拡大モデルの打ち下ろし角度	deg.

3. 蚊の羽根の形態学的パラメータの測定

3.1 実験方法 本研究で用いた蚊はヒトスジシマカであり、関西大学構内で採取したものを研究対象にした。羽根の顕微鏡写真から翼長と翼面積を求め、高速ビデオカメラを使った羽ばたきの撮影か

* 原稿受付 2000年4月4日。

^{*1} 学生員, 関西大学大学院 (〒564-8680 吹田市山手町3-3-35)。^{*2} 正員, 関西大学工学部。

E-mail: ohbak@ipc.ku.kansai-u.ac.jp

ら羽ばたき周波数、羽根のピッチ角の変化、翼端の軌跡を求めた。蚊の羽ばたきの撮影は足をアクリル板の上に固定した状態でを行い、正面および側面から撮影を43匹のものについて行った。

以上のようにして形態学的パラメータを求めた後、蚊の飛行速度⁽¹⁾が1.0m/secであるとしてRe数とSt数を算出した。さらに、蚊の羽ばたきの撮影画像から翼長、平均翼弦長、翼面積、アスペクト比、Re数、St数と周波数の関係を調べた。

3.2 実験結果 図1は蚊の羽根の顕微鏡写真である。羽根の構造は前縁部分が太い翅脈で形成され、後縁にいくにつれ細い翅脈からなっている。全体には毛状のようなものが翅脈の部分から生えており、翅脈の間には膜状のものが張られた構造となっている。毛状のものについては神経の役割を果たすと同時に飛行しているときにも何らかの影響を及ぼしているものと考えられる。

Fig. 1 Mosquito wing

図2～図5はそれぞれ翼長1mm、平均翼弦長cmm、翼面積Amm²、アスペクト比と周波数fHzの関係を示すグラフである。一般的に飛行動物は、羽根の大きさの小さいものほど羽ばたき周波数は高い傾向にあるが、図2～図4から同じ種類の蚊の中でも羽根の大きさの小さいものほど周波数は高い傾向にあることがわかった。しかし、図5から羽ばたき周波数には違いがあっても羽根の形状についてはほとんど違いがないことがわかり、その平均アスペクト比は約4.71であった。平均翼長、平均翼弦長の平均、平均翼面積の値は以下の通りとなった。

平均翼長：2.54 mm, 平均翼弦長の平均：0.54 mm

平均翼面積：1.40 mm², 平均アスペクト比：4.71

また、羽ばたき周波数fと翼長lの関係は文献(2)の中に引用されているOgawa and KandaおよびBelton and Costelloによる観察結果よりfがlのべき乗の逆数に比例する関係が求められているので、それを参考にし、さらに平均翼弦長、翼面積とも似たような関係が

あるのではないかと考え、最小二乗法を使ってこれらの値の関係式を求めた。以下にその式を示す。

$$\text{翼長と周波数} : f = \frac{1517}{l^{1.03}} \quad (1)$$

$$\text{平均翼弦長と周波数} : f = \frac{355}{c^{0.80}} \quad (2)$$

$$\text{翼面積と周波数} : f = \frac{716}{A^{0.68}} \quad (3)$$

測定された形態学的パラメータから蚊の飛行速度を1.0m/sec⁽¹⁾として、Re数とSt数を次式のようにして算出した。

$$\text{Re} = \frac{u \cdot c}{\nu} \quad (4)$$

$$\text{St} = \frac{f \cdot c}{u} \quad (5)$$

Fig. 2 Wing length and frequency

Fig. 3 Chord length and frequency

Fig. 4 Wing area and frequency

Fig. 6 Re-number and frequency

Fig. 5 Aspect ratio and frequency

Fig. 7 St-number and frequency

図6、図7は撮影された43匹について求めた形態学的パラメータから計算されたRe数と周波数の関係およびSt数と周波数の関係を示すグラフである。これらのグラフから蚊が飛行している時のRe数は100～200程度、St数は0.07～0.09程度であることが分かった。蚊が飛行している時のRe数とSt数はこの程度の値であり、かなり粘性の効いた世界で高周波で羽ばたき飛行していることが確認できた。

また、測定されたこれらの値から次の平均値を得た。

平均周波数：591 Hz

平均Re数：137, 平均St数：0.08

3.3 蚊の羽ばたき撮影 図8および図9はそれぞれ蚊の羽ばたきを正面と側面から撮影したもので、打ち下ろしははじめから打ち上げ終わりまでの一周期までの連続写真である。図8の正面から撮影したもののから、上下方向のフラッピング運動だけでなくねじり方向のフェザリング運動をしている様子が観察できる。また、フラッピングの角度は45°の範囲で動かしていることから振幅がその半分の22.5°であることがわかった。図9の側面から撮影したものからは羽根の打ち下ろしの時に斜め前の方向に打ち下ろしている様子が観察され、羽根の動かす方向は体に対して垂直で

