

低速模型飛行機の翼特性

岡 本 正 人・田 端 泰 寛*・倉 田 駿**

Aerodynamic Characteristics of Wings for Low Speed Model Airplane

Masato OKAMOTO, Yasuhiro TABATA* and Syun KURATA**

(平成21年11月28日受理)

Aerodynamic characteristics of wings for low speed model airplane were investigated by conducting wind tunnel test. The Reynolds number of this study is equivalent to the flight of model airplanes in "The Student Indoor Flying Robot Contest". Its contest has been held since 2007 by the Japan Society for Aeronautical and Space Science, and we participated three times in the past. Our participation plane named "Mayfly" has a low aspect ratio wing which generates high lift in large angle of attack. As for such low aspect ratio wing, the effect of airfoil does not appear in comparison with it of planform. However, the characteristics of the airfoil are affected in the large aspect ratio wing used by the other many teams in this contest. It is necessary for the discussion of the wing aerodynamics that the characteristics of planforms that is three dimensional wing and those of airfoils that is two dimensional wing are divided.

The miniature of "Mayfly" as the planform characteristics and the airfoil of thin wing which spars were put on outside were examined. The experimental results of both of planforms and airfoils will be useful for low speed model airplane.

1. はじめに

模型飛行機は1871年アルフォンス・ペノーによって飛行機械の可能性を示唆するものとしてゴム動力模型飛行機が作られたが、その後ライト兄弟による有人動力飛行が行われて以来、その目的は主として本物の縮小模型すなわち人々の趣味や楽しみのために作られてきた。勿論、よく研究された非常に高性能な模型飛行機も製作され、実験用や観測用のように実用的なものもある。しかし、これが超小型であったり非常に低速である場合にレイノルズ数 Re は小さくなり、 $Re=1\times 10^4$ に近づくにつれて翼特性に関する定量的なデータは極めて少なくなる。一方、今日災害現場等で活動できるマイクロロボットの一つとしてMAV (Micro Air Vehicle) と呼ばれる超小型の航空機の開発が行われるようになってきた。さらに、近い将来の火星での無人探査航空機の開発のため、 $Re\leq 1\times 10^4$ の低レイノルズ領域の翼特性の解

明も必要となってきた。これは昆虫などの小さな飛行生物の翅に相当する領域であり、生態の研究にも役立つと考えられる。

このような状況の中で、航空学科に学ぶ学生への作りへの興味関心を高めるため、2007年から日本航空宇宙学会が主催して「全日本学生室内飛行ロボットコンテスト」が開催されるようになった¹⁾。秋田高専においても第3回大会から出場しており、学生が設計製作した機体は飛行可能な限界まで強度を落として軽量化を図っていたため、そのイメージから「Mayfly (カゲロウ)」と名付けられ今までに1号機から5号機の5種類の機体が製作された。実際には毎回数種類の機体を試作改良しながら完成度を高めており、幸運にも3回連続第1位の成績を残すことができた。このコンテストの課題を達成するためには、できるだけ低速で正確な経路を飛行する必要がある、それにはどのような機体や翼型が適しているかを検討した。低速飛行を行うためには翼面積を大きくし、同時に機体質量を小さくすることで翼面荷重を小さくすることと、主翼は飛行時の迎角において大きな揚力係数を得る必要がある。著者等の

* 秋田高専専攻科学生

**秋田高専学生

表 1 各機体の主要諸元

機体名	製作 年月	全長 (mm)	全幅 (mm)	翼面積 (dm ²)	MAC (mm)	AR	質量 (g)
Mayfly-1	08.3	965	640	42.3	660	0.97	93
Mayfly-2	08.9	920	600	40.8	680	0.88	88
Mayfly-3	08.9	830	560	33.6	660	0.86	88
Mayfly-4	09.9	1100	700	62.0	850	0.80	188*
Mayfly-5	09.9	1000	800	66.0	825	1.0	155*

