

令和元年5月25日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05042

研究課題名(和文)乱流特性スケールを反映した接続関数の導入による高性能ハイブリッド乱流モデルの構築

研究課題名(英文) An advanced hybrid LES/RANS model considering the characteristics of near-wall turbulence

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) 3,800,000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」に焦点をあて、新規発想に基づく壁面近傍の乱流特性スケールを適切に反映したLES/RANS接続関数を開発・導入することにより、従来モデルの飛躍的な高性能化・汎用化を実現した。特に、壁面近傍の格子解像度と物理現象を鑑みてLESが十分可能であると判断した際に、乱流モデルが自動的にLES/RANSハイブリッドモデルから純粋なLESに切り替わるという点に本研究の独創性がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、乱流モデルが壁面近傍の格子解像度と物理現象を鑑みて自動的にLES/RANSハイブリッドモデルから純粋なLESに適切に切り替わるという点に独創性がある。従来このような判断は経験を持った技術者に委ねられてきたが、その自動化により実用レベル(低計算コスト・高精度・高普遍性)の高レイノルズ数非定常複雑乱流場の予測がより身近になる。本モデルは、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新たなトレンドとなることが期待できる。本研究の成果が、各種流体機器の設計・開発の改善・高品質化に大きく貢献することは疑いの無いところである。

研究成果の概要(英文)：An idea was newly proposed for an advanced switching parameter used in a hybrid approach connecting large eddy simulation (LES) with Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) modeling (the hybrid LES/RANS (HLR) model). In this study, a switching parameter was newly proposed by introducing knowledge of the near-wall turbulence properly. As a result, this parameter enabled the present HLR model to be smoothly replaced by a full LES if a grid resolution was fine enough in the near-wall region. This feature of the present model is notable because it has never been achieved in any previous LES/RANS hybrid model.

研究分野：計算科学

キーワード：計算力学 乱流現象予測 非定常流れ 数値流体力学 乱流モデル LES/RANSハイブリッドモデル

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

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、実用化へ向けて急速に発展・普及しつつある(図1)。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(DNS)に比べてはるかに少ない格子点数で乱流計算が可能であり、工学的に重要な複雑乱流・乱流伝熱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、特にLESを高レイノルズ(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、一般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傾向が現れる。図2上は、このような不適切な条件で平行平板間乱流のLES計算を行った例であり、摩擦応力の過小予測に起因して平均速度分布が実際から大きくはずれた結果となる。

本研究グループは、この問題を解決すべく、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」に注目し、これまでLES/RANS ハイブリッドモデルの高精度化に取り組んできた。その中で特筆すべき成果の一つとして、LES用のサブグリッドスケール(SGS)モデルの高性能化が挙げられる。図2下は新たに開発したSGSモデルを用いてLESを行った結果であるが、従来モデル(図2上)と比べて粗い格子解像度でも高精度の結果が得られている。その結果、LES/RANS ハイブリッドモデルにおいてもLES領域の拡大に成功した。

しかしながら、従来のLES/RANS ハイブリッドモデルには、「壁面近傍で必ずRANSが適用される」という本質的な問題点が残されている。すなわち、十分LESが適用可能な格子解像度でも、壁面ごく近傍では常にRANSが適用され、加えてその接続位置がバッファ層にかかるような状況では逆に予測精度の著しい低下を招くことが知られている。この問題を解決するには、格子幅と壁からの距離のみを用いた従来の接続方法をさらに発展させ、壁面近傍の乱流現象を適切に反映した指標による新たな概念に基づく接続関数の開発が必要である。

