

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20340099

研究課題名(和文) 高いレイノルズ数の乱流における普遍性の計算科学的検証

研究課題名(英文) Study of universality in turbulent flows at high Reynolds number from the view point of computational science

研究代表者：

金田 行雄 (KANEDA YUKIO)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：10107691

研究成果の概要(和文)：大規模直接数値シミュレーションによるデータの解析によって高いレイノルズ数の乱流における統計的普遍性およびその考え方を、とくに(A)乱流のダイナミクスに内在する普遍性、(B)壁乱流(固体壁近傍の乱流)における普遍性について着目し、計算科学的に検証した。また、乱流場の情報縮約の視点から、ウェーブレット解析による秩序渦の抽出に基づいて乱流場をモデル化する秩序渦シミュレーション手法の有効性を検証した。

研究成果の概要(英文)：The universality in the statistics of turbulent flows at high Reynolds number as well as the idea of the universality were examined on the basis of the analysis of the numerical data by large-scale direct numerical simulation. Particular attention was paid to (A) the universality inherent in the turbulence dynamics and (B) the universality of wall bounded turbulence. Study was also made on the method of coherent vortex simulation, which is based on the extraction of coherent vortices by the use of wavelet analysis and is expected to be useful for reducing the degrees of freedom to be treated in turbulence modeling.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	6,400,000	1,920,000	8,320,000
2009年度	3,300,000	990,000	4,290,000
2010年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
総計	13,200,000	3,960,000	17,160,000

研究分野：流体力学

科研費の分科・細目：物理学・数理物理・物性基礎

キーワード：乱流、高いレイノルズ数、直接数値シミュレーション、データ解析、統計的普遍性、壁乱流、ウェーブレット解析、秩序渦シミュレーション

## 1. 研究開始当初の背景

乱流は日常生活や自然、工学で、量子スケールから宇宙スケールまで、さまざまなスケールで現れる流れの状態である。それぞれの乱流は境界条件や外力などに敏感に依存し、千差万別であり、同一の乱流は現実的には一組もない。

その違いにも関わらず、レイノルズ数  $Re$  (乱流中の非線形性の強さを表す指標) が十分高い乱流中の、十分小さなスケールでは、大きなスケールにおける外力や境界条件の

詳細によらない統計的普遍性があるのではないか、というコルモゴロフに始まる考え方がある。この考え方は現在、多くの乱流理論やモデリングの中核にあり、乱流研究の支配的な見方になっている。

しかしながら、乱流の持つ自由度の巨大さと強い非線形のため、乱流はその解明の重要さとこれまでの多くの研究にも関わらず、依然として未解決の問題として知られている。一方、当然、計算科学的方法による挑戦もなされてきたが、その解明はきわめて困難であ

った。

とくに上記の普遍性あるいはその考え方や理論的予測（ここでは簡単のためこれらをまとめて普遍性と呼ぶ）についての直接的・定量的検証はこれまで少数の場合を除き困難であった。たとえば「十分高い Re」と「十分小さいスケール」という基本的前提についてさえも Re あるいはスケールがどれほどなら「十分」といえるのか、その定量的知見は乏しかった。

一方、幸い近年コンピュータのハード、ソフト両面での進展は著しく、それに伴い乱流の計算科学に大きな変化が起き、計算科学による乱流解明のブレークスルーに国内外で大きな期待が寄せられている。

このような状況の中で、我々は地球シミュレータ (ES) を用いて実現された、従来と桁違い（それ以前のもの最大 512 倍）の自由度を持つ一様等方性乱流の大規模直接数値シミュレーション (Direct Numerical Simulation; 以下 DNS と略記) によるデータの解析を行ってきた。その結果、このような桁違いの量的変化は高い Re の乱流解明への質的变化をもたらす得るとの考えを持つに至った。また、境界の存在も重要となる乱流（壁乱流）についても、これまでの計算アルゴリズムの検討と予備的 DNS から、従来の DNS と質的に違う DNS が可能であるとの見積りを得た。

## 2. 研究の目的

乱流中ではさまざまな時間・空間スケールを持つ渦が共存し複雑に相互作用を行なう。そのスケール範囲は非線形性の強さ (Re) と共に急激に増加する。乱流の持つ最も本質的特徴の一つはまさにこの広いスケール範囲の存在である。それ故、乱流の本質を理解するには、十分高い Re、すなわち広いスケール範囲を持つ乱流の実験・観測あるいは DNS が必要である。本研究課題名にあえて「高いレイノルズ数...」と付したのはこのことを強調するためである。

