

超音速航空機(SST)形態の高揚力装置に関する実験的研究*

郭 東潤^{*1}, 宮田 勝弘^{*2}
野口 正芳^{*1}, 砂田 保人^{*3}, 李家 賢一^{*3}

Experimental Investigation of High Lift Device for SST*

Dong-Youn KWAK^{*1}, Katsuhiko MIYATA^{*2}, Masayoshi NOGUCHI^{*1}
Yasuto SUNADA^{*3}, Kenichi RINOIE^{*3}

ABSTRACT

Wind tunnel tests were conducted to investigate the aerodynamic characteristics of an SST model with leading-edge and trailing-edge flaps. Force measurement and surface pressure measurement were performed for the SST model with leading-edge flaps or with trailing-edge flaps and with both flaps deflected. Flow patterns on the upper surface of the model were visualized by means of oil-flow and smoke. Lift-to-drag ratio of the model was improved by leading-edge flap deflection. Deflecting the trailing-edge flap increased lift, drag and pitch-down moment drastically. When the trailing-edge flap was deflected to ten degrees, lift-to-drag ratio could also be improved. The combined effects of leading-edge and trailing-edge flaps were discussed by comparison with the linearly combined measurement results when the leading-edge and trailing-edge flaps were deflected separately.

Keywords: SST, Leading-edge Flap, Vortex Flap, Trailing-edge Flap

概 要

高揚力装置(内翼前縁フラップ、外翼前縁フラップおよび後縁フラップ)付き SST 形態で風洞実験を行い、離着陸性能に関する各種フラップの有効性を検討した。空気力測定と翼表面圧力測定を行い、各種フラップを単独で操舵した場合や複数のフラップを組合せて操舵した場合のフラップの効果について調べた。オイル・フローや煙による流れの可視化を行うことによって翼周りの流れを把握し、空気力や圧力測定結果との対応を試みた。内翼前縁フラップや外翼前縁フラップ単独では揚抗比 L/D の改善はわずかであった。後縁フラップは揚力係数が大幅に増加するとともに、後縁フラップ舵角が小さい場合では大幅な L/D の改善も得られた。前縁フラップと後縁フラップを組合せて操舵した場合にはさらに大幅な L/D 改善が実現でき、前縁フラップと後縁フラップを組合せて操舵した場合は前縁フラップ、後縁フラップ単独操舵による効果を足し合わせた場合より L/D の改善幅の大きい結果が得られた。L/D や揚力係数における各種フラップの有効性をまとめるとともに、これらの実験結果を利用して L/D における最適フラップ舵角に関する知見を得た。

* 平成 14 年 1 月 7 日受理 (Received 1 January 2002)

*1 次世代超音速機プロジェクトセンター (Next Generation SST Project Center)

*2 技術研修生、東京大学大学院 (University of Tokyo) 現)日本航空株式会社

*3 東京大学工学系研究科航空宇宙工学専攻 (Dept. Aeronautics & Astronautics, University of Tokyo)

1. 序 論

超音速航空機(SST)の主翼に使用される大きな後退角を持つ低アスペクト比翼は従来の航空機に比べ揚力傾斜が小さいことが知られている。そのため離着陸のような低速飛行状態では大きな迎角を取ることが要求される。このとき、翼面上には一対の前縁剥離渦が形成され、それによって翼に働く揚力は増大するが、同時に抵抗も増大してしまう。その際、抵抗の増大の割合が大きいため揚抗比(L/D)特性が悪くなるのが低アスペクト比翼の低速での短所として挙げられる。このため、高いL/Dや揚力係数(C_L)を実現し、離着陸性能を改善させる高揚力装置の適用が必要である。高揚力装置には前縁ポルテックス・フラップや前縁フラップなどL/Dを改善するためのデバイスや、着陸時の高い揚力係数 C_L を得るためのデバイスとして代表される後縁フラップなどがある。

前縁ポルテックス・フラップとは、前縁フラップの一種であり、下方に操舵したフラップ上に生じさせた前縁剥離渦の発生する前方吸引力を利用して翼の揚抗比を改善するデバイスである¹⁾。後退角の大きなデルタ翼(低アスペクト比翼)に有効であり、クランクト・アロー翼においては、後退角がより大きい内翼側において効果を発揮すると考えられる。

なお SST 形態の高揚力装置に関する研究としては参考文献 2,3,4 等がある。しかし各種フラップを組合せて使用されたときにどのような物理的理由で効果があらわれるか詳しくは調べられていない。

そこで本研究では、比較的簡単な機構により実現できる前縁フラップや後縁フラップに着目し、現在、当所(航空宇宙技術研究所:NAL)で進められている次世代超音速機プロジェクト^{5,6)}で主翼に採用されているクランクト・アロー翼(小型超音速ジェット実験機 01 形状)の内翼前縁、外翼前縁及び後縁をフラップ化し、各フラップの有効性を検討するとともに、複数のフラップを組合せて操舵した場合の複合的効果について調べることを目的として風洞実験を行った。なお、本実験結果をもとに SST 形態の高揚力装置設計に役立つデータベースの構築を試みた。

記 号 表

b	: 全スパン長 [m]
c	: 平均空力翼弦長 [m]
C_D	: 抗力係数 ($= D / (q S_w)$)
C_L	: 揚力係数 ($= L / (q S_w)$)
C_m	: ピッチングモーメント係数: 平均空力翼弦の 25% 位置 ($= M_y / (q c S_w)$)
C_p	: 圧力係数 ($= (P - P_\infty) / q$)
C_r	: 翼根部での翼弦長 [m]

D	: 抗力 [N]
L	: 揚力 [N]
M_y	: ピッチングモーメント [Nm]
P	: 翼表面圧力 [Pa]
P_∞	: 一様流静圧 [Pa]
q	: 一様流動圧 ($q = 0.5 \rho U_\infty^2$) [Pa]
Re 数	: 平均空力翼弦長に基づくレイノルズ数 ($= U_\infty c / \nu$)
S_w	: 翼面積 [m ²]
U_∞	: 一様流速 [m/s]
X	: 翼頂点から機軸方向への距離
Y	: 模型機軸からスパン方向への距離
α	: 迎角 [deg]
β	: 横すべり角 [deg]
δ_f	: フラップ舵角 [deg]
	δ_{fLEin} : 内翼前縁フラップ舵角
	δ_{fLEout} : 外翼前縁フラップ舵角
	δ_{fTE} : 後縁フラップ舵角
δ_{fmax}	: 最大フラップ舵角 [deg]
	($\delta_{fLEinmax} : 30^\circ, \delta_{fLEoutmax} : 12.2^\circ$ $\delta_{fTEmax} : 30^\circ$)
δ_{fopt}	: 最適フラップ舵角 [deg]
$\delta_{fopt} / \delta_{fmax}$: 最適フラップ舵角係数
	: 後退角 [deg]
	: 動粘性係数 [m ² /s]
	: 空気密度 [kg/m ³]

模型形状の定数

(例) S301210

1 文字目 : 前縁形状

S : クリーン形態と同じ内翼前縁形状を示す。

2,3 文字目 : 内翼前縁フラップ舵角

30 : 30°

4,5 文字目 : 外翼前縁フラップ舵角

12 : 12.2°

6,7 文字目 : 後縁フラップ舵角

10 : 10°

2. 実験装置及び方法

本研究では2つの風洞を用いてそれぞれの風洞の長所を生かした実験を行った。航空宇宙技術研究所(NAL)の第二低速風洞(今後これを第二低速風洞と呼ぶことにする)では空力測定や圧力測定、オイル・フローを行った。また、東京大学工学系研究科航空宇宙工学専攻のフラッタ風洞(押込み式小型低速風洞:今後これをフラッタ風洞と呼ぶことにする)では煙による流れの可視化を行った。

2.1 NAL2m x 2m 低速風洞実験

風洞は2m x 2m の測定部を持つ回流型風洞であり、精度の高い空気力や圧力測定が可能であるため、内挿天秤による6分力測定や翼表面圧力測定を行った。また、オイル・フロー法によって翼面上の流れを把握することを試みた。

2m x 2m 低速風洞実験に用いた SST 形態模型(今後これを NAL 模型と呼ぶことにする)の概略図を図 1 に示し、模型の諸元を表 1 にまとめた。NAL 模型はフラップを操舵していない形態(クリーン形態)が当所で研究・開発が進められている小型超音速ジェット実験機^{5,6)}の第01次概念形状模型と同一のものである。NAL 模型は主翼と胴体から構成され、主翼はクランクト・アロー翼である。機体軸から翼端方向にセミ・スパン長の 55%位置に内翼と外翼の

kink を持つ。フラップを操舵していないクリーン形態の主翼平面形は、外翼側の後退角を浅くしてアスペクト比を向上させることにより低速空力特性の改善を図った設計になっている。また、主翼には揚力依存抵抗を低減させるべく超音速揚力面理論(Carlson 法)により捻じりとキャンパー分布を最適に組み合わせたワープ設計⁷⁾がなされている。内翼の翼断面は NACA66 シリーズの翼厚分布を有し、外翼側はキャンパー付き厚み比 3% の biconvex 翼の厚み分布を有する(図 2)。主翼と胴体との取り付け部では機軸に対して0.8°の取り付け角を持ち、内翼から外翼へ行くに従い強い捻じり下げが施され、内翼から外翼に転じる kink 位置では機軸に対して-3.7°となっている。また翼端では-3°である。主翼には内翼前縁、外翼前縁および後縁をフラッ

表 1 風洞実験模型の諸元

SST模型	NAL模型	東大模型	
模型全長[m]	1.360	0.272	
模型全幅 b [m]	0.838	0.168	
翼面積 Sw [m ²]	0.292	0.012	
平均空力翼弦長 C [m]	0.459	0.092	
後退角 Λ [deg]	66/42		
アスペクト比	2.42		
主翼	内翼断面	NACA66シリーズ	平板(前・後縁を鋭く)
	外翼断面	3%Biconvex	平板(前・後縁を鋭く)
	取付け角 [deg]	1.58	0
	その他	ワープ形状	平板
フラップ舵角変更	フラップ交換	主翼交換	
圧力孔	0.55Cr,0.83Crに20点	なし	

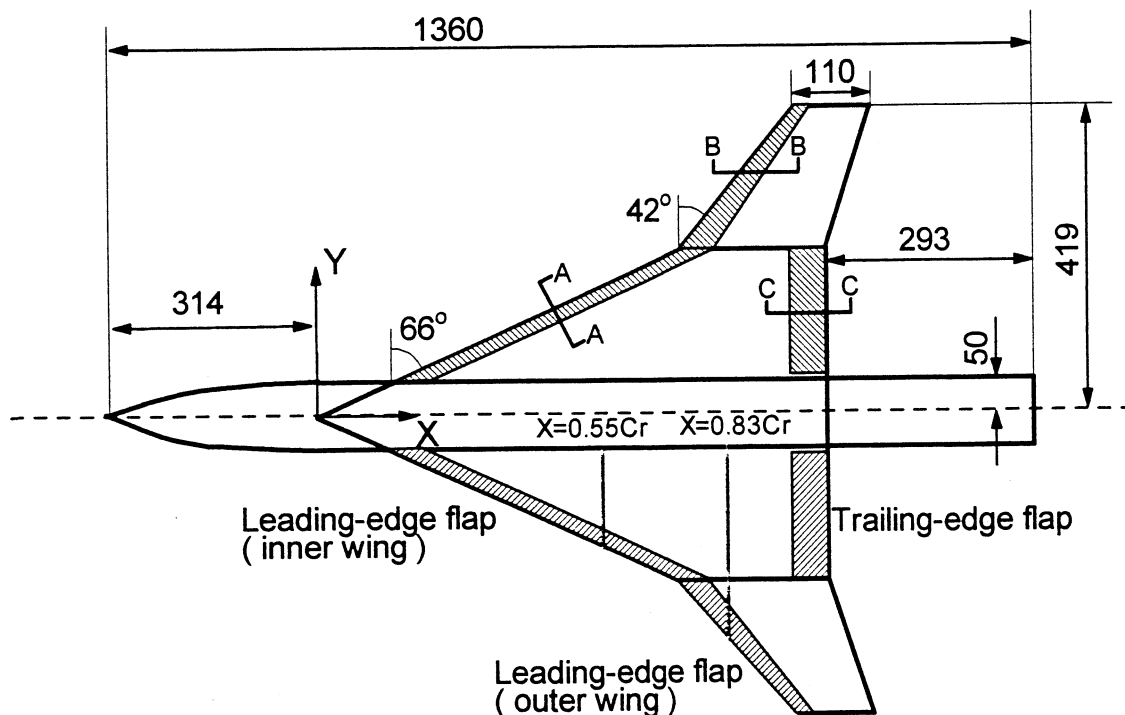


図 1 NAL-SST 模型概略図 (単位: mm)

ブ化し舵角が異なるフラップが取り付けられるようになっている。内翼前縁フラップは後退角が大きいことからポルテックス・フラップとして効果を発揮することが考えられる。ただし、本稿では内翼前縁フラップと表記することにする。各種フラップの舵角や諸元を表2に示す。フラップの断面形状はフラップの舵角以外はクリーン形態と同一である(図3)。内翼前縁フラップの舵角 $\delta_{fLEin} = 30^\circ$ と外翼前縁フラップ舵角 $\delta_{fLEout} = 12.2^\circ$ の場合、kink位置で前縁が滑らかにつながる。 $\delta_{fLEin} = 15^\circ$ と $\delta_{fLEout} = 5^\circ$ の場合

も同様である。内翼・外翼前縁フラップ舵角の組合せによってはkink位置での模型前縁が不連続になる場合(例えば $\delta_{fLEin} = 30^\circ$ 、 $\delta_{fLEout} = 0^\circ$)があり、この際には粘土による簡単な整形を行った。左翼上面には翼頂点からの機体軸方向への距離 $X = 0.55 C_r$ 、 $0.83 C_r$ 位置に各10点の計20点の静圧孔が設けられている。静圧孔は前縁付近での前縁剥離渦による圧力変化を捕らえるため、翼中心から翼端(前縁)に行くにつれ密に位置している(図4)。全長の約25%までがogive coneの前胴部であり、後胴部は直径

表2 NAL 模型の各種フラップの諸元

	内翼前縁フラップ	外翼前縁フラップ	後縁フラップ
舵角[deg]	0,15,30	0.5,12.2	0,10,30
フラップ面積/主翼面積	2.9%	2.2%	3.5%
フラップ幅(翼弦長方向)	Cの10%	局所翼弦長の20%	Cの12.5%

フラップ舵角の定義：内翼前縁、後縁フラップはヒンジラインに垂直方向、
外翼前縁フラップは機体軸の X-Z 面

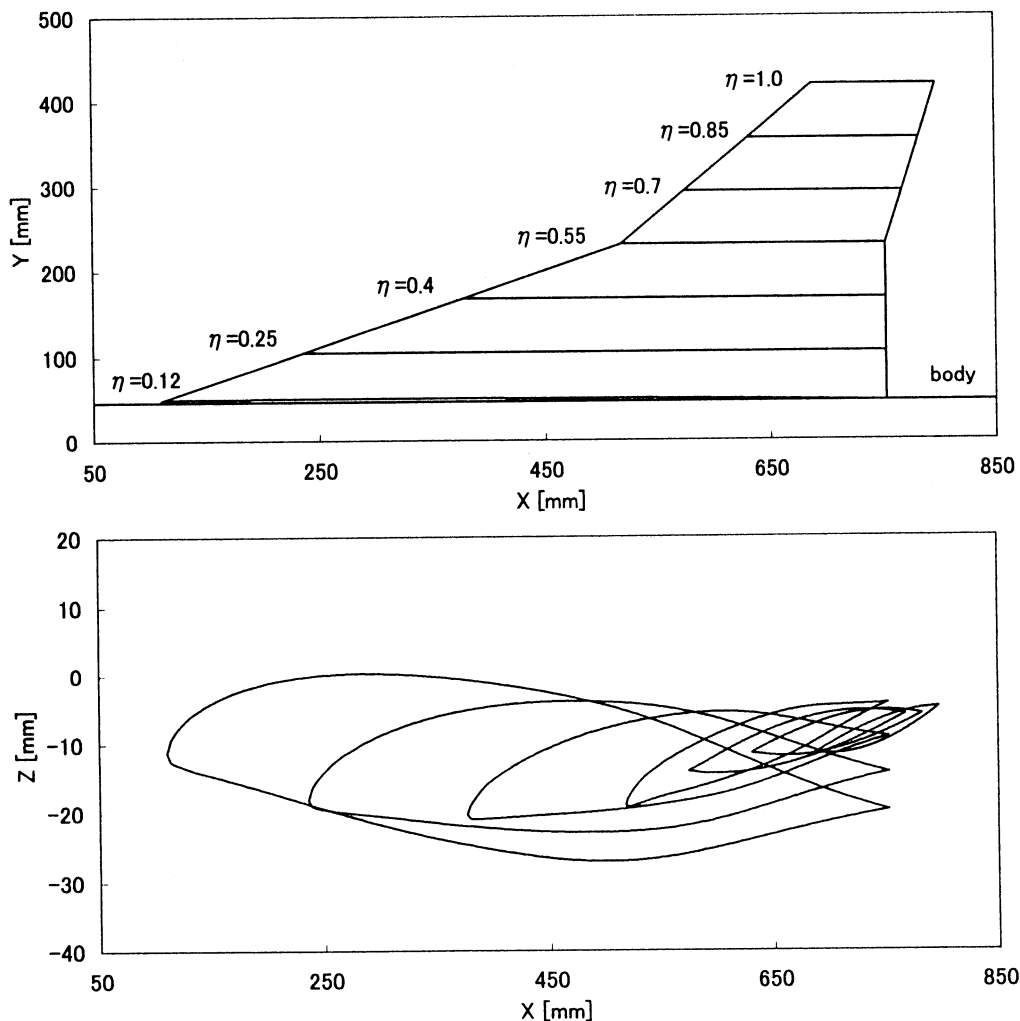


図2 翼断面の詳細 (NAL 模型、クリーン形態)

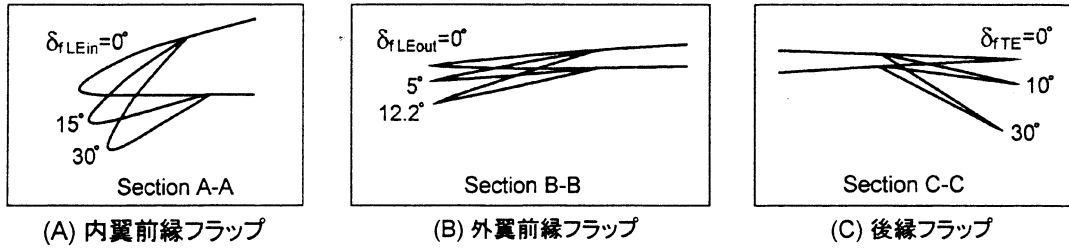


図3 NAL-SST 模型の各フラップ断面図
(図1参照、縮尺は図によって異なる)

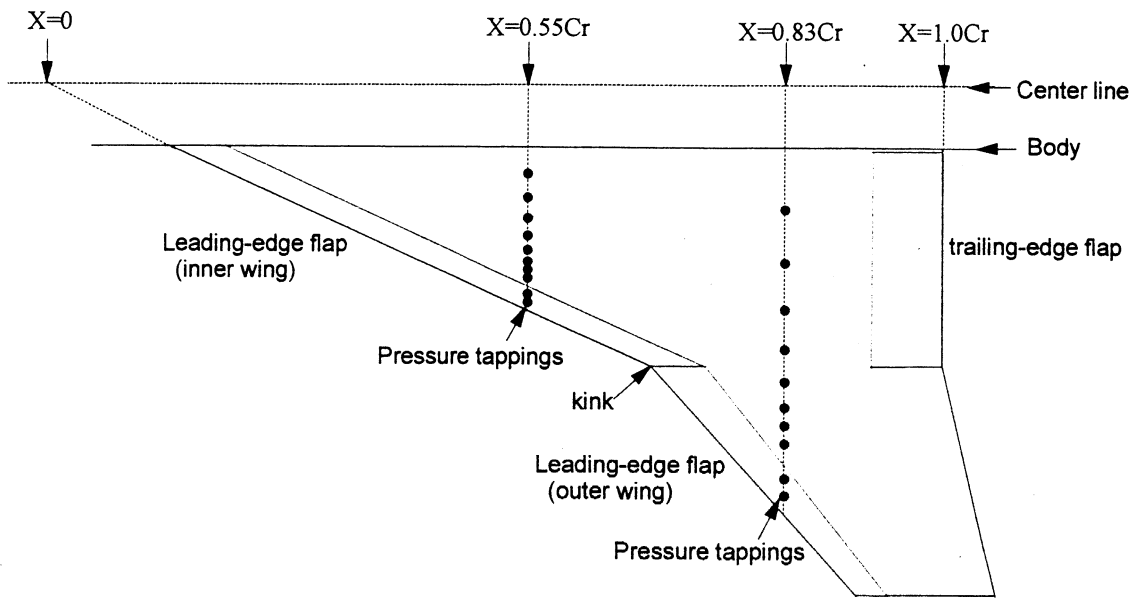


図4 翼表面圧力孔位置 (左翼上面)

表3 実験諸条件および計測範囲

計測内容	2m x 2m 低速風洞試験	フラッタ風洞試験
	計測内容	空気力6分力, 翼表面圧力, オイル・フロー
一様流速 U_∞ [m/s]	30	10
Re数	9.45×10^5	6.2×10^4
迎角 α [deg]	$-4^\circ \sim 30^\circ$	$5^\circ, 12^\circ, 20^\circ$
横滑り角 β [deg]	0°	0°

10cmの円柱である。

2m x 2m 低速風洞での模型の様子を図5に示す。模型はスティングを介してロボット・アーム支持装置⁸⁾に取り付けた。ロボット・アームは3軸方向に移動・回転が可能であり、模型が常に風洞測定部中心位置を保つことができる。圧力測定実験は圧力配管による力測定への干渉を避けるため力測定実験とは別途に行った。風洞実験の諸条件や計測範囲を表3にまとめて示す。Re数は平均空力コード長を基準長としている。

計測されたデータは閉塞効果による動圧の補正、ベース圧、キャピティ圧補正を施し、また風洞壁による影響を補

正した⁹⁾。

2.2 東大フラッタ風洞試験

フラッタ風洞は、開放型測定部で0.6m x 0.6mの吹出口を持つ押込式風洞であり、その概略図を図6に示す。小型風洞であることと開放型測定部であるため可視化実験が容易である。今回はSST形態の模型周りの流れを把握するため、煙による流れの可視化実験を行った。

