

# 乱流空気中におけるリブレット板の抗力と流動特性の測定

石川紀彦\*<sup>1</sup>, 円能寺久行\*<sup>2</sup>, 飯島敏雄\*<sup>2</sup>

## Measurement of Drag and Flow Characteristics on Riblet Plate in Turbulent Airflow

by

Norihiko ISHIKAWA, Hisayuki ENNOJI and Toshio IJIMA

(Received on Sep. 30, 2002, accepted on Nov.25, 2002)

### Abstract

Measurements of the drag, streamwise velocity, turbulent intensity and Reynolds stress on a smooth plate and two kinds of riblet plates have been made in turbulent airflow. The riblet grooves were selected to form a triangle of depth 0.25mm and 0.125mm, and base length 0.5mm and 0.25mm. The Reynolds number of the airflow was changed in the range of  $7.68 \times 10^5 \sim 2.23 \times 10^6$ . The riblets yield 4.5% and 9.9% drag reduction compared to a smooth surface plate. The averaged streamwise velocity, turbulent intensity and the Reynolds stress over the riblet surface were shown to be smaller than those over the smooth surface plate. As a result, it was found that the turbulent energy on the riblet surface is controlled by the riblets.

**Keywords:** Riblet, Flat Plate, Drag Reduction, Flow Characteristic, Turbulent Airflow

### 1. 緒 論

表面摩擦抵抗軽減法は流動を伴う輸送機械、産業機器などの燃費や効率向上を図るための重要な課題である。そのため従来から種々の表面摩擦抵抗軽減法が提案されてきたが、その中の一つとしてリブレットによる方法がある。リブレットは物体表面上の流れ方向に微少な溝群をもつ表面分布構造であり、1970年代後半にNASAによって提案された実用的な表面摩擦抵抗軽減法である。

乱流状態において表面摩擦抵抗を軽減させるためには、壁面近傍の乱流組織構造により供給される乱流エネルギーの生成を抑制することが重要とされている。一般の壁面近傍では低速流塊を後方から大きな速度の流体が押し上げ(イジェクション)、それを高速の流れが運び去ること(スウィープ)によりバースト現象が発生し、レイノルズ応力を生成している。これに対してリブレットは低速流塊を溝の中に滞留させ、レイノルズ応力の生成と関連の深いイジェクションを減少させるため乱流エネルギーの生成を抑制し、摩擦抵抗を軽減させると考えられている。

リブレットに関する研究は、種々の形状について抗力の直接測定を行ったもの<sup>1)</sup>、数値解析により流動特性を調べたもの<sup>2)</sup>、壁面噴流における抵抗減少の評価を行ったもの<sup>3)</sup>、摩擦抵抗軽減のメカニズムについて考察したもの<sup>3)</sup>、<sup>4)</sup>などがある。しかし、溝の形状、寸法には種々考えられ、またリブレット表面上における摩擦抵抗や流れ場の測定が難しく、要求される流れ場に最適な溝の形状、寸法および摩擦抵抗減少のメカニズムなどが確立されたとは言えず、リブレットはいまだ実用の域に達していない。

本研究ではこれまでの研究によって摩擦抵抗軽減効果があるといわれている頂点の鋭い三角形断面の溝を有するリブレット板の抗力を直接測定し、軽減効果を確認するとともに、リブレット表面における平均速度および変動速度などを測定し、滑面平板のそれらと比較することにより、摩擦抵抗軽減効果がある場合の流動特性について調べる。

### 2. 実験装置および実験方法

#### 2.1 リブレットモデル

本実験で使用したリブレットモデルは Fig.1 に示すような三角形の溝群をもち、その具体的な寸法は Table 1 に示された 2

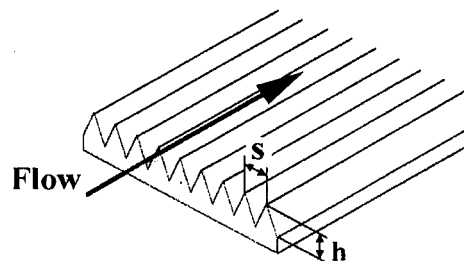


Fig.1 Riblet model

Table 1 Riblet configurations

Model	h (mm)	s (mm)	h / s
Riblet 1	0.25	0.5	0.5
Riblet 2	0.125	0.25	0.5

\* 1 日本電気航空宇宙システム(株)  
\* 2 工学部動力機械工学科教授

種類である。hはリブレットの溝の深さであり、sは溝の幅である。これら2種類のリブレットを長さ500mm、幅196mm、板厚10mmの亚克力樹脂板にNCフライス盤で加工した。

