

# デルタ翼とダブルデルタ翼の流れの数値シミュレーションの信頼性について

堀江俊行\*1、藤井孝藏\*2、服部直三\*3

## Towards the Improvements in Reliability of Delta Wing and Double-Delta Wing Flow Simulations

by

Toshiyuki Horie\*1, Kozo Fujii\*2, Hattori Naozo\*3

### ABSTRACT

Vortical flows over delta wings and double-delta wings are numerically simulated. The reliability of the simulations for both types of wings is investigated. The results obtained with different grid resolutions and different entropy fixes show that characteristics of the secondary vortex, which in turn influences the strength and position of the primary vortex, strongly depend on these parameters. Although the computed primary vortex on the delta wing disagrees with the experimental results on both strength and location, these discrepancies compensate each other and lead to good agreement with the experiments on the aerodynamic characteristics. On the other hand, the interactions of the two primary vortices on the double-delta wings are influenced by the strength and location of the vortices. More research is required for an accurate simulation of the leading-edge vortices over a double-delta wing.

#### 1. はじめに

超音速航空機や宇宙往還機などに用いられるデルタ翼やダブルデルタ翼では、離着陸などの大迎角飛行時において、翼上の流れは前縁剥離渦が支配的となる。そして、このような前縁剥離渦は空力特性において重要な役割を果たす。

図1に計算によって得られたダブルデルタ翼上の全圧分布の一例を示す。計算は約12万点の格子を用い、迎角を $12^\circ$ として行った。図1よりダブルデルタ翼上の流れ場はストレーキ部分と主翼部分から二つの渦が生じ、それらが互いに干渉し合う流れ場となっていることがわかる。それに対して、図2は entropy fix<sup>(1), (2)</sup>すなわち固有値0付近でのみ働く数値粘性をわずかに大きくしたときの計算結果である。図2では等高線の様子は大きく変化し、図1のような流れ場の構造は見られない。実は、このような流れ場の構造の変化は entropy fixのみならず、格子分布を変えることによって生じる。

単純なデルタ翼では多くの計算例が報告されており、一般に比較的精度良い数値シミュレーションが可能であると言われている。それに対してダブルデルタ翼では流れ場の特徴から、このような小さな要因で流れ場が大きく変わる。ダブルデルタのような翼の流れを計算する場合、単純なデルタ翼に比べてより注意して計算を行う必要がある。

例えば次世代実用翼の多くがダブルデルタ翼に類似した形態の翼である。しかし、そのような翼の流れの計算は、ダブルデルタ翼の計算例が少ないため、単純なデルタ翼の計算例を参考にして行われることが多い。図1、図2に見られるような計算上の要因が流れ場に与える影響を議論しておくことが、実用問題の翼の計算に向けて重要となる。

本研究では、デルタ翼とダブルデルタ翼の前縁剥離渦の数値シミュレーションにおいて、格子解像度の影響と entropy fix(数値粘性)の影響に着目し、デルタ翼の数値シミュレーションの信頼性を再度確認すると共に、デルタ翼とダブルデルタ翼で流れ場が受ける影響の違いを明確にすることを目的とする。

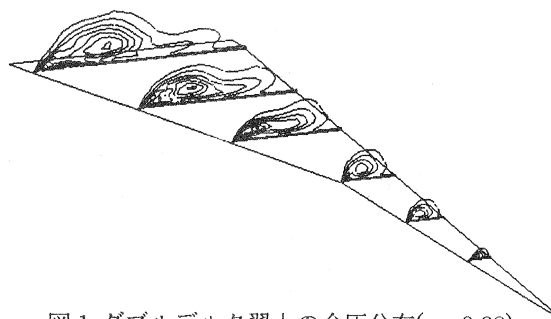


図1 ダブルデルタ翼上の全圧分布( $\epsilon=0.02$ )

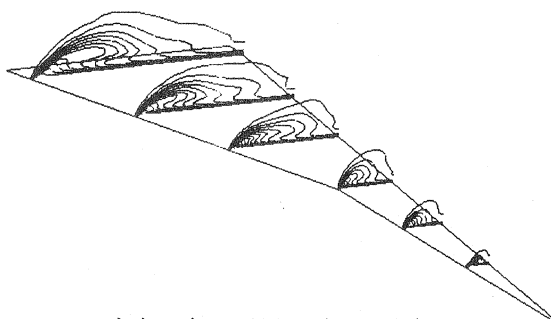


図2 ダブルデルタ翼上の全圧分布( $\epsilon=0.08$ )

