jh190068-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 本研究の目的は「京」を用いて構築した貴重な非圧縮性乱流のビッグデータを活用し、高レイノルズ数乱流の多様なデータ解析のための計算環境を整備することである。今年度は「京」で構築した、高レイノルズ数乱流 DNS データセットを選択・加工・転送・整備した。また、多様なデータ解析のための並列計算コードを開発し、極端に強いエネルギー散逸、局所的なレイノルズ数、乱流中の渦構造と慣性粒子の運動の相関、流体粒子拡散、等についての統計解析を実施した。さらに、圧縮性乱流の高精度・高解像度計算コードの高速化を行い、コードのコアとなる８次精度コンパクト差分法の並列計算の高速化に成功した。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同研究を実施した拠点名

岡山大学、九州大学、神戸大学、名古屋大学

(2) 共同研究分野

■ 超大規模数値計算系応用分野

□ 超大規模データ処理系応用分野

□ 超大容量ネットワーク技術分野

□ 超大規模情報システム関連研究分野

(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, 岡山大学)乱流データ 構築用プログラム開発、データ解析

2. 研究の目的と意義

本研究の目的は「京」を用いて構築した貴重な非圧縮性乱流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とともに、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することで、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である。

3. 当拠点公募型研究として実施した意義

本共同研究では、「京」を用いて構築した貴重な非圧縮性乱流のビッグデータを活用するためのプラットフォームの構築を目指している。乱流現象に関係する多くの未解決問題を解明するためには、貴重な乱流ビッグデータを保存・管理し、いつでも解析できる体制を整えることが重要である。九州大学の拠点では大規模ストレージを活用することにより、巨大データの保存・管理が実現できている。また、名古屋大学の拠点では、データの可視化や圧縮性乱流のさらなるデータ構築が実現した。また、神戸大学と岡山大学の連携で、高効率な圧縮性乱流コードの開発が進んだ。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

該当なし

5. 今年度の研究成果の詳細

京 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」では，最大格子点数 12288^3 の世界最大規模の乱流直接数値計算(DNS)を実現し，世界最高レイノルズ数の乱流場のデータベース構築を行った。本研究課題は，そこで得られた一連の乱流 DNS データを利活用するためのプラットフォームを構築することを目的としている。

今年度は 8 月に京がシャットダウンされるまでに必要なデータセットを特定し、九州大学の大規模ストレージに転送した。データセットは京で実施した，格子点数 6144^3, 8129^3, 12288^3 でコルモゴロフ長 η で規格化した最大波数 $k_{max}\eta$ が約 1 となるデータのほか、小スケールの微細構造とその解像度依存性を明らかにするために構築したデータ（格子点数 4096^3 と 8192^3 で $k_{max}\eta$ の値が 2 のものと 4 のもの）の実空間の速度場データ，圧力場データ，エンストロフィーデータである。また、格子点数 2048^3 および 4096^3 の乱流場においては，時間発展する場の中で追跡した流体粒子および慣性粒子の位置・速度データのデータベースも解析できるように整備し，解析を行った。

今年度は、上記のデータを様々な視点から解析できるように解析コードを整備し、実空間データから差分近似して得られる乱流統計量とフーリエ・スペクトル法の手法で微分して得られる乱流統計量の性質の相違点と類似点を明らかにした。この知見をもとに、高レイノルズ数乱流中の(1)エネルギー散逸率の極端値の統計(投稿中)、(2)慣性力と粘性力の比の統計 [2]、(3)乱流中の渦構造と慣性粒子の分布の関係 [1,3-12] についての解析を進め，結果を得ることができた。

また、非圧縮性乱流と圧縮性乱流における慣性粒子の振る舞いを比較するためのデータベースを整備し，結果をまとめて発表し論文投稿するとともに，圧縮性乱流の高精度・高解像度計算コードのコアとなる８次精度コンパクト差分法の並列計算の高速化 [13] に成功した。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

今年度は九州大学情報基盤開発センターの協力を得て，京で構築した乱流データベースの転送と保存・管理が実現でき，新たな多様な解析を実施できる体制を整えることができた。また、乱流データを解析するためのコードの開発も進み、実際的な成果も得ることができた。

