

昆虫の翼面荷重および翼面出力に関する研究

木村雄吉*・村越大貴**

Investigation on Wing Loading and Wing Power of Insects

Takeyoshi Kimura and Hiroki Murakoshi

The basic performance of the airplanes is expressed by a wing loading W/S and a wing power P/S , in which W , P and S show the weight, power and wing area, respectively. These wing loading and the wing power must be similar to those of vehicles in the natural world, that is, birds, insects, etc.

In this paper, the wing loading of insects has been investigated and it has been shown that the wing loading performance of the insects has a close analogy with the performance of airplanes. We also has investigated the power of insects which has been decided by the muscle weight of insects, and obtained the W vs. P/S curve for insects. We have found that the performance curve of the wing power is compared with one of airplanes and the result agrees very well with each other

1. 緒言

航空機設計において最も重要な基本要素は機体重量、翼性能およびエンジン出力である。従って航空機の基本性能は機体重量 W 、翼面積 S およびエンジン出力 P を組み合わせた翼面荷重 W/S 、翼面出力 P/S および出力荷重 W/P などによって表される。これら三者は理論的に関連づけられ、航空機の容量すなわち機体重量を決めれば、翼の大きさ、エンジン出力などが基本的に求められる。翼面荷重と機体重量の関係はヘルムホルツ¹⁾によって研究された。また出力荷重についてはルナール²⁾によって与えられている。勿論ここで決められる値はあくまで基準であり、航空機の種別、推進器の種類等によって若干の相違が現れる。ただ、同種の航空機においては、翼面積およびエンジン出力はこれら理論曲線と非常によく一致した値となる。

これらの理論を拡大解釈すれば、自然界における飛翔体、鳥類や昆虫類なども当然この理論に従うものと考えてよい。マレー³⁾は鳥類の翼面荷重と体重の関係について研究し、航空機の理論性能曲線と極めてよく類似した値を示すことを明らかにした。

本論文ではトンボ、チョウ、ハチなどの昆虫類の翼面荷重と体重の関係を調査し、航空機における理論性能曲線および鳥類の翼面荷重性能曲線との比較を行い、昆虫の性能曲線が航空力学の理論性能曲線に従うことを確かめる。この理論曲線より外れた昆虫については、その飛び方についての考察を行うことを目的としている。

更に、昆虫についての翼面出力および出力荷重の研究を行う。カルマン⁴⁾によれば、動物につ

* 機械工学科 ** 大学院前期課程学生

いてはその出力は羽を動かす筋肉によるものであり、その筋肉はほぼその体重に比例するものとして、生物の飛行の問題は、小さな鳥よりも大きな鳥の方が困難となり、ある大きさ以上の生物は飛ぶことが出来ないと結論付けている。我々は昆虫の羽根の運動にかかわる筋肉を直接取り出し、その筋肉重量を測定し、昆虫の動力は筋肉に比例するものと仮定して翼面出力および翼面出力を算出し、航空機力学における理論性能曲線との比較を行うことを目的とする。

2. 翼面荷重及び翼面出力の理論

飛翔体の基本性能は、離着陸時及び巡航時における推力 T 、揚力 L 、抗力 D 、重量 W によって定まる。図2.1にこれらの関係を示す。揚力 L [N]は機体重量 W [N]を支え、次式の関係がある。

$$L = W = \frac{1}{2} \rho v^2 C_L S \quad (2.1)$$

ここに ρ は空気密度、 v は飛行速度、 S は翼面積、 C_L は揚力係数である。これより飛行速度 v は

$$v = \left(\frac{2}{\rho C_L} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{W}{S} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.2)$$

となる。

航空機において揚力を得るには水平飛行における速度が重要となる。この速度 v は推力 T によって得られ、そのためには充分な出力の推進機（プロペラ、ジェットエンジン、ロケットエンジンなど）が必要であり、その推進力 T [N]に要する必要出力 P [kW]は $P = D \cdot v$ で表される。

