

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25390149

研究課題名(和文) 計算科学的手法による非等方性乱流の動力学の解明及び情報縮約手法の開発

研究課題名(英文) Computational study on dynamics of anisotropic turbulence and development of turbulence modeling

研究代表者

芳松 克則 (Yoshimatsu, Katsunori)

名古屋大学・未来材料・システム研究所・准教授

研究者番号：70377802

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)：直接数値計算を用いて3次元一様乱流の動力学、特に、(1)誤差場の発展、(2)小スケール渦の大スケールの統計への影響、(3)パッシブスカラー乱流の減衰、について調べた。(1)大スケール統計は、小スケールの渦構造に鈍感であること、(2)誤差場のエネルギーは低波数側で波数の4乗、時間の6乗に従って自己相似的に発展すること、大スケールの誤差場が主要な寄与をしていること、(3)スカラー場の大スケール不変量の存在を示した。平行二平板間乱流の直交ウェーブレット解析に基づく情報縮約手法を開発した。約数%の自由度から成る秩序場が、乱流場の統計や渦構造をよく再現することを示した。

研究成果の概要(英文)：We examined dynamics of three-dimensional (3D) homogeneous turbulence, in particular (1) error growth, (2) influence of small-scale vortices on turbulent statistics at large-scale statistics, and (3) decay of passive scalar turbulence, using direct numerical simulation (DNS). We find the following. (1) The large-scale statistics are not sensitive to the vortex structures and dynamics. (2) The error field exhibits self-similar growth so that its energy increases as $k^4 t^6$, where k is a wavenumber and t is time. The large-scale properties of the error play significant roles in the growth. (3) The large-scale invariant of a passive scalar is shown as the first DNS evidence. A turbulent model using orthogonal wavelets was developed for 3D turbulent channel flows bounded by two parallel planes. It is found that coherent vorticity, reconstructed from few intense vorticity wavelet coefficients, well preserves the statistical predictability and vortices of the turbulent flows.

研究分野：計算科学

キーワード：数理物理 乱流 ウェーブレット

1. 研究開始当初の背景

我々の身のまわり至る所にある、乱れた流れ(乱流)の解明は異常気象、汚染物質の拡散など社会の諸問題の解決に重要である。乱流は巨大自由度、多階層、強非線形の現象である。Re 数(流れの非線形性の強さを表す指標)が十分高い乱流には、大スケールの外力や境界条件の詳細に依らない統計的普遍性が、自由度の大半を占める十分小さなスケールに存在すると考えられている。その考えは、乱流の統計理論、及び、乱流モデルの中核となっている。また、エネルギー減衰過程などでは、大スケールの不変性も鍵であると考えられている。しかしながら、その考えの検証や、乱流の動力学の解明では、十分高い Re 数のデータを扱う必要がある。そのため、乱流解明には、発展著しいスーパーコンピュータの高度利用に基づく計算科学的手法、特に乱流の多階層性を捉えた大規模直接数値計算(Direct Numerical Simulation, DNS)及びそのデータ解析が強力な手段となってきた。計算科学による乱流現象の解明が期待されている。

一方、地球規模の流れや自動車周りの乱流の DNS は、その巨大自由度のため、近い将来現れると考えられるスーパーコンピュータをもってしても不可能である。そのため、数理・物理的根拠もった乱流の自由度縮約手法の開発も期待されている。その縮約手法として、ウェーブレット解析に基づいて全体のわずか数%の自由度から構成される乱流の秩序構造を抽出しその時間発展を捉える情報縮約手法、秩序渦度シミュレーション手法(Coherent Vorticity Simulation, CVS)が開発されてきた。CVS は乱流の小スケールにおける間欠性のみを利用しているため高い拡張性を有する利点がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、計算科学的手法により(1)一様乱流及び非一様乱流の動力学を解明すること、(2)その知見に整合するウェーブレット解析を用いた乱流の情報縮約手法を開発することである。

