

スズメガの羽ばたきと翅翼の揚力特性

Wing Flapping of Hawk Moth and Lift Force Characteristics of Wings

菊地 吉郎 ・ 北浜 慎也*

Kichiro Kikuchi ・ Sinya Kitahama

1. はじめに

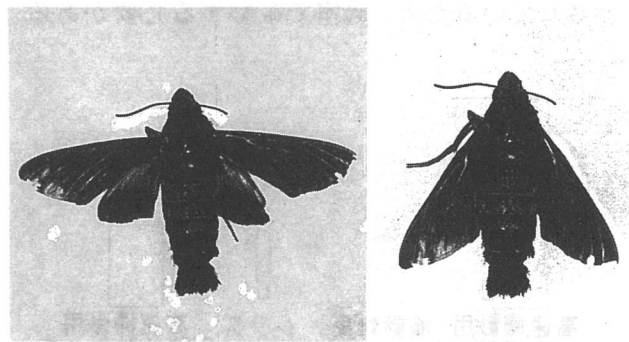
近年、伝統的機械工学と生物の境界領域を研究対象とするバイオメカニクスの研究が盛んに行われている¹⁾。現存する生物は長い時間を経て進化してきたものであり、生物個々の生活環境において生存していくために最適なものはずであり、換言すれば高性能といえる。よって、機械工学の観点から生物を観察すると、生物はさまざまな形や運動のアイデアの宝庫であり、更に生物の機能を解明すれば、その成果を機械技術に応用することができる。

機能を解明するという観点から、小さな体ではあるが、形や運動が実に多彩な昆虫が注目されている。それらは、おそらく比較的簡単な構造から成っており、運動の機能も単純なメカニズムであると考えられるからである。昆虫の様々な運動の中でも、トンボの羽ばたき飛行に関する研究が多く成されている^{2)~6)}。身近な昆虫でありながら、その飛行は実に鮮やかであり、レイノルズ数が 10^3 のオーダの世界の優秀な飛行体と考えられるからである。一方、トンボに負けず劣らず優れた飛行を行う昆虫として、スズメガが知られている。他の蛾や蝶とは異なり、スズメガ科の蛾は飛行速度が速く、遠くまで飛ぶばかりでなく、ホバリングをする。しかしながら、スズメガの機械工学的研究例は知見しない。

そこで、本報ではスズメガの羽ばたき飛行のメカニズムを機械工学的観点から解明することを目的として、スズメガの翅翼の調査・観察、基礎データの計測、高速撮影用9駒多軸カメラによる翅翼の動きの観察を行った。さらに、一様気流中に置いた翅翼の揚力を計測し、揚力係数を実験的に究明した。

2. 翅翼の調査・観察結果

スズメガは節足動物門昆虫綱鱗翅目スズメガ科に属する蛾の総称であり、小山高専校内で夏頃よく見かけるものはホシホウジャクなどである。体型は他の蛾や蝶とは明らかに異なり、太い体に厚くて細長い前翅翼と比較的小さい後翅翼を備えている。前翅翼は前縁部に太くしっかりした翅脈が通っており、付け根から先端部にかけて上向きに捻れている。後翅翼は小さくて短く、後縁部はじゃばらのようにになっている。トンボやバッタの翅翼配置とは異なり、スズメガの前後翅翼は一部重なる配置になっているため、独立して羽ばたくことはできない。蝶とは異なり、他の蛾と同様に止まるとき翅翼を体の横に広げて置くが、その格好は三角翼の戦闘機に良く似ているので、他の蛾や蝶とすぐ見分けがつく。写真1(a)、(b)にホシホウジャクの翅翼と体の形状を示す。



(a) 翅翼

(b) 体

写真1. ホシホウジャクの形状

スズメガの大半は夜に活動するが、一部のホウジャク類は日中に活動する。バタバタと大きな羽音をさせて高速で飛んでいる昆虫によく出会うが、スズメガであることが多い。飛行速度は 40 km/h 程度で、最高速度は 64 km/h 程度に達することもあるといわれており⁷⁾、ギンヤンマの最高速度 50 km/h ⁸⁾に優るとも劣ることはない。その一方、餌としている花の蜜を吸うときは花には止まらず、鮮やかなホバリングを行いながら、長い

