

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：12605  
研究種目：基盤研究(C)  
研究期間：2012～2014  
課題番号：24560186  
研究課題名(和文)デュアルプレーンステレオPIVを用いた3次元リブレットによる抵抗低減効果の解明

研究課題名(英文)Clarification on Drag-Reduction Effect of 3-Dimensional Riblet with Dual-Plane Stereoscopic PIV

研究代表者  
岩本 薫 (IWAMOTO, Kaoru)  
東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：50408712  
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：革新的な3次元形状を有する微細な溝(リブレット)を考案し、世界最大である約12%の抵抗低減効果を確認した。デュアルプレーンステレオ粒子画像流速計を用いることにより縦渦構造の変化を検知し、抵抗低減メカニズムを詳細に解析した結果、その本質は従来の2次元リブレットと同様であることが分かった。重要な相違点として、壁近傍の縦渦構造に付随する高速流体が下壁面に到達して抵抗を増加させる効果を、本リブレットが効果的に抑制していることが分かった。リブレットの平均スパン方向間隔が縦渦構造の直径以上であり、従来の2次元リブレットの間隔よりも広いことから、リブレットの表面積が減少し、抵抗低減効果の増加につながった。

研究成果の概要(英文)：The drag-reduction effect of an innovative three-dimensional riblet is evaluated, and world's largest drag-reduction rate of 12% is obtained. Vortical structures in wall turbulence over the riblet surface are investigated by means of a dual-plane stereoscopic particle image velocimetry measurement. It is found that the drag-reduction mechanism is similar to those of two-dimensional riblets. A different point is that the present riblet respectively induces a downward and upward flows in the expanded and contracted regions, which prevent vortices from hitting the bottom wall with wider lateral spacing of the riblet. In consequence, the wetted area of the present riblet is smaller than those of two-dimensional riblets, resulting in the high drag-reduction effect.

研究分野：熱流体工学

キーワード：乱流 抵抗低減 PIV 数値シミュレーション リブレット

### 1. 研究開始当初の背景

受動制御による乱流摩擦抵抗低減手法の一つとして、鮫肌を模した微細な溝(リブレット)が1980年代から国内外で数多く研究されている。現在までに、流れ方向に形状が変化しない様々なリブレット形状(2次元リブレット)が考案されており、最大約10%の摩擦抵抗低減率が報告されている。他方、流れ方向に形状が変化する3次元リブレットに関して、鮫肌をより正確に模したものの、一定のリブレット断面形状をスパン方向(流れ方向及び壁垂直方向に垂直な方向)に揺動させたものなどが報告されているが、いずれも2次元リブレットを超える抵抗低減効果は得られていない。これは、形状を規定するパラメータが多数存在し、非線形作用が強い壁乱流場において3次元リブレットの形状最適化が困難なためである。また、過去に報告されているすべてのリブレットによる抵抗低減メカニズムは、壁近傍の縦渦構造のスパン方向への揺動を抑制することである。

本研究代表者は、さらなる抵抗低減効果を有する3次元リブレット形状を考案するためには、従来と異なる抵抗低減メカニズムを有する必要があると考えた。その結果、リブレットの溝間隔を流れ方向に直線的に変化させ、適切な加減速を溝間に誘起することによって再層流化を促進する独自の形状を考案した(図1)。予備実験の結果、約9%の抵抗低減効果を確認した。形状の最適化を実施していないため、本3次元リブレットには2次元リブレットを超える高い抵抗低減効果を有する可能性がある。

しかし、1断面2成分の粒子画像流速測定装置(2成分PIV)を用いた予備計測において、溝間には有意な加減速の現象は確認されず、抵抗低減メカニズムには依然として不明点が多い。本研究では、新たにデュアルプレーン・ステレオPIV(DPS-PIV)と世界最大規模の直接数値計算(DNS)を導入し、本3次元リブレットの抵抗低減メカニズムを明らかにする。さらに、形状を最適化し、2次元リブレットを凌ぐ高い抵抗低減効果を得る。