本研究では、最新の計算科学的方法に基づいて、上に述べた意味での乱流の普遍性の定量的検証を行なうことを目的とする。そのために規範的な乱流場に的を絞り、世界最大クラスの DNS によるデータの解析を行なう。具体的にはとくに以下の (1), (2), (3) の研究を行う。

- (1) 乱流のダイナミクスに内在する普遍性：ダイナミクスに内在する普遍性について、周期境界条件下のナビエ・ストークス方程式に従う非圧縮性乱流（以下、Box 乱流と呼ぶ）の大規模 DNS データを用いてその検証を行う。Box 乱流は乱流ダイナミクスの本質を維持する最も規

範的乱流であり、これまで多くの研究がある。

- (2) 壁乱流における普遍性：現実の多くの乱流では、乱流のダイナミクスだけでなく固体境界等の境界の存在が流れに重要な影響を及ぼす。本研究では境界を持つ乱流のもっとも規範的なものとして壁乱流、とくに平行 2 平板間の乱流について、世界最高の Re における DNS を実行し、壁乱流における普遍性を検証する。
- (3) 情報縮約・粗視化モデル：地球温暖化、環境問題や様々な工学の諸問題に現れる流れではその流れの持つ自由度は非常に巨大であるため、予見しうる将来、全ての自由度を取り入れた DNS は不可能である。何らかの情報縮約・粗視化モデルの開発が不可欠である。本研究ではウェーブレット解析に基づく情報縮約手法、とくに秩序渦に着目して情報縮約をする秩序渦シミュレーション (Coherent Vortex Simulation、以下 CVS と略記) 手法の検討を行う。

## 3. 研究の方法

コルモゴロフの普遍性の考えでは、(a) レイノルズ数 Re が十分高く、(b) 慣性小領域 (大きな渦のスケールを  $L$  とし、粘性散逸をになう渦のサイズを  $\eta$  とすると  $L \gg r \gg \eta$  を満たす  $r$  の領域) が十分広いことを前提とし、その前提の下に何らかの統計的普遍性があるとしている。

この考え方およびその普遍性の検証のためには、上に述べたように十分高い Re の実験あるいは DNS が必要である。本研究では、高い Re の DNS データを用いて乱流の普遍性およびその普遍性の考え方について定量的な検証・研究を行った。

具体的には (1), (3) については地球シミュレータ (ES) 上で実現した Box 乱流の世界最大規模直接数値シミュレーション (DNS) データを名古屋大学の並列大型計算機システムに移行し、データ解析を行った。また CVS 手法の検討には後者のシステムを用いた。

(2) についてはスペクトル法 (フーリエ・チェビシェフタウ法) に基づく、平行二平板間乱流の高精度・高解像度かつ高効率な DNS を ES 上で実現してデータ解析を行った。

現在、乱流 DNS は国内外で非常に多くの研究者によってなされているが、上記 (1), (3) の解析で用いる Box 乱流 DNS は従来と桁違いに大規模で、これによって初めて大規模実験に匹敵あるいはそれを凌駕する高い Re の乱流のデータが実験的誤差なしに取れるようになったものである。また本研究は (2) の壁乱流についても世界最高レベルの Re の DNS を実現し解析するものである。本研究はこの

ような世界最高水準の DNS に基づいて、これまで困難であった高い Re の乱流解明を行なうところに学術的特色があり世界的にユニークである。

#### 4. 研究成果

本研究の成果の概略は以下のとおりである。

(1) 乱流のダイナミクスに内在する普遍性：上に述べたように ES 上で実行された Box 乱流の大規模 DNS データを用いて以下の成果を得た。

①レイノルズ数  $Re$  および  $L/r$ ,  $r/\eta$  が無限大の極限における厳密な関係式として注目されているコルモゴロフの 4/5 則 (注) について有限な  $Re$  および  $L/r$ ,  $r/\eta$  の影響がある簡単な近似と良く会うことを示し、その 4/5 則の成立のためにどの程度高い  $Re$  あるいは大きな  $L/r$ ,  $r/\eta$  が必要かを見積もることができた。(注：相対位置ベクトル  $\mathbf{r}$  離れた 2 点の速度差の  $\mathbf{r}$  方向の成分の 3 次モーメントが慣性小領域で  $-(4/5)\varepsilon r$  で与えられるという法則。ただしここで  $\varepsilon$  は単位質量あたりの平均運動エネルギー散逸率。)

