

修士論文

新しい高精度MHDスキームの磁気リコネクションへの  
応用

小川匡教

東京大学大学院理学系研究科

地球惑星科学専攻

宇宙惑星科学大講座

平成28年3月18日

# Abstract

Magnetic reconnection drives the fast release of magnetic energy in explosive events such as magnetic substorms in the Earth's magnetosphere and flares in the solar corona. The Magnetohydrodynamics(MHD) simulations are useful methods to learn macroscopic phenomenon. Recently, Kawai[2013] has proposed that the high-order MHD scheme that combined the compact differencing scheme and the localized artificial diffusivity(LAD) method. This scheme is originally proposed for the hydrodynamics(HD) simulations to resolve turbulence and capture the numerical discontinuities and then applied to the MHD. The LAD method add the artificial diffusivity to capture the numerical discontinuities. The hydrodynamic discontinuities are numerically captured by an additional artificial viscosity in contrast the magnetic discontinuities are captured by an additional artificial resistivity that is modeled on the basis of viscosity. However, magnetic reconnection is not just dissipative phenomena that diffuse the thin current sheet by the magnetic resistivity but the magnetic lines are reconnected at the magnetic discontinuities. This dissipation is a unique process in the MHD. Therefore, it is not clear whether this newly high-order MHD scheme can be applied to magnetic reconnection or not. In this study, I investigate the characteristics of magnetic reconnection by using this new MHD scheme on the several initial conditions.

Magnetic reconnection is triggered by the artificial magnetic resistivity in the diffusion region. The higher resolution is employed, the less effects of the resistivity to the reconnection process become. Hence, current sheets get thinner so that multiple X-lines are generated. I show the reconnection rate at the major X-line reaches about  $0.1B_0V_A$ . On the condition where magnetic reconnection is initiated more naturally multiple X-lines, plasmoids are merged. Furthermore, I consider the double current sheets. The X-lines interact with the plasmoids. I show the reconnection rate at the X-line where the plasmoid merging occur or the X-lines interact with the plasmoids is larger than  $0.1B_0V_A$  and more explosive magnetic reconnection occurs by interaction between the plasmoids and the X-lines. Finally, I attempt to suppress magnetic reconnection, but I show it is difficult to completely suppress even by this high-order MHD scheme. According to the above results, I discuss an issue on studying magnetohydrodynamics phenomenon in space plasma physics by using MHD simulations.

# 要旨

磁気リコネクションは磁力線が繋ぎ変わることで磁気エネルギーを爆発的に解放する現象であり，地球磁気圏の地磁気嵐や太陽コロナにおけるフレア現象などにおいて重要な役割を果たす．電磁流体力学 (MHD) シミュレーションはそのような大規模物理現象の再現に有効な手段の一つである．近年 Kawai[2013] によって新たに localized artificial diffusivity(LAD) 法とコンパクト差分法を組み合わせた高精度 MHD スキームが提案された．この MHD スキームは流体力学 (HD) シミュレーションの分野で，乱流と衝撃波が混在する流れ場を精度よく計算するために考案されたスキームを MHD に応用したものである．LAD 法とは衝撃波を捕獲するために人工的な拡散を不連続面にのみ加える手法である．HD では速度の不連続面に人工的な粘性を与える，MHD では磁場の不連続面を捕獲するために，粘性モデルをそのまま適用した人工抵抗を与える．しかし磁気リコネクションは，薄くなった電流層を電気抵抗がただ拡散させるという散逸現象ではなく，磁場の不連続面において磁力線の繋ぎ変わりが発生する．これは MHD 特有の散逸過程であるため，HD で適用できていたスキームが MHD における磁気リコネクションに適応可能かどうかは明らかではない．本研究では，この MHD スキームで磁気リコネクション現象を 4 つの条件下で数値シミュレーションすることで，このコードで発生する磁気リコネクションの性質を調査した．

その結果拡散領域中央に人工抵抗が効果的に働き，磁気リコネクションを発生させることが分かった．また高解像度化することで人工抵抗の値は小さくなる．よってより薄い電流層が再現され，複数の X-line を伴う磁気リコネクションが発展した．また最も卓越した X-line におけるリコネクションレートは解像度に依存せずおよそ  $0.1B_0V_A$  という高い値となることを示した．次に，より自然に複数 X-line が発生する系でシミュレーションを行ったところ，磁気島融合が確認できた．さらに電流層を二つ設置した場合，それぞれの電流層で発生した X-line とプラズモイドが相互作用することが分かった．磁気島融合や，X-line とプラズモイドの相互作用で発生する X-line におけるリコネクションレートは  $0.1B_0V_A$  よりも高い値となり，より爆発的なリコネクションが発生することを示した．最後に磁気リコネクションの抑制効果が期待される系でシミュレーションを行ったが，高精度 MHD スキームにおいても完全な抑制は難しいことを示した．以上の結果をふまえて，MHD において宇宙電磁流体现象を数値シミュレーションする上での課題に関して考察した．