

令和 5 年 5 月 25 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04274

研究課題名（和文）平均渦度輸送方程式に基づく乱流渦構造に対する壁面粗度の影響の解明

研究課題名（英文）Effect of wall roughness on turbulent structures based on mean vorticity transport equation

研究代表者

亀田 孝嗣 (Kameda, Takatsugu)

近畿大学・工学部・准教授

研究者番号：70304491

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：チャネル乱流において壁面粗度の歪度による平均速度分布の変化が変動速度および変動渦度の相関項に基づいて調査された。金網粗面流のカルマン定数は滑面流のそれよりも低く、壁面粗度の歪度に対して減少する。変動速度と変動渦度の相関項は壁面粗度によらず対数領域で一定となる。壁変数で無次元された垂直方向変動速度とスパン方向変動渦度の相関値は壁面粗度の歪度が-0.847の金網粗面流では滑面流の値と良好に一致するが、壁面粗度の歪度が増加するとその絶対値は減少する。壁変数で無次元されたスパン方向変動速度と垂直方向変動渦度の相関値は滑面流では正であるが、金網粗面流では壁面粗度の歪度によらずほぼ負となる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果は、有効壁面高さ方向距離を使用した場合、粗面流における対数法則のカルマン定数の値が壁面粗度に依存する可能性を示唆するものであった。また、カルマン定数に対して、変動速度・変動渦度相関項の分布形状や符号が関係することを実験的に示したことは、学術的にも価値あるものである。対数法則に関する係数（カルマン定数を含む）の壁面粗度に対する依存性が明らかになることによって、対数法則から導かれる抵抗則の提案に繋げることが可能となり、製品の設計への利用の観点から社会（産業界）に貢献できる。

研究成果の概要（英文）：The effect of the skewness of surface roughness to mean velocity distribution in turbulent channel flow was investigated from the correlation terms of fluctuating velocity and vorticity. Karman's constant for mesh rough surface flow is lower than that for smooth surface flow, and it decreases with the skewness. The correlation terms between fluctuating velocity and vorticity are constant in the logarithmic region. The value of the correlation between the vertical fluctuating velocity and the spanwise fluctuating vorticity normalized with the wall variable for the mesh rough surface flow with the skewness of -0.847 agrees well with that for the smooth flow. The absolute value of the correlation decreases as the skewness increases. The value of the correlation between spanwise fluctuating velocity and vertical fluctuating vorticity normalized with the wall variables is positive for smooth surface flow, but negative for mesh rough surface flow regardless of the skewness.

研究分野：流体工学

キーワード：乱流 壁面せん断流 PIV

1. 研究開始当初の背景

壁面粗度上の流れは、流体関連機器の設計において流動抵抗や流体混合の程度を予測する上で重要である。流動抵抗の見積もりには、1944年に発表されたムディー線図が現在においても有用なデータとして使用されてきている。線図の使用の際には等価砂粒径 k_s の評価を必要とし、その評価には壁面粗度の指標として表面粗さパラメータである算術平均粗さ R_a や最大高さ R_z 等と対応付けて行われてきた。しかし、一様分布壁面粗度ではない3次元壁面粗度の場合、壁面粗度が多種多様な形状・分布状態のため、 R_a や R_z 等の壁面粗度長のみによる k_s 値の正確な評価は困難な状況である。これは、壁面粗度近傍場における壁面粗度による乱流渦構造の違いと平均速度分布形状との関連性が明らかにされていないことが要因の一つである。

本研究課題では、壁面粗度の歪度が壁面粗度近傍の乱流渦構造や平均速度分布形状へ与える影響を調査する。壁面粗度の歪度 S_k は、基準壁面粗度高さ位置に基づく高さ方向の壁面粗度長分布の対称性を表す量である。 $S_k < 0$ であれば、基準壁面粗度高さ位置からみて壁面粗度の凹寸法が凸寸法より大きく、より大きな寸法の凹部が散在することを意味する。 $S_k > 0$ では $S_k < 0$ の逆で壁面粗度の凸寸法が凹寸法より大きく、より大きな寸法の凸部が散在すると解釈される。流れ方向の壁面粗度長分布の S_k 値の正負により、溝粗度あるいは稜粗度のタイプに壁面粗度が対応付けられる。変動速度の3重相関値から、溝粗度ではUpward flow、稜粗度ではDownward flowが支配的になることが知られ、壁面粗度近傍場の支配的な乱流渦構造が異なると期待される。乱流渦構造の形態差（例えば、Hairpin type や Horseshoe type）は変動渦度・変動速度相関値の符号に、強さの差はその値の大きさとして生じ、これらは壁面せん断層の平均渦度分布に影響を与え、壁面粗度による対数速度分布の各係数（カルマン定数や付加定数）の差が表れると考えられる。

