

## 超高速輸送機形状の高揚力装置の空力設計

浅野 宏佳, 越智 章生 (川崎重工業), 井上 隆 (財) 日本航空機開発協会)

## Aerodynamic Design of High Lift Device for HSTP

by

Hiroyoshi ASANO, Akio OCHI (KHI), Takashi INOUE (JADC)

## ABSTRACT

JADC is conducting High Speed Transport Program (HSTP) aiming for the development of next generation high speed aircraft such as supersonic and transonic speed transport. In the FY2003, the authors performed aerodynamic design of high lift device as a part of this program. This paper describes the optimum design of high lift device to improve the lift-to-drag ratio (L/D). The optimization process is based on the response surface method, where the effects of flaps are estimated by linear superposition. Navier-Stokes calculations are performed for the model either with leading-edge flaps or with trailing-edge flaps. Then the performance of the model with all flaps deflected is predicted by adding the effect of leading-edge flap and that of trailing-edge flap. The response surface is created for search of optimum value. This method reduces the computational time required for CFD analysis. Results of Navier-Stokes calculation for the optimum configuration indicate that the present method yields reasonable results.

## 1. はじめに

現在、超音速・遷音速等の次世代の超高速輸送機に関する研究が各国で行われている。これらの機体の多くはその主翼に大きな後退角をもつ低アスペクト比翼を採用しているが、このような翼は離陸時のような大迎角飛行時に大きな揚抗比 (L/D) は得にくい事が知られている。このことから、離陸時の必要滑走路長や上昇率において十分な性能が得られず、またエンジン推力の増大、空港周辺の騒音等の問題につながると考えられる。

本研究は、クランクトアロー翼の揚抗比を改善するために高揚力装置を検討し、離陸時の揚抗比について最適化を行ったものである。

## 2. 最適化手法

## 2.1 機体概要

今回検討を行うのは、超高速輸送機実用化開発調査において検討されている機体である。機体形状の概略を図1に示す。客席数 200~300 席、マッハ数 1 近傍の亜音速で巡航する機体で、主翼にはクランクトアロー翼が採用されている。今回はこの主翼の前後縁にプレーンフラップを取り付けた形状について前・後縁フラップ舵角の最適化を行う。

## 2.2 最適化手法

推算式<sup>1)</sup>を使って、仕様の離陸距離をみたすような  $C_L$  を求めると 0.8 となる。この機体は重量・サイズが同程度の既存機に比べ翼面積が大きいので、離陸時にそれほど大きな  $C_L$  は必要ない。この機体での高揚力装置の役割は、離陸に必要な揚力を稼ぐというよりもむしろ L/D を向上させることにあると考えられる。

最適化の目的は、離陸時の  $C_L=0.8$  において  $C_D$  が最小となる前・後縁フラップ舵角の組み合わせを求め、離陸時の L/D を最大にすることである。

最適化にはナビエ・ストークス (NS) 解析結果を用いるが、NS 解析をは計算時間がかかるため、今回は解析ケースが少なくても最適化手法を試みる。その手法とは、前・後縁フラップを単独で操舵した場合についてのみ NS 解析を行い、単独の効果を足し合わせることによって、前・後縁フラップを同時に操舵した場合の効果を見積もるというものである。これにより、NS 解析のケース数を大きく減らすことができる。

具体的な手順は以下のようになる。

- ① 前・後縁フラップを単独で操舵した場合の  $C_L$ 、 $C_D$  を NS 解析で求める。
- ② ①で求めた  $C_L$ 、 $C_D$  と基本形態の  $C_L$ 、 $C_D$  との差分  $\Delta C_L$ 、 $\Delta C_D$  をそれぞれ前・後縁フラップ単独の効果として求める。
- ③ 前・後縁フラップ単独の効果を足し合わせて、複合的な操舵を行ったときの効果を見積もる。
- ④ ③の結果を使って複合操舵時のポーラー曲線を作成し、 $C_L=0.8$  での  $C_D$  を計算する。
- ⑤ フラップ舵角を振って上記の手順を繰り返す。
- ⑥ 得られた  $C_D$  の値から応答曲面を作成する。
- ⑦ 最も  $C_D$  が小さい前・後縁舵角の組み合わせを最適舵角として選定する。

