

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 23 日現在

機関番号：13903

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760133

研究課題名(和文)境界層外乱れの影響を受けた多重スケール粗面壁乱流の構造と熱輸送機構の解明

研究課題名(英文)Effect of freestream turbulence on wall turbulent flows over multi-scale rough walls

研究代表者

鈴木 博貴 (Suzuki, Hiroki)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：10626873

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、単一スケール粗面壁上に形成される壁乱流を基本としてその粗面壁の多重スケール化や境界層外乱れの影響に関して、さらには、境界層外乱れとして設定されるべき一様等方的な減衰乱れに関して、乱流エネルギーを良好に保存して解析を行うことができる独自開発の数値解析コードを用いて数値解析を行ったものである。多重スケール粗面壁上の流れと境界層外乱れの影響に関しては、静圧変動や速度変動強度に関する結果をはじめとした結果を、また境界層外乱れに関しては、乱流エネルギーの減衰特性や不変量等に関する成果を得、国内外において研究成果を発表した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we attempt to examine characteristics of wall turbulent flows over one-scale and multi-scale rough walls, to simulate effect of free-stream turbulence on these wall turbulences, and to address the understanding of fundamental characteristics of decaying homogeneous-isotropic turbulence, which should be set as free-stream turbulence, by means of numerical simulation, of which accuracy is expected to be higher because of its highly energy-conservation characteristics.

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：乱流

1. 研究開始当初の背景

乱流境界層は身の回りのいたるところに存在するため、その性質を把握することは機械工学をはじめとして工学的に非常に重要である。実際には、境界層外に乱れが存在する場合がほとんどである。境界層外乱れの無い場合はこれまで広く調べられているが、境界層外乱れがおよぼす影響に関してはほとんどわかっていない。

粗面壁上に発達する壁乱流は、流体工学において重要な流れである。粗面壁上の壁乱流の性質は粗面壁の形状に大きく依存する。近年の実験計測では、矩形型粗面上に小スケールの粗面を設定した場合(多重スケール粗面、右図)でも流れ場の性質が大きく変わり、さらに、その変化は矩形型粗面の形状に大きく依存することが示されている。

粗面壁形状の影響に関しては、不明な点が多い。多重スケール粗面壁上の乱流の数値解析を行い、滑面および単一スケール粗面壁上の壁乱流の結果と乱流構造にどのような違いがあるのかを知ることは非常に意義深いと考えられる。

滑面壁上の壁乱流と境界層外乱れの関係は古くから実験的に広く調べられてきた。古くは乱れ強さを主要パラメータとしたが、長さスケールの相対比にも注目すべきことが指摘された。境界層外乱れは摩擦抵抗および壁面熱伝達係数を高めるが、前者は乱れ強さ、後者は長さスケール比の変化を強く受ける。近年は乱れ強さの高い境界層外乱れも設定されている。近年当研究グループによって、乱流境界層に及ぼす境界層外乱れの影響を解析する計算コードを開発することによって数値解析が実現している。近年、数値計算機および解析法の発達に伴い、近年なされるようになってきたが、粗面壁乱流の数値解析例は従来少なかった。多重スケール粗面壁の壁乱流の性質は実験的に報告されているのみであり、数値解析が行われていない。この要因としては、粗面壁上の壁乱流の数値解析に未だ困難を伴うためである。まず、粗面壁形状を解像するに十分な空間分解能が必要である。さらに、粗面壁乱流の数値解析には、滑面の場合の解析よりも空間分解能を上げなければ精度を十分に確保することができない。

境界層外に設定される乱れの特徴が様々である可能性が考えられる。通常、乱れの性質を単純化して影響を考えるため、一様等方的な乱れを対象とする。一様等方的な乱れは、乱れの統計的な記述がとても簡潔になるので、それが及ぼす影響を簡潔に知ることができると期待される。しかし、たとえ一様等方的であっても、乱流の生成方法によっては特殊な性質が生じることが近年わかってきた。例えば、多重スケールで生成された乱れには、積分スケールの時間増加率がとても小さいものがあるとする報告がある。本研究対象において、境界層外乱れのスケールは重要なパ

