

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13689

研究課題名(和文) 不変解に基づいた乱流モデルの高精度化

研究課題名(英文) Development of high-fidelity turbulence model based on invariant solutions

研究代表者

関本 敦 (Atsushi, Sekimoto)

大阪大学・基礎工学研究科・助教

研究者番号：00814485

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：LESの支配方程式の不変解に基づき、乱流モデルの本質の理解とモデルの予測性能の向上を目指した。一様せん断乱流中のLES不変解をニュートン・クリロフ法および弧長法を用いて追跡し、不安定周期解を求めることに成功した。これらの解の存在がLES乱流が維持生成できる理論的な背景を有しており、Navier-Stokes乱流との類似性が力学系理論の面からも明らかになった。また、NS方程式におけるクエット流れの不変解をできる限り高レイノルズ数まで追跡し、平面クエット流れの定常解が一様せん断流のLES解と類似していることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Navier-Stokes方程式を時間発展させる直接数値計算(DNS)は膨大な計算時間がかかるため、設計の試行錯誤の為に、乱流モデルを適用して計算コストを減らすことが必要不可欠である。乱流の大スケール運動のみを計算し、小スケール運動はモデル化するラージ・エディ・シミュレーション(LES)という手法の高速化・高精度化は流体工学において重要な課題であり、格子に依存せず、局所的に乱流と層流が混在する剥離流れなどにも適用可能な普遍的なモデルの構築が必要である。DNSの壁乱流の厳密解とLESの不変解を比較検討することで、LESの壁面モデルの開発指針への重要な知見となる。

研究成果の概要(英文)：The invariant solutions in the large-eddy simulation (LES), i.e., filtered Navier-Stokes equation, are investigated for the development of a high-fidelity turbulence model. The invariant solutions in uniform shear flow are traced along with the parameters, and new periodic orbits are obtained. These invariant solutions give us the theoretical background for the self-sustaining turbulence with eddy viscosity and the similarity with the self-sustaining motions of wall-bounded shear turbulence in the Navier-Stokes (NS) equation. The relatively high-Reynolds-number equilibrium in a plane Couette flow in NS equation is obtained, and the wall-bounded solutions resemble invariant solutions in the LES equation, which paves a way of developing a wall model for eddy viscosity.

研究分野：流体工学

キーワード：壁乱流 乱流モデル LES 不変解

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

大規模計算機の進化と共に、Navier-Stokes (NS)方程式をモデルを使わずに時間発展させる直接数値計算(DNS)を用いた研究が盛んに行われ、マルチスケールな乱流現象の本質を簡単な形状の流れで捉えることができるようになってきた。しかしながら、現在でもDNSには膨大な計算時間がかかるため、現場で設計などでの実用には向かない。さらに、時々刻々と変化する三次元のデータを保存・解析する必要がある、設計現場での試行錯誤の為に、手軽に計算できる乱流モデルの適用は必要不可欠である。今後は、乱流の大スケール運動のみを時間発展させ、小スケールの運動はモデル化する Large-Eddy Simulation (LES)という手法が、多くの設計現場でも使われるようになって考えられ、その高速化・高精度化は流体工学において重要な課題である。しかしながら、現状は、試行錯誤によってモデル定数や格子解像度を変えるなど、LESをはじめとする乱流モデルの使用方法に関しては経験に頼るところが大きい。現状のLESモデルでは壁面近傍流れを正確に予測する為には、乱流エネルギー生成領域を十分に解像する必要がありDNS並に計算コストがかかる。また、剥離流れや層流から乱流が遷移する領域での予測精度が落ちる、といった問題があり、現在でも乱流モデルは発展途上である。モデルを改善すれば予測精度が良くなる場合があるがケース・バイ・ケースであり、「なぜ？」に対する本質的な理解が抜けている。

2. 研究の目的

本研究ではこれまでのLESの支配方程式、つまり、フィルターをかけたNavier-Stokes方程式の不変解に基づいた乱流モデルの本質的理解とモデルの予測性能の向上を目指す。このような不変解は、数値的に求めることができ、層流と乱流の亜臨界遷移現象に大きな役割を果たすことが知られている。本研究では、この不変解の亜臨界遷移に及ぼす役割に着目し、支配方程式の非線形な性質をより深く理解することで、新たな乱流モデル開発の指針を得ることを目的とする。格子に依存せず、局所的に乱流と層流が混在する剥離流れなどにも適用可能な新たなLES渦粘性モデルの構築をめざす。

