

2025年度北海道大学情報基盤センター萌芽型共同研究成果報告書

1. 研究類型 A) 計算資源利用型

2. 研究課題名 非 MHD 効果を扱う新たな電磁流体力学によるグローバル地球磁気圏シミュレーション

3. 研究期間 2025年7月18日～2026年3月31日

4. 研究代表者

氏名	所属機関・部局名	職名	備考
関戸晴宇	北海道大学・情報基盤センター	特任助教	

5. 研究分担者

氏名	所属機関・部局名	職名・学年	備考
梅田隆行	北海道大学・情報基盤センター	教授	
深沢圭一郎	総合地球環境学研究所	教授	

6. 共同研究の成果

研究目的・方法

地球磁気圏全体の時間発展を第一原理運動論方程式によって解くことができれば、磁気圏内で観測される物理過程をより精密にシミュレートすることができる。しかし、広い計算領域を運動論で解くには膨大なメモリが必要になるため、計算負荷を抑えられる流体シミュレーションが有効であると考えられる。一方で、MHD 単一流体近似では慣性効果やジャイロ粘性効果が切り落とされており、運動論シミュレーションとの間には様々な違いが現れる。

流体シミュレーションをより運動論シミュレーションに近づけるためには、高次モーメント量 (Umeda 2020) とともに、Ohm の法則における慣性項が必要である。このうち、高次モーメント量の導入は、世界的にもほとんど研究が行われていない。そこで本研究では、磁気流体力学シミュレーション手法に対し、4次までの高次モーメント量を導入する新たな手法の開発を行う。

MHD 方程式を数値的に解くにあたっては、衝撃波捕獲法と呼ばれる不連続解を捉えるための解法が用いられてきた。現在はこの一種である HLLD 近似 Riemann 解法 (Miyoshi & Kusano 2005) が広く用いられており、保存型の時間発展式を扱っている。しかし、高次モーメント量を導入した方程式系では非保存型の式を解く必要があるため、新たな方程式系に HLLD 法をそのまま適用することは難しい。そのため、非保存型の方程式への適用が可能な数値解法を用いて流体の不連続解を捉える必要があることから、流束ベクトル分離 (Flux Vector Splitting: FVS) 法に基づいた新たな手法を開発する。

研究結果

1次元流体シミュレーションについて、Roe 法 (Roe 1981) を実装し、HLLD 法との比較を行った。また、FVS (Flux Vector Splitting) 法に基づいて、Steger-Warming 法 (Steger & Warming 1981) で解像されて

いなかった接触不連続を解像する新たな手法の開発を行った。この手法についても HLLD 法との比較を行った。

プラズマ運動論シミュレーションで電磁場計算手法として用いられる FDTD (Finite-Difference Time-Domain) 法について、高次精度手法の開発を行った。プラズマシミュレーションへの適用にあたり、電荷保存則が丸め誤差の範囲で満たされるように電流密度の補正を行った。

引用文献

1. T. Umeda, “Evaluating higher moments in the transverse Kelvin–Helmholtz instability by full kinetic simulation”, *Physics of Plasmas*, Vol. 27, 032112, 2020
2. P. L. Roe, “Approximate Riemann solvers, parameter vectors, and difference schemes”, *Journal of Computational Physics*, Vol. 43, pp. 357–372, 1981
3. T. Miyoshi and K. Kusano, “A multi-state HLL approximate Riemann solver for ideal magnetohydrodynamics”, *Journal of Computational Physics*, Vol.208, pp. 315–344, 2005
4. J. L. Steger and R. F. Warming, “Flux vector splitting of the inviscid gasdynamic equations with application to finite-difference methods”, *Journal of Computational Physics*, Vol. 40, pp. 263–293, 1981

成果発表

以下の国際学会、国内学会および研究集会で研究発表を行った。

国際学会

- 2025 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference, Sydney, Australia
- 9th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics, Fukuoka, Japan

国内学会・研究集会

- Japan Geoscience Union Meeting 2025, 千葉市
- 第 158 回 地球電磁気・地球惑星圏学会 (SGEPSS) 総会・講演会, 神戸市
- STE シミュレーション研究会 : プラズマ科学とデータ駆動科学の協調, 東京都