②乱れの強い場所と弱い場所の違いに注目してデータ解析を行い、流線や渦線の曲率半径、管状の渦構造などの、渦度の強さおよびレイノルズ数への依存性を明らかにした。

③ナビエ・ストークス方程式における慣性項の粘性項に対する比が乱流場の各点で一般にレイノルズ数より遥かに小さいこと、および渦度の強い領域でランダムな場に比べその比が小さいことが分かった。また渦度が急激に変化する領域近傍では大きな渦から小さな渦への直接的エネルギー輸送が存在し、その輸送が慣性小領域における乱流場の間欠性、大偏差統計、相似則などに大きな影響をもたらすことが分かった。このことは乱流の小さなスケールにおける統計的普遍性についての従来のモデルの再考を迫るものであり、この方向の研究の今後の展開が望まれる。

④ウェーブレット解析に基づくデータ解析によって、乱流場とランダムな場の間欠性等の統計量の比較を行い、そのスケール依存性の違いを明らかにした。

(2) 壁乱流における普遍性：

①スペクトル法 (フーリエ・チェビシェフ法) に基づく格子点数 1024 の 3 乗の平行二平板間乱流の高精度・高解像度かつ高効率な DNS を ES の 64 ノードを用いて実施し、壁摩擦速度に基づくレイノルズ数  $Re_\tau = 2560$  (世界最高) の準定常状態を実現した。さらに DNS コードを ES2 用に新しく最適化し、格子点数  $1024 \times 1536 \times 1024$  の DNS を、128 ノードを用いて実現した。これらの DNS は今後の乱

流研究のための貴重なデータを与えるものである。

②DNS によって得られた乱流場は対数則によく一致する領域を有し、その領域における 1 次元エネルギースペクトルはコルモゴロフの慣性小領域のスペクトルと矛盾せず、乱流実験データとも定量的によく一致することが示された。一方、小さなスケールにおける局所等方性が必ずしも成立していないことが分かった。

③小さなスケールにおける局所非等方性に着目したデータ解析によって、その非等方性が壁からの距離およびレイノルズ数の増加とともに減少することを定量的に示された。また、得られた結果が一樣剪断乱流における非等方スペクトルの理論と矛盾しないことが示された。(図 1 参照)

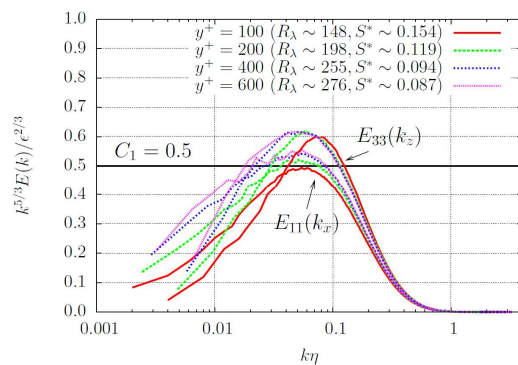


図 1： $\varepsilon^{2/3}k^{-5/3}$ で規格化された 1 次元縦速度相関スペクトル。 $y^+$ は壁単位といわれる単位に基づく壁からの距離。 $R_\lambda$ はその距離における平均テイラーマイクロスケールレイノルズ数。[学会発表等リストの①のプロシーディングスから]

(3) 情報縮約・粗視化モデル：CVS 手法により 3 次元非圧縮性一樣等方性乱流の数値計算を行い、以下の成果を得た。

①一般に LES モデルでは、解像しないスケールの情報をモデル化しないと計算が破綻するけれども、CVS 手法によれば、無秩序成分を解像せず単に無視するだけでも、エネルギースペクトルなどの統計量が良く再現されることが示された。

②CVS 手法と (i) フーリエスペクトルカットフィルターによって自由度を縮約したシミュレーション手法および (ii) スマゴリンスキーモデルを用いたラージエディシミュレーションの手法との比較を行い (i), (ii) いずれとの比較においても、全体の 10% 程度の自由度しか保持しない場合、CVS 手法の方がより良く DNS の統計を再現することが分かった。

③秩序渦度の圧縮部分の平均自乗量は、秩序渦の持つ (各点における) 渦度の自乗の総和に比べ十分に小さいことが分かった。また、

適合格子を用いた CVS の計算量を見積もり、あるレイノルズ数の等方な乱流に対しては、適合格子 CVS の理想的な計算コストは DNS の 10%程度であることが分かった。

