東京大学 大学院 新領域創成科学研究科
基盤科学研究系 先端エネルギー工学専攻
2016 年 3 月修了　修士論文要旨

二次元高精細イオンドップラー計測の開発と磁気リコネクションの二流体効果の実験的検証

学籍番号 47146074　氏名　齋藤航哉
(指導教員 小野 靖 教授)

Key Words：Magnetic Reconnection, Hall Reconnection, Ion Doppler Spectroscopy, Abel inversion

1　概要

磁化プラズマ中で磁力線がつなぎ変わる現象を磁気リコネクションと呼ぶ．磁気リコネクション加熱や高速磁気リコネクションで重要な位置付けとなる磁気リコネクション中の異常抵抗の一つの要因と考えられている二流体効果が知られている．異常抵抗の一因として考えられている二流体効果による Hall 効果は磁気リコネクションにおいて重要な役割を担っているといえる．本研究では既存の二次元イオンドップラー分光計測では空間分解能が十分でないために観測することができなかった二流体効果の発現を検証するために、あらたに高精細二次元ドップラー計測を開発した．二流体効果によって発生するリコネクション面内に流れる Hall 電流に、ガイド磁場と呼ばれるトロイダル磁場を印加することにより発光強度分布が傾くことを、あらたに開発した高精細二次元イオンドップラー計測を用いて観測し、これが二流体効果による Hall 効果に起因していると結論付けた．

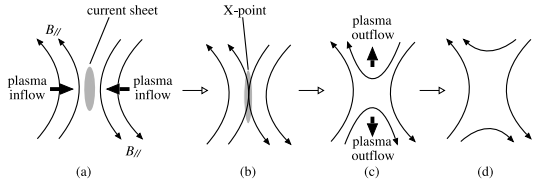


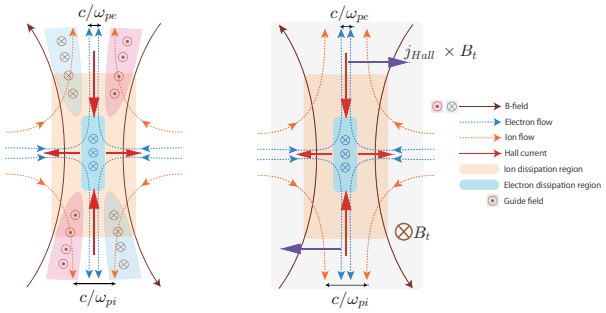
図 1: 磁気リコネクションの概略図

2　二流体効果 (non-MHD effect)

リコネクションの例は天体や核融合などの磁化プラズマに見られる．例えば太陽表面ではコロナループのリコネクションが太陽フレアを引き起こし，太陽表面のプラズマ粒子を高速の太陽風として放出する．また．核融合プラズマにおいてもトカマク配位や逆転磁場ピンチ配位における鋸波状波やディスラプションの際にリコネクションが起こり，磁場構造の再編過程や崩壊過程を決定していることが知られている．このようにリコネクション現象は全ての磁化プラズマに共通する基礎物理過程である．Sweet-Parker モデルは抵抗性 HMD モデルに基づいた定常リコネクションのモデルを提唱しているが無衝突プラズマにおいては太陽フレアの完全電離のプラズマに置けるクーロン衝突による古典拡散に古典的な Spitzer 抵抗では速いリコネクションの時間スケールが説明できない．そこで、速いリコネクションを発現させる異常抵抗モデルの一つとして提唱されている二流体効果に起因して強いリコネクション電場が保持される Hall 効果の発現について実験的に検証する。

3　Hall 効果とガイド磁場による電流シートの傾き

Hall 効果によってリコネクション面に流れる Hall 電流 j_{Hall} にガイド磁場（トロイダル磁場）B_t を印加することによって電流シートが $j_{Hall} \times B_t$ の力を受けて傾くこと（図 2(b)）が実験とシミュレーションの両面から確認されている。



(a)Hall 効果による四重極磁場　(b) ガイド磁場あり Hall 効果

図 2: (a) ガイド磁場のない Hall 効果と (b) ガイド磁場のある Hall 効果の概略図

4　イオンドップラー分光計測

トーラス状のプラズマの発光を観測しようとすると、視線方向に視線積分された発光しか検出できないという計測的な問題が発生する。そこでトーラスの中心軸対象を仮定して、アーベル変換をすることによって視線積分の発光量から光量を求めることができる。局所発光スペクトルの各波長における発光の積分値の集合が、視線積