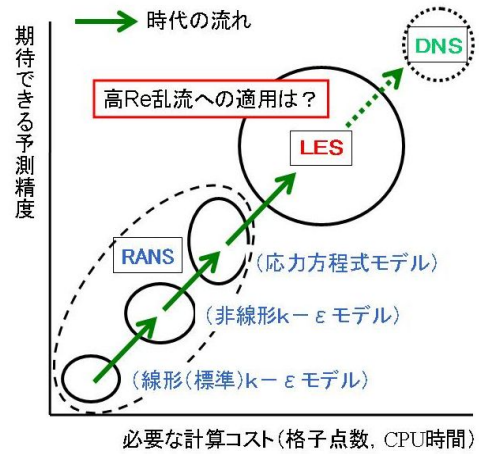


図1

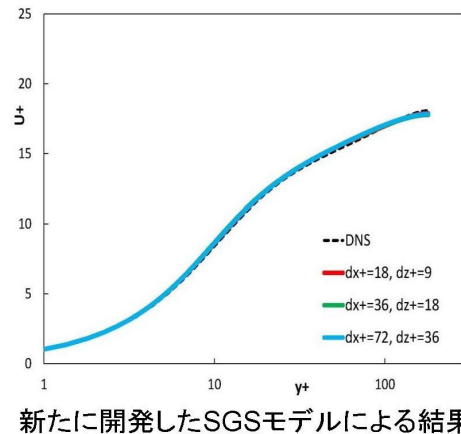
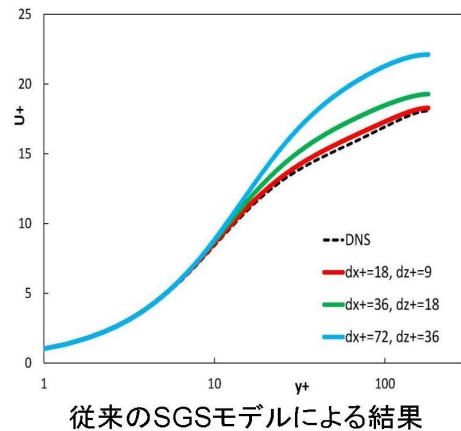


図2

2. 研究の目的

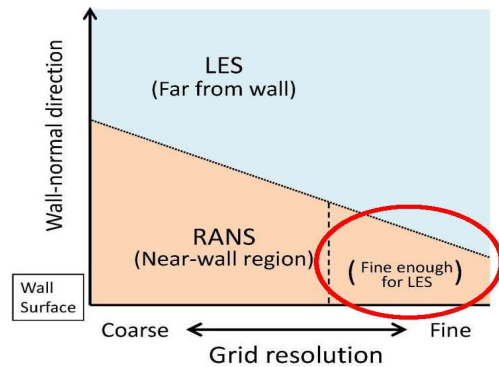
本研究では、工学的に重要な乱流解析分野において近年注目を集めている、ラージ・エディ・シミュレーション(LES)とレイノルズ平均ナビエ・ストークス(RANS)モデルを融合させた「LES/RANS ハイブリッドモデル」に焦点をあて、新規発想に基づく壁面近傍の乱流特性スケールを適切に反映した LES/RANS 接続関数を開発・導入することにより、従来世の中で用いられてきた LES/RANS ハイブリッドモデルの飛躍的な高性能化・汎用化を図る。

3. 研究の方法

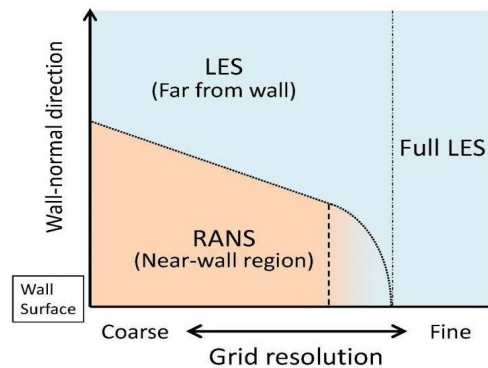
従来の接続手法では、図3上に示すように、細かい格子解像度であっても必ず壁面近傍でRANSが採用される。最近では、比較的低いレイノルズ数の乱流解析ではLESが十分可能な格子解像度を確保できることも多いが(図3上の赤丸で囲んだ領域)、従来のLES/RANSハイブリッドモデルを適用すると壁面近傍は必ずRANSになり、前述の通り純粋なLESよりもむしろ予測精度が低下することが知られている。この問題を解決するためには、格子解像度が十分な場合には全領域でLESを適用することが望ましいが、この要求を満足するための接続関数は物理現象と格子解像度に応じて自動的に接続形態が変化する図3下のような特性を有する必要がある。ちなみに、従来の概念のような格子幅と壁からの距離の情報だけから接続位置を判断する手法でこれを実現することは不可能である。

