

令和 4 年 5 月 24 日現在

機関番号：17102
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2019～2021
課題番号：19K12005
研究課題名（和文）極めて高いレイノルズ数の非定常乱流解析実現に向けた課題の明確化とその解決策の提案

研究課題名（英文）On the realization of unsteady simulation for extremely high Reynolds-number turbulent flows

研究代表者
安倍 賢一（Abe, Ken-ichi）

九州大学・工学研究院・教授

研究者番号：20315104
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）：工学的に重要な乱流解析分野において近年注目を集めている、ラージ・エディ・シミュレーション(LES)とレイノルズ平均ナビエ・ストークス(RANS)モデルを融合させた「LES/RANSハイブリッドモデル」の「極めて高いRe数への適用の可能性」を検討し、本研究で開発した非等方LES/RANSハイブリッドモデルが壁モデルと組み合わせて極めて高いRe数の乱流場に適用された場合でも十分に機能することを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

非等方LES/RANSハイブリッドモデルが壁モデルと組み合わせて極めて高いRe数の乱流場に適用された場合でも十分に機能することが示されたことにより、実用的な場面で多く見られる極めて高いRe数の乱流場に対する「低コスト・高精度数値解析」への道筋をつけることができた。
この技術は、今後さらに発展させていくことにより、基礎的な乱流解析はもとより、自動車空気力学や航空機空気力学等における流体现象解析においても有力な解析手法の一つとなることが期待される。

研究成果の概要（英文）：This study elucidated that an advanced anisotropy-resolving hybrid LES/RANS model works very well even for extremely high-Reynolds-number turbulent flows together with a wall model as the wall-boundary condition.

研究分野：計算科学

キーワード：計算力学 乱流モデル LES RANS ハイブリッドモデル

1. 研究開始当初の背景

乱流の予測手法として知られるラージ・エディ・シミュレーション (LES) は、ここ数十年の計算機の飛躍的な進歩に伴う許容計算コストの拡大とともに、実用化に向けて急速に発展・普及しつつある。LES では、乱流の大半のエネルギーを保有する大きな渦を直接計算し、格子スケール以下

の渦はモデル化する。それゆえ、すべての渦を計算する直接シミュレーションよりもはるかに少ない格子点数で乱流計算が可能であり、複雑乱流場予測への適用が期待されている。しかしながら、壁面近傍ではエネルギーを保有している渦スケールが非常に小さくなるため、LES を高レイノルズ数 (Re 数) 乱流に適用する際の壁面近傍の取扱いが、未解決問題として残されている。

不十分な格子解像度を用いて無理に LES を適用すると、渦構造を適切に捉えられないために、レイノルズせん断応力が小さく見積もられ、摩擦応力が過小予測される。申請者は、この問題を解決すべく、先に採択された研究課題 (24560197, 16K05042) において、LES/RANS ハイブリッドモデルの高精度化に取り組んできた。

以下は、これらの研究の特筆すべき成果である。

- LES用のサブグリッドスケール(SGS)モデルにスケール相似則モデルの特徴を適切に反映させることにより、従来モデルと比べて粗い格子解像度での予測精度向上を実現した。
- 従来の手法では細かい格子解像度であっても必ず壁面近傍でRANSが採用されるという課題 (図1左)を解決すべく、LESとRANSの接続位置を壁面近傍の乱流現象の特性に基づいて決定する手法を新たに構築し、理想的な状態 (図1右)を実現した。

これらの成果の一例として、格子解像度と Re 数を変化させた場合のチャンネル乱流の平均速度分布を図2に示すが、良好な予測結果とともに、図2(a)の赤線が示すように、高解像度の場合に図1右の要求 ($f_{hb}=1$ 全領域 LES) を達成している。さらに、図2(b)中の $Re = 2 \times 10^5$ (バルク Re 数: 約 1.5×10^7) の結果は、壁面近傍から対数領域に至るまで、同程度の格子解像度では世界的に他に類を見ない程の高い基本予測性能を示している。

