

# 昆虫サイズ翼の平面形空力特性

岡本 正人, 佐々木 大輔, 佐々木 航星, 中村 輔  
(金沢工業大学)

## Planform aerodynamic characteristics of insect sized wings

by

Masato OKAMOTO, Daisuke SASAKI, Kousei SASAKI, Tasuku NAKAMURA

### ABSTRACT

The purpose of this study is to ascertain the aerodynamic characteristics of wings with various planforms having low aspect ratios at Reynolds number of  $Re \leq 10,000$  which corresponds to an insect wing. The very small forces and moment acting on the wing were measured by using the low pressure wind tunnel assuming the measurement of insect sized wing. The wing models tested in this study are the thin flat plates having rectangular, elliptical, and delta planforms. The lift slope of the wing with large aspect ratio showed constant in the small angle of attack range and changed horizontally as the angle of attack increases. The Reynolds number effects of these wings were comparatively small. As the aspect ratio of the wing decreased, the small lift slope and the large maximum lift coefficient provided by the additional vortex were obtained at  $Re=10,000$ . However, the maximum lift coefficient decreased as the Reynolds number decreased to 3000 or less, and the additional vortex lift component was hardly seen in the wings with the specific aspect ratios. As the aspect ratio further decreased, the disappearance of the vortex lift was not observed. The aspect ratio range in which this phenomenon was observed was different in the wing planform. This is one of the unique aerodynamic characteristics of the insect sized wings.

### 1. はじめに

低レイノルズ数における低アスペクト比翼の平面形空力特性に関する研究は、超小型の無人航空機 (MAV) の開発と共に増加した。これに対して、Torres and Mueller<sup>1)</sup>は様々な低アスペクト比を持つ平面形形状について、レイノルズ数  $Re=70,000 \sim 140,000$  で風洞実験を行った。レイノルズ数が減少した場合については、Mizoguchi and Itoh<sup>2)</sup>は  $Re=52,000 \sim 76,000$  で、Okamoto and Azuma<sup>3)</sup>は  $Re=10,000 \sim 20,000$  で風洞実験を行っている。これらの実験結果は、高レイノルズ数において有効なLamar<sup>4)</sup>の理論値と比較的よく一致することが確認されていることから、低アスペクト比翼の空力特性は、レイノルズ数依存性が小さいと考えられる。さらに、最近ではCFD (computational fluid dynamics) における解析においても、その結果は  $Re=10,000$  における風洞測定結果と一致が確認されており<sup>5)</sup>、これらの結果はほぼ妥当なものと考えられる。

しかし、私たちはさらにレイノルズ数が小さい  $Re < 10,000$  の昆虫の翅に相当する領域で、低アスペクト比翼の風洞実験を行った結果、この付加的な渦揚力が見られなくなるという現象が生じることが分かった<sup>6)</sup>。さらに、この傾向はさまざまな低アスペクト比翼においても見られ、そのアスペクト比の範囲は平面形状によって異なることが判ってきた<sup>7,8)</sup>。

今回は、特に昆虫サイズの低アスペクト比の様々な平面形の翼の空力特性についてこれまでの研究成果をまとめて発表する。

### 2. 実験装置

実験には研究室で昆虫サイズ翼の測定を目的に開発された低圧風洞装置<sup>9)</sup>を使用した。本風洞はアクリル製の真空デシケータ内に超小型風洞を設置することで、同じレイノルズ数の測定でも風速を増加することで動圧を大きくし、小さなレイノルズ数の測定を可能にしている。本風洞の詳細は文献<sup>6)</sup>または文献<sup>9)</sup>を参照されたい。

### 3. 実験模型

実験した模型の平面形は、Fig. 1 に示すようなアスペクト比  $AR$  の異なる矩形翼、楕円翼、デルタ翼の 3 種類である。これらは薄い平板で製作しており、その模型の主要諸元を Table 1 に示す。平均空力翼弦長  $\bar{c}$  に対する翼厚比  $t/\bar{c}$

は 0.75%~1.5% で翼平面形によってやや異なる。また、楕円翼とデルタ形翼は翼幅方向に翼弦長  $c$  が異なるがその翼厚  $t$  は一定で、翼端に行くほど翼厚比は大きくなる。この影響は、平板翼の場合、翼厚による揚力曲線への影響が比較的小さいことと、特にアスペクト比が小さい翼については翼型よりも平面形の影響が大きいことから、実際に翼端に向けて薄くしてもその結果は殆ど変化しなかった。