#### 2. 数値計算法および計算条件

流れ場としては定常問題を扱うものとし、基礎方程式には3次元 Thin-Layer Navier-Stokes 方程式を用いた。対流項の離散化には Roe スキーム<sup>(3)</sup>を用い、MUSCL 法<sup>(4)</sup>により高次精度化した。時間積分には FF-SGS 陰解法<sup>(5)</sup>を用いた。また、翼全面において層流を仮定して計算を行った。

計算はデルタ翼とダブルデルタ翼に対して行った。格子解像度の影響と entropy fix の影響を見るため、それぞれ粗い格子(約14万点)と細かい格子(約81万点)を用いて、また entropy fix の大きさを決めるパラメータ  $\epsilon$  を 0.02 と 0.08 に変えて計算を行い、比較を行った。それぞれの格子の格子点数を表1に示す。

\*1 東京理科大学大学院、宇宙研特別共同利用研究員

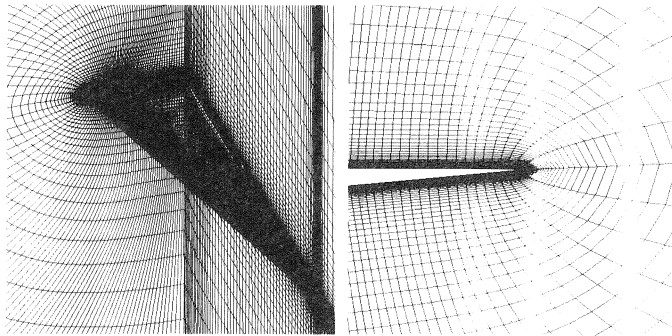
\*2 宇宙科学研究所、\*3 東京理科大学

計算に用いた格子はO-H型構造格子である。計算格子の例として、図3に細かい格子(約81万点)のときのデルタ翼の格子を、また図4にダブルデルタ翼の格子を示す。デルタ翼の計算で用いた翼形状は後退角 $76^\circ$ でHummel<sup>(6)</sup>の実験形状と同じものとした。ダブルデルタ翼の計算では、翼形状としてBrennenstuhl and Hummel<sup>(7)</sup>の実験形状を用い、ストレークの後退角が $80^\circ$ 、主翼の後退角が $60^\circ$ となっている。両者の翼形状においては、図3(b)、図4(b)に示した翼前縁形状に見られるように、デルタ翼では鋭い前縁形状をしているのに対して、ダブルデルタ翼では丸い前縁形状をしており、前縁形状に違いがある。計算領域はいずれの場合も、上流方向に2倍のルートコード、下流方向には3倍、また翼遠方には2.5倍のルートコードの領域とした。

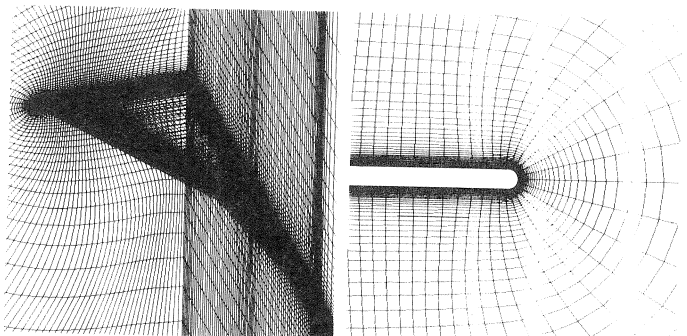
計算で用いた流れ条件を表2に示す。流れ条件も翼形状と同様に、実験条件<sup>(6)</sup>と同じものを用いた。

表1 格子点数

	デルタ翼	ダブルデルタ翼
粗い格子:14万点	55×73×37	62×63×37
細かい格子:81万点	95×127×67	109×111×67



(a) 全体格子 (b) 前縁付近  
図3 デルタ翼の計算格子(細かい格子)



(a) 全体格子 (b) 前縁付近  
図4 ダブルデルタ翼の計算格子(細かい格子)

表2 流れ条件

	Mach	Re(翼根長基準)	$\alpha$
デルタ翼	0.3	$0.9 \times 10^6$	$20.5^\circ$
ダブルデルタ翼	0.3	$1.3 \times 10^6$	$12^\circ$

