

令和 3 年 5 月 24 日現在

機関番号：24403
研究種目：若手研究(B)
研究期間：2017～2020
課題番号：17K14591
研究課題名（和文）空間平均理論による粗面乱流輸送機構の解明と壁面摩擦抵抗の予測に向けての革新的研究

研究課題名（英文）Innovative study toward prediction of friction drag at rough surfaces based on the investigation of the turbulent transport mechanisms by the volume averaging theory

研究代表者
桑田 祐丞（Yusuke, Kuwata）
大阪府立大学・工学（系）研究科（研究院）・助教

研究者番号：40772851
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：スーパーコンピュータを用いた直接数値解析を用いて、粗さを有する壁面に生じる摩擦抵抗を予測する為の2つ数学モデルを開発した。両モデルともに、微視的な粗さ構造を考えず、巨視的な粗さ効果を取り入れたモデルである。1つめの数学モデルは、粗さ構造を計算格子によって扱うことなく、粗面近傍の乱流運動を解くモデルである。もう1つのモデルは、粗さ構造・乱流変動を解くことなく、粗面近傍の平均的な流動を解くモデルである。両モデルともに、粗面に生じる摩擦抵抗を正確かつ汎用的に予測可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

実在する壁面は表面に生じる粗さの影響を受けるために、流体力学的な理想的滑面とみなすことができない場合が多い。しかし、その粗さの形状は様々であり、汎用的に粗さ効果を予測することは一般的に難しい。本研究では、粗さ高さに関する幾何パラメータを用いる既往の代数的なモデルでは無く、モデル化された粗さ効果を含んだ流動方程式を解くモデルを提案した。本モデルは、既往モデルとは大きく異なり、様々な流動条件・粗さ形状に対して汎用的に使用することができる。

研究成果の概要（英文）：Two types of the mathematical model are developed to predict friction drag at a rough surface by means of the direct numerical simulations by the supercomputer. Both models do not resolve the microscopic roughness structure but take account of the macroscopic effects by the wall roughness. One of the models predicts turbulence near a rough surface without resolving the roughness geometry. The other predicts a mean flow near a rough surface without resolving a time-dependent turbulent flow nor roughness geometry. It is confirmed that both models can accurately predict friction drag for various types of rough surfaces.

研究分野：乱流工学

キーワード：粗面乱流 乱流モデル 直接数値解析 空間・時間平均系 格子ボルツマン法

1. 研究開始当初の背景

現実世界の壁面の多くは流体力学的に滑らかとみなすことができることは稀で、壁面の粗さによって摩擦抵抗の増大を引き起こし、機器の性能低下を招く一因となっている。粗面に生じる流動抵抗の要因である乱流摩擦抵抗の予測に関する研究は古くから行われており、現在においても様々なモデルが提案されている。乱流摩擦抵抗の予測は、実験データをまとめ上げた線図により行われることが一般的である。しかし、線図を構成する物理量(例えば等価砂粒粗さ)の設定は容易ではなく、線図そのものの理論的な根拠も乏しい。そのため、粗面構造によっては、正しい乱流摩擦抵抗の予測ができない場合も多く、現在においても粗面の摩擦抵抗予測に関しては課題が山積している。また、粗面乱流の詳細な数値解析を行うためには、複雑な粗面を解像するための膨大な計算格子が必要であり、現実的とは言えない。そのため、数値計算は単純で規則的な粗面を対象とすることが多く、複雑粗面の乱流輸送現象は未だ十分には理解されておらず、乱流現象のモデリングも不十分である。

2. 研究の目的

本研究の目的は空間平均理論に基づく粗面乱流現象の解明とモデル化である。現実的な流動現象の多くは、粗さを持った壁面の影響を強く受ける。工学的には、塗装・切削などの加工による表面粗さや、腐食・浸食などの経年劣化によるものでさえ流動抵抗が著しく上昇することが知られており、実在壁面の摩擦抵抗予測は製品設計において必須である。本研究では、新たな計算手法である格子ボルツマン法を用いる事によって、これまで実施困難であった複雑粗面の大規模詳細乱流解析を行い、乱流の生成・消散・拡散機構の解明を行う。また、これまでの経験的に作られた代数式とは異なり、空間平均理論に立脚した世界に類を見ない粗面摩擦抵抗予測式の確立を目指す。

3. 研究の方法

まず、粗面構造に関する幾何パラメータを様々に変化させた複雑粗面乱流の大規模詳細解析を実施する。次に、得られたデータを用いて、空間平均方程式の収支解析を行い、空間平均モデルの構築を行う。構築した空間平均モデルと直接数値解析の結果を比較することで、モデルの妥当性を検証する。また、空間平均モデルの解析で得られたデータを基に、既往の多孔質体乱流モデルを参考に時間・空間に対する二重平均を施した方程式群のモデル化を行うことで、計算コストを下げた工学的な粗面乱流モデルを構築する。最後に、既往の粗面パラメータに関する調査を行うことで、乱流摩擦抵抗を予測する代数的手法の検討も行う。

4. 研究成果

(1) 空間平均理論に基づく粗面モデル

直接数値解析によって得られた3次元的な時空間データを基に、空間平均方程式の収支解析を行うことで、空間平均方程式のモデル化を行った。空間平均粗面モデルにおいては、粗面によって生じる圧力抵抗・粘性抵抗のモデル化を行う必要があるが、本研究では半理論的な展開によって関数形を決定した後、モデル定数に関しては直接数値解析データを用いて最適化した。開発を行ったモデルに対して、半球をランダムに並べた粗面を用いて妥当性検証を行った。開発モデルは、粗面構造を直接格子解像することなく、粗面に生じる乱流摩擦抵抗、粗面近傍の平均速度分布、レイノルズ応力を精度よく予測することが可能な事が確認された。また、粗面近傍の乱流渦構造や乱流輸送機構においても、直接数値解析の結果を良好に再現可能なことが立証された。これらの結果より、粗面構造を直接解かない空間平均モデルは、粗面構造を直接解く解析結果と比較して、そんな色ない予測精度を持つことが確認された。

(2) 空間・時間平均方程式を用いた二重平均モデル

前述の空間平均モデルは、粗面構造を直接解かないが、非定常な乱流変動を解く必要があり、依然として計算コストが高かった。そこで、粗面構造に加えて乱流変動も解かない空間・時間平均モデルの開発を行った。モデルは、直接数値解析・空間平均モデルの計算結果を利用して、空間・時間平均方程式の収支解析を行うことで構築した。粗面によって生じる粘性抗力・圧力抵抗のモデル化に加えて、粗面近傍のレイノルズ応力をその輸送方程式を解くことで未知相関項をモデル化した。開発した二重平均モデルは、粗面構造や非定常な乱流運動を解くことなく、非常に少ない計算コストで粗面近傍の平均速度分布や乱れ量の予測が可能なが示された。また、実在の粗面を対象とした実験データ等との比較を通じて、本モデルは様々なタイプの3次元不規則粗面の摩擦抵抗を汎用的に予測可能である優れた工学的モデルであることが立証された。これら空間平均モデル、空間・時間平均モデルの比較結果を図1に示す。

(3) 代数予測モデル

粗面構造に関する幾何パラメータから粗面に生じる乱流摩擦抵抗を簡便に見積もるために、粗面の幾何パラメータを用いた代数モデルを検討した。具体的に、粗面の高さスケール以外に、粗面の波長に関する幾何パラメータである有効勾配や粗面高さの確立密度分布に関するパラメータであるひずみ度等の特徴パラメータが乱流摩擦抵抗に与える影響を調査し、代数的に乱流摩擦抵抗を見積もる相関式を提案した。また、空間・時間平均方程式の収支解析を基にした現象解明を行った後、粗面乱流のスケールリングに関する議論を行った。

