渦発生ジェットを伴う後方ステップはく離せん断層の縦渦構造*
(吹出し間隔の影響)山 縣 康 一^{*1} 齋 藤 学^{*1}
森 岡 禎^{*2}, 本阿弥 眞 治^{*3}Longitudinal Vortex Structure in the Separating Shear Layer
over the Backward Facing Step with Vortex Generator Jets
(The Effect of Injection Pitch)Koichi YAMAGATA, Manabu SAITO,
Tadashi MORIOKA and Shinji HONAMI^{*4}^{**} Department of Mechanical Engineering, Tokyo University of Science,
1-3 Kagurazaka, Shinjuku-ku, Tokyo, 162-8601 Japan

The paper presents the flow mechanism of a reattachment process over a backward facing step with vortex generator jets (VGJs). The spanwise arrays of VGJs upstream of the step introduces the co-rotating longitudinal vortices in a separating shear layer. The measurement of the longitudinal vortices by the hot wire anemometer is made to clarify the spanwise structure in the separating shear layer downstream of the step. The particular emphasis is placed on understanding of the effect of the jet injection pitch on the shear layer development. The spanwise structure in the case of the injection pitch of 20 times jet diameter shows two-dimensional feature at the bottom of the separating shear layer as in the distribution of forward flow fraction near the reattachment region.

Key Words: Jet, Separation, Flow Control, Vortex Generator Jets, Longitudinal Vortex, Backward Facing Step

1. 緒 言

近年, 乱流はく離現象の制御に関する研究が活発に行われ, その成果は, 航空機の翼面上の流れやディフューザ流れなどの制御に適用されている⁽¹⁾. はく離再付着流れは, 圧力損失, 振動, 騒音などの原因となる一方, 非定常な渦による混合促進に活用される. 従来の制御用アクチュエータは二次元的なじょう乱を与える場合が多く, 工学的応用を考えると, 構造上課題が残る.

そこで, 実用化の観点から, 渦発生ジェットの採用が有望と考えられる. 渦発生ジェットは, 壁面に設けた孔より境界層内に噴流を吹出し, 縦渦を誘起し, 渦により乱流混合作用を促進し, はく離を抑制, 防止するものである⁽²⁾⁽³⁾. また, 制御を必要としないときは吹出しを止めることにより, 容易に抵抗を低減できるなど, 固定式渦発生器に比べ, 柔軟性に富む.

はく離点が固定した後方ステップ流れに渦発生ジェ

ットを適用し, 再付着流れに及ぼす影響が明らかにされている. 渦発生ジェットによるじょう乱はスパン方向に離散的に与えられるので, 再付着過程がスパン方向構造をもつ可能性がある. 渦発生ジェットの直径を d として, 吹出しピッチを $20d$ に設定した場合, 再付着点壁近傍の流れが二次元となることが著者らの研究で判明した⁽⁴⁾. あわせて, 再付着距離はジェット速度に反比例し, 再付着距離を 20% の範囲で変化させる閉ループ制御システムを実現した⁽⁵⁾. さらに, 制御操作量にジェット速度比, 制御パラメータに再付着領域の壁面静圧を用いて, 制御システムおよび制御則を構築し, 伝達関数の周波数依存性や遅れ時間を明らかにした⁽⁶⁾. しかしながら, 境界層がステップ端ではく離し, はく離せん断層として発達し, 再付着に至る過程においてステップ端上流で吹出された渦発生ジェットがはく離せん断層の発達にどのような役割を演じるかは未解決の問題である.

本研究では, 渦発生ジェットを伴う後方ステップ流れにおけるはく離せん断層の発達と再付着に至る流動機構を調べるため, 本報では, 渦発生ジェットのスパン方向吹出しピッチの影響, 特に, 吹出しピッチを変化させた場合はく離せん断層におけるスパン方向の構造を調べる.

* 原稿受付 2004 年 9 月 17 日.

^{*1} 東京理科大学大学院工学研究科(〒162-8601 東京都新宿区神楽坂 1-3).^{*2} 正員, 東京理科大学大学院工学研究科.^{*3} 正員, フェロー, 東京理科大学工学部.

