

jh210034-NAH

高レイノルズ数乱流のデータ科学プラットフォームの構築

石原 卓 (岡山大学)

概要

京や富岳を用いて得られる非圧縮性乱流と圧縮性乱流の大規模直接数値計算データを活用し、解析や可視化を駆使した多様な「データ科学」を実現可能なプラットフォームを構築することが本研究の目的である。本年度は乱流中の流体粒子の運動のデータベースを用いて高レイノルズ数乱流中の相対拡散について従来の理論の再検討を必要とする結果を得たほか、乱流中の慣性粒子の運動についての多様なデータ解析により、粒子運動に対する圧縮性の影響、重力の影響、慣性の大きい粒子の分布の幾何学的な特徴付けなどについて新しい知見を得ることができた。また、等温を仮定した圧縮性乱流の直接数値計算コードの高効率化に成功し、格子点数 4096³ の世界最大規模の計算の実現に結びつけることができた。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同研究を実施した拠点名

東京大学 名古屋大学 九州大学

(2) 共同研究分野

超大規模数値計算系応用分野

(3) 参加研究者の役割分担

- ・石原 卓(岡山大学)研究の総括, 高レイノルズ 数乱流データの管理と整備, データ解析
- ・横川三津夫(神戸大学)乱流データ構築用プログラム開発, データ解析用プログラム開発
- ・宇野篤也(計算科学研究センター)データ可視化用プログラム開発
- ・小野謙二(九州大学)データ解析用プログラム解析, データ公開用環境整備, 技術支援
- ・岡本直也(愛知工業大学)乱流データ解析
- ・金田行雄(名古屋大学)乱流データ解析
- ・芳松克則(名古屋大学)乱流データ解析
- ・高橋一郎(名古屋大学)乱流データ管理, 可視化 および技術支援
- ・櫻井幹記(名古屋大学)乱流データ 構築用プログラム開発, データ解析
- ・浅井瑞貴, 岡省吾, 森中宏樹(岡山大学)データ解析, コード開発
- ・田浦健次郎, 小林博樹(東京大学) データ管理および技術支援

2. 研究の目的と意義

乱流は自然や科学技術のさまざまな問題で現れる現象である。しかし、強い非線形性と巨大自由度を持つため、物理学の未解決の難問として知られている。一方、ものづくりや気象予測をはじめ社会的関心の高いさまざまな流動現象は、個々の現象の違いによらず、共通の核として乱流のダイナミクスが深く関わっている。そのため、信頼できる予測や設計のためには乱流の解明が不可欠である。それゆえ乱流の解明は社会的に意義が高い。我々は、「京」の性能を存分に発揮させた、カノニカル乱流の大規模直接数値計算(Direct Numerical Simulation; DNS)を実施し信頼性の高い乱流 DNS データを構築してきた。本研究課題では、「京」や「富岳」を用いて構築した貴重な非圧縮性乱流 DNS のビッグデータを活用し、多様な解析や可視化を用いた新しいデータサイエンスを試みる。今年度は新たに圧縮性乱流の基礎データベースも構築し、それらを広く解析・活用できるように整備し、日本が世界を先導する高レイノルズ数乱流のデータサイエンスの研究のためのプラットフォームを構築することを目的とする。

3. 当拠点公募型研究として実施した意義

本研究では「京」や「富岳」を用いて構築した乱流の直接数値計算 (DNS) データベースを東京大学, 九州大学, 名古屋大学のスーパーコンピュータを用いて解析可能とするプラットフォームを構築することを目的としている。これにより, レイノルズ数の高い非圧縮性乱流の多様な解析が可能となる。また, 乱流場と乱流中を運動する慣性粒子の時系列データベースにより, 粒子の拡散現象やダストや雲粒子の衝突過程についての解析も進めることも可能である。当拠点公募型研究はこれらのために必要不可欠である。今年度は, 当研究により弱圧縮性乱流の大規模直接数値計算 (格子点数 4096^3) が実現し, 非圧縮性乱流との定量的な比較が可能となり, 両者の類似性と相違性を明らかにすることができた。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

圧縮性乱流の直接数値計算 (最大格子点数 1024^3) を用いて, 圧縮性乱流中のダスト粒子の運動の性質を調べるためのデータベースを構築することができた。また, 等温を仮定した圧縮性乱流との比較も実現した。非圧縮性乱流の DNS によって乱流場と乱流中を運動する慣性粒子の時系列データベースを構築し, 多様なデータ解析を可能にした。

5. 今年度の研究成果の詳細

圧縮性乱流中の慣性粒子のデータを解析し, マッハ数が 0.3 以下の弱圧縮の場合, 粒子の運動は基本的には非圧縮成分によって支配され, 非圧縮性乱流中の運動と大きくは変化しないことを実証した。この結果は, 原始惑星系円盤乱流は弱圧縮であることが知られているが理論的には非圧縮性乱流として扱って良いことを示すものである [1]。

また, 圧縮性乱流の外力項では圧縮成分と非圧縮成分の割合を制御するため従来高速フ

ーリエ変換を用いていたがその部分が計算時間の半分以上を占めていた。今年度は外力に関係する低波数モードのみ離散フーリエ変換を用いて求め, ヘルムホルツ分解をする方法を導入することにより大幅に計算時間を短縮することに成功した [15]。これにより圧縮性乱流のより大規模な数値計算が可能となった。結果として, 等温を仮定した圧縮性乱流の直接数値計算で格子点数 4096^3 の計算が実現した [14]。