本研究では、この課題を解決すべく、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する。そのために、まず種々の格子解像度・レイノルズ数の乱流解析を実施し、テイラスケールやコルモゴロフスケールといった壁面近傍の乱流特性を詳細に検討する。その知見をもとに、従来から用いている壁からの距離や格子幅とこれら乱流スケールとの関係を適切に反映できるLES/RANS接続関数を新たに構築し、図3下のような特性を実現する。

この目的を達成するためには、先に採択された研究課題(24560197)において解決に努力した図4に示す主要な3つの課題を、より学術的に高いレベルでクリアしていく必要がある。端的に述べると以下のように説明できる。



従来のハイブリッド手法



理想的なハイブリッド手法

図3

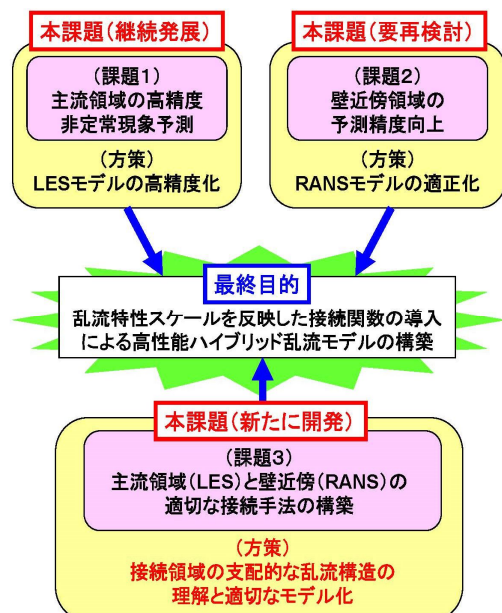


図4

- 課題1：主流領域の LES 解析で用いる SGS モデルの予測性能のさらなる向上が必要である。
- 課題2：図3下に対して、従来の2方程式 RANS では壁面上で LES と RANS が切り替わる際に散逸率の境界条件に問題が発生すると予想される。現在の SGS モデルが1方程式モデルであることから、同形式の境界条件が適用可能な高精度1方程式 RANS モデルの開発が必要である。
- 課題3：前述の通り、本研究の最も鍵となるのは、LES と RANS の接続位置を壁からの距離や格子幅だけでなく壁面近傍の乱流特性も踏まえて決定できる手法を新たに構築することである。

本研究目的を達成するために、図5に示すスケジュールに沿って前出の3つの主要課題を解決し、LES/RANS ハイブリッドモデルの飛躍的な高性能化・汎用化を図る。本研究では、壁面近傍の格子解像度と物理現象を鑑みて LES が十分可能であると判断した際に、乱流モデルが自動的に LES/RANS ハイブリッドモデルから純粋な LES に切り替わるという点に独創性がある。従来このような判断は経験を持った技術者に委ねられてきたが、その自動化により実用レベルの高 Re 数非定常複雑乱流場の予測がより身近になることが期待できる。