2. 研究の目的

本研究課題では、三次元の人工壁面粗度である異なる開孔率の網粗度を使用し、変動渦度や変動速度相関値に基づく壁面粗度による乱流渦構造の変化および乱流渦構造が平均速度分布形状差に与える影響の調査を目的とする。

壁面粗度上の流れにおいて平均速度分布形状差の一つである速度欠損量に対する影響は主として粗さレイノルズ数に基づいて議論されているが、平均渦度の源である壁面粗度近傍の乱流渦構造に着目して説明する試みはなされていない。これは、平均渦度輸送方程式に基づく、平均渦度の拡散や利得に関する変動渦度・変動速度相関項の計測の困難さによるものである。近年では瞬時空間速度の計測がPIVにより実施でき、平均渦度の壁面粗度近傍の乱流渦構造に基づく議論により壁面粗度上の平均速度分布の変化に対する新たな知見を得ることができる。

3. 研究の方法

図1に本研究で使用したチャンネル乱流風洞の概略図を示す。使用した風洞は回流型風洞で、測定部内に流入する流量は、オリフィス流量計により設定された。チャンネル測定部は、長さ $L=3750$ mm、幅 $W=300$ mmおよび高さ $H=25$ mmの寸法を有する。チャンネル上下壁面には、ステンレス製の平織金網が接着剤により貼り付けられている。チャンネル高さ H は上下壁面の金網凹部底面間の垂直方向距離である。金網は線径 $d=0.45$ mm、最大粗さ高さ $k_{max}=0.90$ mmのメッシュ8、18および24の三種類である。座標系は測定部上流の粗さ開始位置の下壁面金網凹部底面を原点として流れ方向を x 、高さ方向を y とした。有効チャンネル高さ H_e は、 ϕ を任意の高さにおける流れ方向およびスパン方向に金網一ピッチを考慮した面積内に流体が占める割合とすると、

$$H_e = \int_0^H \phi dy \quad (1)$$

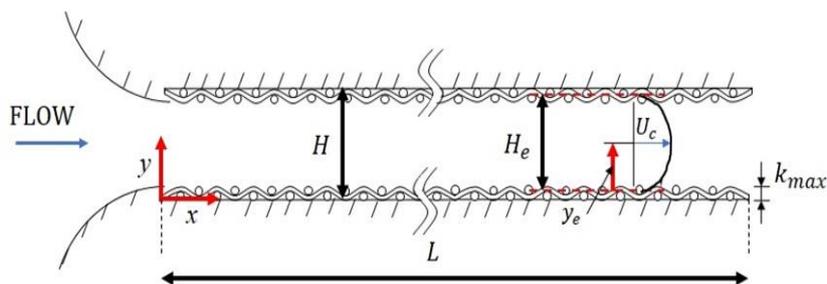


Fig.1 Flow Field and coordinate system.

と定義される．本金網において， H_e は Mesh8 で 24.8 mm，Mesh18 で 24.5 mm および Mesh24 で 24.3 mm となる．有効高さ方向距離 y_e は $y_e = y - (H - H_e)/2$ と定義された．使用した金網の壁面粗度の歪度 S_k を式 (2) から算出した． L_x および L_z は金網の流れ方向およびスパン方向の金網のうねりのピッチ， k' は任意の位置の粗さ高さ \tilde{k} と式 (3) で与えられる算術平均粗さ k_a の差である．

$$S_k = \left(\frac{1}{L_x L_z} \int_x^{x+L_x} \int_z^{z+L_z} k'^3 dx dz \right) / k_{rms}^3 \quad (2)$$

$$R_a = \frac{1}{A} \iint_A \tilde{k} dx dz, \quad A = L_x L_z \quad (3)$$

各メッシュの壁面粗度の歪度 S_k を表 1 に示す． S_k は Mesh の増加で正值から負値へ転じる．

Table 1 Roughness parameters of each mesh

	Mesh8	Mesh18	Mesh24
S_k	0.390	-0.121	-0.847

局所壁面摩擦抵抗係数 C_f は，壁面静圧の下流方向変化 (式 (4)) と PIV 計測による評価される無次元のせん断応力分布 (式 (5)) から算出された．