プロペラ機について、図2.1より水平一定速度のもとでは抗力 D [N]と推力 T [N]は等しいので

$$D = T = \frac{1}{2} \rho v^2 C_D S' \quad (2.3)$$

となる。ここに S' は投影断面積[m²]であり、 C_D は抗力係数である。これより出力 P は

$$P = \frac{1}{2} \rho v^3 C_D S' \quad (2.4)$$

となる。従って航空機が速度 v で飛行するには式(2.4)のエンジン出力 P を要し、速度 v は

$$v = \left(\frac{2 \eta_p P}{\rho C_D S'} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.5)$$

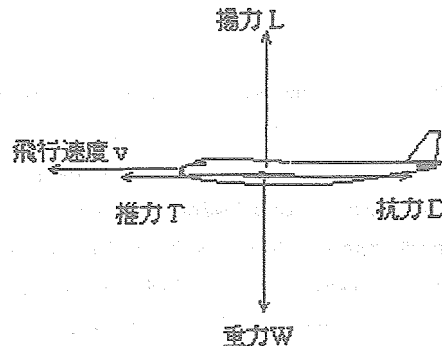


図2.1 航空機に作用する力

となる。ここに η_p はプロペラ効率を表す。このようにプロペラ機の性能を決める主要諸元は重量 W 、翼面積 S 、エンジン出力 P 、速度 v などであることが明らかである。

次に ジェットエンジン性能は一般に推力 T [N] で表す。速度 v とエンジン推力 T の関係は式 (2.3) より

$$v = \left(\frac{2T}{\rho S' C_D} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.6)$$

となる。

(1) 翼面荷重

航空機寸法を ℓ 、機体体積を V 、翼面積を S 、機体密度を ρ_v とすると $V = \alpha \ell^3$ 、 $S = \beta \ell^2$ となり、ここに α 、 β は航空機に特有の定数である。重量 W は $W = \rho_v V g = \rho_v \alpha \ell^3 g$ であるから、これらより

$$\frac{W}{S} = \frac{(\rho_v \alpha g)^{\frac{2}{3}}}{\beta} W^{\frac{1}{3}} \quad (2.7)$$

が得られる。ここで $(\rho_v \alpha g)^{2/3} / \beta = k_1$ と置くと

$$\frac{W}{S} = k_1 W^{\frac{1}{3}} \quad (2.8)$$

となる。翼面荷重と重量の関係は航空機設計にとって最も重要な基礎式の一つである。ヘルムホルツ¹⁾は飛ぶ動物について、この翼面荷重と体重の相似則を研究し、後に鳥についてこの相似則の実験を行い、対数目盛図で表すと鳥の翼面荷重と重量の比は1対3になることを確かめている。

(2) 翼面出力

飛翔体の重量と動力の関係もまた航空機設計にとり重要な基礎式であり、ルナール²⁾はこの研究を行い、動力と機体重量の比が翼面荷重の平方根になることを見出している。本論文では出力と翼面積の比、即ち翼面出力と重量の関係について理論式を導く。式 (2.4) において $c = S/S'$ とおく、ここに S/S' はほぼ一定値を取る。このとき出力 P は

$$P = \frac{C_D \rho v^3}{2c} S \quad (2.9)$$

となり、これらより速度 v を消去することによって翼面出力 P/S は

$$\frac{P}{S} = \frac{\sqrt{2} C_D}{c \sqrt{\rho}} \left(\frac{k_1}{C_L} \right)^{\frac{3}{2}} W^{\frac{1}{2}} \quad (2.10)$$

となる。ここで $(C_D/c) \sqrt{2/\rho} (k_1/C_L)^{3/2} \equiv k_2$ とおくと

$$\frac{P}{S} = k_2 W^{\frac{1}{2}} \quad (2.11)$$

が得られる。

3.翼面荷重

3.1 航空機の翼面荷重

図に引用された航空機は表3.1に示すように、比較的経済性のよい旅客機を主としてプロペラ機、ジェット機を区別してプロットしている。また参考のため、最も初期の飛行機であるフライヤー及び人力飛行機をも載せている。