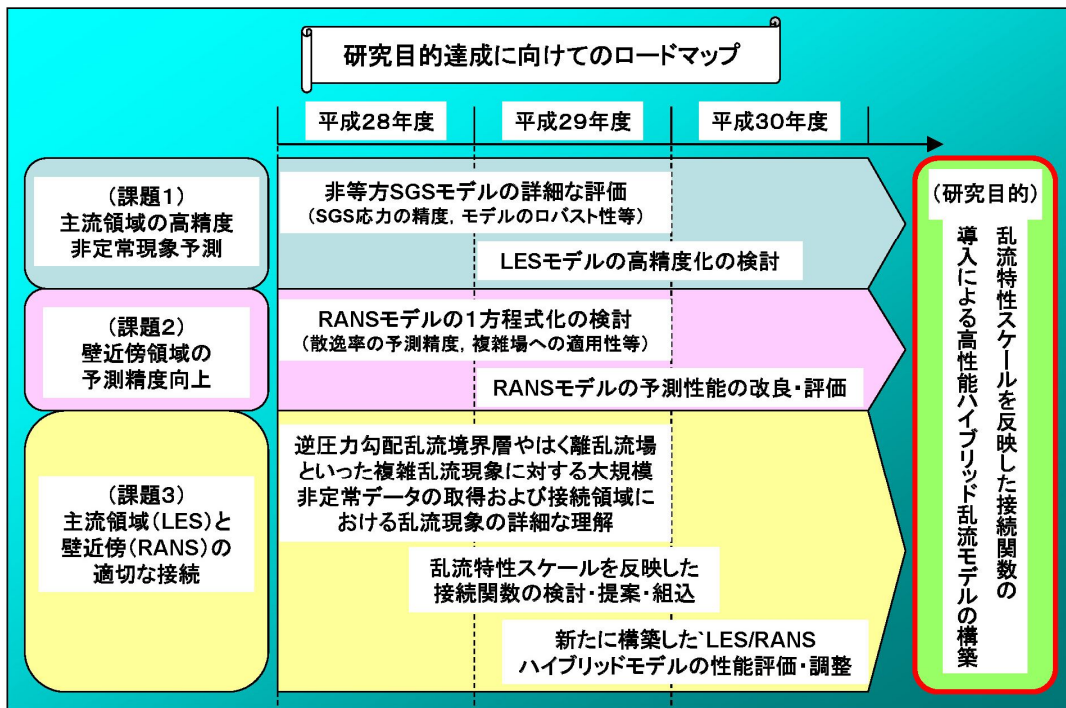


図5

4. 研究成果

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」に焦点をあて、新規発想に基づく壁面近傍の乱流特性スケールを適切に反映した LES/RANS 接続関数を開発・導入することにより、従来世の中で用いられてきた LES/RANS ハイブリッドモデルの飛躍的な高性能化・汎用化を実現した。

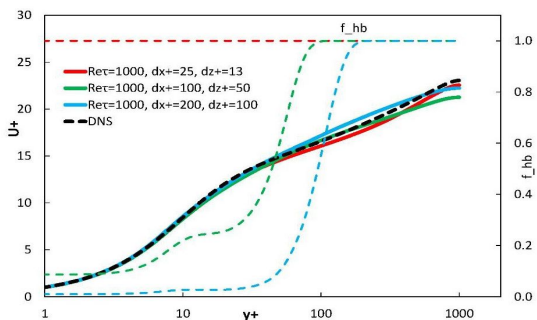
特筆すべき成果としては、以下の3点が挙げられる。

- (1) LES 用の 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。

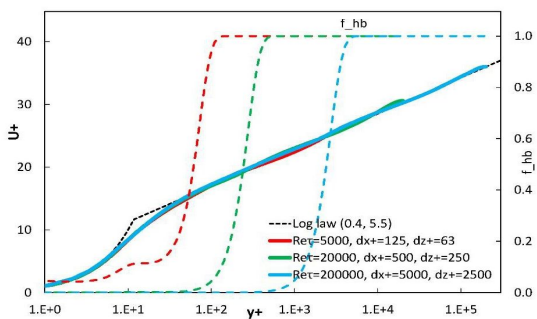
- (2) LES と共通の基本表式を有する非線形 1 方程式 RANS モデルを新たに開発・導入することにより、乱流諸量の壁面境界条件に至るまで同形式の表現を採用することを可能とし、壁面上においても LES と RANS のスムーズな接続を実現した。
- (3) 従来の手法では細かい格子解像度であっても必ず壁面近傍で RANS が採用されるという課題を解決すべく、LES と RANS の接続位置を壁面近傍の乱流現象の特性に基づいて決定する手法を新たに構築し、理想的な接続状態を実現した。

