

論文の内容の要旨

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

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リコネクション現象の実験結果について、太陽フレア等で提唱されている Coalescence instability による高速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、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磁力線が繋ぎ変わる現象であり、太陽フレア等の天体プラズマや磁場閉じ込めプラズマ実験で観測される。電離気体であるプラズマ中では荷電粒子が Larmor 運動するため、磁力線はプラズマに凍結し、質量をもった紐のように振る舞う。磁力線はプラズマと共に運動するため、リコネクションによってプラズマの形状や磁力線のトポロジーが変化する。リコネクションが生じるためには、リコネクション点で一度磁束減衰が生じる必要がある。プラズマの巨視的振る舞いを描像する理想磁気流体力学 (Magnetohydrodynamics: MHD) では、プラズマ抵抗を無視しており、抵抗による磁気拡散は生じない。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 を仮定しており、プラズマの抵抗によって磁気拡散が生じ、リコネクションが生じるとするモデルである。しかし、太陽フレア等のプラズマでは抵抗成分が小さく、計算される磁気拡散やリコネクションにかかる時間スケールが実際の現象よりもはるかに長いことがわかっている。本研究で着目した高速リコネクションモデルは、同方向に流れる電流リング同士が引き合うこと (Coalescence instability) によってリコネクションが非線形に加速されるとするモデルである。Coalescence instability はインフローを駆動する外力としてはたらく、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研究されている。

FRC の合体等の実験においても、同様の高速な磁気リコネクション現象の発生が示唆されている。FRC はコンパクトトーラスに分類される磁場閉じ込めプラズマで、自身のトロイダル電流によって形成されるポロイダル磁場のみに配位を形成する。FRC は通常のトーラス型の磁場閉じ込めプラズマとは異なり、プラズマと鎖交する構造物がなく、磁気圧勾配によって加速することができる。このため、核融合炉開発の観点で、磁気圧によって加速した FRC を合体させることで炉心プラズマを生成する衝突合体生成法が開発された。FAT-CM 装置での実験においても音速や Alfvén 速度 (<100 km/s) を超える速度で FRC を移送するため、衝突直前の運動エネルギーはプラズマの持つ内部エネルギー（熱エネルギーと磁気エネルギー）よりも 2-3 倍程度大きい。それぞれ孤立した閉じた磁場構造を持つ 2 つの FRC から 1 つの FRC が形成されるため、衝突面において磁気リコネクションが生じていると考えられる。しかし、プラズマの抵抗による磁気拡散を仮定した基本的なリコネクションモデル (Sweet-Parker モデル等) でリコネクション速度を計算すると数秒のオーダーとなり、実際に実験で観測される数十マイクロ秒の合体現象よりも遅い。これらのことから前述の天体プラズマ同様、FRC プラズマの合体過程においても抵抗による磁気拡散のみ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がある。

FRC プラズマはトロイダル電流のみを持つことから、偏長な電流リングとして捉えることもできる。このため本論文では FRC 合体で生じる高速な磁気リコネクションを、前述の Coalescence instability による高速リコネクションにより説明することを試みた。また、FRC 合体ではトロイダル磁場を持たないことや移送速度がインフローとしてはたらくことから、衝突面での圧縮が生じていると考えられる。これらのことを踏まえ、本論文では、FRC 合体の実験結果とこの高速リコネクションモデルとの比較を行うことで、磁気リコネクションの観点から FRC 合体過程の理解を試みた。

実験では FRC 合体時に厚さ 30 cm 程度の衝突面が形成されており、この衝突面内では衝突前のパラメータと比較して密度と磁場強度の上昇が確認できたことから、高速リコネクションモデル同様に圧縮性を仮定できることが判明した。また、高速リコネクションモデルの特徴として、磁束の変化率の時間変化が挙げられる。Sweet-Parker モデルや Petschek モデルのような定常リコネクションでは、リコネクションによつ

て繋ぎ変わる磁束の変化率は時間に依存せず一定で対し、Coalescence instability による高速リコネクションモデルでは磁束量の変化率が時間と共に増加する傾向を持つ。FRC 合体実験においても、磁気計測から見積もった磁束量が非線形に増加している傾向が観測された。これらの結果から、圧縮性のプラズモイドである FRC では、移送がインフローを加速することで磁気リコネクションが非線形に加速し、Sweet-Parker のような定常リコネクションモデルよりも Coalescence instability による非定常リコネクションモデルに一致することが判明した。

本論文は、以下の全7章で構成される。

第1章では研究背景についてまとめている。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した。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リコネクションが生じている可能性について言及した。

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 モデルを取り上げた。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リコネクションを説明することができない。本研究は FRC 合体での高速リコネクションについて着目し、FRC 合体と電流及び磁場構造が類似している Coalescence instability による非定常高速リコネクションモデルについて解説した。

第3章は FRC 合体実験およびその中で起きている磁気再結合に関する解説である。核融合分野において性能の良い炉心プラズマを生成する方法として開発された FRC 衝突合体生成法では、2つの FRC を音速や Alfvén 速度を超える速度で合体させる手法である。FRC の合体過程はおおよそ数十マイクロ秒の時間スケールで完了し、この間に2つの FRC が持つ独立した磁場構造が1つに繋ぎ変わることから高速リコネクションが起きていると考えられる。

第4章では本研究を遂行するにあたり使用した日本大学 FAT-CM 装置についての説明である。FRC の生成および加速法に関する説明と FRC 合体を行うための装置系、および各計測方法について触れた。

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した。比較対象の理論モデルではプラズマの圧縮性を仮定していること、外部からの駆動力によりインフローが加速されることなどが挙げられており、実験においてもインフローの速度 (FRC の移送速度) やプラズマの温度、密度といったパラメータの影響を評価するため、これらのパラメータを変化させることで理論モデルとの比較を行う。FAT-CM 装置の生成領域での磁気圧による加速性能の向上により相対速度 ~ 600 km/s での衝突、また低密度で高温な FRC プラズマの生成にも成功した。これにより実現可能な実験領域が拡大した。

第6章では理論モデルとの比較という観点で実験結果についてまとめた。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確認でき、衝突から合体完了まで 20–30 μ s の間、衝突面が形成されている。理論モデルでは圧縮性を仮定しており、本研究の重要なポイントの1つである。プラズマの圧縮性を議論するため、この衝突面における密度および磁場計測をおこなった。レーザー干渉計、および内部磁気計測の結果から、衝突面では衝突前と比較して密度および磁場強度がそれぞれ ~ 1.4 、 ~ 1.6 倍に上昇している。衝突面の内部磁場計測では衝突開始から合体後の FRC 形成までの内部磁気構造の遷移について議論した。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た。磁気計測から見積もられた磁束のデータから、時間に対して線形に磁力線が繋ぎ変わる定常モデルと非線形である非定常モデルとの比較をおこなった。実験においても磁束量が非線形に増加している傾向がみられ、定常よりも非定常なモデルと一致する結果が得られた。

第7章は本論文の結論である。第6章の実験結果を踏まえ、FRC 合体時には合体が進行する箇所では衝突面が形成されており、この衝突面では密度や磁場強度の上昇が確認できたことから FRC 合体ではプラズマの圧縮性を仮定できると結論づけた。またリコネクションによって繋ぎ変わる磁束量の時間変化から、定常的なリコネクションを仮定した Sweet-Parker モデル等よりも圧縮性を仮定した非定常高速リコネクションモデルと一致する結果となった。以上が本論文の要旨である。