後縁に三次元性をもつ平板翼を用いた壁面噴流の操縦

Management of Stronger Wall Jet by Flat Plate Wing with Three-dimensional Trailing Edge

○学 坂口貴之 (山口大院) 正 望月信介 (山口大院)
正 亀田孝嗣 (近畿大工)

Takayuki SAKAGUCHI, Graduate School of Sci. and Eng., Yamaguchi Univ., 2-16-1 Tokiwadai, Ube 755-8611.

Shinsuke MOCHIZUKI, Graduate School of Sci. and Eng., Yamaguchi Univ.

Takatsugu KAMEDA, Dept. of Mech. Eng., Kinki University, 1 Umenobe, Takaya, Higashi-hiroshima 731-2116.

A flat plate wing was applied to flow management of stronger wall jet with constant velocity ratio of $U_m/U_e=4$. The normal straight flat plate and three-dimensional wing with notched trailing edge were employed and located at center of the outer layer in the jet with constant angle of attach of -4 degree. The two wings increase the maximum velocity and velocity in the outer layer. Turbulent intensity profile and Reynolds shear stress profile was decreased by flat plate wings. Streamwise mean momentum flux integrated in cross streamwise plane is increased by flat plate wings. The increasing rate of momentum flux is enhanced by the three-dimensional wing.

Key Words: Stronger Wall Jet, Flow Management, Three-Dimensional Flat Plate Wing, Momentum Flux.

1. 緒言

壁面噴流はタービン翼面上の膜冷却、航空機翼面上の剥離防止、フィルムおよび紙・食品等の乾燥など幅広い分野で利用されている。それらの分野では壁面近傍の運動量の下流への保持、混合の抑制、熱伝達率の増加などが求められており、壁面噴流の操縦は工業上重要な課題といえる。壁面噴流の特徴は、境界層と比べると流れ自身が運動量の源であること、境界層的な性質を持つ内層と自由噴流の性質を持つ外層の2つの領域に分けられ、この内層と外層に秩序的な対の大渦対が存在することが挙げられ、Stronger Wall Jetにおいては外層の大規模渦構造が支配的である。

大規模渦構造の制御において LEBU の効果に関する研究が境界層において多数⁽¹⁾行われている。Mochizuki⁽²⁾らは壁面噴流の外層に LEBU と同様な二次元翼を設置し、せん断層発達の抑制を報告し、大規模渦構造の三次元性促進による渦寸法減少を推測した。また、久枝⁽³⁾らはこの平板翼を種々の迎角で設置し、平板翼に若干の揚力が作用する負の迎角において効果の向上が図られることを報告した。

これらの研究成果により、外層に設置する平板翼に若干の三次元性と迎角を加えることにより制御効果を高めることが期待される。本研究では、平板翼後縁に流れ場の大規模渦構造の寸法と同程度の三次元性を加え、壁面噴流の発達に及ぼす影響を明らかにする。

2. 実験装置および条件

図1には流れ場の概略図および使用記号を示す。測定部寸法は幅 600mm、全長 2,360mm である。噴流出口は幅 600mm、高さ 10mm、一様流出口は幅 600mm、高さ 400mm である。自己保存条件下の速度比 $U_m/U_e=4$ の Stronger Wall Jet を実現するため、流れ場は逆圧力勾配となっている。噴流出口高さ S_1 と噴流出口速度 U_j に基づくレイノルズ数は $Re_j=1.2 \times 10^4$ であり、自己保存成立範囲は $x_0/S_1=60 \sim 164$ である。ここで噴流出口高さは $S_1=10\text{mm}$ 、噴流出口流速は $U_j=17.95\text{m/s}$ 、一様流出口速度は $U_{e0}=2.95\text{m/s}$ であった。

図2は実験に用いた三次元平板翼の概略図を示す。材質はアルミニウムであり、二次元平板翼は全長 700mm、翼弦長 $c=20\text{mm}$ 、厚さ 1mm である。三次元平板翼の後縁部はその中央部を凹部とし、凸と凸との間隔が $2b_2$ (b_2 は半値幅)、山と谷との幅が $b_2/10$ になるように加工された。翼の挿入位置は

後端が自己保存成立の $x_0/S_1=60$ とし、高さは $h=38\text{mm}$ ($=b_2$) とした。迎角は -4° (先端が上向き) とした。

Fig.1 Schematic flow field, nomenclature and coordinate system.

