

平成 30 年 5 月 30 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03603

研究課題名(和文)高レイノルズ数乱流中の微粒子の著しい集中促進メカニズム解明のための計算科学

研究課題名(英文)Computational science of inertial particle clustering in high Reynolds number turbulence

研究代表者

石原 卓 (Ishihara, Takashi)

岡山大学・環境生命科学研究所・教授

研究者番号：10262495

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：乱流中の微粒子の運動を解析するための高精度かつ効率的な並列プログラムを開発し、大規模な数値シミュレーションを実現することで、高レイノルズ数乱流に特有の渦構造(渦クラスタ)と慣性粒子の運動の関係を調べた。その結果、慣性の大きい粒子は渦クラスタの外部の際に集中する傾向があることを明らかにした。また、慣性の大きい粒子の振る舞いのレイノルズ数依存性を明らかにし、原始惑星系円盤中の微惑星形成過程における乱流の役割について信頼性の高い結果を与えた。

研究成果の概要(英文)：By developing a highly accurate and efficient parallel program for analyzing the motion of inertial particles in turbulent flows, we realized large-scale numerical experiments for tracking the particles in direct numerical simulations of turbulence. The relationships between vortex-cluster structures, which are unique to high Reynolds number turbulence, and the motion of inertial particles were investigated. As a result, we showed that particles with large inertia tend to concentrate on the outside of the vortex cluster. We also clarified the Reynolds number dependence of the behavior of particles with large inertia and provided reliable results on the role of turbulence in the planetesimal formation process in protoplanetary disks.

研究分野：流体力学, 計算科学

キーワード：高レイノルズ数乱流 慣性粒子 直接数値シミュレーション

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 流体中の粒子の運動に関して、慣性をもつ微粒子(慣性粒子)は流体に追従して動く流体粒子と異なり、渦から放出される傾向があることが知られている。このため積乱雲中の雨粒の急速な成長や原始惑星系円盤ガス乱流中の微惑星形成過程に、「乱流」が重要な働きをすると考えられている。また、近年の実験技術の著しい進歩、及び、スーパーコンピュータの著しい発展により、乱流中の流体粒子及び慣性粒子の位置や速度の詳細なデータが得られるようになってきたこともあり、乱流中の粒子運動についての研究は近年非常に多い。しかし、これまでの研究は全て、非線形性の弱い(レイノルズ数  $Re$  が  $Re \ll 10^4$  と低い)乱流場に限られ、積乱雲などの現実的な高レイノルズ数 ( $Re \sim 10^6 - 10^7 \gg 10^4$ ) の乱流場における雨粒の衝突・合体の促進のメカニズムは分かっていなかった。

(2) 地球シミュレータを用いて実施した乱流の大規模直接数値シミュレーションデータの可視化と解析により高  $Re$  乱流 ( $Re > 10^4$ ) 中では、微細な強い管状渦が密集した組織構造(薄い剪断層)が形成され、孤立した強い管状渦が支配的な低  $Re$  乱流と質的に異なる様子を呈することが明らかとなっていた。そこで、明確な剪断層が存在する高  $Re$  乱流場 ( $Re > 10^4$ ) を用いて粒子追跡の数値実験を実施し、高レイノルズ数特有の渦構造と慣性粒子の運動の関係を明らかにすることにより、現実的な極めて非線形性の強い高  $Re$  乱流中の微粒子集中促進のメカニズムが計算科学的に解明できるはずであるという考えが本研究の着眼点となった。

### 2. 研究の目的

発達した積乱雲中の雨粒の急速な成長や原始惑星系円盤における微惑星形成過程には、乱流が重要な役割を果たすと考えられているが未解明である。その理由は非線形性の極めて強い(レイノルズ数  $Re$  の高い)乱流の理解が不十分であるからである。私は近年、地球シミュレータ及び京を用いた世界最大規模直接数値計算(DNS)による乱流データを解析・可視化し、高  $Re$  乱流 ( $Re > 10^4$ ) には特有の強い渦の組織構造(薄い剪断層)があることを明らかにした(Ishihara, Kaneda, Hunt, FTAC 2013; IKH)。高  $Re$  乱流の間欠性を理解する鍵と考えられる薄い剪断層は、高  $Re$  乱流中の微粒子の運動にも重要な役割を果たすと考えられる。本研究では世界最大規模の乱流DNSを実施し、薄い剪断層のダイナミクスと役割に着目したデータ解析・可視化により、高  $Re$  乱流中微粒子の著しい集中促進メカニズムを計算科学的に解明することを目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究では、現実的な極めて高レイノルズ数 ( $Re$ ) 乱流による微粒子集中促進のメカニ

ズムを計算科学的に解明することを目指す。具体的には、これまでの研究「乱流の計算科学」で得た、高  $Re$  乱流の知見、乱流データベース、及び乱流DNSコードを駆使して、

