

# リブレットの溝における流れ特性の実験的研究

眞嶋隆行<sup>\*1</sup>, 円能寺久行<sup>\*2</sup>, 飯島敏雄<sup>\*2</sup>

## Experimental Study of the Flow Characteristics in the Grooves of Riblet

by

Takayuki MAJIMA, Hisayuki ENNOJI and Toshio IJIMA

(Received on Sep. 28, 2001, accepted on Dec. 19, 2001)

### Abstract

The flow characteristic on the riblet surface was studied experimentally by using riblet that has a comparatively big grooves, to investigate the mechanism of the friction drag reduction. Three Reynolds numbers equivalent to the reduction, without reduction, increase of the friction drag resistance by riblet were selected as the experimental condition. In those Reynolds number, the distribution of the velocity and turbulence intensity of the air flow were measured by the hot-wire anemometer on the surface including the inside of the grooves of riblet. As a result, it was found that the stagnation region of the flow exists within the grooves of riblet in the low Reynolds number with friction drag reduction and high velocity flow in the upper part slips the surface of the fluid in the stagnation region. This is considered as the mechanism of friction drag reduction. However, in a high Reynolds number it was shown that the stagnation region becomes narrow and the direct contact part between the flow and surface of riblet increase.

**Keywords:** Riblet, Groove, Air Flow, Flow Characteristic, Friction Drag Reduction, Mechanism

## 1. まえがき

近年、自動車、航空機、船舶などの表面や管路の内壁に生じる流体摩擦抵抗を軽減させる実用的な方法の一つとしてリブレットが注目されている。リブレットは流れ方向に規則正しく並べられた三角形や矩形の微小な溝群である。これを流体と接する壁面に直接加工したり、加工された被膜を張り付けることによって流体摩擦抵抗が滑面の場合より軽減されることはすでに実証されている<sup>1)</sup>。しかし、流れ場によっては逆効果の場合もあり、摩擦抵抗軽減のメカニズムおよび種々の流れ場に対して最適な溝の形状や寸法などは確立されていない。

リブレットに関するこれまでの研究では、摩擦抵抗の直接測定、リブレット表面における流れの測定や数値解析などの結果が数多く報告されている<sup>1)-5)</sup>。たとえば、Walsh<sup>1)</sup>はリブレットの溝の形状や寸法を種々変えて摩擦抵抗を測定し、抵抗軽減効果の見られる領域を摩擦速度と溝の深さおよび幅に基づくレイノルズ数で示している。Vukoslavcevicら<sup>2)</sup>は三角形の溝の大きなリブレットを用いてリブの頂点と溝の底を通る2断面上でシングルセンサー熱線プローブによる速度と乱れ強さの測定を行っている。Choiら<sup>3)</sup>は三角形溝をもつリブレット板のまわりの流れを乱流と仮定して数値解析し、リブ頂点の両側には縦渦が対称に生じることを示している。また、Park<sup>4)</sup>はChoi

らの主に速度変動に対する計算結果と比較するためリブレットの溝における流れを4センサー熱線プローブで測定している。

本研究では三角形溝をもつリブレットの摩擦抵抗が滑面板の摩擦抵抗に比べて軽減する場合、同一の場合および増大する場合の各レイノルズ数においてリブレットの溝における速度や乱れの測定を行い、流れの特性を明らかにするとともにリブレットによる摩擦抵抗減少のメカニズムについて考察したので報告する。

## 2. 実験装置および実験方法

Fig.1に本実験で使用する開放型低速風洞を示す。測定部は縦200mm、横160mm、全長1700mmの亚克力製矩形ダクト

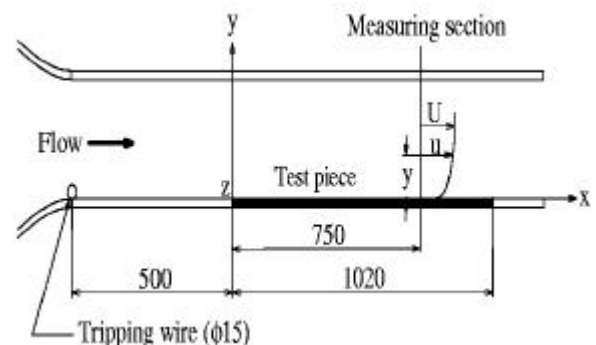


Fig.1 Experimental apparatus

\*1 バブコック日立(株)