3. 研究の方法

現状のLESにおける課題を克服するため、代表者が過去に発見した高レイノルズ数極限におけるLESの不変解に着目する。このような不変解はNavier-Stokes方程式において数値的に求められており、層流と乱流の亜臨界遷移現象に大きな役割を果たしていることが知られている。そこで、本研究では不変解の性質をいかにして乱流モデルに取り入れるかが鍵となる。乱流のダイナミクスを力学系(カオス)理論の観点から理解するという手法を発展させ、乱流モデルの開発に理論的な根拠をもたせるために、LESの不変解と壁乱流の不変解について比較検討する。

4. 研究成果

乱流の大スケール運動のみを計算し、小スケール運動はモデル化する Large-Eddy Simulation (LES)を用い、一様せん断乱流中の不変解をニュートン・クリロフ法、および、弧長法を用いて追跡した。これまで報告されていた定常解については、Navier-Stokes方程式の解への接続を試みたが、渦粘性を完全に除去して Navier-Stokes の高レイノルズ数の不変解へと接続することはできなかった。また、解を追跡していく中で、LESにおける定常解が存在できない計算領域アスペクト比 $A_{xz} < 2$ においては、不安定周期解を求めることに成功した。これらのLES不変解の存在がLESにおける乱流が維持生成できる理論的な背景を有しており、LESの一様せん断乱流と Navier-Stokes のそれとのダイナミクスとの類似性が力学系理論の面からも明らかになった。

また、一様せん断流のLES解の知見を生かして、クエット流れにおけるNavier-Stokes解をできる限り高レイノルズ数まで追跡した。まず、平面クエット流れにおいても同様にスパン方向に制限をかけた計算領域で上分枝解を求めることができた。上分枝解が一様せん断流のものと同様に似ていることが確認でき、一様せん断流のLES上分枝解と同様に、壁面方向に背の高いストリーク構造を有する。次に、この平面クエットの定常解を計算領域アスペクト比 $A_{xz} = L_x/L_z$ を固定させながら、レイノルズ数を上げることで、壁面幅と壁面速度差に基づくレイノルズ数で $Re = 20000$ 程度まで求めることができた(図1)。このクエットのNS定常解は上分枝解で、比較的高い壁面せん断率を有するが、同じレイノルズ数の乱流統計量と比べると半分程度である。

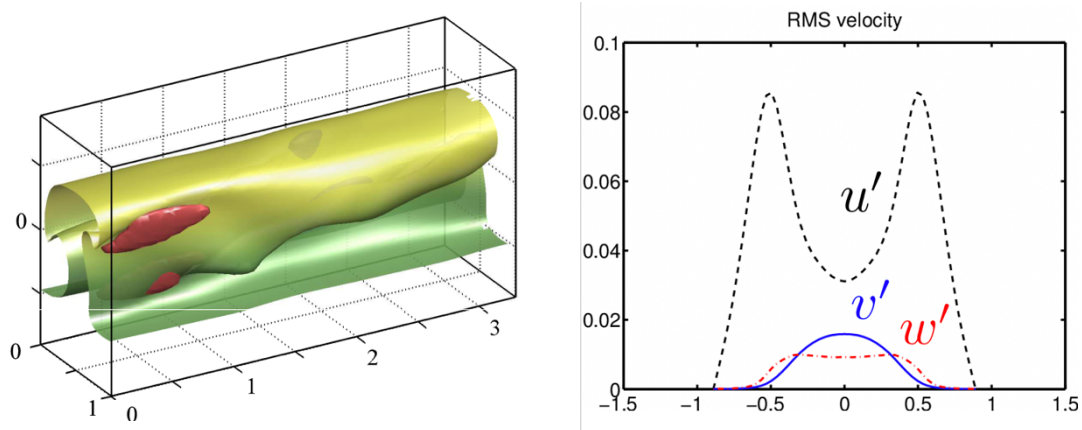


図1 (左図) 平行平板間クエット流における不安定な定常解 (上分枝解) を $Re=5100$ まで追跡した結果. 黄緑は流れ方向速度の等値面を表す. 赤 (青) は流れ方向渦度の正 (負) の等値面である. (右図) 対応する速度変動の大きさ.