風洞吹出口の上流から流れに煙を注入させ、模型上部から翼面に垂直方向(機体軸にも垂直方向)に照らしたレーザーシートで流れを可視化し、模型後方に位置させたビデオ

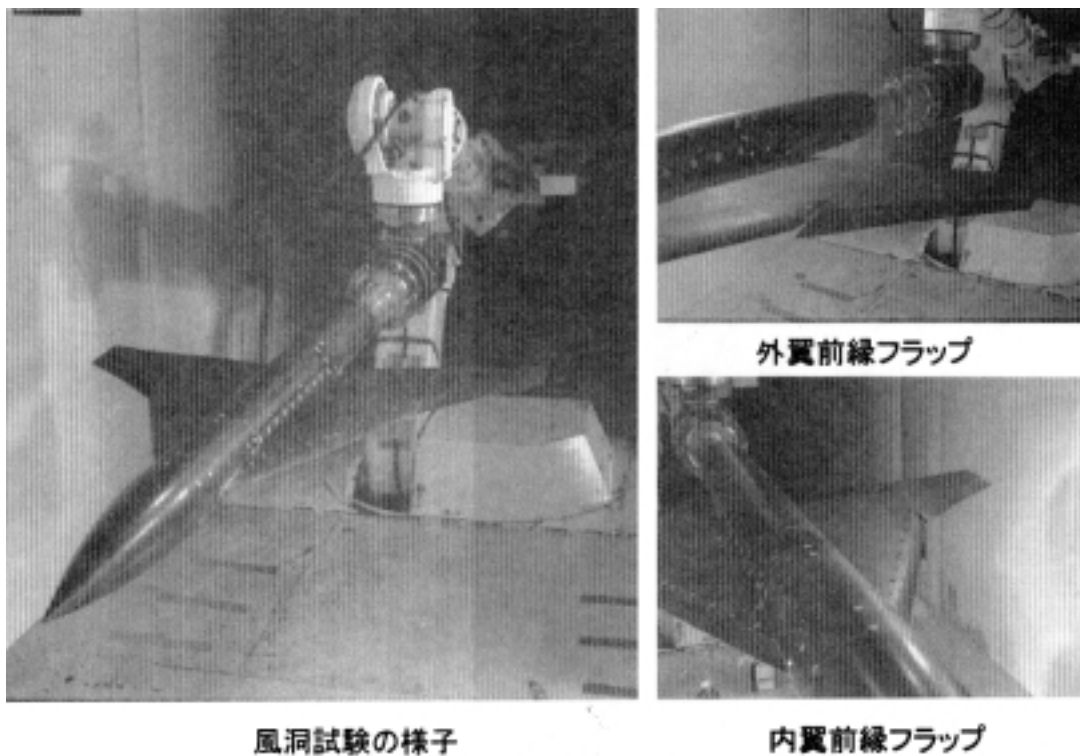


図5 NAL2m × 2m 低速風洞実験の様子

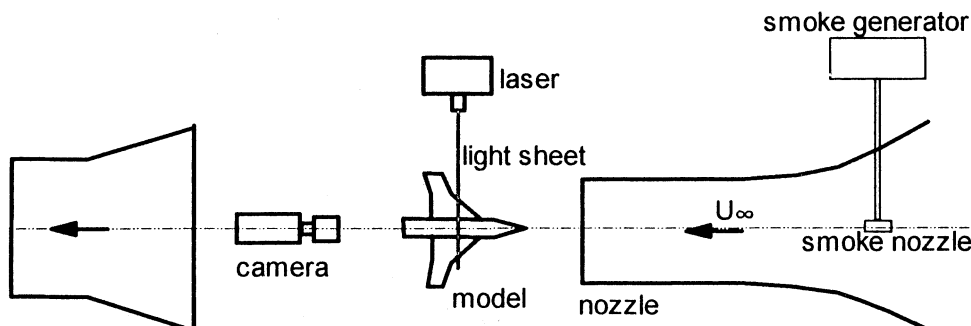


図6 東大フラッタ風洞実験の様子

オ・カメラを用いて撮影した。東大フラッタ風洞実験用模型(今後これを東大模型と呼ぶことにする。)はNAL模型と同一の平面形を持ち、NAL模型に比べ20%の大きさである。ワープ形状の主翼を持つNAL模型に対して、東大模型は前縁・後縁を鋭く仕上げた平板翼である。異なったフラップ舵角を持つ6種類(S000000, S300000, S001200, S000030, S301200, S301210:記号表参照)の主翼を製作し、主翼を交換して実験を行った。NAL模型と東大模型では模型形状が多少異なっており、形状の違いや Re 数の差異により両者の流れ場が異なることが懸念された。このため、東大模型の空力測定を行い2m × 2m 低速風洞実験結果と比較した。法線力測定結果(図A-1参照)の比較から両者の定性的な特性が一致しており、2m × 2m 低速風洞実験結果とフラッタ風洞実験の可視化結果との定性的な比較が

可能であることが確認された。フラッタ風洞実験の諸条件や計測範囲を2m × 2m 低速風洞実験の場合と比較して表3に示す。可視化した翼弦方向位置は $X = 0.3 C_r, 0.55 C_r, 0.8 C_r$ の3ヶ所である。

3. 実験結果

3.1 クリーン形態の空力特性

全てのフラップを操舵していない($\delta_{fLEin} = \delta_{fLEout} = \delta_{fTE} = 0^\circ$)形態をクリーン形態(S000000)と称し、クリーン形態の空力特性を図7(図7(A):縦3分力、図7(B): $L/D-C_L$)に示す。 6° 付近からわずかに C_L の非線形的な増加が見られる。 12° ~ 25° では C_L は線形的に増加し、 30° 付近で $(C_L)_{max}$ を示す。また、 C_L の増加とともにピッチング・モーメント係数 C_m (機首上げ方向が正)が機

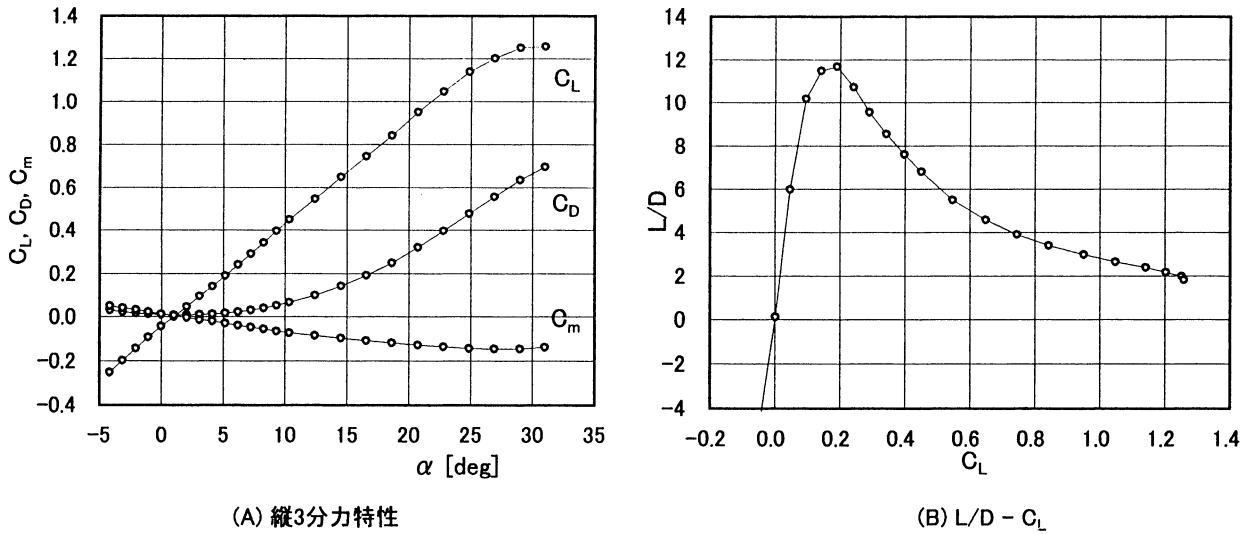


図7 クリーン形態の空力特性(S000000)

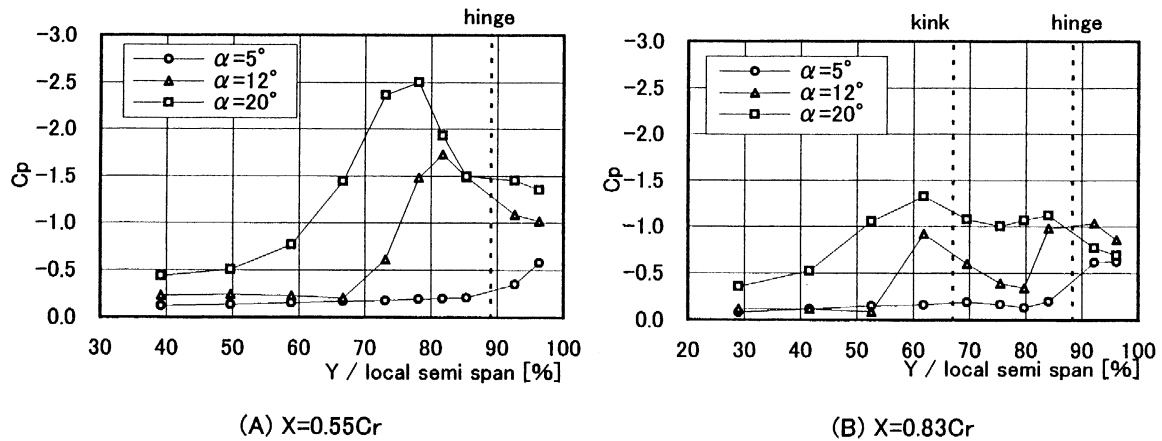


図8 クリーン形態の翼表面圧力分布(S000000)

首下げの方向に増加している。L/D 曲線(図 7(B))を見ると $C_L = 0.18$ で $(L/D)_{max} = 11.69$ 、 $C_L = 0.5$ で $L/D = 6.12$ を示している。図 8 には翼表面静圧 C_p 分布を示す。 $\alpha = 5^\circ$ の場合、翼コード位置 $X = 0.55C_r$ の翼端近く(内翼前縁: 図 4 参照)で C_p の絶対値の増加が見られる(図 8(A))。 $\alpha = 12^\circ, 20^\circ$ になると C_p のピーク値は増大し、またその位置も翼中心方向に移動する。これは図 9 に示す可視化結果(模型を左斜め後方から撮影)から、翼面上に形成される前縁剥離渦の翼スパン方向の位置変化と対応できる。 $X = 0.83C_r$ 位置の C_p 分布(図 8(B))では、 $\alpha = 5^\circ$ の場合前縁付近で C_p のピークが見られ、これは外翼前縁で形成された前縁剥離渦位置と対応できる(図 9(A))。 $\alpha = 12^\circ$ の場合の $X = 0.83C_r$ では 2 つの圧力のピークが見られる(図 8(B))。内側のピークは内翼前縁で形成された剥離渦位置と、外側のピークは外翼前縁から形成される剥離渦位置と対応できる(図 9(B))。また、 $X = 0.8C_r$ では胴体と翼の付根付近に渦状の流れが見られる。これは模型の前胴からの渦であることが流

れの可視化により確認されている。 $\alpha = 20^\circ$ の $X = 0.8C_r$ (図 9(C))では内側の渦のコアがぼやけており、渦崩壊(vortex breakdown)が発生していることが分かる。そのため、図 8(B)の $\alpha = 20^\circ$ での内側で C_p のピークが $\alpha = 12^\circ$ に比べてなだらかになっている。図 10 にはオイル・フロー法によって翼面上の流れを可視化した様子を示す。 $\alpha = 5^\circ$ の場合では内翼・外翼とも前縁付近の狭い領域で前縁剥離渦の形成が推測される流れパターンが見られる。しかし、その他の領域では一様流方向に沿った流れである。 $\alpha = 12.5^\circ$ では内翼側と外翼側での 2 次剥離線は内翼前縁に対してある角度を持ってほぼまっすぐに延びており、2 つ(左右翼では 2 対)の強い渦が形成されているのがわかる。 $\alpha = 20^\circ$ の場合(図 10(C))では内翼側の 2 次剥離線が kink を過ぎてから外側に膨らんでおり、外翼側の渦による流れのパターンは観察されない。図 9(C)では外翼側に渦が翼面から浮きあがって位置していることが観察される。

図 11 にオイル・フロー法から得られた翼面上の流れの

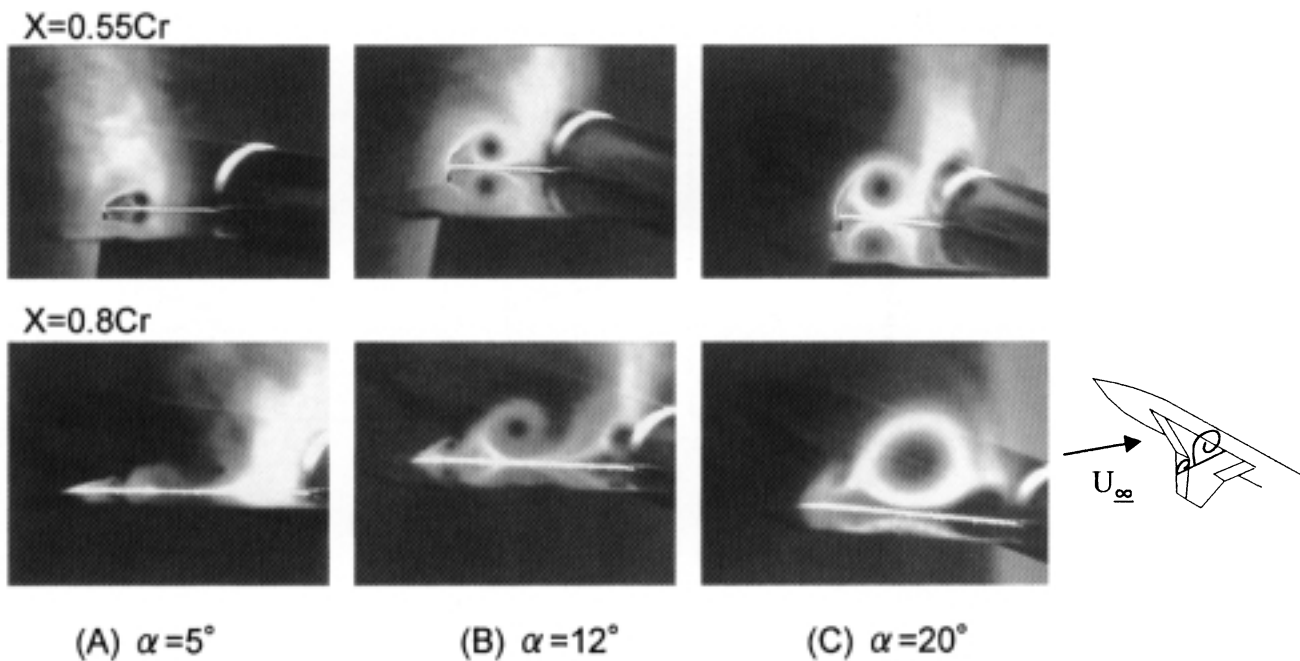


図9 クリーン形態での前縁剥離渦の様子(S000000, $U_{\infty} = 10 \text{ m/s}$)

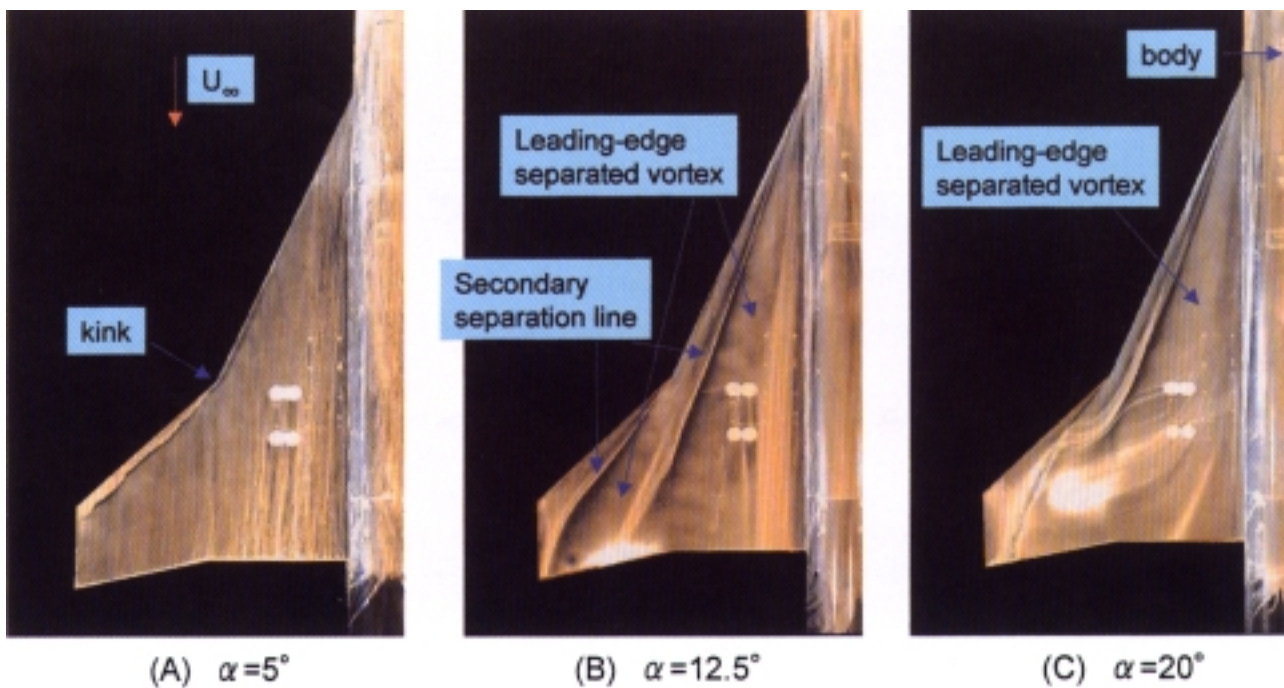


図10 オイル・フローによる翼面上の流れの様子
(S000000, $U_{\infty} = 20 \text{ m/s}$)

パターンを迎角で整理して示す。図中には各迎角における C_p 分布を比較のため重ねて示す。 4° では翼面上で剥離がなく一様流方向に流れる。 5° 付近から内翼・外翼前縁で左右2対の前縁剥離渦が形成される。その後、迎角の増加にともない前縁剥離渦は成長する。 15° 付近から外翼側の前縁剥離渦は翼面から浮き離れると同時に

内翼側の前縁剥離渦は渦崩壊を起す。この2つの現象はほぼ同時に翼後縁から見られ、迎角の増加とともに前方へ移動する。これにより渦吸引力に損失が生じるため非線形的に増加するはずの揚力は相対的に減少し、結果として揚力曲線は線形的に増加した(図7(A))と考えられる。また、翼後縁付近では渦崩壊により渦吸引力の損失され、これによ

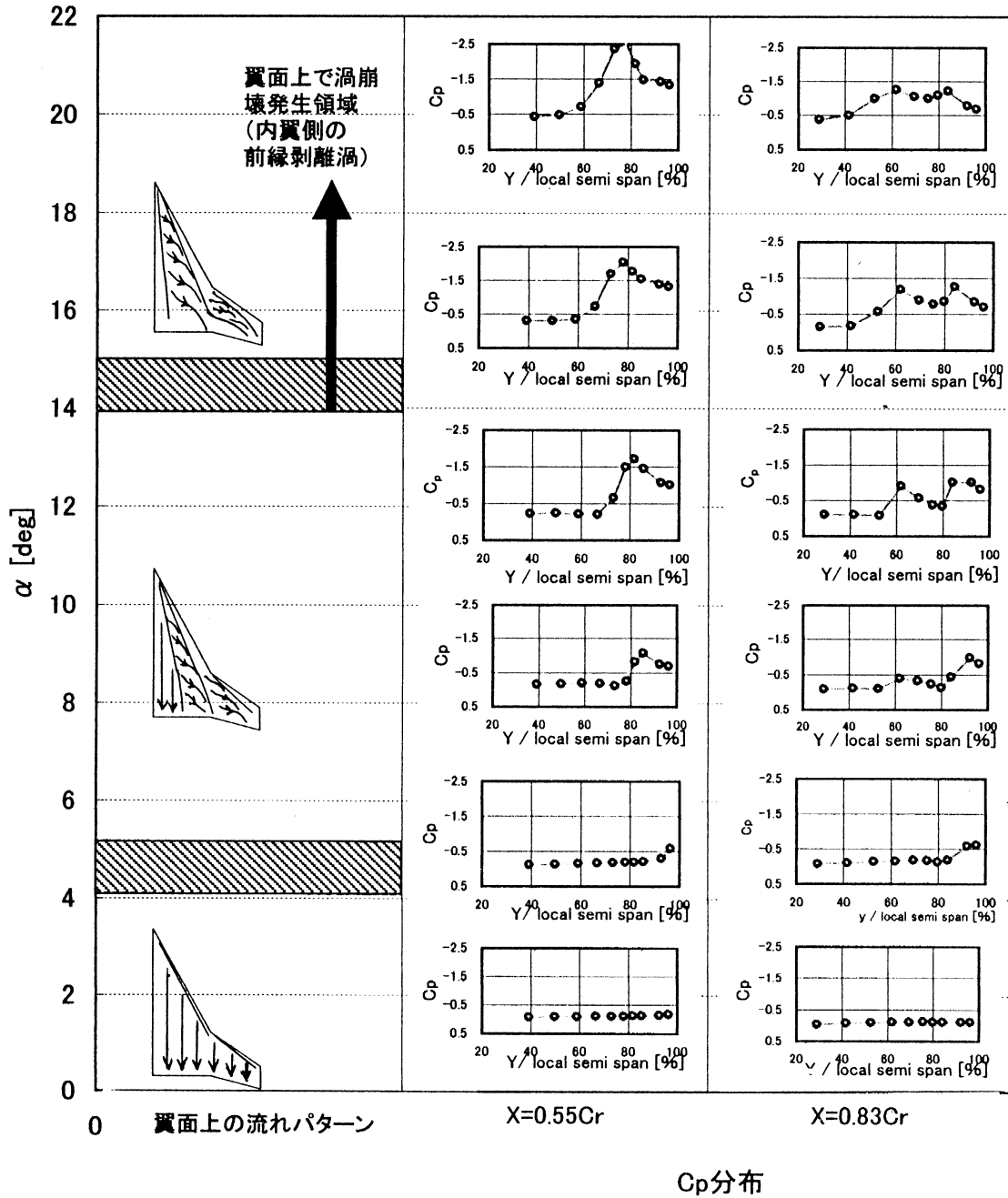


図 11 翼面上の流れパターンの分類 (S000000)