- (A) 乱流中の粒子追跡の大規模数値シミュレーションを実現するためのコード開発
- (B) 粒子追跡データと乱流場の時系列データの対話的可視化・解析手法の開発
- (C) 世界最大規模DNSとデータ解析・可視化の実施

を行い、高  $Re$  乱流による微粒子集中促進のメカニズムを検証し、高  $Re$  乱流特有の薄い剪断層と粒子運動との関係を明らかにする。そのため、HPC、可視化、数値流体力学、流体物理学の専門家と連携をとりつつ、研究協力者と協働し、J. C. R. Hunt 教授(UCL)との国際共同研究を実施する。

### 4. 研究成果

(1) 京用に関与したフーリエスペクトル法に基づく一様等方性乱流の直接数値計算(DNS)二軸分割並列プログラムを活用し、3次スプライン補間の計算をMattorら(1995)の並列化手法を用いて行う、乱流中の慣性粒子追跡プログラムを開発した。並列プログラムの高効率化も行い、格子点数  $2048^3$  の乱流DNS中で  $512^3$  個の慣性粒子8セットを追跡可能にした。これにより、高レイノルズ数乱流中の慣性粒子の運動について信頼性の高い結果を得ることに成功した。

なお、3次スプライン補間を並列計算するコードを活用して、高精度・高解像度なコンパクト差分法やフィルタリングをデータ転置を行うことなく計算可能にし、圧縮性乱流の高精度・高解像度差分法に基づくDNSコードの開発も実施し、結果の検証も行った。

また、Mattorら(1995)の方法では一般に各ノードで斉次方程式一つと非斉次方程式二つを解いてノード間通信を行う必要があったが、3重対角行列の係数が定数で確定している場合は非斉次方程式の解があらかじめ求まることが判明し、最終的には計算量を  $1/3$  に削減することに成功した。

(2) 高レイノルズ数乱流において、渦度の大きさがある閾値以上の領域の塊(渦クラスタ)を抽出して、その塊の慣性モーメントを計算することにより、渦クラスタの形状を定量的に調べるアルゴリズムを開発した。これにより、慣性小領域のスケールにおける高い閾値の渦クラスタは層状の形状を持つことを示唆する結果が得られた。これは、IKHで観察された渦クラスタの直感と一致する結果である。

(3) 京コンピュータの一般課題「カノニカル乱流の大規模直接数値シミュレーション」によって得られた高レイノルズ数乱流場の可視化と解析により、レイノルズ数が  $10^5$  を超える乱流場においても渦の層状のクラスタ

が存在し、積分長と同程度のサイズの剪断を形成していることを確認した。また、高レイノルズ数においては、形とサイズが多様なクラスタが存在し、特に、慣性領域のスケールで管状のクラスタの動力学（生成、成長、合体、消滅）が観察できた。

(4) 渦の層状クラスタが速度変動をブロックする機構を有することは Hunt & Durbin, FDR(1999)の理論解析によって示唆され、IKHにおいて乱流 DNS データを用いて確認されていたが、近年、そのブロッキング機構を用いることにより翼周りの乱流を制御できる可能性が示唆された。

(5) レイノルズ数が  $10^4$  以上となる、格子点数  $2048^3$  の乱流 DNS を用いて慣性粒子追跡を行ったところ、慣性が大きく、ストークス数が 1 より大きいような粒子は高レイノルズ数乱流中の渦クラスタの外部の際に集まる傾向があることを発見した。

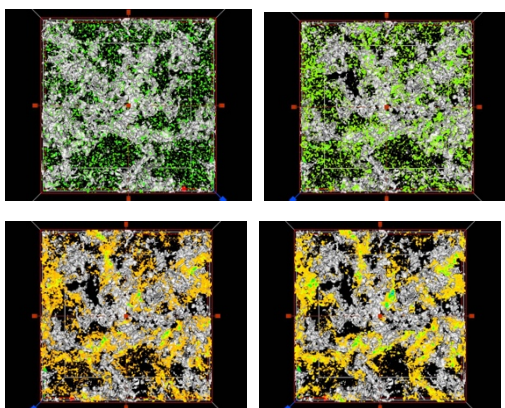


図 1: 高レイノルズ数乱流中の渦クラスタ (白) と慣性粒子の高密度領域。(a)  $St=0.1$ , (b)  $St=1$ , (c)  $St=5$ , (d)  $St=10$ . ここで、 $St$  はコルモゴロフの時間スケールで規格化したストークス数

(6) 乱流中の渦や流れの構造をストレンテンソルの固有ベクトルの向きを揃えて平均化することにより Elsinga & Marusic, JFM (2010) は微細な運動の普遍的な側面を抽出したが、その手法を用いて、レイノルズ数の広いレンジの DNS データを解析することにより、特徴的な渦構造がレイノルズ数の増加に伴い遷移する様子を定量的に捉えることに成功した。これは IKH での観察と一致する。

