

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 1 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420122

研究課題名(和文)乱流中のスケール間エネルギー輸送の解析的評価

研究課題名(英文)Analytical assessment of energy transfer across scales in turbulence

研究代表者

小林 宏充 (KOBAYASHI, Hiromichi)

慶應義塾大学・法学部(日吉)・教授

研究者番号：60317336

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：格子サイズ以上の渦は直接計算し、格子サイズ(SGS)以下の渦はモデル化するラージエディシミュレーション(LES)において、SGSモデル項の影響は、直接計算から検討できるが、複雑な乱流中ではその振る舞いはよくわからない。そこで、解析的な漸近解が知られ、乱流中の渦を模擬している楕円形バーガス渦に空間フィルタをかけることで、楕円渦周りのSGSエネルギー輸送について検討をした。その結果、大きなスケールから小さなスケールへのエネルギーの順輸送とその逆輸送は、楕円渦の周りに四重極に分布することがわかった。また、LESでモデル化するSGS応力テンソルの各項目のエネルギー輸送の違いも可視化して明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In large-eddy simulation (LES), the grid-scale eddy is directly computed, and the subgrid-scale (SGS) eddy is modeled. The effect of the SGS modeled term on the energy transfer is assessed by using direct numerical simulation. However, the behavior of the modeled term is unclear because turbulence is complicated. It is well known that the eddy in turbulence is approximated by the elliptic Burgers vortex. In this study, by taking the filter operation to the elliptic Burgers vortex with asymptotic solution, we examine the SGS energy transfer around the elliptic vortex in LES. As a result, we found that the SGS energy transfer from large scale to small scale, i.e., forward scatter, and the backward energy transfer, namely, backscatter distribute as a quadrupole around the vortex. Moreover, we revealed the difference of the SGS energy transfer distribution by each modeled term in the SGS stress tensor.

研究分野：流体力学

キーワード：流体力学 乱流 数値流体力学 LES 渦 エネルギー輸送 SGSモデル

1. 研究開始当初の背景

(1) 乱流モデルの一種であるラージエディシミュレーション (LES) では、格子サイズ以上のグリッドスケール (GS) の渦は直接計算し、格子サイズ以下のサブグリッドスケール (SGS) の渦はモデル化が行われる。その代表的な渦粘性モデルは、GS から SGS へのエネルギーの順輸送のみを考慮しているため、数値的に安定に計算ができるが、エネルギー輸送レベルでの空間相関を高めるためにはバックscatterと呼ばれるエネルギーの逆輸送の効果を含めることが重要とされてきた。しかしながら、そのようなモデルで実際に数値計算を行うと負の粘性係数が与えられ、計算が発散してしまう困難があった。

(2) また、SGS 応力テンソルをモデル化する際に、そのテンソルを GS 間の相関である Leonard 項 (L 項)、GS-SGS 間の相関である Cross 項 (C 項)、SGS 間の相関である Reynolds 項 (R 項) と分解をして、それぞれの意味を明確にする試みがなされた。その結果、L 項は GS 速度で直接計算し、C 項は Bardina モデルとするとテンソルレベルでの空間相関が高くなること、R 項はテンソルレベルで空間相関の高いモデルは見つかっていないが、GS から SGS へのエネルギー輸送を考えるとスカラーレベルでの観点では R 項はスマゴリンスキーモデルでモデル化すると空間相関が高くなることが報告されてきた。

(3) 実際の乱流場に対して検証した結果は、非常に重要であるが、一方で、それら分解された項がどのような物理的意味を持つのか、つまり渦の周りでどのようにエネルギーを輸送しているのか、その輸送項やテンソルレベルでの空間分布の違いは不明瞭のままである。

(4) さらに上記 L, C, R 項の分解がガリレイ不変性を満たしていないとして Germano によって提唱された修正 L, C, R 項といった分解があるが、その修正の結果、それぞれの項の表現の違いが空間分布に与える影響やその違いの物理的意味は未解明のままである。

(5) これらの物理的意味は、解析的漸近解が知られている渦を利用して、L, C, R 項などを解析的に求めることで、どの項が異なるのか、どの項が効いているのが明確になると考えられる。また解析的漸近解が得られることで、空間相関を解析的に求め、空間分布を可視化することが可能となり、これまで直接計算 (DNS) を実行しないと検討できなかった SGS モデルのアプリオリテストが、簡便にできる可能性がある。