$$C_f = \left(-\frac{H_e}{2} \frac{dP}{dx} \right) / \left(\frac{1}{2} \rho U_b^2 \right) = -\frac{H_e}{2} \frac{dC_p}{dx}, \quad C_p = \frac{P - P_0}{1/2 \cdot \rho U_b^2} \quad (4)$$

$$C_f = \left(-\frac{H_e}{2} \frac{d\tau}{dy_e} \right) / \left(\frac{1}{2} \rho U_b^2 \right) = \frac{d(\tau/(\rho U_b^2))}{d(y/H_e)} \quad (5)$$

式 (4) および (5) において， ρ は空気密度， U_b は断面平均速度， P は壁面静圧，および P_0 は基準圧力 (大気圧) および τ はせん断応力である．

速度成分は，2D-PIV システムを使用して計測された．2D-PIV システムは，高速度カメラ (DITECT 社製 HAS-D71)，レーザーシート光源 (レーザークリエイイト社製 5W，ファンアングル 30°)，画像解析ソフト (DITECT 社製 Flownizer2D) で構成されている．トレーサー粒子は Dantec 社製 SAFEX F2010 により生成され，その平均粒子径は約 1 μm である．粒子画像はフレームレート 8000 fps，約 10 s で取得された．解析には，空間解像度の向上のため再帰的相関法が採用された．本実験はレイノルズ数が Re_{H_e} ($= H_e U_b / \nu$) $\cong 4000$ ，6000 および 8000 で実施された．主な結果の議論は， $Re_{H_e} \cong 6000$ に限定した．

4. 研究成果

(1) 局所壁面摩擦抵抗係数

局所壁面摩擦抵抗係数 C_f の評価の妥当性を検討するために，滑面流において壁面静圧の下流方向変化と PIV 計測による無次元のせん断応力分布から C_f 値が算出された．さらに，それらの結果と Dean により提案された抵抗則との比較を行った．式 (4) および (5) から算出された C_f 値は Dean の提案式 ($C_f = 0.073 Re_{H_e}^{-1/4}$) と 5% 以内で一致することを確認した．そこで，本研究では， C_f 値の算出には式 (5) を採用した． $Re_{H_e} \cong 8000$ では算出方法による C_f 値の差が他の Re_{H_e} 数に比べ大きいため，壁面粗度が流れ場へ及ぼす影響の議論は $Re_{H_e} \cong 6000$ のデータに限定された．

図 2 に $Re_{H_e} \cong 6000$ における C_f の壁面粗度の歪度 S_k に対する変化を示す．図 3 中の実線は $Re_{H_e} \cong 6000$ における滑面流の結果である．壁面粗度の歪度が $S_k \cong -0.847$ である Mesh24 の金網では， C_f 値は実線の滑面流の結果に近くなっている．これは，Mesh が大きいと金網の縦線と横線の間隔が小さいため，はくせん断層の発達距離が短く，はくせん断層による運動量輸送が小さくなるので圧力抵抗による壁面抵抗の増加が小さくなることに起因する． S_k が負値から正值に転じると， C_f 値は滑面流の

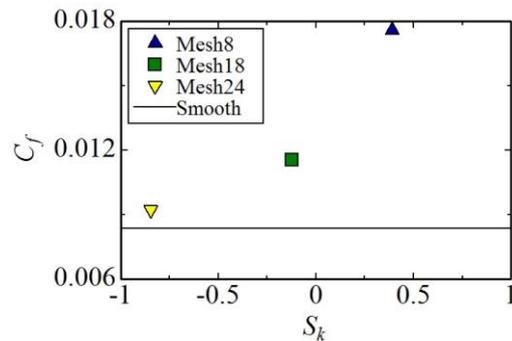


Fig.2 Variation of local skin friction coefficient to skewness of surface roughness

結果に対して著しく増加する。 S_k が負値から正值となると、 Mesh は減少し、 金網の縦線と横線の間隔が広がることではなくせん断層の発達距離の増加に伴い、 運動量輸送も増加して圧力抵抗による壁面抵抗の増加が生じるためである。