分されたスペクトルを構成していることに着目し、逆変換は光量に対して適用する。視線積分方向を x として、計測コードの配置座標 y、プラズマエッジの位置を R とすると各波長ごとの軸対象発光 $I(r,\lambda)$ の積分は、プラズマが光学的に薄く視線上の再吸収が無視できる場合、

$$F(y,\lambda) = \int_{-\sqrt{R^2-r^2}}^{\sqrt{R^2-r^2}} I(r)dx \tag{1}$$

で記述できるので、積分された計測スペクトル $F(y,\lambda)$ について λ を固定して発光強度に逆変換を施し、

$$I(r,\lambda) = -\frac{1}{\pi}\int_r^R \frac{dF(y,\lambda)}{dy}\frac{dy}{\sqrt{y^2-r^2}} \tag{2}$$

とすると、プラズマ内部の波長スペクトルの径方向分布が再構成される。したがって、それを波長に対してガウス関数でフィッティングすることにより原理的には局所イオン温度を実現することができる。

5　２次元高精細ドップラー計測の開発

３２本の光ファイバーを１列にまとめて並べ、空間分解性能を一次元に集約した光ファイバーバンドルから１つのカメラレンズを通してプラズマの発光を観測し、さらに光ファイバーバンドルとカメラレンズの台座を可動ステージ上に設置してショットごとにスライドさせてスキャンすることで擬似的に高精細な２次元の計測を行うスキャニングによる計測システムを開発した.

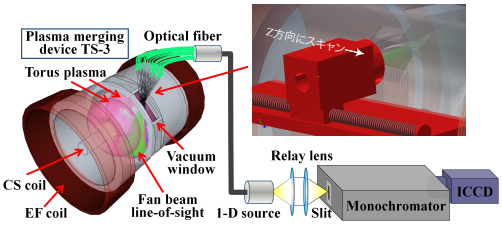
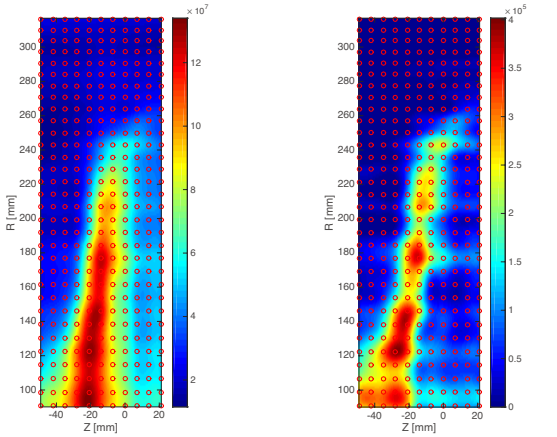


図 3:　１次元ドップラー計測システム

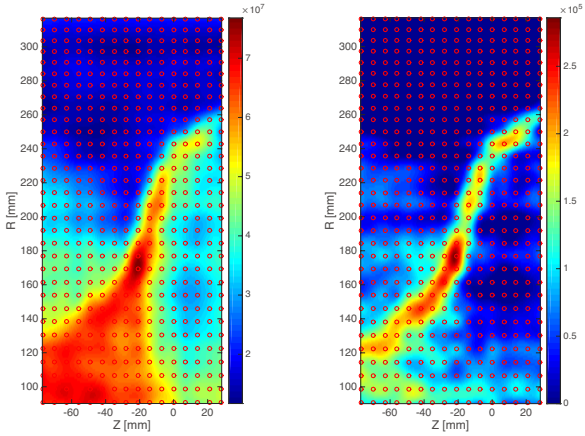
これにより既存の二次元計測よりも空間分解能が高分解能（R 方向に約 4 倍、Z 方向に約 3 倍）で、計測点は最大で $32 \times 16 = 516$ 点の計測が可能となった。開発した高精細の二次元ドップラー計測を用いてプラズマ合体実験装置 TS-3 により磁気リコネクションを発生させ、２流体効果の実験的検証を行った。

イオンスキン長と電子スキン長の異差によって発現する二流体効果を検証するために封入ガス、ガイド磁場強度、ガイド磁場極性を変化させて得られた結果から発光強度分布に見られる傾きは二流体効果によるものであると結論付けた。



(a) 視線積分の発光量の空間分布　(b) 局所の発光量の空間分布

図 4:　２流体効果とガイド磁場による電流シートの傾き。$B_t = -50\mathrm{mT}$.



(a) 視線積分の発光量の空間分布　(b) 局所の発光量の空間分布

図 5: 電流シートのガイド磁場依存性.$B_t = -25\mathrm{mT}$.

6　結論

空間分解能を高めた２次元ドップラー計測を開発し、それを用いることによって Hall 電流とガイド磁場の効果によってアウトフロー領域で電流シートと考えられる強い発光を持った分布が傾くことを観測した．このことは種々のシミュレーションや実験の結果とも一致しており、磁気リコネクション中の電子スキン長とイオンスキン長の異差によって Hall 効果が発現していることをプラズマ合体実験では初めて観測した。