\*2 工学部動力機械工学科教授

Table1 Experimental conditions

	$h^+$	$S^+$	U m/s
Run1	15	30	1.00
Run2	25	50	1.69
Run3	35	70	2.47

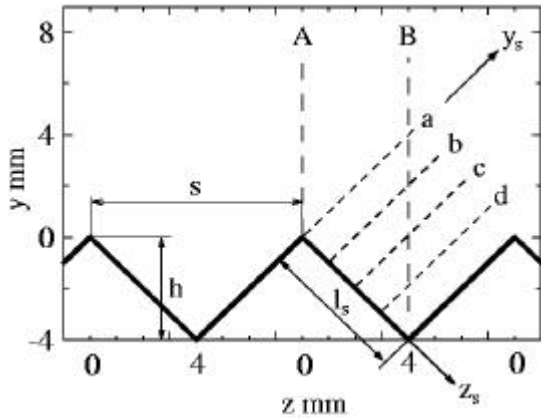


Fig.2 Measuring sections

であり、試験片はノズル出口から 500mm 下流に取り付ける。ノズル出口には測定部で十分発達した乱流境界層となるようにトリッピングワイヤ（直径 15mm）が設置されている。主流速度  $U$  は 1~6m/s の範囲で変化させることができ、その乱れ強さは約 2% である。試験片は幅 160mm、長さ 1020mm の滑面板およびそれと同寸法の平板に Fig. 2 に示すような深さ  $h=4\text{mm}$ 、幅  $s=8\text{mm}$  の直角三角形の溝群を 15 本加工したリブレット板である。

実験条件は Table 1 の通りとする。Run1, Run2 および Run3 は Walsh によって示された摩擦抵抗とレイノルズ数 ( $h^+, s^+$ ) の関係のグラフにおいて、それぞれリブレットの摩擦抵抗が滑面より減少する場合、滑面と同じになる場合、滑面より増大する場合の条件である。ここで、 $h^+ = u^+ h / \nu$ 、 $s^+ = u^+ s / \nu$  であり、 $u^+$  は摩擦速度、 $\nu$  は動粘性係数である。主流速度  $U$  はその関数として与えられた摩擦速度  $u^+$  の式と上記の  $h^+$  および  $s^+$  の式を用いて求めると表中の値となる。

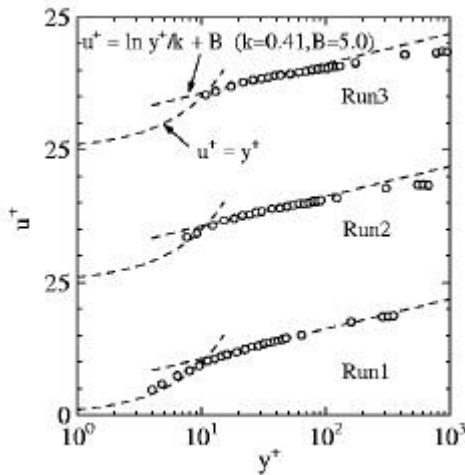


Fig.3 Velocity distribution on the smooth wall

速度分布 ( $u, v, w$  成分) の測定は滑面板およびリブレット板とも試験片の先端から  $x=750\text{mm}$  下流の中央で行い、リブレット板の場合には Fig. 2 に示すような垂直断面 A, B およびリブ斜面に直角な 4 つの等間隔断面 a~d において行う。測定器には定温度型熱線流速計（日本カノマックス製, IHW-100）を用い、センサーとして垂直断面 A, B では速度成分  $u, v$  の測定に上流形 X プロブ、 $u, w$  の測定にクロスフロー形 X プロブ、またリブ斜面の断面 a~d や滑面板の壁面近傍では I 形プロブを使用する。速度データのサンプリング周波数および取得時間は予備実験の結果に基づいてそれぞれ 1kHz, 90 s とする。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 滑面板における対数速度分布

Fig.3 は滑面板の表面で I 形プロブを用いて測定された平均速度  $u$  を対数速度分布で示したものである。ここで、 $u^+ = u / u^*$ 、 $y^+ = y u^* / \nu$  であり、摩擦速度  $u^*$  はクラウザー線図 ( $u^+ / U - \ln(Uy^+ / \nu)$ ) 上で直線となる部分の  $u^+$  と  $y^+$  を対数則に代入し、Newton 法により繰り返し計算して求めた。その結果、Run1 ~ Run3 における摩擦速度  $u^*$  はそれぞれ 0.051, 0.092, 0.13 m/s となった。これらの  $u^*$  を用いて表わした対数速度分布は Fig.3 のようにいずれの条件においても対数則および線形則によく従っており、測定断面における境界層は乱流境界層であることを確認できる。