次に、本実験において使用した実験装置をFig.2に示す。風洞内のリブレット板は、上記のように加工されたものを4枚連結して全長 $L=1160\text{mm}$ 、測定面の長さ $L_p=1000\text{mm}$ 、幅 $b=196\text{mm}$ 、厚さ $t=20\text{mm}$ としたものであり、上下の風洞壁との間隙を2mmに保って、4本のステンレスワイヤーによって吊り下げられている。滑面板もリブレット板と全く同一寸法であり、同様に設置する。供試平板の前縁は流れの剥離を防ぐとともに、圧力抗力を小さくするために8:1の楕円形状とし、後縁は後流渦の発生を抑えるため三角形のシャープエッジとしている。それらの前縁部および後縁部は脱着可能であり、圧力抵抗を一定にするため滑面板およびリブレット板に共通に使用される。実験中、両平板の表面における境界層を乱流にするため滑面およびリブレット面の先端には直径1.5mmのトリッピングワイヤが取り付けられている。また、試験平板の流れによる横揺れを防ぐため、風洞壁の上下3箇所小さなローラーを取り付け、試験平板の両側面を微小な間隙を保って支持するようになっている。

滑面板およびリブレット板に作用する抗力は風洞下部に取り付けられたロードセル(測定範囲0~9.8N)によって測定する。測定時間は30秒とし、その間の出力をデータレコーダに記録し、得られた出力の平均値から抗力を求める。主流速度 $U$ は10~29m/sの範囲で変化させる。この時のレイノルズ数は供試平板の全長 $L$ を代表長さとして $Re=7.68 \times 10^5 \sim 2.23 \times 10^6$ である。

平均速度および乱れ強さなどの測定は、予め校正用風洞で校正された1形およびX形熱線プローブ(直径 $5\mu\text{m}$ タングステン線)を供試平板の中心線( $z=0$ )に垂直な $x/L_p=0.25, 0.49, 0.75$ の各断面において $y$ 方向にトラバースさせて行う。熱線プローブは定温度形熱線流速計に接続され、その出力はA-D変換器を介してサンプリング周波数1kHzでパーソナルコンピュータに取り込んだ後、各種処理を行う。なお、風洞内の主流の乱れ強さは1.0%と小さい。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 抗力測定

$Re$ 数を変えて測定されたリブレット板の抗力 $D$ と滑面板の抗力 $D_s$ の比をFig.3に示す。リブレット板の抗力は $Re$ 数が小さいほど滑面板に比べて減少しているが、 $Re$ 数が増加すると滑面板より増大する傾向を示している。また、いずれの $Re$ 数においてもリブ溝の小さいリブレット2の方がリブレット1より抗力減少効果が見られる。本実験の範囲で抗力が最も減少するのは両リブレット板とも $Re=7.68 \times 10^5$ の時であり、その時の抗力減少率は、リブレット1では4.5%、リブレット2では9.9%となっている。これらのことより、抗力軽減効果は $Re$ 数とリブ溝の大きさによって異なることがわかる。さらに、これらの結果は $Re$ 数に対して最適ナリブの形状や寸法が存在することを示唆している。

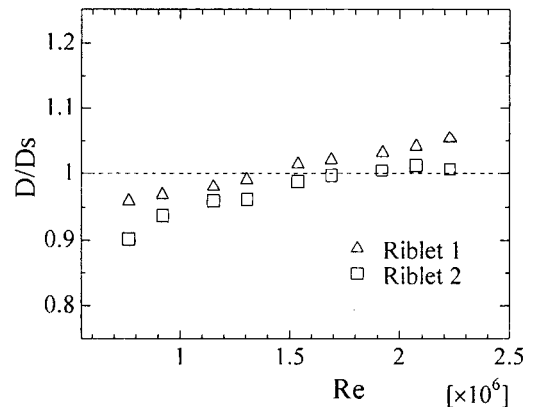


Fig.3 Measured drag of riblets

#### 3.2 平均速度分布

抗力測定の結果、抗力が最も減少した $Re=7.68 \times 10^5$ における平均速度分布をFig.4に示す。ここで、横軸における $H$ はFig.2