ラメータの一つであるので、その時間変化率が大きく異なることは、そのような乱れが及ぼす影響の大きさや仕組みにも影響が生じる可能性が考えられた。

境界層外乱れとしての設定が想定される乱れを対象として、これまで多くの研究が行われてきたが、その中で乱れの静圧変動に関する知見が非常に不足している。これは、実験計測が極めて困難であるという点に主に起因する。静圧変動は、乱流噴流や乱流混合層などの、変動強度の高い乱れについては近年行われるようになってきたが、格子乱流などの一様等方的な乱れの速度の変動強度はそれらよりも小さく、計測の S/N 比を十分に確保することが困難となるのが通常である。

2. 研究の目的

このような背景のもと、本研究では、多重スケール粗面壁上の壁乱流に関する数値解析を行い、滑面および単一スケール粗面壁による壁乱流の場合と比較を行うことで、性質や乱流構造の違いを明らかにすること、また、境界層外乱れとして設定される一様等方的な乱れについて、解析を行い、その理解を深めることが、本研究の目的である。

3. 研究の方法

本研究では、ほとんどの数値解析において用いられる何がしかのモデルを用いずに解析を行うという点で、もっとも高精度とみなせる、直接数値解析法を解析方法として選択した。しかし、たとえモデルの影響を受けなくても、方程式の離散化に伴う誤差は伴う。この誤差の重大なもので通常生じる誤差に運動エネルギーの保存誤差がある。この保存誤差を最小限に低減させることが可能な計算スキームが近年開発され用いられるようになってきたので、本研究ではこれを用いて高精度な解析を目指した。

数値解析では、離散化された方程式を計算機により数値積分することで数値解を得る。数値解を得るのに必要な計算時間は、用いる計算手法によって大きく左右される。たとえば、市販されている流体解析ソフトは、解析する必要のある方程式の一つを反復計算によって求解する。これは、汎用性が高いという長所を持つ反面、計算時間が長くなってしまふ、すなわち、同じ計算コストであれば小規模な計算しかできないという短所がある。本研究では、計算コストの費用対効果を高めるため、直接解法を採用した特殊な計算コードを独自に開発し、それを用いて数値解析を行う。このコードは、汎用性が低いという短所があるが、計算コストを数十分の一に抑えることができ、計算資源を大変有効に使うことができる。

このような方針で開発された本解析コードは、粗面壁乱流のおよび境界層外乱れの解析の両方で用いられる。解析コードの精度は、すでに確認されている。

4. 研究成果

・粗面壁乱流の解析

解析条件について述べる。計算対象は、片側が粗面、片側が滑面の平行平板乱流流れとした。この流れは、従来しばしば解析対象とされている。摩擦レイノルズ数を、これまでの実績がありスタンダードな値である400とした。矩形型粗面については、高さを摩擦レイノルズ数の代表長さの10%とした。この値は通常設定される値の一つである。この値により、粗面物の粘性長基準の大きさは40となる。粗面物の間隔として、粗面物の高さの2倍、4倍、8倍と、計三種類設定した。計算領域については、主流方向に代表長さの3.2倍、主流に垂直な方向には1.6倍ととった。多重スケール粗面壁の場合は、その粗面物の高さを、代表長さの0.0125倍とした。この大きさは、粘性長の5倍であった。流れ場を静圧に着目して可視化した結果、粗面壁の上平面の上側領域において、単一スケール粗面壁と多重スケール粗面壁で有意な差が認められ、多重スケールの粗面物の最上流と最下流の粗面物の影響が大きいことが認められた。また、鉛直方向速度変動の強度に粗面物の多重化は重大な影響をおよぼすことがわかった。この速度変動の強度は、レイノルズ応力の分布と強く関係している。一方、この流れでは、流れの全体においてレイノルズ応力の分布はすでに与えられているので、このことから、レイノルズ応力の機構に大きな影響を及ぼしていることが認められた。境界層外乱れの影響に関しては、影響を単純に考えるため、一様乱数を変換して適当な性質にしたのち設定した。ここで、この一様乱数は連続の式を満たしている。このような乱れを設定して、解析を行った。この場合、片側チャネル条件とした。

