

アペックスフェンスを装備したデルタ翼の渦構造

板倉嘉哉[†], 小川秀介
千葉大学教育学部

Flow-field Structure of Delta Wing with Slotted Apex Fence

by
Yoshiya ITAKURA[†] and Syusuke OGAWA (Chiba University, Faculty of Education)

ABSTRACT

Slotted apex fences are applied to improve low-speed aerodynamic characteristics of 60 deg. delta wing model. The longitudinal forces and moment acting on the thin delta wing with apex fences (Apex fences are hinged to the delta wing upper surfaces along the leading edges at angles of 45, 90 and 135 degrees.) are measured by using universal multi-component sensor and static pressure distribution on the upper surface is also measured by using pressure transducer with pressure scanner. Smoke flow visualization and the light sheet technique are being used to obtain cross sectional views of the fence induced vortices. Combination of pressure distribution maps and image of vortices provide information on the three-dimensional nature of the flow field structure induced by slotted apex fences.

主な記号

C_A : Axial force coefficient (Body axis)
 C_N : Normal force coefficient (Body axis)
 C_p : Static pressure coefficient
 S_f : Fence area, m^2
 S_w : Main wing area, m^2
 ΔC_A : Axial force increment ($\Delta C_A = C_A - C_{A, \text{Fence off}}$)
 ΔC_N : Normal force increment ($\Delta C_N = C_N - C_{N, \text{Fence off}}$)
 α : Angle of attack, degrees
 δ_f : Fence deflection angle, degrees

1. 緒論

長距離旅客需要が増大することが予想され、これに対処し得る高速大量輸送手段として次世代超音速輸送機開発の機運が世界的に高まりつつある。その実現に向けて克服すべき技術的課題は多々あるが、その一つとして、低速域での空力特性を改善する高揚力装置の開発が挙げられる。超音速輸送機に採用されるアスペクト比の小さいデルタ翼は、衝撃波による造波抵抗を低減できるため、超音速巡航に有利であるが、離着陸等の低速飛行時の空力特性には揚力傾斜小さい等の問題点がある。そのため、低速域における空力特性の改善を目的に、様々な高揚力装置が考案されており、我国においても、宇宙航空研究開発機構(JAXA)と東京大学の共同研究¹⁾としてボルテックスフラップの有効性が検証されており、実用化に向けて成果を上げている。

デルタ翼用高揚力装置としては、低迎角時に如何にして翼面上に強い渦を形成させるかが鍵となるが、その一つの試みとしてアペックスフェンス²⁾がある。アペックスフェンスとは Fig. 1 のようにデルタ翼頂点領域の前縁近傍に、三角形の小翼(フェンス)を装着するものであり、フェンスの存在により強力な渦対が誘起され、翼上面頂点領域に強い負圧を生じさせる働きがある。この負圧領域の発生により、低迎角域においても揚力の増大のみならず大きな機首上げモーメントが発生し、離着陸時における後縁フラップ展開による機首下げモーメントをトリムできる可能性もある。また、大迎角ではフェンスに誘起される渦は弱まり負圧も減少し、機首上げモーメントは小さくなる。このような空力特性は、飛行の安定という観点からも望ましいと考えられている³⁾。しかし、フェンス装着により主流方向への投影面積が増大し、抵抗の著しい増加⁴⁾が確認されており、アペックスフェンスの実用化には、抵抗の増加を抑え、いかにして揚抗比を改善するかが課題となる。そこで、筆者らはアペックスフェンス最大の欠点である投影面積の増大に起因する抵抗増加を抑えるべく、従来のフェン

スに改良を加えたスロッチッドアペックスフェンス⁵⁾を提案し、その空力特性を解明してきた。スロッチッドアペックスフェンスとは、フェンスに隙間(スロット)を設けることにより抵抗の増加を極力抑えることを期待するものである。しかし、スロットを通過する流れとフェンス渦が干渉し、空気力の測定だけでは十分に説明できない現象が確認されており⁶⁾、スロット貫流がフェンス渦の構造に与える影響等について詳細に検討する必要がある。

そこで、本報告ではこのスロッチッドアペックスフェンスを装備したデルタ翼を対象として、フェンスの有効性、スロットの有無、フェンス形状及び取り付け角の変化が翼面上の静圧分布及び渦構造に与える影響に着目して風洞実験を実施し、これまでに得られた空力特性を、翼面上の静圧分布及び渦構造の視点から検証することを目的とした。

