

令和 2 年 5 月 28 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06143

研究課題名(和文)ハイブリッド乱流計算の境界面における乱れ生成のモデリング

研究課題名(英文) Modeling of turbulence generation at the interface of hybrid turbulence simulation

研究代表者

半場 藤弘 (Hamba, Fujihiro)

東京大学・生産技術研究所・教授

研究者番号：20251473

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：RANSとLESのハイブリッド乱流計算における境界面の乱れ生成を適切にモデル化するために、スケール空間のエネルギー輸送とそれに伴う渦構造の解析を行った。二点速度相関を用いてスケール空間の新たなエネルギー密度を提案し、チャンネル乱流のDNSデータを解析することにより、スケール空間でエネルギーの逆カスケードを伴う縦渦構造を抽出した。その縦渦構造を維持し適切な乱れを生成するためのLESモデルの検証を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自然界や工学分野でよく見られる高レイノルズ数乱流をLESで数値計算する際、壁面近くや上流領域でRANSを用いることが多い。RANSからLESへ切り替わる境界面近くでは乱れ速度の生成を適切に再現する必要がある。単に経験的な関数で乱れを付け加えるのではなく、物理的な機構に基づくモデル式を提案するために、本研究で行われたスケール空間でのエネルギー輸送とそれに伴う渦構造の解析は重要な役割を果たす。

研究成果の概要(英文)：Vortical structures associated with the energy transfer in the scale space were examined to adequately model the turbulence generation at the interface between the RANS and LES regions of hybrid turbulence simulation. A new energy density in the scale space was proposed using the two-point velocity correlation and it was applied to the analysis of the DNS data of turbulent channel flow. As a result, streamwise vortical structures were found which are associated with the inverse energy cascade in the scale space. LES models were examined to sustain the vortical structures and to adequately generate the turbulent fluctuations.

研究分野：流体物理学

キーワード：乱流モデル RANS LES ハイブリッドモデル

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

計算機の発達に伴いラージ・エディ・シミュレーション(LES)が機械工学を初めさまざまな分野の乱流計算で応用されつつあるが、より正確に計算を行うには重要な課題が二つある。一つは壁面近くの流れのモデル化すなわち壁面モデルである。壁近くで LES をレイノルズ平均モデル(RANS)に切り替える方法が一つの有効な手段として近年用いられている¹⁾。しかし壁面近くでの乱流剪断応力が過小評価され、それに伴い平均速度勾配が過大評価されるという問題があり、回避する方法はいくつか提案されているが、剪断応力の過小評価を含め根本的には未解決である。

もう一つは LES による非定常乱流の計算を行うには、上流から流入する乱れ速度場を適切に設定する必要がある。多くの場合は流入境界条件として平均速度や乱流エネルギーなどの平均量の分布しか与えられておらず、揺らぎ部分の非定常な乱れ速度場を何らかの方法で生成する必要がある²⁾。

2. 研究の目的

本研究ではこの二つの課題が、レイノルズ平均モデル(RANS)と LES のハイブリッド乱流計算の境界面での乱れ速度生成の機構と密接に関連することに着目する³⁾。RANS 領域から LES 領域に移る境界面で、隠れたエネルギーフラックスが存在する。これらのエネルギーフラックスや乱れ速度の復活を正しく数値予測するには、単に乱数を用いて乱れ速度を作るのではなく、それぞれの長さスケールに対応する乱流エネルギーを扱う必要がある。

そこで開発が進んでいる一様等方乱流の理論を非一様乱流に応用することによって、乱流の基礎方程式に基づいて適切な乱れ速度を生成する方法を導く。壁面近くでの乱流剪断応力の不足を解消する適切な壁面モデルを導出し、また流体方程式に従う自然な流入乱流場の生成方法を開発し、課題の解決を試みる。

3. 研究の方法

(1) スケール空間のエネルギー輸送の解析

RANS 領域と LES 領域の境界面でのエネルギーフラックスをとらえるためには、レイノルズ平均とフィルター平均それぞれに伴うスケールでのエネルギー輸送を理解する必要がある。そこで二点速度相関にフィルター関数による積分を施すことによって、スケール空間における新たなエネルギー密度を提案し、エネルギーの輸送方程式を定式化する。チャンネル乱流の直接数値計算(DNS)のデータを用いて、スケール間のエネルギー輸送の解析を行う。

(2) 条件付き平均による渦構造の抽出

エネルギー輸送に伴いどのような乱流運動が生じているのかをつかむため、条件付き平均法を用いて渦構造を抽出する。渦に伴うどのような流れが大スケールの乱れを作り、エネルギーフラックスを担っているかを考察する。