式 (2.8) の k_1 をプロペラ機、ジェット機及びフライヤーの実測値よりそれぞれ求めるとジェット機は $k_1 = 62.4$ 、プロペラ機が $k_1 = 43.6$ 、フライヤーでは $k_1 = 4.72$ となる。これらを図3.1 中の実線で示す。

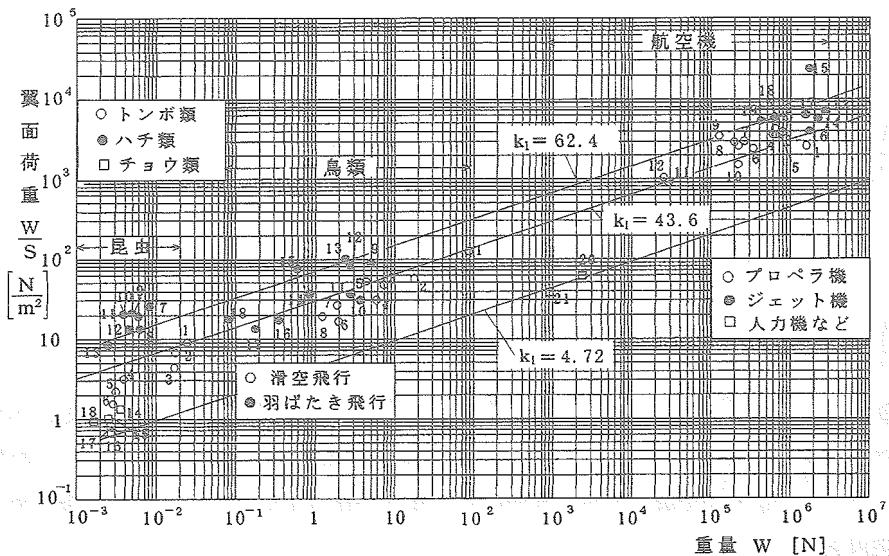


図3.1 翼面荷重

表3.1 航空機・鳥類・昆虫類番号

- 【航空機】 1: ブリストル・ブラバゾン、2: ボーイング 727、3: ボーイング B-29 スーパーフォートレス、4: ボーイング 377 ストリクルーサー、5: イリュージン IL-18 モスクワ、6: ダグラス DC4、7: 日本航空機製造 YS-11、8: フォッカー F27 フレンドシップ、9: サブ 340、10: 三菱 1 式陸上攻撃機、11: ブリテン・ノーマン・アイランダー、12: 三菱零式艦上戦闘機、13: ダグラス DC10、14: エアバス A340、15: BAe アエロスペース・コンコルド、16: ツポレフ Tu144、17: エアバス A300、18: エアバス A320、19: ボーイング 737、20: フライヤー、21: 人力飛行機ミラン
- 【鳥類】 1: ツル、2: ハゲタカ、3: ノスリ、4: トビ、5: セグロカモメ、6: ハヤブサ、7: コリカモメ、8: マグロツカ、9: オオハシ、10: カラス、11: ハト、12: ウズラ、13: コガモ、14: ムクドリ、15: キリンジヤク、16: ヒバリ、17: ツバメ、18: シジュウカラ
- 【昆虫】 1: オニヤンマ、2: オニヤンマ、3: オニヤンマ、4: シオカトンボ、5: シオカトンボ、6: ツバアカネ、7: オオスズメバチ、8: クマバチ、9: オオハシバチ、10: クマバチ、11: クマバチ、12: クマバチ、13: スズバチ、14: アゲハ、15: アゲハ、16: カバマダラ、17: カバマダラ、18: アカゲハ