*平成9年度機械工学科卒業生(現 長岡技科大3年生)

口吻を花に差し込んで蜜を吸う。蝶や他の多くの蛾は花に止まって蜜を吸うことを考えると、ホバリングできることは飛行能力の優秀さの証左といえる。

3. 実験装置および方法

3. 1 基礎データの計測

採取したスズメガの質量を分解能 1 m g の電子天秤で計測した。また、翅翼形状を方眼紙に書き写し、方眼の目を数えることにより面積を計測した。羽ばたき周波数は、スズメガをプラスチック容器の中に入れて羽ばたかせ、その翅翼にストロボスコープの光を照射しながら周波数を調節し、羽ばたきと同調させて計測した。

3. 2 翅翼の動きの観察

翅翼の動きに関しては、高速撮影用 9 駒多軸カメラにより撮影した。このカメラは図 1 に示すように、発光制御部・光源部・レンズ・9 駒多軸カメラで構成されている。光源部とレンズの間に被写体をセットする事により生じた透過光は、各光源の軸線上に位置する 9 個のカメラに至り、カメラのレンズ裏側にセットした 1 枚のフィルム上の 9 カ所で結像する。このカメラはシャッターが開放されているため、暗室で撮影する必要がある。

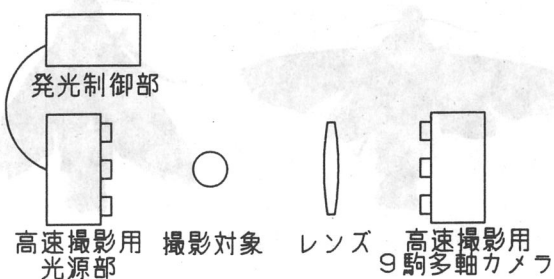


図 1. 高速撮影用 9 駒多軸カメラ

また、発光間隔の設定は 1 μ s まで可能であり、今回の実験では羽ばたき周波数の計測結果より、発光間隔は 1.25 m s ごとに設定した。なお、本来はスズメガを固定して撮影するべきなのだが、羽ばたきが激しくスズメガを固定する事は困難だったため、今回はプラスチックケースの中に入れて自由に羽ばたかせて撮影した。

3. 3 翅翼の揚力の計測

図 2 に揚力計測用の風洞装置を示す。送風機により発生した空気流は、ハニカム状の整流板にて

整流された後、翅翼を通過しピトー管に至る。差圧をベッツ型マノメータにて計測し、計算により流速を求めた。揚力は分解能 1 m g の電子天秤を用いて計測した。翅翼取り付け部を図 3 に示す。

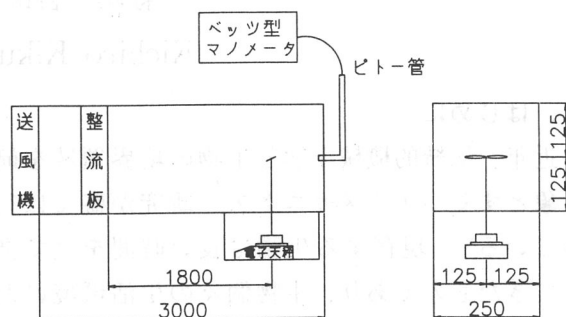


図 2. 揚力計測用風洞装置

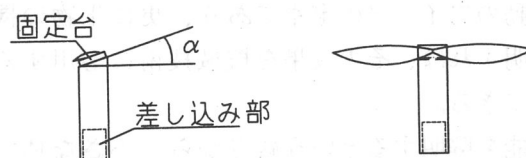


図 3. 翅翼取り付け装置

翅翼を固定台に接着剤で固定し、固定台を取り付け部に両面テープで貼り付け、差し込み部を翅翼固定棒に差し込んだ。取り付け部の角度 α は 5° おきに、最大 35° まで設定した。また、スズメガの翅翼は付け根から翼幅方向にかけて湾曲し、前縁から後縁にかけてはねじれているため、前縁から後縁にかけて水平な付け根の部分の固定し 0° とした。