2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、解析的漸近解をもつ渦 (乱流中で見られる渦に近い楕円形バーガ

ーズ渦) に粗視化フィルタをかけることで得られる、LES で用いられる SGS 応力テンソルやそのモデル化した SGS テンソルの分解の意味を理解し、モデルとの空間相関を解析的、数値的に求めることである。

(2) さらに、カノニカルな乱流や電磁流体乱流の DNS を実行し、その乱流中の渦をフィルタ化した SGS テンソルと解析的な評価方法で得られた知見とを比較して、新しいアプリオリテストとしての検証を試みる。

3. 研究の方法

(1) 解析的漸近解が知られている渦に対して、粗視化フィルタをかけ、スカラーレベルの SGS エネルギー輸送分布やベクトル、テンソルレベルでの空間分布を解析的および数値的に検証する。

4. 研究成果

(1) 楕円形バーガーズ渦周りでの SGS エネルギー輸送は、GS から SGS への順輸送が起こる領域と SGS から GS への逆輸送が起こる領域とが、それぞれ 2 つの極大をもって、渦周りに四重極構造をもつことがわかった。また、それらの分布は周方向に積分すると打ち消しあい、渦中心に順輸送領域が現れることがわかった。

(2) SGS エネルギー輸送項は、L 項、C 項、R 項からの寄与に分解できるが、L 項と C 項に起因する SGS エネルギー輸送の空間分布は逆相関となることがわかった。さらにそれぞれの項をガリレイ不変性を満たすように分解しなおした修正 L 項、修正 C 項、修正 R 項による SGS エネルギー輸送の分布は、修正前と同様の分布となると考えられていたが、C 項と修正 C 項は、逆の空間相関をもつことがわかった。

(3) 代表的な渦粘性型 SGS モデルであるスマゴリンスキーモデルは、速度歪成分が極大をとる楕円渦の長軸方向 (斜め方向) に SGS エネルギーの順輸送が起こることがわかった。これは、楕円渦にフィルタをかけて得られる真の SGS エネルギー輸送項の順輸送分布が、背景場による圧縮方向 (x 軸) に現れ、逆輸送は伸張方向 (y 軸) に現れることと比較して、45 度ずれている。また、スケール相似則を用いて C 項と R 項をモデル化する Bardina モデルを用いると、モデル化された C 項と R 項に起因する SGS エネルギー輸送の空間分布は、それぞれよく似ている分布となるが、どちらも真のエネルギー輸送分布とは逆相関になることがわかった。相似則モデルを用いることで、テンソルレベルでは相関が高くと、エネルギーレベルでは空間相関が落ちることがあることも明らかになった。

(4) Navier-Stokes 方程式中に SGS 応力テン

ソルの微分で現れるベクトルレベルの SGS 力の空間分布を調べた。その結果、スマゴリンスキーマモデルに代表される渦粘性モデルによる SGS 力は楕円渦が作り出す回転する渦ベクトルとは反対方向に回転する力を与えることがわかった。つまり、渦粘性モデルは渦の回転を減速するように作用することがわかった。一方、相似則モデルである Bardina モデルや修正 L 項のテーラー展開の第 1 項である Clark 項といった非線形項は、渦粘性モデルによる SGS 力とは垂直方向に作用し、渦粘性とは別の力を与えることがわかった。Clark 項の作り出す SGS 力は楕円渦の長軸方向外向き、短軸方向内向きで、真の SGS 力との相関が高くなったが、Bardina モデルによる SGS 力は長軸短軸ともに外向きの力となることがわかった。

(5) 一様等方性乱流の DNS 計算を実行し、楕円形バーガーズ渦周りでの解析結果同様、2 次元のとみなせる細長い渦の周りでは、エネルギー順輸送と逆輸送の分布は四重極分布となることを明らかにした。また、矩形ダクト中の電磁流体乱流の計算を行い、2 次元化した渦構造、磁場中の 3 次元渦構造を抽出した。

(6) 本解析の知見を活かし、Clark 項のみを用いたモデルを検討し、平行平板間乱流において良好な結果を得た。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1 件)

