

平成 30 年 6 月 3 日現在

機関番号：32660

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14162

研究課題名(和文)ムーディー線図再構築のための壁面粗度影響の統一的理解

研究課題名(英文)Unified understanding of wall surface roughness effect for Moody diagram method reconstruction

研究代表者

川口 靖夫 (Kawaguchi, Yasuo)

東京理科大学・理工学部機械工学科・教授

研究者番号：20356835

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、流体力学的な立脚点から粗度面の摩擦抵抗を統一的理解・整理して実用性ある解析方法を提供する。

研究の過程で塗料を不規則に吹き付けて形成した粗面に対して、摩擦応力測定と流れの測定を行い、3種類のアプローチによる数値解析手法の開発を行った。不規則粗度をもつ壁面に対して乱流摩擦を予測する方法を構築し、DNS計算と実験により検証した。この方法はPCを用いて数分の計算時間で予測が可能である。

研究成果の概要(英文)：In this research, we provide a practical analysis method by unified understanding and organizing frictional resistance of roughness surface from hydrodynamic standpoint.

We conducted friction stress measurements and flow measurements on roughened surfaces formed by irregular sprayed paint. The surface was also used as the boundary condition of the numerical calculation. Research and development of numerical analysis methods by three approaches (DNS, VANS, DANS) were conducted.

A method for predicting turbulent friction action on the wall surface with irregular roughness was constructed and verified by DNS calculation and experiments. This method can allow prediction of friction with a computing time of several minutes using a PC.

研究分野：流体力学

キーワード：乱流 粗度 摩擦抵抗 DNS RANS レーザ計測

1. 研究開始当初の背景

(1) 固体面とそれに沿って流れる流体との間には摩擦力が作用するが、粗度を「等価砂粒粗さ」というパラメータによって代表させる従来手法では抵抗が未知である新規の粗度に対しては摩擦の大きさを予測することができない。そこで任意の形状をもつ壁面に対する乱流摩擦の程度を予測する方法が求められている。

2. 研究の目的

(1) 本研究は、粗度のある壁面に働く摩擦力を定める解析方法を提案しようとするもので、凸部が規則的に配置された粗度のみならず、不規則な大きさの凸部が分布する粗度も流体力学的な立脚点から統一的に理解し、整理して実用性ある解析方法を提供することを目的とする。

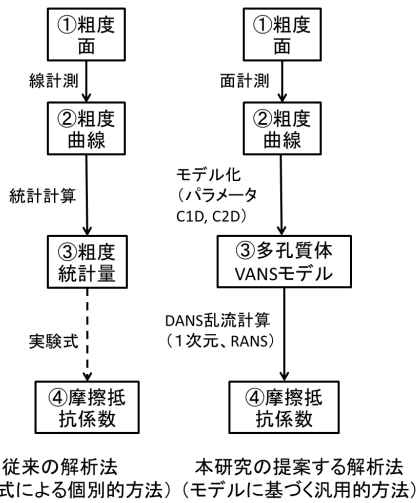


図1 本研究の提案する解析法。モデル化には理論的背景に基づき粗面をモデル化し、NS方程式に立脚した計算に基づいて摩擦抵抗を求める。

(2) 従来ある方法では粗度面の線計測から実験式により等価砂粒粗さを定め、摩擦係数を算出していたが、流体力学的基盤が不十分で、場当たりの推算に留まっていた。本研究では流体力学的考察に基づいて粗度面の3次元計測値から抗力を与える関数のパラメータを定め、さらにRANSに基づく抵抗予測を行うための道筋を確立する。

3. 研究の方法

(1) 実験的研究では円筒型水槽内に側面に粗度を付けた円筒型試験体を浸漬し、試験体を軸の周りに回転させることによって軸に働く応力と回転速度から壁面摩擦力を種々の速度に対して実測した。また不規則粗度については3次元光学測定によって忠実に粗度面を計測した。さらに水槽外部からレーザー光を導入し、PIVの原理によって粗度壁面近傍の平均速度と乱れ強度を測定した(詳細は発表参照)。