2. 風洞試験の概要

空気力測定に使用した主翼模型を Fig. 2 示す。模型は全アルミニウム製で、最大翼弦長 130 mm, 最大翼幅 150 mm, 翼厚 3 mm, 後退角 60°, アスペクト比 2.3 で、前縁は 45°のエッジ形状になっている。翼上面頂点領域には Fig. 3 に示すフェンスが装備されており、スロット無し形態 Type-IA, スロット付き Type-IB (スロット面積比 25%) 及び Type-IC (同 50%) と Type-I 系列の底辺を 2 倍、高さを 1/2 倍とした Type-II 系列フェンスも用意し、合計 6 形態のフェンスを実験に使用したが、代表的な結果のみを報告する。各フェンスの寸法を Table 1 に示す。また、フェンスの取り付け角の影響を見るために、フェンスを主翼に対し 45°, 90°及び 135°に装着した。縦三分力試験では、主流風速は 23m/s (最大翼弦長基準で $Re=2.04 \times 10^5$) に設定し、迎角を -5°~40°に変化させて力測定を実施した。

Table 1 Fence configuration.

Type	Dimensions	Area ratio, S_f/S_w (%)
IA	Width, $W=40\text{mm}$, Height, $H=15\text{mm}$	6.0
IB		4.5
IC		3.0
IIA	Width, $W=80\text{mm}$, Height, $H=7.5\text{mm}$	6.0
IIB		4.5
IIC		3.0

模型は翼後端に接続した十分な剛性を有する長さ 300mm, 直径 10mm の SUS 製支柱により風洞内で스팅支持され、その後端に接続された汎用 6 軸力覚センサー(ニッタ株式会社, IFS-20E12A15-I25-EX)により空気力を計測した。

[†] E-mail: y_ita@faculty.chiba-u.jp

得られた空力データから空力係数算出においては、座標軸に機体軸系(C_N , C_A)を採用し整理した。これは、機体軸系を採用することにより、フェンス取り付け角が 90° の場合、法線力は翼面上の静圧分布の積分値に、軸力は主にフェンスに作用する圧力抵抗に依存することになり、その発生源を分離することが可能となるからである。

デルタ翼上面における縦渦発達の様子を調べるための渦断面の可視化では、風洞吹き出し口近傍に流動パラフィン塗布したニクロム線を設置し、スモークワイヤ発生装置(菅原製作所, MS-405)により線状煙を発生させ、主翼に対して垂直に照射したレーザーシート光により渦断面を可視化し、高速度カメラ(Ditect社, HAS-220)で記録した。なお、可視化実験では、主流風速を 3m/s (最大翼弦長基準で $Re=2.7 \times 10^4$) に設定した。

翼面上の静圧分布測定では、Fig. 2 と同一外形をした主翼模型に SUS パイプ (外径 0.8mm , 内径 0.5mm) 209 個を主翼に埋設し、各圧力孔からビニールチューブで導かれた静圧を圧力スカンナー(SCANIVALVE社)で切り替え、圧力センサー、歪増幅器及び A/D 変換器を介してパーソナルコンピュータに取り込み、データ処理され静圧係数分布としてコンピュータグラフィックスにより可視化した。

3. 結果及び考察

3.1 スロットの影響

3.1.1 軸力特性

Fig. 4 に Type-I 系列フェンスを 90° に取り付けられた場合の、法線及び軸力の特性を示す。フェンス無し形態の場合、軸力は翼表面上の粘性による摩擦力によるものが支配的となるが、フェンスを装着すると、投影面積の増大に伴い、エアブレイキと同様な作用による圧力抵抗が支配的となる。Fig. 6-A の 25%C における可視化結果からも、フェンス背後に強い渦が誘起されており、渦の負圧が軸力の増大をもたらしていることがわかる。一方スロット付きである Type-IB 及び IC の軸力増加は全迎角範囲で著しく抑えられており、スロット無し形態に対して Type-IB で約 70%、IC では約 60%に軸力が低下している。スロットによる軸力増加抑制の有効性が確認できる。

3.1.2 法線力特性

まず Fig. 4 の C_N - α 曲線により、スロットの存在が法線力特性に与える影響を概観する。 15° 以下の低迎角領域でも、フェンスにより誘起された渦により法線力は増大しており、高揚力装置としての効果を確認することができる。しかし、迎角が上昇し 16° 以上になるとフェンス無し形態の方が法線力は増大することになる。これは、迎角の増加とともに、フェンスが主流に対して主翼後方に位置するようになり、誘起されるフェンス渦が徐々に弱まるからである。また、図からは判別しにくいですが、Type-IB フェンスでは迎角 15° 近傍で迎角に対して平坦な法線力特性を示しており、スロットを貫く流れがフェンス渦と干渉していることが考えられるが、このような特性となる原因を空気力の測定から説明することはできない。さらに迎角を増していくと 30° 近傍で失速を迎えるが、フェンス付全形態で失速角がフェンス無しよりも低下する傾向が観察され、フェンスの存在が翼面上に形成される渦の崩壊を促進するものと考えられる。