り機首下げモーメントが低減すると考えられる。

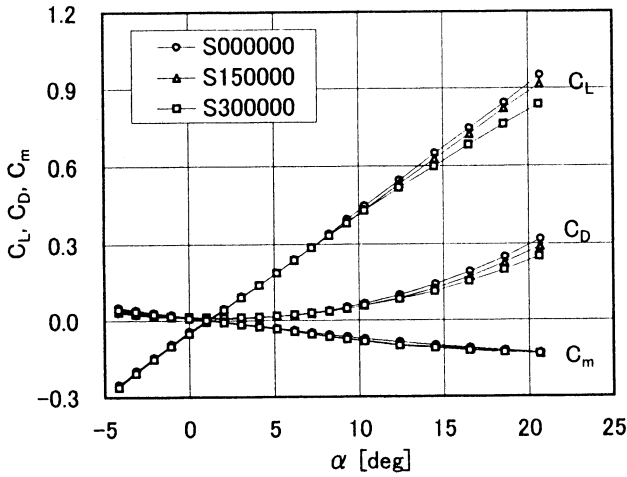
3.2 各種フラップの単独効果

本節では内翼・外翼前縁フラップや後縁フラップに関して、1種類のフラップのみを単独で操舵した結果(今後これを単独効果と呼ぶことにする)について示す。

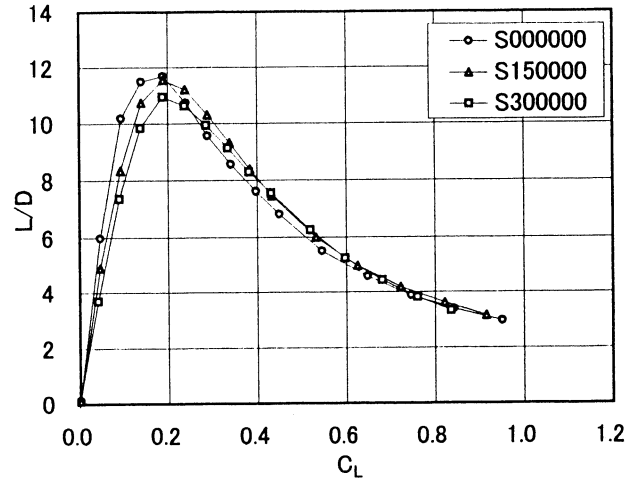
3.2.1 内翼前縁フラップ(内翼前縁ポルテックス・フラップ)

図 12 に内翼前縁フラップを操舵した場合の縦 3 分力と $L/D-C_L$ 特性を示す。内翼前縁フラップ舵角 δ_{fLEin} を大きくするにつれて C_L と C_D の減少が見られる。0.25 C_L

0.65 の範囲では内翼前縁フラップを操舵した場合 (S150000, S300000) が操舵してない場合(S000000) に比べ L/D はわずかに増加している。一般に離陸時の C_L の値は 0.5 から 0.7 付近であり、ここでは代表的に $C_L=0.5$ の場合を取り上げる。S300000 では S000000 に比べて $C_L=0.5$ で L/D が 6.7%改善されている。図 13 に C_p 分布を示す。 $X=0.55C_r$ の場合(図 13(A)) では、内翼前縁フラップ操舵により C_p 分布が大きく変化している。 $\alpha = 5^\circ$ の場合、内翼前縁フラップ操舵により前縁での剥離が抑制されていることが分かる。しかし、S300000 ではヒンジ・ラインの内側で C_p のピークが見られる。また $\alpha = 12^\circ$ の場合では

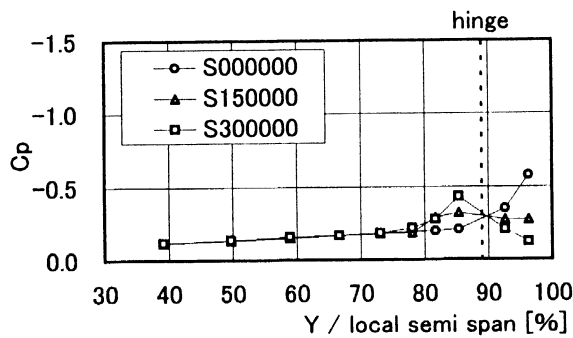


(A) 縦三分力特性

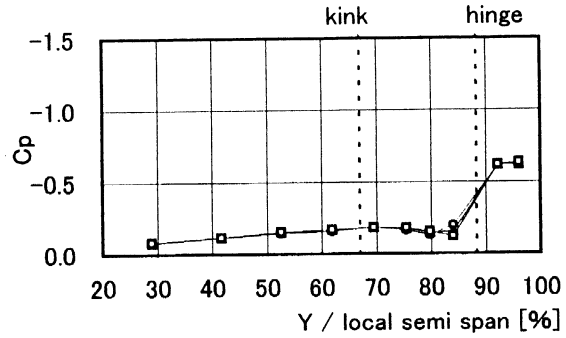


(B) $L/D - C_L$

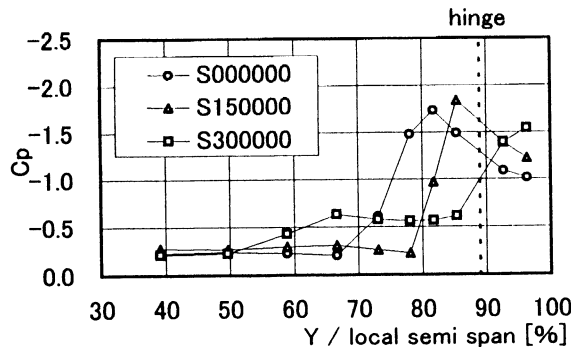
図12 内翼前縁フラップ操舵時の空力特性



$\alpha = 5^\circ$

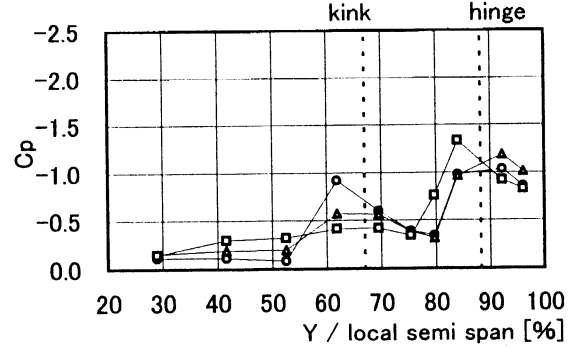


$\alpha = 5^\circ$



$\alpha = 12^\circ$

(A) $X = 0.55Cr$



$\alpha = 12^\circ$

(B) $X = 0.83Cr$

図13 内翼前縁フラップ操舵時の翼表面圧力分布

$\delta_{f, LE in}$ が増加するにつれ C_p のピークが外側に移動し、S300000での C_p のピークはフラップ上に位置している。これはフラップ上に前縁剥離渦が形成され、いわゆるボルテックス・フラップとして機能していることが推定される。図14にS300000の煙による流れの可視化結果を示す。S000000(図9)と比較するとS300000の方が内翼前縁からの剥離渦の形成が全体的に抑制されている様子が見られる。 $\alpha = 20^\circ$ (図14(C))の $X = 0.8C_r$ では前縁剥離渦の

アが確認でき、S000000(図9(C))に比べ vortex breakdown 発生位置が翼後方へ後退していることがわかる。

内翼前縁フラップは前縁での流れの剥離を抑制し、また大きな迎角の領域ではフラップ上に前縁剥離渦を位置させ、ボルテックス・フラップとして機能していることが確認できた。しかし渦流れは、下流に行くに従い円錐状に幅を拡げるのに対して、内翼前縁フラップのフラップ幅は一定であるため下流側では前縁剥離渦がフラップ上から外れ

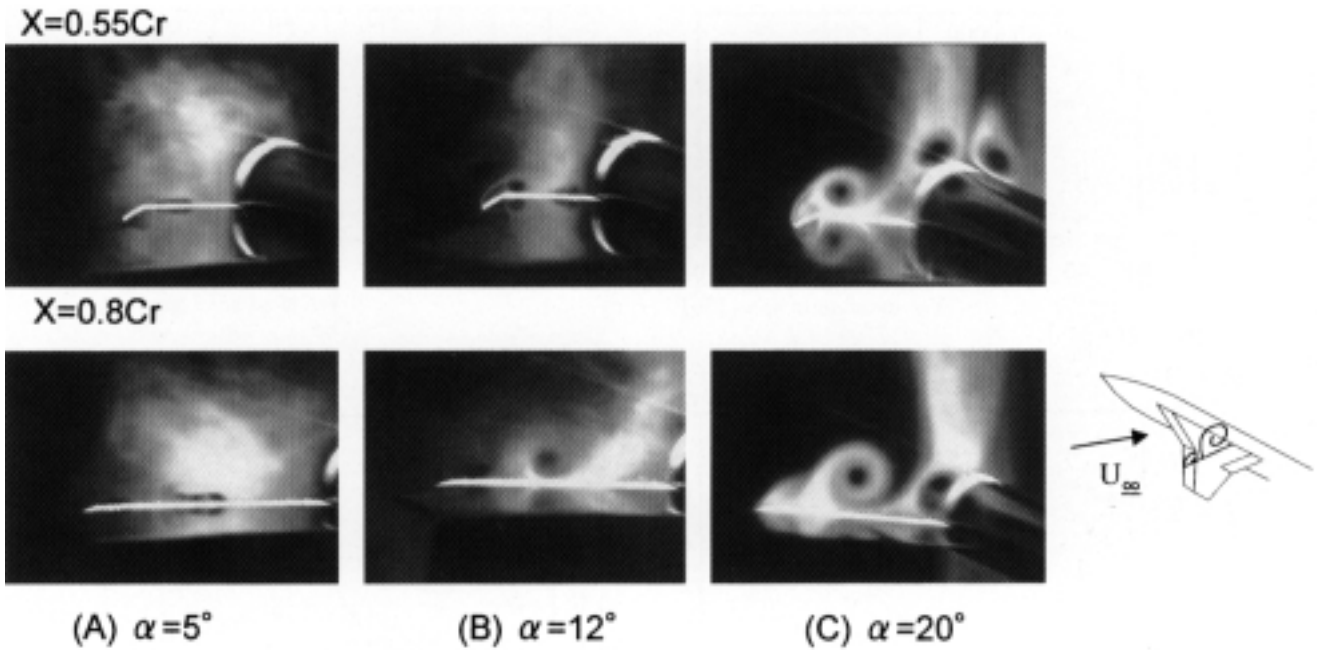


図 14 内翼前縁フラップ操舵時の前縁剥離渦の様子 (S300000, $U_{\infty} = 10 \text{ m/s}$)

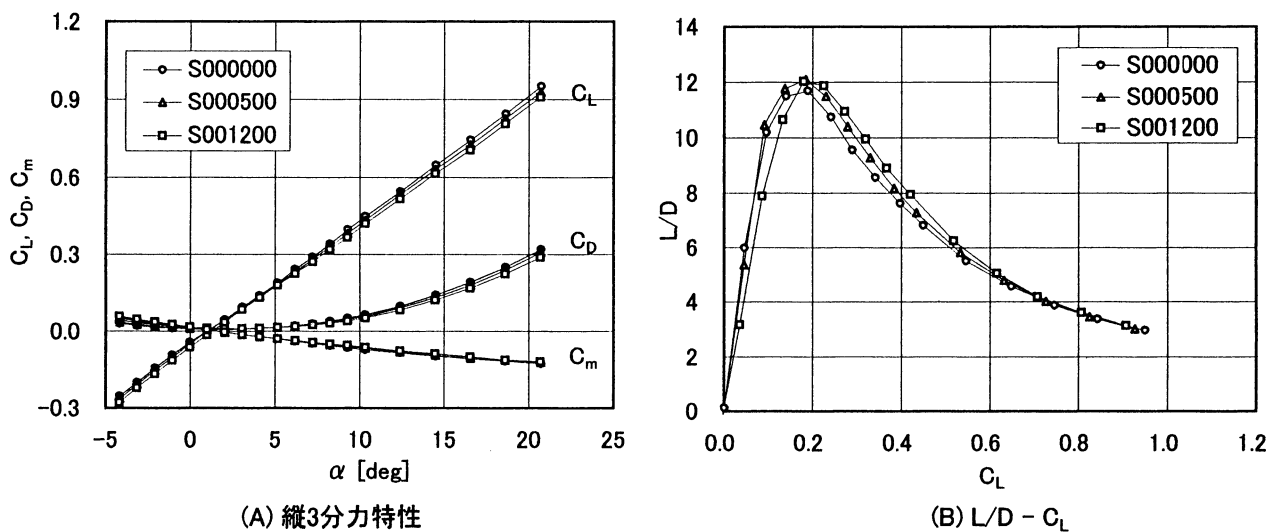


図 15 外翼前縁フラップ操舵時の空力特性

ることにより L/D の改善が小さくなるものと考えられる。

3.2.2 外翼前縁フラップ

図 15 に外翼前縁フラップのみを操舵した場合の縦 3 分力と $L/D - C_L$ 特性を示す。S000000 に比べ外翼前縁フラップを操舵(S000500, S001200)すると C_L と C_D の減少が見られる。しかし、内翼前縁フラップ(図 12)に比べ減少量は小さい。外翼前縁フラップを操舵すると C_L の広い範囲で L/D の改善が見られる。S001200 では S000000 に比べて $C_L = 0.5$ で L/D が 7.2% 改善している。図 16 には C_p 分布を示す。フラップを操舵した場合、 $X = 0.55C_r$ (図 16(A))

では C_p 分布に変化が見られず、外翼前縁フラップ操舵の影響がほとんどないことがわかる。 $X = 0.83C_r$ (図 16(B))では $\alpha = 5^\circ$ の場合、S000000 ではフラップ上で見られた C_p のピークが S000500 ではなくなっている。さらに、S001200 ではヒンジ・ラインの内側でわずかな圧力ピークが見られる。このことは S001200 のオイル・フロー結果(図 17(A))からも確認できるようにヒンジ・ラインの内側でのパブル状の剥離が発生したためである。 $X = 0.83C_r$ の $\alpha = 12^\circ$ での C_p 分布(図 16(B))を見ると、S000000 ではヒンジ・ラインをまたがって C_p のピークが見られるが、S000500 になると圧力のピークがフラップ上で見られる。このことは

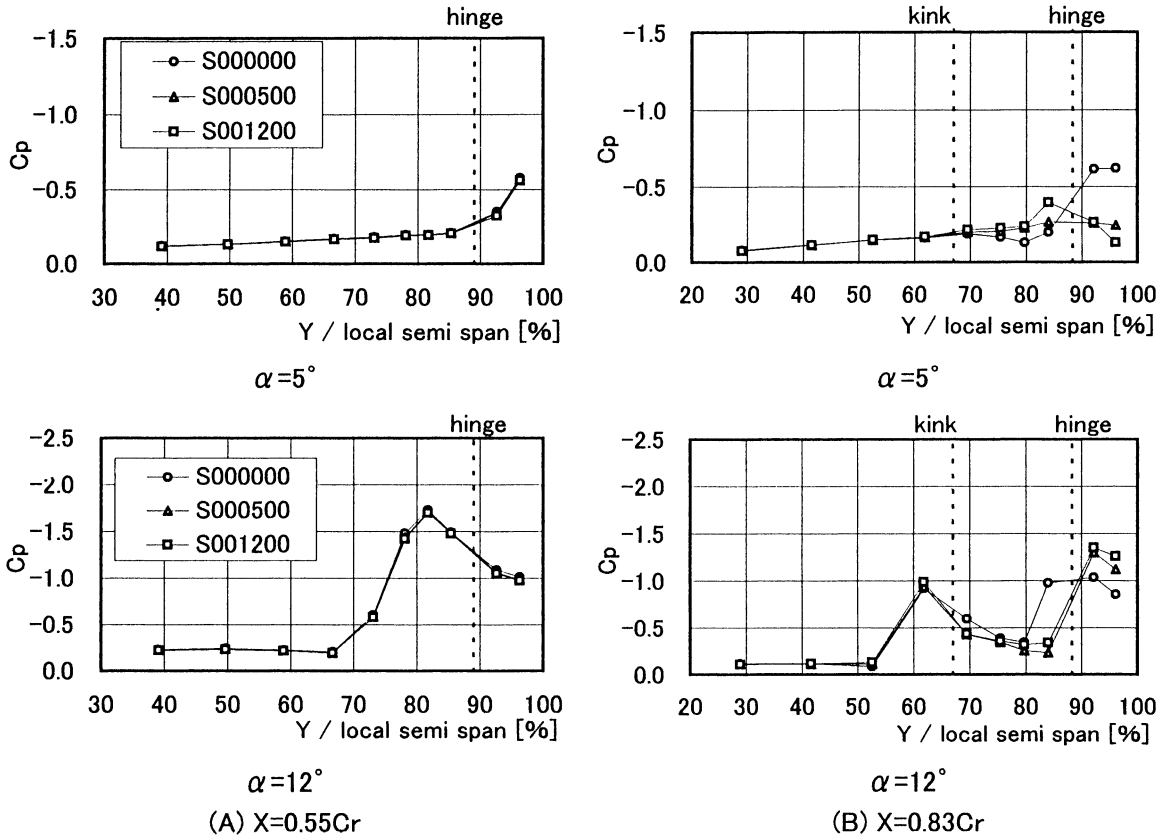


図 16 外翼前縁フラップ操舵時の翼表面圧力分布

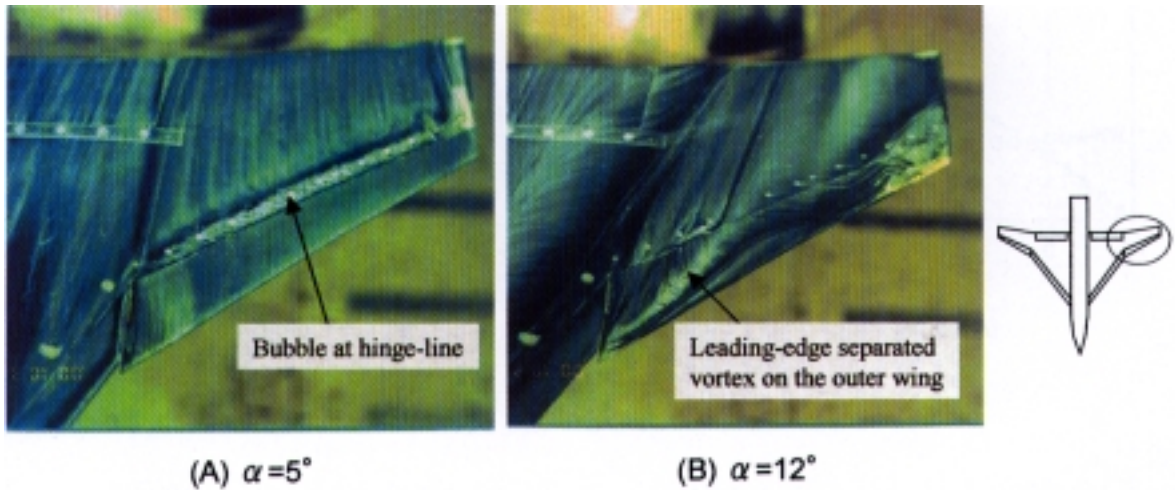


図 17 オイル・フローによる翼面上の流れの様子
(S001200, $U_{\infty} = 30$ m/s)

S001200 の $X = 0.8C_r$ の煙の可視化結果(図 18(B))とオイル・フロー法による流れパターン(図 17(B))からも確認できるように、外翼前縁で発生する剥離渦がフラップ上に位置するためであると考えられる。(すなわちポルテックス・フラップとして機能している)。また、内翼前縁で形成される剥離渦と同様に、外翼前縁で形成される剥離渦は下流に行くに従い円錐状に幅を拡げるため、外翼前縁フラップ

の前方部ではフラップ上にコード方向に形成されている渦が、後方に行くに従いヒンジ・ラインをまたがって位置するようになる。図 18(C)の $\alpha = 20^\circ$ 、 $X = 0.8C_r$ での煙の可視化結果を見ると、内翼前縁で形成された渦のコアがぼやけており vortex breakdown が発生していることが確認できる。

外翼前縁フラップは前縁剥離渦の形成を抑制するととも

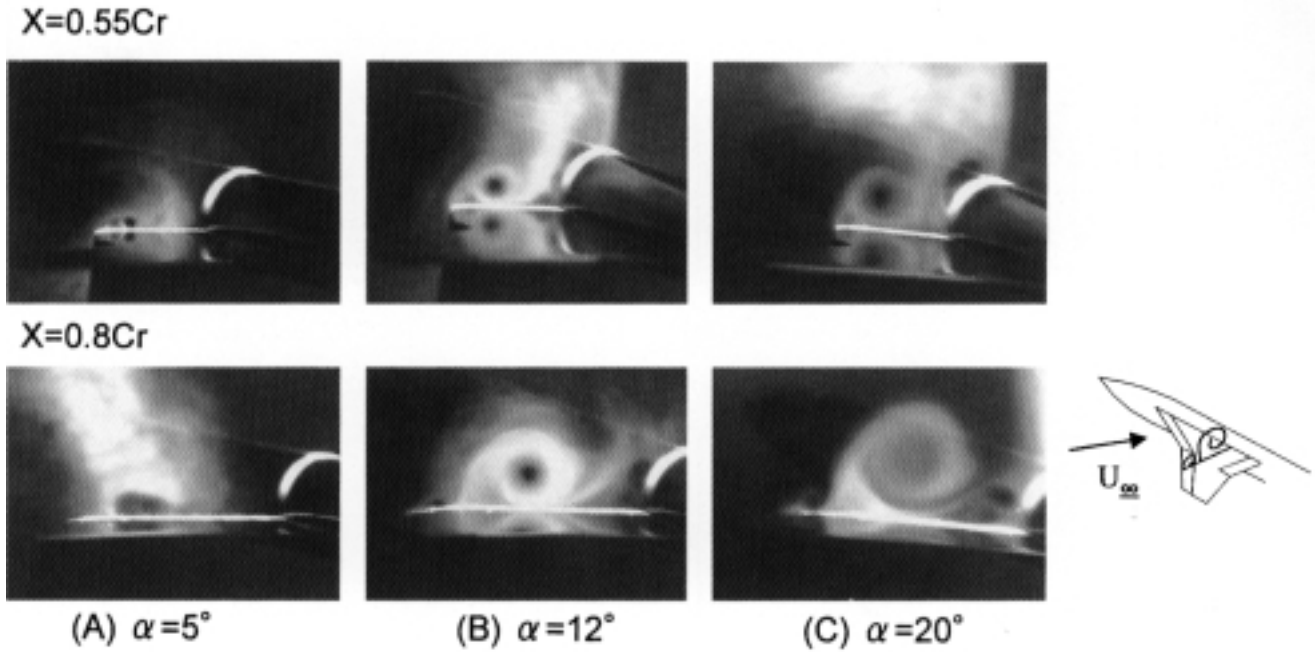


図18 外翼前縁フラップ操舵時の前縁剥離渦の様子
(S001200, $U_\infty = 10 \text{ m/s}$)