なお、プロペラ機及び旅客機についての統計を行った理由は、それらが翼の揚力を利用して滑空を主とする飛行を行うためである。従って推力を主とするジェット戦闘機と人力飛行機は除いている。

ジェット戦闘機については性能曲線より上方になる。これは上昇力がジェットの推進力によって得られ、更に高空では空気密度が薄いため重力 W を支える揚力 L を得るための速度 v が極めて大きく、翼面積が小さくてもよいからである。図中に□印で表される人力飛行機や旧型の航空機はエンジン馬力が弱く翼面積を大きくし、重量 W を軽くし、翼面荷重を小さくする必要があるためプロペラ機の性能曲線よりはるか下方になる。

3.2 鳥類の翼面荷重

人間は鳥にあこがれて航空機を創ったといわれている。このため、滑空する鳥類と航空機の翼面荷重は当然類似したものとなり、図3.1に示すように翼面荷重の性能曲線は航空機のそれに極めてよく一致していることがわかる。羽ばたき飛行する鳥の性能曲線はジェット機のものに近く、滑空飛行を行う鳥の性能曲線はプロペラ機のものに近い。なお、図3.1のデータはマレー³⁾の「動物機械」より転載したものである。

羽ばたき飛行を行う鳥類のデータが上方にあるのは、滑空による揚力以外に羽ばたきによる推力を用いているため翼面積に較べて重量が大きくなっている。なお羽ばたきの機構は羽根の打ちおろし時に揚力を得、上方へのリカバリー時には羽根の角度を変えて抗力を最小にし負の揚力を極力小さくしている。

3.3 昆虫の翼面荷重

図3.1に昆虫の性能曲線を示す。トンボなどのように滑空飛行を主とするものは、プロペラ機の性能曲線に一致している。また、チョウ類などの体重に比して羽根面の大きいものは動力の小さい人力飛行に似て、プロペラ機のものより下方に位置する。ハチなどは鳥類の羽ばたき飛行を行う鳥類と同様ジェット機の性能曲線に似ている。

昆虫の中で、特別な飛行をするものとして小バチの一種でヴァイスフォー機構^{5) 6)}によって飛行するものがある。それによりハチは水平飛行以外に、ホバリング飛行を常時行うことができる。

4. 昆虫の羽ばたき機構⁷⁾

昆虫が羽ばたいて飛ぶときに使う筋肉を飛翔筋という。飛翔筋の微細構造は筋繊維軸に対して垂直方向に明暗の縞(横紋)が見えるところから横紋筋と呼ばれる。昆虫のうちでもハチやカなどは1 kHz を越えるような高周波の羽ばたき運動を行う。このような高周波振動は普通の筋肉の収縮機構では説明できない。

神経や筋肉が発する活動電位の持続時間は少なくとも2～3 msecである。さらに活動電位の後には不応期(膜の興奮性が失われ低る時間)があるので、連続して活動電位を発生できる最大周波数はせいぜい200～300 Hz 程度である。さらに、電気的興奮から力学的変化にいたるまでの遅延時間があるので、筋肉が収縮・弛緩を繰り返す最大周波数は100 Hz 以下と考えられる。このように生理学的に不可能と考えられる運動が可能であることを以下に説明する。

チョウやトンボのように割合周波数の低い羽ばたきをするものと、ハチやカのように高周波の羽

ばたきをするものがあるが、これら両者においてその羽ばたき機構はまったく異なっている。低周波羽ばたきを行う昆虫の羽根の付け根の構造は図4.1 (a) のようになっている。力学的支点となる部分の両側に羽を上げる上挙筋と下げる下引筋がついており、両者が交互に収縮・弛緩を繰り返し羽ばたきを起こさせる。