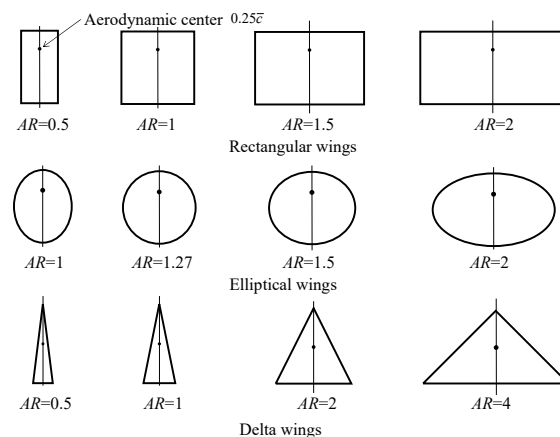


Fig. 1 Planforms of model wings examined in this study

Table 1 Specification of model wings

	Aspect ratio	$c_{\max}$ (mm)	$\bar{c}$ (mm)	$t/\bar{c}$ (%)
Rectangular wing	0.5	40	40	0.75
	1	25	25	1.2
	1.5	25	25	1.2
	2	25	25	1.2
Elliptical wing	1	30	25.5	1.18
	1.27	30	25.5	1.18
	1.5	30	25.5	1.18
	2	30	25.5	1.18
Delta wing	0.5	50	33.3	0.9
	1	40	26.7	1.12
	2	40	26.7	1.12
	4	30	20	1.5

## 4. 実験結果と考察

### 4.1 矩形翼

Fig. 2に、アスペクト比の異なる矩形翼について、レイノルズ数を変化させた場合の空力特性の変化を示す。

Fig. 2(a)は $AR=2$ の矩形翼である。レイノルズ数 $Re=10,000$ の揚力係数 $C_L$ を見ると、 $C_L$ は迎角と共に増加し、 $4\text{deg} \leq \alpha \leq 8\text{deg}$ で揚力傾斜が僅かに増加するが、 $\alpha=12\text{deg}$ で最大揚力係数 $C_{L\text{max}}=0.75$ をとり、その後僅かに $C_L$ は減少した後一定値となる。レイノルズ数が減少すると $Re \leq 3000$ では $C_{L\text{max}}$ は僅かに小さくなり、 $Re=2000$ では揚力傾斜も僅かに変化するが、その変化は比較的小さい。ポラーカーブを見て、抗力係数 $C_D$ は最小抗力係数 $C_{D\text{min}}$ がレイノルズ数の減少と共に増加するがそれ以外は変化が小さい。ピッチングモーメント係数 $C_{M,0.25c}$ は、 $\alpha=0\text{deg}$ 付近では $C_{M,0.25c}=0$ で、僅かに正の傾斜を持つが、 $\alpha > 5\text{deg}$ で負に変化し、一旦一定値になるが、その後徐々に負に増加していく。このレイノルズ数による変化は、揚力曲線の変化と同様に小さい。

$AR=1.5$  (Fig. 2(b)) になると僅かに $C_{L\text{max}}$ が大きくなり、その揚力曲線の山は目立ってくる。しかし、レイノルズ数が減少すると、 $Re=3000$ で $C_{L\text{max}}$ は小さくなり、 $Re=2000$ では見られなくなる。 $C_D$ や $C_{M,0.25c}$ も同様に $AR=2$ の場合と比較してレイノルズ数依存性はやや大きい。

$AR=1$  (Fig. 2(c)) の矩形翼については文献5)にその詳細を示したが、低アスペクト比翼の特徴である翼端渦の渦揚力による $C_L$ の増加は、レイノルズ数の減少と共に低下し、渦揚力の効果が見られなくなる。そのため、 $C_{L\text{max}}$ もレイノルズ数が減少すると小さくなる。

$AR=0.5$  (Fig. 2(d)) になると、アスペクト比の減少によって揚力傾斜は小さくなり、より高迎角まで $C_L$ は増加し、 $\alpha \geq 45\text{deg}$ で $C_L$ が急減するが、この傾向はレイノルズ数が減少しても殆ど変化しない。