しかしながら、航空機のような極めて高い Re 数 (バルク Re 数: 1×10^9 以上) の乱流場を対象とする場合には別の課題も顕在化し、特に壁面上で非滑り条件を設定するために非常に高いアスペクト比の格子を用いる必要があることは深刻な問題と言える。例えば、図2(b)の $Re = 2 \times 10^5$ の計算では、流れ方向とスパン方向の格子解像度はチャンネル半幅を δ として $\Delta x = 0.025\delta$, $\Delta z = 0.0125\delta$ であるが、wall unit (摩擦速度基準) では $\Delta x^+ = 5000$, $\Delta z^+ = 2500$ となり、壁面近傍で $\Delta y^+ \sim 1$ であることを考えると、既にアスペクト比は数千になっている。もしも、壁面形状が平面ではなく曲率を有する状況で同様のアスペクト比の格子の使用を要求された場

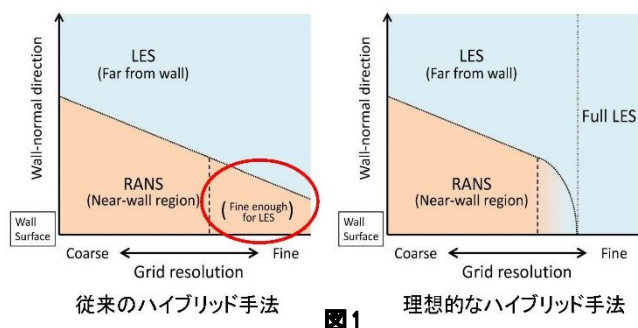
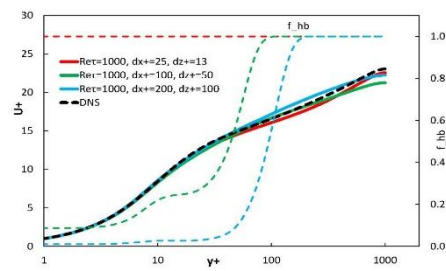
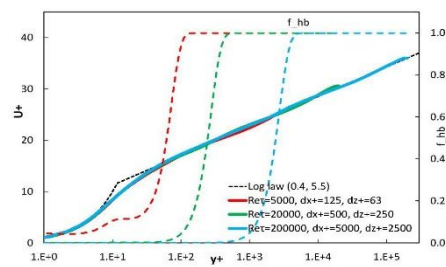


図1



(a) 格子解像度の変化に対する対応



(b) レイノルズ数の変化に対する対応

図2 チャンネル乱流の平均速度分布

合は、計算の安定性の観点からむしろソルバ側で対応できなくなる恐れもある。

このような問題を解決する手段として最近注目されているのが、直交格子を基本として壁面近傍では矩形のまま細分化して格子解像度を高くして乱流構造を捉える「階層型直交格子法」である。この手法は、・直交格子なのでアルゴリズムが単純で計算効率が高い、・物体形状に適合させる一般曲線座標格子や非構造格子を用いる手法に比べて格子生成が極めて容易で短時間で済む、・大規模な計算結果のデータ処理が容易である、といった優れた長所を有する一方で、壁面近傍において十分な予測精度を維持するために必要な格子点数が膨大になるという深刻な課題がある。例として上記の $Re = 2 \times 10^5$ の場合を考えると、壁面から離れた領域で十分な格子解像度である $\Delta x^+ = 5000$ 程度を基準格子幅とし、仮に立方体ベースで $\Delta x^+ = \Delta y^+ = \Delta z^+ \sim 1$ まで細分化すると 12 段 (2^{12}) の細分化が必要である。この場合、壁面近傍のみを細分化しても、上記の 1 格子幅の壁面区画あたり約 $2^{12} \times 2^{12} = 2^{24}$ の格子点が必要となる。さらに、パルク Re 数が 1×10^9 以上では 1 方向の格子点数が数 10 ~ 100 倍程度となり、現在または近い将来のスーパーコンピュータをもってしても計算はほぼ不可能である。

以上のように、近年注目されている「LES/RANS ハイブリッドモデル」や「階層型直交格子法」は非常に魅力ある手法であるが、何れも極めて高い Re 数の乱流場を対象とする場合には課題が残されている。

2. 研究の目的

本研究の目的は「極めて高い Re 数の乱流場の非定常解析を現実的な計算コストで実現すること」である。本研究で対象とする非等方 LES/RANS ハイブリッドモデルは、申請者が開発・提案したものであり、前述の長所以外にも以下の特筆すべき特徴がある。