### 2. 研究の目的

溝間隔が流れ方向に変化する3次元リブレット形状による乱流摩擦抵抗の低減効果を直接数値計算、及び室内実験を用いて解明する。さらに、従来の摩擦抵抗低減メカニズムと対比させ、リブレットによる抵抗低減効果の普遍的知見を得る。

#### (1) 平行平板間乱流の室内実験の実施

3次元リブレットを作製し、平行平板間流路に設置し、抵抗低減効果を評価する。図1のように直線による拡大・縮小の形状だけではなく、流れ方向になめらかな正弦波状に変化させる形状も対象とする。レイノルズ数を変更することで、摩擦長さで無次元化された3次元リブレットの流れ方向長さ、及びスパン

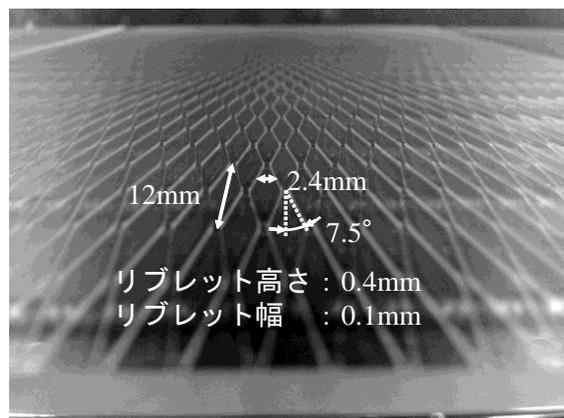


図1：3次元リブレット

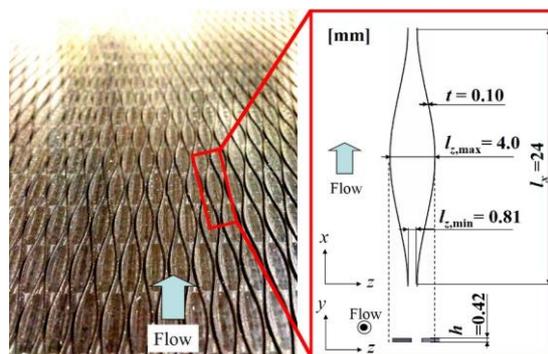


図2：正弦波状リブレット

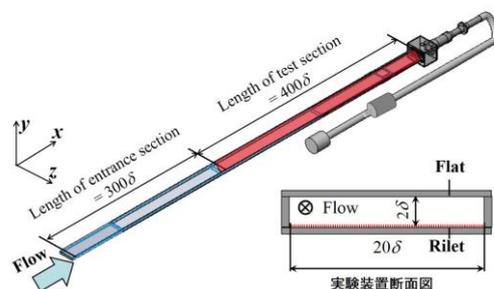


図3：平行平板間流路

ン方向間隔を(相似形を保って)最適化する。最適な条件下で、DPS-PIVを導入することにより、速度3成分の評価、及び壁近傍の縦渦構造の変化を調べ、抵抗低減メカニズムを解明する。

#### (2) 平行平板間乱流のDNSの実施

溝間隔が流れ方向に変化する3次元リブレット形状を有する平行平板間乱流の世界最大規模のDNSをスーパーコンピュータで実施する。リブレット形状を規定するパラメータを最適化する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 平行平板間乱流の室内実験の実施

流れ方向になめらかな正弦波状に変化させる3次元リブレットも作製する(図2)。マシニングセンターを用いた作製方法はすでに確立している。これらを平行平板間流路(図3)に設置し、抵抗低減効果を評価する。

レイノルズ数（本研究の場合は流速）を変更することで、摩擦長さで無次元化された3次元リブレットの流れ方向長さ、及びスパン方向間隔を（相似形を保って）変更することが容易であり、これらの値を最適化する。

最適な条件下での抵抗低減メカニズムを解明するために、DPS-PIV（図4）を導入する。抵抗低減メカニズムには壁近傍の縦渦構造が重要な役割を担っていると考えられる。縦渦構造を検知するためには、変形速度テンソルの9成分すべてを計測する必要がある。変形速度テンソルの第2不変量 $Q$ を計算することによって縦渦構造が検知できる。1面のレーザーシート、及び1台の高速度カメラを用いる2成分PIVでは、1断面内の2成分の速度のみ測定可能である。他方、DPS-PIVでは、近接する2面のレーザーシートを照射し、各シート内で3成分の速度を計測する。よって、速度3成分の3方向の勾配量すべてが計算可能となり、縦渦構造が検知可能となる。

#### (2) 平行平板間乱流のDNSの実施

溝間隔が流れ方向に変化する3次元リブレット形状を有する平行平板間乱流の世界最大規模のDNSをスーパーコンピュータで実施し、抵抗低減効果を最大にする形状を特定する。リブレット形状を再現する計算手法として、境界適合座標系を用いた手法、及び境界埋め込み法が挙げられる。前者は高精度に境界条件を設定できる反面、計算効率が悪く長時間の計算時間を要することから、パラメトリックに形状を変化させる場合には不適合である。後者は、計算効率の良いデカルト座標系の格子に、仮想的に境界を埋め込む方法である。格子の位置に寄らず任意の形状を表現する手法も提案されているなど、複雑な形状をパラメトリックに変更して検証する場合にも適しており、本研究では後者を採用する。

実験と同様に正弦波状リブレットも対象とする。リブレット形状を規定するパラメータは、リブレットの高さ、幅、角度（振幅）、流れ方向の長さ、及びスパン方向の平均間隔の5つであり、計算効率の良い平行平板間乱流のDNSで最適化可能なリブレットの高さ、幅、角度（振幅）の3つを最適化する。

### 4. 研究成果

#### (1) 平行平板間乱流の室内実験の実施

正弦波状リブレットを設置し、差圧と流量を同時計測した結果、最大で約12%の抵抗低減効果を確認した（図5）。この値は、従来の2次元リブレットや直線変化をする3次元リブレット等を凌ぎ、現状で論文として報告されている中では世界最大の抵抗低減効果である。但し、リブレットの間隔が従来のリブレットよりも広い。過去の知見によると、この間隔のサイズを有するリブレットの場合、リブレット間に渦構造が入り込み、抵抗低減効果が減少するはずであり、2次元リブ

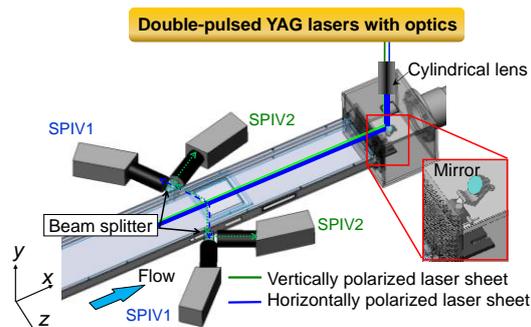


図4：DPS-PIVシステム

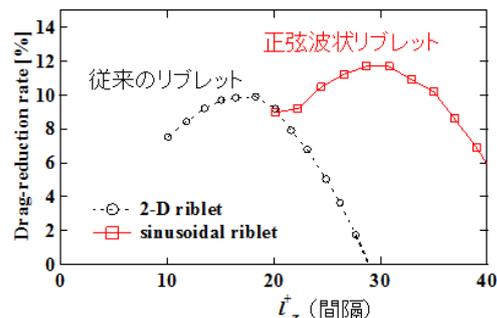


図5：正弦波状リブレットの抵抗低減効果

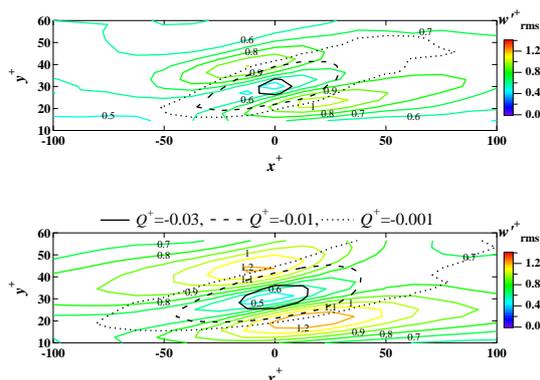


図6： $Q$ 値とスパン方向変動速度強度。上図が平滑面上、下図がリブレット面上。

レットとは異なる抵抗低減メカニズムを持つことが示唆される。

そこで、DPS-PIVを用いて、 $Q$ 値を計測し、渦構造の変化を調べた。その一例として、図6に平滑面側、リブレット面側それぞれにおける渦構造とスパン方向速度 $w$ の変動強度を示す。リブレット面側では平滑面側と比較して規模、旋回強度ともに減少している。二次元リブレットと比較して渦構造を壁面に近づけやすい形状であるが、正弦波状リブレットは渦構造を減衰させる作用を持つために抵抗低減が得られたと考えられる。