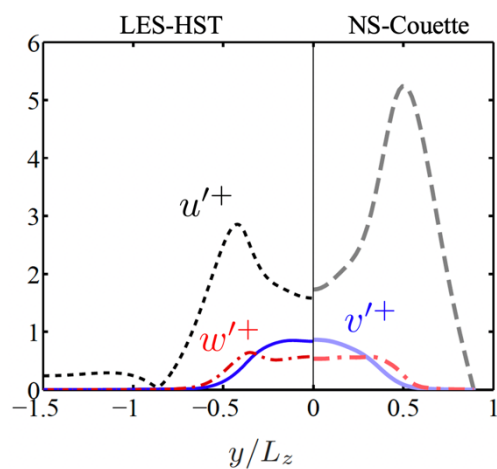


図2 摩擦速度で規格化した速度変動. 同程度の有効レイノルズ数の一様せん断流の LES 不変解 (左半分) とクエット流れの NS 定常解 (右半分) を比較している.

速度変動 (図2) を調べると, 流れ方向の速度変動についてのみ一様せん断流よりも大きくなり, その他の2成分については一様せん断流の解と同程度であった. この速度変動の差は, 一様せん断の LES 不変解にはない壁面の影響がクエットの NS 解の統計量に現れていることを示唆している. つまり, 渦粘性の影響で維持される LES 不変解とクエットの NS 定常解を比較することで, 壁面近傍の粘性層を渦粘性モデルに置き換える際の知見とすることができた.

また, 今後は, クエットポアズイユ流れによる逆圧力勾配の影響や多孔質粗面の影響も調べることで, LES の適用範囲を広げ, 普遍的に用いることができる LES 壁面モデルの開発を進めていく.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Petya Valentinova Stoyanova, Lei Wang, Atsushi Sekimoto, Yasunori Okano, Youhei Takagi	4. 巻 未定
2. 論文標題 The effect of thin and rough layers of porous materials on drag	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J. Chem. Eng. Jpn.	6. 最初と最後の頁 未定
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Sekimoto Atsushi, Atkinson Callum, Soria Julio	4. 巻 1001
2. 論文標題 Characterisation of minimal-span plane Couette turbulence with pressure gradients	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012020 ~ 012020
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1001/1/012020	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 該当する
1. 著者名 Atkinson C., Sekimoto A., Jimenez J., Soria J.	4. 巻 1001
2. 論文標題 Reynolds stress structures in a self-similar adverse pressure gradient turbulent boundary layer at the verge of separation.	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012001 ~ 012001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1001/1/012001	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 該当する
1. 著者名 関本 敦, バシリ キトシオス, キャロム アトキンソン, ソリア フリオ	4. 巻 37
2. 論文標題 自己相似逆圧力勾配乱流境界層の直接数値シミュレーションと統計量スケーリング (<特集>注目研究in年会2018)	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本流体力学会「ながれ」	6. 最初と最後の頁 536 - 539
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 該当する

[学会発表] 計21件(うち招待講演 4件/うち国際学会 15件)

