

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 3 月 27 日現在

機関番号：15501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21760133

研究課題名（和文） 粗面壁に付加したマイクログループによる 2 次元壁面乱流の制御

研究課題名（英文） Control of the Turbulent Flow over a Two-dimensional Rough Wall with Longitudinal Micro grooves

研究代表者

亀田 孝嗣 (KAMEDA TAKATSUGU)

山口大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：70304491

研究成果の概要（和文）：本研究は、微細な縦溝(マイクログループ)が付加された二次元矩形粗面上に発達する乱流境界層について、微細な縦溝により導入された粗さ要素のスパン方向 3 次元性が平均量および乱流量に与える影響を調査した。境界層の発達は、微細な縦溝によりほとんど影響を受けない。それに対応して、流れ方向平均速度および乱れ強さ分布は外層領域において 2 次元粗面流の結果と良好に一致する。一方、粗面壁近傍において粗さ要素間溝中央位置における流れ方向平均速度および乱れ強さ分布は、2 次元粗面流の結果に比べ増加する。壁近傍場での詳細な計測から、粗さ要素間溝部上流側において平均速度および乱れ強さ分布は微細な縦溝後方で増加、微細な縦溝間要素後方で減少するスパン方向に周期的な変化をする。粗面壁に作用する抗力は 2 次元粗面流の結果とほぼ一致するが、粗さ要素表面圧力分布から評価された仮想壁面高さ位置は 2 次元粗面流に比べ下方に移動する。

研究成果の概要（英文）：The effect of the spanwise three-dimensionality of the rough wall introduced by longitudinal micro-grooves has been investigated on the mean and turbulent quantities for a turbulent boundary layer. The boundary layer development has little effect of the three-dimensionality. For the outer layer, the streamwise mean velocity and turbulent intensity profiles are well agreement with those of the two-dimensional rough wall flow, but near the rough wall these values increase. From the detailed measurement near the rough wall, the streamwise mean velocity and turbulent intensity profiles show a periodicity in the spanwise direction corresponding to the micro-grooves. Behind the micro-groove, the streamwise mean velocity is accelerated and the turbulent intensity is enhanced in comparison with those of the two-dimensional rough wall flow. On the drag acting on the rough wall, the three-dimensionality has little influence. The virtual origin of the height direction estimated by the pressure distribution around a roughness element and the drag shifts downward compared with that of the two-dimensional rough wall flow.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2010 年度	500,000	150,000	650,000
2011 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：流体工学，乱流制御，境界層，粗面

### 1. 研究開始当初の背景

本研究では、2次元矩形粗さ要素後方に形成される2次元的な離せん断層に対して微細な縦溝により3次元性を付加することで乱流輸送に変化を与え、壁面抵抗の制御の可能性を明らかにしようとするものである。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、微細な縦溝を付加した2次元粗面上に発達する乱流境界層について、微細な縦溝により導入される粗さ要素の3次元性が流れ場に及ぼす影響を調査することである。その影響を明らかにするために、平均・変動速度および粗面壁に作用する抗力の測定を行う。

### 3. 研究の方法

#### (1)対象とした流れ場および座標系

図1に流れ場の概要、主要記号および座標系を示す。座標系には、粗面平板上流部の粗さ要素開始位置から流れ方向に $x$ 、粗さ要素頂点から高さ方向に $y_T$ を使用した。2次元矩形粗さ要素から成る粗面は、平衡境界層となるように粗さ要素高さ $k_h$ が流れ方向距離 $x$ に比例して変化( $dk_h/dx = 1.25 \times 10^{-3}$ )する。任意の $x$ 位置における粗さ要素の配置間隔は粗さピッチ比 $P(=(b+w)/k_h)$ 、 $b$ は粗さ要素間溝部幅および $w$ は粗さ要素幅である。)を4とした。このとき、粗さ要素に作用する抵抗は圧力抵抗が主となり、粗さ関数は粗さレイノルズ数の関数で表示されることが確認されている。 $d_m$ は壁面抵抗の作用点(仮想壁面高さ位置)から粗さ要素頂上面までの距離であり、境界層厚さ $\delta$ は壁面抵抗の作用点位置から流れ