Fig. 8 Front view of wing motion

Fig. 9 Side view of wing motion

はなく、前後方向のリード・ラグ運動の加わった運動であることがわかった。

この羽ばたきの連続写真から翼端の軌跡と羽根の迎え角の変化を測定した結果を図10、図11に示す。

図10から、蚊が羽ばたく時に上下方向だけでなく前後方向のリード・ラグ運動が加わっていることが観察され、その動きは直線運動ではなく弧を描いたような運動であることが観察された。羽根は直線的に動かすより、弧を描いた運動の方が効率の良い動きであると考えることができる。

図11から、打ち下ろし終わりと打ち上げ終わり付近で急激に迎え角を変化させる傾向があることができた。この急激な迎え角の変化が羽根上面に発生した渦を剥がれにくくさせ、効率良く揚力を発生させているものと考えられる。

Fig. 10 Wing motion

Fig. 11 Alteration of attack angle

4. 羽根の残存率と周波数の関係

4.1 実験方法 蚊は双翅目の種類であるので、間接飛翔筋形の昆虫であり、筋肉の共振を利用した羽ばたきである。その羽ばたきは同じ動きしかできず、また、高い周波数の羽ばたきを行う。蚊のような筋肉の共振を利用した羽ばたきが、羽根を切断し質量を変化させると羽ばたきがどう変化するかを調べるために、2匹の蚊を使い次の方法で実験を行った。

一匹は、図12のように両方の羽根を1から4まで同時に同じ割合づつ切断したもの(Mosquito A)と、もう一匹は、片側の羽根を1から4まで切断した後、もう片方を5から7まで切断したもの(Mosquito B)の2通りの方法で測定した。また、羽ばたき周波数は高速ビデオカメラによって撮影された画像から測定した。

なお切断は、はさみによって容易に行うことができ、切断面はきれいであった。

Fig. 12 Method of wing cutting

4.2 蚊の飛翔筋共振モデル 蚊は間接飛翔筋と胸部の背板の部分による共振を利用した羽ばたきをしているので、図13のように筋肉をばねに置き換えて、羽根の残存率に対する周波数について、1自由度系の振動モデルが共振することを考えた。

Fig. 13 Muscle model

蚊の羽根の間接飛翔筋を図 13 のようなばねと質点の 1 自由度系が強制振動する場合に置き換えて考えると、筋肉の固有振動数は以下の式のように表すことができる。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m+M}} \quad (6)$$

k : 間接飛翔筋のばね定数
M : 間接飛翔筋の質量
m : 羽根の見かけの質量
f : 羽ばたき周波数

さらに、羽根を切断することによって変化する周波数を f' とする。蚊の場合は $m \gg M$ であると考えことにし、残存率が羽根の見かけの質量の変化に比例するものとして、その質量の変化を m' とし、式を書くと式 (6) は次式のようにになる。

$$f' = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m'}} \quad (7)$$

羽根の残存率は $m'/m (\equiv r)$ で表すことができるので、式 (7) に代入すると

$$f' = \sqrt{\frac{m}{m'}} \cdot \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{m}{m'}} \cdot f = \frac{f}{\sqrt{r}} \quad (8)$$

となり、羽ばたき周波数は羽根の残存率の平方根に逆比例することになる。

ただし、羽根の翼幅方向の単位長さ当たりの質量は一定と仮定し、

$$r = \frac{m'}{m} = \frac{l'}{l} \quad (9)$$

が成り立つとした。

羽根の見かけの質量 m は羽根自体の質量と羽ばたき運動に伴う空気流の付加質量の和であるが、付加質量は本実験のような羽根形状の変化の範囲では値が小さくしかも一定と考えた。

4.3 実験結果 図 14 に羽ばたき周波数 f と残存率 r の実験結果 (黒丸と白丸) および理論式 (8) の結果 (実線と破線) を示す。両者はよく一致することがわかる。図 14 から羽根を同時に切断したときも f は $r^{1/2}$ に逆比例し、残存率が 30% で、2 倍程度まで増加した。なお、蚊 A と B の f' の違いは体重の個体差に基づくと考えられる。

実際に蚊の羽根を動かす筋肉は、ばねが共振するよ

うに筋肉を共振させ羽根を動かしていると考えることができ、また、左右の羽根はそれぞれ独立しておらず、同じ筋肉で動かされていること、そのため、羽根は一定の同じ動きしかできないが、数百 Hz という高周波数の羽ばたきをすることができると推測される。

蚊を含む双翅目昆虫は、筋肉と羽根が直接結びついている直接飛翔筋を持った昆虫とは違い、このような間接飛翔筋によって羽根を動かしているが、長い年月をかけて羽根を高周波数で羽ばたかせるために筋肉形態も変化させていったものと考えられることができる。