(3) 乱れを適切に生成する LES モデルの精査

上記の解析で得たエネルギー輸送や渦構造を適切に表現するための LES モデルを、既存のモデルや方程式を調べるにより精査する。

4. 研究成果

(1) スケール空間のエネルギー輸送の解析

チャンネル乱流の DNS のデータを用いて、スケール空間でのエネルギー輸送を解析した。特にチャンネルの主流方向の 2 点相関により、スケール空間のエネルギーフラックスを調べたところ、多くの地点では大スケールから小スケールへ流れる通常のカスケードが見られたが、スパン方向成分のエネルギーについては壁近くで小スケールから大スケールへ流れる逆カスケード現象が見られた。図 1 において、縦軸は壁垂直方向の座標で $y=-1$ は壁面を表し、横軸はスケールの大きさを表す。赤の等高線は正のフラックス(小スケールから大スケールへの逆カスケード)を示す。

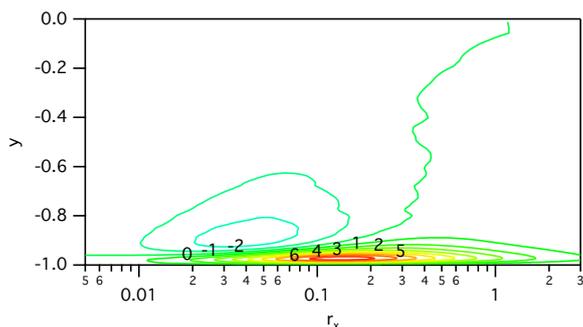


図1 スケール空間におけるエネルギーフラックス

(2) 条件付き平均による渦構造の抽出

上記の解析により壁面近くで逆カスケード現象が起こっていることがわかったが、統計量だけではどのような流体運動がその現象を引き起こしているかはわからない。しかし、瞬時の乱流場を可視化しても速度場は複雑であり、理解が難しい(図 2)。

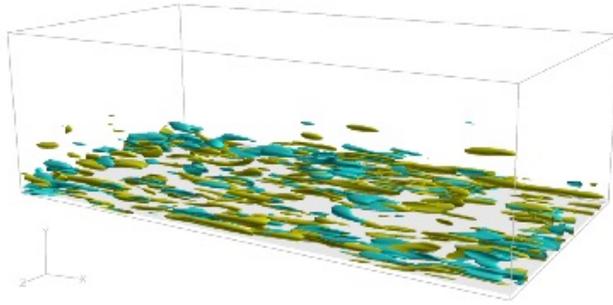


図 2 チャンネル乱流の瞬時場の渦分布

そこで条件付き平均法を用いて、逆カスケード現象に伴う典型的な渦構造を抽出することを試みた。条件としては、各点におけるサブグリッドスケールのエネルギー生成率を用いた。すなわち生成率が負のときにエネルギー逆カスケードに対応することに着目した。その結果図 3 のように、主流方向を向いた大きな縦渦と、その上流に逆方向に回転する小さな縦渦が見られた。特に二つの渦が近づく領域で負のエネルギー生成率(図 3 の青の等値面)、すなわち逆カスケード現象が起こっていることがわかった。このような縦渦構造を適切に再現することが、乱れ生成の LES モデルの役割として重要であることを示唆する。

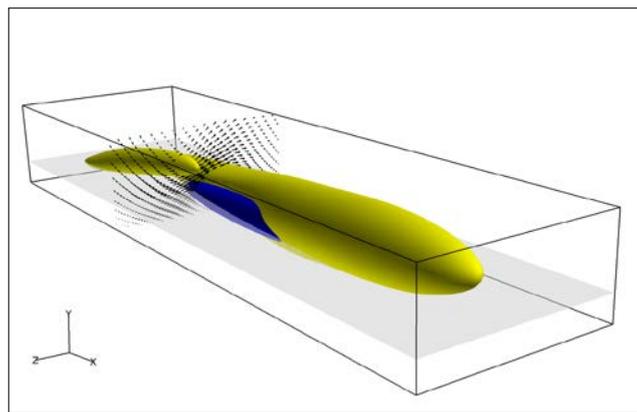


図 3 条件付き平均で抽出された渦構造

(3) 乱れを適切に生成する LES モデルの精査

上述の渦構造を RANS と LES の境界面でも適切に再現し、乱れを生成する LES モデルの候補として、Abe⁴⁾による非等方 LES モデルを考察した。その結果高波数成分でもエネルギースペクトルが適切に維持され、フィルター幅スケールでの渦構造がよく再現されることが示唆された。