Hiromichi Kobayashi, Yoshihiro Okuno, Turbulent and Electrical Phenomena in a Liquid Metal MHD Energy Conversion Device under Various Load Conditions, IEEJ Transactions on Power and Energy, 査読有, Vol. 136, No. 10, pp. 773-778, 2015, DOI:10.1541/ieejpes.136.773

[学会発表](計 15 件)

Hiromichi Kobayashi, Analytical study on the SGS force around an elliptic Burgers vortex, the 69th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, 2016 年 11 月 20 日-22 日, Portland (USA)

長谷川雄太, 青木 尊之, 小林宏充, 適合格子細分化法を導入した格子ボルツマン法の GPU 計算による自転車競技の空力解析, 日本機械学会 第 29 回計算力学講演会, 2016 年 9 月 22 日-24 日, 名古屋大学 (愛知県・名古屋市)

小林宏充, 楕円形バーガーズ渦周りの SGS 力に関する解析, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016 年 9 月 13 日-16 日, 金沢大学 (石川県・金沢市)

Hiromichi Kobayashi, Energy transfer across scales around elliptic Burgers vortices, The 24th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (The 24th ICTAM 2016), 2016 年 8 月 21 日-26 日, Montreal (Canada)

Hiromichi Kobayashi, A new method of a priori test using analytical solution of flows around elliptical Burgers vortex, European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS Congress 2016), 2016 年 6 月 5 日-10 日, Crete Island (Greece)

Yuta Hasegawa, Takayuki Aoki, Hiromichi Kobayashi, Aerodynamics study using locally mesh-refined lattice Boltzmann method for a GPU computation, European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS Congress 2016), 2016 年 6 月 5 日-10 日, Crete Island, (Greece)

小林宏充, LES における楕円形バーガーズ渦を用いたアプリオリテストの検討, 第 31 回生研 TSFD シンポジウム, 2016 年 3 月 9 日, 東京大学生産技術研究所 (東京都・目黒区)

小林宏充, 古典乱流中に見られる楕円形バーガーズ渦周りのスケール間エネルギー輸送の解析, 平成 27 年度物性研究所短期研究会, 量子乱流と古典乱流の邂逅, 2016 年 1 月 5 日-7 日, 東京大学物性研究所 (千葉県・柏市)

小林宏充, LES における楕円形バーガーズ渦周りの SGS エネルギー輸送, 第 29 回数値流体力学シンポジウム, 2015 年 12 月 15 日-17 日, 九州大学 (福岡県・春日市)

長谷川雄太, 青木 尊之, 小林宏充, Octree 細分化格子を導入した格子ボルツマン法による乱流の GPU 計算, 第 29 回数値流体力学シンポジウム 2015 年 12 月 15 日-17 日, 九州大学 (福岡県・春日市)

小林宏充, 楕円形バーガーズ渦周りの SGS エネルギー輸送に関する解析, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015 年 9 月 16 日-19 日, 関西大学 (大阪府・吹田市)

Hiromichi Kobayashi, Energy transfer around Burgers vortex for LES, ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2015, 2015年7月26日-31日, Soul (Korea)

Hiromichi Kobayashi, Liancheng Hu, Yoshihiro Okuno, Numerical Study on Liquid Metal Magnetohydrodynamic Turbulent Flows under Various Electrical Circuit Conditions, International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences (ICCES'15), 2015年7月20日-24日, Reno (USA)

Hiromichi Kobayashi, Analytical and numerical analyses of energy transfer around elliptical Burgers vortices for LES, The 9th Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (TSFP-9), 2015年6月30日-7月3日, Melbourne (Australia)

Hiromichi Kobayashi, Analytical approach to the energy transfer around elliptic Burgers vortices, the 67th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, 2014年11月23日-25日, San Francisco (USA)

〔その他〕

ホームページ等

慶應義塾大学 著書・発表論文・学会発表一覧

<http://k-ris.keio.ac.jp/Profiles/72/0007193/profile.html>

自然科学研究教育センター メンバー紹介

<http://www.sci.keio.ac.jp/member/detail.php?eid=00004>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林 宏充 (KOBAYASHI, Hiromichi)

慶應義塾大学・法学部・教授

研究者番号：60317336