縦渦発生ジェット吹出し口形状の違いが はく離防止効果に与える影響*

長谷川 裕晃^{*1}, 小松崎 泰寛^{*2}, 松内 一雄^{*3}

Effect of Jet Orifice Shape of Vortex Generator Jets on Separation Control

Hiroaki HASEGAWA^{*4}, Yasuhiro KOMATSUZAKI and Kazuo MATSUUCHI

^{*4} Department of Mechanical Engineering, Akita University,
1-1 Tegatagakuen-machi, Akita-shi, Akita, 010-8502 Japan

Longitudinal (streamwise) vortices are produced by the interaction between jets and a free-stream. The fluid particles which have large energy of the freestream are supplied to decelerated fluid particles in the boundary layer by longitudinal vortices. The vortex generator jets can adjust the strength of longitudinal vortices by varying the jet speed. Therefore, they can achieve the adaptive control by properly adjusting the jet speed corresponding to flow parameters such as the angle of attack of an airfoil, the diffuser's divergence angle. In this study, the suppression effect of the shape of orifice of vortex generator jets on flow separation is investigated for three types of jet orifice (circular, triangle and square orifices). The triangle orifice generates the strong vorticity of longitudinal vortices and effective the pressure recovery in the diffuser in comparison with the other orifice shapes. Furthermore, the orifice shape of vortex generator jets causes the different tendency of the pressure recovery in the downstream direction.

Key Words: Boundary Layer, Separation, Secondary Flow, Jet, Longitudinal Vortex, Active Control

1. 緒 言

ジェットと主流の干渉で発生した縦渦は、主流と境界層の強制混合を促進し、境界層内にエネルギーを供給することからはく離制御に利用できる^{(1)~(3)}。特に、ジェット吹出しによる縦渦発生装置の場合、ジェットの吹出し流速を変化させることで、発生する縦渦の強さを調整できるため、流れ場の状態に適合した制御が可能となる。この特徴は、現在航空機の主翼等に設置し実用化されている固体の渦発生装置 (Vortex Generator: VG) に比較すると大きな利点である。VG は、構造が簡単でシステムが単純になる等の利点はあるものの、設置した VG に固有の一定状態の縦渦しか発生させることができない。さらに、常に流れの中に設置されている VG は、制御が必要でない流れの場合においては、付加抵抗として作用し、悪影響を及ぼす可能性がある。これに対して、ジェット吹出しの縦渦発生装置の場合、制御を必要としない場合は、ジェットの吹出しを停止することで、制御装置が引起す付加抵抗

を完全に取り除くことができる。

こうしたジェット吹出しの縦渦発生装置において、ジェット吹出し角の違いで、発生する縦渦の強さに違いが生じることは報告されている⁽⁴⁾。さらに、著者らはジェット吹出し角のうち、壁面とのなす角度 (ピッチ角) が、発生した縦渦の存在する壁面からの距離に影響を与え、はく離防止効果に違いが生じることを明らかにした⁽⁵⁾。これらの研究は、ジェット吹出し口の形状を円形で実施したものである。一方、円形以外の吹出し口においては、膜冷却に関する吹出し口形状の影響は報告されている⁽⁶⁾。しかしながら、はく離制御を目的とし、非円形の吹出し口形状を使用したジェット吹出しの縦渦発生装置に関する報告はなされていない。非円形噴流の場合、円形噴流と渦構造が異なり、拡散、混合作用に違いが生じることは明らかにされている^{(7),(8)}。このためジェット吹出し口を非円形形状に変更することにより、主流との干渉により発生する縦渦に違いが現れることが十分期待できる。そこで本研究では、円形に加え正方形と正三角形の吹出し口を使用し、発生する縦渦の状態を調べるとともに、吹出し口形状の違いがはく離防止効果に与える影響について調べた。

* 原稿受付 2003 年 4 月 3 日。

^{*1} 正員, 秋田大学工学資源学部 (〒010-8502 秋田市手形学園町 1-1)。

^{*2} 正員, 日本飛行機 (株) (〒236-8540 横浜市金沢区昭和町 3175)。

^{*3} 正員, 筑波大学機能工学系 (〒305-8573 つくば市天王台 1-1)。

E-mail: hhasegaw@mech.akita-u.ac.jp

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置 本研究で使用した風洞は、測定部底面の開き角が調節可能な二次元片開きディフューザを有している。図1に測定部断面図を示す。実験は、主流速 U_0 を 6.5 m/s で実施した。測定部は、開き部上流で 120 mm×250 mm の長方形断面を有している。開き部は、ジェットの吹出し口を $x=0$ として $x=57.5$ mm から下流側である。ジェットを吹出すための二次空気は、コンプレッサで気蓄した後、測定部下側底面か

Fig. 1 Test section geometry.