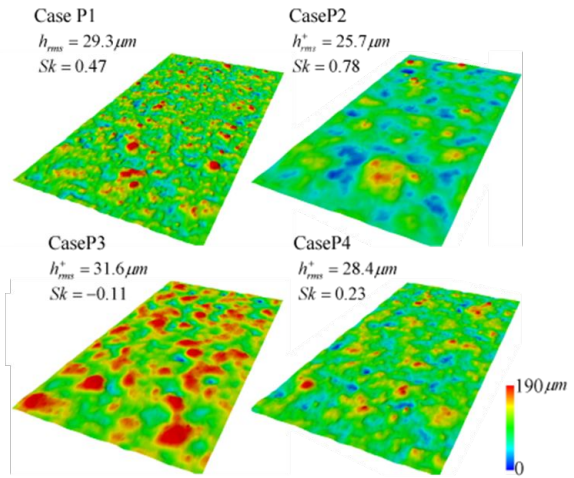


図2 実験および数値解析に用いた粗度面。平板に塗料をわざと粗く吹き付けて作成したもの。P1からP4は粗さ高さ  $h_{max}^+$  は同程度であるが、ひずみ度  $Sk$  と波長が異なる

(2) 数値解析においては、計算領域の1面を粗度面とし、3次元測定による粗度面情報をそのまま入力し、それと対向する面をすべり境界面、その他の4面は周期境界条件として設定した。計算領域内はLBM(格子ボルツマン法)のアルゴリズムとそれに適する格子条件、並列式大型計算機によって数値解析した。計算は【1】粗度壁面を忠実に解像し、流体の領域をDNSによって計算する方法(DNS=Direct Numerical Simulation)【2】粗度壁面をモデル化し、抗力を発生する層で模擬し、流体の領域はLESにより計算する方法(VANS=Volume Averaged Navier-Stokes)、【3】粗度壁面をモデル化し、流体の領域をRANSにより計算する方法(DANS=Double Averaged Navier-Stokes)、の3通りの計算方法をそれぞれ開発し、種々の粗度壁面に対する計算を実施した(詳細は発表、、、を参照)。

4. 研究成果

(1) 実験的研究においては、従来研究対象となってきた規則的粗度面の3系統(半球状突起、円錐状突起、リブ状突起)に加えて塗料をわざと粗く吹き付けて構成した不規則粗度面について、表面形状、摩擦抵抗、粗度面近傍のLDVによる速度測定を行った。数値解析の対象とする4種類の不規則粗度面については詳細に計測を行い、数値解析の入力条件とすることに加えて粗度関数(平均速度分布の滑面と比べた場合の偏差から算出される)摩擦抵抗を詳細に測定した。

(2) DNSにより粗度面近傍の流れの厳密な解析を行い、粗度面の特徴(粗度のrms高さ、ひずみ度)がいかに流れ場と摩擦抵抗に作用するかを明らかにした(発表、、、)

(3) VANS、DANSに基づく数値解析の前段階と

して、粗度面の基底となる面 ( $y=0$ ) と平行な面について面平均を行う操作を、粗度 (固体、速度 0) と流体 (Navier-Stokes 方程式に従う) を含む空間に対して行い、面平均 NS 方程式を誘導した。

(4) 【2】多孔質体の Darcy 則 (速度と抗力とを関係づける式) と接続するように適切なモデル化を行い、粗度面を多孔質体で置き換えて抗力分布を算出できるようにした。これに基づき、VANS による数値計算を行い、DNS と比較して妥当な結果を得た。

(5) 【3】DANS に基づき、粗度面をもつ壁乱流の数値計算を行った。ここでは RANS (Reynolds Averaged NS) として応力方程式モデルを使用した。計算の結果、計算時間は飛躍的に短くなり、高 Re 数の計算も実行可能になった一方、解析結果は DNS、VANS と遜色ないことがわかった。

(6) 【1】【2】【3】の結果をまとめて、不規則粗度面に対する等価砂粒粗さの計算値と、円筒装置による実験値とを比較した。円筒装置特有の遠心力による流れ場の偏差があるため、直接数値を合わせることは難しいが、等価砂粒粗さの大小関係は計算と実験でよく一致していることがわかった。

