

別紙 4

報告番号	※	甲	第	号
------	---	---	---	---

主 論 文 の 要 旨

論文題目 Magnetohydrodynamic Simulation Study on Fast Magnetic Reconnection

(磁気リコネクションの高速化機構に関する電磁流体力学シミュレーション研究)

氏 名 柴山拓也

論 文 内 容 の 要 旨

磁気リコネクションは天文学、宇宙物理学、実験室科学に共通する基礎的なエネルギーの変換過程である。磁気リコネクションは磁力線の繋ぎ替えが起こることで磁気エネルギーを熱や運動エネルギーに変換する。太陽フレアや磁気圏サブストーム、トカマクディスラプションのような爆発的エネルギー解放を説明するためには速い磁気リコネクションが必要である。磁気リコネクションの速さは磁気リコネクション率を用いて表現される。磁気リコネクション率は拡散領域へのインフロー速度を上流の Alfvén 速度で規格化した無次元量であり、様々な現象を説明するのに必要な磁気リコネクション率は 0.01 程度と考えられている。リコネクション理論の一つの目標はこのリコネクション率を説明することである。

Sweet-Parker モデルと Petschek モデルは磁気流体力学(MHD)近似において確立された 2 次元定常リコネクション理論である。Sweet-Parker モデルで予想されるリコネクション率は Lundquist 数の平方根の逆数で表されるが、太陽コロナでの電気抵抗は非常に小さく、Lundquist 数が 10 の 12 乗程度と非常に大きい。このため、太陽コロナでは Sweet-Parker モデルのリコネクション率は非常に小さく太陽フレア等を説明できない。一方、Petschek モデルでは非常に小さな拡散領域とそこから伸びるスローモード MHD 衝撃波でのエネルギー変換によってリコネクション率は Lundquist 数にほとんど依存しないため、速い磁気リコネクションを説明可能である。しかし、電気抵抗が空間的に一様な系ではこの小さな拡散領域を維持することが難しく Petschek モデルは構造を維持できないと考えられている。そのため Petschek モデルの一様抵抗プラズマにおける実現可能性についてはこれまで疑問を持たれていた。

以上の定常リコネクションモデルに対して非定常リコネクションモデルとしてはプラズモイドリコネクションが一様抵抗下で実現可能な高速リコネクションとなり得ると考えられている。細長い拡散領域はテアリング不安定性に対して不安定

であり、磁気島(プラズモイド)によって複数の二次的な拡散領域に分断されることが知られている。プラズモイドリコネクションではこのプラズモイドの数が十分であればその間に形成する小さな Sweet-Parker 型の拡散領域によって速いリコネクションが実現可能とされる。そのためプラズモイドリコネクションは Sweet-Parker モデルに基づいた磁気リコネクションモデルであると言える。

これに対して、本研究では一様抵抗における速い磁気リコネクションのメカニズムをさらに詳細に解明するため、新たな大規模 MHD シミュレーションを行った。その結果、これまで見出されることがない Petschek モデルに基づいた非定常リコネクションによって磁気リコネクションが高速化することを初めて見出した。すなわち、プラズモイドリコネクションの非線形発展の結果、一様抵抗であっても小さな Petschek 型の拡散領域が自発的に出現することを明らかにした。また、この過程は Lundquist 数がある値よりも大きいときに特に顕著に現れることも明らかにした。

さらに、本論文ではこの Petschek 型の非定常リコネクションの発生機構を明らかにするため、一つの Petschek 型拡散領域がプラズモイドとともに形成する詳細な過程を明らかにするためのシミュレーションを、初期境界条件を適切に設定することにより実現した。その結果、プラズモイドの非線形成長の結果として、対称性が破れ、磁場のヌル点と流速場の停留点が一致しなくなることがリコネクションの高速化に重要な役割を担っていることを見出した。さらに、この高速磁気リコネクションは拡散領域スケールでの構造に起因して発生するため、そのリコネクション率は Lundquist 数に強く依存しないことを説明した。以上の結果から、“dynamical Petschek reconnection” と呼ぶべき新しい磁気リコネクションのレジームを発見した。このレジームでは非定常な Petschek 型拡散領域がプラズモイドの発生に伴って形成することで速いリコネクションが実現されており、従来の機構とは異なる高速化機構が働いている。

本論文ではさらに、太陽フレアにおけるこのリコネクションの観測的検証を行うために必要な解析研究も行われた。太陽フレアにおけるリコネクションを観測的に調べるためには、電離過程や 3 次元効果などについて正しく評価する必要がある。太陽フレアの拡散領域に関する観測的研究は高階電離した鉄等の重イオンの輝線を用いることで行われる。これらの重イオンは太陽フレアでの加熱の結果、電離が進行しプラズマ温度に対応した電離平衡状態へ移行する。次世代の観測衛星では非常に時間分解能が高い観測が計画されており、この電離過程を時間分解して観測できる可能性がある。そこで本論文では MHD 方程式とともに電離方程式を解くことでリコネクション領域内での電離進行過程を再現するシミュレーションを実現した。その結果ある断面積以下のプラズモイドには電離平衡近似が適用できないことを明らかにした。さらに、その結果に基づき、電離非平衡モデルとの比較からプラズモイドの成長過程を観測的に調べる方法を提案した。また、3 次元系での MHD 数値計算も行い、2 次元系と 3 次元系での構造発展の違いについて議論を行った。