次に、スロットによる法線力増大効果の詳細を比較するために、フェンス無し形態からの増分を示したものが Fig. 5 である。迎角 15° 以下において Type-IA 及び IC フェンスでは法線力の増大効果を確認することができるが、スロット面積の小さい Type-IB ではフェンス無し形態と同程度の法線力しか得られていないのがわかる。また、迎角の増加に伴っては、Type-IA 及び IC では緩やかに増分が低下していくのに対し、Type-IB では迎角が 15° を越えると法線力の増

分は急激に低下しているが、これは前述の平坦な法線力変化部に対応しており、法線力そのものが低下しているのではない。スロット面積の小さい Type-IB フェンスで法線力増大効果が低いのは、フェンス渦の可視化画像及び翼面上の静圧分布から検証することができる。フェンス無し形態では、迎角の上昇に伴い前縁剥離渦は強くなり、主翼頂点領域の負圧は強まる性質があり、迎角 20° における静圧分布である Fig. 9-B-I からも、静圧のピーク値は -3.27 となっている。それに対し、Fig. 6-A の Type-IA フェンス背後では -2.0 まで上昇しており、フェンス無し形態よりも法線力は低下し、迎角 16° 以上で大小関係が逆転すると考えられる。また、Type-IB フェンスでは Type-IA に見られるようなフェンス背後で負圧領域が広範囲に形成されることはなく、フェンス先端背後の小範囲で強い負圧領域が観察されるだけである。Fig. 6-B の 25%C 断面での可視化画像より、フェンス上端及びスロット下端から渦が誘起されているのがわかるが、50%C 断面では Type-IA で見られるような明確な渦中心を確認することはできず、下流へ向けて両渦が融合しながら成長する様子を見ることもできない。また、圧力分布からも、渦による負圧領域との境界が不鮮明になっており、渦は存在するものの、かなり乱れた状態であると考えられる。Type-IB フェンスではスロット面積が小さく、そこを貫く流れは絞られ加速し、フェンスにより誘起される渦と干渉するため、下流へ向けての渦の成長を阻害することになり、法線力の増大効果を得ることができないと考えられるが、その詳細な流れ場の解明は今後の課題である。

3.2 フェンス取り付け角の影響

3.2.1 法線力特性

Fig. 7 に Type-IA フェンスにおける法線力増分に与えるフェンス取り付け角の影響を示す。迎角 10° 以下においては、フェンス取り付け角によらず、法線力の増加が観察されており、フェンス渦の存在により渦揚力が作用しているのがわかる。また、その大小関係はフェンス取り付け角が 90° で最大の増分を示している。法線力の増加はフェンスにより誘起される渦の強さに依存しており、フェンスが主流に対して直角に近い迎角を持つとき、翼面上に強いフェンス渦が誘起されるからであり、翼面上の静圧分布からも検証することができる。Fig. 9-A-III のフェンス取り付け角 90° の静圧分布では、迎角 5° においてもフェンス背後に低圧領域が形成されており、フェンス渦が誘起されているのがわかる。一方、Fig. 9-A-IV のフェンス取り付け角 135° においては、翼面上に負圧領域は形成されているが、そのピーク値は取り付け角 90° よりも上昇している。主翼頂点領域の圧力分布に着目してみると、フェンス取り付け角が 90° の場合、フェンス渦はフェンス背後の主翼上に誘起され、強い負圧領域を形成しているが、取り付け角 135° ではフェンス上に渦が誘起され、主にフェンス面に負圧領域が形成されていると考えられる。その結果、翼面上の静圧は取り付け角 90° ほどには低下しないのだと考えられる。また、取り付け角 135° においては、フェンスに作用する法線方向分力とフェンス下流の主翼面上に形成される負圧により法線力が増大することになるが、誘起される渦の中心位置はフェンス側面にあるため、フェンスに作用する法線力成分は傾き、 90° ほど法線力の増大には結びつかないと考えられる。

迎角の増加に伴っては、取り付け角 45° では迎角 10° で、取り付け角 90° では迎角 20° で法線力の増大効果は消失している。フェンス取り付け角が 90° 以下では、フェンスが主流に対し主翼背後に隠れる迎角域が存在し、それ以上の迎角ではフェンスによる強い渦を誘起できなためであり、迎角 10° および 20° はそれぞれの限界迎角に対応している。しかし、取り付け角 135° では、迎角に関係なくフェンスが