また、図は省略するが、本リブレットの抵抗低減メカニズムの本質は従来の2次元リブレットと同様であることが分かった。重要な相違点として、壁近傍の縦渦構造に付随する高速流体が下壁面に到達して抵抗を増加させる効果を、本リブレットが効果的に抑制し

ていることが分かった。リブレットの平均スパン方向間隔が縦渦構造の直径以上であり、従来の2次元リブレットの間隔よりも広いことから、リブレットの表面積が減少し、抵抗低減効果の増加につながった。

## (2) 平行平板間乱流のDNSの実施

直線による拡大・縮小のリブレット形状と、流れ方向になめらかな正弦波状に変化させるリブレット形状(図7)を有する平行平板間乱流のDNSを実施した。正弦波状リブレットのパラメータは振幅 $a^+$ 、波長 $\lambda^+$ 、厚さ $t^+$ 、高さ $h^+$ 、平均間隔 $s^+$ がある。本研究では上述の実験を行った形状をもとに $a^+=14.7$ 、 $\lambda^+=431.6$ 、 $t^+=1.8$ 、 $h^+=7.5$ 、 $s^+=43.2$ をベース形状とし、各パラメータを変化させ計算を行った。また流れ方向を $x$ 軸、壁垂直方向を $y$ 軸、スパン方向を $z$ 軸とする。ここで上付きの+指標は摩擦速度 $u_\tau$ と動粘度 $\nu$ で無次元化された値である。ベース形状を中心に振幅は0~1.3倍、厚さは0.33倍~3倍、高さは0.5~1.2倍に変化させたDNSを行った。

その結果、振幅、及び高さは基準形状が最適であり、厚さは薄くするほど良いことが分かった(図略)。リブレットを薄くするほど高い抵抗低減効果が得られる傾向は、従来の2次元リブレットと同様である。

また、DNSでは実験では得ることが困難な詳細な壁面圧力や摩擦応力の分布が得られる。その結果、平滑面と比較しチャンネル壁面上での摩擦が大きく減少し、高せん断領域はリブレット中央部付近に生じたこと、リブレット上面に高せん断領域が発生し、リブレット厚さを薄くするほどリブレット上面の摩擦は減少し、全抵抗低減効果が向上すること、厚さが増すと壁近傍での流速は減少し、リブレット壁側面の摩擦は減少すること、等が分かった。総じて、リブレットのパラメータの変化が抵抗低減効果へ与える影響を定量的かつその原因も解明することができた。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計10件)

- ① M. Sasamori, O. Iihama, H. Mamori, K. Iwamoto and A. Murata, Experimental and Numerical Studies on Optimal Shape of a Sinusoidal Riblet for Drag Reduction in Wall Turbulence, Proc. of the 9th Int. Symp. on Turbulence and Shear Flow Phenomena, 2015, 印刷中, 査読有。
- ② 笹森萌奈美, 守裕也, 岩本薫, 村田章, 壁乱流における正弦波状リブレットが渦の移流に与える影響, 日本機械学会流体工学部門ニューズレター「流れ」, 2015, 査読無。