なお、最近、同様の手法を用いて、慣性粒子の分布について予備的な解析を実施したところ、流体の小スケールにおける普遍的な運動に対応して、慣性粒子の分布にストークス数に依存した特定のパターンがあることを見出した。また、高渦度領域に限定した条件付き平均では、強渦度による慣性粒子の吐き出しが定量的に捉えられ、かつ、その吐き出しが非等方的であることが判明した。(この結果は現在投稿中である。)

(7) 乱流中の慣性粒子の運動の応用問題の一つとして、原始惑星系円盤中の微惑星形成過程がある。原始惑星系円盤のガス乱流中にあるダスト粒子が乱流によって輸送され衝突付着成長するというシナリオでは、粒子の成長に伴い、粒子の衝突速度が増し、限界付着速度を超えて衝突する粒子が破壊してしまいあるサイズ以上大きくなれないというものである。天文の惑星科学分野においては従来、高レイノルズ数乱流のエネルギー Spektrum を考慮した衝突速度の見積もりが使われていたが、衝突速度のばらつきや乱流による粒子のクラスタリングは考慮されていなかった。Pan ら (2015) は近年乱流 DNS を用いた数値実験を実施したが、結果のレイノルズ数依存性が不明であった。我々は一連の乱流 DNS (最大レイノルズ数  $10^4$  以上) により、粒子の衝突付着に関する統計量のレイノルズ数依存性を明らかにし、衝突破壊問題への乱流の影響について信頼性の高い結果を提供することに成功した。

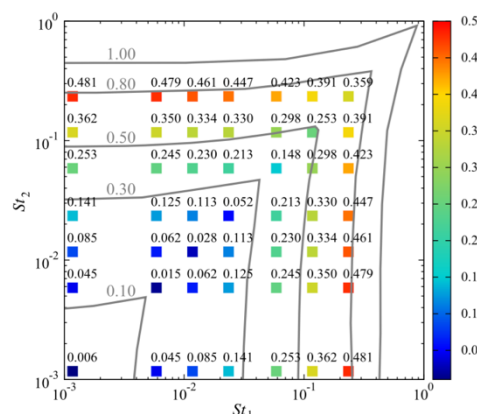


図 2: 衝突粒子相対速度の乱流 DNS ( $Re=16100$ ) による結果 (色付きマーカー) と従来の理論 (Ormel & Cuzzi, 2007) (灰色曲線) との比較; DNS 結果は  $St \sim 0.1$  で  $Re$  依存性が小さく、より高い  $Re$  でも同様であると考えられる。(Ishihara et al ApJ 2018 より)

#### <引用文献>

- ① Ishihara, T., Kaneda, Y., Hunt, J.C.R.: Thin shear layers in high Reynolds number turbulence - DNS results, Flow, turbulence and combustion, 91(4), (2013) 895-929.
- ② Mattor, N., Williams, T.J., Hewett, D.W.: Algorithm for solving tridiagonal matrix problems in parallel. Parallel Comput. 21, 1769-1782 (1995)
- ③ Hunt, J.C.R., Durbin, P.A.: Perturbed vortical layers and shear sheltering. Fluid Dynamics Research 24, (1999) 375-404.
- ④ Elsinga, G.E., Marusic, I.: Universal aspects of small-scale motions in turbulence. J. Fluid Mech. 662, 514 (2010).

- ⑤ Pan, L. and Padoan, P.: Turbulence-induced Relative Velocity of Dust Particles V. Testing Previous Models, *The Astrophysical Journal*, Vol. 812(1), (2015)
- ⑥ Ormel, C. W., & Cuzzi, J. N., Closed-form expressions for particle relative velocities induced by turbulence, *A&A*, 466, (2007) 413