これらの成果をもとに乱流の情報を適切に縮約する乱流モデルの開発が進むことが期待される。

#### 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)

[雑誌論文等] (計 14 件)

- ① K. Yoshimatsu, M. Midorikawa, Y. Kaneda; Columnar eddy formation in freely decaying homogeneous rotating turbulence, J. Fluid Mech., 査読有, 印刷中, 2011
- ② Y. Mizuno, K. Ohi, T. Sogabe, Y. Yamamoto, Y. Kaneda; Four-point correlation function of a passive scalar field in rapidly fluctuating turbulence: Numerical analysis of an exact closure equation, Phys. Rev. E, 査読有, Vol. 82, No. 3, 2010, pp. 036316-1\_9
- ③ 金田行雄, 石原卓; 高レイノルズ数等方乱流の直接数値シミュレーション - 小スケールにおける統計的普遍性 -, ながれ, 査読有, Vol. 29, No. 2, 2010, pp. 73-78
- ④ K. Yoshimatsu, N. Okamoto, M. Farge, K. Schneider; Coherent Vortex Extraction from Three-Dimensional Homogeneous Isotropic Turbulence: Comparison of Wavelet and Fourier Nonlinear Filtering Methods, Theoretical and Applied Mechanics Japan, 査読有, Vol. 58, 2010, pp. 227-233
- ⑤ Y. Kaneda, T. Ishihara; Universality in Statistics at Small Scales of Turbulence: A Study by High Resolution DNS, Turbulence and Interactions, Keynote Lectures of the TI 2006 Conference, 査読有, 2009, pp. 55-76
- ⑥ K. Yoshimatsu, N. Okamoto, K. Schneider, Y. Kaneda, M. Farge; Intermittency and scale-dependent statistics in fully developed turbulence, Phys. Rev. E, 査読有, Vol. 79, 2009, pp. 026303-1\_5
- ⑦ T. Ishihara, T. Gotoh, Y. Kaneda; Study of High-Reynolds Number Isotropic Turbulence by Direct Numerical Simulation, Annu. Rev. Fluid Mech., 査読有, Vol. 41, 2009, pp. 165-180
- ⑧ K. Yoshimatsu, M. Midorikawa, Y. Kaneda;

Coherent Vortices Formation in Homogeneous Rotating Turbulence: Asymmetry between Cyclonic and Anticyclonic Vortices, Proc. FCS2008, 査読有, 2008, pp. 69-76

- ⑨ K. Morishita, T. Ishihara, Y. Kaneda; Direct Numerical Simulation of Turbulent Channel Flow at High Reynolds Number, Proc. FCS2008, 査読有, 2008, pp. 165-172
- ⑩ N. Okamoto, K. Yoshimatsu; Energy Transfer in High Reynolds Number Three-Dimensional Homogeneous Isotropic Turbulence: A Wavelet Viewpoint, Proc. FCS2008, 査読有, 2008, pp. 173-180
- ⑪ Y. Kaneda, J. Yoshino, T. Ishihara; Examination of Kolmogorov's 4/5 Law by High-Resolution Direct Numerical Simulation Data of Turbulence, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, Vol. 77, No. 6, 2008, pp. 064401-1\_8

[学会等発表] (計 41 件)

- ① 森下浩二, 石原卓, 金田行雄; 高レイノルズ数チャネル乱流の局所等方性の DNS による検証, 第 24 回数値流体力学シンポジウム, 2010/12/22, 横浜市
- ② T. Ishihara, J. C. R. Hunt, Y. Kaneda; Conditional statistics near strong thin shear layers in DNS of isotropic turbulence at high Reynolds number, The 63rd Annual Meeting of the American Physical Society's Division of Fluid Dynamics, 2010/11/22, Long Beach (USA)
- ③ T. Ishihara; Large-Scale and High-Resolution Direct Numerical Simulation of Turbulent Boundary Layer: Dynamics of Hairpin Vortex Structures, Japan-Russia Workshop on Numerical Investigation of Hydrodynamic Instabilities and Turbulence with High-performance Computing, 2010/10/06, Okayama (Japan)
- ④ Y. Kaneda; Study of Small-Scale Statistics and Structure of Turbulence by High Resolution DNS, International workshop on CFD and Computational Mathematics, 2010/9/11, Yonsei University (Korea)
- ⑤ T. Ishihara; Interface structures and statistics in direct numerical simulations of turbulence, 6th IMS Turbulence Workshop 'Qualitative Universality, Large- and Small-Scale Coherent Structures and Long-Range Memory in Turbulent Flows', 2010/7/14,