#### 3.2 垂直断面 A, B における平均速度分布と乱れ強さ分布

##### 3.2.1 平均速度分布

Fig.4 はリブレットの頂点および谷を通る垂直断面 A, B における平均速度分布を滑面板における平均速度分布と比較したものである。図中の破線は断面 B における速度分布（印）をシフトして原点を滑面板における速度分布の原点とそろえ、固体壁面から同一距離における分布として比較したものである。

Run1 の場合、断面 A における速度分布はリブレット頂点付近 ( $y/h = 0 \sim 0.3$ ) で滑面における速度より大きくなっている。これは壁面がリブレットの頂点であるため流体と壁面との接触面積が狭く、壁面摩擦が小さいためと考えられる。一方、断面 B における速度分布は  $y/h = -0.3$  付近で変曲点を示し、それより下方では極端に小さくなっており、流れが停滞していることを示している。これは三角溝の底の部分では流路が狭く、

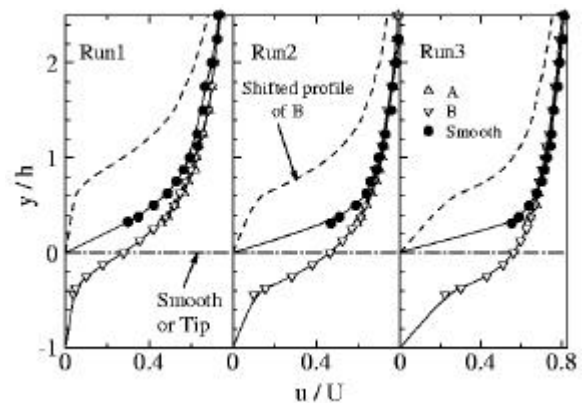


Fig.4 Mean velocity profiles(u)

流れが左右両斜面から摩擦抵抗を受けるためと考えられる。従

って、この変曲点より上部の高速流れは固体壁と接触することなく、溝の中に溜まった流体の表面を変曲点で滑るため、この部分では壁面摩擦が滑面板の場合より小さいものと考えられる。さらに、この断面Bの速度分布を破線のようにシフトして比較すると、リプレットの壁面近傍における速度および速度勾配は滑面のものより非常に小さいことが明白である。このようなリプレットによる影響は上方の流れに及び、断面A、Bにおける速度が  $y/h = 2.5$  まで滑面における速度より大きくなっている。

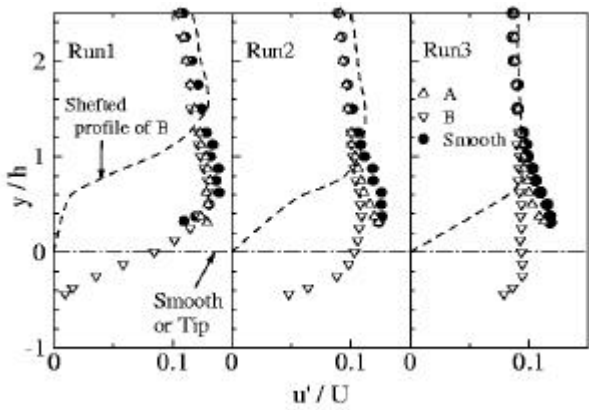


Fig.5 Turbulent intensity profiles( $u'$ )

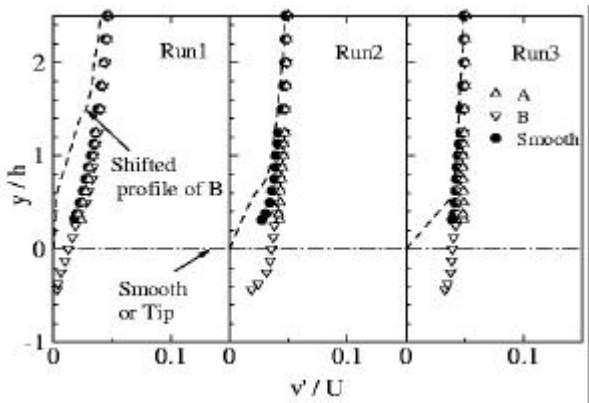


Fig.6 Turbulent intensity profiles( $v'$ )