3. 研究の方法

(1) 乱流の動力学の解明

(a) 一様乱流の二つの場の差(誤差場)の発展、(b)小スケール渦の大スケールの統計への影響、(c)スカラー場を伴う乱流の減衰、などについて調べた。スーパーコンピュータを用いて、乱流の DNS を実行した。3次元周期境界条件の下、フーリエスペクトル法と4次精度ルンゲクッタ法を用いた(格子点数 $512^3, 1024^3$)。(a)乱流場と、その乱流場の高波数成分をランダム化した場を初期場として、二つの場の DNS を行った。その場の差の統計を各時刻で求めた。(b)小スケール渦を破壊する加振を開発し、その加振を受けた乱流の数値シミュレーションを実施した。その結果

を基の乱流の統計と比較する計算機診断を行い、小スケール渦の大スケール統計への影響を調べた。開発した加振は、エネルギーを生み出さず、ソレノイダルである。(c)乱流を用いて、軸対称な初期速度場だけでなく、軸対称な初期スカラー場も作成した。様々な非等方性をもつ初期場に対して、スカラー場を伴う乱流の DNS を実施した。

また、低磁気レイノルズ数の一様乱流の DNS を実行し、Coiflet12を用いた3次元直交ウェーブレット解析により、非等方な間欠性について調べた。回転乱流の柱状渦構造形成への壁面の影響を調べるため、壁水平方向にフーリエスペクトル法を、壁鉛直方向にはチェビシェフ・タウ法を用いて、コリオリ力を受ける平行二平板間乱流の DNS を行った(格子点数 $256^2 \times 192$)。

(2) ウェーブレット解析を用いた乱流の情報縮約手法の開発

壁水平方向にフーリエスペクトル法を、壁鉛直方向にはチェビシェフ・タウ法を用いて、平均圧力勾配を受ける平行二平板間乱流の DNS を行った(格子点数 $256^2 \times 192, 512^2 \times 192$)。粘性項には陰的オイラー法を、それ以外の項には3次精度ルンゲクッタ法を使った。得られた DNS データに対して、直交ウェーブレット解析を行った。壁水平方向には Coiflet30 を使い、壁鉛直方向には、有限区間直交ウェーブレットである CDJV ウェーブレットを用いた。渦度場のウェーブレット係数の大きさがある閾値よりも大きいものだけからなる場、秩序渦度場、を抽出した。残りの場は無秩序渦度場と呼ばれる。ポアソン方程式を解くことにより、これらの渦度場から、秩序速度場、無秩序速度場を求め、得られた場の乱流の統計への影響を評価した。また、壁水平方向のみに2次元ウェーブレット変換を用いて、渦度場の抽出も行い、3次元の結果と比較した。

4. 研究成果

規範的な乱流である3次元一様乱流および平行二平板間乱流に的を絞って研究を実施した。得られた成果の概要を以下に示す。

(1)(a)活発な誤差エネルギー生成は、二つの場の相関がそれほど強くないスケールで起きること、そのスケールよりも大きいスケールの寄与が支配的であることを示した。そのエネルギーの輸送・生成機構はエンストロフィの輸送・生成機構のアナロジーにより解釈される。一様等方乱流における誤差場が、低波数側で波数の4乗、時間の6乗に従って自己相似的に発展することを発見し、大スケールの誤差場が主要な寄与をしていることを示した。また、低磁気レイノルズ数電磁流体乱流中の誤差場は、ほぼ等方的に発展していくことが分かった。すなわち、非等方力の誤差発展への影響は、調べた範囲では弱かった。

(b)一様等方性乱流における小スケール渦の

構造と動力学が大スケール乱流統計に及ぼす影響について定量的に評価した。開発した外力の強さが、典型的な小スケール渦である強いチューブ状の渦を破壊する程度の場合、大スケールの統計にほとんど影響がないことが分かった。外力が小スケール渦の構造と動力学を完全に破壊するほど強い場合は、大スケールの統計にも多大な影響があった。