4. 実験結果及び考察

4. 1 基礎データ

実験に供したスズメガの基礎データの計測結果を表 1 に示す。表中の翼面積は前翅翼の揚力係数

表 1. 基礎データ

	質量(g)	羽ばたき周波数(Hz)	翼面積(mm ²)
ウチスズメ	—	7.0~7.5	389
ホホジヤ	0.207	7.0~8.0	128
ホバスズメ	0.801	7.0~7.5	848
クロジヤ	0.426	7.0~7.5	246
ホホジヤ	0.251	7.5~8.0	198

スズメガの羽ばたきと翅翼の揚力特性

の計算に用いる前翅翼1枚当たりの値である。羽ばたき周波数は70~80Hz付近であった。今回の計測は比較的小型のものばかりであったが、更に大型の場合、羽ばたき周波数は半分程度という報告もある⁹⁾。

トンボとは異なり、スズメガの前後翅翼は重なる配置になっているため、羽ばたいているときの翼面積は明らかになっていない。このため翼形状から推定して、有効後翅翼面積は前翅翼面積の30%と仮定して、(質量/翅翼面積)で定義される翼面荷重を計算すると0.36~0.67となる。この値はトンボや双翅目のハエより大きく、膜翅目のミツバチやスズメバチよりは小さい。

4. 2 翅翼の動き

図4はホシホウジャクの翅翼の動きを1.25msの間隔で撮影し、その翅翼の先端部をそれぞれの写真よりプロットして一つの図にしたものである。

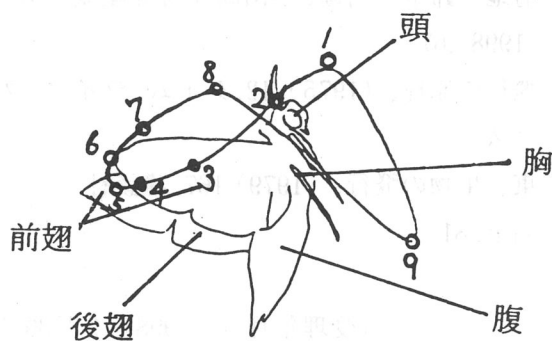


図4. ホシホウジャクの翅翼の動き

ホシホウジャクは暗室の中で羽ばたかず、この一例のみが撮影に成功したものである。この図の一連の動作は体の傾きや、地上までの距離からホバリングや下降中ではなく、まさに飛び上がろうとする瞬間であるといえる。また、この図は翅翼の動きをほぼ真横からとらえたものである。これから、側面からみた翅翼の動きは8の字を横にし、それを山なりに描いていることがわかる。さらに注目すべきは翅翼が背中側に打ち下ろしている点1~8にかけてと、腹側に打ち下ろしている点8~9にかけての動作の速さの違いである。写真を分析した結果、点8~9の距離は点1~8間の点同士の距離のおよそ3.6倍であった。この点同士の間隔は1.25msごとの動いた距離であり、その距離の違いは速さの違いであるといえる。つまり、点8~9間の動作では他の動作に比べ3倍以上も早く動いている事がわかる。この結果より、スズ

メガの翅翼の動きは背中側と腹側に同じような動作を行っているにも関わらず、腹側に打ち下ろす動作で大きな揚力を発生させ、背中側に羽ばたきときの動作では負の揚力を抑えつつも体のバランスをとっているのではないかと考えられる。

今後の研究課題としては、ホバリングやその他のいろいろな状況下での翅翼の動きの解明に取り組む必要があるが、そのためにはハイスピードビデオカメラなどのツールが不可欠である。

4. 3 翅翼の揚力係数

翼型特性は揚力係数で示されることが多く、それを比較して翼型性能が論じられている。生物の翅翼に関しても揚力係数を求め、静的な性能比較が行われている。また、動的な運動解析が可能となれば、揚力係数と組み合わせて動的な揚力を計算できるので、そのための基礎データを計測することにもなる。

そこで、風洞実験で計測した揚力を用い、次式により揚力係数 C_L を計算した。

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho U^2 A}$$

ここに、L : 揚力 [N]

ρ : 空気の密度 (1.205) [kg/m³]

U : 流速 [m/s]

A : 翅翼面積 [m²]