### 3. 計算結果および考察

#### 3. 1 デルタ翼について

##### 3. 1. 1 空力係数分布

###### 細かい格子(81万点)のときの表面圧力係数分布

図5に細かい格子を用いたときのデルタ翼上の(a)全圧分布および(b)表面圧力係数分布を示す。図5(a)より翼上面には流れが前縁で剥離することによって生じる前縁剥離渦の存在が確認できる。また翼上面の前縁に向かう流れが前縁付近で剥離することによって生じる二次剥離渦の存在も確認できる。図5(b)にコード方向3断面におけるスパン方向表面圧力係数分布を示す。まず、60%スパン位置付近に見られる分布のピークは、前縁剥離渦によって生じる負圧のピークである。90%スパン位置付近に見られるもう一つのピークは、二次剥離渦による負圧のピークである。いずれのコード位置においても計算結果と実験結果は良い一致が見られる。ちなみに計算結果はentropy fixの大きさを決めるパラメータ $\epsilon$ が0.02と0.08のときについて示しているが、entropy fixが大きい $\epsilon=0.08$ のときに若干、前縁剥離渦による分布のピークが前縁側にずれる傾向が見られる以外大きな差はない。

###### 粗い格子(14万点)のときの表面圧力係数分布

図6に粗い格子を用いたときのデルタ翼上の(a)全圧分布および(b)表面圧力係数分布を示す。図5(b)と図6(b)の分布を比較し、格子解像度による影響を見る。まず、前縁付近に生じる二次剥離渦による分布のピークが、粗い格子のときのほうが弱く、実験結果と若干違いが見られる。また前縁剥離渦による分布のピークは、粗い格子を用いたときに若干、前縁のほうにずれる傾向が見られる。ちなみにentropy fixが大きい $\epsilon=0.08$ のときには、前縁剥離渦による分布のピークがさらに前縁のほうにずれる傾向が見られた。いずれにしても約14万点という粗い格子を用いたときにも、若干の違いは見られるものの計算結果は実験結果とほぼ良い一致を示している。

###### 揚力係数分布、ピッチングモーメント係数分布

次に、図7に揚力係数分布を、また図8にピッチングモーメント係数分布を示す。計算結果はわずかに一つの迎角についてしか行っていないが、揚力係数分布、ピッチングモーメント係数分布ともに、格子解像度やentropy fixの大きさによらず、実験結果との良い一致が見られる。これまでの他のシミュレーション結果<sup>(8),(9)</sup>からもデルタ翼の空力特性が正しく予測されることが分かっている。

以上示したようにデルタ翼では、計算により得られる空力特性は、格子解像度やentropy fixの大きさによらず、実験結果と良い一致を示す。しかし流れ場の詳細は、実は格子解像度などの影響を受けている。これについて以下に吟味する。

##### 3. 1. 2 流れ場が受ける影響

格子解像度による流れ場の違いを見る。図9に70%コード位置における全圧分布を示す。図9(a)が細かい格子を用いたときの結果、図9(b)が粗い格子を用いたときの結果である。格子解像度による結果の違いを比較すると、前縁付近に生じる二次剥離渦に大きな違いがあることが分かる。細かい格子を用いたときには粗い格子のときに比べて、二次剥離渦は大きく、そして強く生じている。このような二次剥離渦の違いは、図9(a)、(b)の分布の違いを見ても分かるように、前縁から生じる一次の前縁剥離渦の強さや位置にも違いを与えると考えられる。そこで格子解像度による一次剥離渦の渦中心の

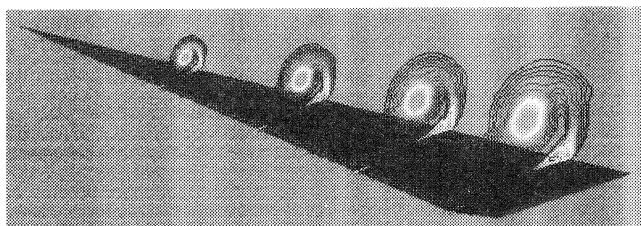
強さと高さの違いを調べてみた。

図10は格子解像度による渦の強さを比較するために、各コード方向位置において渦中心の静圧を調べたものである。いずれのコード方向位置においても、細かい格子の結果は粗い格子の結果に比べて、負圧を強く捉えていることがわかる。渦中心の負圧は格子解像度によって10%近くも違う。

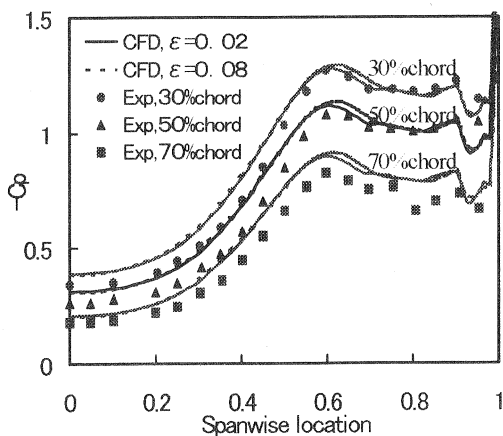
図11に各コード方向位置における渦中心の翼上面からの高さを格子解像度で比較して示す。渦中心の高さについては細かい格子のときは、粗い格子のときよりも高く捉えている。