主流にさらされるため、Fig. 9-B-IV の可視化結果が示すように高迎角においても強力な渦がフェンス面上に誘起され、法線力の増大効果が期待できる。

3.2.2 軸力特性

Type-IA フェンスにおける、軸力増加に与えるフェンス取り付け角の影響を Fig. 8 に示す。取り付け角 90° 以上で、軸力は著しく増大することになるが、特に 135° でその傾向が強く、迎角 30° 以上においてもフェンス無し形態の軸力を上回っている。これは Fig. 9-B-IV からわかるように、取り付け角 135° ではフェンス面上に渦が誘起され、フェンス面に対して垂直方向に力が作用するが、その力は機体軸方向の分力を有するため軸力の増大をもたらす事になる。一方、取り付け角 45° では Fig. 9-A-II 及び 9-B-II の渦構造が示すように、フェンス上面側に渦が誘起され、フェンスに作用する力は推力成分を有することになり、軸力を減少させることになる。この軸力の減少はボルテックスフラップによる推力成分発生と同じ原理によるものと考えられる。

3.3 フェンス形状の影響

3.3.1 軸力特性

Fig. 10 は取り付け角 90° におけるフェンス形状が軸力の増分に与える影響を示した物である。なお、両フェンスともスロット無し形態である。Type-IA ではエアブレイキ効果が強く、軸力は著しく増大するが、Type-IIA では軸力の増加は抑えられ、スロットを有する Type-IC と同程度になっている。Type-IA と IIA の主翼に対するフェンスの面積比は同じ 6% であるが、フェンス背後の渦構造が軸力の増加に差を生じさせていると考えられる。Fig. 12-A から、両フェンスとも翼面上における静圧の最低値は約 -1.9 とほぼ同程度であるが、フェンス背後の渦捕捉位置が異なっているのがわかる。Type-IA の 25%C 断面では、フェンス直後に渦が捕捉されているのに対し、Type-IIA では渦中心が主翼中心線方向に移動しており、フェンスと主翼の接合部角には二次渦も形成されているのがわかる。その結果、Type-IA のフェンス背面には渦による強い負圧が作用し軸力の増大をもたらすが、Type-IIA では渦がフェンス背面から離れた位置に存在するため負圧も弱まり、Type-IA ほど軸力は増大しないと考えられる。しかし、その確認にはフェンス背面の静圧分布の計測が必要になるが、流れ場の構造を乱すことなく静圧孔を埋設することは難しく、PSP や CFD 等により検証しなければならない。

3.3.2 法線力特性

Fig. 11 の法線力増分では、迎角 10° 以下で両フェンスとも同程度に法線力は増加しており、高揚力装置としての効果を確認することができる。フェンス形状の違いにより、Fig. 12-A で示される翼面上の静圧分布は異なるが、その積分値

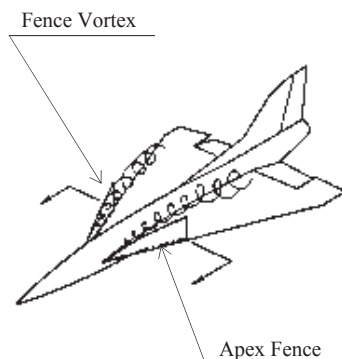


Fig. 1 Apex fence concept.

として得られる法線力は同程度の値となる。しかし迎角の上昇に伴っては、Type-IA では迎角約 15° で、Type-IIA では約 25° でその効果は消失する。前述したように、取り付け角 90° ではフェンスが主流に対し主翼背後に隠れる迎角域が存在し、フェンスに誘起される渦は弱くなる。事実、フェンス無し形態の迎角 20° における静圧分布 Fig. 9-B-I では静圧のピーク値は -3.27 であるのに対し、Fig. 12-B の Type-IA のフェンス背後では -2.0 まで上昇しており、渦強度は低下しフェンス無し形態よりも法線力は低下することになる。一方、Type-IIA フェンスでは、迎角 20° においても母翼頂点領域に非常に強い負圧領域が発生しており、フェンス先端で強い渦が誘起されているのがわかる。Type-II 系列のフェンス先端形状は Type-I 系列よりも鋭く、フェンス渦を弱める作用は低くなるため、高迎角域においても法線力の増大効果が得られるのだと考えられる。

4. 結論

抵抗増加を抑え、揚力増大効果を有するスロテッドアベックスフェンスを装備したデルタ翼における、翼面上の静圧分布及び渦構造を風洞実験により明らかにした。その結果を基に、これまでに得られているスロット面積、フェンスの形状及び取り付け角が空力特性に与える影響について、フェンスにより誘起される渦の位置や状態及び翼面上の静圧分布の視点から検証した。