得られた結果は足し合わせにより同時操舵した場合の効果を推算したものなので、最後に同時操舵した形態について NS 解析を行い性能を確認する。

## 3. NS 解析

## 3.1 解析手法

解析には川崎重工で開発した非構造格子流体解析コード UG3<sup>2)</sup>を用いた。支配方程式は 3 次元 Navier-Stokes 方程式、乱流モデルは Spalart-Allmaras 1 方程式モデルを採用した。

解析モデルは超高速輸送機の主翼の前・後縁にプレーンフラップを取り付けたものであり、主翼のみの半裁である。図2にフラップの形状を示す。前・後縁フラップとも外舷側は等パーセントコード長、内舷側は等コード長である。それぞれ一番外側のキंक位置が等パーセントコード長の部分と等コード長の部分の境目である。

後縁フラップについては外舷側の幅が 20%コード長の後縁 20%フラップと、30%コード長の後縁 30%フラップの 2 種類、前縁フラップについては外舷側の幅が 10%コード長の前縁 10%フラップについて検討する。

## 3.2 解析ケース

表1に解析ケースの一覧を示す。前縁フラップについては舵角 20、30、40° の 3 通り、後縁フラップについてはそれぞれ舵角 10、20、30、40° の 4 通りで解析を行う。フラップを操舵しない基本形態も含め、ケース数は合計 12 ケースとなる。

今回、フラップを操舵しない場合も含めると前縁フラップ舵角を 4 通り、後縁フラップを 5 通りに分けて解析を行っているが、前・後縁同時操舵した形態すべてを解析する

場合を考えてみると、ケース数は  $4 \times 5$  の 20 ケースとなる。後縁フラップについては 2 種類で検討しているので合計 40 ケースでの解析が必要である。前・後縁フラップ単独の効果を足し合わせて、同時操舵した場合の効果を見積もるという手法により NS 解析ケースを 3 分の 1 程度に減らしている。

それぞれのケースでは迎角を 2、6、10° として計算を行う。また、主流マッハ数 0.3、レイノルズ数  $1.38 \times 10^8$  である。

表面格子は、図 3 のようなもので、格子点数は、表面約 4 万セル、空間約 300 万セルとなっている。

### 3.3 前縁フラップ解析結果

前縁フラップの解析結果を図 4～図 6 に示す。図 4 は  $C_L$  -  $C_D$  のグラフである。同一迎角で見た場合、前縁フラップを使用すると、基本形態と比べて  $C_D$  が大きく減少し、 $C_L$  はあまり変化しない。図 5 は前縁フラップの舵効きである。横軸は前縁フラップ舵角、縦軸は基本形態との  $C_D$  の差分である。迎角 6° では舵角 30～40°、迎角 10° では舵角 30° で  $C_D$  の減少量が最大になっている。図 6 は迎角 10° での等総圧線図である。基本形態（舵角 0°）と比べて、前縁フラップを操舵した場合には、前縁剥離渦の大きさが小さくなっていることがわかる。前縁フラップを操舵すると  $C_D$  が小さくなるのは、前縁剥離渦が前縁フラップにより抑制され、渦による抵抗成分が小さくなるためと考えられる。また、舵角をとるとフラップの面が前向きになり、前縁サクションによる推力成分が大きくなることも理由のひとつと考えられる。

