

## 審査の結果の要旨

氏名 曹慶紅

本論文は「**Experimental Study of Dynamic Magnetic Reconnection in Tokamak Plasma Merging Experiment (トカマクプラズマ合体実験を用いた動的磁気リコネクション現象の実験的研究)**」と題し、3次元プリンタを駆使したホルダー作成によって高い空間解像度と測定精度を確保した2次元磁気プローブを開発し、合体するトカマクの磁気リコネクションについて高精細・高精度の磁気計測を行って、合体初期に合体トカマクのプラズマ電流と同極性のプラズモイド、合体中期以降に異極性のプラズモイドが生成されることを見出した。2種類のプラズモイドの生成機構は大きく異なるが、いずれのプラズモイドも放出の際、リコネクションを高速化させ、同時にリコネクションアウトフローに起因するイオン加熱効果を明らかにしている。

第1章は、「Introduction」であり、研究の背景となった核融合エネルギー開発から、その中心となるトカマク磁気閉じこめ実験、さらに課題となるプラズマ加熱と進む中で加熱・点火を目指したトカマク合体実験をまとめている。

第2章は、「Magnetic Reconnection」と題し、トカマク合体実験のプラズマ加熱のキーとなる磁気リコネクション研究を解説している。磁気リコネクションを記述する定常状態を仮定したリコネクションモデルとして、Sweet-Parkerモデルを記述した後、現状の高速リコネクションを説明すべく、プラズモイド発生・放出を伴った動的リコネクションについて紹介している。

第3章は、「Experimental Setup」と題し、動的リコネクション研究のキーとなる高精細、高精度の両立する2次元磁気プローブの開発について述べ、さらに同実験を遂行するトカマク合体実験装置 TS-6 とその電源設備、さらに動的リコネクションの加熱現象を解明する2次元イオンドップラー計測についてまとめている。

第4章は、「Plasmoid Dynamics with Parallel Current in Early Reconnection Phase of Two Merging Tokamak Plasmas」と題し、トカマクプラズマ2個を軸対称合体させた場合、合体初期にトカマクプラズマ電流と同極性のプラズモイドが生成される現象について詳細な磁気計測によって解析を行っている。不安定になりやすいトカマクの曲率の悪い部分から磁気島であるプラズモイドが切り離される物理、磁気島の両側に形成される磁気リコネクション点から両側下流に

流れ出るリコネクションアウトフローによるイオン加熱物理，さらにトカマクとの引力によってプラズモイドが X 点領域から放出・吸収され，その際のプラズマ質量放出効果でリコネクションが高速化する物理を述べている。

第 5 章は，「Plasmoid Dynamics with Anti-parallel Current in Main Reconnection Phase of Two Merging Tokamak Plasmas」と題し，初期のプラズモイドが吸収された後，トカマクプラズマ電流と逆極性のリコネクション電流シートが形成され，そのインフロー束がアウトフロー束を上回り，今度は逆極性の電流を有する磁気島＝プラズモイドが生成される物理を述べている。こちらでもリコネクションアウトフローによるイオン加熱やプラズモイド放出によるリコネクションの高速化について検証を行っている。

第 5 章 は，「Discussion and Conclusions」で成果を整理し，まとめている。

以上要するに，本研究は 3 次元プリンタを用いた高精細・高分解能の 2 次元磁気プローブを開発した上で，2 個のトカマクプラズマの合体中に発生する動的リコネクション現象について，合体初期におけるトカマクプラズマ電流と同極性のプラズモイド発生，放出，および，合体中期・後期におけるトカマクプラズマ電流と異極性のプラズモイド発生，放出を初めて明らかにした。両プラズモイドの X 点領域からの放出によるリコネクション速度の上昇，プラズモイドの両側のリコネクション点下流におけるリコネクションアウトフローによるイオン加熱現象などの関連物理を明らかにしている。日英共同で進むトカマク合体加熱・点火実験のリコネクション加熱機構解明に貢献する成果といえ，プラズマ理工学，核融合工学，電気電子工学への貢献が少なくない。よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。