228 d形粗面境界層における乱れ生成機構と抵抗低減

望月信介[○]、大坂英雄（山口大工）

Turbulent Production Mechanism and Drag Reduction in a d-Type Rough Wall Boundary Layer

Shinsuke Mochizuki and Hideo Osaka

ABSTRACT

Based on a model for momentum transport and turbulence production near the wall by means of unsteady streamwise vortex, a turbulence control technique with longitudinal thin ribs were proposed for d-type rough wall boundary layer and an experiment with direct skin-friction measurement confirmed its efficiency for turbulent drag reduction. The maximum reduction rates of local skin friction coefficient compared with the original d-type rough wall flow and a smooth wall flows are about 10% and 3%, respectively. Examination of the turbulent intensity and Reynolds shear stress profiles shows that the vortex model assumed for the present control technique is reasonable. The streaky structure was observed near the wall and effect of the longitudinal thin ribs on the probability density distribution of the spanwise spacing λ_z was investigated.

Keywords: Drag Reduction, d-Type Roughness, Coherent Structure, Hairpin Eddy

1. 緒 論

本研究の目的は、組織構造に基づく乱れ生成機構の一モデルに従い、粗面溝内部に流れ方向リブ（以下、縦リブと呼ぶ）を挿入し、d形粗面境界層の抵抗低減を図ることである。

リブレットは壁面せん断乱流に対するパッシブな抵抗低減法として盛んに研究され、その有効性が内部流および外部流において確認されている⁽¹⁾。その抵抗低減メカニズムの解明についてみると、壁領域における乱れ生成機構に対するバースティングや縦渦構造といった整構造（Coherent structure）との関係が議論されている⁽¹⁾。しかしながら、外部流においては直接測定による壁面セ

ン断応力の値に基づく実験例がほとんどないことや、整構造の定義においても多くの課題が残されているため、抵抗低減メカニズムと整構造との関係について一致した結論は得られていない。

条件付解析等に基づき推測されたd形粗面上における非定常縦渦構造⁽²⁾とそれによる運動量輸送および乱れ生成機構を図1に示す。非定常縦渦構造はCommon-flow upの渦対形状をなし、これらは滑面上で提案されているようなヘアピン渦の根幹部に相当するものと推測される。この縦渦対はその誘導速度により、溝内部におけるスパン方向輸送および溝内部と境界層との運動量交換を促進するものと考えられる。溝内部から放出された低運動量の流体塊は縦渦対により生成される高せん断層を強め、バースティングによる乱れ生成を増加させるものと予想される。そこで、溝内部に適当なスパン方向間隔で仕切（縦リブ）を挿入すると、縦渦構造を介した溝内部と境界層との干渉により促進された運動量交換および乱れ生成率が抑制され、抵抗低減が生じるものと期待される。

本報告においては、縦リブによるd形粗面境界層の抵抗低減制御を実験的に試み、壁面せん断応力の直接測定および時間平均量分布の測定からその有効性を確認する。

2. 実験装置および方法

d形粗面平板は、粗さ要素高さ k_r 、要素幅 b および溝部幅 w がいずれも 3mm の矩形粗さの配列からなる。縦リブは厚さ 0.1mm の銅板製で、流れ方向 305mm および

Fig.1 A model of momentum transports by means of unsteady streamwise vortex near the d-type roughness.

Fig.2 Local skin friction coefficient as a function of momentum thickness Reynolds number.