- LESとRANSの両方に基本表式が共通の 1 方程式モデルを採用することにより、乱流諸量の壁面境界条件に至るまで同形式の表現を採用することを可能とし、壁面上を含むいかなる LES と RANS の接続部においても両者をスムーズに接続できることを実現した。

ちなみに、十分な格子解像度の場合に全領域を LES で計算するように乱流モデルが自動的に判断する機能の実現において、この特徴は非常に重要な役割を担っている。ここまで述べてきた特徴をすべて有する乱流モデルは他に例が無く、現時点で世界最高峰のレベルを有している。このモデルを極めて高い Re 数の乱流場に適用できるように発展させられれば、その世界的な優位性は疑うところが無く、高い学術的独自性と創造性を有した研究成果が期待できる。

3. 研究の方法

本研究では、まず極めて高い Re 数を対象とした基本的なチャンネル流れの計算を種々の乱流モデルの組み合わせについて実施した。この計算には以下のようなテストケースが含まれる。

- 純粋な LES と標準的な壁モデルの組み合わせ
- 標準的な等方性渦粘性表現の LES/RANS ハイブリッドモデルと標準的な壁モデルの組み合わせ
- 非等方 LES/RANS ハイブリッドモデルと標準的な壁モデルの組み合わせ

次に、上記で得られたデータを用いて各モデルの特性を詳細に考察し、非等方 SGS モデルの優位性や LES/RANS ハイブリッドモデルと壁モデルとの相性、適用に際する問題点を明らかにした。なお、使用できる計算機リソースの関係から、本研究課題の期間中に同様の Re 数の階層型直交格子法による非定常計算の実施は困難であると判断し、主たる研究の目的を「非等方 LES/RANS ハイブリッドモデルの極めて高い Re 数への適用性の実現」に置いて研究を遂行することとした。

その一環として、本非等方 LES/RANS ハイブリッドモデルを可能な限り高アスペクト比の格子

に対応できるように性能改善することを目指して、バックステップ乱流を対象として、ステップ直後のせん断層における高アスペクト比の格子に対するSGSモデルのあるべき姿について詳細な検討を行った。

4. 研究成果

工学的に重要な乱流解析分野において、ラージ・エディ・シミュレーション(LES)とレイノルズ平均ナビエ・ストークス(RANS)モデルを融合させた「LES/RANS ハイブリッドモデル」が近年注目を集めているが、そこで新規発想に基づいて開発された「非等方 LES/RANS ハイブリッドモデル」について「極めて高いRe数への適用の可能性」を検討し、以下の特筆すべき成果を得た。

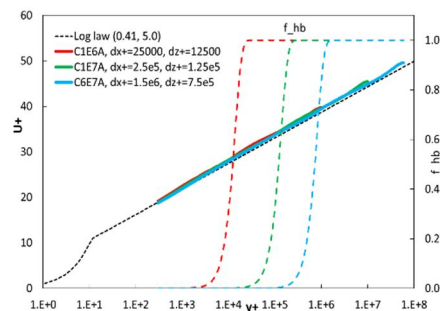
(1) 本非等方 LES/RANS ハイブリッドモデルは、バルク Re 数が 50 億を超えるチャンネル乱流についても、一般的な壁モデルと組み合わせることにより、標準的な計算領域に対して 1 千万点程度の格子点数で高精度予測を維持できることが確認された(図3上「非等方 LES/RANS」)。

(2) 等方性モデルでは LES と RANS の接続部においてダブルバッファ(速度分布の段差)が見られたことから、Re 数や壁モデルの利用の有無に関わらず広い計算条件に対して非等方項の重要性が確認された(図3中「等方性 LES/RANS」)。なお、純粋な LES を用いた計算では、著しい精度低下を招いた(図3下「純粋な LES」)。

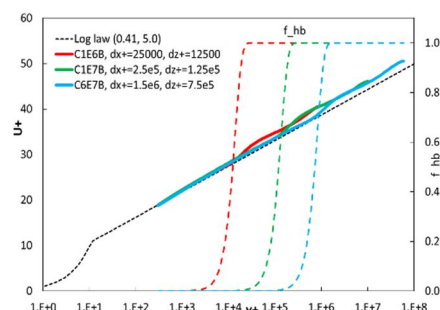
(3) 本ケース(摩擦速度ベースで $Re = 6 \times 10^7$)に対して、第1格子点の壁からの距離 ($y^+ = 300$) を目指して階層型直交格子法を適用すると、壁面1層目だけで 8 千億点(上下壁で 1.6 兆点)が必要であり、総格子点数は本手法の 10 万倍を超えることから、壁モデルを用いる場合でも非等方 LES/RANS ハイブリッドモデルの有用性が示された。