### 3.4 後縁フラップ解析結果

後縁フラップの解析結果を図 7～図 10 に示す。図 7 は後縁フラップ操舵時の  $C_L$  -  $C_D$  である。同一迎角で見た場合、後縁フラップの効果により、 $C_L$ 、 $C_D$  ともに大きく増加するが、ポラー曲線は基本形態から上にずれた形となるので、 $C_L$  一定での  $C_D$  は減少する。図 8 は  $C_L=0.8$  での  $C_D$  を、横軸に後縁フラップ舵角をとりプロットしたものである。後縁 20% フラップ、後縁 30% フラップともに舵角 20～30° で  $C_D$  が最小となることがわかる。図 9、図 10 はそれぞれ後縁 20% フラップ、後縁 30% フラップの迎角 10° における等総圧線図である。舵角毎に特徴的な変化は見られない。

## 4. 最適設計

### 4.1 応答曲面の作成による最適設計

NS 解析結果を用いて、2 節で述べた手順で応答曲面を作成すると図 11 のようになる。横軸は後縁フラップ舵角、縦軸は前縁フラップ舵角で  $C_L=0.8$  における  $C_D$  の等高線が示されている。(a) が前縁 10% フラップ、後縁 20% フラップの組み合わせ、(b) が前縁 10% フラップ、後縁 30% フラップの組み合わせである。前縁 10% フラップ、後縁 20% フラップの組み合わせでは、前縁フラップ舵角 24°、後縁フラップ舵角 26° で  $C_D$  が最小となり、最小値は 0.100 である。また、前縁 10% フラップ、後縁 30% フラップの組み合わせでは前縁フラップ舵角 24° 後縁フラップ舵角 24° で  $C_D$  が最小となり、最小値は 0.101 である。

いずれの組み合わせでも、 $C_L=0.8$  での  $C_D$  の最小値はほぼ同じであったが、フラップサイズが小さいほうが構造的に有利であることを考えて、前縁 10% フラップ、後縁 20% フラップの組み合わせを選択する。

最適形態をまとめると以下ようになる。

- 前縁フラップ幅 外舷側 10%コード長
- 前縁フラップ舵角 24°

- 後縁フラップ幅 外舷側 20%コード長
- 後縁フラップ舵角 26°

$\Delta C_L$ 、 $\Delta C_D$  の足し合わせから検討すると、この形態では  $C_L=0.8$  のとき  $C_D=0.100$  である。また、このときの迎角は 6.42° である。

### 4.2 最適形態の性能確認

最適化では前・後縁フラップ単独の効果を足し合わせて、複合操舵したときの効果を見積もったが、この方法でどの程度性能が予測できているかは疑問が残る。したがって、得られた最適形態について NS 解析を行い、所定の性能が得られるか確認することにする。

図 12 に単独の効果を足し合わせたときの  $C_L$ 、 $C_D$  と複合操舵で NS 解析を行ったときの  $C_L$ 、 $C_D$  を示す。設計点である迎角 6.42° では  $C_L$ 、 $C_D$  ともに足し合わせによる最適化結果と NS 解析結果がよく一致していることがわかる。NS 解析の結果、迎角 6.24° で  $C_L=0.79$ 、 $C_D=0.098$ 、 $L/D=8.1$  であり、所定の性能が得られることが確認できた。

最適形態と基本形態、後縁フラップ操舵時を比較したものが、図 13、図 14 である。図 13 の  $C_L$  -  $C_D$  のグラフから、最適形態では基本形態に比べて、 $C_L=0.8$  での  $C_D$  が大きく減少していることがわかる。図 14 のように  $C_L=0.8$  での  $L/D$  を比較してみると、基本形態の  $L/D=4.4$  に対して、最適形態では  $L/D=8.1$  と向上した。

## 5. まとめ

超高速輸送機の高揚力装置について NS 解析結果を用いた前・後縁フラップの  $L/D$  最適化をおこなった。その結果得られた最適形態では、基本形態の  $L/D=4.4$  から  $L/D=8.1$  と向上した。

