縦渦発生ジェットにおける壁面近傍の流れ*

長谷川 裕晃^{*1}, 松内 一雄^{*2}, 田中 淳介^{*3}Boundary Layer Flow Induced by
Pitched and Skewed Jets in a FreestreamHiroaki HASEGAWA^{*4}, Kazuo MATSUUCHI and Junsuke TANAKA^{**} Department of Mechanical Engineering, Akita University,
1-1 Tegatagakuen-machi, Akita-shi, Akita, 010-8502 Japan

Pitched and skewed jets issuing through small holes in a wall into a freestream have proven effective regarding the control of boundary layer separation. Longitudinal vortices are produced by the interaction between the jets and the freestream. In this method, the fluid particles which have large energy of the freestream are supplied to decelerated fluid particles in the boundary layer by longitudinal vortices. In order to have a better understanding of the suppressing mechanism of longitudinal vortices, the velocity measurements were carried out in a region close to the wall for the various jet pitch angles. In the case of a large pitch angle (measured from lower wall), longitudinal vortices exist apart from the lower wall under influence of the velocity induced by the vortex pair. The flow in the boundary layer is affected by a pitch angle. Longitudinal vortices produced by the small jet pitch angle strongly disturb the flow in the boundary layer and therefore effective separation control is attained.

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

1. 緒 言

流れの中に小翼や突起を設置する渦発生器(Vortex Generator: VG)は、その後流が縦渦を形成し、主流側の流体を境界層内に運ぶことで境界層はく離を防ぐ方法として有効である。VG は単純構造、低コスト等の利点があり、現在航空機の主翼等に設置され実用化に至っている。しかしながら、VG は発生させる縦渦の状態を変化させるためには、小翼の形や配置の組み合わせそのものを変更する必要がある。ジェット吹出しによる縦渦発生装置は、原理的には VG と同じであるが、こうした VG の欠点を補うことが可能である。ジェットと主流の干渉で発生する縦渦は、ジェットの吹出し流速を調整することで、その強さを変化させることが可能である。そのため、流れ場の状態に応じたはく離制御を行うことができる。ジェット吹出しの縦渦発生装置の場合、一般にジェットの吹出し角は、主流に対する角度と壁面に対する角度で規定される。主流に対する吹出し角の違いで、縦渦の強さに違いが生じる^①。さらに、壁面に対する角度を変えて吹出すこ

とで、縦渦の壁面からの高さおよび下流方向への挙動に違いが生じる^②。

ジェットが主流と混合する様子は、Moussa ら^③が報告し、主流の影響を受けたジェットが下流方向に示す軌跡については Chassaing ら^④が明らかにしている。また、Fric ら^⑤は、主流中にジェットを吹出した場合の壁面近傍の渦や後流渦の様子を、スモークワイヤを用いて可視化している。こうして、ジェットと主流が干渉した流れ場の様子や壁面近傍に存在する渦の様子が明らかになった。しかしながら、これらはいずれもジェットを主流および壁面に対して直角に吹出したものである。また、壁面近傍の流れ場に関しては、定性的に評価したもので、特に主流に対して垂直な断面での流れ場の様子は、明らかにされていない。

著者らは、主流に対して垂直な断面での流れ場の様子を測定することで、縦渦がはく離を防止するメカニズムを明らかにした^⑥。その結果、効果的なはく離制御を行うためには、ジェットを傾けて吹出すことは重要である。吹出し角の違いで発生した縦渦は下流方向に異なった挙動を示し、はく離制御に影響を及ぼす^⑦。この吹出し角の違いによる影響は、壁面近傍の流れ場の違いとして生じることが十分期待できる。つまり、効果的なはく離制御を実現するために、壁面近傍の流

* 原稿受付 2004 年 4 月 30 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, 筑波大学機能工学系 (☎ 305-8573 つくば市天王台 1-1-1)。^{*3} 正員, 日産自動車(株) (☎ 243-0192 厚木市岡津古久 560-2)。
E-mail: hhasegaw@mech.akita-u.ac.jp

れ場を明らかにすることは興味深い。しかしこれまで、縦渦発生ジェットにおける壁面近傍の流れ場の様子までは詳細に確認していない。そこで本研究においては、主流に対して垂直な断面において、壁面近傍の流れ場の状態を計測することで、ジェット吹出し角の影響による壁面近傍の流れ場の違いを明らかにする。さらには、離制御効果と壁面近傍の流れの関係についても述べる。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置 図1に本研究で使用した風洞の断面図を示す。主流速 U_0 が 6.5 m/s の場合、ジェット

Fig. 1 Test section geometry.