E-mail: honamis@rs.kagu.tus.ac.jp

2. 記 号

- d : ジェット吹出し孔直径 (=2 mm)
 H : ステップ高さ (=40 mm)
 q^2 : 乱流運動エネルギー $= (\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2})/2$
 Re_H : レイノルズ数 $= U_0 H / \nu$
 Tu : 乱れ強さ; I 形プローブ $\sqrt{u^2}/U_0 \times 100$
 U, V, W : 時間平均速度
 u, v, w : 変動速度
 U_j : ジェット吹出し速度
 U_0 : 基準点主流速度
 VR : 速度比 $= U_j/U_0$
 X, Y, Z : 直交座標
 X_r : 再付着距離
 Z_i : 中央吹出し孔基準のスパン方向座標
 γ_p : 順流率

3. 実験装置および実験方法

図1に実験流路を示す。後方ステップ上流の直線助走路長さとステップ下流試験流路長さは2000 mmである。ステップ高さ H (=40 mm) に対する流路幅のアスペクト比は18, 試験部流路高さと同走路高さの比に相当する流路拡大比は1.5である。ステップ端における流路スパン方向の中心を座標系の原点とし、流路流れ方向を X , 流路高さ方向を Y , 流路スパン方向を Z とする。また、スパン中央部の吹出し孔を基準

Fig. 1 Experimental apparatus

Fig. 2 Jet orifices array

としたスパン方向座標を Z_i と定義した。作動流体に空気をを用い、基準点 ($X_0 = -4H$) では主流速度 U_0 を10 m/s ($Re_H = 2.7 \times 10^4$, 代表長さを H) とし、運動量厚さを基準としたレイノルズ数が2600の発達した乱流境界層を与えた。VGJ 吹出し孔は図2のように直径 d を2 mm, 壁面に対する仰角 (Pitching Angle) を 45° , 主流に対する旋回角 (Skew Angle) を 90° とし, $X = -0.5H$ の位置にスパン方向に配置し, 吹出し間隔 (以後, ピッチと表す) は $5d$ 単位で調節可能である。VGJ の空気源にはベーン式圧縮機を用い, 流路に取付けたプレナム室を介して VGJ を連続して吹出し, 各孔の吹出し方向は同じであるため Co-rotating Vortex を生成する。

流れの測定には感知部直径 $5 \mu\text{m}$ の I 形と X 形プローブ熱線流速計を用いて, $X/H = 0, 0.625, 2, 4, 6$ の流路断面の流れを計測した。また, X 形プローブの出力結果には吹出しがなく, 主流と想定される $Y/d = 20$ における流れの XZ 面内の旋回角を零とする角度補正を施した。本研究では, 吹出し間隔の影響を調べるため, 吹出しピッチ $10d, 20d$ と $40d$ で実験を実施した。

4. 実験結果および考察

4.1 乱れ強さ I 形プローブ熱線流速計は X 形プローブに比べ, 検定, 計測に要する時間が著しく短く, 数多くの吹出し条件で実験するのに都合がよい。I 形プローブで縦渦の抽出が可能かを検証するため, I 形プローブで測定可能な乱れ強さと X 形プローブにより得られる時間平均速度, 渦度, 乱流運動エネルギー, レイノルズ応力を比較した。図3に $X/H = 2$ での $VR = 6$, ピッチ $20d$ の吹出し時の分布を示す。図3(a)~(e)は X 形, 図3(f)は I 形プローブの結果である。図3(a), (b)より吹出し孔に対応し, はく離せん断層に縦渦が存在し, 負と正の渦度をもつことがわかる。ここで負の渦度をもつ縦渦を一次渦と定め, 一次渦は, 主流付近の高い運動量をもつ流れを下方に巻き込む Downwash 流れとせん断層の低い運動量をもつ流れを上方に巻き上げる Upwash 流れを誘起する。乱流運動エネルギー分布では, 一次渦中心位置とはく離せん断層でピークを示す [図3(c)], レイノルズ応力 $-\overline{uv}$ 分布は, 一次渦 Upwash 側, Downwash 側そしてはく離せん断層でピーク値をもつ [図3(d)], レイノルズ応力 $-\overline{uw}$ 分布は, 一次渦下部でピークを示し, はく離せん断層ではピークは示さない [図3(e)], 図3(f)に示す乱れ強さ分布では, 一次渦中心とはく離せん断層でピークが確認され