本研究で開発した LES/RANS ハイブリッドモデルの予測性能を示す例として、チャンネル乱流を例に種々の格子解像度および種々のレイノルズ数の条件で実施した計算結果を図 6 に示す。良好な予測結果とともに、図 6 (a)の赤線が示すように、高解像度の場合に図 3 下の要求 ($f_{hb}=1 \rightarrow$ 全領域 LES) を達成している。さらに、図 6 (b)中の $Re_{\tau}=2 \times 10^5$ (パルク 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、高い基本予測性能を示している。

このように本研究で開発した LES/RANS ハイブリッドモデルは、壁面近傍の格子解像度と物理現象を鑑みて LES が十分可能であると判断した際に、乱流モデルが自動的に LES/RANS のハイブリッドから純粋な LES に切り替わるという点に独創性がある。上述の特徴をすべて有する LES/RANS ハイブリッドモデルは世界的にも他に類を見ない。



(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 6

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

Yangrong ZHANG, Hisashi KIHARA, Ken-ichi ABE, On the Effect of an Anisotropy-Resolving Subgrid-Scale Model on Large Eddy Simulation Predictions of Turbulent Open Channel Flow with Wall Roughness, *Journal of Turbulence*, 査読有、Vol. 18, pp. 809-824 (DOI: 10.1080/14685248.2017.1333617), 2017

Yangrong ZHANG, Hisashi KIHARA and Ken-ichi ABE, Three-Dimensional Simulation of Self-propelled Fish-Like Body Swimming in a Channel, *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, Vol. 12, pp. 473-492, (DOI: 10.1080/19942060.2018.1453381), 2018

Ken-ichi ABE, Improvement of Double-Buffer Problem in LES-RANS Interface Region by Introducing an Anisotropy-Resolving Subgrid-Scale Model, *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, Vol. 32, pp. 263-283, (DOI: 10.1007/s00162-018-0453-5), 2018

〔学会発表〕(計7件)

島中大輝, 木原尚, 安倍賢一, 李曄, 岡本哲, 非等方SGSモデルを導入した簡易車体形状周
り流れのLarge Eddy Simulation, 第30回数值流体力学シンポジウム, 講演論文集, 2016

山本英貴, 木原尚, 安倍賢一, 李曄, 岡本哲, 実走行条件における簡易車体形状周り流れの
Large Eddy Simulation, 第31回数值流体力学シンポジウム, 講演論文集, 2017

鳥居裕規, 木原尚, 安倍賢一, 固有直交分解を用いた円柱周りの非定常流れの構造解析につ
いて, 第31回数值流体力学シンポジウム, 講演論文集, 2017

Soomin PARK, Hisashi Kihara, Ken-ichi Abe, Numerical Study on the Condensed and
Frozen Water Vapor on a Flat Plate Using an Open Source Code, Proceedings of the
48th AIAA Fluid Dynamics Conference, 2018 AIAA Aviation and Aeronautics Forum
and Exposition, Atlanta, Paper No. 53-ASE-3, 2018

Ken-ichi ABE, Performance of an Anisotropy-Resolving Hybrid LES/RANS Model for
High Reynolds-Number Turbulent Channel Flows up to $Re_{\tau} = 2 \times 10^{*5}$, Proceedings
of 9th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer, Rio de
Janeiro, Paper No. S13.1, 2018

小川圭, 木原尚, 安倍賢一, 李曄, 岡本哲, 物体から放出される非定常渦構造と空力特性の
関係に関する数値解析的研究, 第32回数值流体力学シンポジウム, 講演論文集, 2018

平井直人, 木原尚, 安倍賢一, 縦渦の相互干渉が空力特性に与える影響に関する数値解析的
研究, 第32回数值流体力学シンポジウム, 講演論文集, 2018

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

なし

6. 研究組織

研究代表者

安倍 賢一 (ABE, Ken-ichi)

九州大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号: 20315104

(1)研究分担者: なし

(2)研究協力者: なし