Fig. 2 Jet configurations in test section.

Fig. 3 Schematic of jet orifice.

ら吹出す。本研究では、ディフューザの開き角は 20° ($\alpha=20^\circ$) に固定した。開き部底面には、ディフューザ内の圧力回復を調べるために、中心軸上 ($\kappa=125$ mm) に静圧孔を設置した。静圧孔位置は、 $x=110, 160, 200, 250$ mm である。ディフューザ内の圧力回復は、開き部上流側の圧力 ($\kappa=-150$ mm) とディフューザ内との圧力差を、微差圧計を使用して計測する。また、はく離制御効果に関しては、風洞壁面に設置したタフトによる可視化結果も考慮して確認した。

2.2 実験方法 図2に示すように、ジェットは上流から見て流路の右側半分に3個設置した。ジェットは主流に対して 90° (スキュー角 $\theta=90^\circ$)、測定部底面に対して 30° と 45° (ピッチ角 $\phi=30, 45^\circ$) で吹出す。ジェットの吹出す強さは、主流速 U_0 とジェット流速 V_j の流速比 ($VR=V_j/U_0$) で規定する。ジェット吹出し口の形状には、円形、正三角形、正方形を使用した。円形の場合、吹出し口の直径は 2 mm である。正三角形、正方形での吹出し口断面積は、円形の場合と同一になるように定めた。これにより、いずれの形状の吹出し口においても、二次空気の流量を同じにすることで、主流とジェットの流速比を同一に維持できる。本研究では吹出し口形状が正三角形の場合、上流側に底辺が向き、頂点が下流側で主流方向を向くように設置した。また、正方形の場合も、一辺が主流と垂直になるように設置した。主流に対する正三角形、正方形吹出し口の設置向きを、それぞれ図3に示す。

主流と垂直な y - z 断面での y および z 方向の流速 v, w は、X 形熱線プローブを使用し y および z 方向にそれぞれ 5 mm の間隔で測定し求めた。また、ディフューザ内とディフューザ上流部との圧力差は、微差圧計の出力値をコンピュータに取り込み求めた。つまり、微差圧計の出力値は電圧値であるため、あらかじめ求めた校正曲線より電圧値を圧力に変換して求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 吹出し口形状と縦渦の強さ 図4および図5に各下流位置における、各吹出し口形状での正の渦度および負の渦度の最大値を示す。渦度 ω は、

$$\omega = \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \quad (1)$$

である。図4はピッチ角 30° 、図5はピッチ角 45° の場合である。ピッチ角 30° では、いずれの吹出し口形状においても、ピッチ角 45° の場合に比べ正の渦度は強くなっている。正の渦度は、いずれのピッチ角においても、吹出し口近くの $x=10$ mm では、正三角形吹出し口の場合に最も強い。しかし、正三角形吹出

し口の場合、下流に行くにしたがい減衰が大きい。 $x=10$ mm で生じた正の渦度の違いは、 $x=110$ mm の場所ではほとんど確認できない。

一方、負の渦度はピッチ角 30° の場合、吹出し口形状での違いは確認できない。さらに、ピッチ角 30° では、いずれの吹出し口形状においても、ピッチ角 45° に比較し負の渦度は、弱くなっている。つまり、ピッチ角を小さくすると発生する負の渦度は弱くなる。ピッチ角が小さいことは、ジェットを壁面近くに吹出すことに相当する。このため、正の渦の吹き上げ側に発生する負の渦と壁面との距離が近くなる。こうして負の渦による流れが、より壁面の影響を受けやすくなり負の渦が弱くなる。

ジェット吹出しにより加えられた運動量は、主流との干渉により縦渦を発生し、二次流れ成分の速度増加を引き起す。一方、二次流れ成分の速度増加が抑えられた場合、その分主流方向成分の速度増加へ寄与する。

Fig. 4 Downstream decays of the maximum positive and negative vorticities. Open symbols denote positive vorticity ($U_0=6.5$ m/s, $VR=9.5$, $\phi=30$ deg).

Fig. 5 Downstream decays of the maximum positive and negative vorticities. Open symbols denote positive vorticity ($U_0=6.5$ m/s, $VR=9.5$, $\phi=45$ deg).

ジェット吹出し口近くにおいて、主流方向成分の速度増加は、正三角形吹出し口では小さくなっていた。それに対して、円形では大きい。つまり、吹出し口が正三角形の場合、円形に比べ二次流れの速度増加が大きい。これは、正三角形吹出し口で渦度が強くなっていることと一致する。主流に対してジェットを吹出した場合、せん断層が発達して縦渦を形成する。ジェットを主流に対して抵抗となるように吹出すことは、せん断層の発達を促進し、渦度が強くなることにつながる。吹出し口が正三角形の場合、円形に比べ鋭い角部を有している。正三角形吹出し口では、この角部の影響で吹出したジェットの影響が強く残り、せん断層の発達を促進していると推測できる。

3.2 吹出し口形状とはく離防止効果 ジェットを吹出していない状態(制御を行っていない状態)に対するジェットを吹出した場合(制御を実施した場合)のディフューザ内の圧力回復 Cp_{df} を、次のように定義する。

$$Cp_{df} = Cp_{VR} - Cp_{uf} \dots\dots\dots (2)$$

(a) $\phi=30$ deg

(b) $\phi=45$ deg

Fig. 6 Distribution of pressure recovery along the wall static pressure holes of divergent portion ($U_0=6.5$ m/s, $VR=9.5$).

ここで、添字 uf , vr は、それぞれジェットを吹出してない場合と吹出している場合を示す。 C_p は、 $C_p = 2 \Delta p / \rho U_0^2$ で、 ρ は空気密度、 Δp はディフューザ内と開口部上流位置 ($x = -150$ mm) との差圧である。制御前の圧力回復との差を考慮することで、制御効果としての圧力回復を評価できる。つまり、制御後に高い圧

力回復が得られても、制御前にははく離が生じていない場合では、 $C_{p,uf}$ は小さな値となる。図 6 にピッチ角が 30° と 45° の場合における、各吹出し口形状での各下流位置の圧力回復を示す。ジェットと主流の流速比 VR は 9.5 である。ピッチ角が 30° では、正三角形吹出し口で高い圧力回復が得られている。これは、正

(a) Circular orifices

(b) Triangle orifices

(c) Square orifices

Fig. 7 Distribution of pressure recovery along the wall static pressure holes of divergent portion ($U_0 = 6.5$ m/s, $\phi = 30$ deg).

(a) Circular orifices

(b) Triangle orifices

(c) Square orifices

Fig. 8 Distribution of pressure recovery along the wall static pressure holes of divergent portion ($U_0 = 6.5$ m/s, $\phi = 45$ deg).

三角形吹出し口の場合、他の吹出し口形状に比べ強い渦が発生しているためである(図 4)。一方、ピッチ角が 45° においても、正三角形吹出し口で強い渦が発生している。しかしながら、ピッチ角が 45° の場合は、吹出し口形状による圧力回復の違いは、ほとんど確認できない。

図 7 にピッチ角 30° での、各吹出し口形状における VR の影響を示す。吹出し口が円形と正方形では、 VR が 8.5 から 9.5 に増加した場合でも、ほぼ同じ圧力回復を示している。 VR を増加させた場合においても、圧力回復傾向が改善されていない。それに対して、吹出し口が正三角形の場合、 VR が 9.5 まで増加するにともない圧力回復は増加している。正三角形吹出し口で VR が大きい場合、同じ VR で他の二つの形状と比較すると、高い圧力回復が得られている。これは、吹出し口形状が正三角形の場合に、より強い渦が発生したことによる効果である。また、吹出し口が円形の場合、 VR が 5 まで減少すると圧力回復はほとんど得られていない。つまり、ピッチ角 30° で VR が小さい場合、吹出し口形状が正三角形、正方形では、円形吹出し口に比べ高い圧力回復が得られている。

図 8 にピッチ角が 45° での各下流位置での圧力回復を示す。いずれの吹出し口形状においても同じ VR の値では、ピッチ角 30° の場合に比較して圧力回復は小さい。著者らは、円形吹出し口での離防止効果におけるピッチ角の影響を調べた⁹⁾。吹出し口形状が正三角形および正方形においても、ピッチ角を小さくすると圧力回復は高くなる。これは、吹出し口が円形の場合に得られた、ピッチ角を小さくすることで離防止に効果的な縦渦が発生するのと同じ結果となった。また、円形と正方形吹出し口の場合、 $VR=8.5$, 9.5 では、圧力回復の傾向がほぼ同じになっている。こうした VR の増加に対して、圧力回復効果の改善されない現象は、ピッチ角 30° の場合と同様である。一方、ピッチ角 45° で吹出し口が正方形の場合、他の二つの形状に比べ VR を小さくした場合においても圧力回復効果が得られている。この原因については、後で示す $y-z$ 断面での流れ場の結果に基づいて述べる。

VR の増加は、発生する渦を強くすることを意味する。そのため縦渦により生じる二次流れを強くし、境界層内へのエネルギー供給を強めることが可能になる。しかし、一般的に VR の増加は、ジェットを吹出すための二次空気の流量増加を引起し、二次空気の供給能力向上を余儀なくされる。そのため、 VR を小さくできれば、二次空気の流量を抑制する側面からは有効である。

(a) Circular orifices

(b) Triangle orifices

(c) Square orifices

Fig.9 Contours of streamwise vorticity at $x=10$ mm. Decorated lines denote negative vorticity ($U_0=6.5$ m/s, $VR=9.5$, $\phi=45$ deg).

3.3 $y-z$ 断面での流れ場 図 9, 10 にピッチ角 45° での各吹出し口形状における発生した縦渦の状態を示す。図は、上流から見たものである。図 9 は $x=10$ mm, 図 10 は $x=110$ mm の場所でのものである。 $x=10$ mm において、いずれの吹出し口形状においても正・負の組み合わせの三対の渦対が存在している。これら三つの渦対のスパン方向(z 方向)への広がり、 $x=10$ mm ではいずれの吹出し口形状においてもほぼ同じである。しかし、 $x=110$ mm においては、吹出し口形状で縦渦のスパン方向への広がり、違いが生じている。円形吹出し口では、左端の渦対の y 方向位置は、他の渦とほぼ同じである。それに対して、他の吹出し口形状での左端の渦対は、他の渦に比べ y 軸上方に存在している。この傾向は、正三角形吹出し口では、より顕著である(図 10(b))。そして、この左端の負の渦

Fig. 10 Contours of streamwise vorticity at $x=110$ mm. Decorated lines denote negative vorticity ($U_0=6.5$ m/s, $VR=9.5$, $\phi=45$ deg).

が、正の渦を覆うように斜め上方に存在している。この影響で、渦対は正のスパン方向へ押し戻された状態になっている。

円形吹出し口の場合、左端の正の渦の両側には、負の渦が存在している(図 10(a))。そのため、左端の正の渦は負の渦に挟まれた影響を強く受ける。その結果、同じ強さの渦からなる渦対としては存在していない。一方、正三角形吹出し口の場合、正の渦度が強くなる。そのため、正の渦に挟まれた負の渦は弱められ、形が崩され下流方向へ推移して行く。その結果、左端の正の渦は負の渦に挟まれる影響をあまり受けていない。

左端の渦対は、ほぼ同じ強さで存在している(図 10(b))。その結果、渦対の誘起速度の影響を受け、渦の上方への移動が大きくなる。こうして、吹出し口形状の違いで、渦の存在する y 方向位置やスパン方向への広がりには違いが生じている。しかし、こうした現象はピッチ角が 30° の場合には確認できなかった。これは、ピッチ角 30° では、吹出し口形状によらず発生する負の渦度が小さくなるためである。

吹出し口が正方形の場合、 $x=110$ mm での右側二つの渦の y 方向位置は、円形および正三角形の場合と比較すると、より下側壁面近くに存在している。ピッチ角 45° の場合、負の渦は、正方形吹出し口では他の吹出し口形状に比べ弱くなっている(図 5)。正の渦に挟まれた負の渦は、形が上下方向に崩され下流方向に推移する。そして、正の渦の斜め上方に伸ばされた形で存在する。この負の渦の影響で、正の渦の上方への移動が抑えられている。負の渦が弱い場合、こうした正の渦の干渉を受けやすくなる。伸ばされた負の渦は上下に分割され、 $x=110$ mm では分割された下側の負の渦が壁面近くに存在している(図 10(c))。この影響で、渦対の y 軸上方に向かう誘起速度が弱くなる。その結果、渦の上方への移動が抑えられる。このことは、渦対として存在している左端の渦が、他の渦に比べ y 軸上方に位置していることから確認できる。こうしてピッチ角が 45° の正方形吹出し口の場合、渦が壁面近くに存在する影響で、 VR が小さい場合においても、他の吹出し口形状に比べ圧力回復が得られている。

正三角形吹出し口の場合、発生する正の渦度は強くなる。このため、正・負の渦の干渉は、他の吹出し口形状に比べ促進される。つまり、正の渦に挟まれた負の渦の形は、下流方向に早く崩される。3・1 節で正三角形吹出し口の場合、他の吹出し口形状に比べ、下流方向に正の渦の減衰が大きいことを述べた。これは、こうした崩された負の渦により正の渦が影響を受ける現象が、他の吹出し口形状に比べ、より短い下流位置で起こり始めるためである。

ピッチ角が 30° の場合、ピッチ角 45° に比較し、いずれの吹出し口形状においても高い圧力回復が得られている(図 6)。特に、正三角形吹出し口では高い圧力回復になっている。強い渦から成る渦対では、渦対の誘起速度の影響が大きく、渦は上方へ移動しやすくなる。しかし、ピッチ角を小さくすることで、負の渦度を小さくすることが可能になる。その結果、渦対の誘起速度の影響を受けにくくできる。渦は壁面近くに存在することになる。そして、正三角形吹出し口では発生する渦度が強い。そのため、特に高い圧力回復が

得られている。

一方、図 6 においてピッチ角 45° では各吹出し口形状で圧力回復にあまり違いがでていない。ピッチ角が 45° においても、正三角形吹出し口では正の渦度は強くなる。しかし、ピッチ角が大きくなった影響で負の渦度も強くなる。そのため、渦は渦対の誘起速度で y 軸上方に移動する。渦は壁面から離れた位置に存在することになる。つまり、吹出し口形状の影響で渦が強くなった場合においても、その分上方への移動も大きくなる。その結果、ピッチ角 30° の場合に比べ、吹出し口形状の影響が圧力回復の違いに表れていない。

3.4 ジェット吹出し間隔 70 mm ジェット吹出しの縦渦発生装置の場合、 VR の低下は二次空気の流れ量抑制につながる。また、ジェット吹出口の間隔を広げることは、制御時のジェット吹出し口個数を削減できる。これは、同様に二次空気の流れ量抑制につながる。さらに、吹出し口の個数低減は、吹出し口を設置するという加工工程の簡素化にも役立つ。図 11 に吹出し口個数を 3 個から 2 個にした場合の下流方向への圧力回復を示す。吹出し間隔は 70 mm である。間隔 70 mm は、三つの吹出し口の内、中央の吹出し口を使用しないことで実施している。ピッチ角 45° では、いずれの吹出し口形状においても効果的な圧力回復はなされていない。一方、ピッチ角 30° では、ピッチ角 45° の場合に比べ、正三角形吹出し口の場合に、高い圧力回復を示している。図 12 にピッチ角 30° の $x=110$ mm における、正三角形と正方形吹出し口での二次流れを示す。正三角形吹出し口の場合、下側壁面付近で壁面に向かう十分な強さの二次流れが得られている。つまり、主流側の流体がより壁面方向に運ばれていることが確認できる。図 13 に渦度の等値線を示

Fig. 11 Distribution of pressure recovery along the wall static pressure holes of divergent portion ($U_0=6.5$ m/s, $VR=9.5$). Open and filled symbols denote $\phi=45^\circ$ and $\phi=30^\circ$ cases, respectively.