高レイノルズ数非圧縮乱流中の流体粒子の運動のデータベースを解析しリチャードソンの粒子相対拡散が粒子の初期位置に強く依存する結果を得た [3]。

また, 乱流中の各点で慣性力と粘性力の比として局所レイノルズ数を定義し, その分布を高レイノルズ数乱流のデータベースを用いて解析したところ, 積分長と速度の rms 値で定義されるレイノルズ数が 36500 と大きい乱流においても局所レイノルズ数の平均は 100 以下と小さいことがわかった。一方その揺らぎは非常に大きいこと, および, 局所のエンストロフィーの値には依存しないことがわかった [2]。

また, 乱流中で重力の働く慣性粒子の運動を解析し, 重力下では慣性の異なる粒子同士の衝突が卓越することがわかった。これは粒子の成長の初期段階における, 乱流による衝突促進による成長が後の捕集による成長のために重要であることを示唆する結果である。その他, パーシステントホモロジーを用いた乱流中の慣性粒子の位相的データ解析では, 慣性の大きい粒子の分布の特徴の定量化に成功した。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

今年度は, 「京」や「富岳」を用いて構築した乱流の直接数値計算 (DNS) データベースを整備し, 乱流中の流体粒子および慣性粒子の運動についての解析も含め多様な解析を実現

し成果を得ることができた。また、近年フーリエ・スペクトル法を用いて乱流の直接数値計算はデータの通信がネックとなりさらに大規模な計算が困難になりつつある。我々はその代替手段となりうる弱圧縮性乱流の直接数値計算コードを改良し、計算の大規模化に成功し、結果として、格子点数 4096^3 の計算を実現するに至った。今後はさらに大規模な計算を目指す予定である。

以上、本研究では乱流のデータ科学のプラットフォームとして多様な解析を実現し成果を得た。また、依頼に応じて乱流 DNS データの提供も行った。データ公開に向けて今後の展開が期待され、十分な成果が得られているにもかかわらず継続課題が不採択であったことが残念であった。当初予定していた mdx の試験的な活用がうまく進められなかった点は反省点の一つである。

7. 研究業績一覧

- (1) 学術論文 (査読あり)
- [1] Yoshiki Sakurai, Takashi Ishihara, Hitomi Furuya, Masayuki Umemura, and Kenji Shiraishi, Effects of Compressibility of Turbulence on Dust Coagulation Process in Protoplanetary Disks, *The Astrophysical Journal*, 911 (2), 140 (2021)
- [2] Yukio Kaneda, Takashi Ishihara, Koji Morishita, Mitsuo Yokokawa, Atsuya Uno, Statistics of local Reynolds number in box turbulence: ratio of inertial to viscous forces, *J. Fluid Mech.* 929, A1 (2021)
- [3] G. E. Elsinga(+), T. Ishihara, J. C. R. Hunt(+), Non-local dispersion and the reassessment of Richardson's t^3 scaling law, *J. Fluid Mech.* 932, A17 (2022)
- (2) 国際会議プロシーディングス (査読あり)
該当なし
- (3) 国際会議発表 (査読なし)
- [4] T. Ishihara, G. E. Elsinga(+), J. C. R. Hunt(+), Significant thin shear layers in high Reynolds number turbulence, COLLOQUIUM 620 EXTREME DISSIPATION AND INTERMITTENCY IN TURBULENCE 17-19 May 2021, TU Delft. The Netherland (オンライン, 招待講演)
- [5] Takashi Ishihara, Temporal Behavior of Significant Shear Layers in High Reynolds Number Turbulence, ICFD2021, Tohoku Univ. (2021) 10 月
- [6] Takashi Ishihara, DNS data analysis of the collision processes of inertial particles in high Reynolds number turbulence, 4th International Workshop on Cloud Turbulence (招待講演) (国際学会) (2022)
- (4) 国内会議発表 (査読なし)
- [7] 石原 卓, 宇宙物理における乱流現象解明のための計算科学 一原始惑星系円盤乱流中のダスト成長一, 2021 GFD オンラインセミナー (第 6 回) (招待講演) (2021)
- [8] 岡 省吾, 石原 卓, 乱流中の慣性粒子の分布の位相的データ解析, 日本応用数理学会 2021 年度年会 (2021)
- [9] 元塚博貴, 石原卓, 乱流中の微細渦構造周りの慣性粒子の運動の数値解析, 日本流体力学会 年会 2021, 東京大学(オンライン) 2021 年 9 月
- [10] 森中 宏樹, 石原卓, 高レイノルズ数乱流中の慣性粒子の運動の直接数値シミュレーション, 日本流体力学会 年会 2021, 東京大学(オンライン) 2021 年 9 月
- [11] 宮本理史, 石原卓, 金田行雄, 乱流の慣性小領域の渦構造についての DNS データ解析, 日

本流 体力学会 年会 2021, 東京大学(オンライン)2021 年 9 月

[12] 浦覚斗, 石原卓, 高レイノルズ数乱流中の流体 粒子と慣性粒子の拡散過程の DNS データ解析, 日本流体力学会 年会 2021, 東京大学(オンライン)2021 年 9 月

[13] 浅井瑞貴, 櫻井幹記, 石原 卓, 乱流中で鉛直重力の働く慣性粒子の衝突過程の DNS データ解析, 数値流体力学シンポジウム 2021 12 月

[14] 櫻井幹記, 石原 卓, 横川三津夫, 一様等方性圧縮性乱流の直接数値シミュレーション, 数値流体力学シンポジウム 2021 12 月

[15] 竹上 諒, 横川 三津夫, 櫻井 幹記, 石原 卓, 圧縮性乱流直接数値シミュレーションコードの DFT を用いた高速化, 研究報告ハイパフォーマンスコンピューティング (HPC) , 2022-HPC-183, 2, 1-7(2022)

(5) 公開したライブラリなど
該当なし

(6) その他(特許, プレスリリース, 著書等)
該当なし