最適化では、前・後縁フラップの単独の効果を線形に足し合わせることによって、複合操舵したときの効果を見積もった。この方法により見積もった結果と同時操舵の NS 解析結果はよく一致しており、足し合わせで複合効果がある程度予測できることがわかった。

本作業は、(財)日本航空機開発協会における平成 15 年度超高速輸送機実用化開発調査の一環として実施したものである。

## 参考文献

- 1) Raymer, D.P., "Aircraft Design: A Conceptual Approach, 3rd ed.", AIAA, Washington, 1999, pp 99.
- 2) 嶋英志, "川崎重工業における空力設計のための CFD 技術の開発について", 数値流体力学会誌第 6 巻第 2 号, pp.45-57, 1998

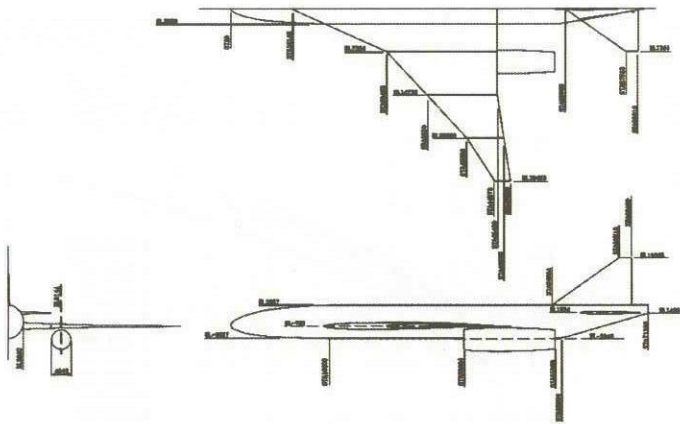


図1 超高速輸送機 機体三面図

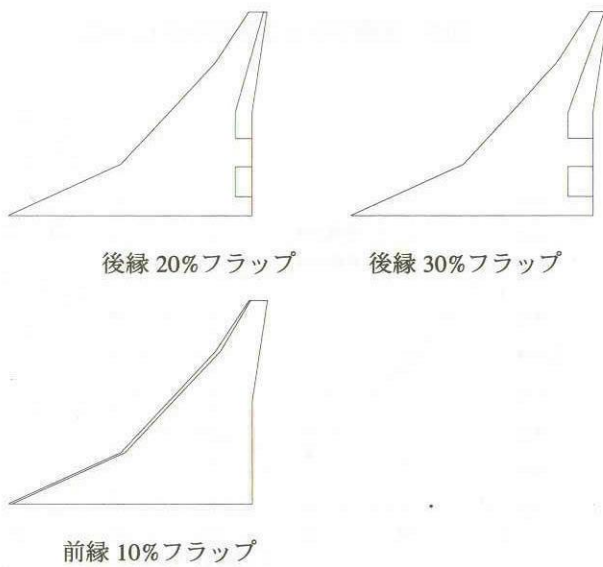


図2 フラップ形状

表1 解析ケース

形態	ケース番号	舵角 [deg]
基本形態	1	0
前縁フラップ サイズ 10%	2	20
	3	30
	4	40
後縁フラップ サイズ 20%	5	10
	6	20
	7	30
	8	40
後縁フラップ サイズ 30%	9	10
	10	20
	11	30
	12	40



図3 計算格子 (後縁 30%フラップ 舵角 30°)