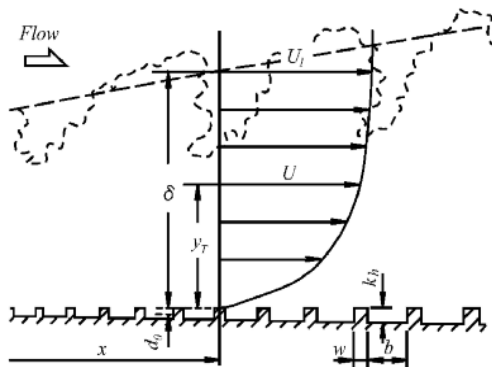


Fig.1 Schematic flow field, nomenclature and coordinate system

方向平均速度 $U$ が $U = 0.995 U_1$  ( $U_1$ は主流速度)となる $y_T$ 高さ位置までの距離として定義された。

図2に実験に使用した微細な縦溝を付加した粗面の概要図を示す。縦溝は、平衡境界層となる $x > 2000\text{mm}$ 範囲の2次元矩形粗さ要素に付加された。微細な縦溝の幅 $g_w$ および深さ $g_d$ は $g_w = g_d \approx 0.3 k_h$ とした。この大きさは粗さ要素近傍場におけるテイラーのマイクロスケールと同程度である。微細な縦溝の配置間隔 $g_p$ は付加的な長さ尺度の導入を避けるために $k_h$ とした。なお、この配置間隔は粗さ要素近傍場におけるスパン方向積分尺度と同程度であった。すべての実験は、ゼロ圧力勾配下および単位レイノルズ数 $U_1/\nu \approx 6.24 \times 10^5 \text{m}^{-1}$  ( $\nu$ は動粘度)で行なわれた。

#### (2)速度および壁面抗力の測定

速度成分の計測には、自作I型熱線プローブと定温度型熱線流速計を使用した。熱線センサーは直径 $2.5 \mu\text{m}$ のタングステン線で、そのアスペクト比は200である。熱線流速計からの信号はAD変換器(サンプリング周波数 $10\text{kHz}$ )を介してパソコンに取り込み、40sの平均値として平均速度を計算した。

壁面抗力(摩擦抗力+圧力抗力)の計測は、浮動片要素応力直接測定装置により行われた。図3に装置の概略図を示す。浮動片要素上には粗さ要素が5ピッチにわたり設置されている。本装置を用いて $x = 2980$ および $3580 \text{mm}$ の2箇所壁面抵抗を測定するために、浮動片要素はそれぞれの $x$ 位置で直径 $D$ を $77.4$ および $89.5 \text{mm}$ の寸法に取り替えた。なお、浮動片要素の平面形状は加工のし易さ