・境界層外乱れ（格子乱流）の解析

格子乱流のレイノルズ数を2500とした。乱流格子は、支配方程式の外力項を用いて設定している。計算領域として、主流方向に代表長さの100倍以上設定し、主流に垂直な方向には、積分スケールの数倍以上を確保している。格子乱流の解析では、まずベキ乗則の指数を正確に見積もる方法について検討した。その結果、乱流エネルギーと散逸率についてなりたつ基本的な関係を用いて、ベキ指数を見積もる方法が、適当と考えられたので、これを設定した。ベキ指数は、代表長さの60倍程度を境界として、その前後で異なっていた。この方法を応用して、積分スケールのベキ指数についても見積もった。これらを用いて、格子乱流の不変パラメータがどのように定義されるベキかについて考察した。その結果、バッチャー型とサフマン型の中間の型として不変量が与えられることが認められた。これは、近年報告されている結果と定性的に異なり、この理由はレイノルズ数の条件にあるものと考察された。

・境界層外乱れ（多重スケール乱流生成格子乱流）の解析

多重スケールで乱流生成を行う乱流格子として、近年報告されているフラクタル形状の格子を用いた。設定パラメータについては、格子レイノルズ数を2500とし、厚み比を変化させた。また閉塞率についてもその影響を調べるため、変化させて解析を行った。多重スケール乱流生成格子乱流において、従来もっとも重大と認識されている問題に、乱流エネルギーの減衰を記述する関数の関数形があった。従来はこの判定を分布の近似誤差を比較することで結論づけていた。本研究では、分布形状の関数形が有する性質に着目して、この判定を行う方法を開発し、関数形の議論を結論づけた。その結果、多重スケール乱流生成格子乱流において乱流エネルギーはベキ関数にしたがって減少することが認められた。一方で、積分スケールの性質については、従来の報告通り時間変化率が小さいことが認められた。これらベキ関数に従って減衰する乱流エネルギーと積分スケール一定の両方がなりたつ乱れの性質は、これまでの理論では説明できなかった。そこで本研究では、これら2つを両立させるために乱流が有するベキ性質について、理論的に考察した。

従来報告されているフラクタル形状の格子に加えて、本研究では新しい乱流生成プロモータを考案した。これは、乱流格子に多重スケール乱流生成の視点を加えてできたものであった。これを解析するための解析コードを開発して、解析を行い、ベキ関数の指数について調べた。その結果、この乱流生成プロモータにより生成された乱れは、乱流エネルギーが同じであるにもかかわらず、従来の格子乱流の場合よりも大きな減衰指数を有することが認められた。

・将来に向けての解析

将来に向けた解析についても行った。まず本研究が用いているエネルギー保存型の解析方法の有効性についてさらに検討を進めた。その結果、乱流の高次統計量や乱流騒音に関する量に関しては、乱流の基本統計量に関するよりもより効果が高いことが、解析的に認められ、この結果を踏まえて、非粘性一様等方性変動速度場を用いて解析を行った結果、この解析的予測が検証された。

先の粗面壁乱流の解析および境界層外乱れの解析においては、レイノルズ数が低いことが最も重大な問題として認められた。そこでこれを解決する案として、LESが適当であると考えられたので、解析コードをLES解析が可能であるように改良した。市販の流体解析ソフト等で用いられるLESモデルには、バックスキッターを再現できないモデルや、精度を確保するためには過度の空間分解能を高めなければならないモデルがあり、これを解消するため本コードではダイナミックブレマンモデルが用いられている。

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9件)