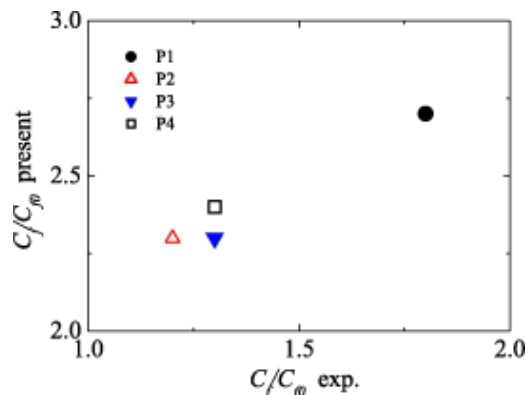


図3 DANS に基づく粗面 (図2、P1~P4) の摩擦係数 (滑面の摩擦係数で規格化)  $C/C_0$  の計算値 (present : 縦軸) を実験値 (exp. : 横軸) と比較したもの

(7) 本研究の開始時点では、粗度に伴う流体力学的な変化、すなわち減速効果や小噴流効果を代表因子として摩擦抵抗予測に組み込むことを考えていた。しかしながら研究の進展に伴い、面平均 NS 方程式を直接考察することにより、こうした因子に現象を集約する必要はなく、壁近傍の減速やレイノルズ応力の増大といった効果は忠実に計算されることがわかった。

(8) さらに、粗度面形状と VANS モデルとの関係は、3 次元的な粗度面形状を与えれば合理的に定めることができるので、抵抗値が未知の粗度面に対してもモデル化が可能であ

る。このモデルは従来の研究のように面の幾何学形状に基づく少数のパラメータで摩擦抵抗の経験式を構成するより汎用性に富み、未知の粗度面に対しても VANS モデル化が可能である。

(9) 【1】DNS【2】VANS の方法は低いレイノルズ数の流れに対しても数千万点の格子点が必要で、短い時間ステップの計算を長時間継続する必要があって、従来の Moody 線図を用いる方法と比べると極めて高いコストと時間を必要とする。一方【3】DANS では数百点の格子により  $10^6$  のオーダーの Re 数まで数分の計算時間で解析が可能であり、パーソナルコンピュータは必要であるが手軽さでは Moody 線図法とさしたる違いはない。

(10) 本研究の実施により、任意の形状をもつ壁面に対する乱流摩擦の程度を予測する方法を提案することができた。その実施手順は 1 与えられた表面形状を 3 次元測定機で計測する、2 一定の計算式 (表面形状のみによって定まる) に従って VANS モデルのパラメータを計算する、3 数分の DANS 計算によって摩擦係数を求める、という過程になる。

#### 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)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 8 件)

Kuwata, Y. and Kawaguchi, Y., "Statistical discussions on turbulence around randomly distributed semi-spheres", ASCHT2017, 2017.

Kuwata, Y. and Kawaguchi, Y., "Lattice Boltzmann Direct Numerical Simulation of Turbulence over Randomly Distributed Hemispheres", 16th European Turbulence Conference, 2017.

Kuwata, Y. and Kawaguchi, Y., "Lattice Boltzmann direct numerical simulation of turbulence over resolved and modelled rough walls with irregularly distributed roughness", Tenth International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (TSFP10), 2017.

桑田祐丞、川口靖夫、「空間平均理論に立脚した粗面モデルによる乱流解析」、第 54 回日本伝熱シンポジウム、2017.

Kuwata, Y., Sugiyama, T. and Kawaguchi, Y., "Imbalance correction grid refinement method for lattice Boltzmann large

eddy simulations ”, 1st Asian Conference on Thermal Sciences, ACTS 2017, 2017.

杉山琢哉、桑田祐丞、川口靖夫、「局所細密格子を用いた格子ボルツマン法によるラージ・エディ・シミュレーション」、日本機械学会関東支部第 23 期総会・講演会、2017.

鈴木駿平、軍司愛美、三重野紘央、桑田祐丞、川口靖夫、「不規則粗面の乱流摩擦抵抗予測に向けた壁面近傍流れの PIV 測定」、日本機械学会関東支部第 23 期総会・講演会、2017.

桑田祐丞、川口靖夫、「応力方程式モデルによる巨視的粗面乱流モデル」、第 55 回日本伝熱シンポジウム、2018.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

川口 靖夫 (Kawaguchi Yasuo)

東京理科大学・理工学部機械工学科・教授  
研究者番号：20356835

### (2) 研究分担者

塚原 隆裕 (Tsukahara Takahiro)

東京理科大学・理工学部機械工学科・准教授  
研究者番号：60516186

### (3) 連携研究者

なし

### (4) 研究協力者

なし