MAC：空力平均翼弦
AR：アスペクト比
* 投下用お手玉を含めず

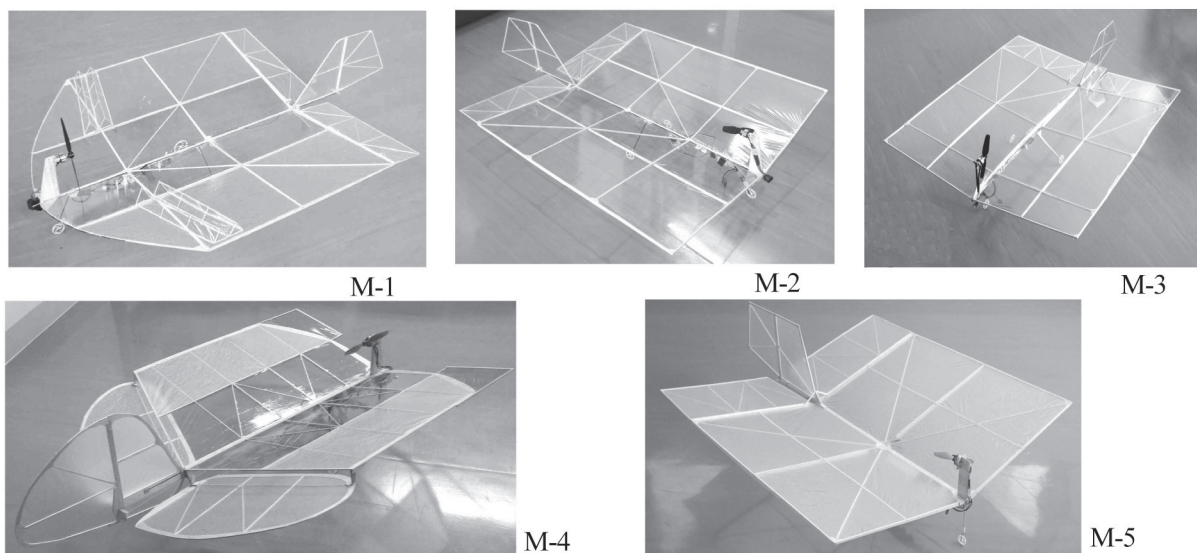


図 1 コンテストに出場した 5 機の「Mayfly」

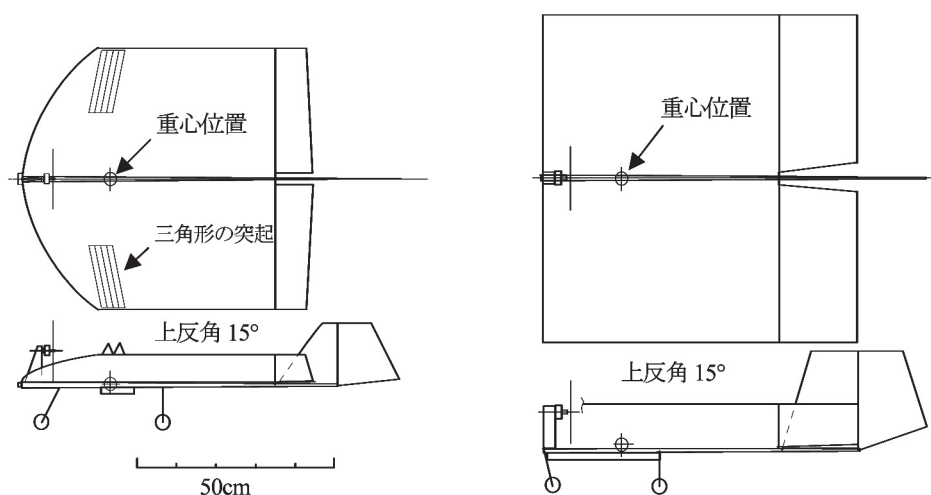


図 2 風洞実験の対象にした M-1 と M-5

研究室では、主に $Re = 1 \times 10^3 \sim 1 \times 10^4$ の低レイノルズ数領域の翼特性について風洞実験を通して研究していることから、「Mayfly」を製作するための風洞実験も実施した。

そこで、今回は特にこのコンテスト程度の低速の模型飛行機に応用可能な翼特性について検討した結

果を紹介する。

2. 「Mayfly」について

表 1 と図 1 は、これまでのコンテストに出場した Mayfly-1～Mayfly-5（略称 M-1～M-5）の主要諸元

とその写真である。M-1～M-5の共通した特徴は次のようになる。

- (1) アスペクト比 $AR \leq 1$ の低アスペクト比翼を持つ無尾翼機である。
- (2) 翼型は平板（M-3はキャンバーを持つ）で、バルサの骨組みに上面にだけ薄いポリエチレン（厚さ0.01mm）を貼っている。
- (3) $10^\circ \sim 15^\circ$ の大きな上反角を持つ。
- (4) プロペラとモータは翼の上面にパイロンを設けて取り付けられている。
- (5) 垂直尾翼は翼後縁から後方に張り出すような形で中心線上に取り付けている。
- (6) 舵面はラダーおよびエレベータである。

これらの特徴の中で(1)と(2)は高迎角で飛行することで高い揚力係数を得て超低速で飛行する方法としてM-1以後受け継がれている。ただし、バルサ骨組みの構造は設計者が軽量化と強度を考えて決めている。(3)は、試作途中では小さな上反角のものも現れたが、飛行試験を繰り返す内に大きい値が採用された。この効果を示唆するものとして文献2)を参照されたい。(4)は動力源の簡単な設置方法で、着陸時の破損からも有利である。(5)は大迎角時に大きな主翼の陰に入りにくくまたプロペラの後流中に置くことでラダーの十分な利きを確保している。(6)は、主翼後縁のエレベータはエレボンとしたことがあるが、これまでのコンテストの飛行においてはラダーとエレベータで十分であることが確認された。飛行性能は、最小速度が1m/s以下で最大速度は4m/s程度まで変化させられる。最小速度では極めて小さな半径での旋回が可能で、殆どその場で向きを 180° 変更できる。

これら機体の設計に主に携わったのは、M-1, M-2が神馬義貴(09年専攻科卒)、M-3, M-5が倉田駿(第3著者)、M-4が田端泰寛(第2著者)で、同じようなコンセプトではあるが機体にはそれぞれ工夫を加えることで完成度を高くすると共にコンテストの課題に対応している。そこで、各機体の特徴について簡単に述べる。M-1の平面形は前縁が丸く後退している。これは壁等に衝突したとき機体の破損を小さくするため、さらに前縁にはカーボンの薄板を貼っていた。また、翼上面には翼弦長の20%付近に流れと直角方向に三角形大きな突起を付けている。これは機体の安定性に効果があり、無くても飛行は可能であるが旋回後の機体の揺れの収束は突起があった方が早く、操縦者は定点上空を飛行させるためにはこの突起が必要との意見であった。M-2では平面形は完全な矩形としたが、これでM-1に見

られた機体の揺れは小さくなり、機体質量を極力減らすために三角形の突起は付けていない。M-3は翼断面にキャンバーを付けることで最大揚力係数を大きくして機体の小型化を図ったが、飛行中低迎角になると急激な頭下げモーメントが発生し操縦が難しくなった。翼端を平板に戻し、さらに後縁部に反転キャンバーをつけることで対処したが、機体の小型化は僅かになった。M-4は平面形や舵面が丸みを帯びたものとなり特徴的な形をしていたが、M-1と同じように旋回後の機体の揺れがやや大きく前縁部分を矩形にすることで対処している。また、舵面は主翼からやや下方に離して取り付けられているのも特徴である。M-5は主翼の平面形を正方形とし大きな舵面を持たせて宙返りの課題に対処した。ペイロードの増加と共にM-4とM-5は翼面積が増加し、モータのパワーも大きなものとしている。

3. 風洞実験方法

実験に使用した風洞は、測定部断面が大きさが一辺360mmの正方形で風速が2～6m/sである。2次元翼特性の実験においては翼弦長を基準にしたレイノルズ数 $Re = 2 \times 10^3 \sim 1 \times 10^4$ 程度の測定を主に行っている。風洞装置の詳細は文献3), 4)等を参照されたい。

ところで、翼特性を論じる場合に翼素の断面形状である翼型による2次元翼特性と、平面形を考慮した3次元翼特性に分けて考える必要がある。すなわち、アスペクト比 AR の大きい翼では翼型の影響が強く表れ、 AR が小さい場合は平面形による影響が大きくなると考えられる。そこで、「Mayfly」についてはアルミ平板を用いて縮小模型を製作し風洞実験を行うことでその平面形特性を考察した。次に翼型特性については、 $AR=6$ の矩形翼を主にアルミ平板（厚さ $t=0.3 \sim 0.5\text{mm}$ ）や木材を用いて模型を製作し風洞実験を行った。 $AR=6$ の矩形翼模型の空力係数は揚力傾斜の非線形性を考慮して2次元化していない。従って、このデータは純粋に2次元翼ではなく3次元翼特性も含んでいることになるが、翼の AR は比較的大きいことから翼型特性の影響が大きいとして考察した。

今回の実験で使用した模型では AR の小さな模型を実験すると翼弦長が大きくなるため後述のように $Re=4 \times 10^4$ 程度まで大きくなり、 AR が大きくなると翼面積には限界があるため翼弦長が小さく $Re=1 \times 10^4$ 程度まで減少する。そのため実験レイノルズ数は本コンテスト用としてはやや小さくなるが、低

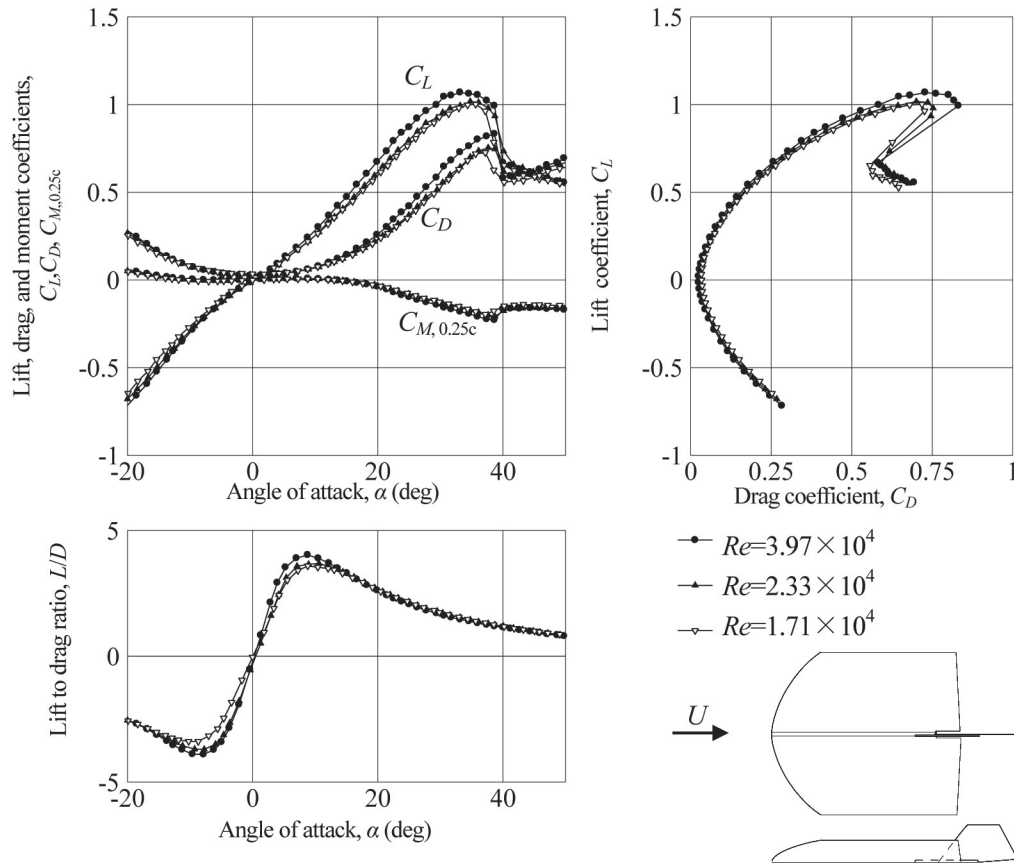


図3 「Mayfly-1」の空力特性

速で飛行するほど風洞実験結果に近づくこと、この低レイノルズ数領域の翼特性のデータは非常に少ないことから十分に活用できるものと思われる。

$Re \approx 1 \times 10^4$ の低レイノルズ数領域においては翼型は翼厚の大きな厚翼より板を曲げたような薄翼の方が最大揚力係数や揚抗比の点からは有利で、また厚翼の場合も前縁を尖らせたり翼厚の薄い方が性能がよい。また、円弧薄翼のような連続した曲線で構成しなくても“へ”の字型に折り曲げたような翼でも同程度の揚抗比が得られる。これらの風洞実験結果は文献3)を参照されたい。

今回は主として薄翼に強度を持たせるための構造材の影響について検討した。できるだけ軽量に製作する場合、バルサやカーボン材等の構造材の上に薄い被覆材（薄い紙やポリエチレン等）を貼ったものが多いが、構造材を覆うように翼の上面と下面に被覆材を貼ると被覆材の質量が加わるため片面だけにしておく。「Mayfly」においても同様の構造を取ることで軽量化を図っている。古くは、湾曲させた竹ひごに細いリブを入れ、その上に薄い紙を貼ったゴム動力ライトプレーンもその例である。これで軽量化は可能であるが構造物は翼の表面（多くは下面）

にむき出しになり、ある程度機体が大きくなると前縁材や後縁材の他、翼幅方向の桁材やリブが必要となり、流れに平行なリブはそれほど問題にならないとしても流れに直角方向の桁材の影響は考慮しないわけにはいかない。「Mayfly」の場合翼弦長が非常に大きいので桁材の高さは翼弦長に対して小さい（2%以下）が、アスペクト比の大きな翼の場合は翼弦長が小さくなるためその割合は大きくなる。そこで、本研究では薄翼を扱う場合にその桁材がどのような影響を及ぼすかについて検討してみた。

4. 実験結果

4.1 平面形特性

Mayflyの翼の平面形の中で特に前縁が丸い後退角のついたM-1と、ほぼ同じアスペクト比 AR を持つ矩形翼のM-5を比較する。図3、図4は厚比 $t/c = 0.5\%$ のアルミ平板で製作した縮小模型の風洞実験結果である。ただし、M-1は翼上面の三角形突起は付けていない。レイノルズ数は3種類設定した。

両者の揚力傾斜は後述の AR の大きな翼と比べて小さく、迎角 α の増加と共に揚力傾斜は増加する。

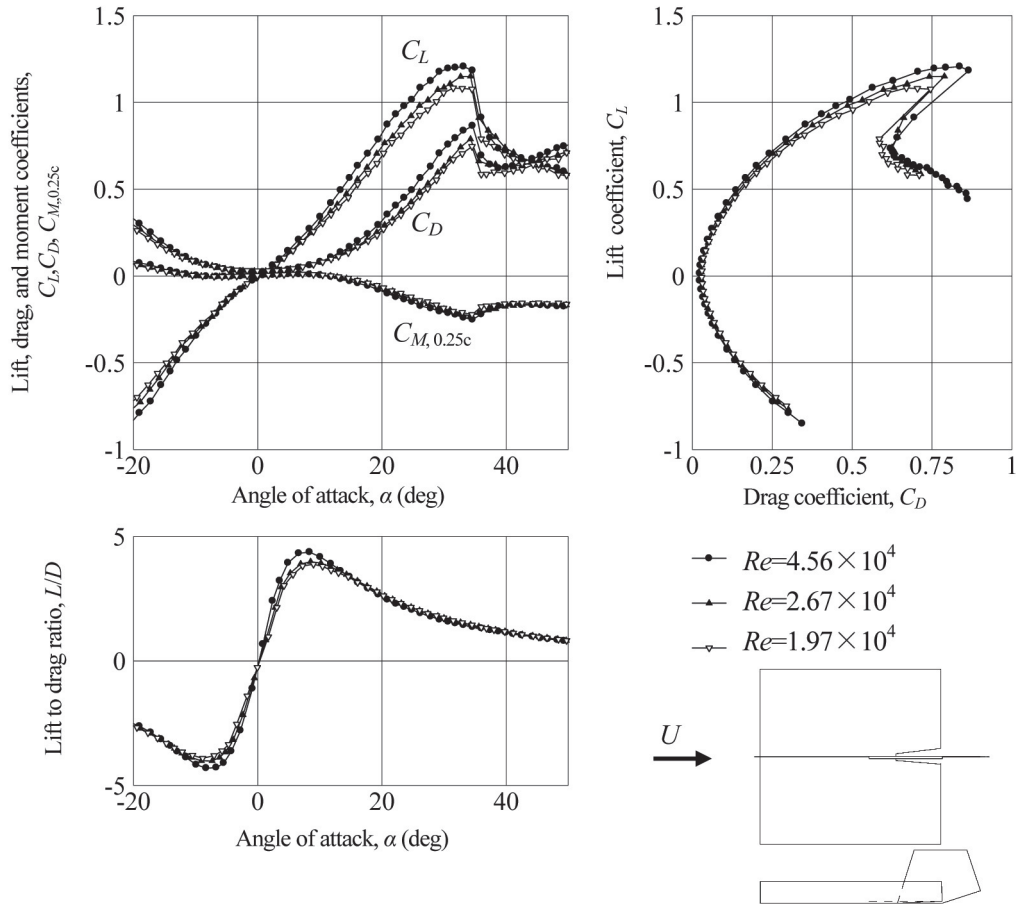


図4 「Mayfly-5」の空力特性

これは翼端渦による渦揚力の付加によるものである。しかしその傾斜はM-5の方が大きいことが分かる。揚力係数 C_L は迎角 $\alpha = 30^\circ$ 付近まで増加を続け、最大揚力係数 $C_{L,max} > 1$ となるが $C_{L,max}$ もM-5の方がやや大きくなる。その後M-1は $\alpha = 39^\circ$ 付近で、M-5は $\alpha = 35^\circ$ 付近で C_L は急激に低下する。この C_L の低下は飛行において悪影響を及ぼしそうであるが実際にはプロペラ推力の上向き成分が大きくなり機体全体では C_L が急激に減少することはない⁵⁾。抗力係数 C_D は迎角の増加と共に増加し、文献6)のようなleading-edge suction analogyを使ったポテンシャル理論値とも比較的よく合っている。このことから、平面形特性に関しては低レイノルズ数の特性は比較的小さいと言える。揚抗比 L/D は $\alpha = 6^\circ \sim 8^\circ$ の比較的小さな迎角で最大値 $(L/D)_{max} \cong 4$ をとり後述の AR の大きな平板翼と比較して小さくなる。また、レイノルズ数が減少すると C_L 、 C_D は僅かに減少(C_D は $\alpha = 0^\circ$ 付近では摩擦抗力 C_f の増加により僅かに増加)し、 $(L/D)_{max}$ もやや小さくなる。ピッチングモーメント係数 $C_{M,0.25c}$ は、 $-10^\circ < \alpha < 10^\circ$ では $C_{M,0.25c} \cong 0$ で、さらに α が増加すると負の値が大きくなる。ま

た、 C_L が急激に低下する迎角においてはモーメント曲線も変化する。

また、前述のようにM-1の翼上面には三角形の突起が付けられているが、風洞実験では殆ど特性に差が見られなかった⁵⁾。翼素の特性でみると、この三角形の突起は翼型特性に差を与えるものであるが、M-1のように AR の小さな翼ではその差は殆どなくなる。このことは、 AR の小さな翼においては平面形特性が強く翼型特性の影響が小さいことを表していると考えられる。

4.2 油膜法による検討

M-1(三角形突起なし)とM-5のアルミ縮尺模型に色チョークの粉末で色を付けた油を翼上面に塗布し、油膜法により観察した。図5は代表的な線模様と、その線が迎角と共にどのように移動するかを示している。迎角 $\alpha = 10^\circ$ では両者とも前縁付近に線模様が見られる。M-1では前縁形状に沿って翼端側では後方に曲がっているのに対し、M-5では翼端に向かうにつれて前方に曲がっている。この線は前縁剥離泡の再付着点によるもの⁷⁾と思われ、翼端付近

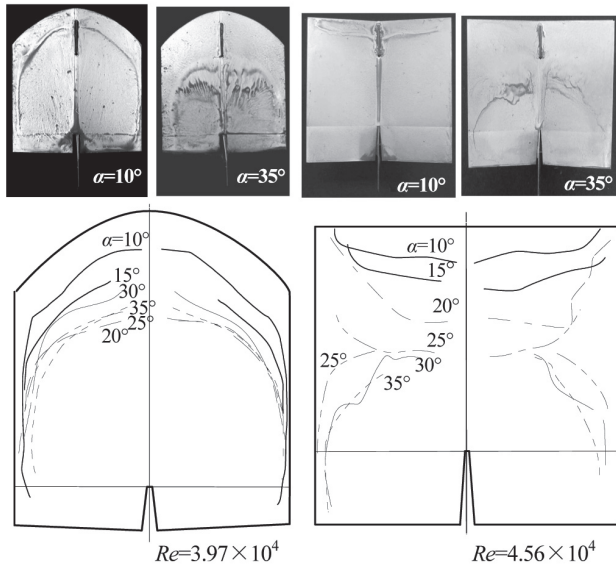


図5 油膜法による線模様の位置の変化

では翼端渦による影響が現れる。 $\alpha \leq 20^\circ$ まではこの線は翼弦の30%付近まで迎角の増加と共に後退していくが、さらに迎角が増加するとM-1では翼上面の線模様は前進していく。M-5は $\alpha \geq 25^\circ$ で線模様の形が変化し、翼端側で後方に曲がったM-1に近い線模様ができる。またこの位置はM-5の方がやや後方になる。流れを観察すると迎角が大きい範囲では翼端渦によって押さえつけられた主流流線と翼表面の間に渦が見られ、前縁近傍の渦は翼面上に逆流領域を作っているようである。このように、油膜法では平面形により差が顕著に現れるが翼に作用する力やモーメントにおいてはその差は小さいことが分かる。

4.3 翼型特性

上述のように今回は構造物を含んだ薄翼を中心に調べてみた。

生物の翼を見ると、昆虫の翅は薄い膜状でトンボのようにギザギザした断面をしているものもあり、そのギザギザの頂点には翅脈が通っている。トビウオは滑空速度が13m/s程度になり、そのレイノ

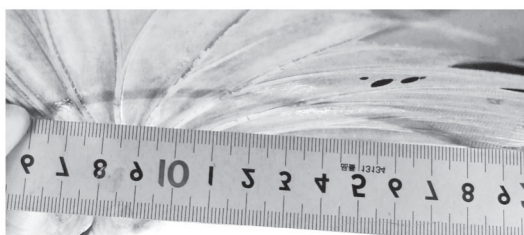


図6 トビウオの胸びれ（展開時）の下面

ルズ数は昆虫よりも大分大きい⁸⁾。その翼の構造は図6のように多数の鰭条の上に伸縮自在な膜がその隙間を埋めている。鰭条は円弧に近い膜の下部に大きく張り出しており、強度の必要な翼根の方が鰭条の高さは高い。

図7-aは円弧状のアルミ薄板 ($t/c=1.25\%$) の下面に翼幅方向に多数の桁（高さ $h/c=2.5\% \sim 5\%$ ）を取り付けた $AR=6$ の矩形翼の風洞実験結果である。このアルミ薄板は完全な円弧ではなく放物線に近い形をしており、前縁及び後縁の翼弦線に対する角度は完全な円弧薄翼よりも小さくなる。そのためキャンバーは9%であるが、9%円弧薄翼³⁾と比較すると揚力曲線の非線形性は小さく最大揚力係数もやや小さくなる。翼の下面には流れと直角方向に多数の桁を配置し後縁の方はやや小さくした。また後縁には何も付けていない。さらに後縁に近い桁を外し、桁を前半部に集中して取り付けた場合も同時に比較している。翼下面に構造物を付けることで揚力係数 C_L は全体的にやや小さくなり、最小抗力係数 C_{Dmin} も増加する。そのため揚抗比 L/D はどの迎角においても減少していることが分かる。この構造物も後縁側がなくなると正の迎角範囲で C_L はやや増加し、 L/D も改善されることが分かる。

次に、同じ円弧薄翼の上面に桁（高さ $h/c=3.8\%$ ）を配置した場合の結果が図7-bである。前縁上面に桁を移し、さらに前縁から翼弦長の25%位置に桁を付けた場合と比較した。前縁上面に桁を配置すると C_L は $\alpha=5^\circ$ で最大値をとりそれ以上増加しない。その結果 C_{Lmax} は何も付けていない翼と比較して小さくなる。それに対し、前縁の桁を外し上面25%位置だけに桁を残すと何も付けていない翼と比較して C_L は全体に大きくなる。おそらくキャンバーが増加したのと同じような効果が得られるようである。ただし、 C_D が増加することにより $(L/D)_{max}$ は小さくなるが、迎角の大きな $\alpha=10^\circ$ 付近の L/D はやや高くなる。また、前縁が薄い翼では揚力曲線の非線形性が大きいことが分かる。

薄い平板の下面に桁（高さ $h/c=1.7\%$ ）を付けた場合の結果が図8-aで、「Mayfly」もこのような構造である。前縁後縁に桁を付けることにより C_L は増加するのが分かる。 C_D はやや増加するが、 L/D を見ると殆ど変化していない。また $C_{M0.25c}$ は負の値が僅かに増しキャンバーの増加と同じような効果である。しかし、負の迎角を見ると、桁を付けることにより C_L の絶対値は小さくなり、 L/D の絶対値も小さくなっている。これは円弧薄翼における結果と同じであり、翼の構造物の上に被覆を行う場合に翼の上