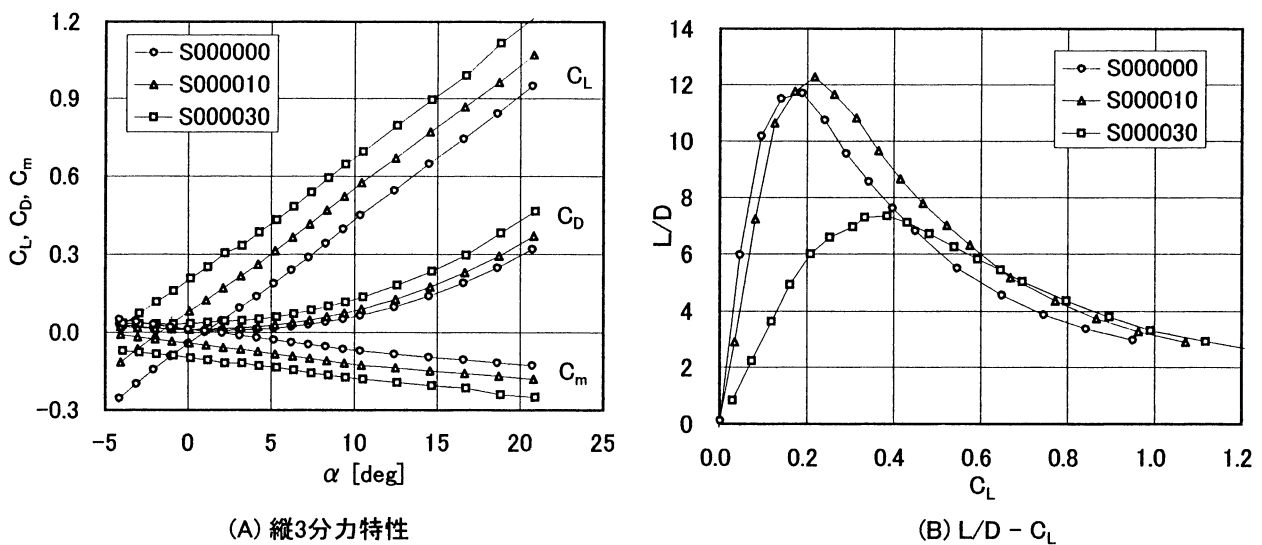


図19 後縁フラップ操舵時の空力特性

に、大きな迎角の範囲ではフラップ上に剥離渦を位置させ、ポルテックス・フラップとしての機能を有していることが分かる。外翼前縁フラップを操舵することにより C_L 、 C_D が減少するが、 C_D の減少の割合が C_L の減少より大きく、結果として L/D 特性はわずかに向上している。

3.2.3 後縁フラップ

図19に後縁フラップを操舵した場合の縦3分力と $L/D - C_L$ 特性を示す。後縁フラップを操舵すると C_L と C_D が大きく増加する。S000000 に比べ、S000010 の場合では $(L/D)_{\max}$ の C_L 値が増加し、広い C_L の範囲で L/D が向上し

ている。S000030 の場合では C_L の増加に比べ C_D の増加の方が大きく、その結果 $0 < C_L < 0.4$ の範囲では L/D 特性が大幅に悪化している。また機首下げピッチング・モーメント C_m が増加している。 $C_L = 0.5$ での L/D は、S000010 では S000000 に比べて 19.3%改善、S000030 では 7.0%改善している。図20に C_p 分布を示す。 $X = 0.55C_r$ (図20(A)) では δ_{fTE} が増加するにつれ、 C_p のピークが増大している。これは後縁フラップにより実効迎角が増加するためである。 $X = 0.83C_r$ (図20(B))でも同様な傾向が見られる。図21にオイル・フロー法による翼面上の流れのパターンを示す。図21(A)の S301210 の場合、後縁フラップ上の流れは

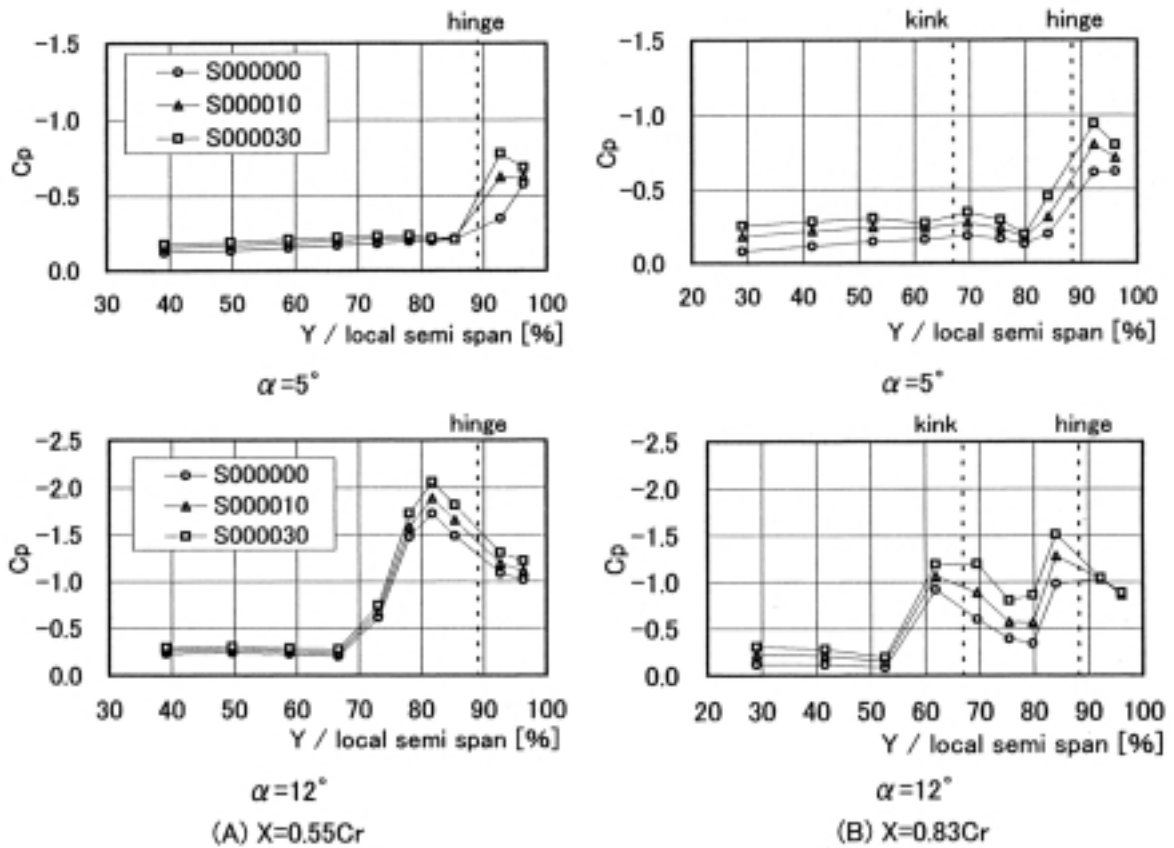


図20 後縁フラップ操舵時の翼表面圧力分布

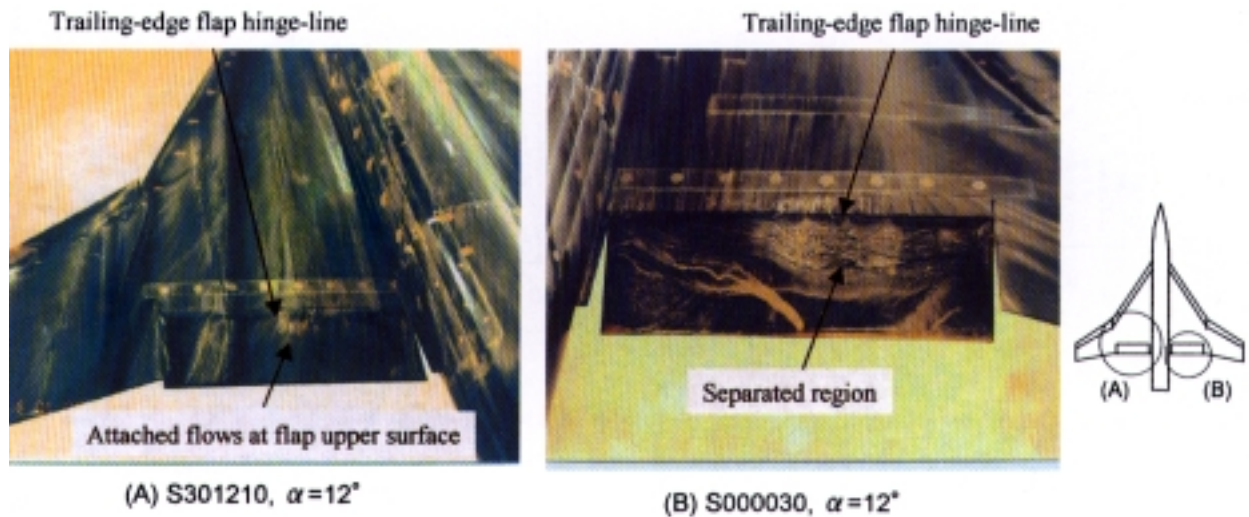


図21 後縁フラップ上での流れの様子

($U_{\infty} = 30 \text{ m/s}$)

S000010 の場合と本質的に同様であることを確認した。S301210 の場合ではフラップ上面に付着した流れが観察されるのに対して、S000030(図 21(B))ではヒンジ・ラインから流れが剥離していることがわかる。そのため S000010 の場合では L/D が向上するのに対して、S000030 では低い C_L の範囲でこの剥離による抵抗の増大が L/D 特性の悪

化をもたらしているものと考えられる(図 19)。なお、後縁フラップを用いる場合にはピッチング・モーメントも変化するためピッチ方向のトリムの考慮が必要である。

3.3 各フラップの組合せによる複合効果

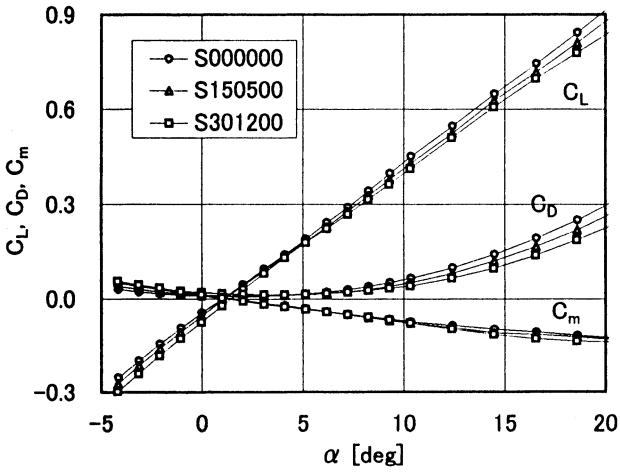
内翼・外翼前縁フラップ及び後縁フラップのうち、複数

のフラップを組合せて操舵した場合の効果(今後これを複合効果と呼ぶことにする)について述べる。

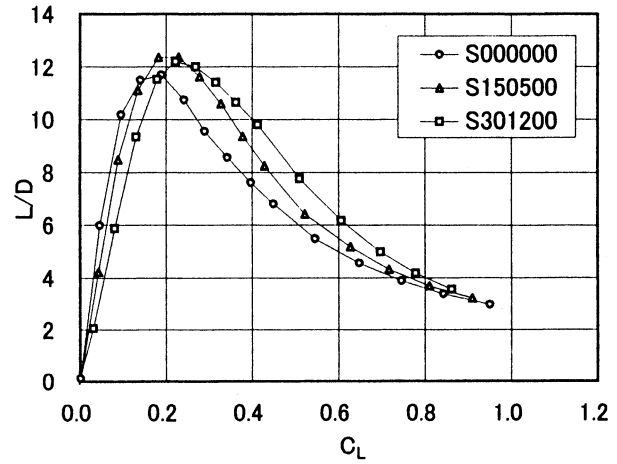
3.3.1 内翼・外翼前縁フラップの組合せ

図 22 には内翼・外翼前縁フラップを同時に操舵した場合の縦 3 分力と $L/D-C_L$ 特性を示す。S000000 に比べ、S150500、S301200 の順にフラップ舵角を増加させると C_L 、 C_D が減少し、 L/D は C_L 0.2 の範囲で大幅に向上して

いる。S301200 の場合では S000000 と比べて $C_L=0.5$ において L/D が約 30% 向上した。図 23 の C_p 分布を見ると $X=0.55C_r$ 位置(図 23(A))では内翼前縁フラップの操舵により $\alpha=5^\circ$ の場合は前縁剥離渦の発生が抑制され、また $\alpha=12^\circ$ ではフラップ上に渦が形成されている。 $X=0.83C_r$ 位置(図 23(B))では、 $X=0.55C_r$ 位置での内翼前縁フラップによる C_p 分布と同様な変化が外翼前縁フラップ上でも見られる。内翼及び外翼前縁フラップの操舵によるボルテッ

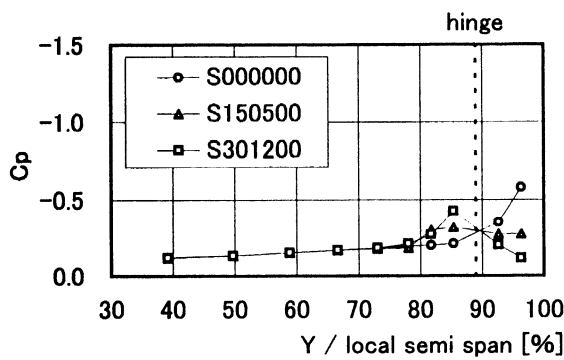


(A) 縦3分力特性

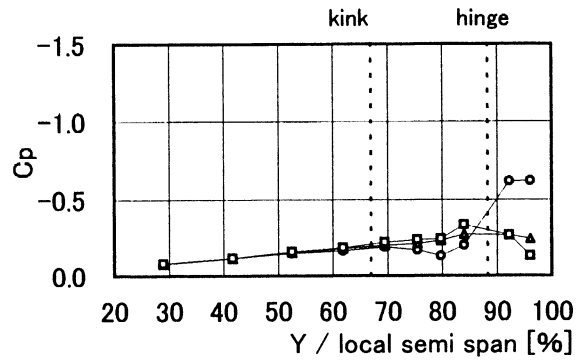


(B) $L/D - C_L$

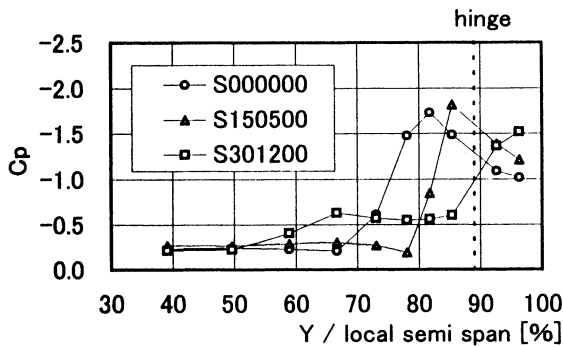
図 22 内翼・外翼前縁フラップ操舵時の空力特性



$\alpha=5^\circ$

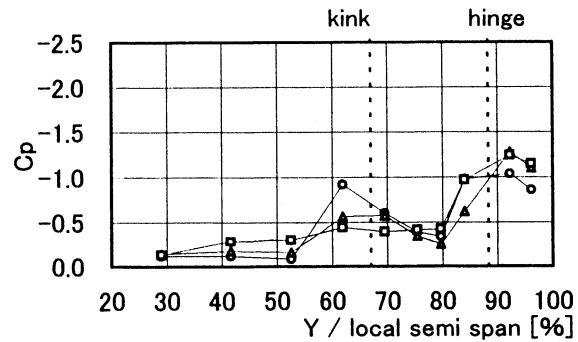


$\alpha=5^\circ$



$\alpha=12^\circ$

(A) $X=0.55C_r$



$\alpha=12^\circ$

(B) $X=0.83C_r$

図 23 内翼・外翼前縁フラップ操舵時の翼表面圧力分布

クス・フラップ的効果が L/D において効果的に働いていることがわかる。

内翼・外翼前縁フラップを組合せて操舵した場合は、それぞれのフラップの単独効果が足し合わされた効果が得られるので L/D は大きく向上するものと考えられる。

3.3.2 前縁フラップと後縁フラップの組合せ

この節では前縁フラップ(内翼前縁あるいは外翼前縁フラップ)と後縁フラップを組合せて操舵した場合の効果について述べる。

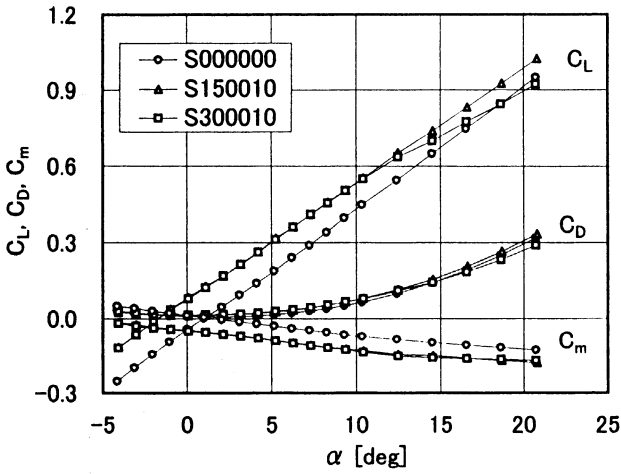
内翼前縁フラップと後縁フラップの組合せ：図 24 に内翼前縁フラップと後縁フラップを同時に操舵した場合の縦3分力と $L/D-C_L$ 特性を示す。S000000 に比べ S150010 と S300010 では、後縁フラップの操舵により低迎角の範囲で C_L, C_D が増加し、 C_m が増加すると揚力曲線や抗力曲線の勾配

(C_L, C_D) は減少する。 L/D 特性は $C_L = 0.25$ の範囲で大きな改善が見られ、S300010 の場合では S000000 と比べて $C_L = 0.5$ において L/D が約 25.4% 向上している。

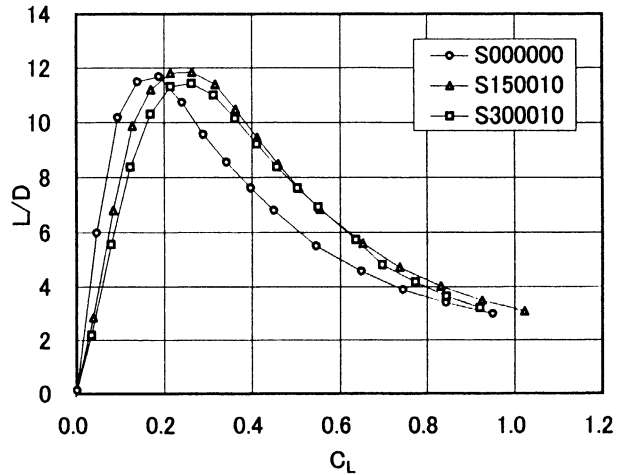
外翼前縁フラップと後縁フラップの組合せ：図 25 に外翼前縁フラップと後縁フラップを同時に操舵した場合の縦3分力と $L/D-C_L$ 特性を示す。S000510 と S001210 の縦3分力特性は、図 24 と同様に外翼前縁フラップの単独効果(図 15)と後縁フラップの単独効果(図 19)が含まれたような傾向を示す。

L/D 特性は $C_L = 0.2$ 付近で大幅な改善が得られ、これら 2 つの形態の $(L/D)_{max}$ は S000000 に比べ大きく増加している。S001210 の場合では S000000 と比べて $C_L = 0.5$ において L/D が約 33.2% 向上している。

内翼・外翼前縁フラップと後縁フラップの組合せ：後縁フラップのみの効果(図 19)によると S000010 の場合では、後縁フラップ上で流れが付着しているため広い C_L の範囲で

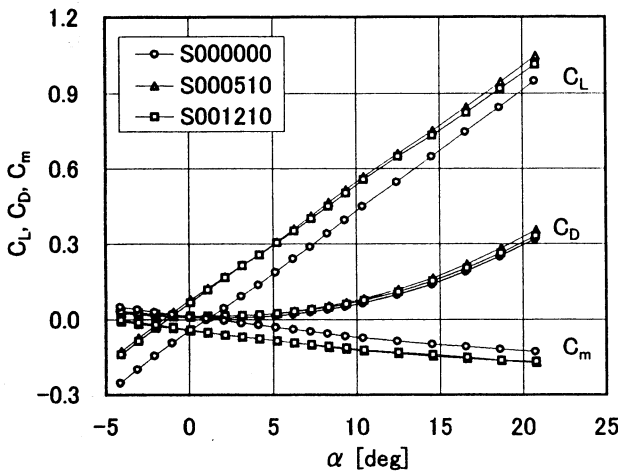


(A) 縦3分力特性

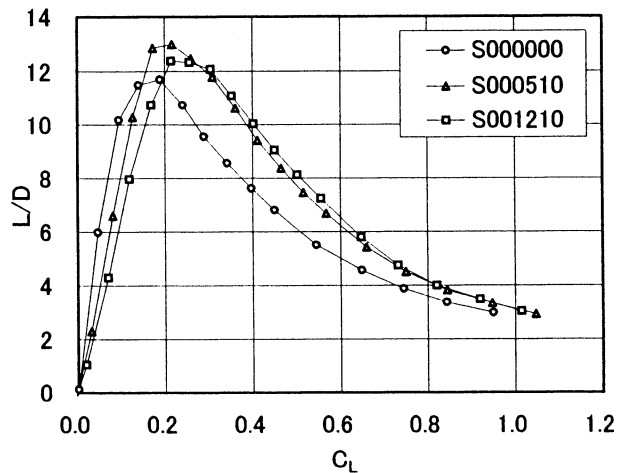


(B) $L/D - C_L$

図 24 内翼前縁・後翼フラップ操舵時の空力特性



(A) 縦3分力特性

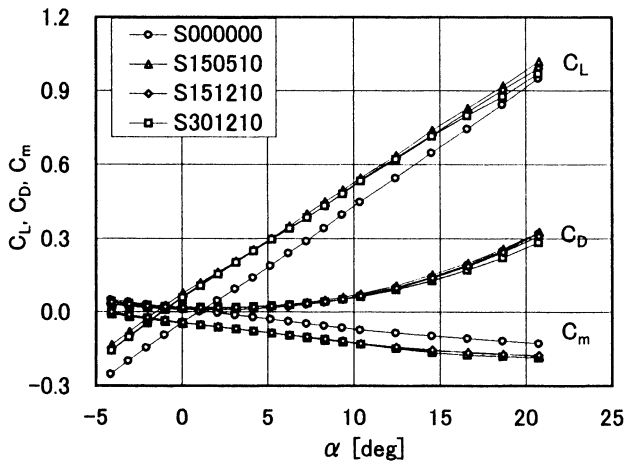


(B) $L/D - C_L$

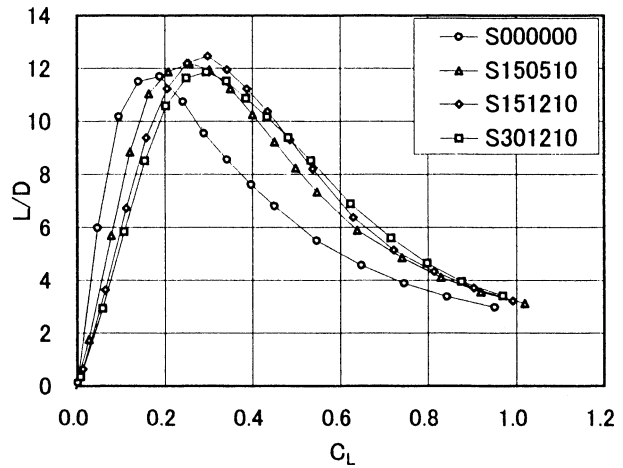
図 25 外翼前縁・後翼フラップ操舵時の空力特性

L/D 特性の改善が得られていた。ここでは後縁フラップと内翼・外翼前縁フラップを組合せて使用した場合の複合効果について述べる。図 26 に後縁フラップを $\delta_{fTE} = 10^\circ$ に操舵して内翼・外翼前縁フラップをさらに操舵した S150510、S301210、S151210 での縦 3 分力と L/D- C_L 特性を示す。S151210 はそれぞれの前縁フラップの単独効果において $C_L = 0.5$ 付近で最も良好な L/D を示した内翼前