以上のように、矩形翼の場合、 $1 \leq AR \leq 1.5$ ではレイノルズ数が $Re \leq 5000$ に減少するとき、低アスペクト比翼の渦揚力が見られなくなり $C_{L\text{max}}$ は小さくなる。

### 4.2 楕円翼

Fig. 3に、アスペクト比の異なる楕円翼について、レイノルズ数を変化させた場合の空力特性の変化を示す。

$AR=2$  (Fig. 3(a)) では、 $Re=20,000$ においても $C_L$ は大きくなり、アスペクト比の大きい特性曲線となる。ここではレイノルズ数が減少しても、 $Re=2000$ で $\alpha=10\text{deg}$ 付近の $C_L$ が僅かに減少するだけである。

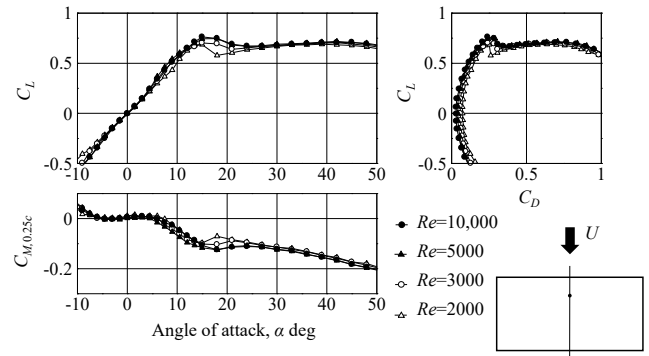
$AR=1.5$  (Fig. 3(b)) では、 $Re=20,000$ の $C_L$ は $\alpha \geq 15\text{deg}$ で傾斜は小さくなるが迎角と共に $C_L$ は増加を続け、 $\alpha=33\text{deg}$ 付近で $C_{L\text{max}}$ をとり、その後急減する。レイノルズ数の減少と共に $C_L$ は減少するが、レイノルズ数の減少に対して $15\text{deg} < \alpha < 40\text{deg}$ の迎角範囲全体の $C_L$ が減少していき、 $Re \leq 3000$ になると、この迎角範囲で平坦な揚力曲線になる。

これが完全な平板 ( $AR=1.27$  (Fig. 3(c))) になると、レイノルズ数の減少と共に $C_L$ が急減する迎角が小さくなり、 $Re \leq 3000$ では渦揚力による $C_L$ の増加は全く見られなくなり、 $C_{L\text{max}}$ は大きく減少する。 $C_D$ も $C_L$ の変化と共にレイノルズ数が減少すると増加しなくなり、ポラーカーブを見ると $Re \leq 3000$ では低アスペクト比翼の特性が見られなくなる。

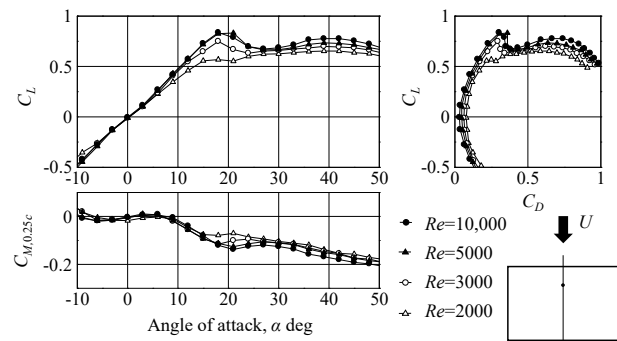
$AR=1$  (Fig. 3(d)) の場合、レイノルズ数が減少しても $C_L$ 、 $C_D$ 、 $C_{M,0.25c}$ の特性に大きな変化はなく、 $Re \leq 3000$ で $C_L$ 傾斜が僅かに小さくなり、 $\alpha=40\text{deg}$ 付近で急減する $C_L$ の迎角は僅かに大きくなる。