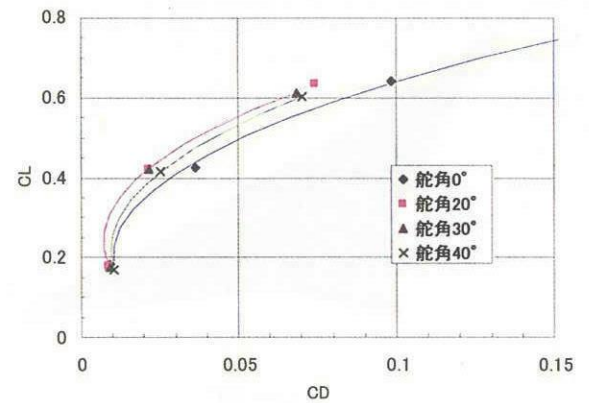
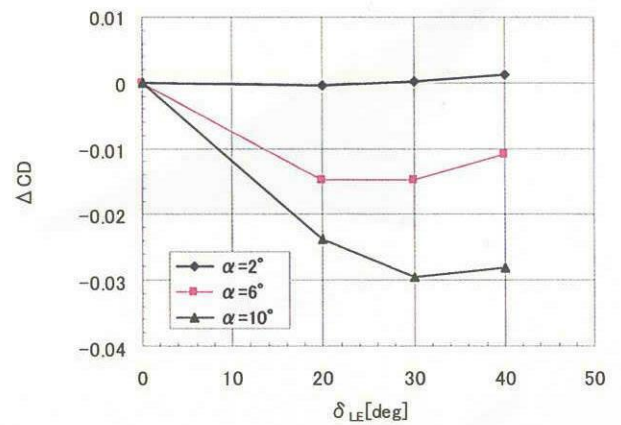
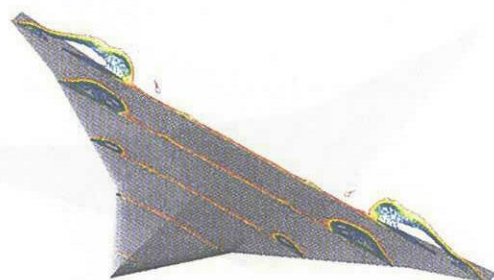
図4 前縁フラップ操舵時の  $C_L$ - $C_D$ 