スパン方向 150mm の範囲にスパン方向間隔 $W_r=3\text{mm}$ 一定で溝内部に設置された。この縦リブを挿入した平板を十分発達した d 形粗面境界層が形成された位置 (平板前縁から測った距離が $x_0=800\text{mm}$ および 1800mm の 2 条件) に設置した。実験は零圧力勾配および主流乱れ強さ 0.3% の下で行われた。

局所壁面せん断応力の測定は、直径 60mm の浮動片要素をもつ直接測定装置⁽³⁾により行われた。測定値は差動トランスデューサからの変位出力の平均値 (20 秒間) と較正式から算出された。速度成分の計測は定温度型熱線流速計、および直径 $5\mu\text{m}$ で受感部長さ 1mm のタングステン細線をセンサとする I 形および X 形熱線プローブを用いた。測定は、縦リブ挿入開始位置の下流 225mm の位置において行われた。この発達距離は初期境界層厚さ δ_0 (縦リブ挿入平板設置位置における境界層厚さ) の 11 倍 ($x_0=800\text{mm}$ の場合) および 5.6 倍 ($x_0=1800\text{mm}$ の場合) に相当し、粘性長さに対しては 2000 倍以上になる。

3. 結果および考察

3.1 局所壁面せん断応力 図 2 は局所壁面摩擦抵抗係数 $C_f \equiv \tau_w / (\rho U_1^2 / 2)$ [U_1 は主流速度、 τ_w は壁面せん断応力] の運動量厚さ θ に基づくレイノルズ数 $R_\theta \equiv \theta U_1 / \nu$ に対する変化を示す。図中には滑面境界層の値として、Kármán-Schoenherr の実験式⁽⁴⁾を実線で示した。縦リブ挿入平板上の C_f は $R_\theta > 2000$ においては d 形粗面上の値と同程度で、滑面流の値に比べ大きい。一方 $R_\theta \leq 2000$ においては、縦リブ挿入平板上の C_f は d 形粗面上の値よりも低く、抵抗低減が生じていることがわかる。また、 $750 < R_\theta < 1200$ の範囲において縦リブ挿入平板上の C_f は滑面流のものよりも小さい。これらは縦リブが d 形粗面境界層の抵抗低減に対して有効であり、かつ滑面流よりも局所摩擦抵抗係数が低い粗面平板を実現した極めて重要な結果である。滑面流および d 形粗面流に対する C_f 値の低減率における最大値は、それぞれ 10% ($R_\theta=1200 \sim 1300$) および 3% ($R_\theta=1000$) であった。

ここでは縦渦構造による運動量輸送および乱れ生成機

構に対して仮定したモデルの妥当性をみている。図 3 は抵抗低減率 $\Delta C_{fd} \equiv (C_{fd} - C_{fd}^0) / C_{fd}^0 \times 100(\%)$ [C_{fd} は縦リブ挿入平板、 C_{fd}^0 は d 形粗面平板上の C_f である] をリブレイノルズ数 $W_r^+ \equiv W_r u_\tau / \nu$ [u_τ は摩擦速度] に対して示す。リブレイノルズ数は縦リブスパン方向間隔 W_r の縦渦構造の代表尺度 ν / u_τ に対する比として解釈できる。縦渦構造のスパン方向代表寸法は後述のように粘性長さの 100 倍のオーダーであるため、 $W_r^+ \leq 100$ の範囲において抵抗低減が期待される。図中には x_0 に関して 2 箇所の結果が示され、影付の範囲はデータのばらつきを表している。 R_θ 数の差異によらず (x_0 によらず)、 $W_r^+ \leq 100$ において抵抗の低減が生じている。このことより、縦リブを用いた d 形粗面境界層の抵抗低減法において仮定された非定常縦渦構造による運動量輸送モデルは妥当といえる。しかしながら、低減率の大きさは R_θ 数により異なり、最大の低減率が得られる W_r^+ の値は不明である。

3.2 時間平均量分布 平均速度、乱れ強さおよびレイノルズせん断応力分布に与える縦リブ挿入の影響をみる。図 4 は抵抗低減がみられたレイノルズ数範囲における対数速度分布を示す。壁面に垂直方向の距離は直接測定による C_f に基づき Monin-Yaglom 法⁽⁵⁾から原点補正量 ε を求め、 $y = y_1 + \varepsilon$ とした。図中には 1968 年の Stanford 会議において提案された滑面流に対する対数速度分布⁽⁴⁾を実線で描いた。結果をみると、傾きは実線

Fig.3 Reduction rate of local skin friction coefficient.