### 4.3 デルタ翼

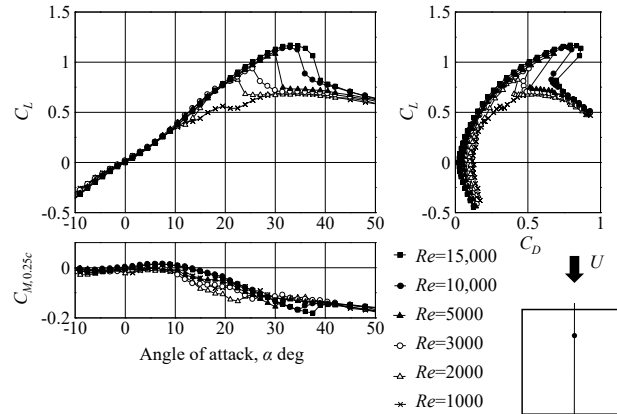
Fig. 4に、アスペクト比の異なる三角形の平面形を持つデルタ翼について、レイノルズ数を変化させた場合の空力特性の変化を示す。



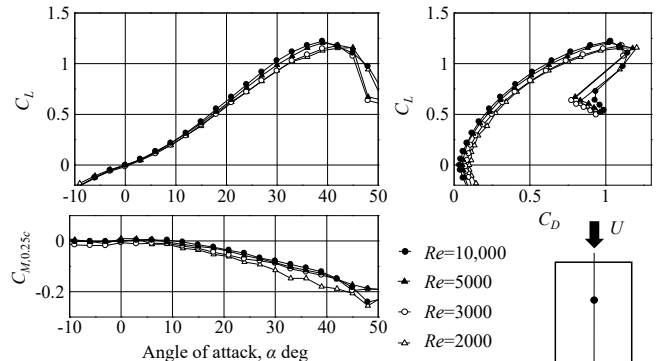
(a) Rectangular wing with  $AR=2$



(b) Rectangular wing with  $AR=1.5$

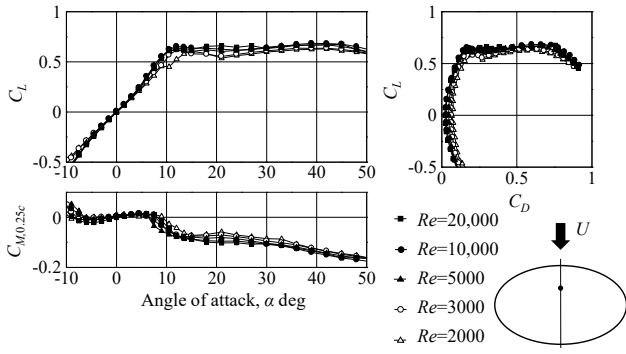


(c) Rectangular wing with  $AR=1$

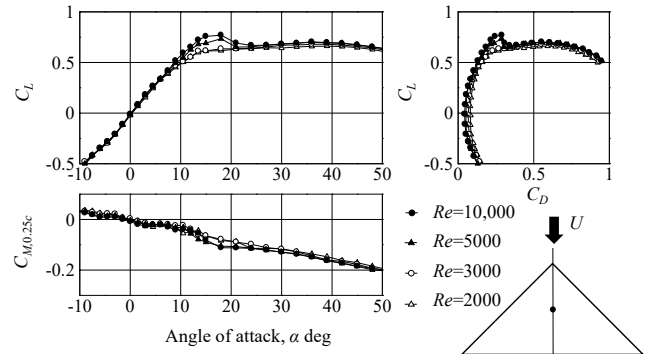


(d) Rectangular wing with  $AR=0.5$

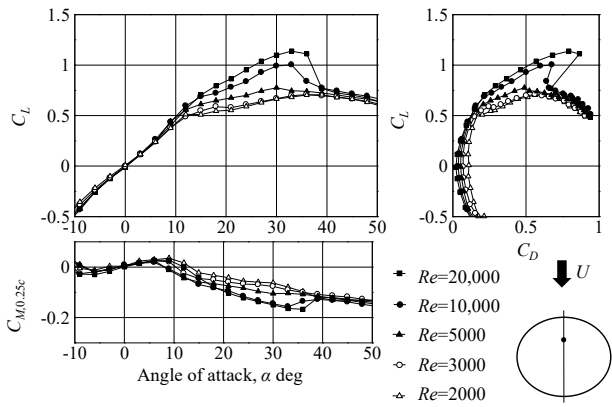
Fig. 2 Aerodynamic characteristics of the rectangular wings with various aspect ratios