縁フラップ舵角と外翼前縁フラップ舵角の組合せである。いずれの形状でも S000000 に比べ $C_L = 0.25$ で大幅に L/D が向上している。特に S151210 では $C_L = 0.5$ で S000000 に比べて 48% の L/D 改善が得られている。図 27 の C_p 分布を見ると、 $X = 0.55C_r$ 位置(図 27(A))で 5° と 12° の場合のいずれも内翼前縁フラップの舵角が $\delta_{fLEin} = 15^\circ$ である S150510 と S151210 の C_p 分布が一致している。し

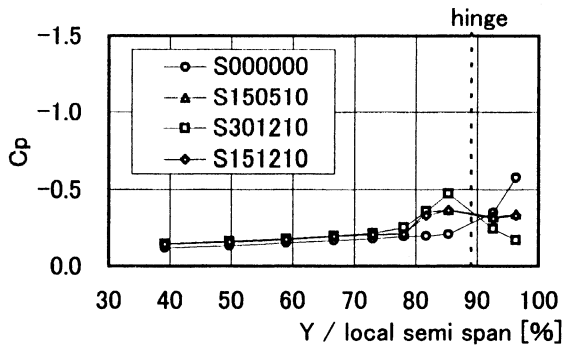


(A) 縦3分力特性

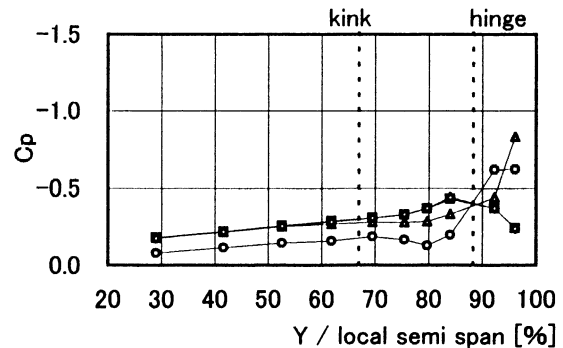


(B) L/D - C_L

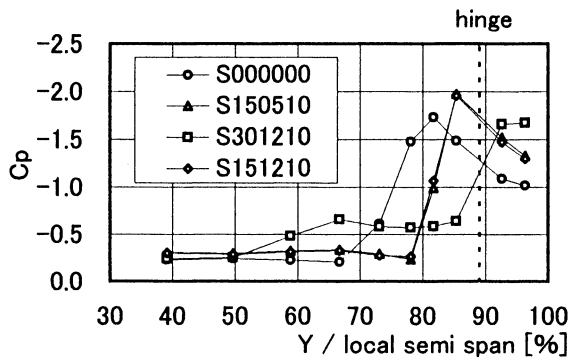
図 26 前縁・後翼フラップ操舵時の空力特性



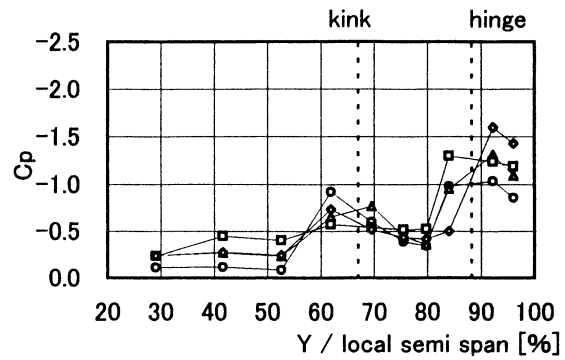
$\alpha = 5^\circ$



$\alpha = 5^\circ$



$\alpha = 12^\circ$



$\alpha = 12^\circ$

(A) $X = 0.55C_r$

(B) $X = 0.83C_r$

図 27 前縁・後翼フラップ操舵時の翼表面圧力分布

かし、 $X = 0.83C_r$ 位置(図 27(B))の $\alpha = 12^\circ$ の場合には外翼前縁フラップ舵角を $\delta_{fLEout} = 12.2^\circ$ に一致させた S151210 と S301210 の結果は大きく異なっている。これは δ_{fLEin} が 15° と 30° の両者で異なっており、内翼前縁で形成される前縁剥離渦の様子が異なること、さらに外翼前縁で形成される前縁剥離渦と内翼前縁で形成された渦が干渉するためでもあると考えられる。また後縁フラップ舵角が小さい場合($\delta_{fTE} = 10^\circ$)では、前縁フラップと後縁フラップを組合せて使用すると、各フラップを単独で使用する場合に比べて L/D 特性は大幅に改善される結果が得られた。

4. 考察

4.1 圧力分布による前縁剥離渦の位置変化

本節では C_p 分布の実験結果から各種フラップ舵角や迎角を変化させた場合、 C_p のピーク(C_{pmin})がどのように変化したかを調べることにより翼面上の前縁剥離渦のスパン方向位置変化の把握を試みる。

図 28 にはそれぞれのフラップを操舵した場合に C_p 分布でピークを示すスパン方向位置が各迎角ごとに变化する様子を示す。 $X = 0.55C_r$ (図 28 の上段)では内翼前縁で左右 1 対の前縁剥離渦が形成されるため C_p のピークは 1 つであり、 $X = 0.83C_r$ (図 28 の下段)では内翼前縁で形成された渦による C_p のピーク(内側)と外翼前縁で形成された渦による C_p のピーク(外側)の 2 つがある(図 8(B)の $\alpha = 12^\circ$ の場合を参照)。なお内翼・外翼前縁フラップを操舵した場合のヒンジ・ラインの内側で形成される C_p のピーク(ヒンジでのバブル状の剥離)については無視することにした(図 13(A)の $\alpha = 5^\circ$ の場合を参照)。なお、本実験に使用した模型で最も前縁付近に位置する圧力孔は局所スパン長の 96% ($X = 0.55C_r$ 、 $0.83C_r$ の場合とも)であり、図中にプロットする場合は計測された圧力分布から C_p ピークが読み取れる場合のみに制限した。

内翼前縁フラップ(図 28(A)): $X = 0.55C_r$ ではフラップ舵角を増加させると C_p のピーク位置は図中の右上方向に移動しており、内翼前縁フラップにより前縁剥離渦の形成や成長が抑制されることがわかる。 $X = 0.83C_r$ では外翼前縁で形成された渦による C_p のピーク(外側)位置が内翼前縁フラップ舵角により変化しており、内翼前縁フラップに影響されることがわかる。

外翼前縁フラップ(図 28(B)): $X = 0.55C_r$ では外翼前縁フラップ舵角による C_p ピーク位置は変化しておらず、外翼前縁フラップの影響が $X = 0.55C_r$ 位置には及んでないことがわかる。 $X = 0.83C_r$ では外翼前縁フラップ舵角により外側の C_p ピーク位置が大きく変化しており、外翼前縁フラップ操舵により外翼前縁での剥離渦の形成、成長が抑制されることが確認できる。

後縁フラップ(図 28(C)): $X = 0.55C_r$ では後縁フラップ舵角による影響は小さい。しかし後縁フラップ舵角の増加により内翼前縁での渦の形成がわずかに早まっている(S000000 では $\alpha = 6^\circ$ から、S000030 では $\alpha = 5^\circ$ から渦が形成)。 $X = 0.83C_r$ の外側での C_p ピークの位置変化は後縁フラップ舵角が増加すると、より小さい迎角から内側への移動が起きており、外翼前縁での渦の発生、成長が早まっていることがわかる。反面、内側の C_p ピーク位置は後縁フラップ舵角が増加すると、より大きな変化が大きな迎角で生じている。

内翼・外翼前縁フラップ(図 28(D)): $X = 0.55C_r$ では内翼前縁フラップのみを操舵した場合(S300000)と内翼・外翼前縁フラップを同時に操舵した場合(S301200)の C_p ピークの位置はほぼ一致する。 $X = 0.83C_r$ の外側の C_p ピーク位置は外翼前縁フラップのみを操舵した場合(S001200)と S301200 が一致する。

前縁・後縁フラップ(図 28(E)): $X = 0.55C_r$ では後縁フラップの影響が小さい(図 28(C)参照)ため、S301200 と S301210 がほぼ一致する。 $X = 0.83C_r$ では前縁フラップ(S301200)と後縁フラップ(S000010)との間に前縁・後縁フラップを操舵した S301210 の場合が位置する。

以上の結果により、内翼前縁フラップは内翼前縁からの剥離渦の形成を抑制し、外翼前縁フラップは外翼前縁からの渦の形成を抑制することがわかった。後縁フラップは前縁剥離渦の形成を促進する傾向がある。また後縁フラップは翼の $X = 0.55C_r$ より $X = 0.83C_r$ での C_p ピーク位置に大きな影響を及ぼすことが確認できた。

4.2 ポーラー曲線表示によるフラップ効果の考察

本節では実験で得られた C_D を最小自乗法を用いて次式のように C_L の 2 次式で近似し、各係数を比較することを考える。ここで近似する C_L 範囲は $0.2 < C_L < 0.8$ である。

$$C_D = C_{D0} + K (C_L - C_{L0})^2$$

一般に K は揚力傾斜に反比例する係数である。係数 C_{L0} はキャンバー効果を示し、キャンバーが大きくなると C_{L0} が増加する。 C_{D0} は摩擦抵抗と最小揚力時の圧力抵抗の和である。

図 29 はフラップ操舵時の各係数の変化を示す。図中の横軸はそれぞれのフラップ舵角を最大フラップ舵角 δ_{fmax} (例えば後縁フラップでは $\delta_{fTEmax} = 30^\circ$) で無次元化した値(今後これをフラップ舵角係数と呼ぶことにする)である。内翼前縁フラップ舵角を増加させると K 値は減少している(図 29(A))。外翼前縁フラップでは大きな変化は見られない。一方、内翼・外翼前縁フラップを同時に操舵すると K は大幅に減少している。図 29(B)の C_{L0} では全てのフラッ

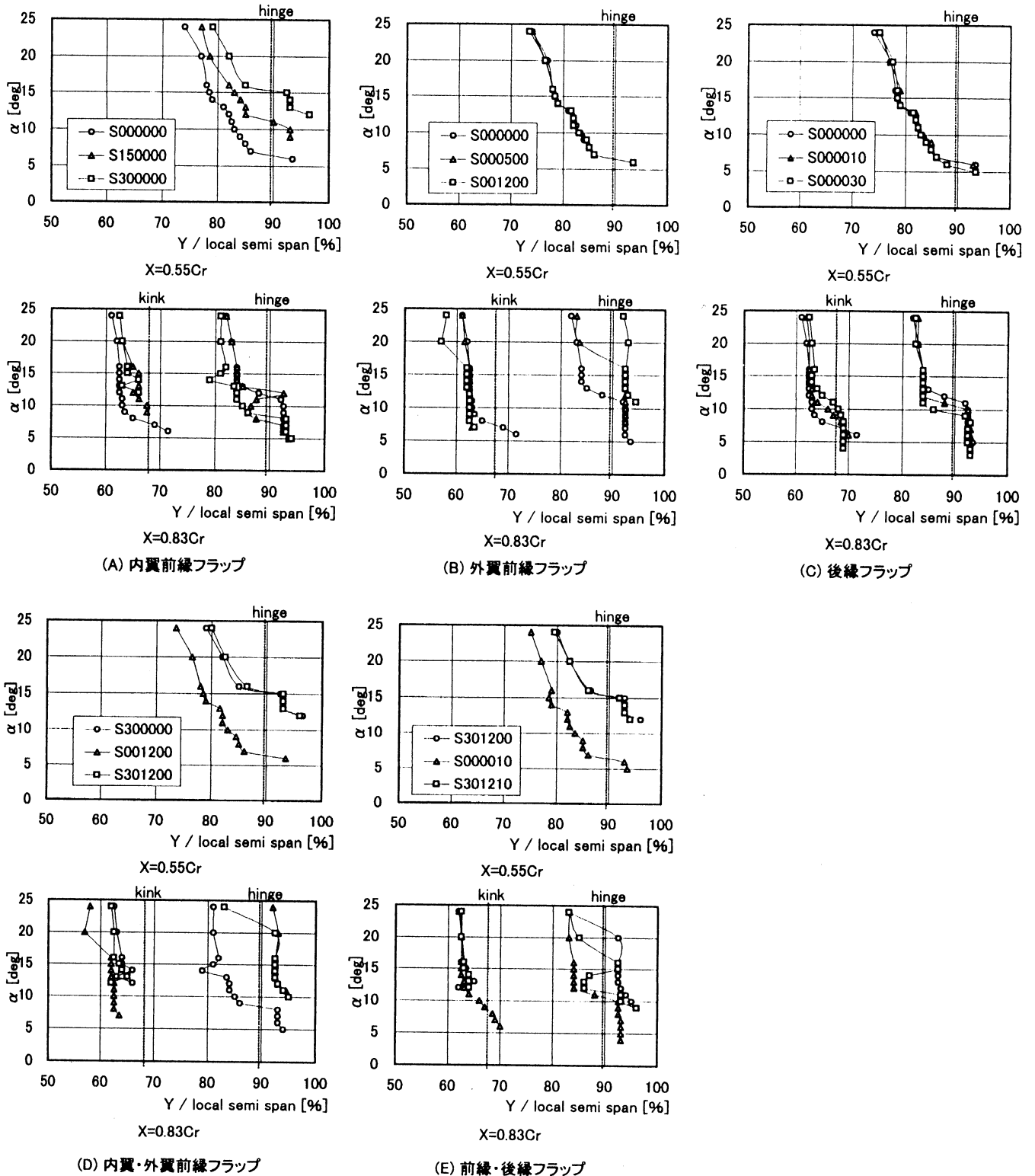


図 28 フラップ操舵による圧力ピーク位置変化

プのケースで右上がりになっている。内翼及び外翼前縁フラップを単独で操舵した時より両者を同時に操舵した場合の方が、 C_{L0} の増加が大きい。後縁フラップ操舵による C_{L0} の変化は最も大きい。図 29(C) の C_{D0} は、内翼及び外翼前縁フラップ操舵によりわずかに増加している。これはフラップ操舵によりヒンジ線内側で流れが剥離する領域があ

るためと思われる。後縁フラップの最大舵角 ($\delta_{fTE} / \delta_{fTEmax} = 1.0$) ではフラップ上面で流れが剥離しているため、 C_{D0} が急激に増加している。

図 30 にはポーラー曲線表示により各種フラップを単独で操舵した場合の効果の足し合せ(単独効果の足し合わせ：付録 A-3 参照)場合と、複数のフラップを組合せて操

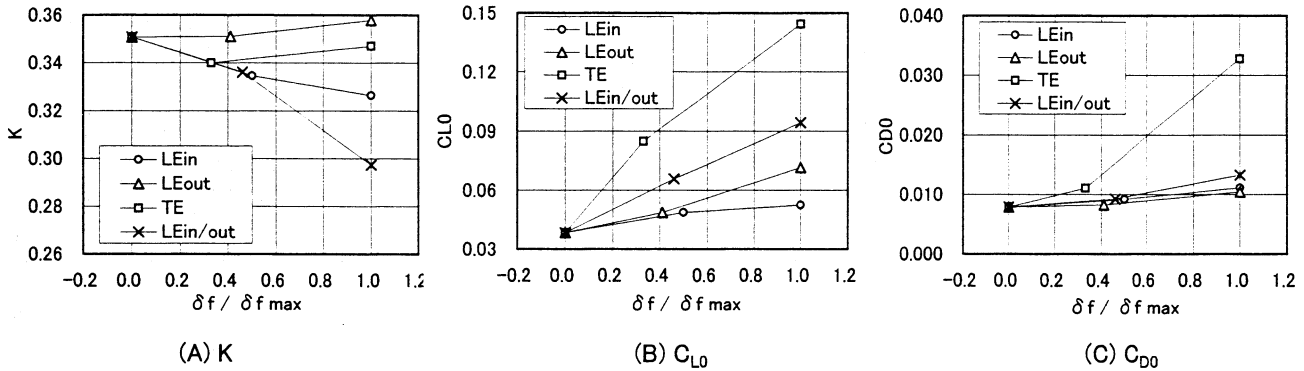


図 29 ポーラー曲線表示による各フラップ操舵時の係数比較

$$C_D = K (D_L - C_{L0})^2 + C_{D0}$$

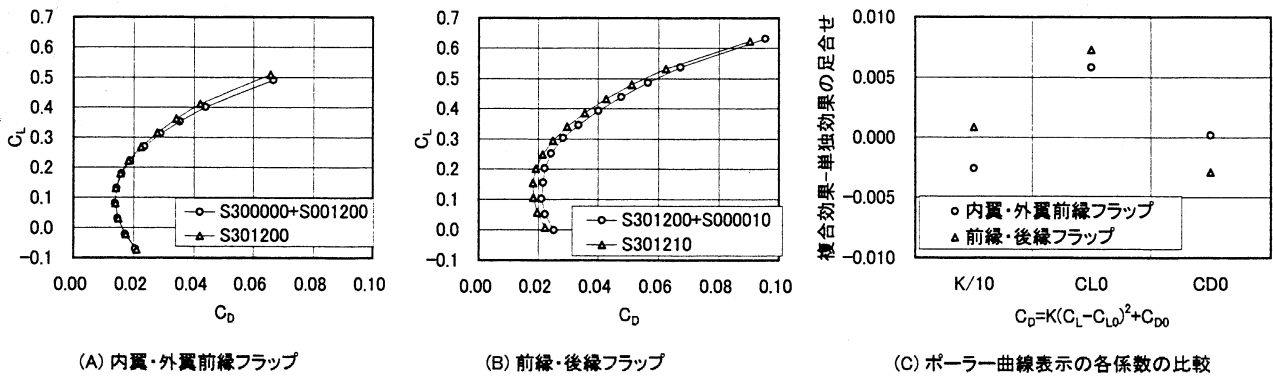


図 30 ポーラー曲線表示によるフラップの単独効果と複合効果の比較

舵した場合(複合効果)を比較した。図 30(A)には内翼・外翼前縁フラップを操舵した場合(S301200)を、図 30(B)には前縁・後縁フラップの場合(S301210)を示す。図 30(C)には前述の 2 次式で近似した場合のそれぞれの係数(K, C_{L0} , C_{D0})について、複合効果の場合から単独効果の足し合わせを差し引いたものを示す。この値が 0 を示す場合、単独効果を足し合わせた場合のポーラー曲線と複合効果のポーラー曲線が一致することを意味する。

図 30(C)によると内翼・外翼前縁フラップの場合(S301200)では K 値の差は負、すなわち単独効果の足し合わせより複合効果の K 値の方が小さいことを意味する。 C_{L0} の差は正の値を示し、キャンバー効果は複合効果の方が大きいことを示している。また C_{D0} には大きな変化はない。前縁・後縁フラップの場合では K の変化は小さい。 C_{L0} は正の値を示し、複合効果でのキャンバー効果がより大きいことを示している。 C_{D0} は負の値を示し、複合効果により圧力抵抗が減少したことがわかる。

以上の結果により内翼・外翼前縁フラップの複合効果や前縁・後縁フラップの複合効果は、単独効果の足し合わせよりキャンバー効果がより強くなっていることがわかる。また内翼・外翼前縁フラップでは複合効果によりポーラー曲線の開きが大きく(K が小さく)なっている。前縁・後縁

フラップでは複合効果により C_{D0} が減少していることがわかる。

4.3 各種フラップによる空力特性の改善

4.3.1 各種フラップの有効性

ここでは離着陸性能を代表する L/D と C_L において各種フラップの有効性について考察する。図 31 にはフラップ舵角による L/D と C_L の変化を示す。離陸時の C_L を 0.5 と考え、フラップ操舵時の C_D の変化を図 31(A)に示す。また、図 31(B)には着陸の迎角を $\alpha = 12^\circ$ と設定した場合の C_L の変化をまとめた。

図 31(A)を見ると、内翼前縁フラップを操舵(印)すると C_D は減少している。外翼前縁フラップの場合(印)では内翼前縁フラップと同様な傾向を示す。また内翼・外翼前縁フラップを組合せて操舵(印)した場合には大幅に C_D が減少する。後縁フラップ(印)では $\delta_{fTE} = 30^\circ$ ($\delta_f / \delta_{fTE} = 1.0$)の場合に比べ $\delta_{fTE} = 10^\circ$ ($\delta_f / \delta_{fTE} = 0.33$)の場合の方が C_D の低減は大きい。前縁・後縁フラップを組合せて操舵した場合(x印: $\delta_{fTE} = 10^\circ$ に操舵した状態で前縁フラップを操舵、+印: $\delta_{fLEin/out} = 30/12.2^\circ$ に操舵した状態で後縁フラップを操舵)では C_D が大きく低減されて

おり、L/D 特性において最も有効であることがわかる。図 31(B)では前縁フラップを操舵した場合(内翼前縁フラップや外翼前縁フラップのそれぞれを単独で操舵した場合や両者を組合せて操舵した場合)、いずれも C_L は減少しており、前縁フラップは高い C_L を得るには有効でないことがわかる。後縁フラップのみを操舵した場合に最も高い C_L が得られている。しかし、前述(3.2.3 節)したように後縁フラップは大きな機首下げモーメントを発生させる。