また、レイノルズ数 R_e は、次のように定義される。

$$R_e = \frac{Ud}{\nu}$$

ここに、d : 翅翼の平均翼弦長 [m]

ν : 空気の動粘性係数

(1.49×10⁻⁵) [m²/s]

図5にホシホウジャクの前翅翼の揚力特性を示す。図中の曲線は最小二乗法により三次関数近似したものである。計測に供した翅翼は翼幅方向中間部で約30°ほど上向きにねじれている上、翅翼断面形状が飛行機の翼のように反りを有しているため、翅翼を固定台に取り付ける時に翅翼の付け根部分を基準に水平を決めた。このため、迎角が0°のとき揚力係数は正の値をとり、-30°付近で0となっている。迎角の増加とともに揚力係数は増加しているが、揚力係数0の位置から約30°増加した付近で最大値に達し、以後減少して失速が始まる。また、レイノルズ数が減少するほど揚力

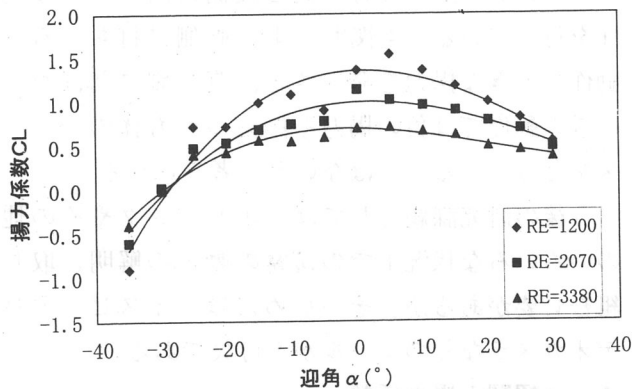


図5. 前翅翼の揚力特性

係数は増加しているが、レイノルズ数が最も大きいデータでは迎角の変化に対する揚力係数の変化は少ない。これらの傾向は他のスズメガにおいても見られた。

揚力係数の値は同程度のレイノルズ数で計測したトンボの値より僅かながら小さい⁶⁾。すなわち、レイノルズ数が 10^3 のオーダーでは、飛行機の翼型に似た厚みを持つスズメガの翅翼よりも平板に近いトンボの翅翼の方が流体力学的に優れていることを意味する。しかしながら、スズメガの翼面荷重はトンボに比べて大きく、大きな羽ばたき周波数でトンボ並の高速飛行をするためには、厚く頑丈な翅翼の方が有利だったものと考えられる。

なお、後翅翼のみの揚力は微少すぎて、今回の実験では安定した計測が不可能であった。

5. まとめ

- 1) 今回の計測に供したスズメガの羽ばたき周波数は70~80 Hzであり、同一の個体でも10 Hz程度の幅があった。
- 2) ホシホウジャクの飛び上がる瞬間の翅翼の動きは、側面から見て8の字を横に描くように羽ばたいている。一連の翅翼の動きの速度は一定ではなく、腹側へ打ち下ろす速度が他に比べて大きい。このような動作は高揚力を得るために、流体力学的に妥当なものである。
- 3) ホシホウジャクの前翅翼の揚力係数は迎角の増大とともに増加するが、極大値を経て減少する。今回の実験の範囲では、レイノルズ数が減少すると揚力係数は増加する。揚力係数

の最大値は、同程度のレイノルズ数で計測したトンボの平板に近い翅翼の値よりも僅かながら小さい。

6. 参考文献

- 1) 日本機械学会、生物と機械、(1992)、Ⅲ、共立出版。
- 2) Azuma, A., Azuma, S., Watanabe, S. and Furuta, T., Biol.,116 (1985),79.
- 3) Azuma, A. and Watanabe, T., J. exp. Biol.,83 (1979),59.
- 4) 須藤・橋本・太田・片桐、機論、60-579、B (1994),59.
- 5) 河内、第32回飛行機シンポジウム、航空学会、(1994),383.
- 6) 菊地・鈴木・高橋、小山高専研究紀要、No.30 (1998),67.
- 7) 飛行の原理、(1975),42,タイム ライフ ブックス。
- 8) 東、生物の飛行、(1979),167,講談社。
- 9) 同上. 81.

(受理年月日 1998年9月30日)