Fig. 2 Jets configuration ($D_j=2\text{ mm}$, $\theta=90\text{ deg}$).

Fig. 3 Boundary layer probe.

吹出し位置における境界層厚さは 6 mm で、境界層厚さを代表長さとしたレイノルズ数は 2.6×10^3 である。

また境界層は、層流境界層である。測定部は、 $120\text{ mm} \times 250\text{ mm}$ の長方形断面を有している。測定部は、流路底面の開き角が調節可能な二次元片開きディフューザである。本研究では、ディフューザの開き角 α は 20° で行った。ジェットは、ディフューザ部上流 57.5 mm において、流路下側壁面から吹出す。ジェットは主流に対する角度を 90° (スキュー角 $\theta=90^\circ$) に設定した。座標系とジェットの吹出しイメージを図2に示す。ジェット孔は、直径 $D_j=2\text{ mm}$ で、上流側から見て流路の右側半分に3個設置してある。吹出し口位置は、 $Z=125, 160, 195\text{ mm}$ である。ジェット流速 V_j は、主流速 U_0 との比 $VR(V_j/U_0)$ で規定する。ジェットと壁面との吹出し角度(ピッチ角 ϕ)は、ジェット吹出し部を交換することで、 $\phi=30, 45, 60, 90^\circ$ が可能である。また、流れが離れているか否かの確認は、開き部底面にタフトを貼り付けることにより実施した。

2.2 実験方法 流れ場の計測は、コンピュータ制御の三軸トラバース装置に、X形熱線プローブを取り付けて実施した。特に本研究においては、風洞壁面近傍の流速測定を可能にし、かつ流れに影響を与えないようなプローブを製作し使用した。図3に使用したプローブの概要図を示す。プローブに使用したセンサは、定温度型で直径 $5\text{ }\mu\text{m}$ 、長さ 1 mm のタングステンでできている。また、三次元速度を測定するために、速度のXおよびY方向成分 U, V とXおよびZ方向成分 U, W 計測用の二種類のプローブを用意した。主流に対して垂直なY-Z断面における流速の計測は、YおよびZ方向にそれぞれ 2 mm 、 4 mm で実施した。ただし、壁面近傍における測定間隔は、流れ場の様子をより詳細に計測するために、Y方向には 0.5 mm または 1 mm 、Z方向には 0.5 mm での計測も実施した。

また、縦渦の可視化にはスモークワイヤ法を使用した。ワイヤには直径 0.1 mm のSUS304を用い、流れ場に影響がでないことを考慮した。トレーサには流動パラフィンを用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 ジェットにより誘起された縦渦 図4はジェットと主流の干渉で発生した縦渦の可視化である。図は風洞の下流側から見た状態で、流脈線を示している。縦渦は、1つの吹出し口に対応したものである。ワイヤは、 $X=10\text{ mm}$ 、 $Y=20\text{ mm}$ に設置してある。ピッチ角が 90° の場合、回転方向の異なる渦の大きさ、強さがバランスされた渦対として存在している。その

(a) $\phi = 30 \text{ deg}$ (b) $\phi = 90 \text{ deg}$ Fig. 4 Longitudinal vortices visualized by smoke-seeding freestream ($U_0 = 3 \text{ m/s}$, $VR = 3.5$).

ため渦対の中央で Y 軸上方に向かう吹上げの流れが確認できる。また、渦は縦長の状態で下側壁面から離れた場所に位置している。図 4(b)では、スモークワイヤを設置した位置が低い場合、渦の上側の部分が確認できていない。それに対して、ピッチ角が 30° の場合、回転方向の異なる渦のバランスは崩れた状態になっている。そのため、渦対中央でのはっきりとした吹上げは確認できない。そして、 90° の場合に比べ、渦は下側壁面に近い位置に存在している。つまり、ピッチ角を小さくした場合、縦渦は回転方向の異なる渦のバランスが崩れて発生する。このため、渦対の誘起速度による吹上げの影響を受けにくい。その結果、渦の形や位置に違いが生じる。

3.2 各吹出し角での壁面近傍の流れ

図 5 に $X = 10 \text{ mm}$ の場所における、 $\phi = 30, 60, 90^\circ$ での二次流れを示す。図よりピッチ角が小さくなるにしたがい、壁面近傍の二次流れが強くなっていることが確認できる。特に $\phi = 90^\circ$ の場合では、壁面近傍での二次流れはほとんど確認できない。また、図 6 および図 7 にそれぞれ $X = 40 \text{ mm}$ での二次流れと縦渦の状態を示す。縦渦は、上流側から見て時計回りの渦を正の渦と定義している。図における渦度は、白くなるにしたがい正の値が大きく、黒くなるにしたがい負の値が大きくなる。いずれのピッチ角においても、流れ場に正・負