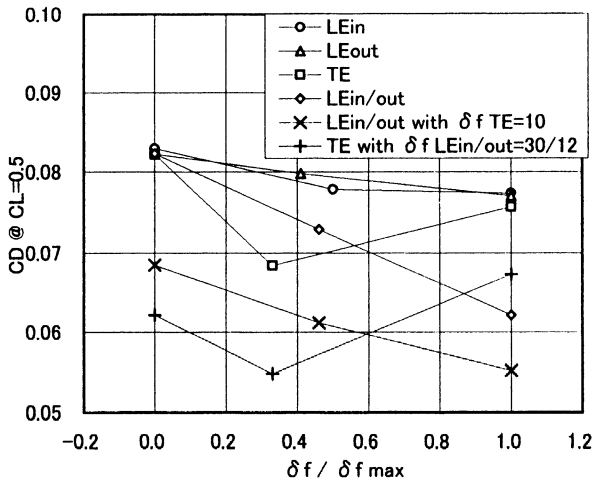
このように離陸時の L/D を向上するには前縁・後縁フラップの組合せが、また着陸時の高い C_L を得るためには後縁フラップが有効であることがわかる。

4.3.2 L/D 特性に関する最適フラップ舵角

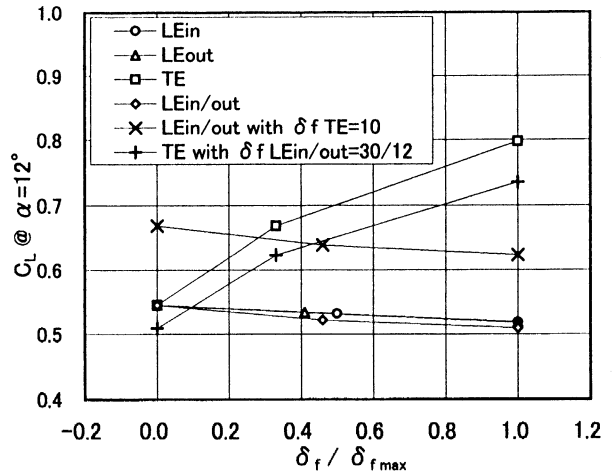
本節では今回の実験結果(C_L を固定してフラップ舵角を変化させた空気力計測結果：図 31(A))を用いて $C_{D \min}$ に関する最適フラップ舵角について考察する。最適フラップ

舵角は付録 A-2 に示す方法で求めた。この方法ではわずが 3 つのフラップ舵角に対する実験結果を基に 2 次曲線で近似しているため、あくまで定性的傾向の把握に留まるが、将来の最適フラップ設計に対する方針を立てる際の貴重な情報としての意義を有するものと考え。

図 32(A)には各フラップ形状での最適フラップ舵角係数(最適フラップ舵角を各フラップの最大フラップ舵角で無次元化)を示し、図 32(B)には最適フラップ舵角操舵時の C_D からクリーン形態の C_D を差し引いた値($C_{D \text{ opt}} = C_D$ at $\delta_{f \text{ opt}} - C_{D \text{ S000000}}$)を示す。すなわち、最適フラップ舵角に操舵した場合の C_D の変化量を示す($C_D < 0$ の場合はフラップ操舵による抵抗の低減を意味する)。なお、最適フラップ舵角が今回の実験範囲から大きくはずれた場合($\delta_{f \text{ opt}} / \delta_{f \text{ max}} > 1$)は図中へのプロットから除外した。この場合ではより大きなフラップ舵角での再実験が必要である。

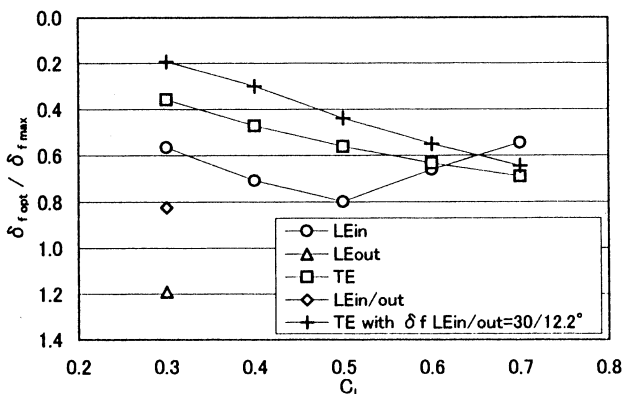


(A) フラップ操舵によるL/D 変化 ($C_L=0.5$)

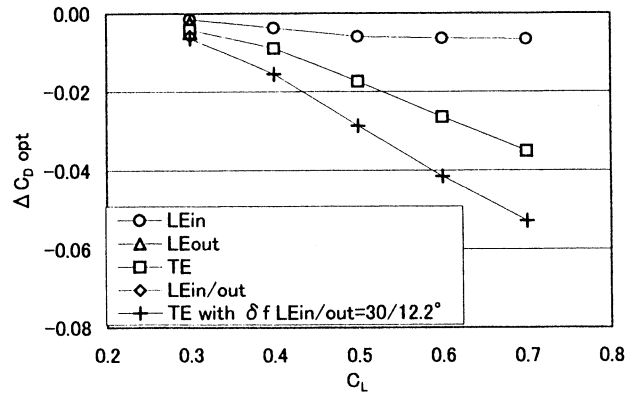


(B) フラップ操舵による C_L 変化 ($\alpha=12^\circ$)

図 31 L/D, C_L におけるフラップの有効性



(A) 最適フラップ舵角係数 ($\delta_{f \text{ opt}} / \delta_{f \text{ max}}$)



(B) 最適フラップ操舵時の抵抗

$\Delta C_{D \text{ opt}} = C_D \text{ @ } \delta_{f \text{ opt}} - C_D \text{ @ S000000}$

図 32 最適フラップ舵角および最適フラップ操舵時の抵抗

内翼前縁フラップ：内翼前縁フラップ(図 32(A)の 印)を見ると、 $C_L = 0.5$ では C_L が増加すると最適フラップ舵角係数は増加する。しかし、 $C_L = 0.5$ では最適フラップ舵角は C_L に反比例して、 C_L が増加するにつれ減少している。図 32(B)に示した内翼前縁フラップの最適フラップ舵角操舵時の C_D 変化($C_{D, LEin, opt}$: 図 32(B)の 印)は C_L が増加するに従って減少している。

外翼前縁フラップ：外翼前縁フラップの場合(図32(B)の 印)では、 $C_L = 0.3$ ですすでに最適外翼前縁フラップ舵角 $\delta_{f, LEout, opt}$ は今回の最大フラップ舵角より大きい値を示す($\delta_{f, LEout, opt} / \delta_{f, LEout, max} = 1.2$)。なお、 $C_L = 0.4$ では $\delta_{f, LEout, opt} / \delta_{f, LEout, max} = 1.2$ である。

後縁フラップ：後縁フラップの場合(図 32(A)の 印)では、 C_L が増加するにつれ後縁フラップの最適フラップ舵角係数も単調に増大する。後縁フラップを最適フラップ舵角に操舵した場合の抵抗の変化(図 32(B)の 印)も C_L が増加するに従って大きく低減している。

内翼・外翼前縁フラップ：内翼・外翼前縁フラップを同時に操舵した場合(図 32(A)の 印)では、内翼・外翼フラップをそれぞれ単独で操舵した場合の各最適フラップ舵角(図 32(A)の 、 印)の間に最適フラップ舵角を有する($C_L = 0.3$ で最適フラップ舵角係数を比べると 印 : 0.56、 印 : 1.19、 印 : 0.82)。

前縁・後縁フラップ：内翼・外翼前縁フラップを $\delta_{f, LEin/out} = 30/12.2^\circ$ に操舵した場合の後縁フラップの最適フラップ舵角(図 32(A)の + 印)は、後縁フラップのみを操舵した場合(図 32(A)の 印)に比べ小さいフラップ舵角を示す。前縁フラップと後縁フラップを組合せて操舵すると C_D (図 32(B)の + 印)は大幅に低減している。

フラップ操舵時の結果から最適フラップ舵角を求めた。内翼前縁フラップの一部を除いてすべてのケースで C_L が増加するにつれ、各フラップでの最適舵角は増加する傾向が見られる。また、これらのフラップ操舵により C_D は大幅に低減される。前縁・後縁フラップを組合せて操舵すると前縁フラップのみを単独で操舵した場合や後縁フラップのみを単独で操舵した場合に比べて最適フラップ舵角は減少する傾向が得られた。

4.4 各種フラップ単独効果の足し合わせと複合効果の比較

前節までに各種フラップを単独で操舵した場合の単独効果と、複数のフラップを同時に操舵した場合の複合効果を調べた。一般に複数のフラップを同時に操舵した場合の複合効果は概ねそれぞれのフラップの単独効果が足し合わさったような効果が得られると考えられる。しかし、それぞれのフラップの単独効果を足し合わせた場合に比べ、複数のフラップを同時に操舵した場合ではフラップ同志で流れの干渉が起こっていると考えられる。そこで、このこと

を考えるために各種フラップ(内翼・外翼前縁フラップ、後縁フラップ)の単独操舵による効果(単独効果)を足し合わせた場合(今後これを「単独効果の足し合わせ」と呼び、フラップの干渉を考えない、すなわち線形的であるとした場合に相当するものとする)と二つ以上のフラップを同時に操舵した場合の複合効果について比較する。比較の方法としては L/D 特性の改善に焦点を絞り、フラップ効果による C_L 、 C_D の変化に注目した。なお、内翼・外翼前縁フラップ単独効果の足し合わせと複合効果を比較する方法を付録A-3 に詳述する。ここでは付録A-3 の結果を基に2つ以上のフラップを操舵した場合における各フラップの効果を調べた。

4.4.1 内翼・外翼前縁フラップ効果

図33には付録A-3の方法に従って求めた内翼前縁フラップと外翼前縁フラップの単独効果の足し合わせと複合効果の比較結果を示す。図33(A)には C_L 、 C_D 分布において、内翼前縁フラップのみの効果である単独効果(印:S300000-S000000)と、外翼前縁フラップを操舵した際の内翼前縁フラップの効果である複合・単独効果混合型(印:S301200-S001200)の結果を示す。同様に図33(B)には内翼前縁フラップの操舵有無での外翼前縁フラップ効果(単独効果:S001200-S000000(印)と複合・単独効果混合型:S301200-S300000(印))の結果を示す。また図33(C)には内翼・外翼前縁フラップ単独効果の足し合わせ(印)と複合効果(印)および複合・単独効果の混合型(印)の結果を示す。さらに図33(D)には L/D- C_L 特性を示す。

図33(A)の C_L を見ると、 $>7^\circ$ では外翼前縁フラップを操舵した場合(印)が操舵していない場合(印)に比べ、内翼前縁フラップによる C_L 値が大きい($C_{L, S300000-S000000} < C_{L, S301200-S001200}$)。図33(B)で $>7^\circ$ では内翼前縁フラップを操舵した場合(印)が操舵していない場合(印)に比べ外翼前縁フラップによる C_L 値が大きく($C_{L, S001200-S000000} < C_{L, S301200-S300000}$)、両者を足し合わせた場合(図33(C)上段)では単独効果の足し合わせ(印)より複合・単独効果の混合型(印)の方がより大きな C_L 値を示す。また図中には内翼前縁フラップと外翼前縁フラップの複合効果(図33(C)の 印:S301200-S000000)も重ねて示す。付録A-3で述べたように複合効果(印)は単独効果の足し合わせ(印)と複合・単独効果の混合型(印)の平均値を示す。単独効果の足し合わせ(図33(C)の 印)より複合効果(図33(C)の 印)の場合の方が $>7^\circ$ で C_L 値が大きく、L/D が向上される方向に働く。

図33(A)の下段に示す C_D においては、 $5^\circ \sim 12^\circ$ では外翼前縁フラップを操舵した場合(印)が操舵していない場合(印)に比べ、内翼前縁フラップによる C_D がわずかに小さく、L/D は向上される方向に働く。外翼前縁フ

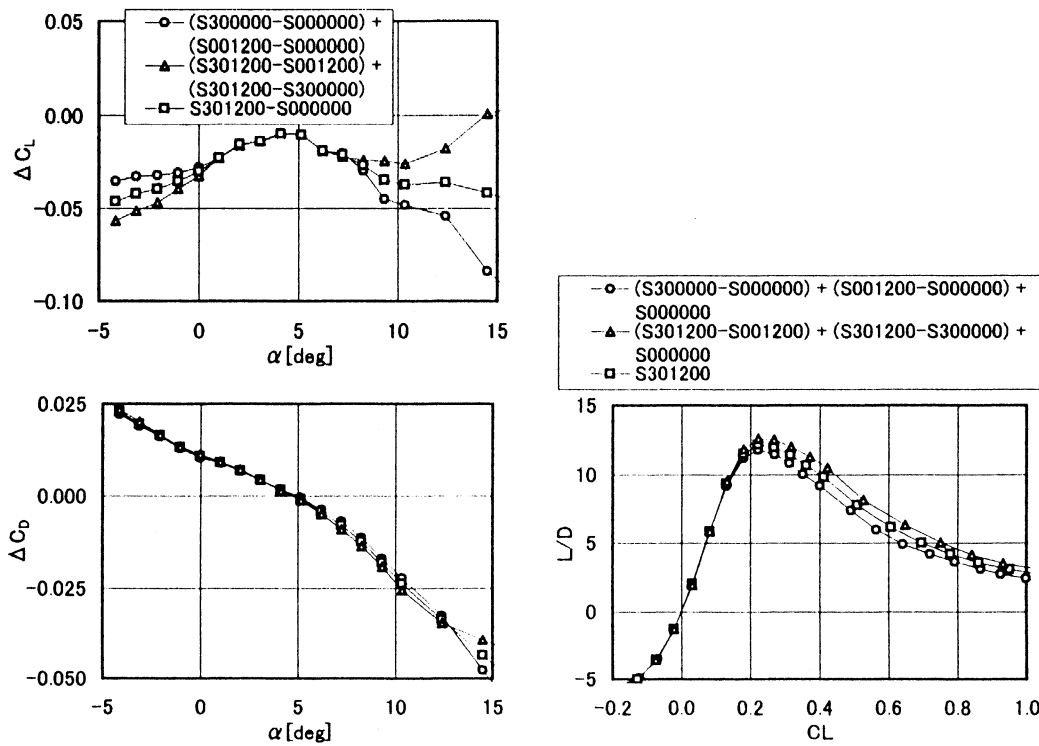
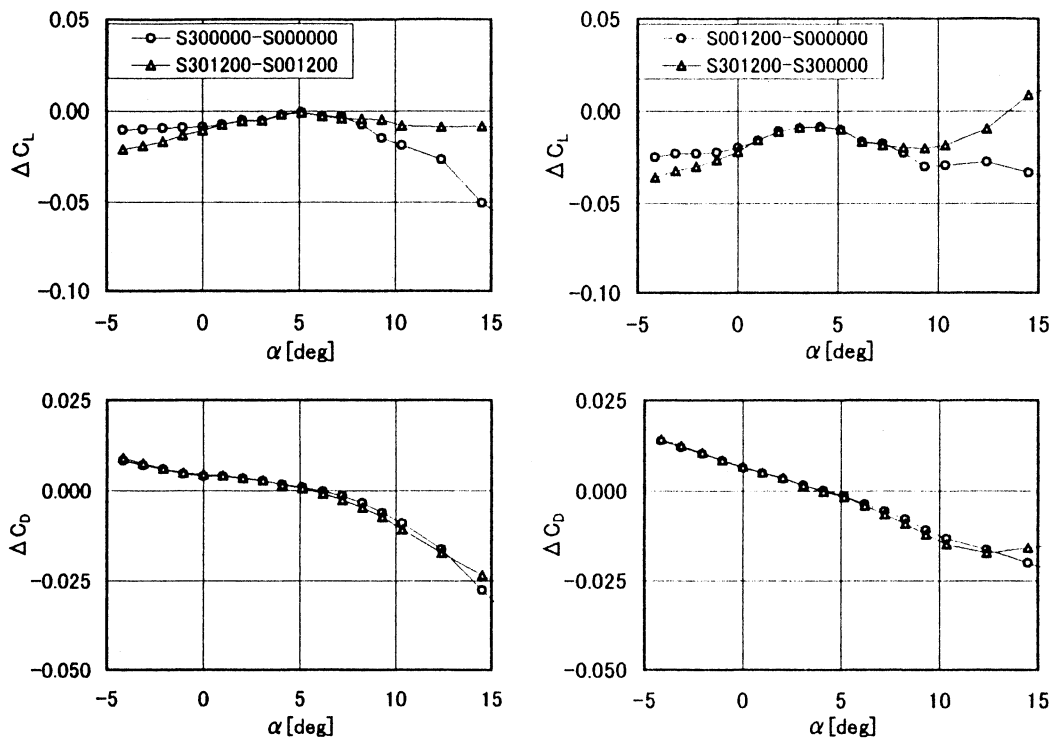


図33 内翼・外翼前縁フラップにおける単独効果と足し合わせと複合効果の比較

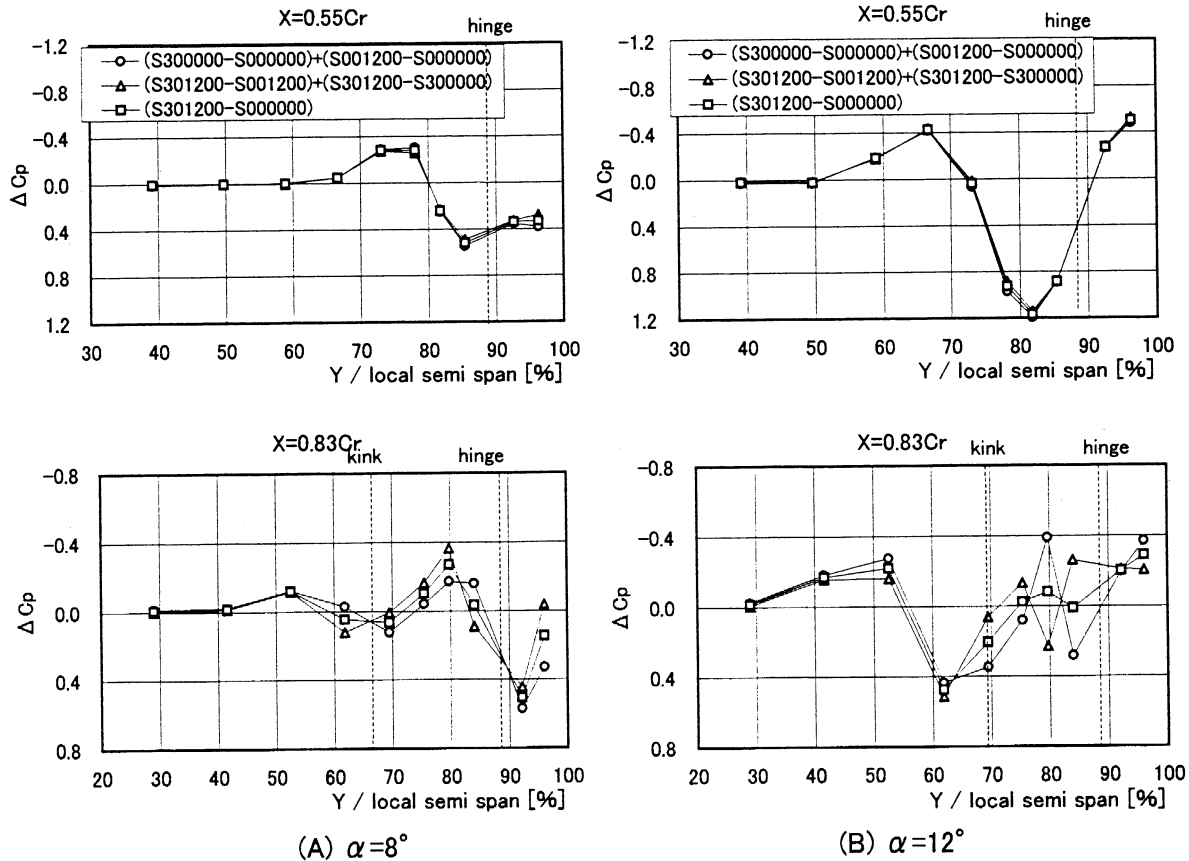


図 34 C_p 分布における内翼・外翼前縁フラップの単独効果と複合効果の比較

ラップ効果(図 33(B))は内翼前縁フラップ効果と同様な傾向が見られ、 5° - 12° の範囲では内翼前縁フラップを操舵した場合(印)が操舵していない場合(印)に比べ、外翼前縁フラップによる C_D の値は小さい。内翼前縁フラップの効果と外翼前縁フラップの効果を足し合わせた場合(図 33(C))ではさらに両者(印と印)の差が増大する。

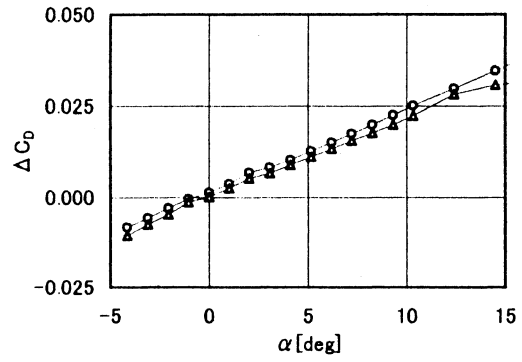
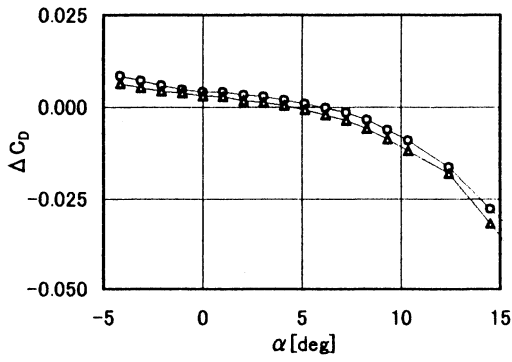
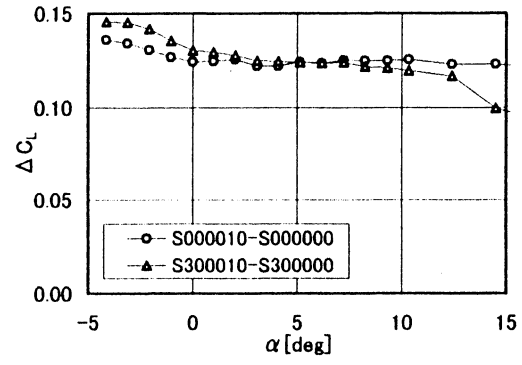
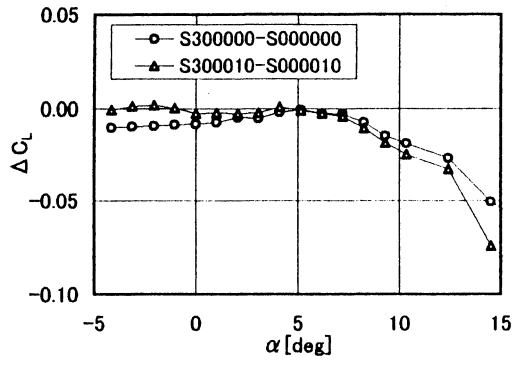
図 33(D)の L/D 特性を見ると、 $C_L = 0.2$ で複合効果の L/D (印)が単独効果を足し合わせ場合(印)より改善されている。 $0.2 < C_L < 0.4$ 範囲(5° - 9°)での複合効果による L/D の改善の主要因は、単独効果の足し合わせに比べ C_D が低減されていること、また $0.4 < C_L$ での L/D の改善は C_L の増加によっていることが確認された。