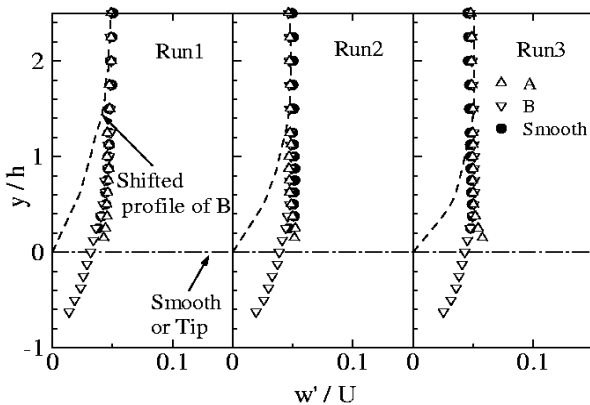


Fig.7 Turbulent intensity profiles( $w'$ )

Run1, Run2 のようにレイノルズ数が大きくなると断面Aのリプレット頂点付近における速度はレイノルズ数とともに増大している。また断面Bにおける速度分布はセンサー部の大きいX形熱線プローブによる測定であるため溝の底までは測定されていないが、 $y/h = 0.4 \sim 0.5$  で変曲点を示し、それより下方では急速に減少していると推測される。しかし、変曲点の部分の速度はレイノルズ数とともに大きくなり、流れの停滞領域も狭くなっていると考えられる。また、断面Bの速度分布をシフトした破線と滑面における速度分布との比較から、レイノルズ数が大きくなるとともに溝の中でも速度および速度勾配が増大していることがわかる。

### 3.2.2 乱れ強さ分布

Fig.5に垂直断面A、Bにおけるx方向の乱れ強さ( $u'/U$ )の分布を示す。ここで  $u'$  は rms 値である。図中の破線は断面Bにおける乱れ強さ分布(印)を原点が滑面と一致するようにシフトして滑面における乱れ強さ分布(印)と比較したものである。Run1の場合、断面Aにおける乱れ強さ分布はリプレットの頂点近傍( $y/h = 0 \sim 0.5$ )で滑面のものより大きくなっている。また、断面Bの乱れ強さ分布は速度分布(Fig.4)と同様に、 $y/h = -0.4$  に変曲点のある分布を示し、それ以下ではほぼ零になっており、やはりここでは流れが停滞していることを示している。さらに図中の破線より、溝内の乱れ強さは滑面における乱れ強さに比べて非常に小さいことがわかる。断面A、Bにおける乱れ強さ分布は  $y/h = 0.45$  以上で滑面の場合より小さくなっており、リプレットが境界層における乱れ運動に影響を与えていることを示している。Run2, Run3のようにレイノルズ数が大きくなると、断面Aの頂点近傍における乱れ強さは滑面における乱れ強さよりさらに増大する傾向を示している。一方、断面Bの乱れ強さ分布はレイノルズ数が大きくなるほど溝のより深い位置まで大きな値を示し、 $y/h = -0.5$  以下で変曲点となる傾向を示している。さらに図中の破線より、溝内の乱れ強さは滑面の乱れ強さに比べると非常に小さいが、レイノルズ数とともに壁面の近くまで増大していることがわかる。また、断面A、Bにおける乱れ強さ分布はRun2, Run3の場合それぞれ  $y/h = 1.4$  および  $1.2$  以下で滑面板における乱れ強さより小さくなっており、リプレットが境界層の乱れ運動に与える影響はレイノルズ数とともに壁面から近い範囲に留まっている。

次に、Fig.6, Fig.7は垂直断面A、Bにおけるy方向およびz方向の乱れ強さ  $v'/U, w'/U$  の分布を示したものである。いずれの実験条件においても両成分の大きさは、 $u'$  成分(Fig.5)の  $1/2$  程度であることがわかる。また、断面Aにおける  $v', w'$  の分布はいずれの実験条件においても上方から  $y/h = 0.4$  まで滑面の分布とほぼ等しくなっているが、リプレット頂点付近( $y/h = 0 \sim 0.3$ )では滑面の分布より大きくなる傾向を示している。これはChoiら<sup>3)</sup>の乱流解析結果で示されているように、頂点の両側に縦渦が生じているためと考えられる。一方、断面Bの  $v', w'$  成分の分布はいずれの実験条件においても  $y/h = 0.5$  付近で変曲点となる傾向を示しているが、やはりレイノルズ数が大きくなるとともに溝のより深い位置まで乱れが増大している。また図中の破線と比較すると溝内の乱れ強さは滑面の場合よりかなり小さいことがわかる。