(c) 濃度などのスカラー場を伴う軸対称一様乱流の減衰則を調べた。パッシブスカラー乱流では、Corrsin の不変量を初めて示した。さらに、十分発達したのちに、スカラー場の非等方性の程度がほぼ保たれることを発見した。密度勾配による浮力を受けた一様成層乱流の減衰も調べた。比較的強い成層の場合に、理論的に予想されている減衰則を部分的に支持する結果が得られた。

回転軸と平板が直交し、平均流の無い平行二平板間回転流れの柱状渦形成について調べた。二平板間の中央に孤立渦を置いた場合、壁面での慣性波の反射により、回転軸方向に伸びた柱状渦構造の形成が促進されることが分かった。この促進は、二平板間の中央に乱流場を置いた場合でも観測された。

低磁気レイノルズ数電磁流体乱流における間欠性について、その非等方性を特徴づけるウェーブレットに基づく指標を提案した。(2) 平行二平板間乱流の秩序構造を、直交ウェーブレット解析により抽出した。特に、壁面近傍の壁水平方向には、一様乱流の場合よりも消失モーメントが高いウェーブレットを使う必要があることが分かった。3次元直交ウェーブレット変換を用いた場合、渦度のウェーブレット強度の上位3%程度だけからなる秩序場が、乱流の渦構造をよくとらえるだけでなく(図1) 統計、動力学が良く再現することが分かった。秩序渦度場の発散は無視できるほど小さいこと、無秩序速度場のゆらぎがロジスティック分布によく従うことも示した。一方、壁水平方向だけに2次元ウェーブレット変換を用いた場合は、渦度のウェーブレット強度が上位約10%まで保持する必要があった。

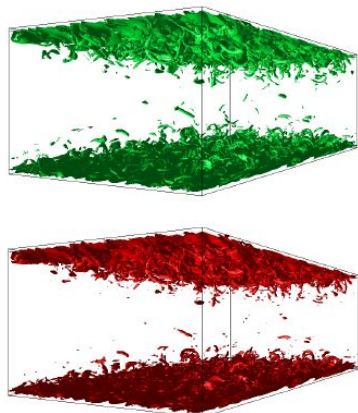


図1. 平行二平板間乱流の強い渦度場の可視化図。(上) 乱流場、(下) 秩序渦度場。

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 3 件)

1. Small-scale anisotropic intermittency in magnetohydrodynamic turbulence at low magnetic Reynolds numbers, N. Okamoto, K. Yoshimatsu, K. Schneider, and M. Farge, Physical Review E, 査読有, 89, 033013, (2014).
2. Influence of vortex dynamics and structure on turbulence statistics at large scales, K. Yoshimatsu, K. Anayama, and Y. Kaneda, Physics of Fluids, 査読有, 25, 055106, (2015).
3. Coherent vorticity in turbulent channel flow: a wavelet viewpoint, K. Yoshimatsu, T. Sakurai, K. Schneider, M. Farge, K. Morishita, T. Ishihara, Ninth International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena, 査読有, 4B-5.pdf (2015).

[学会発表](計 17 件)

1. On the four-fifths law in magnetohydrodynamic turbulence, K. Yoshimatsu, European Turbulence Conference 14, 2013 年, ENS de Lyon, Lyon (France).
2. Predictability of three-dimensional homogeneous turbulence, K. Yoshimatsu, Turbulence Colloquium Mediterranea, 2013 年(招待), Sidi Bou Said (Tunisia).
3. Directional multi-scale statistics of quasi-static magnetohydrodynamic turbulence, N. Okamoto, K. Yoshimatsu, K. Schneider, M. Farge, Turbulence Colloquium Mediterranea, 2013 年, Sidi Bou Said (Tunisia).
4. 一様等方性乱流における小スケールの渦構造の大スケールの統計への影響, 穴山晃士郎, 芳松克則, 金田行雄, 日本流体力学会 年会 2013, 2013 年, 東京農工大学小金井キャンパス, 小金井市, 東京都.
5. 3次元等方乱流の予測可能性, 芳松克則, 日本流体力学会 年会 2013, 2013 年, 東京農工大学小金井キャンパス, 小金井市, 東京都.
6. Directional multi-scale statistics of quasi-static magnetohydrodynamic turbulence, N. Okamoto, K. Yoshimatsu, K. Schneider, and M. Farge, 55th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, 2013 年, Denver, Colorado (USA).
7. 結合コンパクト差分法を用いた3次元熱対流乱流の直接数値計算, 久富夏規, 芳松克則, 石井克哉, 第27回数値流体力学シンポジウム, 2013 年, 名古屋大学, 名古屋, 愛知県.
8. Influence of vortex structure/dynamics on