(2) 流れ方向平均速度分布

図3に流れ方向平均速度 U を摩擦速度 u_τ で、 有効高さ方向距離 y_e を粘性長さ ν/u_τ で無次元化された対数速度分布を示す。 縦軸は $U^+ (= U/u_\tau)$ および横軸は $y_e^+ (= y_e u_\tau / \nu)$ である。 壁面粗度状態によらず、 y_e^+ 値が十分大きい y_e^+ の範囲 ($y_e^+ \geq 100$) において、 有効高さ方向距離 y_e を使用した場合でも式(6)で表される対数直線部の存在が確認できる。

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(y_e^+) + C \quad (6)$$

式(6)中の κ はカルマン定数および C は付加定数である。 滑面流の結果は $\kappa \cong 0.38$ および $C \cong 5.2$ である。 金網の結果は、カルマン定数および付加定数ともに滑面流と異なる。 それらの結果を図4および図5に示す。 図4のカルマン定数 κ についてみる。 縦軸はカルマン定数 κ 、 横軸は壁面粗度の歪度 S_k である。 有効高さ方向距離 y_e に基づく金網上の対数速度分布のカルマン定数 κ は滑面流の結果(図4中、実線で示す。)に比べ低く、壁面粗度の歪度 S_k に対して減少している。 図5の付加定数についてみる。 縦軸は付加定数 C 、 横軸は壁面粗度の歪度 S_k である。 なお、 C の下付きの S は滑面流、 R は金網粗面流を意味し、 $C_S - C_R$ は粗さ関数である。 $C_S - C_R$ 値は、局所壁面摩擦抵抗係数 C_f (図2参照)の壁面粗度の歪度 S_k に対する依存性に対応して増加する。 一般的に、付加定数 C は粘性底層厚さと関連付けられて議論されており、壁面粗度によって粘性底層内の流れが乱流化されて粘性底層の厚みの減少により金網粗面流での付加定数 C が減少したと解釈される。

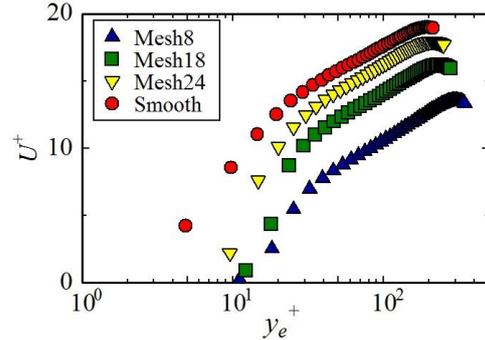


Fig.3 Logarithmic velocity profiles

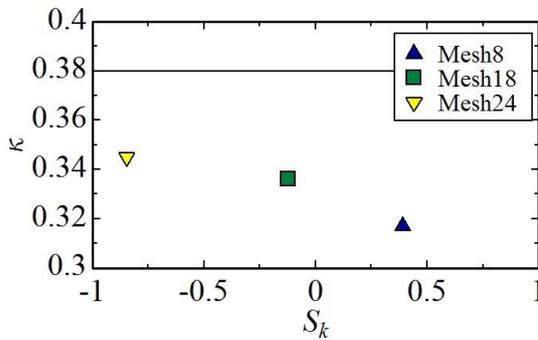


Fig.4 Kármán constant

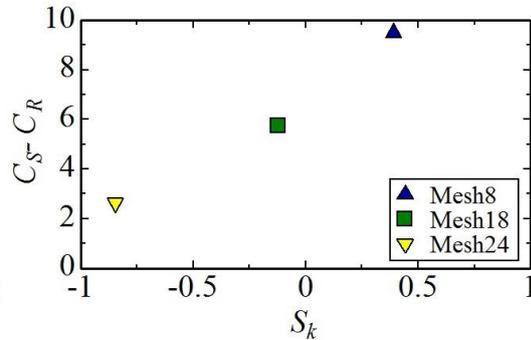


Fig.5 Additive constant

(3) 変動速度・変動渦度相関分布

金網粗面流のカルマン定数 κ が滑面流のそれよりも低く、壁面粗度の歪度 S_k に依存して変化する理由を調査するために、スパン方向平均渦度輸送方程式に着目する。スパン方向平均渦度輸送方程式は、

$$U \frac{\partial \Omega_z}{\partial x} + V \frac{\partial \Omega_z}{\partial y_e} = - \frac{\partial(\overline{v\omega_z})}{\partial y_e} + \frac{\partial(\overline{w\omega_y})}{\partial y_e} + \nu \frac{\partial^2 \Omega_z}{\partial y_e^2} \quad (7)$$