Fig.2 Schematic flat plate wing

3. 実験結果および考察

図3、4および5にスパン方向断面中央 ($z=0$) における平均速度、乱れ強さおよびレイノルズせん断応力分布の流れ方向 ($x/c=5 \sim 50$) 変化を示す。横軸の平均速度は非攪乱流れ (ND) の超過速度 $U_{0(ND)}$ と一様流 $U_{e(ND)}$ で、レイノルズせん断応力は超過速度 $U_{0(ND)}$ でそれぞれ無次元化している。また、縦軸は翼挿入高さ h で無次元化している。まず、図3の流れ方向平均速度分布についてみる。 $x/c=5$ において、壁面近傍の内層から最大流速高さ b_m 付近で増速がみられ、その大きさは非攪乱流に対する二次元平板翼 (以後、2D と呼ぶ。) および三次元平板翼 (以後、3D と呼ぶ。) の最大の増速の程度はそれぞれ 12% および 19% である。 $x/c=50$ となる最下流位置についてみると、2D の結果は内層から $y/h=4$ の広い範囲において増速が生じている。3D の結果は2D に比べて外層における増速は低いものの、 $y/h=2.5$ まで増速している。このこと

から、3D が運動量を最も下流にまで維持できる。これより、平板翼への三次元性の付加は大規模渦構造による拡散を抑制することにより層の発達を低下させ、その効果を比較的下流まで維持すると考えられる。

次に、図 4 の流れ方向乱れ強さ分布についてみる。 $x/c=5$ において、2D および 3D の両者の結果は内層から $y/h=1.5$ 付近まで乱れ強さの低減が確認される。最大の減少率はそれぞれ 29% および 25% である。この乱れ強さの低減は他の断面においても認められるが、減少の割合は下流に向けて小さくなる。翼による攪乱効果は下流に向け減衰し、乱れ強さ分布は $x/c=30$ において非攪乱とほぼ一致するようになる。しかしながら、 $x/c=50$ の最下流位置においても 2D および 3D の乱れ強さは非攪乱よりも若干大きい。

次に図 5 のレイノルズせん断応力分布についてみる。 $x/c=5$ についてみると、2D および 3D の両者の結果は内層から外層にかけての広い範囲で負の絶対値が減少し、特に $y/h>1$ において顕著である。この最大の減少量は 2D および、3D でそれぞれ 65% および 57% である。下流に行くに従い、2D の結果は $y/h=1$ 付近にみられた減少が $x/c=50$ において消失し、非攪乱の状態に回復している。一方、 $y/h=2\sim4$ にかけて負の絶対値は増加している。平板翼の外層への設置は広い領域で乱れ強さおよびレイノルズせん断応力を低減させる効果がある。しかしながら、平均速度分布における速度勾配は増加しており、渦寸法の減少が推測される。

平板翼による壁面噴流の操縦に対する有効性を確かめるため、流れ方向運動量流束の変化を調べてみる。図 6 は流れ方向運動量流束の断面内積分値における非攪乱流に対する増加率 $(M - M_{ND}) / M_{ND}$ を示す。ここで M および M_{ND} はそれぞれ攪乱流及び非攪乱流の下式で定義される流れ方向運動量流束積分値である。

$$M = \int_{z_0}^{z_1} \int_0^{y_1} \rho U^2 dy dz \quad (1)$$

高さ方向積分範囲の y_1 は乱れエネルギーが各断面の最大値の 0.5% の値をとる高さとした。一方、スパン方向積分範囲は三次元性を加えた場合の 1 周期に該当する $z_0=-38[\text{mm}]$, $z_1=38[\text{mm}] (=h)$ とした。2D における運動量流束積分値は翼挿入直後の $x/c=5$ では約 10% の増加、 $x/c=10$ においても約 11% 増加している。3D は 2D に比べてその増加率が大きく、 $x/c=5$, 7.5 および 10 においてそれぞれ 23%, 37% および 23% 運動量流束の積分値が増加している。平板翼の外層における挿入は壁面噴流の運動量流束の増加に寄与し、三次元性の付加はその効果を高めることがわかる。

4. 結言

二次元および三次元性を付加した平板翼を壁面噴流の外層に設置し、以下の結果が得られた。

- (1) 中心断面における平均速度分布において、平板翼の設置は最大速度および外層における速度を増加させる。
- (2) 平板翼の設置は乱れ強さおよびレイノルズせん断応力の値を減少させる。
- (3) 平板翼の設置は流れ方向運動量の断面内積分値を増加させ、三次元性の付加はその増加率を高める。

文献

- (1) Anders, J.B.Jr., Outer-Layer Manipulators for Turbulent Drag Reduction, Viscous Drag Reduction in Boundary Layers, Progress in Astronautics and Aero., (Eds. Bushnell, D.E. and Hefner, J.N.), AIAA, 123, pp.263-284, (1990)
- (2) Mochizuki, S., Yamada, S., and Osaka, H., Management of a

Plane Turbulent Wall Jet by the Large-Eddy Break-up Device, JSME Int. J., Ser.B, 49(2006), pp.921-927.

- (3) 久枝大亮他 2 名, 日本機械学会中国四国支部総会, 講演会講演論文集, Vol. 49, (2011), pp.289-290.

Fig.3 Deformation and recovery of a mean velocity profile

Fig.4 Deformation and recovery of streamwise turbulent intensity profile

Fig.5 Deformation and recovery of the Reynolds shear stress profile

Fig.6 Increasing rate of momentum flux integrated in cross-streamwise planes