

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03876

研究課題名（和文）逆圧力勾配下における乱流境界層の統計量スケールリング則と新たなLES基盤の創出

研究課題名（英文）Scaling law and a new LES wall-model for adverse-pressure-gradient turbulent boundary layer flow

研究代表者

関本 敦（Sekimoto, Atsushi）

岡山大学・環境生命自然科学学域・准教授

研究者番号：00814485

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）：逆圧力勾配下の乱流境界層に対する直接数値シミュレーション（DNS）を用いて、乱流統計の新たなスケールリング則を提唱した。従来の99%厚さに代わって、平均せん断に基づく境界層厚さを新たに導入し、ゼロ圧力勾配境界層と剥離直前のものと乱流統計量が、慣性領域においてよく一致することを確認した。また、エネルギー散逸率や渦度についても局所平衡仮説に基づいたスケールリング則を導出し、DNSデータで検証し、LESの壁モデルへと発展させたい。また、側壁の影響による二次流れ（主流に対して直角方向の流れ）への影響とその統計量への影響についても調査を進め、強化学習を用いた二次流れパターンの制御可能性を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

逆圧力勾配下の乱流境界層において新たに提唱したスケールリング則の検証は学術的に重要で、従来の99%厚さに代えて平均せん断に基づく境界層厚さを導入することで、乱流統計量の正確な評価が可能となり、境界層乱流の理解が深まる。さらに、LES壁モデルの精度向上と高速化が期待でき、航空機やタービン翼など流体機械の性能向上への応用が挙げられる。新たなスケールリング則とそのLESシミュレーション技術は、複雑形状周りの流れの正確な解析を可能にし、エネルギー効率の向上や環境負荷の低減に寄与する。また、深層強化学習を用いた流れの制御技術は、将来的な乱流制御の革新に繋がる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：Using direct numerical simulation (DNS) for turbulent boundary layers under adverse pressure gradients, we proposed a new scaling law for turbulent statistics. Instead of the conventional 99% thickness, we introduced a boundary layer thickness based on mean shear. We confirmed that turbulent statistics in the inertial region align well between zero pressure gradient boundary layers and those at the verge of separation. Additionally, we derived scaling laws for energy dissipation rate and vorticity magnitude based on the local equilibrium hypothesis. We validated them using DNS data, aiming to develop a novel wall model for LES. Furthermore, we advanced research on the influence and control of secondary flows (flows perpendicular to the main flow) caused by sidewalls. We demonstrated the potential to control secondary flow patterns using deep reinforcement learning.

研究分野：流体工学，乱流，データ駆動計算

キーワード：逆圧力勾配乱流境界層 LES スケールリング則 流動制御

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

曲面や角を有する複雑形状周りの数値シミュレーションの精度向上は、航空機やタービン翼などの流体機械の性能向上につながる重要な課題である。しかしながら、剥離点近傍では、流れは逆圧力勾配の影響で減速し、局所的に層流化するため、既存のレイノルズ平均乱流モデル(RANS)やラージ・エディ・シミュレーション(LES)の予測精度は良くない。さらに、LESでは、壁面近傍の解像度を落として計算するために壁面モデルが用いられるが、それには局面などの複雑形状に対応したモデルはまだ開発されていないまま、航空機の翼や胴体周りのシミュレーションが行われているのが現状である。

壁面乱流や混合層、噴流などのせん断乱流は、飛行機翼や攪拌器など工学分野全般に見られ、その詳細な流れの予測のために、乱流中の大スケール渦のみを解像し小スケールのみをモデル化するLESが設計現場にも応用されつつあり、その高精度化は日本国内の生産技術の進歩に大きく貢献する。高レイノルズ数においては、LESであっても、壁面近傍の最小スケールの渦までを解像しないと精度が落ちるため、モデルを用いずにナビエ・ストークス方程式を解く直接数値シミュレーション(DNS)と同程度の計算コストがかかってしまうのが現在のLESの枠組みの欠点であり、それを補うために、壁面モデルが導入される。

既存の壁面モデルは平板上に沿う乱流の平均流が対数速度分布を持つことに基づいているが、曲面や角を有する複雑形状周りの流れにも適用されてしまっている。航空機やタービンでは、逆圧力勾配の影響によって翼に沿う乱流境界層流れが減速し、最終的には剥離するが、この剥離点近傍の流れは、そもそも壁面モデルの適用範囲外でありLESの予測精度が著しく落ちてしまう。LESの予測精度の向上のためには、実験データまたはDNSによる検証が必要であるが、実験については、外乱や風洞内の側壁の影響による二次流れが存在するため、強い逆圧力勾配下での乱流境界層を実現するのは非常に困難であり、過去の研究による実験データには大きなばらつきがある。したがって、正確な乱流統計量を得るためには乱流モデルを使用せずにナビエ・ストークス方程式を解く直接数値シミュレーション(DNS)が非常に有用である。