である。式(7)中の $\overline{v\omega_z}$ は垂直方向変動速度とスパン方向変動渦度の相関、 $\overline{w\omega_y}$ はスパン方向変動速度と垂直方向変動渦度の相関である。スパン方向平均渦度 Ω_z は十分発達した流れでは、 $\Omega_z = -\partial U / \partial y_e$ となる。カルマン定数 κ は平均速度勾配 $\partial U / \partial y_e$ と $\kappa = (y_e \partial U / \partial y_e)^{-1}$ の関係が成立するため、カルマン定数 κ に対する一考察が式(7)に基づいて可能であろう。対数速度分布が成立する範囲では、粘性の影響は小さいので無視すると、スパン方向平均渦度 Ω_z の対流輸送に対して、 $\overline{v\omega_z}$ および $\overline{w\omega_y}$ が重要な項となる。本研究課題では、 $\overline{v\omega_z}$ および $\overline{w\omega_y}$ の分布の調査を行った。PIVによる $\overline{v\omega_z}$ および $\overline{w\omega_y}$ の計測の妥当性は、式(8)に基づいて評価された。

$$\frac{\partial(-\overline{uv})}{\partial y_e} = \overline{v\omega_z} - \overline{w\omega_y} \quad (8)$$

滑面流において、 $-\overline{uv}$ 、 $\overline{v\omega_z}$ および $\overline{w\omega_y}$ をPIVにより計測し、式(8)の関係を満足することを確認した。本研究課題では $\overline{v\omega_z}$ をPIVで実測し、式(8)に基づく残差から $\overline{w\omega_y}$ を評価した。

図6に壁変数（摩擦速度 u_τ および粘性長さ ν/u_τ ）で無次元化された $\overline{v\omega_z}$ および $\overline{w\omega_y}$ の分布を示す。上付きの+は壁変数での無次元化を意味する。図6左の $\overline{v^+\omega_z^+}$ 分布についてみる。対数速度分布が成立すると考えられる $y_e^+ \geq 100$ において、壁面粗度によらず $\overline{v^+\omega_z^+} < 0$ で一定となる。その一定値は、壁面粗度の状態に依存している。一方、図6右の $\overline{w^+\omega_y^+}$ 分布は $y_e^+ \geq 100$ において滑面流では $\overline{w^+\omega_y^+} > 0$ で一定であるが、金網粗面流では $\overline{w^+\omega_y^+} < 0$ で一定となり、滑面流とは符号が異なる。 $\overline{v^+\omega_z^+}$ および $\overline{w^+\omega_y^+}$ の一定値に対する壁面粗度の歪度 S_k に対する変化を図7に示す。図7の