- London (UK)
- ⑥ Y. Kaneda; Comparison of the statistics of interfaces of homogeneous and inhomogeneous turbulent flows, Euromech Colloquium 517 on Interfaces and Inhomogeneous Turbulence, 2010/6/29, London (UK)
- ⑦ N. Okamoto, K. Yoshimatsu, K. Schneider, M. Farge, Y. Kaneda; Coherent vortex simulation: application to 3D homogeneous isotropic turbulence, 12thEUROMECH European Turbulence Conference, 2009/9/8, Marburg (Germany)
- ⑧ K. Yoshimatsu, N. Okamoto, K. Schneider, Y. Kaneda, M. Farge; Intermittency in high resolution direct numerical simulation of turbulence in a periodic box: a wavelet viewpoint, 12thEUROMECH European Turbulence Conference, 2009/9/7, Marburg (Germany)
- ⑨ Y. Kaneda; Examination of Kolmogorov's idea of universality in turbulence by computational approaches, Turbulent Mixing and Beyond, Second International Conference and Advanced School, 2009/7/27, Trieste (Italy)
- ⑩ K. Morishita, T. Ishihara, Y. Kaneda; Direct numerical simulation of turbulent channel flow at high Reynolds number, International Symposium on Frontiers of Computational Science 2008, 2008/11/27, Nagoya University (Japan)
- ⑪ K. Yoshimatsu, N. Okamoto, K. Schneider, Y. Kaneda, M. Farge; Intermittency and scale-dependent Statistics in Fully Developed Turbulence, 61th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics, 2008/11/24, San Antonio (USA)
- ⑫ K. Morishita, T. Ishihara, Y. Kaneda; Direct Numerical Simulation of Turbulent Channel Flow at High Reynolds Number, Japan-Russia Workshop on Study of Hydrodynamical Instability, 2008/11/19, Kobe (Japan)
- ⑬ T. Ishihara, H. Iwata, Y. Kaneda; Direct Numerical Simulation of Turbulent Boundary Layer using Sinc-Galerkin Method, Japan-Russia Workshop on Study of Hydrodynamical Instability, 2008/11/18, Kobe (Japan)
- ⑭ T. Ishihara; Statistics of two-point velocity difference in high-resolution direct numerical simulations of turbulence in a periodic box, Inertial-Range Dynamics and Mixing, 2008/9/30, Cambridge (UK)

- ⑮ Y. Kaneda; Small-scale Statistics in High Reynolds Number Turbulence - A Study by Direct Numerical Simulation -, The Twelfth Asian Congress of Fluid Mechanics, 2008/8/18, Daejeon (Korea)
- ⑯ Y. Kaneda; Statistics in direct numerical simulation of high Reynolds number turbulence in a periodic box, Symposium on Fluid Science and Turbulence, At the boundaries of nonlinear physics, fluid mechanics and turbulence: where do we stand?, 2008/5/31, Baltimore (USA)
- ⑰ Y. Kaneda; DNS of Turbulence Under Simple Geometrical Conditions - Universality in Small-Scale Statistics, Workshop on Petascale Computing: Its Impact on Geophysical Modeling and Simulation, 2008/5/5, Boulder (USA)
- ⑱ K. Yoshimatsu, N. Okamoto, K. Schneider, M. Farge, Y. Kaneda; Coherent vortices in high resolution direct numerical simulation of homogeneous isotropic turbulence: A wavelet viewpoint, International Workshop on 'Multiscale methods for fluid and plasma turbulence : applications to magnetically confined plasmas in fusion devices', 2008/4/21, Marseille (France)

[その他]  
ホームページ等  
<http://kenpro.mynu.jp:8001/Profiles/0001/0000112/profile.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

金田 行雄 (KANEDA YUKIO)  
名古屋大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：10107691

### (2) 研究分担者

石井 克哉 (ISHII KATSUYA)  
名古屋大学・情報基盤センター・教授  
研究者番号：60134441  
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  
芳松 克則 (YOSHIMATSU KATSUNORI)  
名古屋大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号：70377802

### (3) 連携研究者 なし