Fig. 14 Frequency and remain ratio of wing cutting

5. 羽根の拡大モデル実験

5.1 実験方法 蚊の飛行は羽ばたきによるものなので、羽根の周りの流れは固定翼のものとは異なる。昆虫の羽ばたきでは羽根の打ち下ろしによって圧力の低い領域を形成し、羽根の上面には非定常渦があらわれる。これが昆虫を飛行させるための揚力となっている。

実際に蚊の羽根の周りの流れを可視化するのは困難であり、実験の再現性も得られにくいので、羽根の拡大モデルを作製し微風速風洞内で上下に動かすことで実際の動きを模擬し、煙を使って周りの流れを可視化した。蚊の形態学的パラメータの測定から Re 数と St 数が得られたので、モデル実験はこれらの値が等し

くなるようにして実験を行った。羽根のモデルは10倍に拡大したものを使ったので、風洞の流速と上下動の周波数はそれぞれ実際の飛行速度⁽¹⁾と羽ばたき周波数の1/10倍、1/100倍にした。図15は実験装置の概略図であり、羽根を動かす方向は実際の羽ばたきと同じように上下方向のフラッピング運動に加えて前後方向にも運動させるために、15° 時計方向に回転させた方向 ($\theta=15^\circ$) で動かした。また、羽根の迎え角 α° を $0 \sim 75^\circ$ まで 15° づつ変えて実験を行った。

Fig. 15 Experimental device

羽根の上面に発生する渦の循環の最大値を下に示す式(10)⁽⁹⁾を用いて高速ビデオカメラの画像から計算した。渦は羽根の前縁および後縁に発生するので、それぞれについて計算し足しあわせたものを循環 Γ とした。また、前縁での渦の循環を Γ_e 、後縁での渦の循環を Γ_r とした。

$$\Gamma_{\max} = \pi d v \quad (10)$$

$$(\Gamma_{\max} = \Gamma_e + \Gamma_r)$$

$\Gamma_{\max}$: 渦の循環の最大値 (m^2/sec)

ここで、 d は撮影された画像から測定した渦直径であり、 v はその画像からの渦の先端の位置変化と時間間隔より求めた渦の周速度を表している。

5・2 実験結果 微風速風洞による拡大モデル実験より図16のような渦の発生と剥離が繰り返される可視化画像が得られた。この画像から、渦は羽根の迎え角が大きいほど発生と剥離が遅れるということがわかった。

Fig.16 Flow visualization

図 17 は、横軸に迎え角 α° を縦軸に渦の発生時間および剥離時間 t msec を示している。また、羽根は打ち下ろし始めから打ち下ろし終わりまで 100 msec かかるので縦軸には 100 msec までとっている。

図 18 には渦の循環を計算した結果を示す。横軸に迎え角 α° 、縦軸に循環 Γ m²/sec をとっている。

これらの実験結果から渦の循環の最大値はピッチ角が 15° の時であったが、この時羽根の気流に対する

迎え角は約 80° 程度である。実際に蚊が飛行している時も羽根は気流に対して大きな迎え角で羽ばたいており、そのため体は大きく傾けた状態で飛行している。大きな循環を持った渦を発生させるためには、このように気流に対する迎え角を大きくすることで、効率良く揚力を発生させることができることがわかった。

また、渦の発生と剥離がピッチ角が大きくなることに遅れることから、羽ばたく時に羽根をねじることが渦を羽根の上面にとどまらせ、揚力を最大限発生し続ける効果があると考えることができた。

以上から蚊は効率良く飛行するために、羽根を巧みに動かすと同時に、高周波数で羽ばたいているということがわかった。

6. 結言

- (1) 蚊の羽ばたき撮影と羽根の顕微鏡写真から、形態学的パラメータを得ることができ、43 匹の蚊についてのばらつきを知ることができた。
- (2) 実際の羽根の挙動を、高速ビデオカメラによる撮影から観察することができた。また、蚊の羽ばたきが筋肉の共振を利用したものであることを確認することができた。
- (3) 羽根の拡大モデル実験から、渦が存在している時間がピッチ角が大きくなるほど遅れる傾向があることがわかり、また、その渦の循環を求めた結果、実際の蚊の飛行が効率の良いものであることがわかった。

最後に、本実験に協力して頂いた当時の本学 4 年生 大島 司君、吉野 明弘君、越智 均君、木村 優典君に謝意を表す。

文 献

- (1) 東 昭、生物の動きの事典、朝倉書店 (1997)
- (2) 池庄司 敏明、蚊、東京大学出版会 (1993)、98-101
- (3) Ellington C. P., et al., Nature, **384** (1996), 626
- (4) 甲斐、大場、機講論、No.99-1, (1999), 10-33
- (5) 甲斐、大場、機講論、No.99-1, (1999), 295
- (6) 甲斐、大場、機講論、No.99-19, (1999), 443
- (7) 甲斐、大場、機講論、No.99-37, (2000), 63-64

Fig. 17 Vortex generation and separation

Fig. 18 Vortex circulation