

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

岡山大学大学院環境生命科学研究科

1. 研究目的

本プロジェクトでは宇宙分野と流体計算科学分野の連携を図り、乱流の計算科学的な方法を駆使して、微惑星の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、宇宙分野の専門家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、宇宙規模流動現象の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)を活用した大規模な数値実験を行う。また、エクサスケールのスーパーコンピュータを用い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&粒子追跡の並列コードを開発し、高効率化を実施する。

2. 研究成果の内容

原始惑星系円盤中の微惑星形成過程においては、円盤ガス乱流中のダスト粒子が衝突付着を繰り返して成長し、サブミクロンからキロメートルサイズの微惑星まで成長すると考えられているが、中心星落下問題や衝突破壊問題などの障壁が存在し、理論的な説明が不完全である。近年、乱流による粒子のクラスタリングがこれらの問題の解決の鍵を握る可能性があるとして注目され、乱流の数値シミュレーションを用いた研究が行われるようになってきている。

我々のグループでは、乱流の大規模な直接数値計算 (DNS) を用いて乱流中の慣性粒子の運動の性質を調べ、ダスト粒子の衝突付着に関する統計を調べた。その結果、粒子の平均衝突速度は従来の理論予測の半分以下であること、衝突する粒子の速度分布より低速で衝突して破壊しない粒子が確かに存在することを確認した。また、開発したコードによる、乱流中の粒子の付着成長シミュレーションでは、粒子の平均衝突速度が限界付着速度より大きいような場合においても、限界付着速度以下で衝突付着成長を繰り返す粒子が存在することを確認している。

以上は、非圧縮性乱流の直接数値シミュレーションによる結果である。一般に、原始惑星系円盤ガスの流れは弱圧縮性であり、非圧縮性とみなしてよいと考えられているが、確かな裏付けがあるわけではない。そこで、本研究では、高精度・高解像度な差分法による圧縮性乱流の DNS を行い、非圧縮性乱流の結果と比較することで、ダスト粒子の衝突付着成長過程における流れの圧縮性の影響を調べた。

その結果、圧縮性の影響で乱流場そのものの統計量は非圧縮性乱流と異なるが、粒子の衝突付着成長に関する統計量に目立った違いがないことが明らかとなった。これは、今後粒子の衝突付着成長に関する、さらに大規模な数値実験を行うにあたり、目的に応じて、非圧縮性もしくは圧縮性乱流の DNS を使い分けて活用すれば良いことを意味する。なお、圧縮性乱流 DNS では、圧縮成分と非圧縮成分の大きさを制御可能な外力の導入に成功し、計算の高効率化も実現した。

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の研究により、乱流の大規模 DNS に基づく恣意的でない結果を宇宙・惑星科学分野に示すことに成功している。圧縮性の影響についても、原始惑星系円盤中の微惑星形成過程の文脈での議論により新たな発見につながっている。

4. 今後の展望

ポスト京や今後のスーパーコンピュータの性能を十分に発揮するようコードの最適化を行い、更なる大規模計算や更なる多粒子計算を実現して、高レイノルズ数乱流中の衝突付着成長に関するより信頼性の高い結果を提示することが今後の課題である。

5. 成果発表

(1) 学術論文

(2) 学会発表

・櫻井幹記, 古谷眸, 小林直樹, 岡本直也, 石原卓, 白石賢二, 梅村雅之, **Effect of compressibility of turbulence in the coagulation process of the dust particles in the protoplanetary disks**, 日本地球惑星科学連合大会 2018/05/21 幕張メッセ

・石原卓, 小林直樹, 江野畑圭, 濱端航平, 櫻井幹記, 白石啓貴, 梅村雅之, 白石賢二, 原始惑星系円盤乱流場中のダスト付着成長シミュレーション, 第35回 Grain Formation Workshop 2019/02/18, 石垣島アートホテル

・櫻井幹記, 小林直樹, 岡本直也, 白石賢二, 古谷眸, 梅村雅之, 石原卓, 原始惑星系円盤乱流の圧縮性とダスト粒子統計, 第35回 Grain Formation Workshop, 2019/02/18, 石垣島アートホテル

・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付着成長シミュレーション, ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星 第3回公開シンポジウム, 2019/03/13 東京工業大学

・櫻井幹記, 小林直樹, 白石賢二, 岡本直也, 石原卓, 古谷眸, 梅村雅之, 原始惑星系円盤乱流の圧縮性がダスト粒子運動に及ぼす影響について, 日本天文学会 2019 年春季年会, 2019/03/16, 法政大学

(3) その他

使用計算機	使用計算機 に○	配分リソース*	
		当初配分	追加配分
COMA	○	77,400	
Oakforest-PACS	○	117,400	
※配分リソースについてはノード時間積をご記入ください。			