

|       |       |
|-------|-------|
| 受付 ID | 16a41 |
| 分野    | 宇宙    |

## 宇宙規模流動現象解明のための計算科学

### Computational science for cosmic-scale flow phenomena

石原 卓

名古屋大学大学院工学研究科

#### 1. 研究目的

本プロジェクトでは宇宙分野と流体分野の連携を図り、乱流の計算科学的方法を駆使して、惑星形成過程および宇宙惑星生命の謎にせまることを目的としている。具体的な連携としては、宇宙分野と数値流体力学分野、特に乱流の計算科学、の専門家の協働により宇宙規模流動現象解明のための具体的な問題および条件設定を行い、カノニカルな乱流の直接数値計算 (DNS) を活用した超大規模数値実験の実現に向けて、メニーコア計算機用の乱流&粒子追跡の並列数値計算コードを開発し、効率化を実施する。

#### 2. 研究成果の内容

原始惑星系円盤ガス乱流中の微惑星形成過程の解明のため、非圧縮性乱流の大規模 DNS を用いた粒子追跡シミュレーションを行い、データ解析を実施した。その結果、乱流中で衝突するダスト粒子の平均相対速度は従来の理論評価より小さいこと、および、平均相対速度が岩石の限界付着速度を上回るような条件においても、乱流による粒子のクラスタリングに起因して、同サイズの粒子対では衝突付着成長可能なものも多く存在し、衝突付着成長の確率は小さくないことを見出した。本研究では、さらに円盤ガス乱流が弱圧縮性であることを考慮し、圧縮性乱流の DNS コードの開発、乱流統計量に関する結果の検証、粒子追跡データの非圧縮性乱流との比較を行った。その結果、圧縮性乱流においてもコルモゴロフの理論に基づいた規格化により非圧縮性乱流とよく一致するエネルギースペクトルが得られること、および、慣性粒子の衝突に関する統計量が両者でよく一致することが確認できた。

#### 3. 学際共同利用として実施した意義

学際共同利用として研究を行ったことにより、宇宙分野においては、微惑星形成過程における「乱流」の役割について、初めて恣意性のない数値計算結果での議論が可能になった。また、流体力学分野、特に乱流の計算科学、においては、スーパーコンピュータによる大規模乱流計算の有用性を、宇宙分野（惑星科学分野）において示すことに成功した。学際共同利用により、ポスト「京」のアプリケーション開発につながる成果を得ることができた。

4. 今後の展望

メニーコアマシンでのコードのチューニングを進め、非圧縮性乱流と圧縮性乱流の結果や性質の違いを把握しつつ、より非線形性の強い（レイノルズ数が高い）乱流場の数値シミュレーションの実現を目指す。同時に、粒子の衝突付着シミュレーションのコード開発を進め、大規模な数値実験により、粒子の衝突条件の解析のみならず、粒子の衝突付着成長に関する統計量の時間変化の理解を深める。

5. 成果発表

(1) 学術論文

- Dust coagulation promoted by turbulent clustering in protoplanetary disks, N. Kobayashi, K. Enohata, T. Ishihara, K. Shiraishi, M. Umemura (submitted)

(2) 学会発表

- 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, 石原卓, 宇宙生命計算科学連携拠点 第2回ワークショップ, 2016年4月
- 微惑星形成過程解明のための乱流の大規模直接数値計算と粒子追跡, 小林直樹, 江野畑圭, 石原卓, 白石賢二, 梅村雅之, 日本天文学会2016年秋季年会, 2016年9月
- 乱流の直接数値計算を用いた原始惑星系円盤ダストの衝突付着成長シミュレーション, 濱端航平, 江野畑圭, 石原卓, 白石賢二, 梅村雅之, 日本天文学会2016年秋季年会, 2016年9月
- 圧縮性乱流直接数値シミュレーション手法の検討, 櫻井幹記, 古谷眸, 岡本直也, 石原卓, 第30回数値流体力学シンポジウム, 2016年12月
- Rapid Dust Coagulation expedited by Turbulent Clustering in Protoplanetary Disks, T. Ishihara, Formation of the Solar System and the Origin of Life, Lorenz center, Leiden, 2017年2月
- Direct numerical simulations of incompressible and compressible turbulence, T. Ishihara, Y. Sakurai, JAPAN-RUSSIA WORKSHOP ON INNOVATIVE APPROACHES AND SUPERCOMPUTER TECHNOLOGIES IN COMPUTATIONAL PHYSICS, Moscow, 2017年3月

(3) その他

| 使用計算機                           | 使用計算機に○ | 配分リソース*      |
|---------------------------------|---------|--------------|
| HA-PACS                         |         |              |
| HA-PACS/TCA                     |         |              |
| COMA                            | ○       | 1200 (+480*) |
| ※配分リソースについては32node換算時間をご記入ください。 |         |              |

\*32node換算480時間の追加申請を行い、採択された。