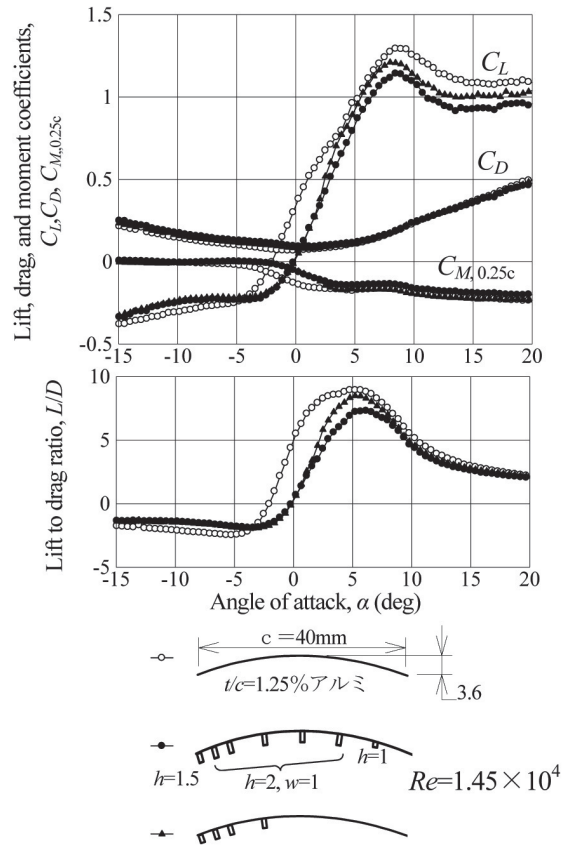


図 7-a 円弧状薄翼下面の桁の効果

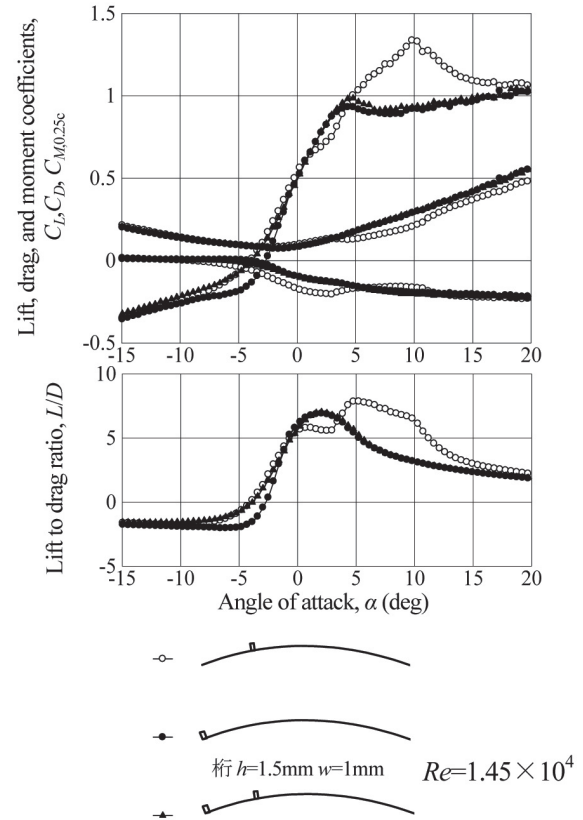


図 7-b 円弧状薄翼上面の桁の効果

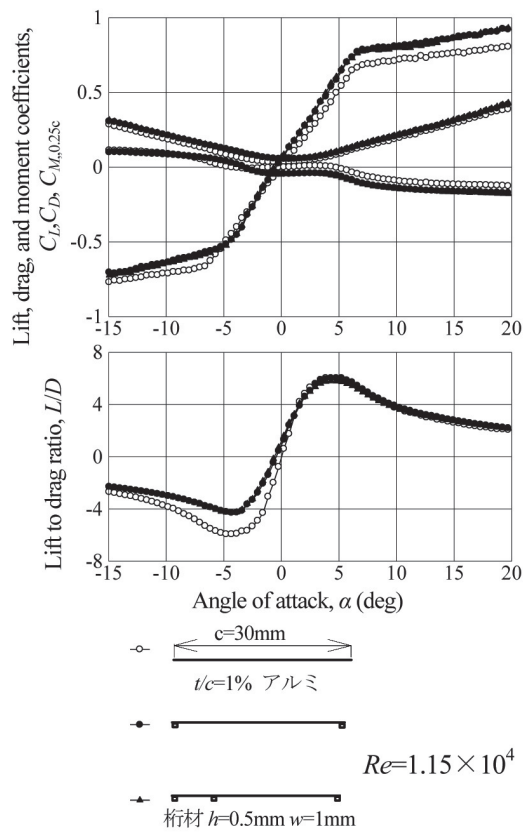


図 8-a 平板翼下面の桁の効果

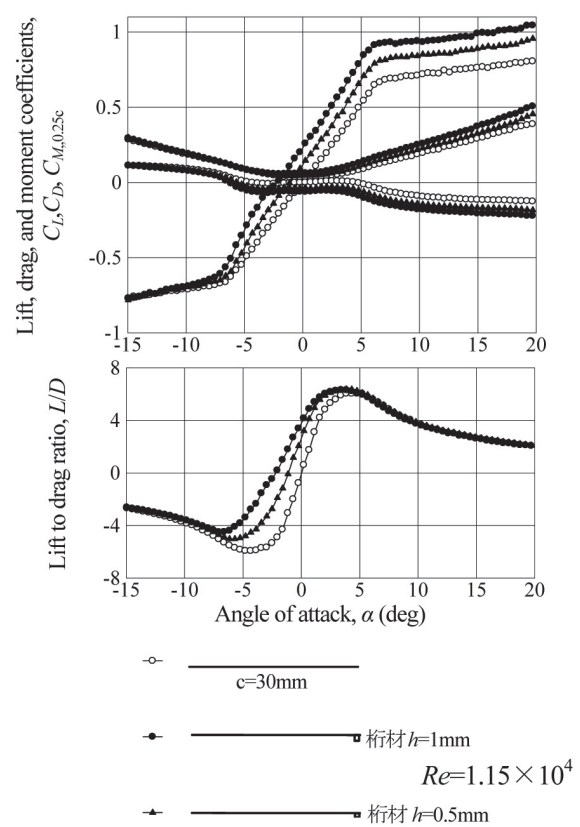


図 8-b 平板翼後縁下面部の桁の効果

面の方がよいことになる。ただし、前縁の形状さえ適当であれば翼上面の凸凹は効果的な場合もある⁹⁾。

後縁の桁の効果を調べるために、薄い平板の後縁下面に高さの異なる板（高さ $h/c = 1.6\% \sim 3.3\%$ ）を垂直に取り付けた結果が図 8-b である。桁の高さを増すと何も付けない平板と比較して C_L が増加するのが分かる。これは Gurney flap¹⁰⁾ と呼ばれるものと同じ効果である。Gurney Flap は翼面積を変化させずに簡単に揚力を増す方法として自動車のリヤウイングなどに使われるが、同時に抗力も増加する。図 8-b を見るとこの桁を付けることによる抗力の増加は僅かで、 L/D は正の迎角で僅かであるが増加している。 $C_{M0.25c}$ は負の値に変化しており、翼のキャンバーが増したのと同じような効果である。このように、後縁下面の桁が性能を向上させる効果がある可能性があり、これは後縁での剥離域が大きい低レイノルズ数の現象かもしれない。

5. まとめ

「Mayfly」を題材として翼特性についての風洞実験を行った。アスペクト比の小さな翼は揚抗比が小さく、平板でも大きな最大揚力係数が得られるが、円弧薄翼と比較して特に高いわけではない。しかし、大きな翼面積が簡単な構造で得られるため軽量化の点でも有利で、平板翼を使うことで風圧中心の移動が小さく良好な操縦性が確保できると考えられる。

このような軽量の機体では翼の被覆は片面だけに施すことが多いが、その翼型特性についても実験を行った結果、被覆は構造材の上に貼る方が翼の性能を確保する点で有利であると思われる。前縁の桁を上面に出すとよい結果が得られなかったが、前縁が適当であると翼上面の桁は最大揚力係数を増加させる可能性を持っている。また、後縁を下に張り出した Gurney flap は、低レイノルズ数領域では揚抗比の点でも悪くはならず、揚力係数を増加させる効果がありそうである。このことは後縁の桁の構造として応用できる面白い結果である。

参考文献

- 1) 土屋武司, 鈴木真二: 全日本学生室内飛行ロボットコンテストの開催, 第12回スカイスポーツシンポジウム講演集, 日本航空宇宙学会, pp.40~43, 2006