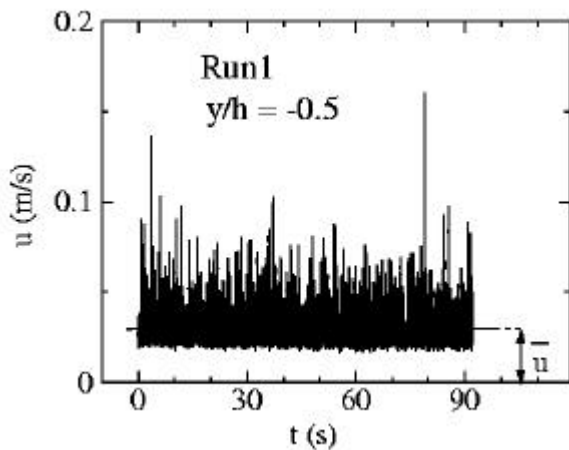


Fig.8 Velocity(u) in the riblet groove

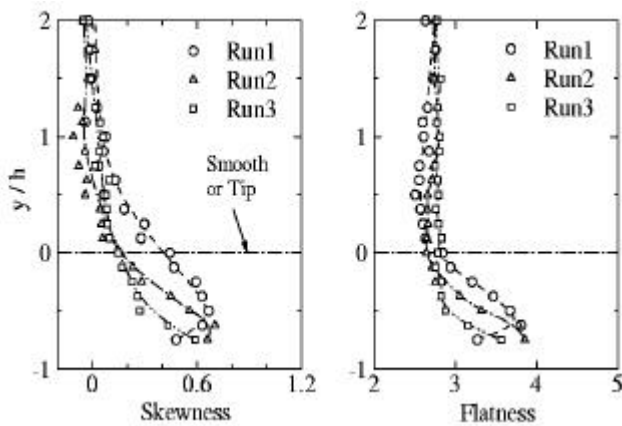


Fig.9 Skewness and flatness of the velocity(u)

### 3.2.3 断面Bにおける局所速度の歪み度と扁平度

Fig.8 はリプレットの溝内における速度変動の一例として、Run1 の条件で断面Bの  $y/h = -0.5$  の点で測定した速度  $u$  の生データを示したものである。ここで、縦軸は瞬間速度  $u$ 、横軸はサンプル時間  $t$  である。同図によると、瞬間速度は平均速度  $u$  と同程度の大きさの速度が大部分を占め、間欠的に非常に大きな速度が現れている。従って、この溝内部の点では層流状態の流れに上方の高速流体から間欠的にエネルギーが供給されていることがわかる。

Fig.9 は、このような瞬間速度分布から求めた断面B上の各点における速度  $u$  の歪み度および扁平度の分布を示したものである。Run1における両分布は  $y/h = -0.5$  付近でピークを示し、その点より下方では急速に小さくなる傾向を示している。このピーク点における速度変動は Fig.8 に示した通りであり、この付近では上方の流れからエネルギーが補給され、運動量の交換が間欠的に行われていることを確認できる。また、このピーク点より下方の領域では歪み度および扁平度が小さくなっていることから、この領域では上方の流れから補給されるエネルギーが少なく、流れは層流状態に保たれていると考えられる。しかし、Run2 や Run3 のようにレイノルズ数が大きい場合には歪み度や扁平度のピーク点は下方へ移動し、流れが層流状態に保たれる領域は狭くなっているものと考えられる。