課題代表者は、逆圧力勾配下での乱流境界層のDNSデータを用いて、新たな乱流統計量のスケールリング則を見出している。境界層厚さと壁面摩擦速度に加えて、新たに圧力勾配に基づく圧力速度との混合速度スケールを定義して用いることで、乱流エネルギーとエネルギー散逸率の壁面近傍の分布がよくスケールでき、しかも、幅広い圧力勾配の(おそらく剥離直後も含む)範囲で成立することが分かってきた。このスケールリング則を応用することで、ゼロ圧力勾配乱流境界層から剥離流れまでに統一的に適用できるLES壁面モデルを構築できるものと考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究では、飛行機やタービン翼などの曲面上にみられる逆圧力勾配を伴う乱流境界層を対象として、ラージ・エディ・シミュレーション(LES)の新たな枠組みを構築する。ゼロ圧力勾配乱流境界層から剥離流れまでに統一的に適用できる普遍的なLES壁面モデルを開発し、複雑形状でも高速に実施できるLESの技術基盤として、ゼロ圧力勾配乱流境界層から剥離流れまでを統一的に理解できる普遍的な統計量のスケールリング則に整合する壁面モデルの開発を行う。これによって、航空機やタービン翼などの設計現場におけるパラメータ変更の試行錯誤を支援し、最適設計や高精度の予測・制御を可能にする。

### 3. 研究の方法

乱流境界層の直接数値シミュレーション(DNS)の結果から、従来の枠組みを超えるLESモデル開発を行う。圧力勾配を考慮した新たな壁面モデルを用いたLESを開発し、「どこまで正しく「壁乱流の非線形ダイナミクスを再現できるか」、そして「LES壁面モデルのさらなる精度向上のために必要な要素は何か」をDNSと比較検証しながら進める。

境界層厚さ内に10メッシュ程度の格子点を配置するだけでも精度良くLESを実施できる枠組みを構築できれば、設計現場でも十分利用可能なLESとすることが期待できる。具体的には次の3つを目的にして課題に取り組んだ：(1) 新たな壁面モデルの開発；(2) DNSと新たなLES壁面モデルの背景にある物理機構の探求；(3) NACA翼などの複雑形状まわりの流れを対象とした実証シミュレーション。

#### (1) 新たな壁面モデルの開発：

境界層乱流は空間発達型の乱流場であるため、DNSを行うためには、観測したい剥離現象に対

して、十分大きな計算領域を設定する必要がある。不自然な流入流出条件の影響が及ばず、自己相似な統計量分布が得られる条件を満たす領域を解析範囲とする。本研究では、この解析可能な領域を流れ方向に広げた DNS を実施し、圧力勾配を変えた乱流境界層の DNS を複数実施して LES の壁面モデル開発のための参照データベースとする。同じ境界条件で LES を実施し、DNS と良好な一致が得られる壁面モデルを開発する。

(2) DNS と新たな LES 壁面モデルの背景にある物理機構の探求:

得られた DNS データベースから、時事刻々と変化する乱流構造(レイノルズ応力や渦度の強さが大きい領域)を抜き出し、平均的な振る舞いを他の乱流の場合の結果と比較検討することで、乱流境界層への逆圧力勾配の影響についてのさらなる知見を得る。特に、剥離直前の流れは本質的に低レイノルズ数であるため、非線形不変解を探索し、乱流の再層流化過程を調べる。

(3) NACA 翼などの複雑形状まわりの流れを対象とする実証シミュレーション:

実際の翼形状周りの DNS と LES シミュレーションを行い、上流からの攪乱や側壁を導入することによる二次流れの影響を調査し、壁面モデルに追加すべき物理要素を特定する。これには機械学習によるモデルパラメタの調整が有用であり、DNS データを参照し、データ同化や強化学習の手法を用いて LES の壁面モデルのパラメタ調整を行う。

#### 4. 研究成果

本研究の主な成果は、以下の通りである。

1) 新たなスケールリング則の DNS データベースによる検証

逆圧力勾配下の乱流境界層に対する直接数値シミュレーション(DNS)から、新たな乱流統計量のスケールリング則の可能性を検証した。これまでよく利用されている主流速度の99%厚さは、強い逆圧力勾配の統計データのスケールリングには不適切であることが言われている。本研究では、平均流から求まるせん断に基づく境界層厚さを提唱し、統計量のスケールリングに応用した。ゼロ圧力勾配乱流境界層の乱流統計量と剥離直前における乱流境界層のそれとがよく Collapse する乱流統計量のスケールリング則を導き、DNS データベースで検証した。また、エネルギー散逸率や渦度についても、局所平衡仮説に基づいたスケールリング則を導き DNS データでこれを検証した。壁面せん断に基づくせん断レイノルズ数と、圧力勾配パラメタから求まる等価レイノルズ数の2つのパラメタによって、幅広い圧力勾配付き乱流境界層の統計量を整理して理解できることを示している。ゼロ圧力勾配乱流境界層から剥離流れまでを統一的に理解できる普遍的な LES 壁面モデルの開発に道筋がつけられた。境界層乱流だけでなく、せん断乱流一般に適用できる LES 壁面モデリングとして有用なものになると期待できる。