(4) 本非等方 LES/RANS ハイブリッドモデルを可能な限り高アスペクト比の格子に対応できるように性能改善することを目指し、バックステップ乱流を対象として、ステップ直後のせん断層における高アスペクト比の格子に対する SGS モデルのあるべき姿について詳細な検討を行った結果、SGS モデルのフィルター幅として従来から用いられてきたセル体積の三乗根は高アスペクト比の格子では必ずしも適切でないことがわかり、将来の性能改善に向けて非常に有用な知見が得られた。

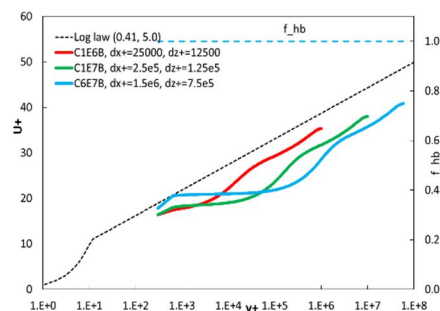
以上のことから、本研究で開発した非等方 LES/RANS ハイブリッドモデルが壁モデルと組み合わせ、極めて高い Re 数の乱流場に適用された場合でも十分に機能することが示された。



非等方 LES/RANS



等方性 LES/RANS



純粋な LES

図 3

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 Abe Ken-ichi	4. 巻 5
2. 論文標題 Performance of a Hybrid LES/RANS Model Combined with a Wall Function for Predicting Quite High Reynolds-number Turbulent Channel Flows up to $Re_{\tau} = 6 \times 10^{*}7$	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Thermal Science and Technology	6. 最初と最後の頁 19-00653
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/jtst.2020jtst0014	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 Abe Ken-ichi	4. 巻 31
2. 論文標題 Notable effect of the subgrid-scale stress anisotropy on mean-velocity prediction through budget of the grid-scale Reynolds-shear stress	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 105103
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5121528	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 Abe Ken-ichi	4. 巻 33
2. 論文標題 Detailed Investigation of Subgrid Scale Models in Large-Eddy Simulation Using High Aspect-Ratio Grid Spacing, Physics of Fluids	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 115120
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0070183	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8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 廣渡 祥太, 木原 尚, 安倍 賢一
2. 発表標題 機械学習を利用したSGS応力の予測精度向上に関する一考察
3. 学会等名 第34回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡部 峻佑, 木原 尚, 安倍 賢一
2. 発表標題 モード内周波数特性を考慮した固有直交分解によるチャンネル乱流内速度場の詳細考察
3. 学会等名 第34回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Abe Ken-ichi
2. 発表標題 Investigation of the Effect of an Anisotropy-Resolving Subgrid-Scale Model on Budgets of the Reynolds Stresses
3. 学会等名 Proceedings of 11th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena, Southampton, Paper No. P21 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Abe Ken-ichi
2. 発表標題 Performance of a Hybrid LES/RANS Model Combined with a Wall Function for Predicting Quite High Reynolds-number Turbulent Channel Flows up to $Re = 6 \times 10^7$
3. 学会等名 Proceedings of the Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow-2019, Tokyo, Paper No. I314 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Abe Ken-ichi
2. 発表標題 On the Role of Anisotropic Term in Subgrid-scale Model for Enhancing Energy Spectrum in High-wavenumber Region
3. 学会等名 Proceedings of The 72nd Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, Seattle, Paper No. B19.06 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藏原 幹弥, 木原 尚, 安倍賢一
2. 発表標題 モード内周波数特性を考慮した固有直交分解による簡易車体周り流れの詳細考察
3. 学会等名 第35回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中 紘生, 木原 尚, 安倍賢一
2. 発表標題 縦渦の相互干渉を利用した空力特性制御に関する研究
3. 学会等名 第35回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 沖本 和貴, 木原 尚, 安倍賢一
2. 発表標題 機械学習を利用した非等方RANSモデルの予測精度向上に関する研究
3. 学会等名 第35回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2021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
---------	---------