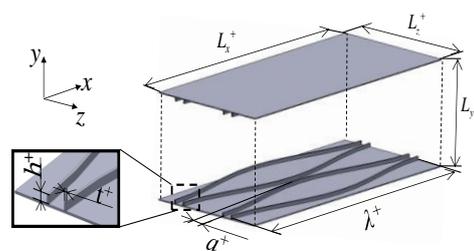


図7：正弦波状リブレットのパラメータ

- ③ M. Sasamori, O. Iihama, H. Mamori, K. Iwamoto and A. Murata, Parametric Study on Sinusoidal Riblet Shape for Drag Reduction in Turbulent Channel Flow, Proc. of the 3rd Int. Education Forum on Environment and Energy Science, 2014, No. C212, 2 pp., 査読有。
- ④ M. Sasamori, H. Mamori, K. Iwamoto and A. Murata, Experimental Study on Drag-Reduction Effect due to Sinusoidal Riblets in Turbulent Channel Flow, Experiments in Fluids, 55, 2014, No.1828, 14 pp., DOI: 10.1007/s00348-014-1828-z, 査読有。
- ⑤ O. Iihama, H. Mamori, K. Iwamoto and A. Murata, Drag-Reduction Effect of Sinusoidal Riblets in Turbulent Channel Flow by Direct Numerical Simulation, Proc. of 11th. World Congress on Computational Mechanics, 2014, No. a2506, 2 pp., 査読有。
- ⑥ K. Yamaguchi, M. Sasamori, H. Mamori, K. Iwamoto and A. Murata, Analysis of Vortical Structure over a Sinusoidal Riblet by Dual-Plane Stereoscopic PIV, Proc. of the 17th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, 2014, No. 119, 7 pp., 査読有。
- ⑦ M. Sasamori, H. Mamori, K. Iwamoto and A. Murata, Analyses of Flow Field in Wall Turbulence over Sinusoidal Riblet for Drag Reduction, Proc. of the 2nd Int. Education Forum on Environment and Energy Science, 2013, No. A136, 2 pp., 査読有。
- ⑧ M. Sasamori, K. Iwamoto, A. Murata and H. Mamori, Experimental Study on Drag-Reduction Mechanism of Turbulent Flow over a New Sinusoidal Riblet, Proc. of the 1st Int. Education Forum on Environment and Energy Science, 2012, A215, 2 pp., 査読有。
- ⑨ M. Sasamori, K. Iwamoto and A. Murata, Quadrant analysis of Reynolds shear stress on a sinusoidal riblet by PIV measurement, Proc. of the 9th Euromech Fluid Mechanics Conference, 2012,

0058\_C04, 1 p., 査読有.

- ⑩ M. Sasamori, K. Iwamoto and A. Murata, Experimental Study on Drag-Reduction Effect of a New Sinusoidal Riblet, Proc. of ASME 2012 Fluids Engineering Division Summer Meeting, 2012, FEDSM2012-72437, 6 pp., 査読有.

[学会発表] (計6件)

- ① 笹森萌奈美, 守裕也, 岩本薫, 村田章, 壁乱流における正弦波状リブレットが渦の移流に与える影響, 第92期日本機械学会流体工学部門講演会, 2014年10月25日, 富山大学 五福キャンパス, 富山
- ② 岩本 薫, 乱流境界層の摩擦抵抗低減を目的とした生物規範型制御, 日本機械学会エンジンシステム部門「先進内燃機関セミナー」(招待講演), 2014年10月06日, 日本航空株式会社 M1ビル, 東京.
- ③ 岩本 薫, 壁乱流の摩擦抵抗低減を目的とした生物規範型制御, FS 分子産業講演会: 界面の制御、機能、応用 (招待講演), 2014年03月10日, 産業技術総合研究所, 茨城.
- ④ K. Iwamoto, Biomimetic Control for Friction Drag Reduction in Wall Turbulence, Techno Innovation Park Symposium 2013 (招待講演), 2013年09月20日, 東京農工大学, 東京.
- ⑤ 山口強太郎, 笹森萌奈美, 守裕也, 岩本薫, 村田章, Dual-Plane Stereoscopic PIV を用いた正弦波状リブレットによる抵抗低減流れの可視化計測, 日本流体力学会年会 2013, 2013年09月12日, 東京農工大学, 東京.
- ⑥ 飯浜大空, 守裕也, 岩本薫, 村田章, 抵抗低減効果のための3次元リブレットを有するチャンネル乱流の直接数値計算, 日本流体力学会年会 2013, 2013年09月12日, 東京農工大学, 東京.

[その他]

ホームページ等

<http://iwamoto.lab.tuat.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

岩本 薫 (IWAMOTO, Kaoru)

東京農工大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号: 50408712