したがって、自己評価は 90 点である。多様なデータ解析が対話的に行える環境を構築し，継続課題にてさらなる研究成果を得るほか，データが一般にアクセスできる体制を整えていくことが今後の課題である。

7. 研究業績一覧（発表予定も含む）

(1) 学術論文 （査読あり）

1. 櫻井幹記，白石啓貴，石原卓，‘一様等方性乱流中の粗視化された 高渦度領域周りの慣性粒子の分布と運動’ 土木学会論文集 A2(応用力学)，Vol. 75, No. 2 (応用力学論文集 Vol. 22)，I_509-I_518, 2019.

(2) 国際会議プロシーディングス （査読あり）

2. Yukio Kaneda, Takashi Ishihara, Koji Morishita, Mistuo Yokokawa, and Atsuya Uno, ‘STATISTICS OF INERTIAL AND VISCOUS FORCES IN TURBULENCE’, ICTAM2020 (ACCEPTED for an ORAL PRESENTATION)
3. Yoshiki Sakurai, Naoki Kobayashi, Takashi Ishihara, ‘Particle collision statistics in multiscale turbulent flow structures’, ICTAM 2020 (ACCEPTED for a SHORT ORAL PRESENTATION WITH POSTER)

(3) 国際会議発表 （査読なし）

4. Yoshiki Sakurai, Takashi Ishihara, Masayuki Umemura, Computational

science of dust coagulation in compressible turbulence (ポスター), CCS International Symposium, University of Tsukuba, 2019年10月

5. Yoshiki Sakurai, Takashi Ishihara, Hitomi Furuya, Masayuki Umemura, Kenji Shiraishi, Clustering and collision statistics of dust particles in weakly compressible turbulence in protoplanetary disks (口頭), In the Spirit of Lyot, Tokyo, 2019年10月
6. Yoshiki Sakurai, Takashi Ishihara, Hitomi Furuya, Masayuki Umemura, Kenji Shiraishi, Collision Statistics of Dust Particles in Compressible Turbulence, International Conference on Flow Dynamics (口頭), International Conference on Flow Dynamics, OS15-6, 618-619, Sendai, 2019年11月

(4) 国内会議発表 (査読なし)

7. 石原卓, 濱端航平, 櫻井幹記, 梅村雅之, 原始惑星系円盤乱流場中のダストの衝突付着成長シミュレーション (口頭), 日本地球惑星科学連合 2019 年大会, MGI35-03, 千葉, 2019年5月
8. 櫻井幹記, 古谷眸, 小林直樹, 石原卓, 岡本直也, 白石賢二, 梅村雅之, Effect of the compressibility of turbulent flows on dust particle collision statistics in a protoplanetary disk (口頭), 日本地球惑星科学連合2019年大会, MGI35-P07, 千葉, 2019年5月
9. 石原卓, 白石啓貴, 櫻井幹記, 梅村雅之, 乱流中の微粒子の衝突についての数値シミュレーション (口頭), 第 23 回 日本流体力学会 中四国・九州支部講演会, 山口, 2019年6月
10. 櫻井幹記, 石原卓, 乱流中の慣性粒子分布における自己相似構造の抽出 (口頭), 第 65 回理論応用力学講演会・第 22 回土木学会応用力学シンポジウム, 北海道, 2019年6月
11. 石原卓, 岡省吾, 乱流中の慣性粒子の分布の位相的データ解析(口頭), 日本流体力学会年会 2019, 電気通信大学, 2019年9月
12. 白石啓貴, 櫻井幹記, 石原卓, 乱流中の慣性粒子の衝突・付着現象理解のための数値解析 (口頭), 第33回数値流体力学シンポジウム, 北海道, 2019年11月
13. 杉浦幸哉, 横川三津夫, 櫻井幹記, 石原卓, 圧縮性流体直接数値シミュレーションにおけるコンパクト差分法の並列解法の高速化, 情報処理学会研究報告, Vol.2020-HPC-173 No.18 (2020).

(5) その他(特許,プレスリリース,著書等)

14. 櫻井幹記, 第65回理論応用力学講演会・第 22 回土木学会応用力学シンポジウム講演賞