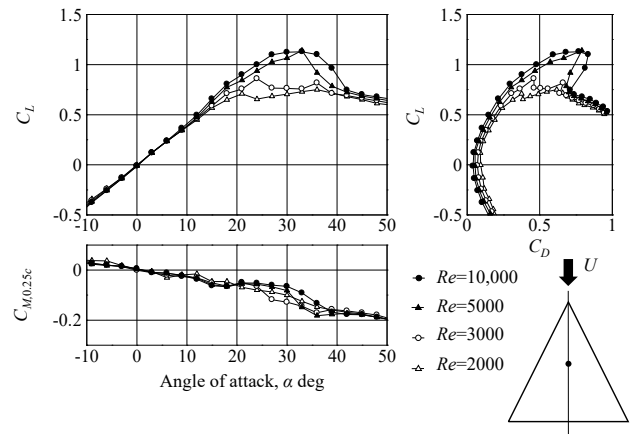
(a) Elliptical wing with  $AR=2$



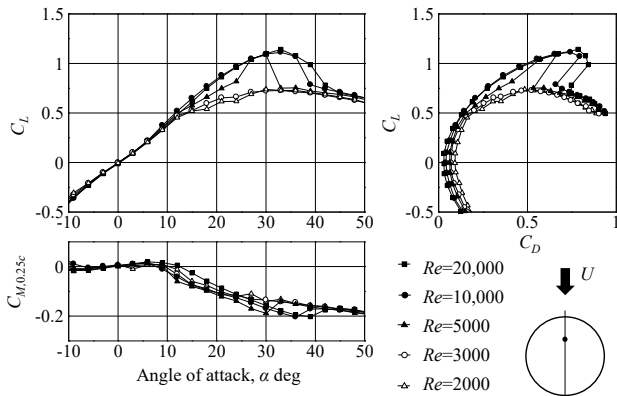
(a) Delta wing with  $AR=4$



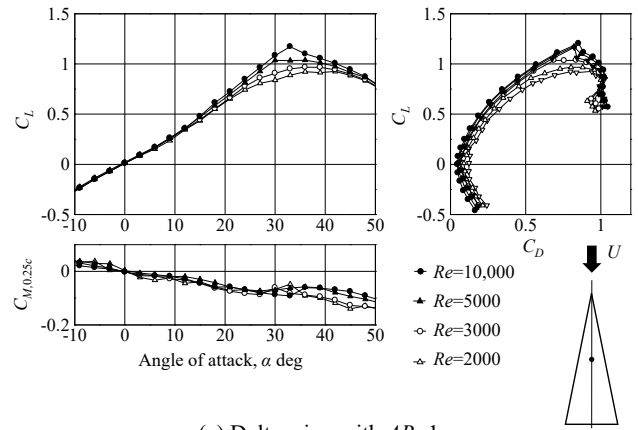
(b) Elliptical wing with  $AR=1.5$



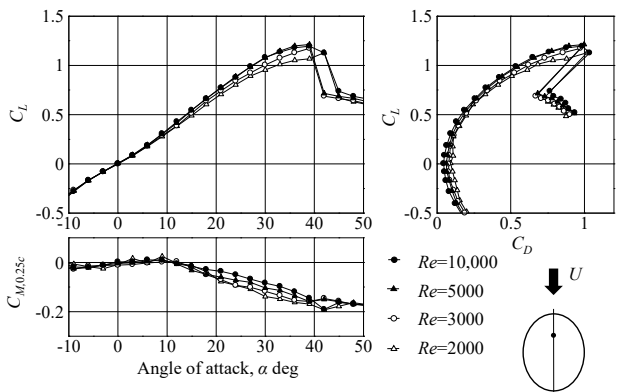
(b) Delta wing with  $AR=2$



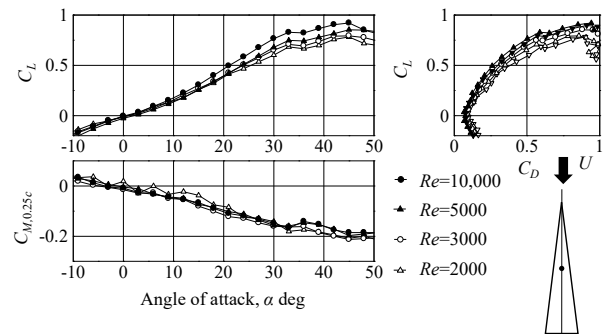
(c) Elliptical wing with  $AR=1.27$  (disk wing)