#### 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 7 件)

- ① Takashi Ishihara, Naoki Kobayashi, Kei Enohata, Masayuki Umemura, Kenji Shiraishi, Dust Coagulation Regulated by Turbulent Clustering in Proto planetary Disks, *The Astrophysical Journal*, 854, 2018, 81(16pp) (査読有) DOI: 10.3847/1538-4357/aaa976
- ② G. E. Elsinga, T. Ishihara, M. V. Gouder, C. B. da Silva, J. C. R. Hunt, The scaling of straining motions in homogeneous isotropic turbulence, *Journal of Fluid Mechanics*, 829, 2017, 31-64(査読有) DOI:10.1017/jfm.2017.538
- ③ 石原 卓, 宇野 篤也, 森下 浩二, 横川 三津夫, 金田 行雄, 高レイノルズ数乱流中の渦の組織構造とその時間発展, *ながれ*, 35, 2016, 109-113(査読無) <http://www.nagare.or.jp/publication/nagare/archive/2016/2.html>
- ④ Julian C.R. Hunt, Takashi Ishihara, Damien Szubert, Ioannis Asproulias, Yannick Hoarau and Marianna Braza, Turbulence Near Interfaces - Modelling and Simulations, *Advances in Fluid-Structure Interaction*, 133, 2016, 283-292 (査読有) DOI: 10.1007/978-3-319-27386-0
- ⑤ Alberto Vela-Martin, Takashi Ishihara, A new statistical tool to study the geometry of intense vorticity clusters in turbulence, *Journal of Physics: Conference Series*, 708, 2016, 012004\_1-6 (査読有) DOI:10.1088/1742-6596/708/1/012004
- ⑥ Takashi Ishihara, Koji Morishita, Mitsuo Yokokawa, Atsuya Uno and Yukio Kaneda, Energy spectrum in high-resolution direct numerical simulations of turbulence, *Phys. Rev. Fluids*, 1, 2016, 082403(R)\_1-9 (査読有) DOI: 10.1103/PhysRevFluids.1.082403
- ⑦ Takashi Ishihara, Kei Enohata, Koji Morishita, Mitsuo Yokokawa, Katsuya Ishii, Accurate Parallel Algorithm for Tracking Inertial Particles in Large-Scale Direct Numerical Simulations of Turbulence, *Parallel Computing Technologies*, 9251, 2015, 522-527 (査読有) DOI: 10.1007/978-3-319-21909-7\_51

[学会発表] (計 34 件)

- ① Takashi Ishihara, Atsuya Uno, Koji Morishita, Mitsuo Yokokawa, Yukio Kaneda, Vortex clusters and their time evolution in high-Reynolds-number turbulence, *Fundamental Aspects of Geophysical Turbulence III* (招待講演), 2018年3月19日, 名古屋大学
- ② Takashi Ishihara, Naoki Kobayashi, Kei Enohata, Masayuki Umemura, Kenji Shiraishi, Motion of inertial particles in high-Reynolds-number turbulence, *NITech Lectures on Turbulence and Cloud* (招待講演) 2018年3月8日, 名古屋工業大学
- ③ Takashi Ishihara, Internal interfaces in turbulence, *Euromech colloquium on Turbulent/nonturbulent interfaces: from laboratory to geophysical scales* (招待講演), 2017年7月4日, Imperial College London (イングランド)
- ④ Takashi Ishihara, Rapid Dust Coagulation expedited by Turbulent Clustering in Protoplanetary Disks, *Formation of the Solar System and the Origin of Life*(招待講演), 2017年02月21日, Lorentz Center (オランダ)
- ⑤ Takashi Ishihara, Koji Morishita, Julian C.R. Hunt, Thin shear layers observed in the DNS of high Reynolds number turbulence, *International Symposium on Near-Wall Flows: Transition and Turbulence*(招待講演), 2016年06月21日, 京都大学
- ⑥ 石原 卓, 原始惑星系円盤乱流中のダストの運動の数値シミュレーション, *宇宙生命計算科学連携拠点 第2回ワークショップ*(招待講演), 2016年04月27日, 筑波大学
- ⑦ 石原 卓, 江野畑 圭, 小林 直樹, 白石賢二, 中本 泰史, 梅村 雅之, 原始惑星系円盤乱流と微惑星成長, *日本天文学会2016年春季年会*(招待講演), 2016年03月15日, 首都大学東京
- ⑧ Kei Enohata, Koji Morishita, Takashi Ishihara, Relative diffusion of a pair of inertial particles in the inertial sub-range of turbulence, *American Physical Society 68th Annual DFD Meeting*, 2015年11月23日, ボストン, アメリカ (その他、26件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.ems.okayama-u.ac.jp/~ishihara/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

石原 卓 (ISHIHARA, Takashi)  
岡山大学・大学院環境生命科学研究科・教授  
研究者番号：10262495

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

森下 浩二 (MORISHITA, Koji)  
神戸大学・計算科学教育センター・特命助教  
研究者番号：50634648

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

金田 行雄 (KANEDA, Yukio)  
愛知工業大学・基礎教育センター・教授  
研究者番号：10107691

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

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

### (4) 研究協力者

ジュリアン ハント (HUNT, Julian)  
ユニバーシティ カレッジ ロンドン・教授

江野畑 圭 (ENOHATA, Kei)  
名古屋大学・大学院工学研究科・修士

小林 直樹 (KOBAYASHI, Naoki)  
名古屋大学・大学院工学研究科・修士

濱端 航平 (HAMABATA, Kohei)  
名古屋大学・大学院工学研究科・修士

櫻井 幹記 (SAKURAI, Yoshiki)  
名古屋大学・大学院工学研究科・修士