1. 発表者名 Zehuan Wu, Atsushi Sekimoto, Callum Atkinson, Julio Soria
2. 発表標題 Near-wall structures in Couette-Poiseuille flows in the vicinity of separation
3. 学会等名 11th Australasian Heat and Mass Transfer Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Atsushi Sekimoto, Vassili Kitsios, Callum Atkinson, Julio Soria
2. 発表標題 Self-similar outer length scaling for adverse-pressure-gradient turbulent boundary layers
3. 学会等名 Euromech Colloquium 598 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Atsushi Sekimoto
2. 発表標題 On the scaling of the statistics of adverse-pressure-gradient turbulent boundary layers
3. 学会等名 Fluid Dynamics Seminars in the University of Melbourne (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Atsushi Sekimoto
2. 発表標題 Unstable periodic orbits in homogeneous shear flow
3. 学会等名 Monash Fluid Seminar Series (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shevarjun Senthil, Callum Atkinson, Vassili Kitsios, Atsushi Sekimoto, Julio Soria
2. 発表標題 Investigation of the factors contributing to skin friction coefficient in a self-similar adverse pressure gradient (APG) turbulent boundary layer (TBL) flow using direct numerical simulation (DNS)
3. 学会等名 71st APS-DFD (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Daniel Cardoso Cordeiro, Atsushi Sekimoto, Yasunori Okano
2. 発表標題 Large eddy Simulation of oil blowout in water
3. 学会等名 Workshop on particle-based modeling of cloud microphysics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. P. Eisfelder, J.S. Muller, A. Sekimoto, A-J. Buchner, V. Kitsios, C. Atkinson, K. Overleithner, J. Soria
2. 発表標題 Stability of a self-similar adverse pressure gradient turbulent boundary layer
3. 学会等名 21st Australasian Fluid Mechanics Conference (AFMC21) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Zehuan Wu, Atsushi Sekimoto, Callum Atkinson, Julio Soria
2. 発表標題 Quadrant analysis and integral length scale of Couette-Poiseuille flows on the verge of separation
3. 学会等名 Proceedings of 21st Australasian Fluid Mechanics Conference (AFMC21) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Senthil, C. Atkinson, V. Kitsios, A. Sekimoto, J. Soria
2. 発表標題 Investigation of the factors contributing to skin friction coefficient in adverse pressure gradient turbulent boundary layer flow using direct numerical simulation
3. 学会等名 21st Australasian Fluid Mechanics Conference (AFMC21) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Zehuan Wu, Callum Atkinson, Julio Soria, Atsushi Sekimoto
2. 発表標題 Transport of vorticity and the Reynolds stress in the Couette-Poiseuille flow on the verge of separation
3. 学会等名 European Drag Reduction and Flow Control Meeting (EDRFCM2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Atsushi Sekimoto
2. 発表標題 Invariant solutions in DNS/LES of statistically stationary homogeneous shear flow
3. 学会等名 Scientific Computing Across Scales: Extreme Events and Criticality in Fluid Mechanics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Zehuan Wu, Callum Atkinson, Julio Soria, Atsushi Sekimoto
2. 発表標題 THE THREE-DIMENSIONAL STRUCTURES IN TURBULENT COUETTE-POISEUILLE FLOWS ON THE VERGE OF SEPARATION
3. 学会等名 11th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (TSFP11) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jens S. Muller, Kilian Oberleithner, Michael P. Eisfelder, Atsushi Sekimoto, Abel-John Buchner, Vassili Kitsios, Callum Atkinson, Julio Soria
2. 発表標題 Modal analysis of coherent structures in self-similar turbulent boundary layers with adverse pressure gradient
3. 学会等名 11th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (TSFP11) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shevarjun Senthil, Callum Atkinson, Vassili Kitsios, Atsushi Sekimoto, Julio Soria
2. 発表標題 Contribution of intense Reynolds stress structures to the skin friction coefficient in adverse pressure gradient turbulent boundary layer flow
3. 学会等名 17th European Turbulence Conference (ETC17) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Zehuan Wu, Atsushi Sekimoto, Callum Atkinson, Julio Soria
2. 発表標題 Mean skin friction generation in Couette-Poiseuille flows
3. 学会等名 17th European Turbulence Conference (ETC17) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 関本 敦, 岡野 泰則, 河原 源太
2. 発表標題 浮力を伴う正方形ダクト乱流の二次流れ
3. 学会等名 化学工学会第83年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 関本 敦, 岡野 泰則, 河原 源太
2. 発表標題 正方形ダクトにおける複合熱対流
3. 学会等名 第55回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 関本 敦
2. 発表標題 一様剪断流のLESにおける非線形サドル解
3. 学会等名 ダイナミクス研究会中野(明治大学) (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 関本 敦, V. Kitsios, C. Atkinson, J. Soria
2. 発表標題 自己相似逆圧力勾配乱流境界層の直接数値シミュレーションと統計量スケーリング
3. 学会等名 日本流体力学会年会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 25) 関本 敦, 岡野 泰則, 河原 源太
2. 発表標題 正方形ダクト流れにおける乱流パフへの浮力の影響
3. 学会等名 化学工学会第50回秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 関本 敦, 中森 瑞基, 岡野 泰則
2. 発表標題 不安定密度成層下における低レイノルズ数正方形ダクト乱流の二次流れ
3. 学会等名 化学工学会年会第84年会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>大阪大学 研究者総覧 http://www.dma.jim.osaka-u.ac.jp/view?l=ja&u=10008742 Google Scholar, Atsushi Sekimoto, https://scholar.google.com/citations?user=as0ddb0AAAAJ&hl=ja 大阪大学 基礎工学研究科 物質創成専攻 化学工学領域 岡野研究室 研究業績リスト http://www.cheng.es.osaka-u.ac.jp/okanolab/result.html</p>

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