このように前縁剥離渦の強さや位置は、格子解像度によって違いが見られる。それにも関わらず既に述べた通り、図5(b)、図6(b)の表面圧力係数分布は格子解像度によらず実験結果と良い一致を示した。また、図7の揚力係数分布、図8のピッチングモーメント係数分布も同様に、計算結果は格子解像度によらず実験結果と良い一致を示した。この理由は、粗い格子のときには、細かい格子のときに比べて渦の強さは弱い、渦の高さを低く捉えており、この二つの渦の強さと高さの条件がうまく重なり合って、格子解像度によらず空力特性は実験結果と良く一致すると考えられる。

以上述べたように、格子解像度によって二次剥離渦の違いが生じ、それによって前縁から生じる前縁剥離渦の位置や強さにも違いが生じることが分かった。そしてそれにも関わらず、渦の位置と高さの条件がうまく重なり合った結果、格子解像度によらず実験結果と良い空力特性の一致を示す。同様に entropy fix の大きさによる流れ場の違いを吟味すると、同じような現象が entropy fix の大きさの違いについても言えることが分かる。このことから、デルタ翼の計算において、得られた空力特性が実験結果と良く一致することが、必ずしも流れ場を正確に再現していることを示しているとは限らないことがわかる。

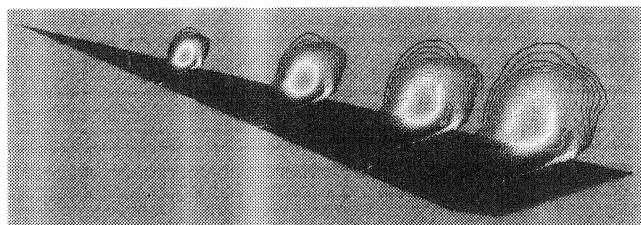


(a) 全圧分布 ( $\epsilon = 0.02$ )

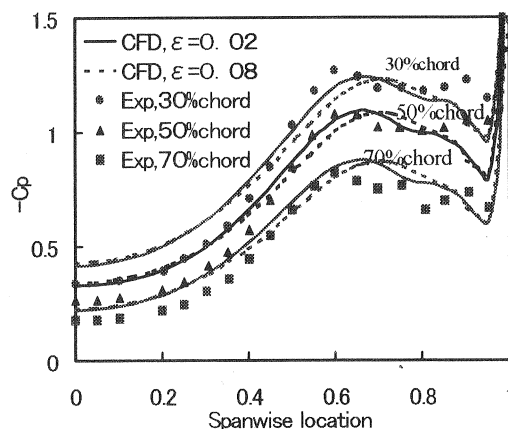


(b) 表面圧力係数分布

図5 細かい格子の結果



(a) 全圧分布 ( $\epsilon = 0.02$ )



(b) 表面圧力係数分布

図6 粗い格子の結果

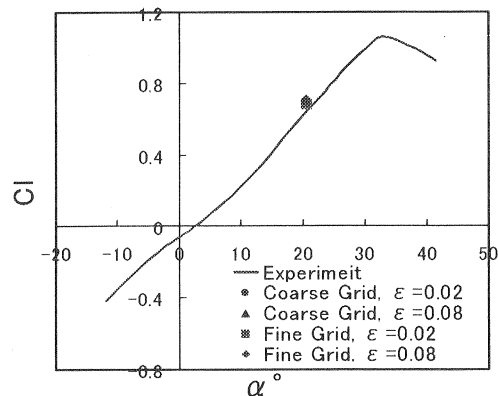


図7 揚力係数分布

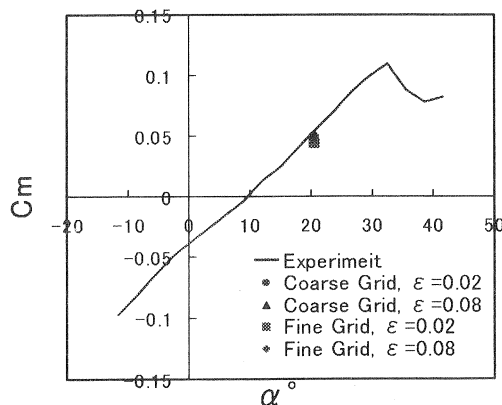


図8 ピッチングモーメント係数分布

### 3. 2 ダブルデルタ翼について

図 12(a)にダブルデルタ翼上の全圧分布、図 12(b)に流線の一例を示す。まずダブルデルタ翼では、ストレーク部分と主翼部分から二つの渦が生じていることがわかる。そして、それら二つの渦は下流になるに従い互いに強く干渉し合い、次第に融合する流れ場となっている。次に、デルタ翼と同様に空力特性に着目する。