1. Suzuki, H., Matsuo, S., Watanabe, M., Hasegawa, Y., and Ushijima, T., A 3D Navier-Stokes Simulation under Staggered/Collocated Grids with High-Kinetic Energy Conservation, Proc. Of Grand Renewable Energy 2014, 2014, accepted.
2. Suzuki, H., Matsuo, S., Hasegawa, Y., and Ushijima, T., Development and Application of an Navier-Stokes Simulation Code with High-Kinetic-Energy-Conservation, Proc. Of Grand Renewable Energy 2014, 2014, accepted.
3. Suzuki, H., Nagata, K., Sakai, Y., Hayase, T., Hasegawa, Y., and Ushijima, T., Direct Numerical Simulation of Grid Generated Turbuence (Analysis on Invariants and Rotta Model), Trans. JSME ser.B, Vol. 70, No.807, pp.2363-2374, 2013.
4. Suzuki, H., Nagata, K., Sakai, Y., Hayase, T., Hasegawa, T., and Ushijima, T., Direct Numerical Simulation of Fractal-generated Turbulence, Fluid Dyn. Res., Vol.45, 061409, 2013.
5. Suzuki, H., Nagata, K., Sakai, Y., Hayase, T., Hasegawa, Y., and Ushijima, T., An Attempt to Improve Accuracy of Higher-Order Statistics and Spectra in Direct Numerical Simulation of Incompressible Wall Turbulence by Using the Compact Schemes for Viscous Terms, Int. J. Num. Meth. Fluids, Vol. 73, No. 6, pp.509-522, 2013.
6. Suzuki, H., Nagata, K., Sakai, Y., Hayase, T., Hasegawa, Y., and Ushijima, T., DNS Study on Pressure Characteristics of Fractal-generated Turbulence, Proc. Of 4th Int. Conf. on Jets, Wakes and Separated Flows, paper No. 1109, 2013.
7. Watanabe, M., Suzuki, H., Hasegawa, Y., and Ushijima, T., Development and Quantitative Validation of a Numerical Code using Highly Energy-Conservative Scheme, Proc. Of 4th Int. Conf. on Jets, Wakes and Separated Flows, paper No. 1170, 2013.

8. Suzuki, H. and Perkins, R., J., DNS of Channel Flow with Two-scale Surface Roughness on One Wall, Proc. Of European Turbulence Conference 14, paper No.115, 2013.
9. Suzuki, H., Nagata, K., Sakai, Y., Hasegawa, Y., and Ushijima, T., DNS on Multiscale-Generated Grid Turbulence Using Classical Grid, Proc. Of Int. Symp. Turb. Shear Flow Phenom., paper No. HOMIE, 2013.

[学会発表] (計7件)

1. The Grand Renewable Energy 2014, 2014年7月27日-同年8月1日, 東京都, Suzuki, H., Matsuo, S., Hasegawa, Y., and Ushijima, T., Development and Application of an Navier-Stokes Simulation Code with High-Kinetic-Energy-Conservation, accepted.
2. The Grand Renewable Energy 2014, 2014年7月27日-同年8月1日, 東京都, Suzuki, H., Matsuo, S., Watanabe, M., Hasegawa, Y., and Ushijima, T., A 3D Navier-Stokes Simulation under Staggered/Collocated Grids with High-Kinetic Energy Conservation, accepted.
3. The 4th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows, 2013年9月17日-同年同月21日, 名古屋市, Watanabe, M., Suzuki, H., Hasegawa, Y., and Ushijima, T., Development and Quantitative Validation of a Numerical Code using Highly Energy-Conservative Scheme.
4. The 4th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows, 2013年9月17日-同年同月21日, 名古屋市, Suzuki, H., Nagata, K., Sakai, Y., Hayase, T., Hasegawa, Y., and Ushijima, T., DNS Study on Pressure Characteristics of Fractal-generated Turbulence.
5. The 14th European Turbulence Conference, 2013年9月01日-同年同月04日, Lyon市 (仏国), Suzuki, H. and Perkins, R., J., DNS of Channel Flow with Two-scale Surface Roughness on One Wall.
6. The 8th International Symposium on

Turbulence and Shear Flow Phenomena,
2013 年 8 月 28 日-同年同月 30 日,
Poitiers 市 (仏国), Suzuki, H, Nagata,
K., Sakai, Y., Hasegawa, Y, and
Ushijima, T., DNS on
Multiscale-generated Grid Turbulence
using a Classical Grid.

7. 日本機械学会東海支部第 62 期総会講演
会, 2013 年 3 月 18 日-同年同月 19 日,
津市, 渡邊雅也, 鈴木博貴, 長谷川豊,
牛島達夫, 一般座標系コロケート格子を
用いた風車翼まわり流れ場の解析.

[図書] (計 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年月日 :
国内外の別 :

○取得状況 (計 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
取得年月日 :
国内外の別 :

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 博貴 (SUZUKI HIROKI)
名古屋工業大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号 : 10626873

(2) 研究分担者

()

研究者番号 :

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :