

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 27 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23560194

研究課題名(和文)高レイノルズ数乱流特有の渦組織構造とその動力学の情報縮約法の開発と計算科学的解明

研究課題名(英文)Computational Science for understanding the vortical structure and vortex dynamics in high Reynolds-number turbulence

研究代表者

石原 卓(Ishihara, Takashi)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10262495

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：一様等方性乱流の大規模直接数値計算(格子点数4096の3乗)で得られたデータを可視化・解析し、高レイノルズ数乱流では、強い渦管が密集して層状の強い組織構造(剪断層)を形成し、低レイノルズ数乱流とは定性的に異なること、および、渦の組織構造(剪断層)はシャープな界面を有し、その界面には速度変動をブロックする働きがあることを明らかにした。また、時系列データの解析によりその剪断層中で非常に強い渦が頻繁に生成・消滅することも明らかにした。さらに、乱流境界層の乱流・非乱流界面が高レイノルズ数乱流中の剪断層と類似の性質を有することを直接数値計算を活用したデータ解析により明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Using direct numerical simulation(DNS) of turbulence in a periodic box with a maximum of 4096 grid points and Taylor micro-scale Reynolds numbers  $R_\lambda$  up to 1131, it is shown that there is a transition in the forms of the significant vortical structures, from isolated vortices (when  $R_\lambda$  is less than 100) to complex thin-shear layers (when  $R_\lambda$  exceeds about 1000). Within the significant layers, strong vortices are generated with micro-scale thickness  $10\lambda$  ( $\lambda$  is the Kolmogorov micro scale). The interfaces of the layers act partly as a barrier to the fluctuations outside the layer. We also performed the DNS of turbulent boundary layers (TBL) along a flat plate to study the properties of turbulent/non-turbulent (T/NT) interface of the TBL. Analysis of the conditional statistics near the interface shows that conditional cross correlations of the streamwise or the wall-normal velocity change sharply across the interface. This is consistent with the blocking mechanism of the interface.

研究分野：流体物理学

キーワード：高レイノルズ数乱流 剪断層 間欠性 直接数値計算

### 1. 研究開始当初の背景

地球シミュレータを用いた一様等方性乱流の格子点数 4096 の 3 乗の大規模直接数値計算 DNS (Yokokawa et al. SC2002) では、エネルギーを保有する大規模渦のスケール ( $L$ : 積分長) と粘性が重要となる最小渦のスケール ( $\eta$ : コルモゴロフ長) の比が 2000 以上に及ぶ広い慣性小領域 (粘性に対して慣性が卓越するスケール領域) を有する乱流データが構築された。そのデータ解析により高レイノルズ数乱流においてエネルギー輸送率の空間平均やエネルギースペクトルなどの低次統計量ではリチャードソンやコルモゴロフの理論とのよい一致が確認されている (Kaneda et al. Phys. Fluids 2003)。また、エネルギー輸送の揺らぎ、速度微分や速度差の空間的変動は間欠性が強く、その間欠性はレイノルズ数が大きいほど、スケールが小さいほど、強くなるという統計的結果も得られている (Aoyama et al. JPSJ 2005, Ishihara et al. JFM 2007)。

しかし、高レイノルズ数乱流場の統計的性質と具体的な渦構造との関係の理解は十分ではない。一方、大規模 DNS (格子点数 4096 の 3 乗) による高レイノルズ数乱流場の高渦度領域の可視化は、渦度の強い管状渦そのものが支配的であった従来の低レイノルズ数乱流場の可視化とは異なり、管状渦が集まってある組織構造を形成し、渦度の弱い領域とのコントラストが非常にはっきりしていることを示している。この事実は多くの研究者から注目されており、中でも、噴流や物体後流の乱流/非乱流のシャープな境界に着目した研究を実施していた、乱流研究の第一人者の一人である Hunt 教授 (UCL) は、その可視化にみられるようなシャープな境界を持つ渦の組織構造が高レイノルズ数乱流の間欠性を理解する鍵であると指摘している。(Hunt et al. J. Hydro-environment Research 2010)

我々は Hunt 教授とその境界を特徴づけるための条件付き統計解析を行い、(i) 高レイノルズ数乱流中には速度の揺らぎの rms 値のオーダーの急激な速度変化が存在していること、(ii) その急激な速度変化のある個所に管状渦が集中し、太さがテイラー長の数倍で大きさが積分長に及び、かつ境界が非常にシャープな渦組織構造 (剪断層や渦管) を形成していること、(iii) 急激な速度変化のある個所でエネルギー輸送が活発であることなどの知見を得た。

これらの結果は全て大規模データ中で見つけた、渦組織構造 (剪断層) のある一断面の解析の結果のみに基づくものであり、得られた結果の普遍性、渦組織構造の 3 次元的形状、トポロジー、分布の他、構造の持続性や動力学については分かっておらず、それゆえ高レイノルズ数乱流の理解も想像の域を出ていないのが現状であった。

### 2. 研究の目的

そこで本研究では、高レイノルズ数乱流特有の重要な性質のひとつであると考えられる、非常にシャープな境界をもつ渦組織構造の特性を統計的に明らかにすることを目的とする。そのため、乱流の世界最大規模直接数値計算データを活用し、

- (1) 渦組織構造を組織的に抽出・解析する情報縮約法の開発
- を実施した後、それを用いて
- (2) 渦組織構造の 3 次元構造、空間分布、特性の統計的解明
  - (3) 渦組織構造の動力学の解明
- を目指した研究を実施展開する。

### 3. 研究の方法

本研究では高レイノルズ数乱流特有の重要な性質のひとつと考えられる、強い管状渦が集合して形成される、非常にシャープな境界をもつ渦組織構造について、その 3 次元構造、空間分布、特性を理解するため、乱流の世界最大規模 (格子点数 4096 の 3 乗) 直接数値計算データを活用した、解析手法の開発と詳細なデータ解析を実施する。具体的には以下の研究項目を実施する。

- (1) 世界最大規模の乱流 DNS データから非常にシャープな境界をもつ渦組織構造を抽出・解析するための情報縮約法を開発する。
- (2) 開発する情報縮約法を用いて組織的な解析を行い、渦組織構造の 3 次元構造と空間分布を把握する。また渦組織構造の特性を各種条件付き統計解析により解明する。
- (3) 乱流場の時間発展を行い、典型的な渦組織構造の持続性、動力学について解明する。

### 4. 研究成果

平成 23 年度

渦組織構造の厚さがテイラー長の数倍、大きさが積分長のオーダー、エンストロフィーが平均の 10 倍程度という解析結果に基づき、テイラー長のスケールにおけるエンストロフィーの局所平均 (粗視化) を用いて渦組織構造を抽出する方法を開発した。この方法を用いて計算領域全体の解析を実施したところ、その局所平均がある閾値を満たし、隣接してあるサイズ以上のクラスターを形成しているものの中に「剪断層」が存在していることが分かった。また、渦組織構造は全エンストロフィーの 10% を有しているが、その体積が計算領域全体の 2% 以下であるため、乱流場の速度微分のフラットネスファクターへの寄与は微小であることが分かった。

平成 24 年度

可視化を用いた対話的な解析を実施し以下の結果を得た：(1) 多くの強い渦組織構造の互いの間隔は積分長程度である。(2) 層状の

強い渦組織構造(剪断層)は、太さがコルモゴロフ長  $\eta$  の 10 倍程度の強い渦管が  $12\eta$  程度の間隔で密集して構成され、組織的にシャープな界面を形成している。(3)その剪断層の中には、わずか  $10\eta$  程度の距離で速度の rms 程度の速度差を形成するような、非常に強い渦管が存在する。(4)シャープな界面を持つ剪断層の外側と内側の速度変動の 2 点相関が界面近傍で急激に小さくなる(変動がブロックされる)。(5)平均の 10 倍程度の強いエネルギー散逸が起きている剪断層の内部では、それと同程度の大きさのエネルギー輸送(エネルギーの順カスケード)が平均的に起きているが、剪断層の厚さ程度より大きいスケールにおけるエネルギー輸送は小さく、層の外部から内部にエネルギーの流入があることが示唆された。

その他、乱流境界層の乱流・非乱流界面においても速度の 2 点相関が界面近傍で急激に小さくなることを確認し、乱流・非乱流界面に速度変動をブロックする役割があることを実証した。

平成 25 年度

テイラー長  $\lambda$  に基づくレイノルズ数  $R\lambda = 0(100)$  の低レイノルズ数乱流における強い渦構造が“管状の渦”であるのに対し、 $R\lambda = 0(1000)$  の高レイノルズ数乱流では強い管状渦が密集して形成される“剪断層”であることを明らかにし、低レイノルズ数乱流と高レイノルズ数乱流の質的な違いを明らかにした。前年度作成した格子点数 4096 の 3 乗の乱流 DNS 時系列データを解析した結果、以下の知見を得た。(1)強渦度領域のシャープな境界を有する強い剪断層が少なくとも  $0(\lambda/u')$  の時間スケールで持続して存在する。(2)厚さ  $0(\lambda)$  の剪断層中の強い管状渦は変形しつつ層内を  $0(u')$  の速度で移動している。(3)最も強い剪断層の内部で渦度の値が著しく大きい点が高頻度で生成・消滅を繰り返す。(4)高エンストロフィーの部分領域中に剪断層が存在する確率は高い。

平成 26 年度

乱流境界層の直接数値計算結果を解析し、乱流境界層中の粘性底層と対数領域の間のバッファー層において、渦度の平均が急激に変化し、対数領域側の速度変動をブロックするなど、高レイノルズ数乱流中の剪断層と類似の性質を有することを示唆する結果を得た。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 7 件)

1. T Ishihara, J C R Hunt and Y Kaneda, Conditional analysis near strong shear layers in DNS of isotropic turbulence at high Reynolds number, Journal of Physics: Conference series, 査読有, 318 巻, 2011, 042004

2. 金田行雄, 石原卓, 横川三津夫, 板倉憲一, 宇野篤也, 大規模直接数値シミュレーションによる周期境界乱流中のエネルギー散逸率とエネルギースペクトル, 査読有, ながれ, 31 巻 241-244, 2012
3. Yuji Hattori, Takashi Ishihara, 4D visualization of isotropic turbulence and dynamics of high-entropy structures, USB Proceedings of JSST2012 International Conference on Simulation Technology, 査読有, 170-174, 2012
4. Takashi Ishihara, Kensaku Mori, Interactive visualizations of the large-scale data generated by the DNS of isotropic turbulence on 40963 grid points, USB Proceedings of JSST2012 International Conference on Simulation Technology, 査読有, 175-177, 2012
5. Takashi Ishihara, Yukio Kaneda, Julian C.R. Hunt, Thin Shear Layers in High Reynolds Number Turbulence-DNS Results, 査読有, Flow Turbulence Combust, 91(4), 895-929, DOI 10.1007/s10494-013-9499-z, 2013
6. J.C.R. Hunt, Takashi Ishihara, Nicholas A. Worth, Yukio Kaneda, Thin shear layer structures in high Reynolds number turbulence - Tomographic experiments and a local distortion model, 査読有, Flow Turbul. Combust, 92(3), 607-649, DOI 10.1007/s10494-013-9518-0, 2014
7. Takashi Ishihara, Hiroki Ogasawara, Julian C. R. Hunt, Analysis of conditional statistics obtained near the turbulent/non-turbulent interface of turbulent boundary layers, 査読有, Journal of Fluids and Structures, Volume 53, February 2015, Pages 50-57 doi:10.1016/j.jfluidstructs.2014.10.008

[学会発表] (計 47 件)

1. Takashi Ishihara, Conditional statistics near strong thin shear layers in DNS of high Reynolds number turbulence, Seminar at the University of Hong Kong, University of Hong Kong, 2011/6/16, 招待講演
2. Takashi Ishihara, Conditional statistics near strong thin shear layers in DNS of high Re turbulence, KITP Program: The Nature of Turbulence, University of California, Santa Barbara, USA, 2011/4/20, 招待講演
3. Takashi Ishihara, Julian C.R. HUNT, Yukio Kaneda, Conditional statistics near strong thin shear layers in DNS of isotropic turbulence at high Reynolds

- number, The School of Mathematical & Statistical Sciences (SoMSS) Seminar, Arizona State University, USA, 2011/4/13, 招待講演
4. Takashi Ishihara, Julian C.R. Hunt, Yukio Kaneda, Strong thin shear layers in high Reynolds number turbulence, 64th annual meeting of the APS division of fluid dynamics, Baltimore Convention Center, 2011/11/21
  5. Takashi Ishihara, Strong shear layers in high Reynolds number homogeneous turbulence, CCS Symposium Autumn 2011, Nagoya University, 2011/11/1
  6. Takashi Ishihara, J.C.R. Hunt, Yukio Kaneda, Conditional analysis near strong shear layers in DNS of isotropic turbulence at high Reynolds number, 13 European Turbulence Conference, Warsaw University, 2011/09/14
  7. 石原 卓, 小笠原浩樹, 乱流境界層の乱流・非乱流界面近傍の条件付き統計解析, 九大応力研共同利用研究集会「壁乱流における大規模構造の統計法則と動力学に果たす役割」, 九州大学, 2013/2/23
  8. 森下浩二, 石原 卓, 金田行雄, 高レイノルズ数チャンネル乱流の非等方スペクトル, 九大応力研共同利用研究集会「壁乱流における大規模構造の統計法則と動力学に果たす役割」, 九州大学, 2013/2/23
  9. 石原 卓, 高レイノルズ数乱流中の強い渦の組織構造, RIMS 共同研究 研究集会「偏微分方程式の背後にある確率過程と解の族が示す統計力学的な現象の解析」, 京都大学, 2013/2/14
  10. 小笠原浩樹, 石原 卓, 乱流境界層の DNS における乱流・非乱流界面近傍の構造と統計, 第 26 回数値流体力学シンポジウム, 東京, 2012/12/19
  11. Takashi Ishihara, Strong Shear Layer in High Re Turbulence - DNS Results, Mini Workshop on Urban Research a Review & Outlook on the Hong Kong Built Environment, 香港大学, 2012/12/7, 招待講演
  12. H. Ogasawara, T. Ishihara, Conditional analysis of the statistics near the turbulent/non-turbulent interface of turbulent boundary layers, APS 65th annual DFD meeting, San Diego Convention Center, 2012/11/18
  13. K. Morishita, T. Ishihara, Y. Kaneda, Small-scale statistics in direct numerical simulation of turbulent channel flow up to  $Re = 5120$ , APS 65th annual DFD meeting, San Diego Convention Center, 2012/11/18
  14. T. Ishihara, J.C.R. Hunt, Y. Kaneda, Intense dissipative mechanisms of strong thin shear layers in high Reynolds number turbulence, APS 65th annual DFD meeting, San Diego Convention Center, 2012/11/18
  15. Takashi Ishihara, Julian C.R. Hunt, Yukio Kaneda, Strong thin shear layers in homogeneous high Re turbulence-structures and statistics, First Multiflow Conference on the Turbulent-Non turbulent interface, Madrid, Spain, 2012/10/25, 招待講演
  16. Takashi Ishihara, Yuji Hattori, 4D visualization of isotropic turbulence and dynamics of high-entropy structures, JSST 2012, Kobe, 2012/9/28
  17. Takashi Ishihara, Kensaku Mori, Interactive visualizations of the large-scale data generated by the DNS of isotropic turbulence on  $4096^3$  grid points, JSST 2012, Kobe, 2012/9/28
  18. 小笠原浩樹, 石原 卓, 金田行雄, 乱流境界層の直接数値シミュレーションを用いた乱流・非乱流界面の解析, 日本流体学会 年会 2012, 高知大学, 2012/9/18
  19. 金田行雄, 石原 卓, 横川三津夫, 板倉憲一, 宇野篤也, 大規模直接数値シミュレーションによる周期境界乱流中のエネルギー散逸率とエネルギースペクトル, 日本流体学会 年会 2012, 高知大学, 2012/9/17, 招待講演
  20. 石原 卓, Hunt Julian C.R., 金田行雄, 高レイノルズ数一様等方性乱流中の強い剪断層, 日本流体学会 年会 2012, 高知大学, 2012/9/17
  21. 石原 卓, 高レイノルズ数乱流の計算科学, 流体若手夏の学校 2012, 京都, 2012/7/23-7/25, 招待講演
  22. T. Ishihara, H. Ogasawara, Conditional Analysis of Statics Obtained Near the Turbulent/Non-Turbulent Interface of Turbulent Boundary Layers, ERCOFTAC SYMPOSIUM on Unsteady Separation in Fluid-Structure Interaction, ERCOFTAC SYMPOSIUM on Unsteady Separation in Fluid-Structure Interaction, Mykonos, Greece, 2013/06/17-06/21
  23. J.C.R. Hunt, T. Ishihara, Y. Hoarau, M. Braza, Turbulence Near Interfaces-Modelling and Simulations, ERCOFTAC SYMPOSIUM on Unsteady Separation in Fluid-Structure Interaction, Mykonos, Greece, 2013/06/17-06/21
  24. 石原 卓, 高レイノルズ数乱流の渦構造について, 「宇宙生命計算科学連携拠点」ワークショップ, 筑波大学, 2013/6/29
  25. 石原 卓, 超多自由度複雑流動現象解明のための計算科学, 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点第 5 回シンポジウム, 2013/7/13
  26. Takashi Ishihara, Julian Hunt, Yukio

- Kaneda, Thin Shear Layers In High Reynolds Number Turbulence-Dns Result, ETC14, Lyon, 2013/09/01-09/04
27. Takashi Ishihara, Julian Hunt, Yukio Kaneda, Thin Shear Layers In High Reynolds Number Turbulence- A Coherent-structure Model, ETC14, Lyon, 2013/09/01-09/04
  28. Takashi Ishihara, Structure of the turbulent/non-turbulent interface of turbulent boundary layers-DNS results, Turbulence Colloquium TCM2013, Sidi Bou Said(Tunisia) 2013/09/05-09/09
  29. 石原 卓, Jha Pradeep, 金田行雄, Julian Hunt, 高レイノルズ数乱流中の剪断層の時間発展, 日本流体力学会 年会 2013, 東京農工大, 2013/09/12-09/14,
  30. 石原 卓, カノニカル乱流の大規模直接数値シミュレーション (hp120242), 平成 25 年度「京」を中核とする HPCI システム利用研究課題 中間報告会, タイム 24 ビル (東京), 2013/10/02-10/03
  31. 服部裕司, 石原 卓, 一様等方性乱流中の高渦度領域の動的形状解析, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 高知大学, 2013/09/25-09/27
  32. Yuji Hattori, Takashi Ishihara, Dynamic Geometrical Analysis of High-Enstrophy Structures in Isotropic Turbulence, ETC14, Lyon, 2013/09/01-09/04
  33. Pradeep K. Jha, Takashi Ishihara, Temporal behavior of strong shear layers in high Reynolds number turbulence, APS-66th Annual DFD meeting, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 2013/11/24-11/26
  34. Takashi Ishihara, Hiroki Ogasawara, Julian C.R. Hunt, Structure of the turbulent/non-turbulent interface of turbulent boundary layers - DNS results, APS-66th Annual DFD meeting, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 2013/11/24-11/26
  35. 大竹悠介, 岡本直也, 石原 卓, 低磁気レイノルズ数 MHD チャネル乱流における乱流・非乱流界面, 第 27 回 数値流体力学シンポジウム, 名古屋大学, 2013/12/17-12/20
  36. 石原 卓, 森下浩二, 横川三津夫, 宇野篤也, 金田行雄, 「京」コンピュータを用いたカノニカル乱流の大規模直接数値シミュレーション, 第 27 回 数値流体力学シンポジウム, 名古屋大学, 2013/12/17-12/20
  37. 石原 卓, Pradeep Jha, 金田行雄, Julian Hunt, 高レイノルズ数乱流中の薄い剪断層とその時間変化について, 大スケール流体運動と乱流揺らぎ 京大 数理解析研究所 共同研究集会, 京都大学, 2014/01/08-01/10
  38. 石原 卓, Vortical structures in homogeneous high Reynolds number turbulence, 大阪大学ジョイントセミナー(with Konstantin Mischaikow), 大阪大学, 2014/4/17, 招待講演
  39. T. Ishihara, Vortical Structures in the DNS of Turbulence at Reynolds Number Higher Than  $10^4$ , Mini-Workshop for Turbulence Research, The University of Hong Kong, 2014/7/11, 招待講演
  40. Takashi Ishihara, Vortical Structures in High Reynolds Number Turbulence ( $Re \sim 10^5$ ) by Large-Scale DNS on K computer, Seminar at Imperial College London, 2014/10/8, 招待講演
  41. Takashi Ishihara, Julian C.R. Hunt, Thin shear layers in homogeneous high Reynolds number turbulence and in turbulent boundary layer, Seminar at Delft University of Technology, 2014/10/10, 招待講演
  42. 石原 卓, 宇宙規模流動現象解明のための計算科学, 第 6 回「学際計算科学による新たな知の発見・統合・創出」シンポジウム 筑波大学, 2014/10/21-22
  43. 石原 卓, カノニカル乱流の大規模直接数値シミュレーション, 第 1 回「京」を中核とする HPCI システム利用研究課題 成果報告会、コクヨホール, 2014/10/31
  44. 石原 卓, Computational science of high Reynolds number turbulence, 流体方程式の構造と特異性に迫る数値解析・数値計算, 名古屋大学, 2014/12/8-9, 招待講演
  45. 石原 卓, カノニカル乱流の大規模直接数値計算, 第 27 回 理論懇シンポジウム「理論天文学・宇宙物理学と境界領域」, 国立天文台 三鷹キャンパス すばる棟大セミナー室, 2014/12/24 - 12/26, 招待講演
  46. T. Ishihara, K. Morishita, M. Yokokawa, A. Uno, Y. Kaneda, Direct numerical simulation of high reynolds number turbulence by the K computer, JAPAN-RUSSIA WORKSHOP ON SUPERCOMPUTER MODELING, INSTABILITY AND TURBULENCE IN FLUID DYNAMICS (JR SMIT2015), Keldysh Institute for Applied Mathematics RAS, Moscow, Russia, 2015/3/3-36
  47. J.C.R. Hunt, M. Moustouai, A. Mahalov, T. Ishihara, J. Westerweel, M. Braza, Scalar and momentum transfer processes across stratified sheared turbulent interfaces, EUROMECH Colloquium 567: Turbulent mixing in stratified flows, DAMTP, Centre for Mathematical

Sciences, Cambridge, UK, 2015/03/22-  
03/25

〔図書〕(計 1 件)

- ① 金田行雄, 石井克哉, 石原卓, 岩本薫, 吉田 恭, 芳松克則, 半場藤弘, 乱流の計算科学 - 乱流解明のツールとしての大規模数値シミュレーション, 共立出版, 2012 年

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.fluid.cse.nagoya-u.ac.jp/ishihara/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

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

### (2) 研究分担者

芳松克則 (YOSHIMATU, Katsunori)  
名古屋大学・エコトピア科学研究所・准教授  
研究者番号: 70377802

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