Fig. 3 Contours ($X/H=2$, $VR=6$, $Pitch/d=20$)

る。

このように X 形プローブは流れの詳細な構造を調べることができ、また、I 形プローブは、一次渦や、はく離せん断層の乱れ強さ分布から、流れの特徴を把握できることがわかる。そこで、以下に I 形プローブ熱線流速計により吹出しピッチの影響を検討する。

4.2 隣接する VGJ による影響 図 4 に単一孔から吹出した場合の I 形プローブによる乱れ強さ分布を示す。ピッチ $20d$ で吹出す場合の分布は図 3(f) に相当する。単一出しの場合、 $Z_i/d=3$, $Y/d=10$ 付近に一次渦の中心があり、はく離せん断層は $Z_i/d=-10 \sim 0$ 付近に乱れ強さの極大部をもつ。これは、一次渦の Downwash 流れの下部に位置し、一次渦の Upwash 流れがはく離せん断層を上方に持ち上げ、結果として極大部が存在すると考えられる。また、はく離せん断層内の分布は $Z_i/d < 15$ 付近まで縦渦の影響が認められる。図 3(f) に示したピッチ $20d$ の場合も縦渦中心のスパン方向位置は単一出しの場合と同じであり、乱れ強さもほぼ同じ値であり、はく離せん断層内のピークは $Z_i/d = -10 \sim 5$, ならびに $Z_i/d = 10 \sim 25$ に位置する。したがって、一次渦の形成には隣接する VGJ の影響は少ないと考える。

Fig. 4 Turbulence intensity ($X/H=2$, $VR=6$, Single)

4.3 はく離せん断層の主流方向速度と乱れ強さ 図 5 と図 6 に I 形プローブによる再付着点に近い $X/H=6$ での速度比 $VR=6$, ピッチ $10d$, $20d$, $40d$ と吹出し条件を変化させた場合はく離せん断層における平均速度と乱れ強さ分布を示す。速度分布は、ピッチ $10d$ ではスパン方向に吹出し孔の位置に対応しない分布で、また、二次元的な分布とはならない。ピッチ $20d$ ではスパン方向に二次元的な分布を示し、ピッチ $40d$ では吹出し孔の位置に対応した周期的な分

Fig. 5 Mean velocity U/U_0 ($X/H=6$, $VR=6$) Fig. 6 Turbulence intensity (%) ($X/H=6$, $VR=6$)

布を示す。乱れ強さ分布は、ピッチ $10d$ では、ピークが不規則な位置に存在し、ピッチ $20d$ では、せん断が強い領域 (U/U_0 が 0.4 から 0.6 の領域) でスパン方向に周期的な分布を示す。ピッチ $40d$ では、速度分布と同様に、スパン方向に周期的な変化を示す。ここで、参考のため文献(4)より引用したマイクロフローセンサによる再付着領域壁近傍の順流率分布を図7に示す。順流率 γ_p は一定時間内(8秒間)に流れが主流方向に流れる時間割合である。順流率50%の等値線(太線)は再付着位置に相当する。はく離せん断層のせん断が強い領域で乱れ強さ分布が周期的な構造をもつにもかかわらず [図6(b)], 再付着位置の壁面近傍の時間平均流れは、はく離せん断層の周期性が反映しない。再付着流れ壁面近傍のスパン方向の構造 [図7(c)の順流率50%の等値線] は、はく離せん断層下部領域 ($U/U_0 < 0.4$ の領域) における時間平均流れのスパン方向の構造 [図5(b)] と類似する。