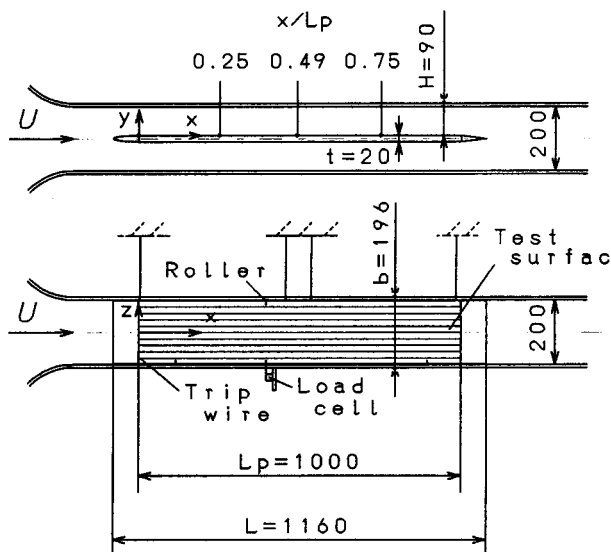


Fig.2 Experimental apparatus

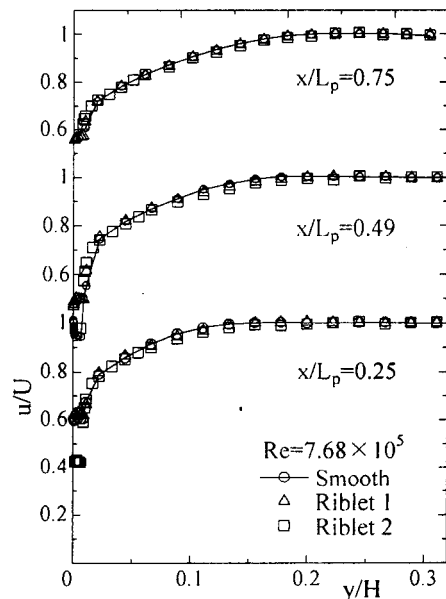
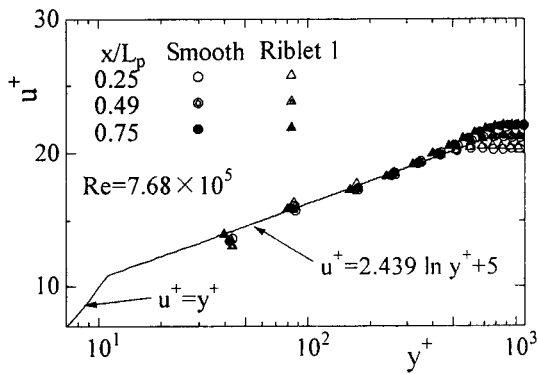


Fig.4 Mean velocity profile

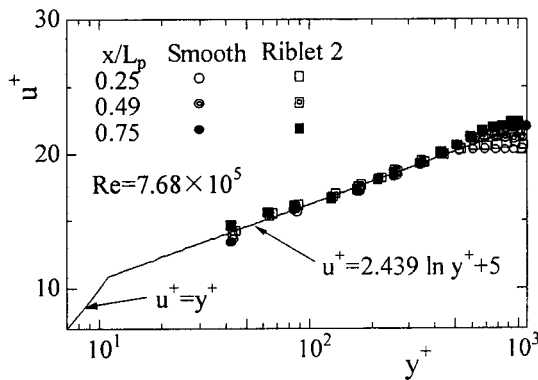
に示すような流路幅である。いずれの  $x/L_p$  断面においても滑面板とリブレット板との平均速度の差は非常に小さいが、 $y/H=0.25$  以下の壁面近傍ではリブレット板における速度の方が滑面板における速度よりやや大きな値を示している。これは、前報<sup>9)</sup>において大きな溝をもつリブレットを用いて行った速度場の測定結果と同様であり、滑面板では流れが固体表面と摩擦するのに対し、リブレット表面では流れが溝の中に滞留している流体の表面を滑るため大きくなるものと考えられる。

3.3 対数速度分布

Fig. 5 は上記の平均速度分布を対数で表したものである。ここで、 $u^+=u/u_\tau$ 、 $y^+=y u_\tau/\nu$  である。摩擦速度  $u_\tau$  は  $u$  の平均