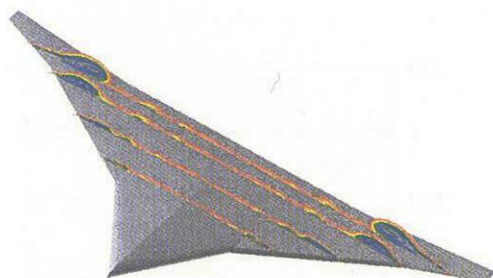
図5 前縁フラップ舵効き



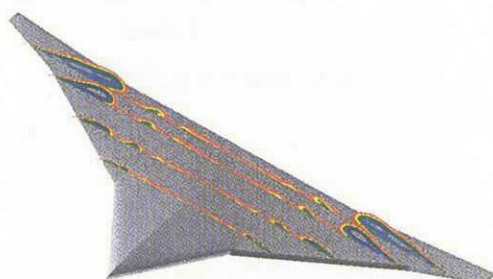
$\delta_{LE}=0^\circ$



$\delta_{LE}=20^\circ$



$\delta_{LE}=30^\circ$



$\delta_{LE}=40^\circ$

図 6 等総圧線図

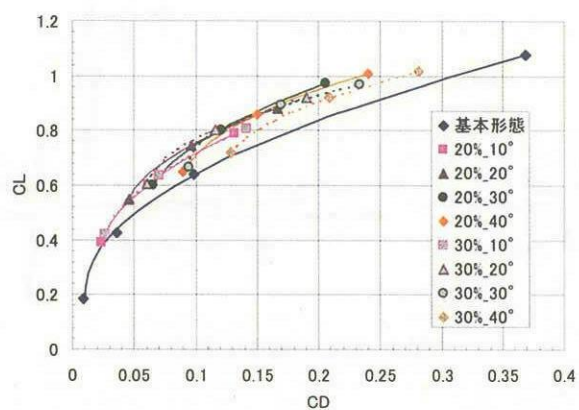


図 7 後縁フラップ操舵時の  $C_L$ - $C_D$

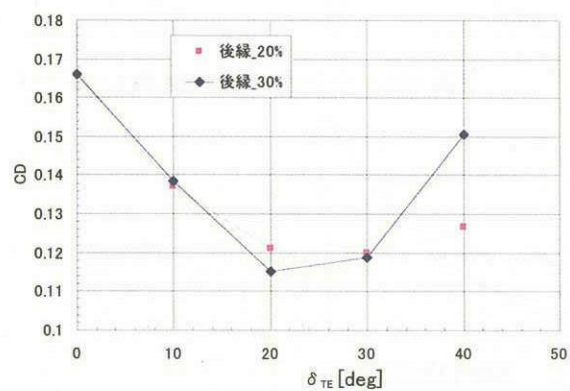
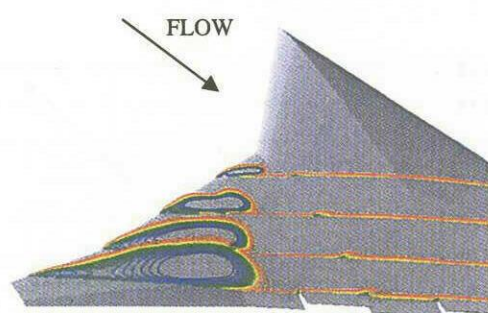
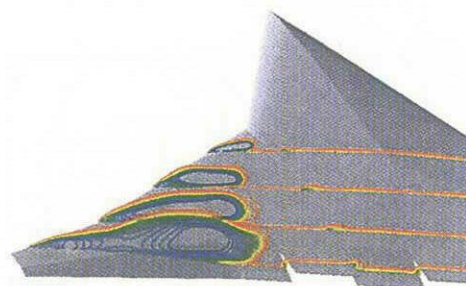