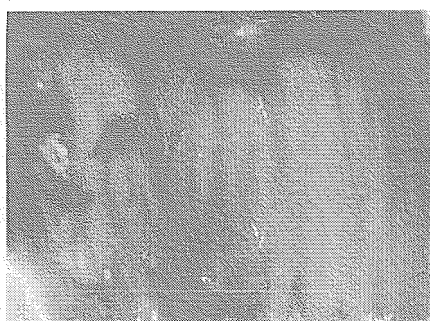
(a) 同調筋による羽ばたき



(b) 非同調筋による羽ばたき

図4.1 昆虫の筋肉

このときの筋肉に入力する神経の活動と、羽ばたきの運動が同期していることから、このようなタイプの飛翔筋を同調筋とよぶ。一方、高周波で羽ばたくタイプの昆虫の羽の付け根の構造は図4.1 (b) のようになっている。上挙筋は胸の背面の外骨格についており、下引筋は体の長軸方向に走っている。神経活動と羽の運動を同時記録すると、神経活動とはまったく独立に羽が振動している。したがって、このようなタイプの飛翔筋を非同調筋とよぶ。非同調筋は、同調筋に比べ、筋線維が太い。筋小胞体も未発達なため、すばやい収縮・弛緩にはむしろ不向きで、10 Hz程度のくり返し刺激で強い収縮をおこしてしまう。



(a) 同調筋



(b) 非同調筋

図4.2 昆虫の筋肉写真

図4.2 (a) の写真はトンボの筋肉写真で縦方向に走る筋肉繊維から図4.1 (a) の同調筋であることがわかる。図4.2 (b) の写真はハチの筋肉写真で、図4.1 (b) の非同調筋を示し、横方向に走る下引筋と、その背後に縦方向の上挙筋がある。

非同調筋が振動を起こす理由は、この筋の収縮が緊張によって活性化され、短縮によって不活

性化されるという特性を持つためと考えられる。カやハチのような高周波羽ばたきを行う昆虫においては、胸部において共振系を作り高周波の羽ばたきを行うものと考えられる。

以上のことから昆虫の羽ばたき動力は筋肉重量に比例すると考えてよく、本論文では飛翔筋肉重量 W' と昆虫の出力 P は

$$P = c \cdot W' \quad (4.1)$$

とする。ここに c は昆虫類全般について一定値をとるものと仮定する。

5. 翼面出力

図5.1に航空機及び昆虫の翼面出力に対する重量の実測結果を示す。

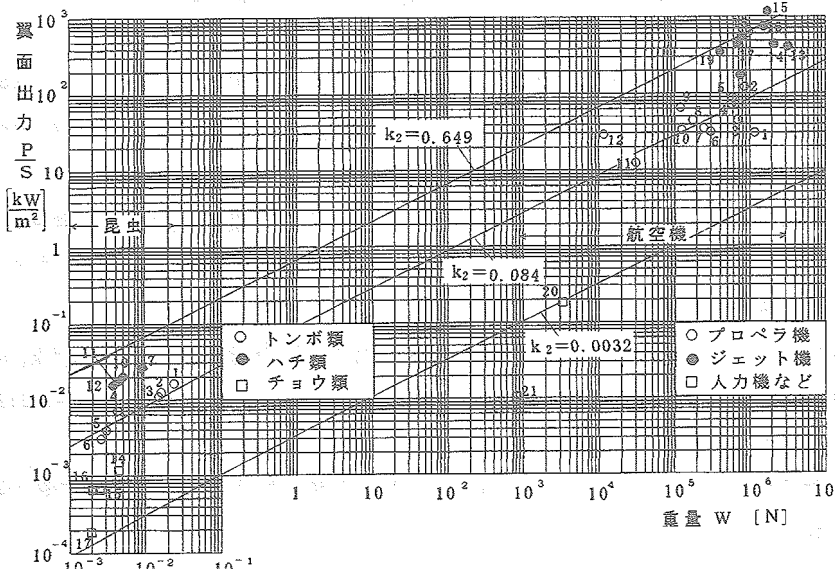


図5.1 翼面出力

5.1 航空機の翼面出力

翼面荷重の性能曲線の場合と同様、プロペラ機、ジェット機についての翼面出力の性能曲線を示し、参考のためフライヤー及び人力飛行機の性能についても合わせて記載している。