#### 3. 2. 1 空力係数分布

##### 粗い格子(14万点)のときの表面圧力係数分布

図 13 に粗い格子を用いたときの表面圧力係数分布を示す。図 13(a)は 62.5%コード位置における分布、図 13(b)は 75%コード位置における分布である。図中には実験結果も示されている。まず図 13(a)62.5%コード位置における分布について実験結果を見ると、50%スパン位置付近に一つ分布のピークが見られる。これはストレーク部分から生じる渦による負圧のピークである。80%スパン位置付近にももう一つピークが見られるが、これは主翼部分から生じる渦による負圧のピークである。それに対して計算結果は若干二つのピークが見られるものの、その強さは実験結果に比べて非常に弱く、実験結果との一致は見られない。図 13(b)75%コード位置における分布を見ても、実験結果は 62.5%コード位置と同様に、二つの渦によるピークが見られる。それに対して、計算結果の分布は一つのピークしか存在せず、実験結果と大きく異なる分布となっていることがわかる。

##### 細かい格子(81万点)のときの表面圧力係数分布

図 14 に細かい格子を用いたときの表面圧力係数分布を示す。図 14(a)62.5%コード位置における分布より、格子解像度を上げることによって計算結果の分布は明確な二つのピークを持つようになり、明らかに解が改善されたことがわかる。特にストレーク部分から生じる渦による分布のピークは、実験結果と非常に良い一致を示している。しかし、主翼部分から生じる渦による分布のピークについては、解の改善は見られるものの、実験結果との違いは大きい。図 14(b)75%コード位置における分布でも、格子解像度を上げることによって二つの渦によるピークが見られるようになり、解の改善が伺える。しかし、実験結果と計算結果の分布の違いは大きく、異なる分布をしている。

##### さらに細かい格子(400万点)のときの表面圧力係数分布

以上示したようにダブルデルタ翼では単純なデルタ翼と同様の格子解像度を用いても、計算により得られる表面圧力係数分布は実験結果と良い一致を示さない。しかしながら、格子解像度を上げることによって、解の改善は見られた。そこで、さらに格子解像度を上げて約 400 万点の格子を用いた計算を行った。このときの表面圧力係数分布を図 15 に示す。まず図 15(a)62.5%コード位置における分布より、さらに格子解像度を上げたことによって、主翼部分から生じる渦による分布のピークが若干改善されたことがわかる。また図 15(b)75%コード位置における分布からも、計算結果の分布は明確な二つのピークを持つようになり、解は明らかに改善されたことがわかる。特にストレーク部分から生じる渦による分布のピークについては、計算結果は実験結果と良い一致を示している。しかし、約 400 万点という解像度の格子を用いても、主翼部分から生じる渦による分布のピークについては、いずれのコード位置においても正確に捉えていない。

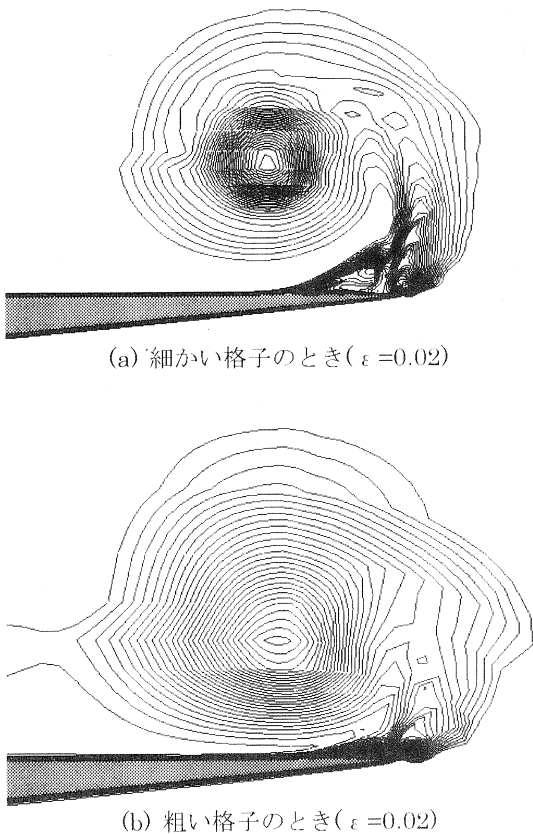


図 9 70%コード位置における全圧分布

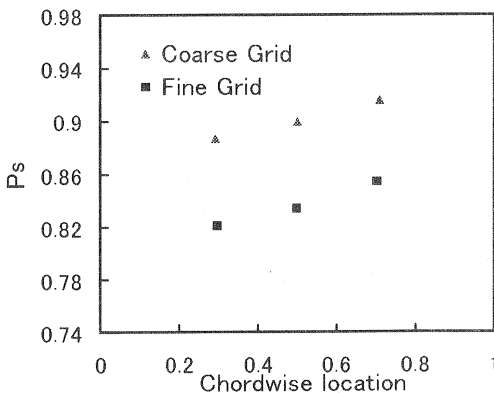


図 10 渦中心の強さ( $\epsilon=0.02$ )