またその他の LES モデルとして非線形渦粘性モデルを考えるため、レイノルズ応力の平方根テンソルを導入して、実現性条件を満たす高次非線形モデルを導出しいくつかの流れ場で検証した。さらにその際係数として必要となるエネルギー散逸率の輸送方程式を、乱流の統計理論を用いて理論的に数値的に考察した。

〈引用文献〉

- 1) P. R. Spalart, Annu. Rev. Fluid Mech. Vol. 41, p. 181, 2009.
- 2) T. S. Lund, et al., J. Comput. Phys. Vol. 140, p. 232, 1998.
- 3) F. Hamba, Phys. Fluids, Vol. 23, p. 015108, 2011.
- 4) K. Abe, Int. J. Heat Fluid Flow, Vol. 39, p. 42, 2013.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 5件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 7件）

| | |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名 Hamba Fujihiro | 4. 巻 4 |
| 2. 論文標題 Inverse energy cascade and vortical structure in the near-wall region of turbulent channel flow | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review Fluids | 6. 最初と最後の頁 114609 1-18 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevFluids.4.114609 | 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 Inagaki Kazuhiro, Ariki Taketo, Hamba Fujihiro | 4. 巻 4 |
| 2. 論文標題 Higher-order realizable algebraic Reynolds stress modeling based on the square root tensor | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review Fluids | 6. 最初と最後の頁 114601 1-18 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevFluids.4.114601 | 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 Inagaki Kazuhiro, Hamba Fujihiro | 4. 巻 3 |
| 2. 論文標題 Energy transport due to pressure diffusion enhanced by helicity and system rotation in inhomogeneous turbulence | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review Fluids | 6. 最初と最後の頁 124601 1-23 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevFluids.3.124601 | 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 Hamba Fujihiro, Kanamoto Kouta | 4. 巻 33 |
| 2. 論文標題 Analysis of destruction term in transport equation for turbulent energy dissipation rate | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Theoretical and Computational Fluid Dynamics | 6. 最初と最後の頁 181 ~ 196 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00162-019-00490-2 | 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 Hamba Fujihiro | 4. 巻 842 |
| 2. 論文標題 Turbulent energy density in scale space for inhomogeneous turbulence | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics | 6. 最初と最後の頁 532 ~ 553 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jfm.2018.155 | 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18件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

| |
|--|
| 1. 発表者名 F. Hamba |
| 2. 発表標題 Energy cascade and vortex structure in turbulent channel flow |
| 3. 学会等名 Proceedings of 11th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena, 2A-1 (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 K. Inagaki, T. Ariki, F. Hamba |
| 2. 発表標題 A realizable turbulence model for the Reynolds stress based on the square root tensor |
| 3. 学会等名 Proceedings of 17th European Turbulence Conference, 151 (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 稲垣和寛, 小林宏充 |
| 2. 発表標題 サブグリッドスケール乱流モデルにおける生成散逸非平衡効果の検討 |
| 3. 学会等名 日本流体力学会年会2019講演論文集, 乱流(1)-3 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 半場藤弘 |
| 2. 発表標題 チャンネル乱流におけるエネルギー逆カスケードと衝突流 |
| 3. 学会等名 第33回数値流体力学シンポジウム講演論文集, A06-3 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 稲垣和寛, 小林宏充 |
| 2. 発表標題 非等方解像SGS乱流モデルにおける非等方項の物理的役割 |
| 3. 学会等名 第33回数値流体力学シンポジウム講演論文集, A07-3 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 K. Inagaki, F. Hamba |
| 2. 発表標題 Modeling the energy flux enhanced in rotating inhomogeneous turbulence |
| 3. 学会等名 Proceedings of the interdisciplinary Turbulence initiative (iTi) 2018, p.29 (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 半場藤弘 |
| 2. 発表標題 チャンネル乱流におけるエネルギーカスケードと渦構造 |
| 3. 学会等名 日本流体力学会年会2018講演論文集, 乱流(3)-2 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 半場藤弘 |
| 2. 発表標題 乱流エネルギー散逸率輸送方程式のレイノルズ数依存性 |
| 3. 学会等名 第31回数値流体力学シンポジウム |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 稲垣和寛, 有木健人, 半場藤弘 |
| 2. 発表標題 Reynolds応力の平方根を用いた実現性条件を満足する乱流モデルの定式化 |
| 3. 学会等名 第31回数値流体力学シンポジウム |
| 4. 発表年 2017年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

| |
|---|
| <p>東京大学 生産技術研究所 半場研究室 研究内容 http://www.iis.u-tokyo.ac.jp/~hamba/research.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 |
|-------|---------------------------------|-----------------------|----|
| 研究協力者 | 稲垣 和寛 (Inagaki Kazuhiro) | | |