4・4 吹出しピッチの影響 図8に速度比が6の場合における(a) $X/H=2$, ピッチ $10d$, (b) $X/H=4$, ピッチ $20d$ での乱れ強さ分布を示す。はく離せん断層内の乱れ強さが吹出し孔のピッチに応じて、周期的に分布し、両者のせん断層内の構造が相似となることを示す。

図9に各種実験条件のもとでの乱れ強さの変化を示す。図9(a)は速度比 VR が6, ピッチ $20d$ におけるはく離せん断層と一次渦における乱れ強さの極大値、そして参考のため、 $VR=0$ の渦発生ジェットを吹出

Fig. 7 Forward flow fraction from Ref⁽⁴⁾

さない場合について下流方向の変化を示す。一次渦の乱れ強さが減衰するのに対し、はく離せん断層の乱れ強さが増加する。吹出しのない後方ステップ流れでは、ステップではく離したあと、せん断層の横渦の合体により乱れ強さが増加し、再付着点に至る前に最大値を示し、その下流で再付着する。せん断層のせん断が強い領域の乱れが強くなれば、せん断層の発達を促し、はく離せん断層の再付着距離は短くなる⁽⁷⁾。そこで、渦発生ジェットがせん断層の乱れを強くし、せん断層の発達を促進していることがわかる。図9(b)は

(a) $X/H=2$, $VR=6$, $Pitch/d=10$ (b) $X/H=4$, $VR=6$, $Pitch/d=20$

Fig. 8 Turbulence intensity contours (%)

ジェット速度比と乱れ強さの関係を示す。はく離せん断層と一次渦における乱れ強さはいずれも速度比の増加に対して単調増加する。図 9(c) に速度比 6 における乱れ強さに及ぼす吹出しピッチの影響を示す。ピッチ $20d$ の場合、乱れが強いことがわかる。

以上の結果より、渦発生ジェットを伴う後方ステップ流れでは、はく離せん断層内の乱れは強くなるが、縦渦内の乱れ強さは減衰し、吹出し間隔は吹出し孔径の 20 倍のオーダがはく離せん断層の発達に望ましいことがわかる。あわせて、はく離せん断層の下部 ($U/U_0 < 0.4$ の領域) では時間平均速度がスパン方向に一樣な分布を示し、二次元再付着過程に対応するものと思われる。再付着過程のスパン方向の構造を制御するには適切なスパン方向吹出しピッチを選択する必要がある。

5. 結 言

レイノルズ数 $Re_H = 2.7 \times 10^4$ の後方ステップ流れに渦発生ジェットを与えた場合、実験した条件の範囲で以下の結論を得た。

(a) Downstream variation

(b) Velocity ratio variation

(c) Pitch variation. $VR=6$

Fig. 9 Turbulence intensity

(1) I 形と X 形プローブ熱線流速計による測定結果の比較より、I 形熱線プローブでもはく離せん断層の縦渦構造の特徴を抽出可能である。

(2) はく離せん断層の発達には、吹出しピッチは $20d$ のオーダが望ましい。

(3) 吹出しピッチ $20d$ の場合、はく離せん断層のせん断が強い領域の時間平均速度はスパン方向に一樣な分布を示し、再付着位置の壁面近傍の時間平均流れも二次元である。

(4) ピッチ $20d$ の場合、はく離せん断層のせん断が強い領域の乱れ強さはスパン方向に周期的な分布を示す。

文 献

- (1) Gad-el-Hak, M., *Flow Control*, (1998), 29-56, Springer.
- (2) Johnston, J. P. and Nishi, M., *AIAA J.*, **28**-6 (1990), 989-994.
- (3) Compton, D. A. and Johnston, J. P., *AIAA J.*, **30**-3 (1992), 640-647.
- (4) 森岡 禎・ほか 2 名, 機論, **67**-662, B (2001), 2443-2448.
- (5) 森岡 禎・本阿弥 眞治, 機論, **67**-656, B (2001), 876-881.
- (6) 森岡 禎・本阿弥 眞治, 機論, **69**-680, B (2003), 801-807.
- (7) Isomoto, K. and Honami, S., *Trans ASME, J. Fluids Eng.*, **111** (1989), 87-92.