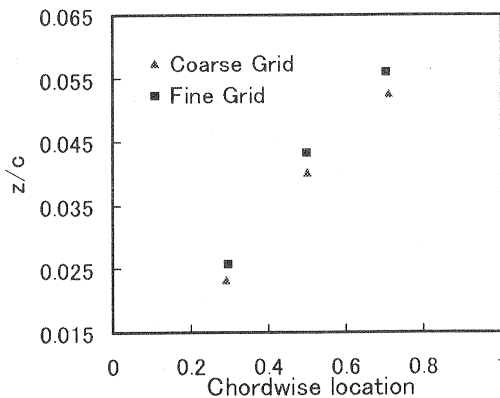


図 11 渦中心の高さ( $\epsilon=0.02$ )

揚力係数分布、ピッチングモーメント係数分布

図16に揚力係数分布を、また図17にピッチングモーメント係数分布を示す。揚力係数分布については、計算結果は実験結果との良い一致が得られた。それに対してピッチングモーメント係数分布については、計算結果は実験結果と大きく異なる値を示している。このことはシミュレーションで得られた翼後半部の全圧分布の不一致に起因している。

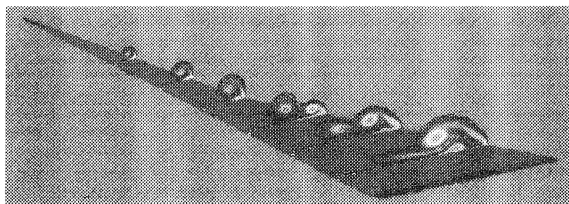
ここで示したようにピッチングモーメント係数分布が計算結果と実験結果で大きく異なるということは、これらの翼の高迎角特性評価という実用計算の信頼性に問題があることを示唆しており、注意を必要とする。次世代超音速旅客機(SST)や宇宙往還機などでは単純なデルタ翼ではなく、ダブルデルタ翼やそれに類似した形態の翼を持つことが多い。

以上述べたように、単純なデルタ翼では計算により得られる空力特性は実験結果と良い一致を示すのに対して、ダブルデルタ翼では計算による空力特性の把握は非常に困難となる。このような違いの理由について、以下議論を進める。

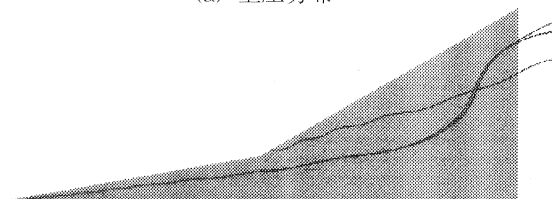
3. 2. 2 流れ場が受ける影響

図18にダブルデルタ翼上の全圧分布の一例を示す。ストレーク部分の分布と主翼部分の分布にそれぞれ着目すると、いずれにおいても単純なデルタ翼と同様に、前縁付近に二次剥離渦の存在が確認できる。そしてこの二次剥離渦はデルタ翼のときと同様に、格子解像度や entropy fix の大きさによって違いが生じ、それによってストレーク部分から生じる渦と主翼部分から生じる渦の位置や強さにも違いが生じる。このような二つの渦の位置や強さの違いは、渦の干渉や融合といった現象が生じるダブルデルタ翼において非常に重要となる。

図19に計算によって得られたダブルデルタ翼上の流線を示す。図19(a)は粗い格子のとき、図19(b)は細かい格子のときの結果である。また図中には entropy fix の大きさ  $\epsilon$  が 0.02 と 0.08 のときについて二通りの結果が示されている。まず粗い格子の結果と細かい格子の結果を比較すると、格子解像度によって二つの渦の干渉・融合に違いが見られることがわかる。また同じ格子解像度であっても、entropy fix の大きさによっても渦の干渉・融合の位置に違いが生じている。このようにダブルデルタ翼では、格子解像度や entropy fix といった計算上の要因による渦の位置と強さの違いが、二つの渦の干渉や融合に大きな影響を及ぼす。このため、ダブルデルタ翼では計算による空力特性の把握が困難となる。



