論文審査の結果の要旨

氏名　清水　健矢

本論文は、磁場の極性が反転したプラズマシートにおける磁気リコネクションの発達の条件を粒子シミュレーションで調べた研究であり、4 章で構成されている。第 1 章は、本論文で議論する磁気リコネクションおよびティアリング不安定に関する一般序論である。磁場の極性が反転したプラズマシートにおいて、ティアリング不安定と呼ばれる電磁流体不安定によりプラズマシートに蓄えられた磁場のエネルギーが解放されることは 1960 年代からよく研究されてきた。しかし地球磁気圏尾部などで観測されるプラズマシートは、しばしばプラズマシートの厚さがイオンのジャイロ半径程度でありイオンおよび電子の運動論が重要になるが、電磁流体不安定では扱えない運動論が効く領域での磁場のエネルギー解放は必ずしもよくわかっていなかった。特に、運動論効果を取り入れた粒子シミュレーションの研究では、ティアリング不安定の成長が確認できない、もしくは不安定成長の飽和レベルが低く十分な磁気エネルギー解放が起きないことが知られていた。一方、ハリス解と呼ばれる反平行磁場の初期平衡解において、ティアリング不安定成長モードの磁場の揺らぎ（有限振幅の固有モードを模擬したもの）を加えると、十分な磁気エネルギー解放が導かれることも知られていた。このようにティアリング不安定のトリガー機構には未解決の部分があり、特に運動論近似で記述される薄いプラズマシートから電磁流体近似で記述される厚いプラズマシートまでのティアリング不安定の磁気エネルギー解放の研究の重要性が述べられている。また本論文でトリガー機構の研究を数値シミュレーションを用いて行うにあたり、プラズマシートでの温度異方性を導入することでティアリング不安定の成長時間を速めて研究を行うことが述べられている。

第 2 章は、様々な条件化でおきるリコネクションを統一的に理解するために、プラズマシートのイオンジャイロ半径に対する厚み、磁場に平行方向と垂直方向の温度異方性、イオンと電子の質量比の条件を色々と変えた空間 2 次元の粒子法の数値シミュレーションを実行した。その結果、垂直方向の温度のが平行方向の温度よりも高い温度異方性を導入すれば厚いプラズマシートでも十分発達したティアリング不安定が起き、そのリコネクション率はどのケースも 0.2 程度に達し、通常電磁流体近似で知られている値になること、また発達するティアリング不安定ではイオンと電子の質量比に依らないことを突き止めた。また更にティアリング不安定から大規模リコネクションへと発達する条件として、厚いプラズマシートでは大きな温度異方性が必要とされるが、薄いプラズマシートでは小さな温度異方性で良いことが述べられた。

第 3 章では、第 2 章で初期条件として導入した温度異方性が、プラズマシートの断熱圧

縮によって導かれる可能性を議論している。プラズマシートに外部から注入される磁気フラックスによって温度異方性が成長できるかどうかを空間 2 次元の数値シミュレーションを用いて議論した。その結果、厚いプラズマシートに対するプラズマシートの圧縮によって、2 章で議論された温度異方性は生成可能であり、その結果大規模リコネクションへと発達すること、また空間 3 次元効果を取り入れると電流駆動型の低周波混成ドリフト不安定(LHDI)の成長が起きることが予想されるが、厚いプラズマシートの圧縮では必ずしも LHDI の成長は大きくないことを確認し、2 章で展開した 2 次元数値シミュレーションの妥当性を述べた。

第 4 章は、まとめと考察および将来への展望が簡潔に述べられている。本論文の主要な結論として、第 2 章で展開した温度異方性の条件の下での反平行磁場のプラズマシートにおいては、LHDI のような電流駆動型のプラズマ不安定による異常電気抵抗がなくプラズマシートの厚みがイオンジャイロ半径に比べて大きくても、無衝突ティアリングが発生し、リコネクション率が 0.2 程度の十分な磁気エネルギー解放が担えることが議論されている。また今後の課題として、初期ハリス解において電流方向のたて磁場の効果について議論されている。

なお、本論文で論述されたティアリング不安定に関する研究は、地球磁気圏のみならず宇宙から実験室プラズマに至る広範囲でのリコネクションを理解する上で重要であり、本研究により運動論領域での磁気リコネクションの理解が前進したことが認められる。本論文は、藤本正樹および篠原育との共同研究であるが、論文提出者が主体となって数値シミュレーションをおこなったもので、論文提出者の寄与が十分であると認められる。

以上により、本審査委員会は、本論文が博士学位論文として十分な内容を含んでいるものと判定し、論文提出者に博士（理学）の学位を授与できると認める。