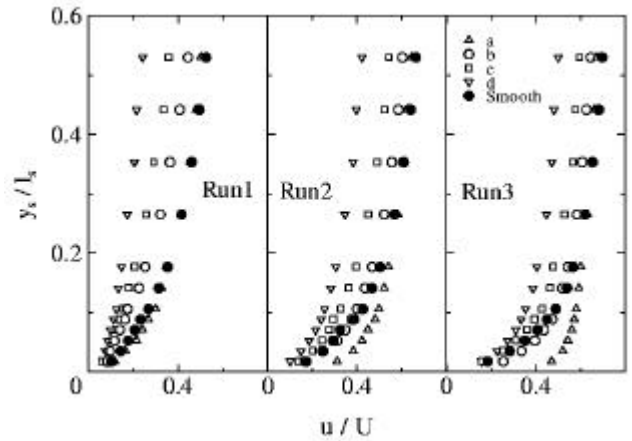


Fig.10 Velocity profiles(u) on the riblet surface

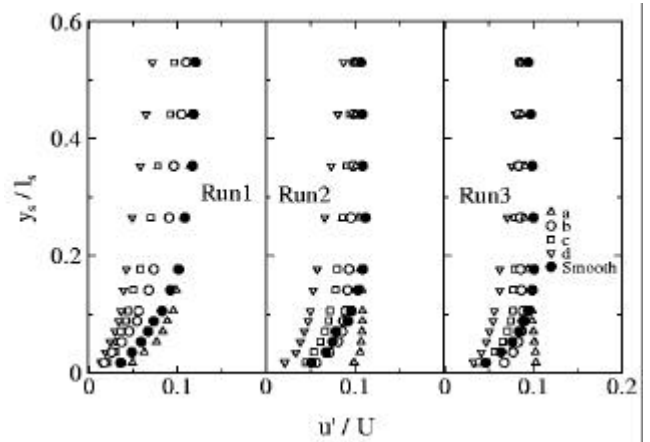


Fig.11 Turbulent intensity profiles(u') on the riblet surface

## 3.3 断面 a ~ b における平均速度分布と乱れ強さ分布

### 3.3.1 平均速度分布

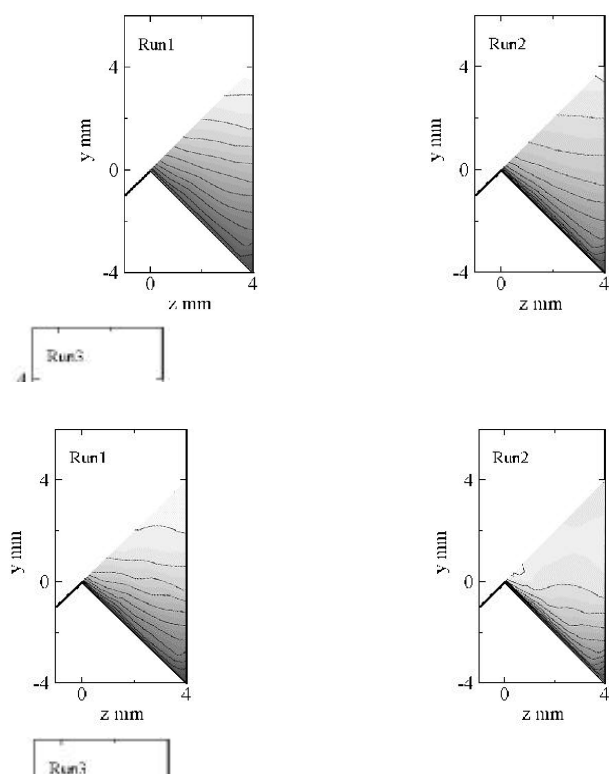
Fig.10 はリブ斜面上における速度勾配すなわち壁面せん断応力の評価を行うために、リブ斜面に直角な断面 (a ~ d) において測定した平均速度分布を示す。縦軸は Fig.2 に示したリブ斜面長さ  $l_s$  で、また横軸は主流速度  $U$  で無次元化されている。

Run1 の場合断面 a における速度勾配は滑面板における速度勾配とほぼ等しいが、これより溝の底に近い断面 (b ~ d) ほど速度勾配は小さくなっている。これより、リブ斜面上での局所せん断応力はリブ頂点から斜面長さの  $1/4$  までは滑面板のものと同様等しいが、それ以下の斜面では溝の底に近い断面ほど小さくなり、斜面の大部分において滑面板のせん断応力より小さいと考えられる。従って表面積はリプレットの方が滑面より広いにもかかわらず、局所せん断応力を積分して求められる摩擦抗力はリプレットの方が滑面板より小さいことになる。

一方、Run2 および Run3 のようにレイノルズ数が大きくなると速度勾配が滑面の場合より大きくなる断面は Run2 では b、Run3 では c というふうに溝の底の方へ広がっている。従って、レイノルズ数が大きい場合には摩擦抵抗が滑面の場合より増大するものと考えられる。

