

令和 6 年 5 月 3 1 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K14175

研究課題名（和文）乱流構造に基づく高レイノルズ数乱流境界層の壁面近傍モデリング

研究課題名（英文）Near-wall modeling of the high Reynolds number turbulent boundary layer based on the turbulence structures

研究代表者

前山 大貴（MAEYAMA, Hirotaka）

東北大学・工学研究科・特任助教

研究者番号：80912360

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,200,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究は剥離・再付着を伴う高レイノルズ数乱流境界層流れを高精度に予測可能な LES 壁面モデルの開発に向けた基礎研究として実施した。壁面モデル LES を用いたゼロ圧力勾配下の平板乱流境界層解析を実施し、壁面近傍乱流構造と壁面モデル LES の乱れ生成メカニズムについて調査と考察を行った。レイノルズせん断応力を構成する Q2 成分と Q4 成分が同時にペアとして存在する条件下で条件付き平均を行うことで、壁面モデル LES の壁面近傍流れ場が無秩序ではなく秩序構造をもつことを明らかにしたこと及び、その構造の長さスケールが格子解像度の不足により非物理的に伸長していることを明らかにしたのが主要な成果である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

剥離・再付着を伴う高レイノルズ数乱流境界層現象は航空機や産業用タービン等の空力性能に重大な影響を及ぼすため、その正確な予測は工学的に非常に重要である。高レイノルズ数流れを高忠実にシミュレーションする手法として壁面モデル LES が注目されているが、剥離・再付着を伴う非平衡流れに対する予測精度は既往研究では明らかにされていない。本研究では、壁面モデル LES による壁面近傍乱流構造と乱れ生成メカニズムについて明らかにし、壁面モデル LES による高レイノルズ数流れ場の予測精度に対する理論的根拠を明らかにした。本成果は今後の非平衡流れに向けた壁面モデル LES の改良に向けて学術的意義のあるものである。

研究成果の概要（英文）：This research was conducted as a fundamental research to develop wall model for LES (WMLES) which can predict the high Reynolds number turbulent boundary layer flow with separation and reattachment. The calculations of the turbulent boundary layer were conducted and the near-wall turbulence structures and turbulence generation mechanisms in the WMLES were investigated. By using the conditionally averaging technique, it was elucidated that the near-wall flow field of the WMLES is organized and the length scale of the turbulence structures is elongated unphysically because of the shortage of the grid resolution.

研究分野：流体工学

キーワード：乱流境界層 高レイノルズ数流れ LES 壁面モデル

1 . 研究開始当初の背景

高レイノルズ数流れを高忠実に予測する数値流体力学(computational fluid dynamics: CFD)の手法として、エネルギー保有域の支配的な乱流スケールを計算格子と数値計算スキームで直接解像する LES(large-eddy simulation)が近年注目されている。従来の CFD では、時間平均流れ場を主に対象とする Reynolds-averaged Navier-Stokes 乱流モデルを用いた定常 CFD 解析が主に使用されてきたが、例えば航空機の設計を例にとると、定常 RANS 解析では乱流境界層の剥離・再付着現象が支配的なフライトエンベロープ境界付近の非定常性の強い流れ場(遷音速バフエットや低速失速)の予測が困難であることが知られている。そのような非定常性の強い複雑な物理現象を高忠実に予測するためには、乱流現象を準第一原理的に再現可能な LES の応用が期待されている。しかしながら、高レイノルズ数流れでは壁面近傍の境界層内層における乱流渦のスケールが、レイノルズ数の増加に対して急激に小さくなり LES の計算コストが膨大となるため、境界層内層をモデル化する壁面モデル LES と呼ばれる手法が必須となる。壁面モデル LES はレイノルズ数依存性の強い壁面近傍の境界層内層をモデル化することで計算コストを大幅に削減しつつ、境界層外層の支配的な乱流渦スケールは LES の計算格子によって直接解像することで、付着乱流境界層の外層における乱流統計量を高忠実に予測できる。しかしながら、一般に用いられる既存の LES 壁面モデルでは圧力勾配や対流などの効果が無視できる(流れ場が平衡状態にある)ことを仮定した平衡モデルであり、剥離や再付着を伴う非平衡乱流境界層現象を高忠実に予測可能かという疑問に対し、十分な学術的根拠を持って答えられていなかった。