- 2) 岡本 真, 砂田 茂, 岡本正人, 得竹 浩: センチメートルサイズの飛行機の安定性に関する一考察, 第47回飛行機シンポジウム, 日本航空宇宙学会, pp.310-322, 2009
- 3) Okamoto, M., Yasuda, K., Azuma, A.: Aerodynamic Characteristics of the Wings and Body of a Dragonfly, J. Exp. Biol., Vol.199, pp.281-294, 1996
- 4) 岡本正人: 低レイノルズ数における定常翼空力特性の実験法, 論文集「高専教育」第32号, pp.7-12, 2009
- 5) 神馬義貴, 湯川啓介, 岡本正人: 第3回全日本学生室内飛行ロボットコンテスト出場機「Mayfly」の開発, 14回スカイスポーツシンポジウム講演集, 日本航空宇宙学会, pp.39-42, 2008
- 6) Lamar, J. E., "Extension of Leading-Edge-Suction Analogy to Wing with Separated Flow Around the Side Edges at Subsonic Speeds," NASA TR R-428, 1974
- 7) Torres G. E. and Muller T. J.: Aerodynamic Characteristics of Low Aspect Ratio Wings at Low Reynolds Numbers, "Fixed and Flapping Wing Aerodynamics for Micro Air Vehicle Applications", Vol.195, AIAA, pp.115-141, 2001
- 8) Azuma, A: The Biokinetics of Flying and Swimming Second Edition, AIAA, 2005, pp.85-100
- 9) Azuma, A., Okamoto, M., Yasuda, K.: Aerodynamic Characteristics of Wing at Low Reynolds Number. "Fixed and Flapping Wing Aerodynamics for Micro Air Vehicle Applications", Edited by Muller, T. J., Vol.195, pp.341-398, AIAA, 2001
- 10) Neuhaert, D. H., Pendergraft, O. C. Jr.: A Water Tunnel Study of Gurney Flaps, NACA Technical Memorandum 4071, NASA, 1988