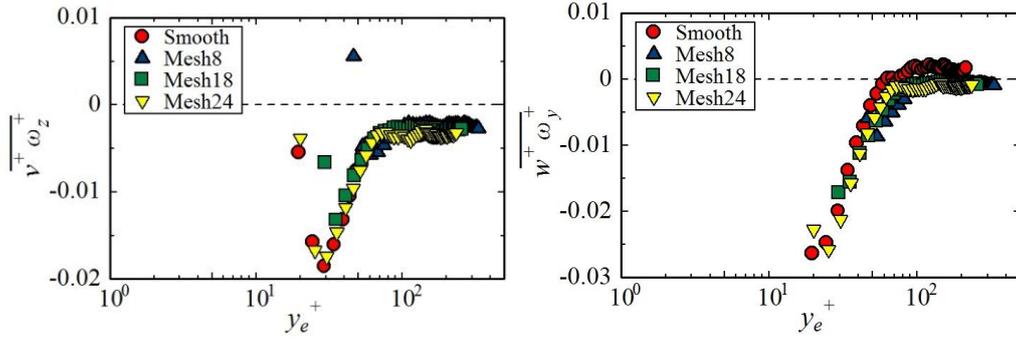


Fig.6 Fluctuating velocity and vorticity correlations

上部の図は $\overline{v^+\omega_z^+}$ 、下部の図は $\overline{w^+\omega_y^+}$ の一定値の S_k に対する変化を示す。それぞれの図中の実線は滑面流の結果である。 $\overline{v^+\omega_z^+}$ についてみると、 $S_k \cong -0.847$ (Mesh24) では滑面流の結果 ($\overline{v^+\omega_z^+} \cong -3.36 \times 10^{-3}$) と良好に一致するが、 S_k が増加すると $\overline{v^+\omega_z^+}$ の絶対値は減少している。 $\overline{w^+\omega_y^+}$ についてみると、滑面流の結果は $\overline{w^+\omega_y^+} \cong 1.62 \times 10^{-3}$ で正值であるのに対し、金網粗面流では S_k によらず $\overline{w^+\omega_y^+} < 0$ でほぼ一定 ($\overline{w^+\omega_y^+} \cong -8.22 \times 10^{-4}$) となっている。この結果に基づく、金網粗面流では対数速度分布が成立する y_e^+ の範囲で主として $\overline{w^+\omega_y^+} < 0$ となること平均速度勾配 $\partial U^+/\partial y_e^+$ の大きさに変化を与え、それに伴いカルマン定数 κ の値が変化していると考えられる。なお、金網粗面流では $\overline{w\omega_y}$ 値を実測していないため、今後実測して確認を得ることが必要である。

5. まとめ

(1) せん断応力勾配から算出された局所壁面摩擦抵抗係数は、壁面粗度の歪度が $S_k \cong -0.847$ である Mesh24 の金網粗面流では滑面流の結果に近くなるが、Meshの減少に伴う歪度の増加により局所壁面摩擦抵抗係数は増加する。

(2) 壁変数で無次元化された流れ方向平均速度分布は、有効壁面高さ y_e を用いた場合でも対数領域が確認される。金網粗面流のカルマン定数は滑面流それよりも低く、壁面粗度の歪度に対して減少する。

(3) スパン方向平均渦度輸送方程式における二つの変動速度と変動渦度の相関項は壁面粗度によらず対数領域で一定となる。壁変数で無次元された垂直方向変動速度とスパン方向変動渦度の相関の一定値は壁面粗度の歪度が $S_k \cong -0.847$ となる Mesh24 の金網粗面流の結果は滑面流の値と良好に一致するが、壁面粗度の歪度が増加するとその絶対値は減少する。一方、壁変数で無次元されたスパン方向変動速度と垂直方向変動渦度の相関値は滑面流では正で一定となるのに対して、金網粗面流では壁面粗度の歪度によらず負で一定となる。

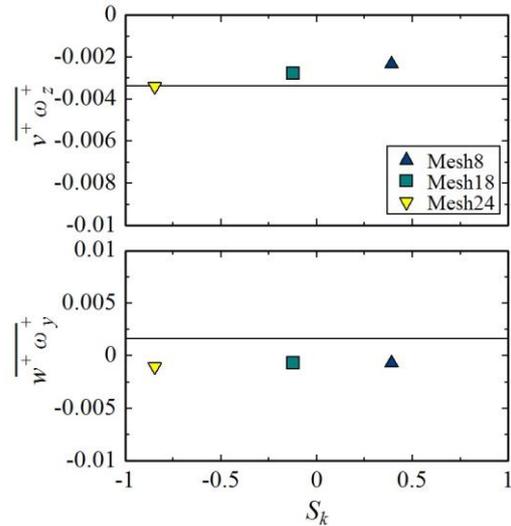


Fig.7 Dependency of fluctuating velocity and vorticity correlations to skewness of surface roughness

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 砂川 弘樹, Goit Jay Prakash, 亀田 孝嗣
2. 発表標題 二次元チャンネル乱流の平均速度分布に与える三次元壁面粗さの影響
3. 学会等名 日本機械学会 中国四国支部 第61期総会・講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 亀田 孝嗣, 望月 信介, Jay Prakash Goit
2. 発表標題 片壁面に付加された粗さ要素の粗さピッチ比がチャンネル流に及ぼす影響(空間平均量に基づく調査)
3. 学会等名 日本機械学会 第99期 流体工学部門 講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 砂川 弘樹, 亀田 孝嗣, Goit Jay Prakash
2. 発表標題 二次元チャンネル乱流における網粗度の影響
3. 学会等名 日本機械学会 中国四国支部 第60期総会・講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	望月 信介 (Mochisuki Shinsuke)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------