参考文献

- 1) 郭東潤, 宮田勝弘, 野口正芳, 李家賢一, 超音速機形態の前縁・後縁フラップの複合効果による揚抗比の改善について, 日本航空宇宙学会論文集第 51 巻, 第 597 号, 2003 年。
- 2) Hoffler, K. D., Rao, D. M. and Frassenelli, M. C., "Basic Studies on Delta Wing Flow Modification by Means of Apex Fence", NASA CP-2416, Oct 1985.
- 3) 石原剛, 綿貫忠晴, 久保田弘敏 他, アベックスフェンス付きデルタ翼の低速大迎角空力特性, 昭和 63 年度科学研究費総合研究(A)回収型宇宙飛行体の低速空気力学総合研究班報告書, 1989 年。
- 4) 板倉嘉哉, 塩家正和, 渦フェンス付きデルタ翼における低速空力特性, 第 32 回流体力学講演会, 2000 年。
- 5) 板倉嘉哉, 曾原恵, 抵抗増加を抑えたアベックスフェンス付きデルタ翼の低速空力特性, 第 34 回流体力学講演会, 2002 年。
- 6) 板倉嘉哉, 宮谷剛史, Slotted Apex Fence 付きデルタ翼の大迎角低速空力特性, 航空宇宙における空力研究シンポジウム, 2004 年。

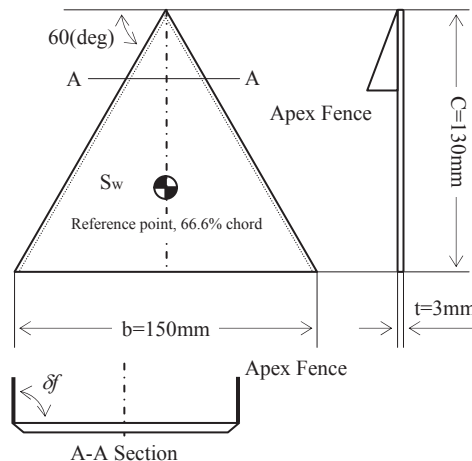


Fig. 2 60-deg delta wing model with apex fence.

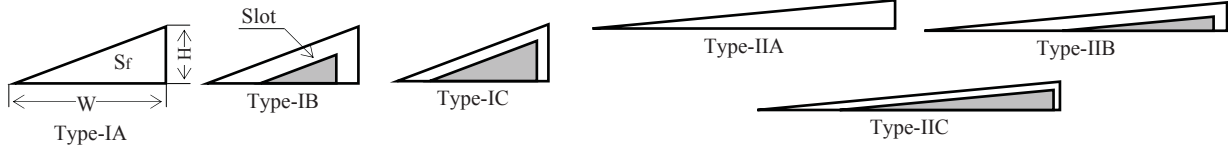


Fig. 3 Fence shapes.

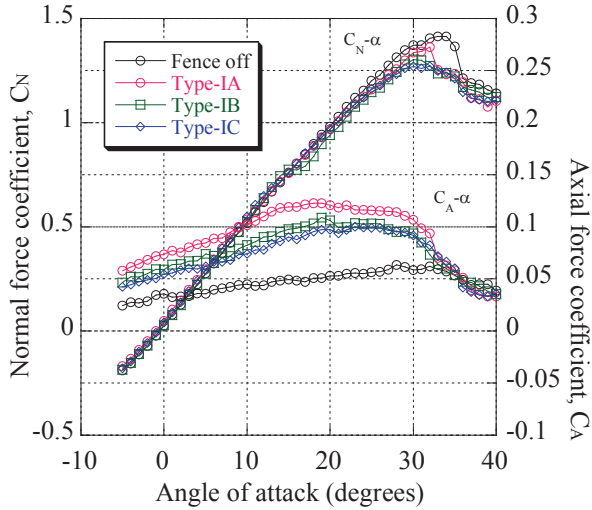


Fig. 4 Slot area effect on normal and axial force coefficients ($\delta f=90^\circ$).