(a) Riblet 1



(b) Riblet 2

Fig. 5 Log-law plot of mean velocity profile

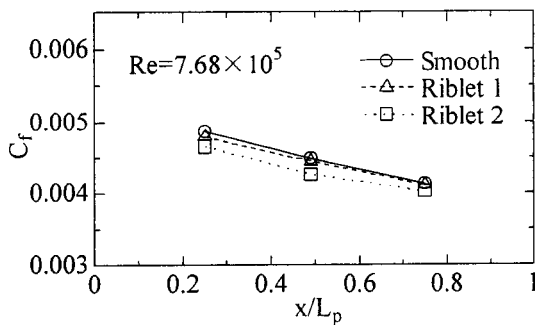


Fig. 6 Local skin friction coefficient

速度分布が対数則に従う ( $u$  が  $\ln y$  に対して直線的に変化する) 領域での  $u$  と  $y$  を  $u^+=2.439 \ln y^++5$  に順次代入して Newton 法により繰り返し計算する方法<sup>3)</sup> により求め、それらの平均値とした。 $\nu$  は空気動粘性係数である。対数速度分布は滑面板およびリブレット板ともに  $40 < y^+ < 500$  の範囲で壁法則が成立していることがわかる。

3.4 摩擦抵抗係数

前述のように、滑面板およびリブレット板ともに平均速度分布に対数則が成り立つ  $y^+$  の領域がわかったので、この範囲における摩擦速度  $u_\tau$  を用いて、 $u_\tau/U=(C_f/2)^{1/2}$  より  $x/L_p$  ごとに局所摩擦係数を求めた結果を Fig. 6 に示す。局所摩擦係数は滑面板およびリブレット板ともに下流側で多少小さくなるが、リブレット 1 およびリブレット 2 の摩擦係数はともに滑面板に比べて減少する傾向を示している。各供試板ごとにこれらの 3 断面における平均値をとって比較すると、リブレット 1 で 1%、リブレット 2 で 4% 滑面板より摩擦係数の減少となる。これらの値は摩擦抗力のみを減少率を表すため、前述の抗力測定結果よりも抗力減少割合は低いものの、速度分布から算出される摩擦抵抗係数からもリブレットによる抗力軽減効果を確認できることがわかる。

3.5 乱れ強さ分布

Fig. 7 はリブレット 1 およびリブレット 2 の  $x/L_p=0.75$  における乱れ強さの流れ方向 ( $x$  方向) 成分  $u'/U$ 、壁面に垂直な方向 ( $y$  方向) の成分  $v'/U$  およびリブレットのスパン方向 ( $z$  方向) の成分  $w'/U$  の分布を示している。この図は代表的に  $x/L_p=0.75$  の断面における乱れ強さを  $y/H=0 \sim 0.3$  の範囲で示したものであるが各供試板間の差が小さくて見にくい。従って、壁面近傍におけるこれらの乱れ強さ分布を拡大して各  $x/L_p$  断面ごとに示したものが Fig. 8 である。いずれの断面においてもリブレット板および滑面板ともに壁面近傍における乱れ強さは  $u'/U$  が最も大きく、 $v'/U$  および  $w'/U$  はほぼ同じ大きさであることがわかる。特に、壁面に近いほど両リブレット板における乱れ強さ  $u'/U$ 、 $v'/U$ 、 $w'/U$  はいずれも滑面板におけるものより減少しているため、これはリブレットによって壁面近傍における乱れが抑制されていると考えられる。またリブレット 2 はリブレット 1 より乱れ強さが小さくなっていることから、乱れの抑制効果が大きく、そのため Fig. 3 や Fig. 6 のように摩擦抗力が減少したものと考えられる。