2) 剥離現象の背景にある物理機構について、圧力勾配の影響を系統的に調べるために、境界層乱流の DNS よりも比較的計算コストが低い壁面クエット・ポアズイコ流れを対象とした DNS を実施し、剥離現象付近に見られる渦構造や大規模構造とそれらが統計量に及ぼす影響について調べた。上記のモデルを実装した LES を実施し、DNS との詳細な比較検討を行ったが、剥離の層流乱流遷移と LES モデルとの関係については、さらなる検討が必要である。また、剥離制御も工学的に重要な課題であり、本研究では、安定成層、不安定成層下でのクエット・ポアズイコ流れの DNS を実施して、データを取得した。浮力による剥離メカニズムの変調の調査と、今後の剥離流れ制御の指針決定に役立たせる事ができる。

3) NACA 翼などによる複雑形状での LES 実証シミュレーションについて、今後のスパコン環境の動向を踏まえて、GPU 計算環境に対応したプログラムの開発を進めた。実証シミュレーションについては、プログラムの検証がまだ十分でないため、翼形状周りの DNS は実施できていない。また、複雑形状における側壁の影響については、既存の正方形ダクトコードを利用して実施した。浮力が強く働く領域では、熱対流の影響により二次流れの循環渦の影響で、側壁上に剥離点が生まれる。この予測を LES モデルで行い、DNS データベースで検証を行った。また、流動制御について、データ駆動計算の一種である深層強化学習モデルを取り入れた加熱制御を行い、二次流れパターンを能動的に制御できることを見出した。今後は、剥離流れの制御にも活用できる強化学習と流体シミュレーションを組み合わせた新たなデータ駆動型制御の枠組みを構築することができた。

## 5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 関本 敦	4. 巻 24(4)
2. 論文標題 ミニマルスパン・チャンネル乱流の直接数値計算による乱流伝熱解析	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 東京大学情報基盤センター・スーパーコンピューティングニュース	6. 最初と最後の頁 37 - 39
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 関本 敦	4. 巻 24(5)
2. 論文標題 Couette-Poiseuille流れにおける大規模構造の解析	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 東京大学情報基盤センター・スーパーコンピューティングニュース	6. 最初と最後の頁 23 - 30
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 関本 敦	4. 巻 23
2. 論文標題 正方形ダクト乱流の直接数値計算のGPU加速	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 東京大学情報基盤センター スーパーコンピューティングニュース	6. 最初と最後の頁 57,64
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 関本 敦	4. 巻 25
2. 論文標題 臨界レイノルズ数付近における矩形ダクト乱流中の二次流れと熱的制御	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 東京大学情報基盤センター スーパーコンピューティングニュース	6. 最初と最後の頁 20
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 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 関本 敦, 後藤 涼花
2. 発表標題 統計的に定常な一様せん断乱流への浮力の影響
3. 学会等名 日本流体力学会年会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Atsushi Sekimoto, Vassili Kitsios, Callum Atkinson, Julio Soria
2. 発表標題 Scaling of Turbulence Statistics in Adverse-Pressure-Gradient Turbulent Boundary Layer Flow
3. 学会等名 Eighteenth International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 関本 敦
2. 発表標題 データ駆動型の熱制御による流動設計
3. 学会等名 IMI研究集会「流体数値・データ科学による乱流場の計測・予測・制御・設計」(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 関本 敦, 三谷 崇志, 伊賀 成啓
2. 発表標題 数値流体シミュレーションにおけるデータ駆動型の能動パラメータ制御
3. 学会等名 第37回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 関本 敦, 三谷 崇志
2. 発表標題 強化学習による正方形ダクト乱流の制御 ~ 平均二次流れの熱的制御と伝熱性能評価 ~
3. 学会等名 第61回 日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Takashi Mitani, Atsushi Sekimoto
2. 発表標題 hermal control of the streamwise vortices in a turbulent square-duct flow by a reinforcement learning
3. 学会等名 the 6th R-CCS International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Atsushi Sekimoto, Takashi Mitani
2. 発表標題 Data-driven thermal control of secondary flow in a marginally turbulent square-duct flow and relevance to the invariant solutions
3. 学会等名 12th International Conference on Computational Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>Sekimoto Lab.  <a href="https://sites.google.com/view/sekimoto-lab/research">https://sites.google.com/view/sekimoto-lab/research</a></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
--	---------------------------	-----------------------	----

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