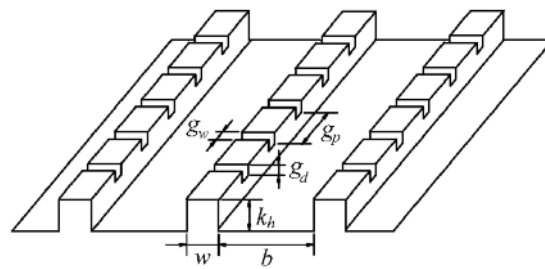


Fig.2 Roughness geometries

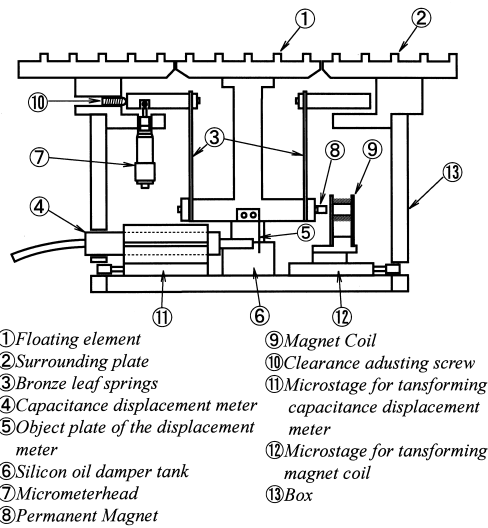


Fig.3 Direct measurement with a floating element device

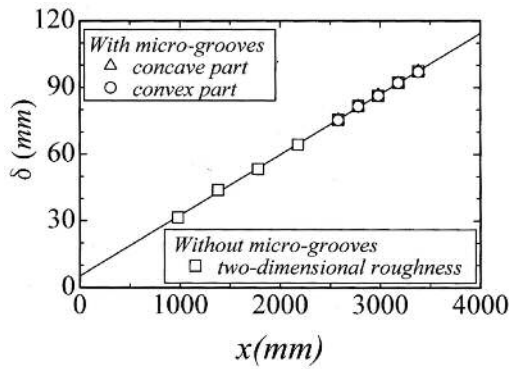


Fig.4 Boundary layer development

および精度を考慮して円形とした。この浮動片要素は、2本のりん青銅板バネを介してパラレルリンク式機構で支持されている。浮動片要素と周囲板のギャップ寸法  $G$  は、ギャップで生じる2次的な力の発生を極力抑制するためにできる限り小さくし、 $G=100\ \mu\text{m}$  ( $G u_t / \nu < 10$ )とした。周囲板と浮動片要素の高さの差であるミスアラインメント寸法  $M$  は、要素周囲に配置した3個のマイクロメータにより  $M = -10\ \mu\text{m} \sim 0\ \mu\text{m}$  の範囲に収まるように調整された。なお、浮動片要素に作用する接線力(壁面抵抗)と浮動片要素の変位量に関する静的較正曲線は極めて良い直線性を示した。

また、圧力抗力および仮想壁面高さ距離の評価を行うために、粗さ要素表面圧力の計測を  $x=2980\text{mm}$  付近の粗さ要素1ピッチの範囲で行った。粗さ要素表面に設けられた圧力孔(直径  $0.3\ \text{mm}$ )の圧力は微差圧計により電圧に変換され、その値をパソコンに取り込み平均化された(平均化時間  $40\text{s}$ )。

#### 4. 研究成果

##### (1) 全体的流れ場の特徴

図4に境界層厚さ  $\delta$  の流れ方向距離  $x$  に対

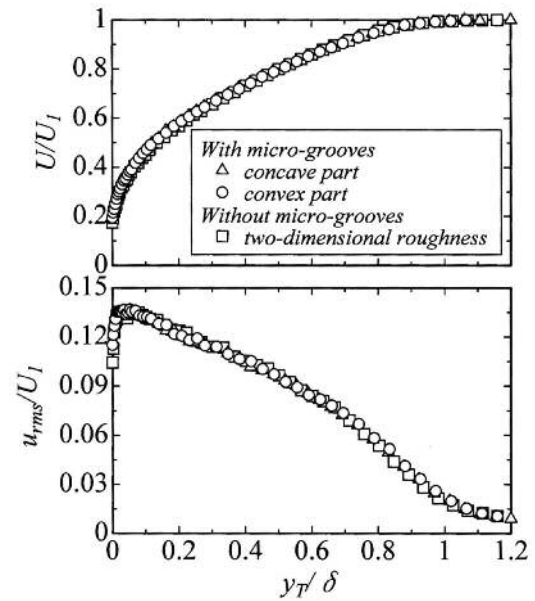


Fig.5 Streamwise mean velocity and turbulent intensity profiles throughout the layer