### 3.3.2 乱れ強さ分布

Fig.11 はリブ斜面に直角な断面上の乱れ強さ分布を示す。Run1 の場合、リプレット頂点を通る断面 a 上の乱れ強さは滑



面における乱れ強さより大きくなっているが、それより下方の断面では溝の底に近い断面ほど滑面における乱れ強さより小さくなっている。しかし、Run2 および Run3 のようにレイノルズ数が大きくなるとともにリブレットにおける乱れ強さは断面 a で著しく増大し、溝の底に近い断面まで滑面における乱れ強さより大きくなっている。

### 3.3.3 平均速度と乱れ強さの等高線分布

リブレット溝内の流動をより明瞭にするため Fig.10 および Fig.11 のデータを用いて x 方向の平均速度  $u$  および乱れ強さ  $u'$  を等高線で示したものがそれぞれ Fig.12 および Fig.13 である。ここで、色の薄い部分は大きな値、色の濃い部分は小さな値を示すので、色の濃い部分では流体が停滞または溜まっていると見ることができる。Run1 では平均速度および乱れ強さの小さい領域が非常に広いこと、またレイノルズ数が大きくなると平均速度や乱れ強さの小さい領域は狭くなり、溝の下方まで速度や乱れの大きい部分が広がっていることがわかる。

### 3.4 摩擦係数軽減のメカニズムについての一考察

以上の結果より、三角形断面のリブレットによる摩擦抵抗軽減のメカニズムについて考える。摩擦係数が軽減するレイノルズ数においては速度や乱れが滑面の場合より大きくなる領域はリブレットの頂点近傍のみであり、流れが溝の中に停滞する領域が広く存在することがわかった。Fig.12 および Fig.13 の Run1 における速度や乱れ強さの等高線分布において色の濃い部分は

その停滞領域を明瞭に示している。停滞領域より上部の高速流れが固体壁と直接接触する部分はリブ頂点付近のみであり、大部分は溝の中に停滞または溜まっている流体の表面を滑っていると考えられる。従って、リブレットの摩擦抵抗は滑面のものより小さいと考えられ、これがリブレットによる摩擦抵抗軽減のメカニズムと提案したい。

## 4. まとめ

レイノルズ数 ( $h^+$ ,  $s^+$ ) を変えながら直角三角形の断面を持つリブレットの溝内における流れ特性を実験的に調べた結果、次のような結論が得られた。

(1) 摩擦抵抗軽減効果がある場合のレイノルズ数における流れはリブレットの頂点近傍で速度や乱れ強さが滑面のものより大きい、溝深さの約 1/2 以下では変曲点を示して急速に減少し、流れが停滞していることを示す。しかし、レイノルズ数の増大とともに溝のより深い位置まで速度や乱れが増大し、停滞領域は狭くなる。また、リブレット頂点近傍ではいずれのレイノルズ数においても乱れの主流方向およびスパン方向成分が滑面の場合より大きい。

(2) 摩擦抵抗軽減効果がある場合のレイノルズ数において、リブレットが乱流境界層に影響を与える領域は溝深さの 2.5 倍であり、レイノルズ数が大きくなるとともにその領域は狭くなる。

(3) 摩擦抵抗軽減効果のあるレイノルズ数では、リブ斜面に沿う速度および乱れ強さはリブ頂点から斜面長さの 1/4 まで滑面の場合より大きい、それ以下の断面では小さい。しかし、レイノルズ数が大きくなるとともに速度や乱れ強さは溝のより深い位置まで増大する。

(4) リブレットによる摩擦抵抗軽減のメカニズムとして、リブレットまわりの高速流れが固体壁と直接接触する部分は少なく、大部分は溝の中に停滞している流体の表面を滑っていることが考えられる。

## 参考文献

- 1) Walsh, M. J., "Drag Characteristics of V-Groove and Transverse Curvature Riblets", AIAA, 72(1980), 168-184.
- 2) Vukoslavcevic, P., Wallace, J.M. and Balint, J.I., "Viscous Drag Reduction Using Streamwise-Aligned Riblets", AIAA J., 30-4(1992), 1119-1122.
- 3) Choi, H., Moin, P. and Kim, J., "Direct numerical simulation of turbulent flow over riblets", J. Fluid Mech., 255(1993), 503-539.
- 4) Park, S.R., "Flow Alteration and Drag Reduction by Riblets in a Turbulent Boundary Layer", AIAA Journal, 32-1(1994), 31-38.
- 5) 小栗英美・小濱泰昭, "微小な表面分布構造を用いた流体抵抗の軽減", 機論, 62-597, B(1996), 76-83.