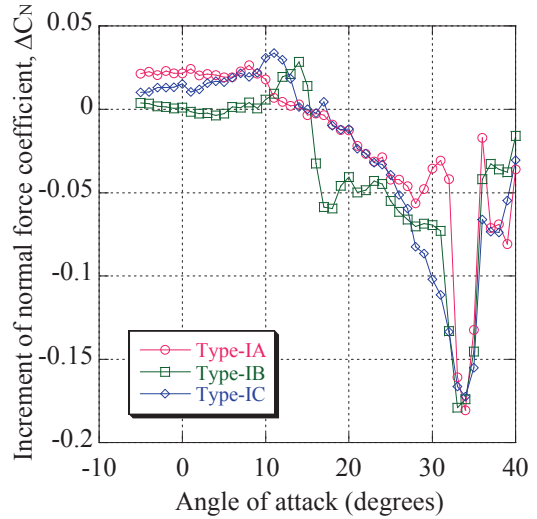
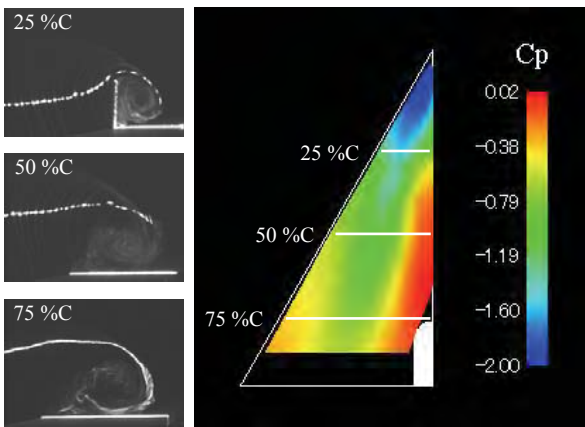
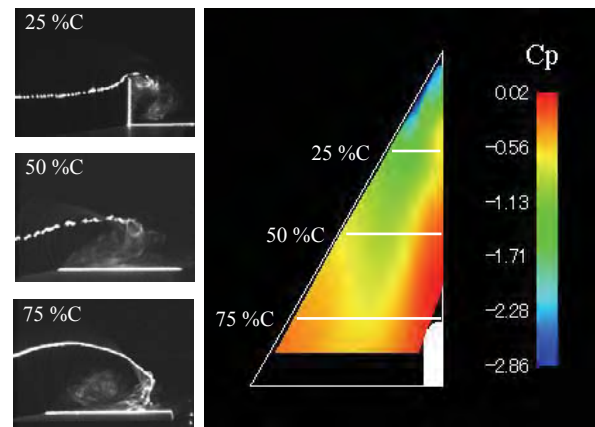


Fig. 5 Slot area effect on normal force increments ($\delta f=90^\circ$).



(6-A) Type-IA



(6-B) Type-IB

Fig. 6 Upper surface static pressure distributions and vortex structure ($\alpha=20^\circ$, $\delta f=90^\circ$).

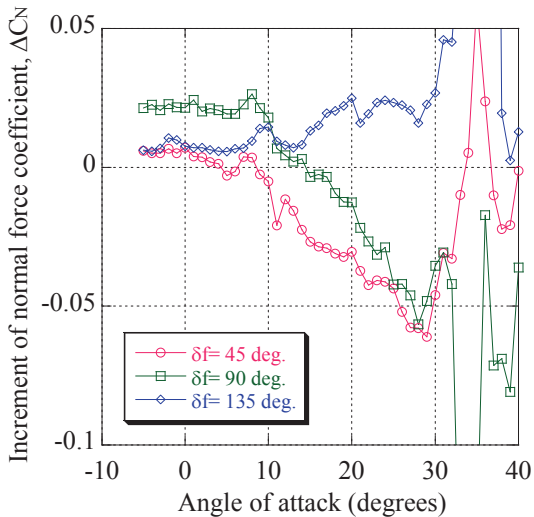


Fig. 7 Fence deflection angle effect on normal force increments (Type-IA).

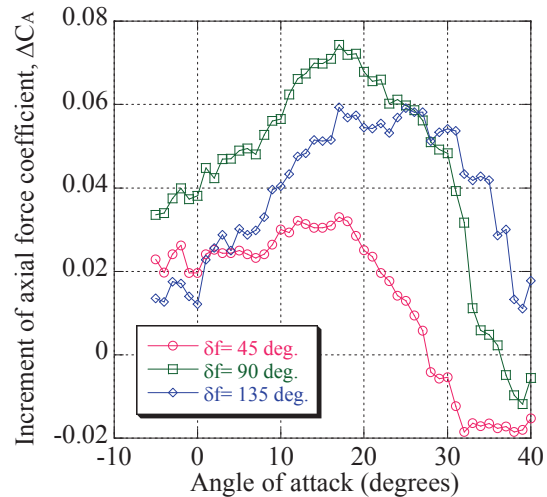


Fig. 8 Fence deflection angle effect on axial force increments (Type-IA).