(c) Delta wing with  $AR=1$



(d) Elliptical wing with  $AR=1$



(d) Delta wing with  $AR=0.5$

Fig. 3 Aerodynamic characteristics of the elliptical wings with various aspect ratios

Fig. 4 Aerodynamic characteristics of the delta wings with various aspect ratios

$AR=4$  (Fig. 4(a)) では、 $Re=10,000$  においては  $\alpha=15\text{deg}$  付近で  $C_L$  が僅かに大きくなり山形に少し膨らんだ揚力曲線となる。レイノルズ数が減少するとこの部分が見られなくなり、 $AR=4$  では比較的レイノルズ数依存性は小さい。

$AR=2$  (Fig. 4(b)) になると、 $Re=10,000$  の揚力曲線は低アスペクト比翼の特性を示し、非線形な渦揚力が付加されることによって  $\alpha=30\text{deg}$  付近で大きな  $C_L$  を示すが、 $Re=5000$  では僅かに  $C_L$  の減少が見られ、 $Re \leq 3000$  では渦揚力による  $C_L$  の増加は見られなくなる。特に  $Re=2000$  では揚力傾斜だけが小さく低アスペクト比翼の特性は見られない。

$AR=1$  (Fig. 4(c)) では、 $Re=10,000$  では低アスペクト比翼の渦揚力による  $C_L$  の増加が見られるが、レイノルズ数が減少すると  $15\text{deg} < \alpha < 50\text{deg}$  における  $C_L$  の減少が顕著になる。

$AR=0.5$  (Fig. 4(d)) では、 $Re=10,000$  では迎角の増加と共に揚力傾斜が徐々に大きくなる低アスペクト比翼の揚力曲線を示しており、 $\alpha=45\text{deg}$  付近で  $C_{Lmax}$  をとる。レイノルズ数が減少すると、徐々に  $C_{Lmax}$  は小さくなるが、その揚力曲線の形状は全体に揚力傾斜が僅かに小さくなるだけで、 $AR=1$  のような非線形な  $C_L$  の増加がなくなることはない。

Fig. 5は実験翼の主たる空力特性である  $C_{Lmax}$  と  $(L/D)_{max}$  のレイノルズ数変化をまとめたものである。 $C_{Lmax}$  は小さなアスペクト比の方が高く、 $AR=0.5$  ではレイノルズ数の減少と共に  $C_{Lmax}$  の減少は小さい。ただし、楕円翼は  $AR=1$  でも減少しない。 $AR \geq 2$  では  $C_{Lmax}$  は小さいが、レイノルズ数の減少と共に減少しない。すなわち、その間のアスペクト比ではレイノルズ数の減少と共に  $C_{Lmax}$  は減少する。これに対して、 $(L/D)_{max}$  はアスペクト比の大きい方が大きく、レイノルズ数の減少と共に減少することが分かる。

#### 4.4 考察

レイノルズ数が減少した場合に  $C_L$  が減少する迎角範囲は低アスペクト比翼に見られる翼端渦による渦揚力が付加される迎角である。このことは、渦格子法のような揚力面理論に渦揚力として Polhamus の Suction analogy<sup>10)</sup> を加えた理論