(a) $\phi = 30 \text{ deg}$ (b) $\phi = 60 \text{ deg}$ (c) $\phi = 90 \text{ deg}$ Fig. 5 Secondary flow vectors at $X = 10 \text{ mm}$ ($U_0 = 6.5 \text{ m/s}$, $VR = 9.5$). (a) $\phi = 30 \text{ deg}$ (b) $\phi = 60 \text{ deg}$ (c) $\phi = 90 \text{ deg}$ Fig. 6 Secondary flow vectors at $X = 40 \text{ mm}$ ($U_0 = 6.5 \text{ m/s}$, $VR = 9.5$).

の三対の渦対が存在している。そして、ピッチ角が小さいほど縦渦は壁面近くに位置している。さらに、ピッチ角が小さいほど二次流れは強くなっている。小さなピッチ角でジェットを吹出すことは、ジェットの W

Fig. 7 Contours of streamwise vorticity at $X=40$ mm ($U_0=6.5$ m/s, $VR=9.5$).

成分の大きさが増加することに相当する。この W 成分の増加が発生する縦渦の渦度の増加を引起す。こうして発生した縦渦が強く、壁面近傍にある $\phi=30^\circ$ の場合、壁面近傍の二次流れがより強くなっている。

次に図 8(a)に $\phi=45^\circ$ での $X=10$ mm における渦度の等値線を示す。図は Y 方向の目盛りを約 2 倍拡大して表現してある。壁面ごく近傍に正負の渦対の存在が確認できる。この渦対は、回転方向と位置や $Fric$ などの結果を考慮すると馬蹄渦と考えられる。そして、異なるピッチ角での図 8(b)と比較すると、馬蹄渦の存在位置は、ピッチ角が小さくなるにしたがい、上流側から見て左側に移動している。これはピッチ角が小さくなると、ジェットを吹出すことによる $-W$ 成分の流れが増加し、馬蹄渦がその方向に移動したものである。図 9 は、ジェットの場合とジェットの代わりに円柱を流れ場に傾けておいた場合における、馬蹄渦の span 方向 (Z 方向) 位置の比較を示す。図 9(a)は、図 8(a)

Fig. 8 Contours of streamwise vorticity at $X=10$ mm ($U_0=6.5$ m/s, $VR=9.5$).

Fig. 9 Comparison of spanwise position of horseshoe vortices at $X=10$ mm ($U_0=6.5$ m/s).

の上流側から見て一番左側のジェット吹出し口 ($Z=125$ mm) に対応する馬蹄渦を拡大したものである。図 9(b)は、同じ $Z=125$ mm の場所に円柱を 45° 傾けて設置した場合のものである。図中の Δ は、ジェットの吹出し口および円柱の中心位置を示している。円柱の直径は、ジェットの吹出し口直径と同じ 2 mm である。円柱の場合、馬蹄渦の位置がジェットの場合ほど傾き角の影響を受けていない。つまり、ジェット

を吹出した場合に発生する馬蹄渦は、吹出しの $-W$ 成分の流れの影響で、円柱の場合に比べ上流から見てより左側に存在している。さらに、他のピッチ角に相当するように、円柱の傾き角度を変化させても、馬蹄渦の位置はジェットの場合に比べ傾き角の影響を受けない。こうして、ジェットを吹出すことによる $-W$ 成分の流れが、馬蹄渦の位置に影響していることが確認できる。

図 8(a)および(b)の馬蹄渦を比較すると、 $\phi=45^\circ$ の場合が $\phi=90^\circ$ の場合に比べ、よりはっきりと確認できる。またこの傾向は、 $\phi=30, 60^\circ$ と比較した場合においても同様である。Fricらは異なる VR における、主流に対して垂直に吹出したジェットの後流渦の側方からの可視化を実施している⁹⁾。 VR が大きくなるにしたがい吹出したジェットの downstream 方向への軌跡は、壁面から次第に離れていく。そしてジェットの軌跡が壁面に近い場合や離れた場合に、壁面近傍の流れがかなり乱れた状態で可視化されている。このジェットの軌跡の壁面からの高さの違いは、 VR が一定の場合、ピッチ角の違いによっても生じる。つまりジェットの軌跡における VR の増加は、ピッチ角の増加に相当する。こうして適当な壁面からの高さの軌跡を描く $\phi=45^\circ$ の場合に、馬蹄渦がより顕著に確認できているのは、Fricらの可視化の結果から、壁面近傍の乱れ方が小さいためと推測される。