図 34 には、内翼・外翼前縁フラップの単独効果の足し合わせ(印)、複合効果(印)および複合・単独効果混合型(印)について C_p 分布を示す。 8° と 12° の場合とも $X = 0.55C_r$ では 3 つのケースの C_p 分布がよく一致しているのに対して、このことより $X = 0.83C_r$ では差異が大きい。図 33(D)で見られた内翼・外翼前縁フラップの単独効果の足し合せと複合効果での L/D の差は、 $X = 0.83C_r$ 付近での流れ場の違いによることが考えられる。

4.4.2 前縁・後縁フラップ効果

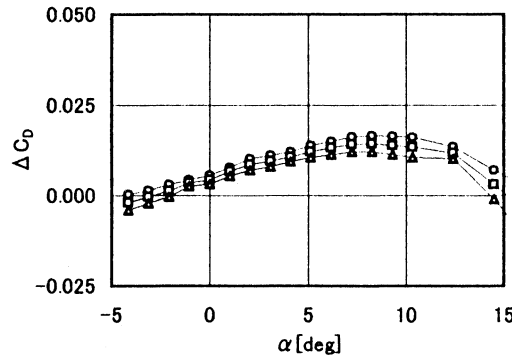
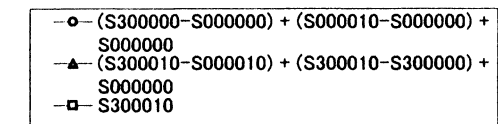
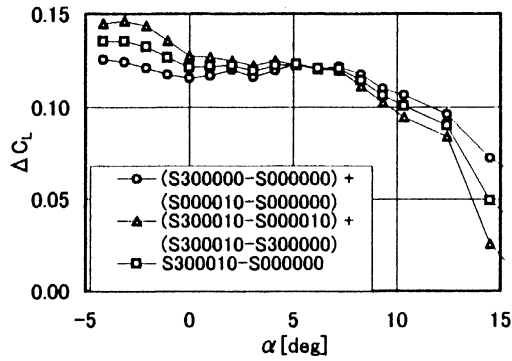
(1) 単独効果の足し合わせと複合効果による C_L , C_D
 図 35 に内翼前縁フラップと後縁フラップの単独効果の足し合わせ(印)と複合効果(印)および複合・単独効果複合型(印)について、前節同様に C_L と C_D の実験結果を示す。後縁フラップ操舵の有無での内翼前縁フラップ効果による C_D (図 35(A))を見ると、後縁フラップを操舵していない場合(○印: S300000-S000000)に比べ、後縁フラップを操舵した場合(印: S300010-S000010)では C_D が低減する。また内翼前縁フラップの操舵の有無での後縁フラップ効果による C_D (図 35(B))は、内翼前縁フラップを操舵した場合(印: S300010-S300000)の方が操舵していない場合(○印: S000010-S000000)に比べ小さい値を示す。内翼前縁フラップ効果と後縁フラップ効果を足し合わせた場合(図 35(C))では、単独効果の足し合わせ(○印)より複合・単独効果混合型による足し合わせの C_D (印)の方がさらに小さく、また複合効果による C_D (印: S300010-S000000)は、単独効果の足し合わせと複合・単独効果混合型の両者の平均値を示す。以上より、内翼前縁・後縁フラップの複合効果では単独効果の足し合わせより C_D が低減されるため L/D が向上(図 35(D))される。

図 36 には外翼前縁フラップと後縁フラップの C_D の



(A) 内翼前縁フラップの効果

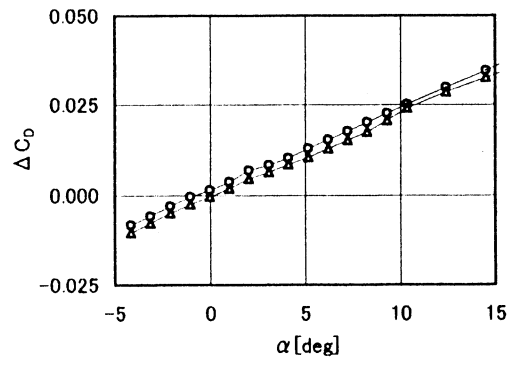
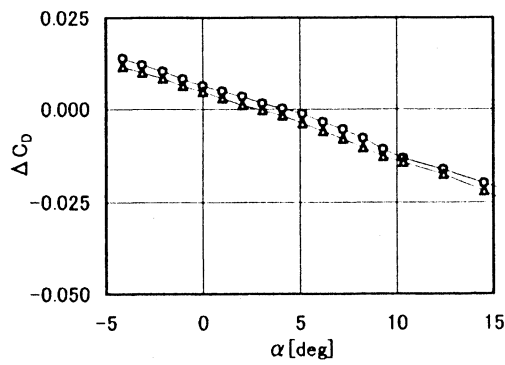
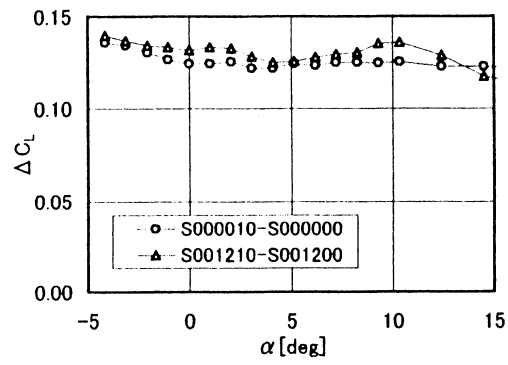
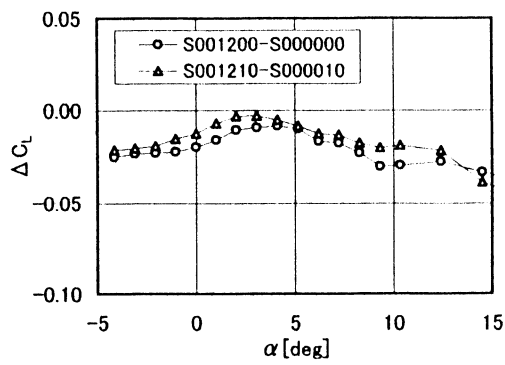
(B) 後縁フラップの効果



(C) 内翼前縁・後縁フラップの効果

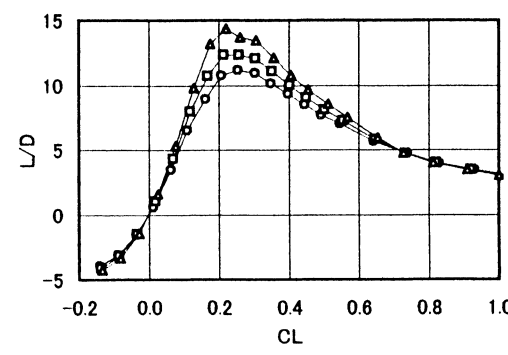
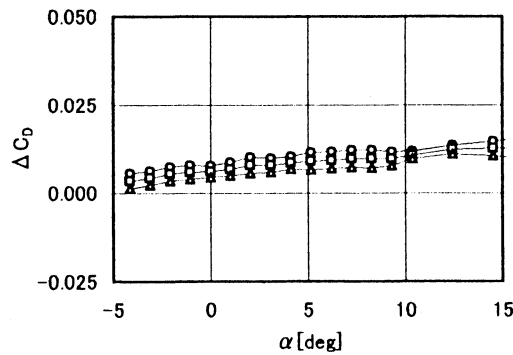
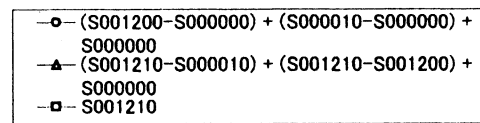
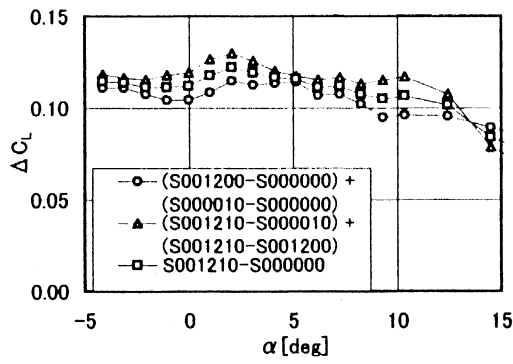
(D) L/D特性

図35 内翼前縁・後縁フラップにおける単独効果と足し合わせと複合効果の比較



(A) 外翼前縁フラップの効果

(B) 後縁フラップの効果



(C) 外翼前縁・後縁フラップの効果

(D) L/D特性

図 36 外翼前縁・後縁フラップにおける単独効果と足し合わせと複合効果の比較

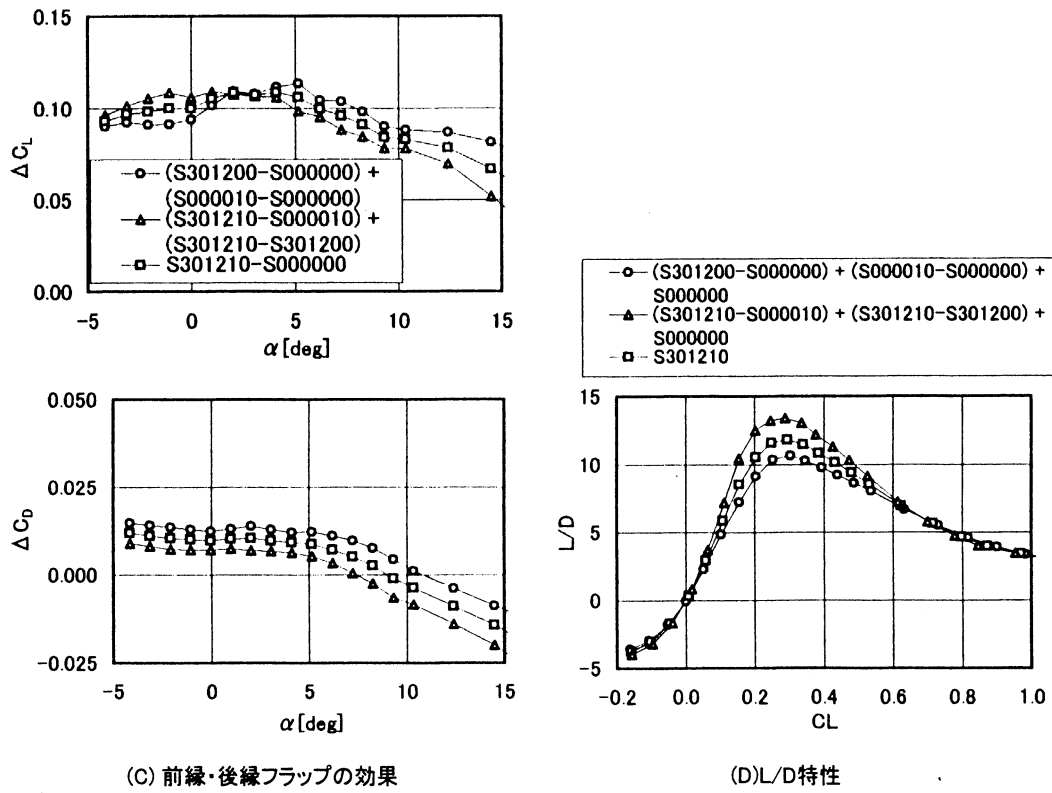
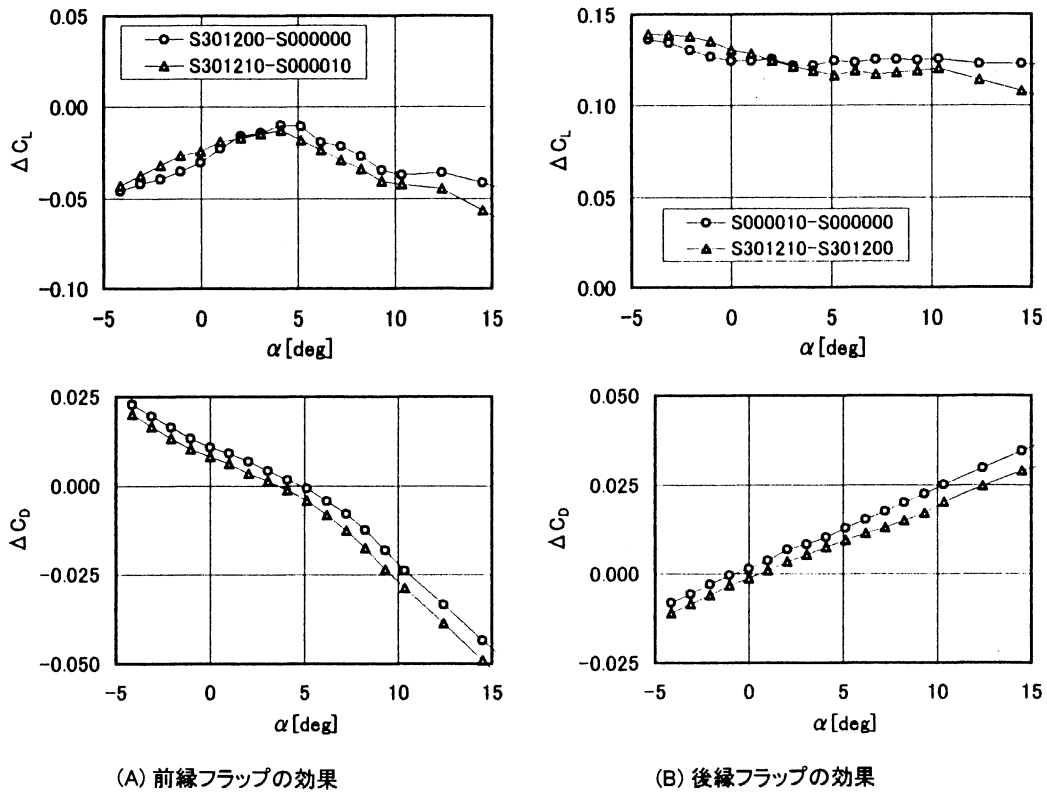


図 37 前縁・後縁フラップにおける単独効果と足し合わせと複合効果の比較

比較結果を図 35 と同様に示す。外翼前縁フラップと後縁フラップを組合せた場合では、内翼前縁・後縁フラップを組合せた場合と同様な傾向を示す。後縁フラップを操舵した場合の外翼前縁フラップの効果(図 36(A): 印)は後縁フラップを操舵していない場合(○印)に比べて小さい C_D 値を示し、後縁フラップ(図 36(B))でも外翼前縁フラップを操舵した場合(印)が操舵していない場合(○印)より C_D が小さい。外翼前縁・後縁フラップ効果を足し合わせた場合(図 36(C))では複合効果(印)が単独効果の足し合わせ(○印)より C_D は小さく、単独効果の足し合わせに比べ複合効果では C_D の低減により L/D は向上(図 36(D))される。

図 37 には内翼・外翼前縁フラップと後縁フラップの C_L , C_D の比較結果を図 35, 36 と同様に示す。ここでは内翼・外翼前縁フラップを同時に操舵した場合を前縁フラップの単独効果と呼ぶことにする(付録 A-3 参照)。さらに後縁フラップを単独で操舵した場合を後縁フラップ単独効果と呼ぶことにする。内翼・外翼前縁フラップと後縁フラップを組合せた場合では、内翼前縁と後縁フラップを組合せた場合や、外翼前縁フラップと後縁フラップを組合せた場合と同様な傾向を示す。後縁フラップを操舵した場合の前縁フラップ(内翼・外翼前縁フラップ)の効果(図 37

(A): 印)は、後縁フラップを操舵していない場合(○印)に比べ小さい C_D 値を示し、後縁フラップの場合(図 37(B))でも前縁フラップを操舵した場合(印)が操舵していない場合(○印)より C_D が小さい。前縁・後縁フラップ効果を足し合わせた場合(図 37(C))では複合効果の C_D (印)が単独効果の足し合わせ(○印)より小さく、複合効果では単独効果の足し合わせに比べ C_D の低減により L/D は向上(図 37(D))される。

(2) 単独効果の足し合わせと複合効果の考察

前節で述べたように前縁フラップ効果(内翼・外翼とも)と後縁フラップ効果はお互いに干渉しており、後縁フラップの操舵により前縁フラップまわりの流れ場が異なり、前縁フラップ効果も変化する。同様に前縁フラップの操舵により後縁フラップの効果も変化することが考えられる。図 38 には内翼前縁フラップと後縁フラップの操舵による実効迎角の変化の概念図を単独効果と複合・単独効果混合型についてまとめて示す。

・前縁フラップ効果：後縁フラップ操舵により前縁フラップ効果も変化することについてまず考える。後縁フラップを正方向に操舵すると、操舵していない場合に比べ有効な迎角が増加する。そのため後縁フラップを操舵していない場合より、より大きな有効迎角での前縁フラップ効果が得られ

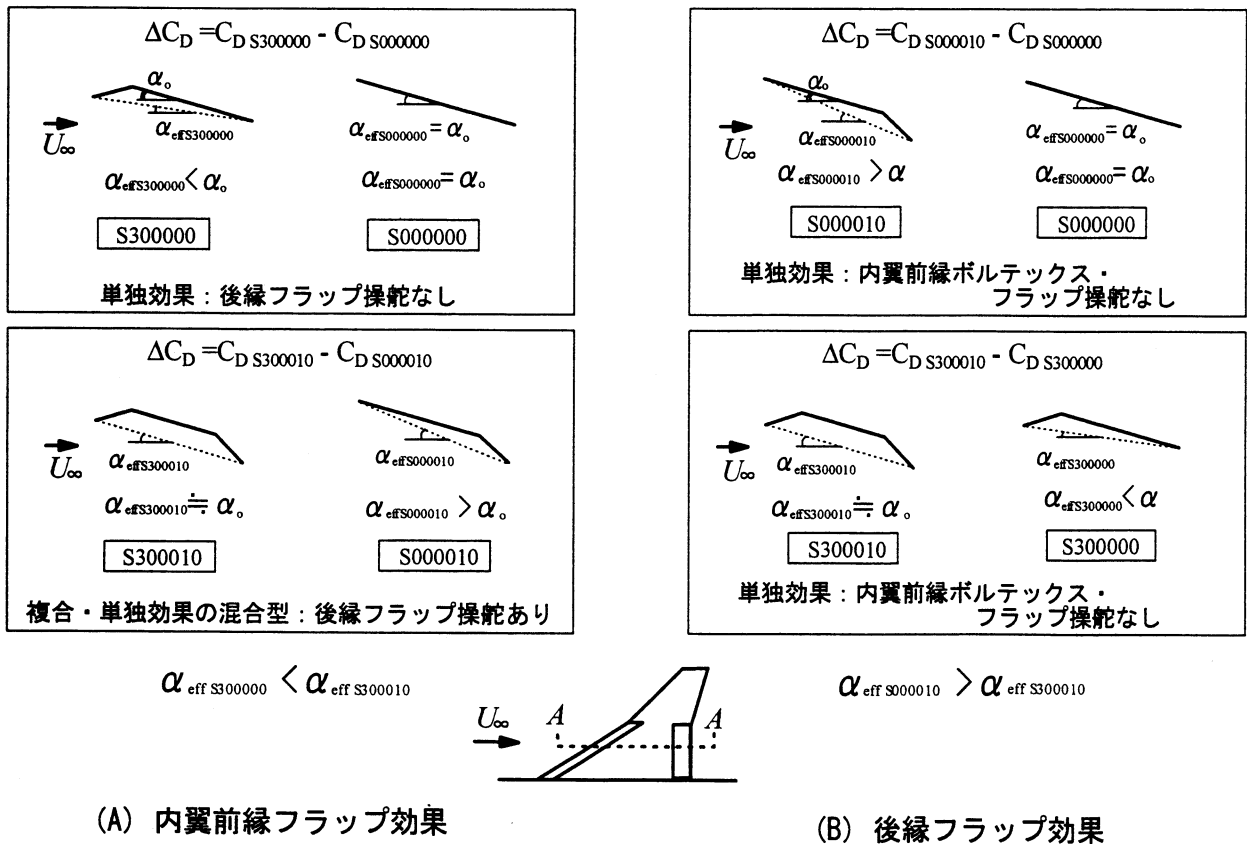


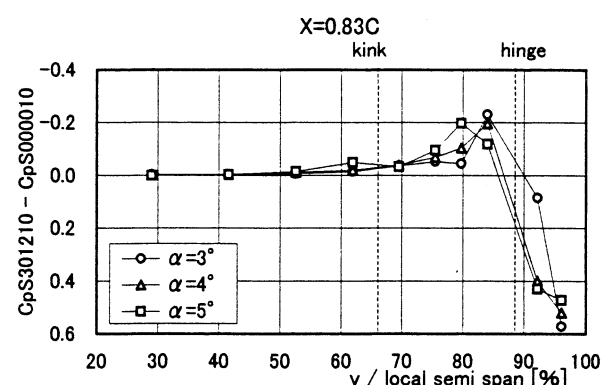
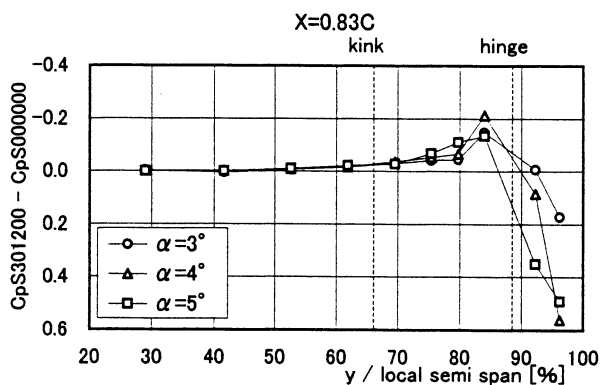
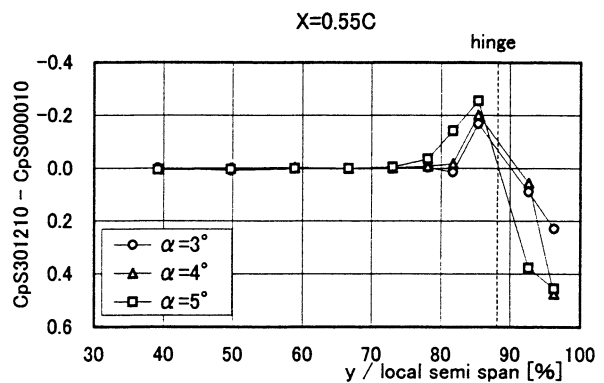
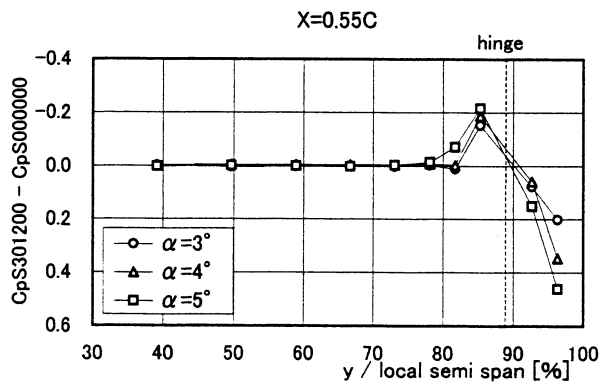
図 38 内翼前縁・後縁フラップの操舵による実効迎角の変化 (単独効果と複合・単独効果混合型の比較、A-A 断面)