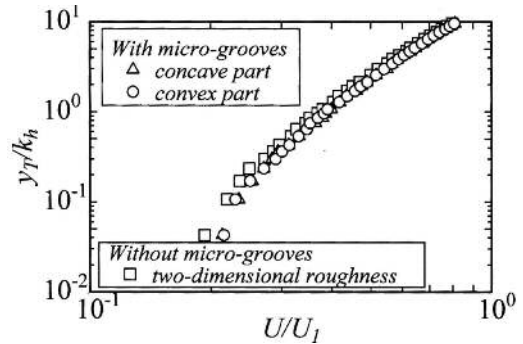


Fig.6 Streamwise mean velocity profile near the rough surface

する変化を示す。図4中には比較のため、2次元粗面流の結果も合わせて示す。本結果は2次元粗面流の結果とほぼ良好に一致しており、微細な縦溝は境界層の発達に対してほとんど影響しない。次に、図5に  $x=2980\text{mm}$  付近(運動量厚さ  $\theta$  に基づくレイノルズ数  $R_\theta (= \theta U_1 / \nu) \approx 8200$ )の粗さ要素間溝部中央位置で計測された流れ方向平均速度  $U$  および乱れ強さ  $u_{rms}$  の分布を示す。縦軸の  $U$  および  $u_{rms}$  は  $U_1$  で、横軸の  $y_T$  は  $\delta$  で無次元化された。図5中には、微細な縦溝(凹部と呼ぶ)および微細な縦溝間(凸部と呼ぶ)中央部で計測された結果および微細な縦溝が付加されていない場合(2次元粗面)の結果を合わせて示す。 $\delta$  で無次元化した場合、 $U/U_1$  および  $u_{rms}/U_1$  分布は微細な縦溝付加(凸部および凹部)の結果と2次元粗面の結果に差異が生じていない。そこで、粗さ要素近傍場に限定して両者の差異を調査するために、 $y_T$  を  $k_h$  で無次元化した結果を図6に示す。図6中の記号は図5と同様である。なお、差異を明確にするために、図6は両対数表示されている。粗さ要素近傍

