

## 論文の内容の要旨

論文題目 高速磁気リコネクション現象によるイオン加熱の機構解明と応用手法開拓

氏名 村田 幸弘

本研究では、高速磁気リコネクションによって発生するイオン加熱機構の解明を目的に実験的検証を行い、そこで得られた知見を基に工学機器へ応用する可能性について検討を行った。

磁気リコネクションとは、本来つなぎ変わることはない反平行な磁力線が接近することによりアンペアの法則に従った電流シートが発生し、このシート内での局所的な電気抵抗による磁場拡散のため、つなぎ変わる現象である。原理からわかるように、本現象ではオーム加熱による電子加熱が発生するが、本現象によって下流側に流れ出る磁力線に凍結して運動するイオンが運動エネルギーを得ることで、イオンへのエネルギー分配が発生する。イオン加熱機構については多様な説があるが、本研究が実証したのは磁気リコネクションのアウトフローのイオン運動エネルギーがプラズマ粘性を介したダンピングによって熱化する機構である。

この検証実験のため、まず分光計測法を用いた二次元イオン温度計測系とその解析に必要な計算機アルゴリズムの開発を行った。TS 装置の中心部のリコネクション面を見渡せる窓を使用して、軸対称一次元イオン温度計測系を中心軸 ( $z=0$ ) 方向に拡張し、 $r$ - $z$  平面でのイオン温度二次元分布の計測を可能とした。本計測系を用い、まず(1)これらイオン加熱現象を様々な実験条件下で計測してその傾向を把握した。この結果から判明したこととして、(1. a) 高速磁気リコネクションのイオン加熱は縦磁場が弱いほど大きくなること、(1. b) リコネクション点 (X point) 近傍に再結合磁場が残っているにも関わらずリコネクションアウトフローが減衰してしまうこと、(1. c) 二次元イオン温度計測結果から、イオン加熱領域はリコネクションアウトフロー領域であって、その幅は電流シート幅程度であること、などが挙げられる。これらを踏まえ、更に別途計測した電子密度分布計測結果や後に示す計算機解析結果を総合して、リコネクション高速化には密度の蓄積 (pileup) と放出 (ejection) が大きく依存していると考えた。そこで、(2) リコネクションモデルとして一般的な Sweet-Parker model に電流シート内の密度蓄積効果項を導入したモデルを提案し、電流シート内および近傍での電子密度計測を行って、提案モデルに従いリコネクションレートと密度蓄積との関係を実験によって明らかにした。ところで TS 装置によるリコネクション実験にはトーラスプラズマ合体を用いている。つまり、プラズマを閉じ込めた二つのトーラスがトポロジー変化して一つのトーラスとなるから、必ずリコネクション点での密度上昇

が存在する。そこで、姉妹実験装置である米プリンストンプラズマ物理研究所にある MRX 装置を用いて、密度蓄積効果を抑えたリコネクション実験も行い、リコネクションの高速化が抑えられることも実験で示した。

このリコネクション高速化は、抵抗散逸だけでは分散できないエネルギーをイオンの運動エネルギーへと変換する機構であることが明らかとなってきたが、この高温イオンを工学に活かすことを考えた場合にはそのエネルギー収支は重要な検証項目となる。そこで、(3)解放される磁場エネルギー、ジュール損失およびイオン(電子も考えられるが質量が 2000 分の 1 であるから無視できる)運動エネルギーを別途算出して、その時間発展を検証し、リコネクション高速化によってイオンへは最高値で約 80%のエネルギー変換が行われていることがわかった。ところで、このイオン運動エネルギーが粘性などによってダンピングして熱化したと考えているが、実際に放電開始から時々刻々と粒子の運動を追跡し、ダンピングによるエネルギー損失が計測されるイオン熱エネルギーになるかどうかは問題である。そこで、(4)計測された二次元磁場データによって得られる EXB ドリフトスピードをイオン流速と仮定し、更にイオンと中性粒子がそれぞれ 50%ずつ存在するとして、LBM (格子ボルツマン法)を用いた質量保存、運動量保存およびエネルギー保存を満足した巨視的な熱流体を磁場計測時間ごとに算出し、失う運動エネルギーが全て熱化するとして計算されたイオン温度と計測されるイオン温度とが一致することを確かめた。本解析では熱流体を考えており、圧縮加熱も考慮される。イオン温度には縦磁場依存性があるが、これについても入力データのみを変更しただけで、得られるイオン温度と計測温度とが一致することも確認した。この結果は、高速磁気リコネクションによるイオン加熱機構が、不安定性などによる加熱ではなく、単に高速リコネクションによって得た運動エネルギーのダンピングによる熱化であることを証明する結果でもある。尚、本シミュレーションの精度についての検証実験も必要であり、分光計測で得られる視線積分分光スペクトルとシミュレーションから算出される同様のスペクトルとの照合はよい一致を見せた。

また、工学に応用する際には効率的な「反応場」の利用が不可欠である。イオンフローのダンピングがイオン加熱の主要因であるから、最も効率的な反応場の位置は存在する。(5)その場所について、密度変調点に着目した検証も行った。縦磁場による密度変調点の変化はこれまでに行った電子密度分布計測によって検証されていたが、この変調点と高効率なエネルギー変換位置とが同調しており、トーラスプラズマが持つ密度分布がリコネクション高速化に大きく関与していることを示した。更に(6)外部から人為的に電流シートを打ち消す方向にトロイダル電界を印加し、模擬的に異常抵抗を発生させることでリコネクションを高速化する試みも行った。本手法は、これまでのリコネクション高速化手法とは全く異なる手法であり、高速化トリガーの一候補となっている。

最後にこれらの知見を総合して、(7)実際に得られる高温イオンを用いたプロセッシングプラズマによる薄膜生成実験も行った。高速磁気リコネクションによるイオン加熱は運動エネルギーをターゲット等に衝突させてエネルギーを解放するエネルギー変換法では

ないため、ガス同士の化学反応場としても有用である。また、コイルのみを使用するため不純物混入も極めて抑えられる。これらの特徴を活かす初期実験としては薄膜生成は適当ではないが、イオンプレーティング法に見られるイオンと類似したイオン状態を作り出せることを、計測以外の手法で示すことができた点は評価できる。

総合的な評価として、磁気リコネクションの高速化機構の実験的解明はこれまでに皆無であったが、その機構の一候補である密度蓄積効果を提案し、定量的に評価したことはプラズマ物理としても新規性に富んだ画期的な成果であると考えられる。宇宙プラズマ、特に太陽フレアにおける高速リコネクション機構の一提案にもなっている。またこれに付随したイオン加熱機構についても、リコネクションフローのダンピングによる熱化であることを実験によって検証し、高速磁気リコネクションによるイオン加熱を定量的に制御できる見通しを立てた。更に、本イオン加熱手法を圧縮加熱と併用すれば、より効率的で不純物混入の極めて少ないイオン加熱器として応用できる。