式(2.11)の係数 k_2 はジェット機については $k_2 = 0.649$ 、プロペラ機 $k_2 = 0.084$ 、フライヤー $k_2 = 0.0032$ となる。

5.2 昆虫の翼面出力

昆虫の出力は式(4.1)における定数 c を航空機の理論、式(2.11)を参考にして昆虫の筋肉重量より求めた。昆虫の飛翔に関する筋肉は捕獲した昆虫から解剖によって取り出した(図4.2)。これより、出力 P は

$$P = 0.0086 \cdot W' \quad (5.1)$$

のように得られた。

航空機および昆虫の翼面出力に対する重量の結果を図5.1に示す。

図5.1中の昆虫と航空機の翼面出力を比較した場合、両者は、極めてよく類似した傾向を示している。即ち、トンボなどのように滑空飛行を主とするものは、翼面出力についても航空機におけるプロペラ機の性能曲線に一致している。ハチ類については航空機におけるジェット機の性能曲線に近づき、翼面出力はトンボ類の性能曲線の上方に位置している。チョウ類など体重に比して羽根面の大きいものは動力の小さい初期の航空機や人力飛行に似ており、翼面出力はトンボ類に比して小さくなっている。

6. 結言

本論文は航空機の翼面荷重及び翼面出力について重量との関係を理論的統計的に研究したものである。翼面荷重、翼面出力及び重量の関係は航空機性能を定める最も重要な要素の一つであり、航空機の設計の基本量となるものである。

更に、本研究ではこの翼面荷重と翼面出力と重量との関係を航空機だけでなく、他の飛翔物——鳥類及び昆虫——にまで拡張して考察した。そして鳥類及び昆虫類の性能曲線は航空機の性能曲線とよく類似していることを明らかにした。

(1) 滑空を主とする航空機においてプロペラ機の翼面荷重及び翼面出力の性能曲線は $k_1 = 43.6$ 、 $k_2 = 0.084$ という結果が得られ、これらの性能曲線は鳥類のうち滑空を主とする鳥、昆虫ではトンボの性能曲線によく類似していることを確かめた。

(2) 旅客機のうちでジェット機について、その翼面荷重及び翼面出力の性能曲線は $k_1 = 62.4$ 、 $k_2 = 0.649$ となり、鳥類では羽ばたき飛行を行う鳥、昆虫ではハチ類の性能曲線がこれに近づくことを明らかにした。

(3) 初期の航空機フライヤーや人力飛行機などの性能曲線は昆虫においてチョウ類の性能曲線に類似している。

以上の研究成果より、飛翔体の設計計画において航空機だけでなく、殆どの飛行物体に共通の基本性能があることが明らかとなり、本研究は種々の飛翔体の設計の指針となるものと考えられる。

参考文献

1. Helmholtz, H. von, : "Über ein Theorem, geometrische ähnliche Bewegungen flüssiger Körper betreffend, nebst Anwendung auf das Problem, Luftballons zu lenken", Monatsberichte der königlichen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 1873, p.501-514
2. Renard, C. : "Nouvelles experiences sur la resistance de l'air", L'Aeronaute, 24(1891), p.73-81
3. Marey, E. J. : "La Machine animale", Paris, 1873
4. カルマン, T. von, (谷一郎訳) : 「飛行の理論」, 岩波書店, 1956
5. 萬原, 木村 : 「ヴァイスフォー・メカニズム空力特性」, 日本航空宇宙学会誌, 32, 362, 1984. 3
6. Tsutahara, Kimura, et al. : "Ship's Propulsion using Weis-Fogh Mechanism", Marine Eng. Soc. Japan, 17, 2, 1989, 10
7. 太田次郎, 石原勝敏, 黒岩澄雄 : 「基礎生物学講座 4 動物の行動」, 朝倉書店, 1995

(平成14年12月2日受理)