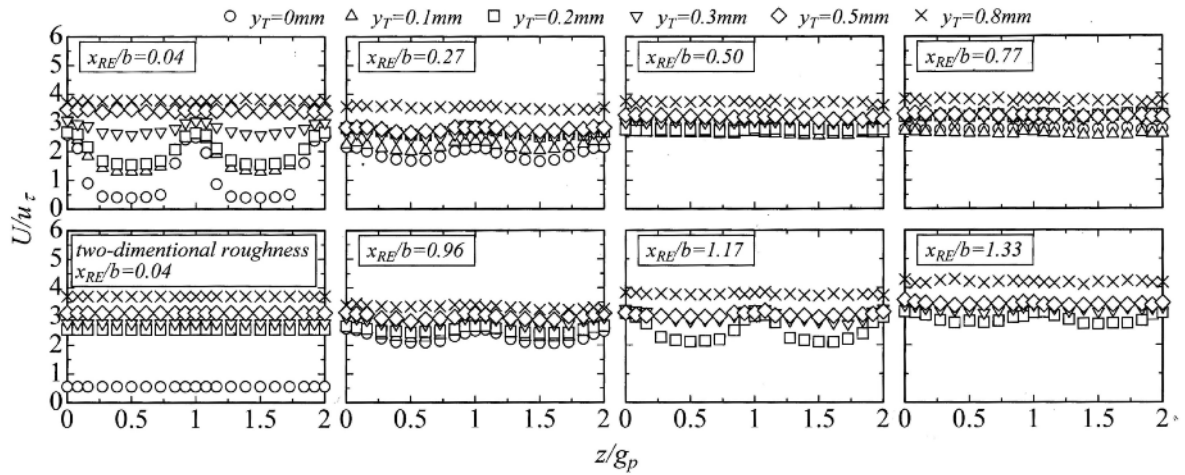


Fig.7 Streamwise mean velocity near a rough wall

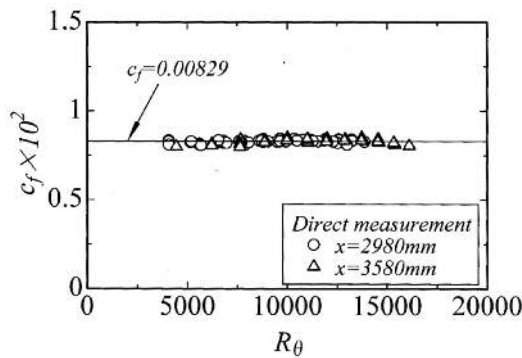


Fig.8 Local skin friction coefficient

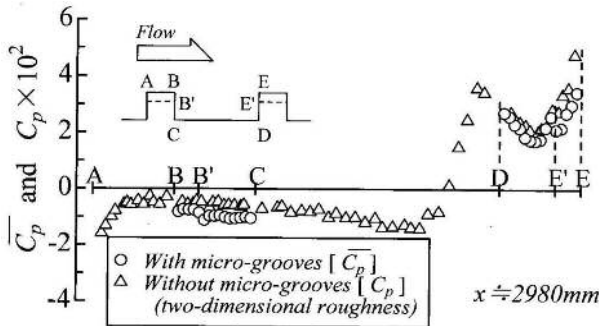


Fig.9 Pressure coefficients around a roughness element

( $y_T/k_h < 1$ )において縦溝付加の結果は、2次元粗面の結果に対して増速しており、その増加量は2次元粗面に対して最大で約11%となっている。なお、 $u_{rms}/U_1$ 分布は $U/U_1$ 分布と同様に、微細な縦溝を付加した結果が2次元粗面の結果に対して増加していた。

#### (2)粗さ要素近傍の流れ

微細な縦溝が粗さ要素近傍の流れ場に与える影響を詳細に調べるために、後述する浮動片要素応力直接測定装置によって計測された壁面せん断応力から算出された摩擦速度  $u_\tau$  で無次元化された流れ方向平均速度

$U/u_\tau$  分布を図7に示す。横軸は縦溝中央を原点としたスパン方向距離  $z$  を微細な縦溝の配置間隔  $g_p$  で無次元化した。また、図7中には、粗さ要素後端を原点とした流れ方向距離  $x_{RE}$  を溝部幅  $b$  で無次元化した7つの断面で測定した結果が示されている。図7中には、比較のために2次元粗面流の  $x_{RE}/b = 0.04$  位置における結果を左下段に示す。微細な縦溝の配置間隔に対応した  $U/u_\tau$  分布の変化は、粗さ要素上、溝部上流 ( $x_{RE}/b = 0.33 \sim 0.27$ ) および溝部下流 ( $x_{RE}/b = 0.96$ ) で生じている。微細な縦溝後方において  $U/u_\tau$  値は2次元粗面流のそれに比べ加速するが、微細な縦溝間においては2次元粗面流の結果とほぼ一致する。溝部中央部 ( $x_{RE}/b = 0.5 \sim 0.77$ ) における  $U/u_\tau$  分布はほぼ一定で、微細な縦溝に対応した変化が消失している。また、高さ方向においては  $y_T/k_h \leq 0.1$  ( $y_T = 0.5\text{mm}$ ) 以下の範囲に微細な縦溝の影響が生じている。なお、図示していないが、流れ方向乱れ強さ  $u_{rms}/u_\tau$  分布は  $U/u_\tau$  分布と同様な変化傾向であることを確認した。ここで、微細な縦溝中央部 ( $z/g_p = 0, 1$  および  $2$ ) における  $U/u_\tau$  分布の流れ方向変化についてみると、微細な縦溝間中央部 ( $z/g_p = 0.5$  および  $1.5$ ) に比べてその変化は小さく、かつ値も大きい。一方、微細な縦溝間中央部における  $U/u_\tau$  分布は2次元粗面流の結果とほぼ対応した分布傾向であったが、溝部中央部における値は2次元粗面流に比べわずかに増加していた。同様に、流れ方向乱れ強さ  $u_{rms}/u_\tau$  分布においても  $U/u_\tau$  分布と対応した変化をしていた。この主たる要因として、粗さ要素上の微細な縦溝部で壁面による拘束がないことが挙げられる。以上の結果より、 $u_{rms}/u_\tau$  値が2次元粗面流の結果に比べて増加しているため、溝部において乱流による運動量輸送が強化されることが推測され、それに伴い壁面に作用する抗力の増加が期待される。

### (3) 壁面に作用する抗力と仮想壁面高さ

浮動片要素応力直接測定装置を用いて壁面に作用する抗力の測定を行った。図8に測定された抗力値から算出された局所壁面摩擦抵抗係数 $c_f$ の $R_0$ 数に対する変化を示す。測定は、 $x=2980\text{mm}$ および $3580\text{mm}$ 位置で $U_1$ を $U_1=4.5\sim 14.5\text{m/s}$ の範囲で変化させて行われた。また、図8中には2次元粗面流の結果を実線で示している。2箇所の $x$ 位置で計測された $c_f$ 値は $x$ 位置ならびに $R_0$ 数によらずほぼ一定( $c_f \approx 0.00829$ )である。このことは、微細な縦溝を付加しても完全相似となる平衡境界層の条件の一つを満足することを意味する。また、2次元粗面流の結果( $c_f \approx 0.00846$ )と比較すると、その差は約2%で小さい。