で示す滑面流の対数速度分布のものとほぼ同じ（したがって、カルマン定数 $\kappa=0.41$ ）対数直線部がみられるものの、切片の値に差異がみられる。 C_f 値が滑面流とほぼ同じとなる $R_\theta=750$ および 1200 においては、分布は通常対数速度分布に一致する。一方、 C_f 値が滑面流よりも低い $R_\theta=860$ および 910 においては、分布は通常対数速度分布よりも上方にある。したがって、粗面流において通常は抵抗の増加を表現する粗さ関数は負の値をとることになる。これは、リブレット⁽¹⁾ および LEBU による抵抗低減の場合にもみられている。このことは、対数層の存在を認めると、抵抗低減によるエネルギー散逸率の減少にともなう最小渦寸法あるいは粘性底層の厚みの増加と解釈される。滑面流に比べ C_f 値が大きい $R_\theta=1570$ の場合、分布は通常対数速度分布の下方に位置する。

図5は粗さ関数をd形粗面の代表粗さ寸法である原点補正量に基づくレイノルズ数 $u_\tau \varepsilon / \nu$ に対して描いたものである。本結果は抵抗低減が生じていることおよび低レイノルズ数の範囲であるため、実線で示す高レイノルズ数のものよりも上方に位置している。注目すべき結果は、滑面よりも抵抗係数が低い条件においては粗さ関数およ

Fig.4 Logarithmic velocity profiles.

Fig.5 Roughness function.

び $u_\tau \varepsilon / \nu$ 値の両者が負の値をとっていることである。 $u_\tau \varepsilon / \nu < 0$ の値については、原点補正量 ε が負の値をとることによるもので、相似性成立のための仮想原点が粗さ要素頂上よりも上方に位置することになる。このことは、縦渦構造をエネルギー含有渦とすると、その代表寸法 ℓ および乱流レイノルズ数 $u\ell/\nu$ の減少を意味するものと考えられ、前述の最小渦寸法の増加と対応する。

乱れ生成機構に対する影響をみるため、流れ方向乱れ強さ分布の変化をみる。図6においては、縦リブ挿入により抵抗低減が生じた条件 $R_\theta=1300$ ($W_r^+=35$) および抵抗低減が生じなかった条件 $R_\theta=5000$ ($W_r^+=120$) における2つの代表的な結果を示す。抵抗低減が生じた $R_\theta=1300$ ($W_r^+=35$) の場合、壁近傍において u_{rms}/U_1 値の減少が確認され、d形粗面流に対する最大の低減率は測定した範囲で45%である。この u_{rms}/U_1 値の減少は、抵抗低減の生じなかった $R_\theta=5000$ ($W_r^+=120$) においても確認される。 u_{rms}/U_1 値の減少は、内層 $y_t/\delta < 0.2$ の範囲で認められる。したがって、縦リブによるd形粗面平板の変更は、そのほとんどが生成される壁近傍の乱れ生

Fig.6 Modification in streamwise turbulent intensity profiles.

Fig.7 Modification in Reynolds shear stress profiles.

成率を減少させていることがわかる。このことは、本抵抗低減法提案の基礎となった縦渦構造が、溝内部と境界層との運動量交換と乱れ生成機構の両者に関連することを示す証拠の一つであると考えられる。滑面流よりも C_f 値が大きい $R_\theta=1300$ において u_{rms}/U_1 値は Purtell らの滑面流のもの⁽⁶⁾ に比べ大きい。

図7はレイノルズせん断応力分布を示す。縦リブ挿入により抵抗低減の生じた $R_\theta=1300$ ($W_r^+=35$) において、壁近傍におけるレイノルズせん断応力 $-\overline{uv}/U_1^2$ 値が減少し、壁面方向に向かう運動量流束が抑制されたことを明かに示している。一方、縦リブ挿入により抵抗低減の生じなかった条件 $R_\theta=5000$ ($W_r^+=120$) において、 $-\overline{uv}/U_1^2$ 値の減少はみられない。なお、 $R_\theta=1300$ ($W_r^+=35$) における壁領域において $-\overline{uv}/u_\tau^2 \approx 1$ となる領域が存在していた。そのことは、縦リブの挿入により抵抗低減の生じた流れ場においても対数速度分布成立の妥当性を支持する一定応力層を仮定が適用可能であることを意味している。

3.3 ストリーク構造の可視化

滑面流において乱れ生成機構と密接に関連することが

Fig.8 Streaks over the d-type rough surface at $R_\theta=1300$.