(a) 全圧分布



(b) 流線

図12 ダブルデルタ翼上の流れ場(細かい格子,  $\epsilon=0.02$ )

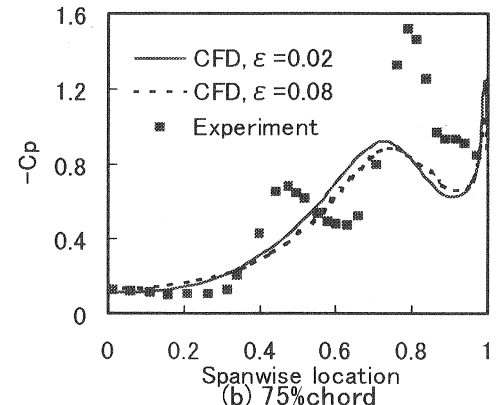
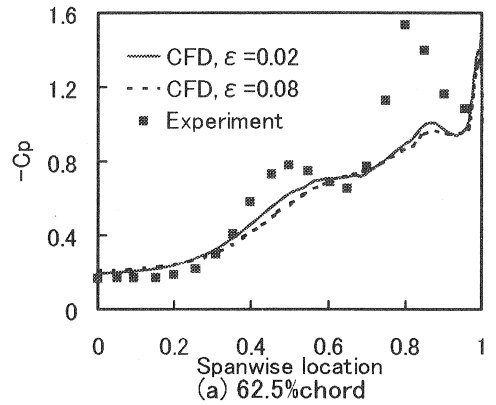


図13 表面圧力係数分布(Coarse Grid)

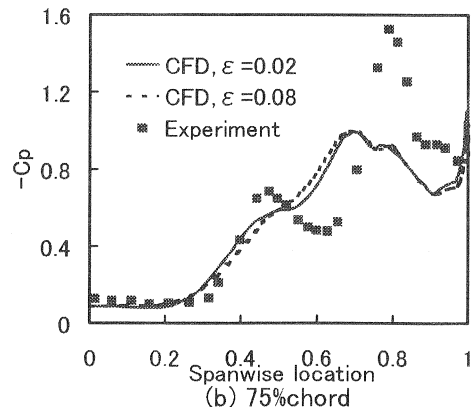
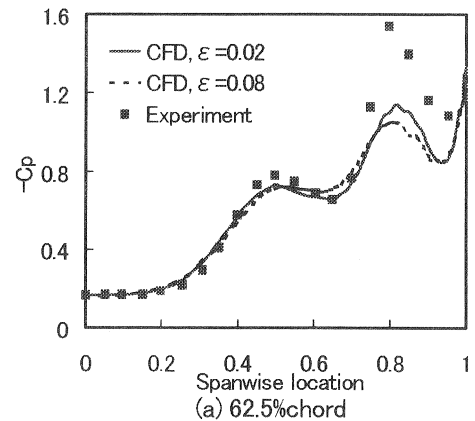


図14 表面圧力係数分布(Fine Grid)

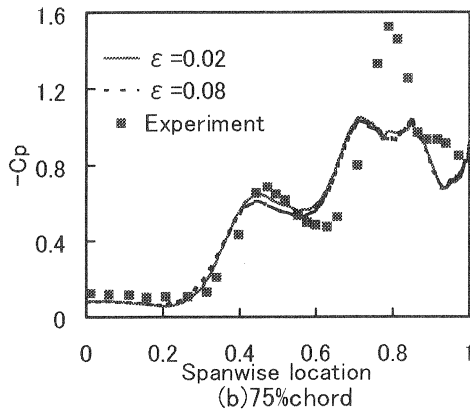
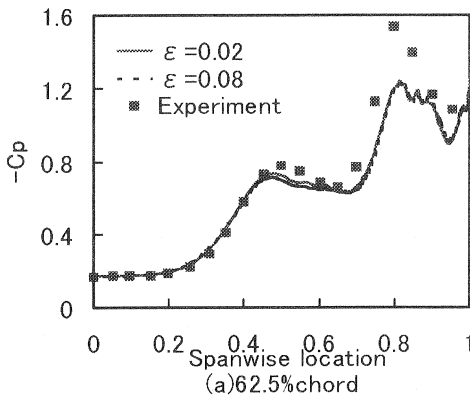


図 15 表面圧力係数分布(The Finer Grid)