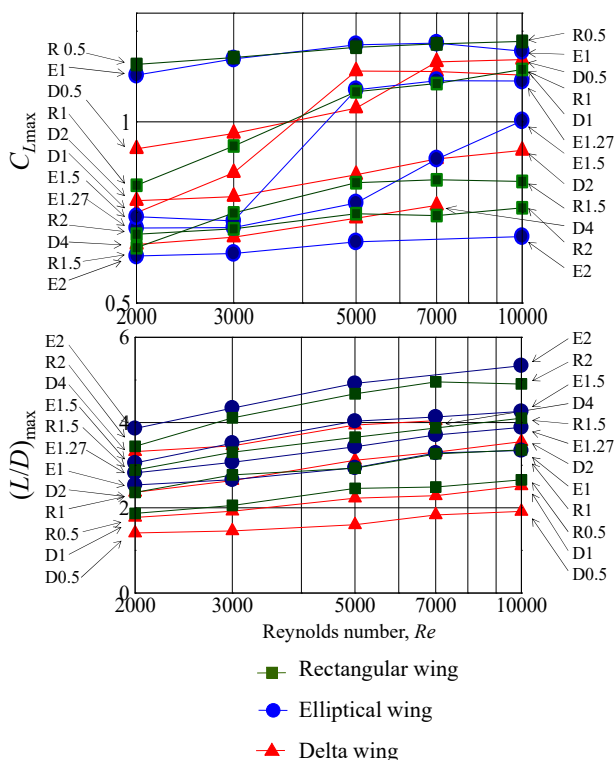


Fig. 5 Reynolds number effects of main aerodynamic coefficients

値との比較で明らかである。すなわち、 $Re=10,000$  では理論値に近い揚力曲線が得られ、 $Re \leq 5000$  では Suction analogy を加えない理論揚力係数、すなわち渦揚力を付加しない揚力面理論値に近づく。この結果については、矩形翼は文献6、楕円翼は文献7、デルタ翼は文献8を参照されたい。

渦揚力は翼端渦が翼面に付着することで、翼の循環が増加して渦揚力として付加される。この翼端渦は流れの可視化結果からレイノルズ数の減少にかかわらず見られる。しかし、レイノルズ数が減少したとき、その渦は翼面から離れ、翼に付着していない<sup>6-8)</sup>。すなわち、翼端渦は発生するが渦揚力として付加されないことになる。これに対して、さらにアスペクト比が減少すると、この  $C_L$  の減少は殆ど見られなくなる。この原因はよく分からないが、左右の翼端が近づくことによって、左右の翼端渦が互いに翼面への付着を助長するのではないかと思われる。

#### 5 結言

翼の平面形特性において低アスペクト比翼はレイノルズ数依存性が小さいと思われていたが、 $Re \leq 3000$  では、低アスペクト比翼に見られる渦揚力の付加が見られなくなる現象が生じた。そのアスペクト比範囲は平面形によって異なり、矩形翼では  $1 \leq AR \leq 1.5$ 、楕円翼では  $1.27 \leq AR \leq 1.5$ 、デルタ翼では  $1 \leq AR \leq 2$  であった。これは、昆虫サイズ翼に見られる特有の空力特性の一つである。

本研究は、科学研究費補助金（課題番号16K06894）の補助を受けて行われた。ここに謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) Torres, G. E., and Mueller, T. J.: Aerodynamic Characteristics of Low Aspect Ratio Wings at Low Reynolds Numbers, Fixed and Flapping Wing Aerodynamics for Micro Air Vehicle Applications, edited by T. J. Mueller, Vol. 195, AIAA, Reston, VA, 2001, pp. 115-141
- 2) Mizoguchi, M. and Itoh H.: Effect of Aspect Ratio on Aerodynamic Characteristics at Low Reynolds Numbers, AIAA Journal, Vol. 51, No. 7, 2013, pp. 1631-1639.
- 3) Okamoto, M., and Azuma, A.: Aerodynamic Characteristics at Low Reynolds Numbers for Wings of Various Planforms, AIAA Journal, Vol. 49, No. 6, 2011, pp. 1135-1150.
- 4) 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
- 5) 三輪恭也, 夏目雄太 他: 超低レイノルズ数領域におけるアスペクト比矩形翼の流体解析, 日本機械学会 北陸信越支部 第55期総会・講演会論文集, 2018
- 6) 岡本正人, 佐々木大輔, 佐々木航星, 中村輔: 昆虫サイズ  $AR=1$  矩形翼の空力特性, 日本航空宇宙学会論文集 Vol.65, No.5, pp.177-180, 2017
- 7) 中村輔, 岡本正人: 超低レイノルズ数領域における円板翼の空力特性, 第55回飛行機シンポジウム講演集, 2017
- 8) 佐々木航星, 岡本正人: 翼平面形状におけるレイノルズ数依存性, 第48期定時社員総会および年会講演会, 2017
- 9) Okamoto, M. and Ebina, K.: Effectiveness of Large-Camber Circular Arc Airfoil at Very Low Reynolds Numbers, Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci. Vol. 59, No. 5, 2016, pp. 295-304
- 10) Polhamus, E. C.: A Concept of the Vortex Lift of Sharp-Edge Delta Wings Based on a Leading-Edge-Suction Analogy, NASA TN-D-3767, 1966