Fig. 12 Secondary flow vectors at $x=110$ mm ($U_0=6.5$ m/s, $VR=9.5$, $\phi=30^\circ$).

Fig. 13 Contours of streamwise vorticity at $x=110$ mm. Decorated lines denote negative vorticity ($U_0=6.5$ m/s, $VR=9.5$, $\phi=30^\circ$).

す。正三角形吹出し口の場合、発生した渦が正方形の場合に比べ、強くかつ壁面近くに存在していることが確認できる。正三角形吹出し口では、正の渦を覆うように負の渦が存在している。この影響で、正の渦の上昇が抑えられている。そして、正三角形吹出し口でより高い圧力回復が得られる。吹出し口間隔を広げたことで、渦対は隣に存在する他の渦対の影響を受けにくくなる。このため負の渦は、両側から正の渦に挟まれることによる影響を受けにくくなる。しかし、正三角形吹出し口の場合、発生している正の渦度が強い。そのために渦対間の流れは、両側に存在する渦対の影響を受けることになる。こうして、正の渦に挟まれた負の渦は、形が崩れ上下に分割され、正の渦を覆うように存在する。

4. 結 言

ジェット吹出しの縦渦発生装置において、吹出し口形状の違いが離防止に与える影響について調べた結果は、以下のようにまとめることができる。

(1) ジェット吹出しの縦渦発生装置において、吹出し口形状の違いにより、ディフューザ内の圧力回復が異なりはく離制御効果に違いが生じた。これは、吹出し口形状の影響で、発生する渦の強さ、正と負の渦の干渉による渦が存在する壁面からの位置の違いがでるためである。

(2) 吹出し口形状を正三角形にすることで、発生する縦渦の渦度を強くすることが可能である。

(3) 正三角形吹出し口の場合、渦が強くなることから効果的なはく離制御が実施できる。しかしながら、はく離防止効果には吹出し口形状に比べ、ジェット吹出しピッチ角が大きく影響する。

(4) ピッチ角 45° では、ジェットの吹出し流量を少なくした場合においても、正方形吹出し口では渦が壁面付近に存在するために、効果的なはく離制御が行える。つまり、制御装置を設置する場所等の制約から、小さなピッチ角でジェットを吹出せない場合にお

いては、ジェット流量を抑えた制御に対して、吹出し口形状を正方形にすることは有効である。

今後は、非円形吹出し口の主流に対して設置する方向が違ふ場合の確認も含め、ジェットと主流が干渉して縦渦が発生するメカニズムについて、流れの可視化を実施して調べる予定である。本研究の実施にあたり、実験およびデータ整理に協力していただいた、筑波大学松内研究室の修論生の久保克之君、深川真君および卒論生の吉川雅史君にお礼を申し上げます。

文 献

- (1) Selby, G. V., Lin, J. C. and Howard, F. G., Control of Low-speed Turbulent Separated Flow Using Jet Vortex Generators, *Experiments in Fluids*, 12(1992), 394-400.
- (2) Nishi, M., Shibata, Y., Nakamura, M. and Okamoto, M., Application of Vortex Generator Jets to Control the Flow from Separating in a Conical Diffuser, *ASME FED-217(1995)*, 27-34.
- (3) 長谷川裕晃・松内一雄, ジェット吹出しによる境界層能動制御のメカニズム, *機論*, 64-617, B(1998), 92-99.
- (4) Compton, D. A. and Johnston, J. P., Streamwise Vortex Production by Pitched and Skewed Jets in a Turbulent Boundary Layer, *AAAJ*, 30-3092, 640-647.
- (5) 長谷川裕晃・松内一雄, ジェット吹出しによる縦渦発生装置の吹出し角の違いが離防止効果に与える影響, *機論*, 64-627, B(1998), 164-170.
- (6) Goldstein, R. J. and Eckert, E. R. G., Effect of Hole Geometry and Density on Three-Dimensional Film Cooling, *J. Heat Mass Transfer*, Vol. 17(1974), 595-607.
- (7) 豊田国昭・F. Hussain, 非円形噴流中の渦構造に関する研究, *機論*, 55-514, B(1989), 1542-1545.
- (8) 土屋良明・羽田喜昭・堀越長次・佐藤俊, 長方形噴流の拡散に関する研究, *機論*, 51-461, B(1985), 85-94.