図 8  $C_L=0.8$  での  $C_D$

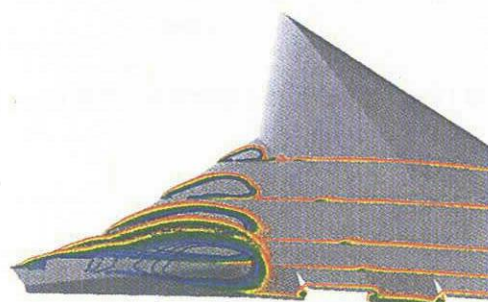




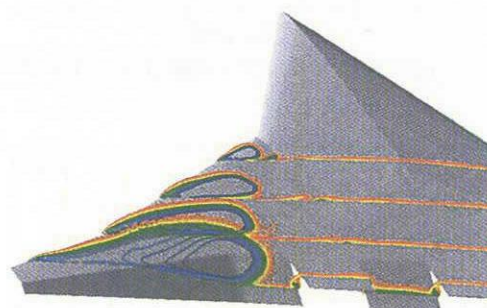
$\delta_{TE}=10^\circ$



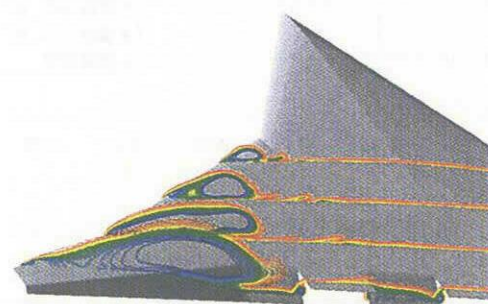
$\delta_{TE}=10^\circ$



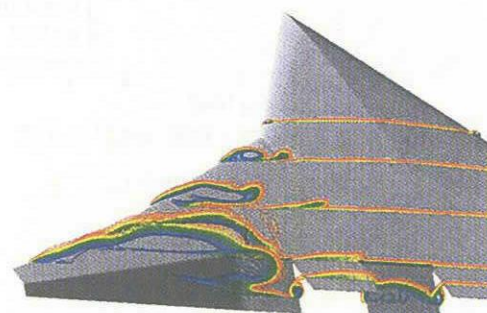
$\delta_{TE}=20^\circ$



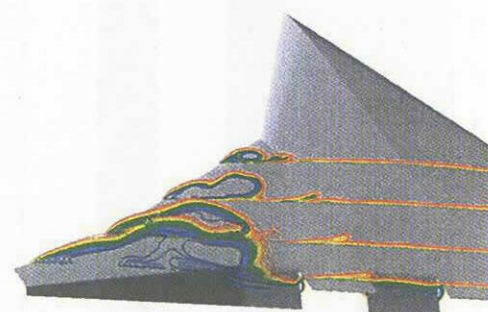
$\delta_{TE}=20^\circ$



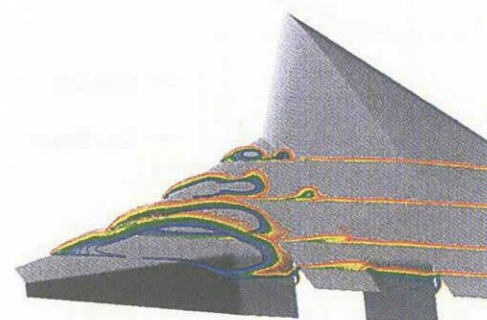
$\delta_{TE}=30^\circ$



$\delta_{TE}=30^\circ$



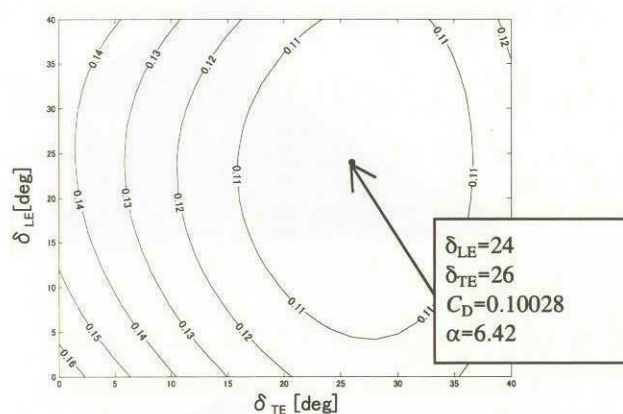
$\delta_{TE}=40^\circ$