次に、仮想壁面高さ位置を評価するために、粗さ要素表面圧力分布を計測した。図9にスパン方向縦溝間一ピッチ当りで平均化された粗さ要素表面圧力分布を示す。図9中には、比較のため $x \approx 2980\text{mm}$ 付近で計測された2次元粗面流の結果を合わせて示す。図9中に示した本粗面流の結果は、粗さ要素間溝部上流側および下流側の結果である。縦軸の圧力係数 $C_p$ は、本粗面の結果においてスパン方向縦溝間当りの平均値 $\overline{C_p}$ とした。なお、 $C_p$ は粗さ要素表面圧力 $P$ から主流の静圧 $P_s$ を差し引いた値を主流の動圧 $(1/2\rho U_1^2)$ 、 $\rho$ は空気密度で除した係数である。横軸は、粗さ要素1ピッチ間の粗さ要素各面を展開して表示された。粗さ要素上流および下流側壁面における両粗面の圧力係数値は同様な分布傾向であるが、本粗面の結果は2次元粗面のそれに比べ低い。この結果から粗さ要素間1ピッチおよび微細な縦溝間1ピッチ当りに作用する圧力抵抗係数 $c_D$ を以下の式に基づき評価した。

$$c_D = \left( \overline{C_p} \right)_{DE} - \left( \overline{C_p} \right)_{AB} \times k_h / \lambda$$

本粗面の $c_D$ 値は $c_D \approx 0.00829$ 、一方比較に用いた2次元粗面では $c_D \approx 0.00845$ であった。仮想壁面高さ位置は下式によって定義され、下式に測定値を代入して評価された。

$$d_m = \frac{\int_{-g_p/2}^{g_p/2} \int_0^{k_h} y_m (P_d - P_u) dy_m dz}{\frac{1}{2} \rho U_1^2 c_f \lambda g_p}$$

ここで、 $y_m$ は $y_m = -y_T$ 、 $P_u$ および $P_d$ はそれぞれ粗さ要素間溝部上流側および下流側側壁面の表面圧力である。 $d_m$ 値は $d_m = 0.492 k_h$ で、2次元粗面流( $d_m = 0.452 k_h$ )に比べ約1.1倍大きい。これは、微細な縦溝が仮想壁面高さ位置を2次元粗面流に比べ下方に移動させることを意味する。

### 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)

[学会発表] (計4件)

- ①田中大樹, 亀田孝嗣, 望月信介, 微細な縦溝を付加した2次元粗面上に発達する境界層の壁近傍における乱流構造, 日本機械学会 中四国支部 第50期総会・講演会, 2012年3月8日, 広島大学工学部.
- ②亀田孝嗣, 望月信介, 秋根弘貴, 2次元粗面に付加した微細な縦溝が乱流境界層の相似則に及ぼす影響, 日本機械学会 2011年度年次大会, 2011年9月12日, 東京工業大学 大岡山キャンパス.
- ③秋根弘貴, 亀田孝嗣, 望月信介, 微細な縦溝を付加した2次元粗面上に発達する境界層の乱流構造, 日本機械学会中国四国支部 第49期総会・講演会講演論文集, 2011年3月5日, 岡山理科大学.
- ④亀田孝嗣, 望月信介, 秋根弘貴, 2次元粗面に付加した微細な縦溝に対する乱流境界層の応答, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, 2010年10月31日, 山形大学工学部.

### 6. 研究組織

#### (1) 研究代表者

亀田 孝嗣 (KAMEDA TAKATSUGU)  
山口大学・大学院理工学研究科・准教授  
研究者番号: 70304491

#### (2) 研究分担者

なし

#### (3) 連携研究者

望月 信介 (MOCHIZUKI SHINSUKE)  
山口大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号: 70190957