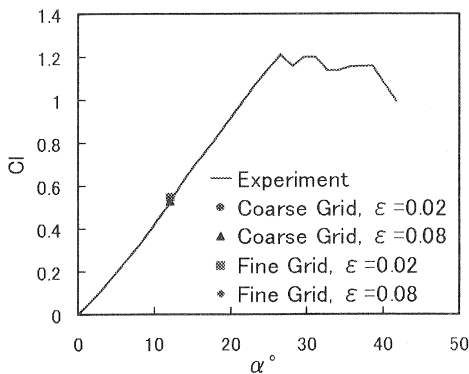


図 16 揚力係数分布

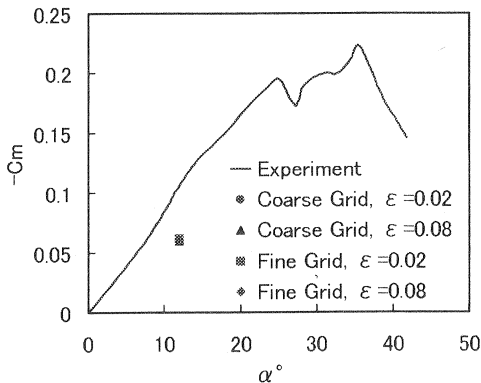


図 17 ピッチングモーメント係数分布

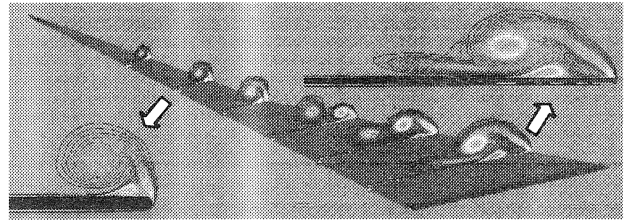


図 18 全圧分布

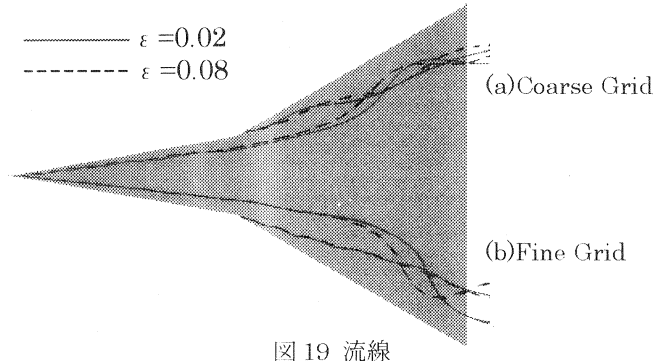


図 19 流線

4. まとめ

デルタ翼とダブルデルタ翼の流れの数値シミュレーションについて、格子解像度と entropy fix の影響に着目することによって、それぞれの翼の計算の信頼性について検証を行った。デルタ翼とダブルデルタ翼ともに、それらの影響によって二次剥離渦に違いが生じ、そのために前縁剥離渦の位置と強さに違いが生じることがわかった。デルタ翼では渦の位置と強さに違いが生じて、この二つの条件がうまく重なって空力特性が実験と良く一致することが多い。それに対してダブルデルタ翼では、渦の位置と強さの違いが二つの渦の干渉・融合に大きな影響を及ぼし、空力特性の把握が困難となることが明らかとなった。

参考文献

- (1) A. Harten, "On a Class of High Resolution Total-Variation-Stable Finite-Difference Schemes", SIAM J. Num. Anal., Vol. 21, pp. 1-23, 1984.
- (2) Yee, H. "Upwind and Symmetric Shock-Capturing Schemes", NASA TM 89464, May, 1987.
- (3) Roe, P.L., "Approximate Riemann Solvers, Parameter Vectors, and Difference Schemes", Journal of Computational Physics, 43, 357-372, 1981.
- (4) Van Leer, B. "Toward the Ultimate Conservative Difference Scheme. 5, A Second-Order Sequel to Godunov's Method", Journal of Computational Physics, 32, 101-136, 1979.
- (5) Fujii, K., "Efficiency Improvements of Unified Implicit Relaxation/Time Integration Algorithms and Their Applications", AIAA Paper 97-2105, 1997.
- (6) Hummel, D., "On the Vortex Formation over a Slender Wing at Large Angles of Incidence", High Angle of Attack Aerodynamics, AGARD-CP-247, Paper No.15, 1997.
- (7) Brennenstuhl, U. and Hummel, D., "Vortex Formation Over Double-Delta Wing", ICAS Paper82-6.6.3, 1982.
- (8) J. L. Thomas, S. L. Taylor, and W. K. Anderson, "Navier-Stokes Computations of Vortical Flows over Low Aspect Ratio Wings", AIAA Paper 87-0207, 1987.
- (9) 村山光宏, 加藤琢真, 中橋和博, "高迎角デルタ翼前縁剥離渦崩壊の数値シミュレーション", 第 31 回流体力学講演会講演集, pp. 361-364, 1999.