- turbulence statistics - Is it so significant?, K. Yoshimatsu, K. Anayama, and Y. Kaneda, Waves and Turbulence in Rotating, Stratified and Electrically Conducting Fluids, 2014 年 (招待), University of Cambridge, Cambridge (UK).
9. 乱流における小スケールの渦構造の大スケールの統計への影響, 芳松克則, 穴山晃士郎, 金田行雄, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 2014 年, 中部大学 春日井キャンパス, 愛知県.
 10. Coherent vorticity extraction in turbulent channel flow using orthogonal wavelets, T. Sakurai, K. Yoshimatsu, K. Schneider, M. Farge, K. Morishita, and T. Ishihara, European Fluid Mechanics Conference 10, 2014 年, Technical University of Denmark, Copenhagen (Denmark).
 11. Influence of vortex structure and dynamics on turbulence statistics at large scales, K. Yoshimatsu, K. Anayama, and Y. Kaneda, Séminaire M2P2, Aix-Marseille Université, 2014 年 (招待), Marseille (France).
 12. Coherent vorticity extraction in turbulent channel flow using anisotropic wavelets, K. Yoshimatsu, T. Sakurai, K. Schneider, M. Farge, K. Morishita, and T. Ishihara, 67th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, 2014 年 the Moscone (West) Convention Center, San Francisco, California (USA).
 13. Influence of vortices on turbulence statistics, K. Anayama, K. Yoshimatsu, and Y. Kaneda, 67th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, 2014 年, the Moscone (West) Convention Center, San Francisco, California (USA).
 14. Volume Penalization 法による 3 次元熱対流の数値計算, 澤村陽一, 芳松克則, Kai Schneider, 第 28 回数値流体力学シンポジウム, 2014 年, タワーホール船堀, 江戸川区, 東京都.
 15. Influence of vortex structure and dynamics on turbulence statistics at large scales, K. Yoshimatsu, K. Anayama, and Y. Kaneda, Workshop on New Perspectives in Quantum Turbulence: experimental visualization and numerical simulation, 2014 年 (招待), 名古屋大学, 名古屋, 愛知県.
 16. Influence of vortex dynamics and structure on turbulence statistics at large scales with or without combustion, K. Yoshimatsu, 2015 International Workshop on Computational Science and Engineering, 2015 年 (招待), 名古屋大学, 名古屋, 愛知県.
 17. Coherent vorticity in turbulent channel flow: a wavelet viewpoint, K. Yoshimatsu, T. Sakurai, K. Schneider, M. Farge, K. Morishita, and T. Ishihara, Ninth International Symposium on Turbulence and

Shear Flow Phenomena, 2015 年, The University of Melbourne, Melbourne (Australia).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

芳松 克則 (YOSHIMATSU, Katsunori)
名古屋大学未来材料・システム研究所
准教授
研究者番号：70377802

(2) 研究分担者

岡本 直也 (OKAMOTO, Naoya)
名古屋大学大学院工学研究科
助教
研究者番号：80547414

(3) 連携研究者

石原 卓 (ISHIHARA, Takashi)
名古屋大学大学院工学研究科
准教授
研究者番号：10262495