2 . 研究の目的

本研究の目的は、剥離・再付着を伴う高レイノルズ数乱流境界層現象を高忠実に予測可能な LES 壁面モデル開発に向けた基礎研究として、壁面モデル LES で予測される壁面近傍境界層内層における瞬間乱流構造と乱流生成機構を明らかにすることである。工学応用上重要な乱流境界層の剥離・再付着現象は、壁面近傍における瞬間乱流構造が支配的な因子となっていることから、壁面モデル LES の更なる改良に向けて、壁面モデル LES で予測される壁面近傍乱流構造とそれによる乱流生成機構に対する理論的理解が不可欠である。壁面モデル LES の乱流生成機構が明らかになって初めて、剥離・再付着現象を伴う流れ場の非平衡成分(圧力勾配や対流項成分)を考慮した非平衡壁面モデルの確立が理論的な根拠を持って可能となる。

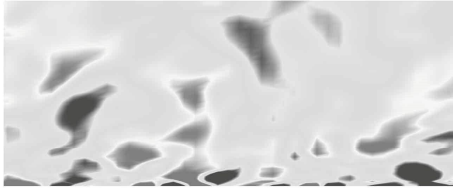
3 . 研究の方法

本研究では平衡流近似を仮定した平衡モデルによる壁面モデル LES を使用して、ゼロ圧力勾配下の平板乱流境界層を解析する。また壁面モデル LES の参照データとするため、計算格子の解像度以外を壁面モデル LES と同じ条件とした直接数値計算(DNS: direct numerical simulation)も実施する。乱流統計量や瞬間流れ場について壁面モデル LES と DNS の間で詳細な直接比較を実施することで、壁面モデル LES の瞬間乱流構造や乱流生成メカニズムを明らかにする。

4 . 研究成果

壁面モデル LES の乱流生成機構を解明するため、壁面モデル LES で予測される壁面近傍乱流構造を調査した。壁面モデル LES と DNS を用いて予測された平板乱流境界層流れに対して(図 1(a)), レイノルズせん断応力を構成する Q2 成分(低速ストリーク)と Q4 成分(高速ストリーク)が同時にペアとして存在する条件下で条件付き平均を実施した結果、壁面モデル LES で予測される壁面近傍流れ場は完全に無秩序ではなく、DNS と同様の秩序構造が統計的に存在することが明らかとなった(図 1(b))。一方で、壁面モデル LES によって予測される壁面近傍秩序構造は DNS のそれと比較し非物理的に伸長しており、SGS(sub-grid-scale)渦粘性を考慮したスケーリング則を新たに提案することで、壁面モデル LES では壁面近傍の SGS 渦粘性による拡散効果が支配的な要因となって乱流構造が伸長していることが明らかとなった。また、壁面近傍秩序構造(擬似的なストリーク)によって縦渦が生成され、壁面近傍の乱れが自律的に再生維持される壁面モデル LES の乱れ生成メカニズムについて考察を行い、壁面モデル LES の有効性の理論的根拠を解明した。本成果は、国際的な学術誌である Journal of Fluid Mechanics (JFM)に掲載された。

(a)



(b)

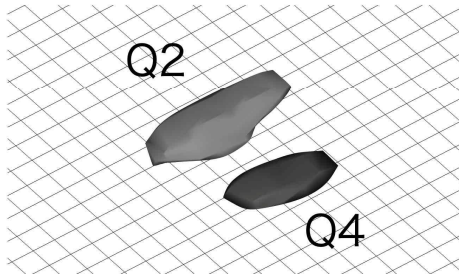


図 1 壁面モデル LES の(a)瞬間乱流構造と(b)条件付き平均乱流構造

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Hiroataka Maeyama, Soshi Kawai	4. 巻 969
2. 論文標題 Near-wall numerical coherent structures and turbulence generation in wall-modelled large-eddy simulation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 A29
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1017/jfm.2023.575	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2件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Hiroataka Maeyama, Soshi Kawai
2. 発表標題 Near-wall turbulence generation in wall-modeled LES
3. 学会等名 APS DFD 2022（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 前山大貴，河合宗司
2. 発表標題 壁面モデルLESにおける壁面近傍の乱れ発生機構
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2022
4. 発表年 2022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
---------	---------