3-3 はく射効果と壁面近傍の流れ 図 10 に $\phi=30, 90^\circ$ での $X=70$ mmにおける二次流れの様子を示す。 $\phi=30^\circ$ の場合、壁面近傍においても下向きの成分を持った流れが確認できる。また、 $\phi=90^\circ$ の場合、壁面近傍の二次流れは $\phi=30^\circ$ に比べ非常に弱い。これはジェット吹出しピッチ角の影響で、 $\phi=90^\circ$ の場合、発生した縦渦の位置が $\phi=30^\circ$ の場合に比べ壁面から高い位置にあるためである。こうして縦渦がより壁面から離れた位置にある $\phi=90^\circ$ の場合では、壁面近傍の二次流れはほとんど確認できない。次に、図 11 に $X=110$ mmの場所における $\phi=30, 90^\circ$ での二次流れを示す。 $\phi=30^\circ$ の場合、 $X=70$ mmにおいて確認された壁面近傍の二次流れは、 $X=110$ mmでは非常に小さくなっている。 $\phi=90^\circ$ の場合は、 $X=70$ mm同様 $X=110$ mmの場所において、壁面近傍の二次流れはほとんど確認できない。

図 12 に各ピッチ角でジェットを吹出した場合の、ディフューザ内の圧力回復係数 Cp_{df} を示す。 Cp_{df} は、

$$Cp_{df} = Cp_{VR} - Cp_{uf} \quad \dots\dots\dots(1)$$

と定義した。添字 VR, uf は、それぞれジェットを吹

(a) $\phi=30$ deg

(a) $\phi=90$ deg

Fig. 10 Secondary flow vectors at $X=70$ mm. ($U_0=6.5$ m/s, $VR=9.5$).

(a) $\phi=30$ deg

(a) $\phi=90$ deg

Fig. 11 Secondary flow vectors at $X=110$ mm. ($U_0=6.5$ m/s, $VR=9.5$)

Fig. 12 Distribution of pressure recovery along the wall static pressure holes of divergent portion ($U_0=6.5$ m/s, $VR=9.5$).

出した場合と吹出していない場合を示す。つまり、 Cp_{df} は制御を行っていない状態に対する制御を実施し

た場合の値を示している。 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き部上流位置($X=-150$ mm)との差圧である。ディフューザ内の壁面静圧は、下側壁面の中心軸上で下流方向に4ヶ所で測定した。 $X=110$ mmにおいて、 $\phi=30^\circ$ の場合高い圧力回復が確認できる。しかしながら、 $\phi=90^\circ$ ではほとんど圧力回復は得られていない。図13に風洞開き部の下側壁面に貼り付けたタフトにより、流れを可視化した様子を示す。図の左側が上流である。タフトは $Z=140$ mmに一列で貼り付けてある。上流側から4枚目のタフトの先端が $X=110$ mmの位置である。図より $X=110$ mmにおいては $\phi=30^\circ$ の場合、壁面に沿った流れが確認でき、はく離制御効果が得られている。一方 $\phi=90^\circ$ の場合は、 $X=110$ mmで流れははく離している。つまり、 $X=110$ mmにおいて $\phi=30, 90^\circ$ での壁面近傍の二次流れに、違いはほとんど確認できない。しかしながら $\phi=30^\circ$ の場合、 $X=110$ mmでははく離制御効果が得られている。 $\phi=30^\circ$ の場合、上流側の $X=70$ mmで $\phi=90^\circ$ に比べ、壁面近傍に強い二次流れの存在が確認できる。つまり、この二次流れにより、境界層内にエネルギーが供給される。その結果、開き部の壁面に沿った下流方向の流れが得られ、はく離が制御されている。

このことは、はく離制御において、制御を行いたい下流位置まで、縦渦を壁面近傍に維持するように、渦の挙動を制御する必要がないことを示す。縦渦発生ジェットでははく離制御の場合、発生する二次流れが壁面近傍に届くように、縦渦の位置を制御することは重

要である。そのためには、ジェットは制御する場所にできるだけ近い上流側から吹出すことになる。しかし、制御を実施する場所まで縦渦を壁面近傍に維持する必要がなければ、ジェット吹出し口はより上流側に移動させることが可能となる。これはジェット吹出し位置に、幅を持たせた設計が可能となることを意味する。つまり、制御を行いたい場所の上流側で、十分な壁面近傍の流れが得られるような、縦渦の強さ、位置に制御すればよいことを示す。

