

# プラズモイド型乱流磁気リコネクションの 磁気流体シミュレーション研究

Magnetohydrodynamic simulation of plasmoid-dominated turbulent reconnection

研究代表者： 銭谷誠司（神戸大学・都市安全研究センター・特命准教授）  
zenitani@port.kobe-u.ac.jp

## 研究目的 (Research Objective):

磁気リコネクションは宇宙・天体プラズマ中の磁気エネルギーを解放する重要な物理素過程である。磁気流体 (MHD) 近似のもとでは、磁気リコネクションの基本的な性質は Sweet=Parker 理論モデルによって長年議論されてきた。しかし最近、細長く伸びた Sweet=Parker リコネクション領域が大量のミニ・リコネクション領域と磁気島 (プラズモイド) に分裂し、乱流状態に移行することがわかってきた。本研究では、このような「プラズモイド型乱流リコネクション」の基礎的な性質を大規模な数値シミュレーションを通して理解することを目指す。さらに、こうした研究と並行してシミュレーションコードのそのものの改良・改善を図る。

## 計算手法 (Computational Aspects):

研究代表者が開発・公開している「OpenMHD」コードを利用する。OpenMHD は 2次元 MHD 問題を有限体積法で解く。MPI を用いて 500~2400 コアの並列計算を実行する。最新版では、データを GPU にオフロードして計算することもできる。

## 研究成果 (Accomplishments) :

リコネクションの2つの上流領域で、プラズマ密度が不揃いな「密度非対称」条件下でのプラズモイド型乱流リコネクションの数値シミュレーションを行った。昨年度までの研究で、磁気リコネクションの進行速度 (リコネクション・レート) が理論予想に従ってスケールすることや、密度勾配によってプラズモイドが回転することがわかっていた [2]。

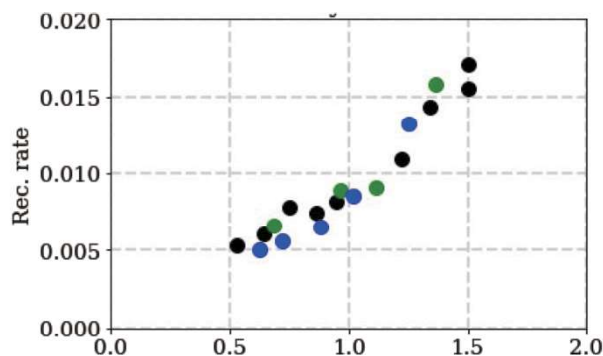


図1 密度非対称磁気リコネクションの実効リコネクションレート(縦軸)と圧縮性を考慮した修正スケール則(横軸)との比例関係

今年度は、このパラメーターサーベイを拡張して多数の計算を実行し、その結果を吟味した結果、プラズマの圧縮性を考慮した新しいスケール則を用いると予測精度が良くなることを発見した（図1）。

計算コード OpenMHD の改良も進んだ。OpenMP の記述を工夫してスレッド数が多い場合の安定性を向上させた。さらに OpenMHD の GPU および MPI-GPU 環境での利用ノウハウも蓄積した。図2は、AMD 社のマルチコア CPU (EPYC プロセッサ 7282 : 16 コアおよび 7452 : 32 コア) および NVIDIA 社の GPU (K80, P100, ... A100) で OpenMHD の実行時間を比較した図である。ノードあたり（≒電力あたり）で考えると、GPU はマルチコア CPU と比べて概ね 1/2~1 オーダー高速であることがわかる。ローエンドの Tesla K80 や P100 は、無料クラウドサービス Google Colaboratory (Colab) でも利用できる。2022 年 9 月にオンラインで開催した国際シミュレーションスクールでは、我々は Colab と OpenMHD を使った実行環境を提供した（口頭発表 #6）。A100 は京大新システムにも導入された GPU である。今後、システム G を利用すれば、大規模な計算を圧倒的短時間で実行できるはずである。

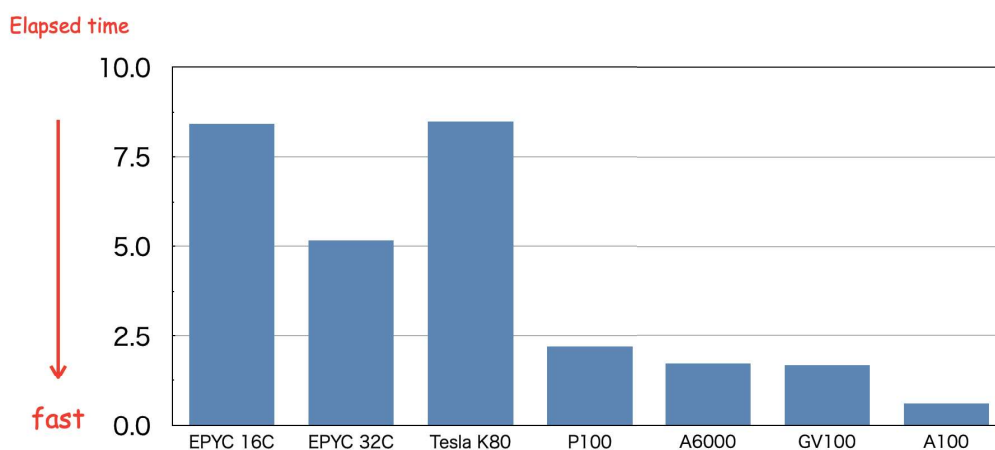


図2 磁気リコネクションテスト問題のベンチマークテスト。  
各実行環境(横軸)での実行時間(縦軸)を示す。

## 公表状況 (Publications) :

### (論文)

1. Zenitani, S. and S. Nakano, *Loading a relativistic Kappa distribution in particle simulations*, Physics of Plasmas 29, 113904 (2022)
2. 山本百華, 宇宙プラズマ中の密度非対称条件下での磁気リコネクションの MHD シミュレーション (神戸大学大学院工学研究科 2022 年修士論文)

### (口頭)

3. Zenitani, S., Yamamoto, M., and T. Miyoshi, *Plasmoid-dominated turbulent reconnection in symmetric and asymmetric systems*, US-Japan Workshop on Magnetic Reconnection

(MR2022), Monterey, USA, May 2022 (招待講演)

4. Zenitani, S., Yamamoto, M., and T. Miyoshi, *Plasmoid-dominated turbulent reconnection in symmetric and asymmetric systems*, EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, May 2022
5. Zenitani, S., Yamamoto, M., and T. Miyoshi, *Plasmoid-dominated turbulent reconnection in symmetric and asymmetric systems*, AOGS 19th Annual Meeting, Online, Virtual, August 2022
6. Zenitani, S., *Getting started with MHD simulations*, The 14th International School/Symposium for Space Simulations (ISSS-14), Online/Kobe, Japan, September 2022 (招待講演)
7. 銭谷誠司、磁気リコネクションにおけるプラズマ粒子軌道研究の進展、プラズマ・核融合学会、富山、2022年11月 (招待講演)