

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 村田 幸弘

本論文は「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」と題し、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、高導電率のプラズマ中で本来凍結される反平行な磁力線が接近することにより電流シートが発生し、シート内での局所的な磁界拡散のため、つなぎ変わる現象である。電流シートではオーム加熱による電子加熱が発生するが、下流側に流れ出る磁力線によってイオンが加速されることで、イオンへのエネルギー分配が発生する。多くのプラズマ加熱機構に関する説の中で本研究ではアウトフローのイオン運動エネルギーがプラズマ粘性によるダンピングを介して熱化する機構を実証した。

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方向に拡張し、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、イオン加熱現象を計測した結果、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、リコネクションのイオン加熱には縦磁界が弱いほど大きくなることが判明した。さらに電子密度分布計測結果を総合して、リコネクション高速化には密度の蓄積（パイルアップ）と放出といった非定常効果の寄与が大きいことが判明し、定常モデルである Sweet-Parker モデルに電流シート内の密度蓄積効果項を導入し、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明らかにした。合わせて、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のMRX装置を用いて、密度蓄積効果を抑えた実験も行い、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。

このイオン加熱を応用を考えた場合にはそのエネルギー収支が重要な検証項目となる。計測の結果、解放される磁界エネルギー、ジュール損失およびイオン運動エネルギーの時間発展を検証した。リコネクションのつなぎ変わった磁力線の加速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。電子も等速度に加速されるが、その質量が 2000 分の 1 であるから電子加熱は無視できる。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られる。

リコネクションのイオン加熱現象は核融合プラズマの加熱にとって極めて有用であることが等研究室の過去の研究で明らかになっている。さらにこれを広く工学応用することを考えて、計測された二次元磁場データによって得られる $E \times B$ 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が実験と一致することを確かめた。イオン温度の縦磁界依存性についても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、リコネクションによって加速された粒子のダンピングによる熱化であることを意味する。更に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方向のリコネクション電界を印加することでリコネクションを高速化できることを示し、人為的なリコネクション制御を行った。

最後に事例として、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。

以上、要するに、磁気リコネクションの高速化機構として密度パイルアップ効果の存在を始めて実証し、高速磁気リコネクションによるイオン加熱機構を解明し、その定量的制御手法、およびイオン加熱装置としての応用手法を示したもので、プラズマ工学、電気工学に貢献するところが多く、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。