る(図 38(A))。これは後縁フラップを操舵した場合の方が操舵していない場合より小さい迎角で同一の前縁フラップ効果(C_D)を得られることを意味する。図 39 には後縁フラップ操舵有無での外翼前縁フラップ効果による翼表面圧力分布の変化分 C_p (図 36(A)と同様)を示す。後縁フラップを操舵していない場合(図 39(A))の迎角 $\alpha_0 = 4^\circ, 5^\circ$ での C_p 分布は、後縁フラップ操舵時(図 39(B))の迎角 $3^\circ, 4^\circ$ ($\alpha_0 - 1^\circ$)での C_p 分布と類似した分布を示す。このことから後縁フラップを操舵すると、操舵しない場合より有効な迎角が増加するものと考えられるため、同一の前縁フラップ効果(ここでは C_p 分布)を持つ場合には、後縁フラップを操舵した場合の方が操舵していない場合に比べ迎角が小さいことが確認できる。図 35(A), 36(A), 37(A)で後縁フラップを操舵した場合の C_D 特性(印)が、操舵していない場合(印)より左方向(迎角が小さい方向)にシフトしていることは、この圧力結果から容易に説明できる。前縁フラップ効果(内翼・外翼とも)を横軸でプロットすると(図 35(A), 36(A), 37(A)) C_D 特性が右下がりであり、そのため後縁フラップを操舵した場合の方が操舵していない場合に比べ C_D は小さい値を示す。

・後縁フラップ効果：次に C_D に関して、前縁フラップ操舵により後縁フラップ効果が変化することについて考える。図 35(B), 36(B), 37(B)より、前縁フラップ操舵時の後

縁フラップ効果は前縁フラップを操舵していない場合に比べ C_D 曲線が右方向(高い迎角の方向)にシフトしている。これは前縁フラップを操舵した場合には操舵していない場合に比べ有効な迎角が減少するためであり(図 38(B))、前縁フラップを操舵していない場合に比べより小さい迎角(幾何学的な迎角より小さい)での後縁フラップの効果を得るためと考えられる。このことは同一の後縁フラップ効果(C_D)が得られる迎角が前縁フラップ操舵の有無により異なり、前縁フラップを操舵した場合の方が操舵しない場合より大きな迎角で同じ後縁フラップ効果(C_D)を持つことを意味する。後縁フラップ効果による C_D 特性は変化に対して右上がりであり(図 35(B), 36(B), 37(B))、そのため前縁フラップを操舵した場合の方が操舵していない場合に比べ C_D は小さい値を示す。

・前縁・後縁フラップ効果：図 35(C), 36(C), 37(C)より、前縁フラップ効果や後縁フラップ効果は、いずれも単独で操舵した場合(単独効果の足し合わせ)より組合せて操舵した場合(複合・単独効果混合型)の方が C_D は小さい値を示した。また同様な理由から、前縁・後縁フラップの単独効果の足し合わせより複合効果の方が小さい C_D を示している。このことは単独効果の足し合わせより複合効果の方が C_D が小さくなり、これにより高い L/D を示したものと考えられる。



(A) 後縁フラップ操舵なし

(B) 後縁フラップ操舵あり

図 39 C_p 分布における後縁フラップ操舵有無での前縁フラップの効果

内翼前縁フラップと後縁フラップの複合効果と、外翼前縁フラップと後縁フラップの複合効果を比較すると、外翼前縁・後縁フラップの組合せの方が、内翼前縁・後縁フラップの組合せよりも L/D における複合効果が大きかった(図 35(D), 36(D))。主翼における前縁・後縁フラップの位置からでは気流に対して前後に位置する内翼前縁フラップと後縁フラップの干渉の方が大きいと思われる。しかし、外翼側が内翼側より局所的な翼弦長が短いためフラップを操舵すると大きなキャンパーが生じるのと同様な効果が得られるため、前縁・後縁フラップの干渉が大きくなり、そのため内翼前縁・後縁フラップより外翼前縁・後縁フラップでの複合効果がより大きくなったものと考えられる。ただし内翼前縁・後縁フラップの組合せによる複合効果と外翼前縁・後縁フラップの組合せによる複合効果は本質的には同等の現象と考えられる。また内翼・外翼前縁フラップと後縁フラップの複合効果では、内翼前縁フラップと後縁フラップの複合効果と、外翼前縁フラップと後縁フラップの複合効果の両者が含まれているため、単独効果の足し合わせより複合効果はさらに大きく、大幅な L/D の向上が得られたと考えられる(図 37(D))。

5. 結 論

風洞実験を行い高揚力装置(内翼前縁フラップ、外翼前縁フラップおよび後縁フラップ)付き超音速航空機(SST)形態の空力特性について調べた。各種フラップを単独で操舵した場合のフラップ効果や複数のフラップを組合せて操舵した場合の複合効果について調べ、離着陸性能における各種フラップの有効性について検討した。

- ・内翼前縁フラップや外翼前縁フラップは低い迎角では前縁剥離渦の形成を抑制するが、高い迎角ではフラップ上に前縁剥離渦を捕獲してボルテックス・フラップとして機能することを確認した。このような流れ場の変化により C_L 、 C_D が低減されるが、 C_L に比べ C_D が低減される割合が大きく、広い C_L の範囲で L/D は改善される。
- ・後縁フラップは C_L 、 C_D を増大させるとともに機首下げピッチング・モーメントも増大させる。後縁フラップ舵角 $\delta_{i_{TE}}=10^\circ$ の場合ではフラップ上で流れは付着しており、 L/D 特性は大幅に改善される。
- ・内翼・外翼前縁フラップおよび後縁フラップを組合せて操舵すると広い C_L の領域において L/D は大幅に改善される。またそれぞれのフラップ単独効果の足し合わせと両者を同時に操舵した場合の複合効果を比較すると、複合効果の方が L/D が向上される。
- ・最大揚抗比 $(L/D)_{\max}$ はクリーン形態(S000000)の $(L/D)_{\max}=11.69$ に比べ、外翼前縁フラップと後縁フラップを操舵した S000510 で $(L/D)_{\max}=12.98$ ともっとも大き

な値を示した。これは外翼前縁フラップと後縁フラップを操舵することにより翼のキャンパーが大きく、翼特性が向上したことによる。

- ・内翼・外翼前縁フラップや後縁フラップを操舵した 301210 の場合ではクリーン形態に比べ $C_L=0.5$ での L/D は 48.3%改善された。これは内翼・外翼前縁フラップがボルテックス・フラップとして働くことや後縁フラップの効果、また前縁フラップや後縁フラップの複合効果によるものである。
- ・後縁フラップは大きなピッチング・モーメントを生じさせるためトリムを考慮すべきであるのに対して、前縁フラップではピッチング・モーメントは大きく変化しない。

謝 辞

本研究を行うにあたって航空宇宙技術研究所 低速風洞グループの藤田敏美氏、岩崎昭人氏及び平成 12 年度東京大学大学院生の安部浩子氏の多大な協力を得ました。この場をお借りして深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 李家賢一：デルタ翼上に生じる前縁剥離渦の制御について ボルテックス・フラップの活用，日本航空宇宙学会誌，第 48 巻，第 554 号 (2000) pp. 161-167.
- 2) Coe, P.L., Jr. and Weston, R.P. ; Effects of Wing Leading-Edge Deflection on Low-Speed Aerodynamic Characteristics of a Low Aspect-Ratio Highly Swept Arrow-Wing Configuration (1979) NASA TP1434.
- 3) Coe, P.L., Jr., Kjelgaard, S.O. and Gentry, G.L., Jr. ; Low-Speed Aerodynamic Characteristics of a Highly Swept, Untwisted, Uncambered Arrow Wing (1983) NASA TP-2176.
- 4) 坪井伸幸，海田武司，川島鋭司，二ツ寺直樹；次世代超音速輸送機における低速揚抗比改善の試み，第 33 回飛行機シンポジウム講演集 (1995) pp. 309-312.
- 5) 坂田公夫；超音速実験機について NAL 次世代超音速機技術の研究開発，第 36 回飛行機シンポジウム講演集，特別講演 (1998).
- 6) 吉田憲司；小型超音速実験機の空力設計技術，日本流体力学会年会 2001 講演集 (2001) pp. 547-548.
- 7) Carlson, H.W. and Miller, D.S. ; Numerical Method for the Design and Analysis of Wings at Supersonic Speeds (1974) NASA TN D-7713.
- 8) 藤田敏美，岩崎昭人，藤枝郭俊，重見仁，中安英彦，勾坂雅一；産業用ロボットを用いた風洞模型支持システム (1994) NAL-TM666.
- 9) 進藤章二郎；低速風洞実験法(1992) コロナ社 .

付 録

A-1 . 2m × 2m 低速風洞とフラッタ風洞での空気力測定と比較 第2章で述べたように2m × 2m 低速風洞(空気力測定)とフラッタ風洞(流れの可視化)での実験では模型形状の詳細な違いやRe数に大きな違いがある。そのため、これらの違いにより両者で異なる流れ場が形成されることが懸念された。そこでフラッタ風洞で2m × 2m 低速風洞実験と同様な空気力測定を行うことにより、両者(空気力測定と流れの可視化)の結果が定性的に対応可能か否かを確認した。図A-1に2m × 2m 低速風洞とフラッタ風洞での空気力測定による翼上面に垂直方向の力成分(法線力: C_n)を示す。フラップを操舵してないS000000形態と比較すると、フラッタ風洞(図A-1(A))では $\alpha = 0^\circ$ で $C_n = 0$ であるのに対して、2m × 2m 低速風洞(図A-1(B))の場合では $\alpha = 0^\circ$ で $C_n < 0$ である。フラッタ風洞試験で用いた東大模型の翼にはワープがなく、取り付け角が 0° の平板翼であるため模型の上下方向で対称となり、 $\alpha = 0^\circ$ で $C_n = 0$ になる(模型が上下方向に対称である場合理想的には $\alpha = 0^\circ$ で $C_n = 0$ になる)。一方、2m × 2m 低速風洞試験で用いたNAL模型にはワープがあり、模型が上下方向に非対称である。そのため $\alpha = 0^\circ$ で $C_n \neq 0$ を示す。フラッタ風洞(図A-1(A))と2m × 2m 低速風洞(図A-1(B))でそれぞれ同じ模型形態による比較を行うと両者はほぼ同様な傾向を示している。両者共にS000030の場合に最も C_n が大きく、S301200の場合に最も小さい C_n を示す。このように両者で定量的な違いは見られるものの定性的にはよく一致していることがわかる。これにより2m × 2m 低速風洞で行った空気力測定実験結果とフラッタ風洞で行った流れの可視化結果との定性的な比較が可能であると判断した。

A-2 . 最適フラップ舵角の求める方法

最適フラップ舵角は下記のような方法で求めた。ここでは内翼前縁フラップの場合を例として説明することにす。なお、その他のフラップについても同様な方法で求めた。内翼前縁フラップ舵角 $\delta_{fLEin} = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ (S000000, S150000, S300000)でのポラー曲線から $C_L = 0.5$ での C_D の値を求めた(詳細は4.2節参照)。この3つのフラップ舵角での C_D の値を使って2次曲線を求め、図A-2に重ねて示す。この曲線から C_D が最も小さくなる舵角を最適フラップ舵角(δ_{fopt})として求めた。また、最適フラップ舵角における C_D の値も求めた。なお異なる C_L でも同様な方法で δ_{fopt} を求めた。

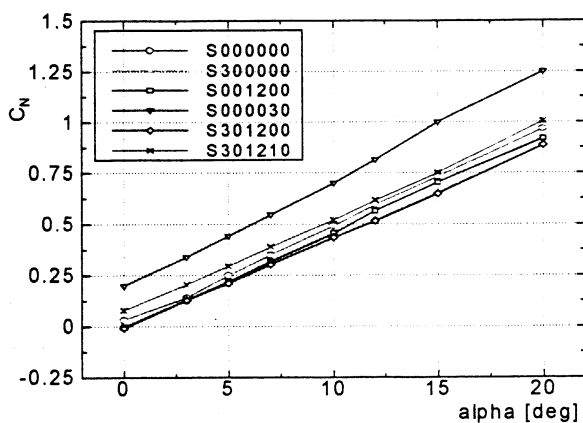
A-3 . 単独効果の足し合せと複合効果の比較方法

複数のフラップを操舵した場合の複合効果について調べるため、単独効果の足し合わせと複合効果を以下のような方法で比較した。まず各フラップ操舵時の C_L, C_D とフラップを操舵してないクリーン形態(S000000)の C_L, C_D との差分 $\Delta C_L, \Delta C_D$ に注目した。 C_D において各種フラップを単独で操舵した場合の単独効果と、複数のフラップを組合せて操舵した場合の複合効果について、操舵したフラップの種類を基に整理して図A-3に示す。また図中には各フラップ操舵時の C_D からS000000での C_D を差し引く場合の表記法も記入した。ここでは単独効果の足し合わせと複合効果について内翼前縁フラップと外翼前縁フラップによる C_D の変化を例に挙げて説明する。

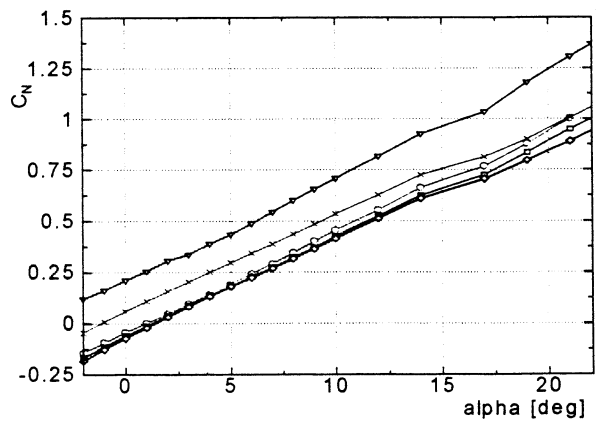
・ 単独効果の足し合わせ

内翼前縁フラップの効果(図A-3(A))と外翼前縁フラップの効果(図A-3(B))を足し合わせた場合であり、下記のように書ける。

$$\text{単独効果の足し合わせ} = C_{DLEin} + C_{DLEout} \quad (A-1)$$



(A) 東大フラッタ風洞実験



(B) NAL第二低速風洞実験

図A-1 NAL2m × 2m 低速風洞実験と東大フラッタ風洞実験での法線力 C_n の比較

・ 複合効果

内翼前縁フラップと外翼前縁フラップの複合効果は両者を組合せて操舵した場合の効果(図 A-3(D))である。

$$\text{複合効果} = C_{D,LEin+LEout} \quad (A-2)$$

・ 複合・単独効果混合型

内翼前縁フラップと外翼前縁フラップを同時に操舵した(複合効果)場合(図 A-3(D))から一つのフラップのみを操舵した場合(図 A-3(A)あるいは(B))の差分をとり、内翼前縁フラップと外翼前縁フラップのそれぞれの効

果を求め、それらを足し合わせる。これを複合・単独効果混合型と呼ぶことにする。複合・単独効果混合型の各フラップの効果は下記のように表記することができる。また、これらの効果を足し合わせると(A-3)のようにも書ける。

内翼前縁フラップの効果:

$$C_{D[LEin \text{ with } LEout]} = C_{D,LEin+LEout} - C_{D,LEout}$$

外翼前縁フラップの効果:

$$C_{D[LEout \text{ with } LEin]} = C_{D,LEin+LEout} - C_{D,LEin}$$

複合・単独効果混合型での各フラップ効果の足し合わせ:

複合・単独効果混合型 =

$$C_{D[LEin \text{ with } LEout]} + C_{D[LEout \text{ with } LEin]} = 2 C_{D,LEin+LEout} - (C_{D,LEin} + C_{D,LEout}) \quad (A-3)$$

ここで複合効果(A-2)と単独効果の足し合わせ(A-1)との差を $X_{LEin+LEout}$ とし

$$X_{LEin+LEout} = C_{D,LEin+LEout} - (C_{D,LEin} + C_{D,LEout}) \quad (A-4)$$

$X_{LEin+LEout}$ と $C_{D,LEin+LEout}$ で(A-1)~(A-3)を表すと以下のようになる。

・ 単独効果の足し合わせ

$$C_{D,LEin} + C_{D,LEout} = C_{D,LEin+LEout} - X_{LEin+LEout} \quad (A-5)$$

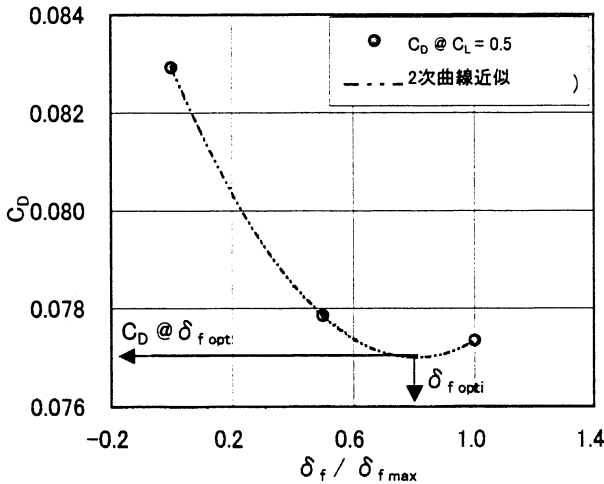
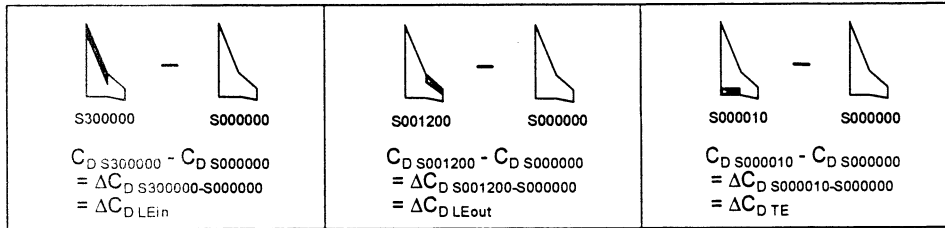


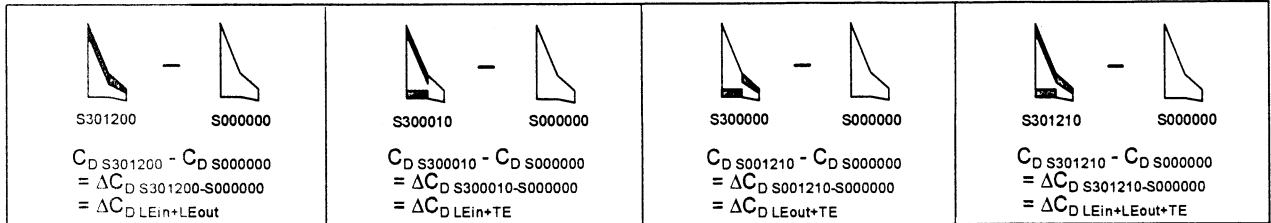
図 A-2 内翼前縁フラップの最適フラップ舵角と最適フラップ舵角操舵時の C_D ($C_L = 0.5$)

・ 単独効果



(A) 内翼前縁フラップ効果 (B) 外翼前縁フラップ効果 (C) 後縁フラップ効果

・ 複合効果



(D) 内翼前縁フラップと外翼前縁フラップ効果 (E) 内翼前縁フラップと後縁フラップ効果 (F) 外翼前縁フラップと後縁フラップ効果 (G) 内翼前縁フラップと外翼前縁フラップと後縁フラップ効果

図 A-3 C_D における単独効果と複合効果

(フラップ操舵時の舵角: 内翼前縁フラップ = 30°, 外翼前縁フラップ = 12.2°, 後縁フラップ = 10°)

・複合効果

$$C_{D\text{ LE in + LE out}}$$

・複合・単独効果混合型

$$2 C_{D\text{ LEin+LEout}} - (C_{D\text{ LEin}} + C_{D\text{ LEout}}) = C_{D\text{ LEin+LEout}} + X_{\text{LEin+LEout}} \quad (\text{A-6})$$

上記の整理方法によると、複合・単独効果混合型(A-6)と単独効果の足し合わせ(A-5)との差($2X_{\text{LEin+LEout}}$)は、複合効果(A-2)と単独効果の足し合わせ(Eq.A-5)との差($X_{\text{LEin+LEout}}$)の2倍であることがわかる。このことから、複合・単独効果混合型における内翼前縁フラップ効果($C_{D\text{ [LE in with LE out]}}$)と外翼前縁フラップ効果($C_{D\text{ [LE out with LE in]}}$)をそれぞれ分離して調べ、単独効果($C_{D\text{ LE in}}$ と $C_{D\text{ LE out}}$)と比較して調べることができる。これにより複合効果と単独効果の足し合わせの差($C_{D\text{ LE in + LE out}}$ と $C_{D\text{ LE in + LE out}} - X_{\text{LEin+LEout}}$)を明確にすることを4.4節において試みる。

C_L, C_p についても同様な方法による比較が可能であり、内翼前縁フラップと後縁フラップの場合(図 A-3(E))、外翼前縁フラップと後縁フラップの場合(図 A-3(F))及び内翼・外翼前縁フラップと後縁フラップの場合(図 A-3(G))でも同じ処理による比較を行った。但し、内翼・外翼前縁フラップと後縁フラップの場合(図 A-3(G))では内翼・外翼前縁フラップを同時に操舵した場合(図 A-3(D))を前縁フラップの単独効果とし、そこに後縁フラップの単独効果(図 A-3(C))を足し合わせたものを単独効果の足し合わせとして処理を行った。

内翼前縁フラップと後縁フラップの場合(図 A-3(E))、外翼前縁フラップと後縁フラップの場合(図 A-3(F))及び内翼・外翼前縁フラップと後縁フラップの場合(図 A-3(G))でも同じ処理による比較を行った。但し、内翼・外翼前縁フラップと後縁フラップの場合(図 A-3(G))では内翼・外翼前縁フラップを同時に操舵した場合(図 A-3(D))を前縁フラップの単独効果とし、そこに後縁フラップの単独効果(図 A-3(C))を足し合わせたものを単独効果の足し合わせとして処理を行った。