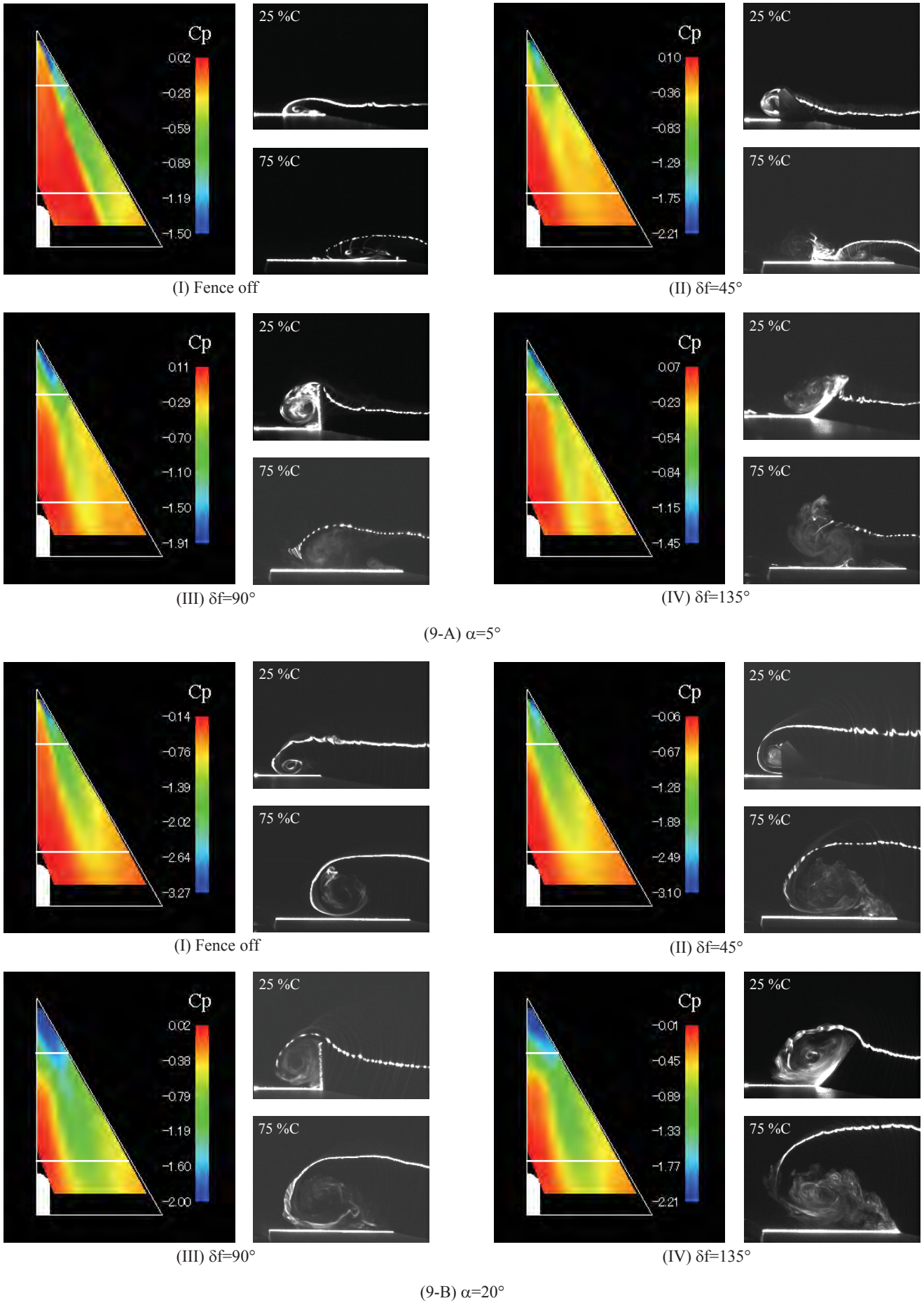


Fig. 9 Upper surface static pressure distributions and vortex structure (Type-IA).

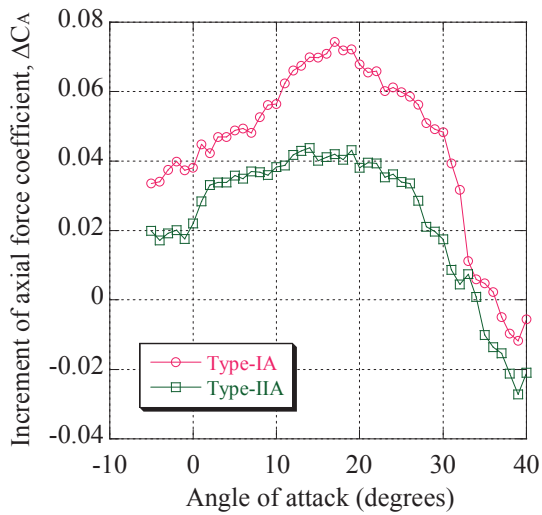


Fig. 10 Fence shape effect on axial force increments ($\delta f=90^\circ$).

