

## 論文審査の結果の要旨

氏名：関 太 一

博士の専攻分野の名称：博士（理学）

論文題名： 磁場反転配位プラズマ合体における高速磁気リコネクション現象に関する研究

審査委員：（主査） 教授 浅井 朋彦

（副査） 教授 岩本 弘一 特任教授 高橋 努

本論文は、磁場閉じ込めプラズマの一つである磁場反転配位（Field-reversed configuration: FRC）プラズマの合体過程に生じる高速磁気リコネクション現象の実験結果について、太陽フレアの高速リコネクション現象の説明のために提案された Coalescence instability によるリコネクションモデルと比較・検証したものである。

磁気リコネクション現象とは、プラズマ中で生じる磁力線の繋ぎ変わりであり、有限な抵抗を持つプラズマ中で反平行な磁力線同士が近づいた際に生じる。プラズマは磁力線に凍結しているため、リコネクションによって磁力線のトポロジーが変化し、磁気エネルギーから運動エネルギーへの変換が生じる。磁気リコネクションは、プラズマ中の有限な抵抗による散逸により生じる。磁気リコネクションの基本モデルとして知られる Sweet-Parker モデルは、2次元平面上での抵抗性 MHD を仮定し、プラズマの抵抗によって磁気拡散により定常的なリコネクションが生じるとするモデルである。しかし、太陽フレア等の低密度・高温プラズマでは抵抗が小さく、このモデルより計算されるリコネクション速度は、観測される現象よりもはるかに長い。

実験対象としている FRC プラズマの合体現象は、磁気圧によって加速された2つのプラズマモイドを衝突・合体させ、1つの FRC が形成される一連のプロセスである。FRC は反磁性方向のトロイダル電流とそれによって生成されるポロイダル磁場のみから成るコンパクトトーラスであり、その電流および磁力線の幾何学的構造は、偏長な電流ループと見なすことができる。そこで、本論文では、同方向に流れる電流ループ間に生じる引力（Coalescence instability）によってリコネクションが非線形に加速されるリコネクションモデルに着目し、実験結果との比較を行なっている。このモデルにおいて Coalescence instability はインフローを駆動する外力としてはたらくし、磁気拡散領域内で圧縮が生じることでリコネクションが加速する。このモデルは太陽フレアの観測結果と良い一致を示しており、数値シミュレーションや理論的側面からも検証されている。

ここで対象とする FRC 合体実験は、プラズマ中の特性速度である磁気音波や Alfvén 波の伝播速度よりも高速にプラズマを衝突、合体させる。衝突直前の運動エネルギーがプラズマの内部エネルギーと同等かそれよりも大きいことから「衝突合体」と呼ばれる。合体過程は数十マイクロ秒の時間スケールで完了し、衝突面において生じる磁気リコネクションも同等の時間スケールで生じていると考えられる。しかし、実験対象となるプラズマのパラメータに対して、抵抗による散逸を仮定し定常リコネクションモデルでリコネクション速度を評価すると数秒のオーダーとなり、観測されるリコネクション速度よりも5桁ほど遅い。したがって、FRC プラズマの合体過程においても抵抗散逸では説明できない高速なリコネクションが生じていると考えられる。

また、ポロイダル磁束のみから形成される FRC は圧縮性であることから、Coalescence instability モデルで仮定される電流ループの合体仮定と同様のリコネクションの加速が期待される。実験では、これらの観点から、レーザー干渉法による密度計測や超高速カメラによる衝突面の観測、さらに複数の手法による磁場計測が行われ、理論モデルと比較されている。この結果、リコネクションにより生じた合体後の FRC の磁束の変化量は、Sweet-Parker モデルや Petschek モデルのように時間に依存しない定常リコネクションではなく、Coalescence instability と同様に非線形に加速することが確認された。また、合体後の FRC の巨視的振る舞いも、Coalescence instability モデルで予測された挙動とよく一致することが示されている。

本論文は、FRC 合体過程と Coalescence instability モデルの幾何学的類似性に着目し、実験結果とモデルによるリコネクション速度やその時間依存性について検証した、新規性、独自性の高い研究成果である。

本論文は7章からなり、それらの概要と評価は以下の通りである。

第1章では研究背景について述べられている。我々にとって最も身近な恒星である太陽から、電離気体であるプラズマと磁力線の相互作用について述べた後、太陽フレアの加速メカニズムとされる磁気リコネクションについて略述されている。また、FRC プラズマの合体過程においても、太陽フレア同様に抵抗による拡散だけでは説明できない高速なリコネクションが生じている可能性について言及されている。

第2章は磁気リコネクションに関する詳細な解説である。リコネクションの基本モデルとして Sweet-Parker モデルおよび Petschek モデルが説明され、これらの定常リコネクションモデルでは太陽フレア等の高速なリコネクションを説明できないことが述べられている。また、実験対象である FRC 合体での高速リコネクションと電流及び磁場構造が類似している Coalescence instability による非定常な高速リコネクションモデルについて解説されている。

第3章は FRC 合体実験に関する解説であり、核融合炉心プラズマの高効率な生成法として開発された FRC 衝突合体生成法や、そこで生じる FRC の合体過程およびその時間スケールなど、実験の概要が述べられている。

第4章は、実験を遂行するにあたり使用した日本大学 FAT-CM 装置、FRC の生成および加速法、FRC 合体を行うための装置系、および各計測方法について説明されている。

第5章では理論モデルとの比較を行うために、実験で実現可能なパラメータ領域の拡大に関する装置改造について解説されている。この装置改造は、執筆者が主体的に取り組んだものである。これにより、理論モデルとの比較の際に、プラズマの温度、密度に加え、移送速度や衝突性などのパラメータを大きく変化させて実験を行うことが可能となった。

第6章では理論モデルとの比較という観点で実験結果がまとめられている。高速度カメラの計測から厚さ 30 cm 程度の衝突面が形成されていることが示され、この衝突面における密度および磁場計測の結果から、密度および磁場強度の急峻な上昇が確認されている。さらに衝突時に形成される磁場構造が最終的に FRC プラズマの特徴である反転磁場構造へと移り変わる様子が観測されており、これらの結果から、リコネクション速度の定常モデルおよび非定常モデルとの比較が行われた。この結果、磁束量の時間変化が非線形に加速している傾向がみられ、定常よりも非定常な Coalescence instability モデルとよい一致を示すことが示されている。

第7章では、上記の研究により得られた結論と今後の展望が記述されている。

以上、本論文に記されている研究は、執筆者である関太一氏が主体的に行ったものであり、また、その結果や関連する計測法の開発などの成果は、関氏を筆頭著者とする5編の学術論文として既に出版、または受理されている。

このことは、本論文の提出者が自立して研究活動を行い、又はその他の高度な専門的業務に従事するに必要な能力及びその基礎となる豊かな学識を有していることを示すものである。

よって本論文は、博士（理学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

令和6年2月15日