Fig.9 Probability density distribution of spanwise spacing of the streaks and its modification due to the longitudinal ribs.

示唆されているストリーク構造の可視化を行った。図8は $R_\theta=1300$ ($W_r^+=35$) のd形粗面上における上方から撮影した写真である。トレーサーには灯油による煙を用い、これを溝底部に設けたスリットからスパン方向に一樣に放出した。この際の放出流量は境界層中における流量の1/10,000以下であった。滑面上においてみられる縞模様がd形粗面上においてもみられる。このことはd形粗面上における乱れ生成機構が滑面流と類似の構造をもつことを示唆しており、d形粗面流が擬滑面流と呼ばれることを説明する証拠でもある。図9は、およそ360個の標本から求めたストリーク構造のスパン方向間隔 λ_z の粘性長さに対する比 $\lambda_z^+ \equiv \lambda_z u_\tau / \nu$ の確率密度分布図である。 λ_z^+ は50~150の範囲に分布している。縦リブ挿入により比較的小さい間隔の事象の発生頻度が減少したため、その平均値は $\lambda_z^+ \approx 98$ から100へと増加した。また、標準偏差の値は縦リブ挿入により29.5から24.5へと減少している。ストリーク構造は図1で示した縦渦構造の中央において、溝内部の流体塊を境界層内に吸引することにより発生すると考えられる。また、これら縦渦構造が x - z 平面内に密に存在しないため、 λ_z が直接に縦渦構造の横断面寸法を与えるとは考えがたい。一方、抵抗低減により縦渦構造およびそれに関連する高せん断層の強度が弱まり、バースティングの発生周波数が減少することが予想される。それにとともに、比較的小さいスパン方向間隔 ($\lambda_z^+ \approx 50$ 付近) のストリーク構造の発生が減少し、結果として λ_z^+ の平均値が増加したと考えることができる。

4. 結論

- 1) 直接測定による壁面せん断応力測定により、縦リブによるd形粗面境界層の抵抗低減に有効であることが示された。最大低減率は、d形粗面流に対し10%、滑面流に対し3%であった。
- 2) 抵抗低減によらず滑面流のものと同じ傾き (カルマン定数 $\kappa=0.41$) の対数直線部は存在するものの、切片の値は異なる。
- 3) 乱れ強さおよびレイノルズせん断応力の値は、抵抗低減の生じた条件の内層において減少した。
- 4) 抵抗低減率および乱れ強さ分布の解析から、仮定した縦渦構造による運動量輸送および乱れ生成機構の妥当性が示された。

文献

- 1) Walsh, M.J., Riblets: Viscous Drag Reduction in Boundary Layer (ed. Bushnell, D.M. & Hefner, J.N.), 1990, pp.203-262.
- 2) 大坂英雄, 望月信介, 低レイノルズ数におけるd形粗面乱流境界層の縦渦構造: 日本機械学会論文集B編, 58-486 (1987), pp.371-379.
- 3) 望月信介, 大坂英雄, 壁面せん断応力の直接測定: 機械の研究, 養聖堂, 45(1993), pp.66-72.
- 4) 中村育雄, 大坂英雄, 工科系流体力学: 共立出版, (1985).
- 5) Monin, A.S., Yaglom, A.M., Statistical Fluid Mechanics: The MIT Press, (1987), pp.284-295.
- 6) Purtell, L.P. et al., Turbulent boundary layer at low Reynolds number: Phys. Fluids, 24(1981), pp.802-811.