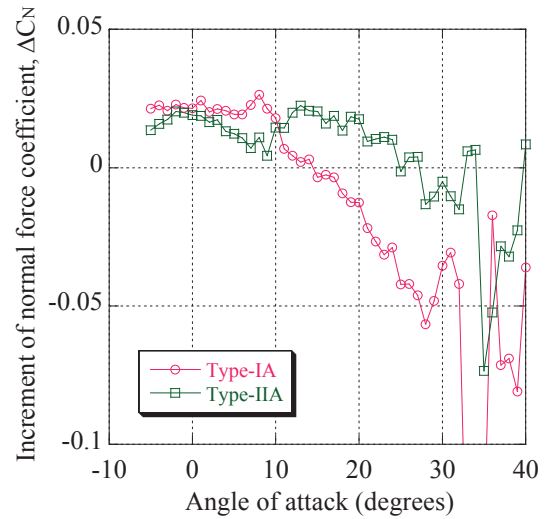


Fig. 11 Fence shape effect on normal force increments ($\delta f=90^\circ$).

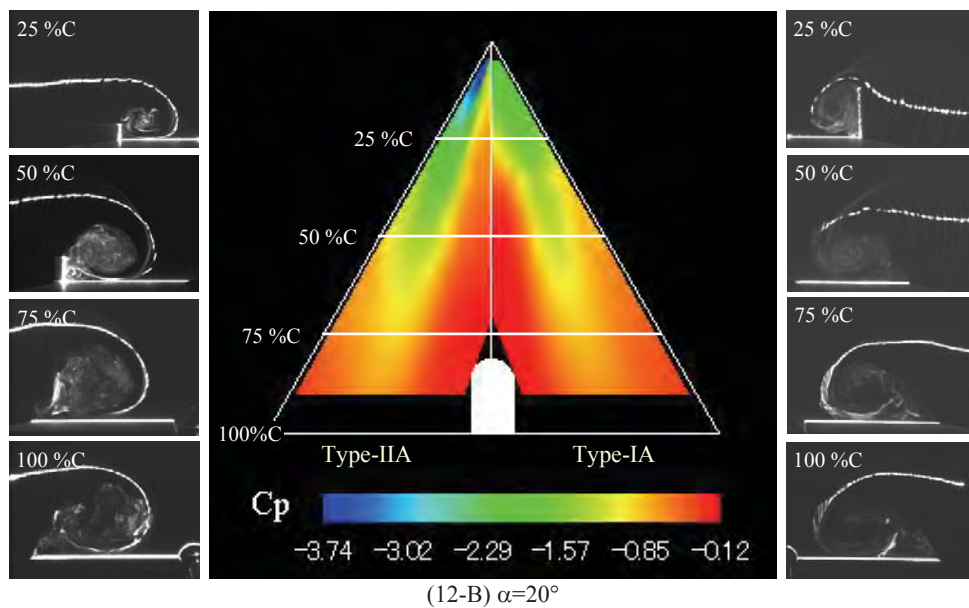
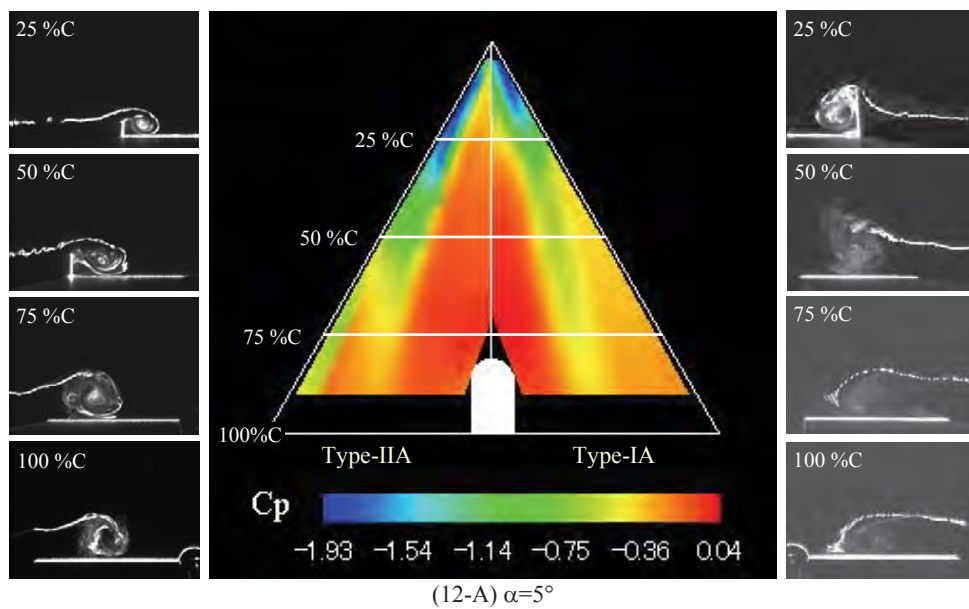


Fig. 12 Upper surface static pressure distributions and vortex structure ($\delta f=90^\circ$).