

非対称磁気リコネクションの磁気流体的研究

MHD study of asymmetric magnetic reconnection

研究代表者：近藤 光志 (愛媛大学宇宙進化研究センター)

研究目的 (Research Objective):

磁気リコネクションは、宇宙プラズマにおける様々な爆発現象において重要な役割を果たしていることは、これまでの多くの研究において示されてきた。身近な現象としては太陽フレアにおいて、太陽コロナに蓄えられた磁場エネルギーを爆発的に開放する機構として磁気リコネクションが重要な役割を果たしていることが観測的にも理論的にも示されている。Mクラスを越えるような大規模太陽フレアでは、電流層を挟んだ両側の繋ぎ変わる磁力線群の磁場強度やプラズマ密度などが対称な磁気リコネクションが最終的に起こることで磁場エネルギーを爆発的に開放していると考えられている。一方、対称磁気リコネクションを起こす状態に導いているのが、異なる磁気ループ間で起こる非対称磁気リコネクションであると考えられている。

一方、太陽風により運ばれる惑星間空間磁場と固有磁場を持つ惑星の磁気圏磁場との間でも非対称な磁気リコネクションが引き起こされていることが示されてきた。GEOTAIL 衛星観測を用いた我々の先行研究において、この非対称磁気リコネクションを起こしている磁気圏境界層の環境がこれまで我々が示してきたプラズマ温度一定環境と大きく異なることが示されてきた。

本研究では、より実環境に近い非対称磁気リコネクションを調べるため、非対称磁気リコネクションの密度比依存性を明らかにすることを目的とする。

計算手法 (Computational Aspects):

前年度までと同様に、2step-Lax-Wendroff コードを用いて磁気流体方程式を二次元的に解く。ただし、自発的に発展する磁気リコネクションを解くために、外部境界からの影響を排除するため、初期に与える擾乱により発生するファストモード波が外部境界に達するまでの領域を計算する。このため、非常に大規模な計算領域を計算する必要があり、電波科学計算機実験装置の共同利用を活用させていただいた。

特に本研究では、磁場強度比 k_M が 1 から 2 の比較的磁場強度比の小さな領域において、密度比 k_N が実環境に近い 0.05 から 1.1 の領域でパラメータサーベイをすることで密度比依存性を明らかにする。

研究成果 (Accomplishments) :

図 1 に磁場強度比 $k_M=2$ におけるプラズマバルク速度 x 成分(V_x)の空間分布を示す。対称磁気リコネクションにおいてスローショックに挟まれたジェット領域と呼ばれる領域は、非対称磁気リコネクションにおいては低ベータ側のスローショックとインターミディエイトショックに挟まれる。非対称磁気リコネクションでは、低ベータ側のプラズモイド領域(図中下側)のプラズマ速度の最大値は、そのジェット領域におけるプラズマ速度の最大値と同等まで加速されることが分かる。図 2 に磁場強度比 $k_M=2$ におけるプラズマ速度の最大値の密度比依存

性を示している。図 2 における密度比 0.2 のケースがこれまで示してきた等温条件に最も近い条件であり、以前示したように、時間と共にジェット領域の最大値(赤プロット)にプラズモイド領域の最大値(白抜きプロット)に近づいていく。一方、密度比 0.05 の場合、ジェット領域よりもプラズモイド領域の最大値が大きく、時間と共に、ジェット領域の最大値がプラズモイド領域の最大値に近づいていく。これらの間にある密度比 0.1 においては、ジェット領域とプラズモイド領域の最大値はほぼ同じであることが分かる。

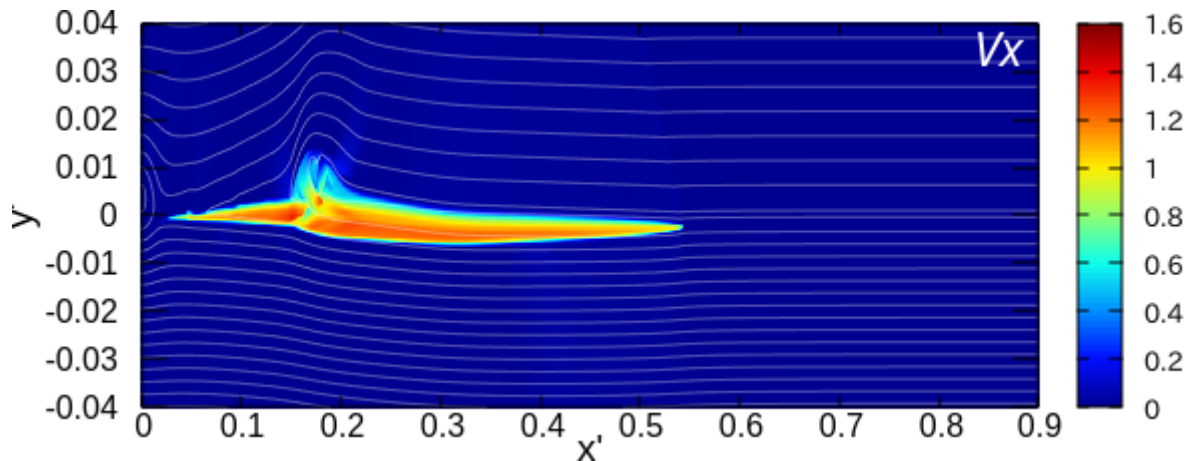


Fig.1 磁場強度比 $k_M=2$ におけるプラズマバルク速度 x 成分(V_x)の空間分布

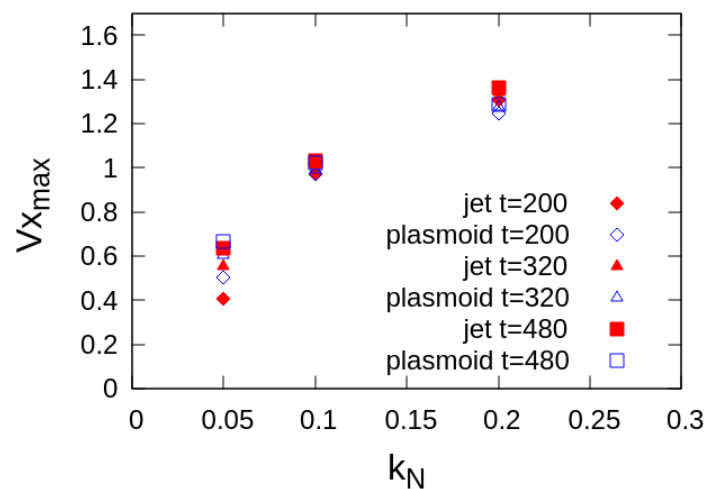


Fig.2 密度比 k_N に対するジェット領域およびプラズモイド領域の最大プラズマ速度

公表状況 (Publications) :

(口頭)

1. 近藤光志, 非対称磁気リコネクションと太陽フレア: フレア予測とモートン波, RISH 電波科学計算機実験(KDK)シンポジウム, オンライン, 2026 年 3 月
2. 新田伸也・近藤光志・銭谷誠司, 自己相似磁気リコネクション・モデルの相対論化に向けて: 状態方程式の影響, 日本天文学会 2025 年秋季年会, 山口, 2025 年 9 月
3. 近藤光志, Dependence of magnetic reconnection outflow on the current sheet condition, 地球電磁気・地球惑星圏学会 2025 年秋学会, 兵庫, 2025 年 11 月