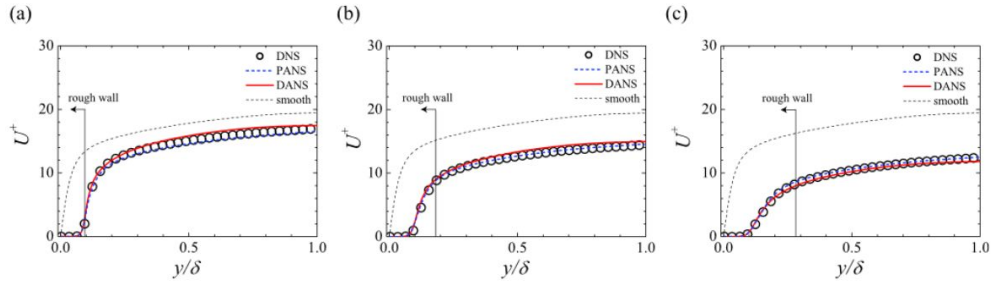


図1 2つの開発モデルを用いた半球粗面粗面近傍の平均速度分布予測結果の比較。滑面における直接数値解析結果(smooth)、粗面における直接数値解析(DNS)、空間平均モデル(PANS)、空間・時間平均モデル(DANS)の結果を示している。(a)は同程度のスケールの半球を敷き詰めた粗面、(c)は様々なスケールの半球を敷き詰めた粗面であり、(a)、(b)、(c)の順で粗さが大きくなる。図1は、発表論文(Kuwata, K Suga, Y Kawaguchi, An extension of the second moment closure model for turbulent flows over macro rough walls, International Journal of Heat and Fluid Flow 77, 186-201)の図5から抜粋した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yusuke Kuwata, Kazuhiko Suga, Yasuo Kawaguchi	4. 巻 77
2. 論文標題 An extension of the second moment closure model for turbulent flows over macro rough walls	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Fluid Flow	6. 最初と最後の頁 186-201
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijheatfluidflow.2019.04.003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yusuke Kuwata, Yasuo Kawaguchi	4. 巻 77
2. 論文標題 Direct numerical simulation of turbulence over resolved and modeled rough walls with irregularly distributed roughness	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Fluid Flow	6. 最初と最後の頁 1-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijheatfluidflow.2019.02.009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yusuke Kuwata, Yasuo Kawaguchi	4. 巻 862
2. 論文標題 Direct numerical simulation of turbulence over systematically varied irregular rough surfaces	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 781-815
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jfm.2018.953	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yusuke Kuwata, Yasuo Kawaguchi	4. 巻 10
2. 論文標題 Statistical discussions on skin frictional drag of turbulence over randomly distributed semi-spheres	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics	6. 最初と最後の頁 263-272
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12572-018-0223-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yusuke Kuwata, Koji Tsuda, Kazuhiko Suga	4. 巻 904
2. 論文標題 Direct numerical simulation of turbulent conjugate heat transfer in a porous-walled duct flow	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 A9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jfm.2020.669	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yusuke Kuwata, Rika Nagura	4. 巻 32(10)
2. 論文標題 Direct numerical simulation on the effects of surface slope and skewness on rough-wall turbulence	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 105113
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0024038	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yusuke Kuwata, Takuya Sugiyama, Yasuo Kawaguchi	4. 巻 15(2)
2. 論文標題 On the scaling of turbulence over an irregular rough surface in a transitionally rough regime	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Thermal Science and Technology	6. 最初と最後の頁 JTST0015
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jtst.2020jtst0015	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Yusuke Kuwata, Takuya Sugiyama, Yasuo Kawaguchi
2. 発表標題 SCALING OF TRANSITIONAL ROUGH WALL TURBULENT FLOW OVER IRREGULAR ROUGH SURFACE
3. 学会等名 The 7th Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusuke Kuwata, Koji Tsuda, Kazuhiko Suga
2. 発表標題 DIRECT NUMERICAL SIMULATION OF CONJUGATE TURBULENT HEAT TRANSFER IN POROUS SQUARE DUCT
3. 学会等名 11th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusuke Kuwata
2. 発表標題 Direct numerical simulation study on the influence of rough surface slope on turbulence
3. 学会等名 Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 桑田 祐丞
2. 発表標題 格子ボルツマン法による不規則粗面壁の乱流熱流動解析
3. 学会等名 第 32 回計算力学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 桑田 祐丞, 津田 航志, 須賀 一彦
2. 発表標題 多孔体壁矩形ダクトの乱流熱流動解析
3. 学会等名 第 56 回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 桑田 祐丞, 川口 靖夫
2. 発表標題 応力方程式モデルによる巨視的粗面乱流モデル
3. 学会等名 第55回伝熱シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yusuke Kuwata, Yasuo Kawaguchi, Kazuhiko Suga
2. 発表標題 Macroscopic modelling of rough wall turbulence based on the second moment closure
3. 学会等名 International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer 18 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 杉山 琢哉, 桑田 祐丞, 川口 靖夫
2. 発表標題 局所細密格子法を用いた格子ボルツマン法による実在粗面乱流のLES
3. 学会等名 第23回計算工学講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yusuke Kuwata, Yasuo Kawaguchi
2. 発表標題 Lattice Boltzmann direct numerical simulation of turbulence over resolved and modelled walls with irregularly distributed roughness
3. 学会等名 10th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yusuke Kuwata, Yasuo Kawaguchi
2. 発表標題 Lattice Boltzmann direct numerical simulation of turbulence over randomly distributed hemispheres
3. 学会等名 16th European Turbulence Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yusuke Kuwata, Yasuo Kawaguchi
2. 発表標題 Statistical discussions on turbulence around randomly distributed semi-spheres
3. 学会等名 Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 桑田 祐丞, 川口 靖夫
2. 発表標題 空間平均理論に立脚した粗面モデルによる乱流解析
3. 学会等名 第54回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2017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
---------	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------