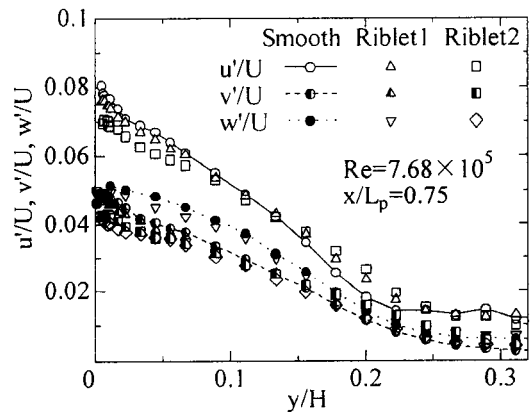
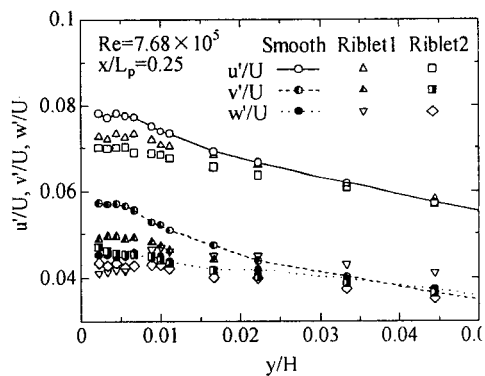
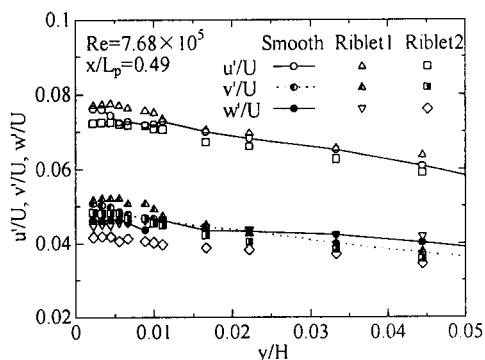


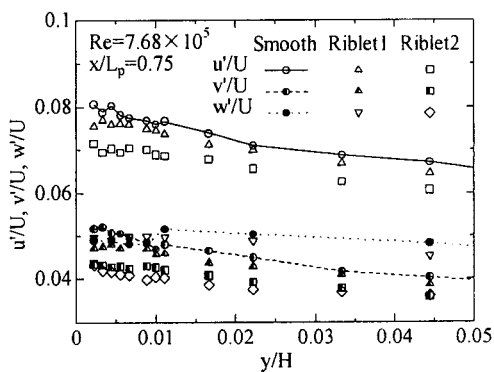
Fig. 7 Turbulent intensity profile ( $x/L_p=0.75$ )



(a)  $x/L_p=0.25$



(b)  $x/L_p=0.49$



(c)  $x/L_p=0.75$

Fig.8 Turbulent intensity profile near wall

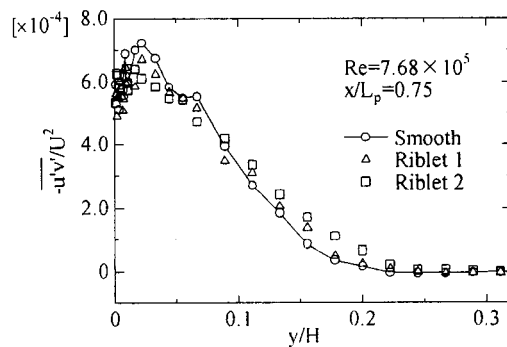
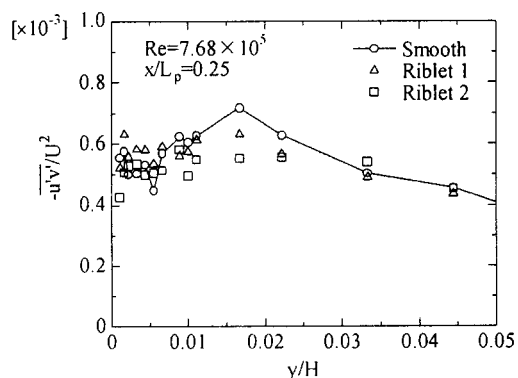
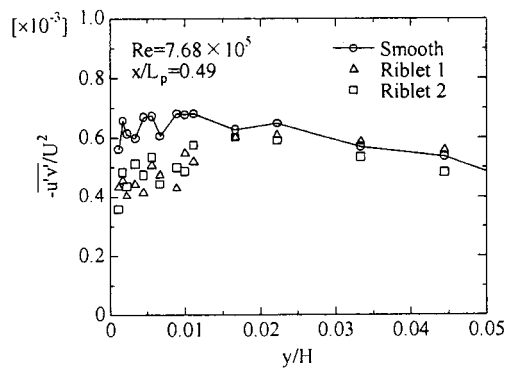


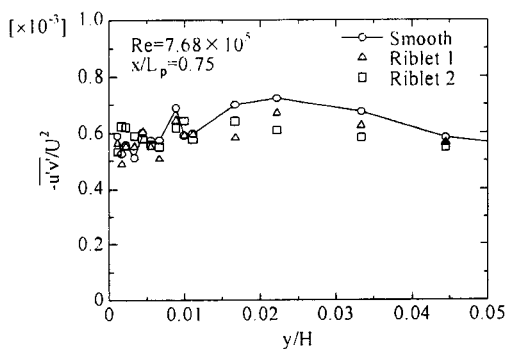
Fig.9 Reynolds stress profile



(a)  $x/L_p=0.25$



(b)  $x/L_p=0.49$



(c)  $x/L_p=0.75$

Fig.10 Reynolds stress profile near wall

### 3.6 レイノルズ応力分布

Fig.9 は代表的に  $x/L_p=0.75$  の断面におけるレイノルズ応力分布を  $y/H=0\sim 0.3$  の範囲で示したものである。両リブレットにおけるレイノルズ応力は  $y/H=0.1$  以下で滑面板における値より小さく、 $y/H=0.1$  以上では滑面板における値より大きくなる傾向を示しているが、壁面近傍ではそれらの傾向が明瞭でない。そこで、各  $x/L_p$  断面の壁面近傍におけるレイノルズ応力 ( $-u'v'$ ) 分布を拡大して示したものが Fig.10 である。各  $x/L_p$  断面におけるレイノルズ応力は  $y/H=0.01$  以上では滑面板、リブレット 1、リブレット 2 の順に小さくなっている。しかし  $y/H=0.01$  以下では、総合的にはリブレットにおけるレイノルズ応力の方が滑面板におけるものより小さくなっているが、大きさの順序は不揃いである。これは、 $y/H=0.01$  の断面が実際には  $y=0.9\text{mm}$  であり、

壁面に非常に接近しているため流れが壁面の粗さの影響を受けたり、熱線プローブのセンサーが壁面の温度の影響を受けたりしたことによる誤差と考えられる。すなわち、壁面の粗さは有限であるため壁面近傍の流れに影響を与え、また壁面の温度は流体の温度より低いので熱線プローブのセンサーを冷却し、特にレイノルズ応力は $u'$ と $v'$ の積であるためそれらの影響を敏感に受けやすい。従って、 $y/H=0.01$ 以下の断面におけるレイノルズ応力分布の大きさの順序は正確とは言えないが、総合的には滑面におけるものよりリブレットにおけるレイノルズ応力の方が小さく、乱流エネルギーが抑制されていることは確かである。

従来の研究においてリブレットにおける抗力と流れ場の関係が確立されていないことの要因は壁面近傍における流れの測定がこのように困難であるためと考えられる。従って、壁面の極近傍における流れの正確な測定法についてさらに究明して行く必要がある。

#### 4. 結 論

リブレットにおける抗力、速度分布、乱れ強さおよびレイノルズ応力分布を測定し、滑面板のそれらと比較した。その結果は次のようにまとめられる。

(1) 抗力の測定により、本実験で使用したリブレット1では4.5%、リブレット2では9.9%の抗力軽減が見られた。

(2) リブレット板の壁面近傍における速度は滑面のそれよりやや小さい。また、リブレット板および滑面板における速度分

布は $50 < y^+ < 500$ の範囲で壁法則が成り立ち、この範囲における速度分布から得られる摩擦抵抗係数からもリブレットの抗力軽減効果を確認できた。

(3) リブレット板の壁面近傍において乱れ強さおよびレイノルズ応力は滑面板のそれらより小さいことがわかった。これはリブレットにより壁面近傍の乱流エネルギーが抑制されていることを表す。

#### 参考文献

- 1) M.J. Walsh: Drag Characteristics of V-Groove and Transverse Curvature Riblets, Progress in Astronautics and Aeronautics, AIAA, 72 (1980), 168.
- 2) H. Choi, P. Moin and J. Kim: Direct numerical simulation of turbulent flow over riblets, J. Fluid Mech., 255(1993), 503.
- 3) 山下新太郎, 林本秀夫, 井上吉弘, 岩上泰弘: リブレット面に沿う壁面噴流に関する実験的研究(平均・変動速度場と抵抗減少の評価), 機論(B編), 60-572(1994), 1145.
- 4) 小栗英美, 小濱泰昭: 微少な表面分布構造を用いた流体抵抗の軽減, 機論(B編), 62-597(1996), 1754.
- 5) 金宰基, 吉識晴夫: 発達チャンネル乱流の乱れ特性について(非加熱定常流の場合), 機講論, No.973-1(1997), 177.
- 6) 眞嶋隆行, 円能寺久行, 飯島敏雄: リブレットの溝における流れ特性の実験的研究, 東海大学紀要(工学部), 41-2(2001), 135.