3.4 ジェット吹出し直後の流れ場

3.2において、発生した縦渦の状態により、壁面近傍の流れが影響を受けることを述べた。つまり、縦渦発生ジェットでは、流れ場に存在する大規模な縦渦が、境界層内の流れを規定する。そこで、ジェット吹出し直後で、ジェットの影響が壁面近傍のみの場合における流れ場の様子を調べてみた。測定は、ジェット吹出し直後のみ実施している。図14に $X=5$ mmの場所における二次流れを示す。壁面近傍において、二次流れが確認できる。図15は同じ場所での渦度の等値線である。渦度は、白くなるにしたがい正の渦度が、黒くなるにしたがい負の渦度が強くなることを示している。図より壁面近傍での渦の存在が確認できる。つまり、ジェット吹出し直後の流れ場のため、ジェットによる影響は壁面近傍のみである。流路内に大規模な縦渦は存在しない。しかし、吹出したジェットにより、壁面近傍に正・負の渦が発生している。その渦による流れが壁面近傍に存在している。このことより、境界層外側に渦が発生していない場合においても、吹出したジェットは壁面

(a) $\phi=30$ deg

(a) $\phi=90$ deg

Fig. 13 Surface flow in divergent portion of the test section ($U_0=6.5$ m/s, $VR=9.5$).

Fig. 14 Secondary flow vectors at $X=5$ mm ($U_0=6.5$ m/s, $\phi=30$ deg).

Fig. 15 Contours of streamwise vorticity at $X=5$ mm ($U_0=6.5$ m/s, $\phi=30$ deg).

近傍に渦を発生させ、二次流れを誘起している。境界層内の流れは、ジェットの吹出しとともに発生する。その後、吹出したジェットの影響は境界層外側におよび、流れ場に大規模な縦渦が発生する。そして壁面近傍では、その渦による流れが支配的になる。

4. 結 言

縦渦発生ジェットでは、主流と境界層の強制混合によりはく離制御を実現する。そのため、ジェット吹出し角は制御効果に直接影響する。そこで、ジェット吹出し角の違いによる壁面近傍の流れ場の違いを明らかにするために、壁面近傍の計測を実施した。その結果は、以下のようにまとめることができる。

- (1) 小さなピッチ角でジェットを吹出した場合、ジェットによる W 成分の大きさが増加する。この影響で発生する縦渦の渦度が増加し、さらに縦渦が壁面から近い位置に存在する影響で壁面近傍の流れが引きずられて、壁面近傍の二次流れが強くなる。
- (2) ジェットを傾けて吹出すことにより生じる W 成分の流れは、馬蹄渦をその方向に移動させ、馬蹄渦が存在するスパン方向位置の違いを引起す。
- (3) はく離制御の観点から、制御を実施する下流位置で壁面近傍の二次流れがほとんど確認されない場合においても、その上流側で十分な壁面近傍の二次流れが存在し、境界層内に主流側のエネルギーが供給できれば、はく離制御効果は下流方向に持続される。
- (4) 流れ場に大規模な縦渦が存在しないジェット吹出し直後においても、ジェット吹出しとともに壁面近傍の流れは影響を受ける。

本研究の実施にあたって、特に壁面ごく近傍の流れ場の計測が可能なように風洞底面の改修に協力してい

ただいた、筑波大学文部科学技官中島孝氏にお礼を申し上げます。また、実験およびデータ解析に協力していただいた、筑波大学松内研究室の卒論生であった小松崎泰寛君に感謝の意を表します。

文 献

- (1) Compton, D. A. and Johnston, J. P., Streamwise Vortex Production by Pitched and Skewed Jets in a Turbulent Boundary Layer, *AIAA J.*, **30** (1992), 640-647.
- (2) 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はく離防止効果に与える影響, *機論*, **64**-627, B(1998), 164-170.
- (3) Moussa, Z. M., Trischka, J. W. and Eskinazi, S., The Near Field in the Mixing of a Round Jet with a Cross-stream, *J. Fluid Mech.*, **80**(1977), 49-80.
- (4) Chassaing, P., George, J., Claria, A. and Sananes, F., Physical Characteristics of Subsonic Jets in a Cross-stream, *J. Fluid Mech.*, **62**(1974), 41-64.
- (5) Fric, T. F. and Roshko, A., Vortical Structure in the Wake of a Transverse Jet, *J. Fluid Mech.*, **279**(1994), 1-47.
- (6) 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.