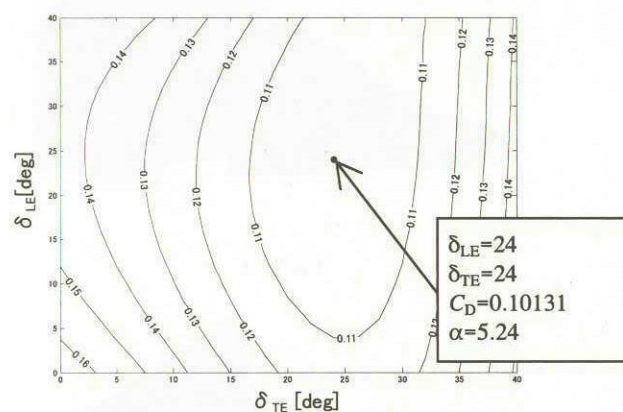
$\delta_{TE}=40^\circ$

図9 等総圧線図（後縁 20%フラップ 迎角  $10^\circ$ ）

図10 等総圧線図（後縁 30%フラップ 迎角  $10^\circ$ ）



(a) 前縁フラップ+後縁 20%フラップ



(b) 前縁フラップ+後縁 30%フラップ

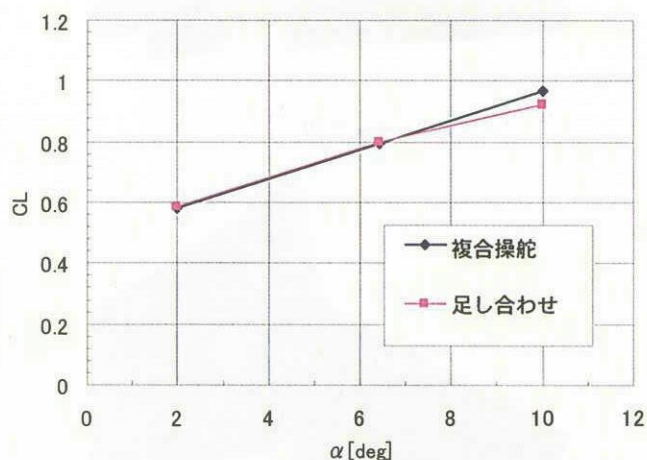
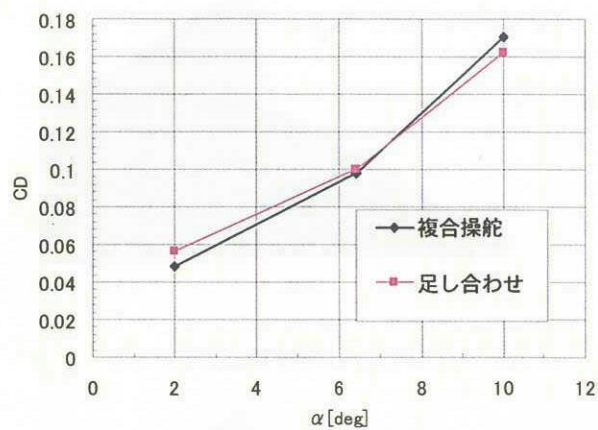
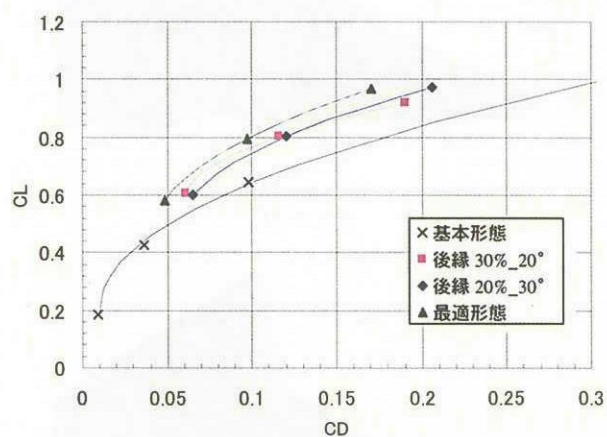
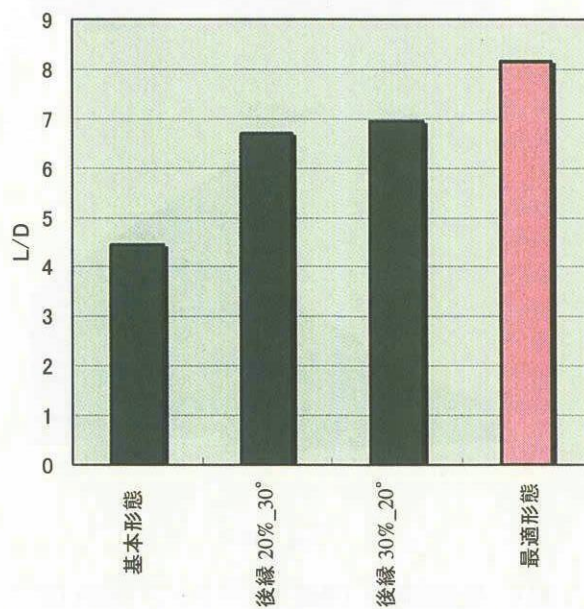
図 11  $C_L=0.8$  での  $C_D$ 図 12(a) 足し合わせと複合効果の比較 ( $C_L - \alpha$ )図 12(b) 足し合わせと複合効果の比較 ( $C_D - \alpha$ )図 13 最適形態と他形態の比較 ( $C_L - C_D$ )

図 14 L/D 比較