OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	Experimental Investigation on Electron Dynamics in Magnetic Reconnection
Author(s)	境, 健太郎
Citation	大阪大学, 2023, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/92910
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

様式３

論　文　内　容　の　要　旨

氏　　名　（　　境　健太郎　　）	
論文題名	Experimental Investigation on Electron Dynamics in Magnetic Reconnection (磁気リコネクションの電子ダイナミクスに関する実験研究)

論文内容の要旨

磁気リコネクションは、磁場トポロジーの変化に伴って磁場からプラズマにエネルギーを変換する、さまざまな宇宙空間、天体、実験室プラズマに普遍的に存在する物理過程である。磁気リコネクションの駆動機構とエネルギー分配は未解決の問題である。近年の高精度な宇宙空間の観測により、微視的な電子のダイナミクスが巨視的な磁気リコネクションの駆動に重要な役割を果たすことが明らかになった。しかし、宇宙空間・天体プラズマでは微視的な物理量と同時に巨視的なプラズマの構造を測ることは一般に困難である。本論文では、このような多スケール性を調べるために、実験的手法で磁気リコネクションの研究を行った。

第1章では、これまでに行われてきた磁気リコネクション研究の進展と未解決問題について述べた。さらに、電子だけが磁化する微視的な系における磁気リコネクションの駆動メカニズムとエネルギー分配を明らかにするという本論文の目的を明らかにした。

第2章では、本論文に関連するプラズマ、波動、磁気リコネクション、およびトムソン散乱の理論的背景について論じた。

第3章では、電子だけを磁化しイオンを磁化しない強度の磁場をプラズマに印加することで、磁気リコネクションの電子スケールに着目した研究を行った。これまで、電子スケールの磁気リコネクションに対応する大域的なプラズマの構造とその時空間発展を計測してきたが、磁場トポロジーの変化の直接的な証拠、および局所的な電子・イオンそれぞれの運動は得られていなかった。本論文では、これまで行われてきた大域的計測に加えて、新たに電子スケールの磁気リコネクションの局所的計測を行った。局所的な磁場強度と電子・イオンの速度をそれぞれ磁気プローブと協同トムソン散乱を用いて計測した。リコネクションが起こっている領域から離れた位置における局所的な磁場計測により、磁気リコネクションの結果生じたプラズモイドの伝播に対応する磁場の反転をとらえた。磁場のウェーブレット変換による時間-周波数解析により、ホイッスラー波を検出した。ホイッスラー波は電子スケールの波動であるため、磁気リコネクションが電子のスケールで起こっていることを示している。また、磁気リコネクションが起こっている領域における電子・イオンの速度の空間分布を計測した。電子の速度は電子Alfvén速度程度のアウトフローを示すのに対して、イオンの速度は空間的に一定であった。この電子だけのアウトフローは、イオンのジャイロ半径より小さな空間スケールにおいて、磁気リコネクションによって磁場のエネルギーが電子の流れのエネルギーとして開放されることを示している。

第4章では不安定性を励起するようなプラズマの計測手法として、非平衡プラズマ中のトムソン散乱の研究を行った。電子二流体不安定性が成長する非平衡プラズマからの散乱スペクトルを理論・数値シミュレーションを用いて計算した。その結果、散乱スペクトルに不安定性によって励起された波動に対応する新たなピークが現れることが分かった。また、通常計測される電子プラズマ波・イオン音波スペクトルにも波動の励起に特徴的な構造が現れることが分かった。これらの励起波動、電子プラズマ波、イオン音波のスペクトルを計測することで、実験的に不安定性を同定することができることが分かった。

第5章では、高強度レーザーからの散乱光の空間分布をイメージング、波長スペクトルを分光計測によって、高強度レーザーが駆動する短時間の現象を解像する診断法の開発を行った。ウォラストンプリズムを用いて偏光を測ることで、計測された光が散乱光であることを確認した。イメージング計測の結果は電子の空間分布に対応する輝度分布を示しており、高強度レーザーの光路上の密度分布を測れることを示した。散乱光の波長スペクトルには波長方向に周期的な構造が存在する。数値シミュレーションと比較することにより、スペクトルの周期的な構造は電子バーンシュタイン波との共鳴スペクトルである可能性があることが分かった。これは相対論的実験室宇宙物理の実験における磁場計測手法として活用できると考えられる。

第6章では、第3章から第5章で行った磁気リコネクションの実験研究を総括し、さらに今後の展望について述べた。

様式７

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名　（境　健太郎　）		
	（職）	氏　名
論文審査担当者	主 査　教授　蔵満康浩 副 査　教授　上田良夫 副 査　教授　兒玉了祐 副 査　教授　村上匡且 副 査　教授　吉村政志	

論文審査の結果の要旨

磁気リコネクションは、宇宙空間プラズマや天体プラズマ、さらに実験室プラズマにおいて観測される現象で、磁場のエネルギーをプラズマの流れの運動エネルギーに変換するマクロなエネルギー変換機構として広く研究されている。磁気リコネクションの突発的なオンセットは、ミクロな電子スケールのダイナミクスが本質的な役割を果たすと考えられてきたが、磁場のトポロジーそのものを変えるマクロな現象の中で、ミクロな電子スケールの情報を計測することは、広い宇宙空間においても実験室においても困難である。本論文では、支配パラメータを制御し、電子だけが磁場と結合する系において実験的に磁気リコネクションを引き起こし、トムソン散乱計測を用いて直接ミクロな電子スケールの現象を明らかにしている。以下に各章における内容の要約を示す。

第１章では、本研究の背景を述べ、宇宙から実験室における磁気リコネクション研究を俯瞰し、本研究の位置付けと本論文の目的を明らかにしている。

第２章では、磁気リコネクション研究の学術的な基礎となるプラズマの基礎方程式から出発し、マクロな構造とエネルギー変換、さらにプラズマ中の波動について論じ、また実験室における局所計測の原理について述べている。

第３章では、大型レーザーを用い、背景磁場強度を制御し、電子のみが磁場と結合する系における磁気リコネクション実験について述べている。協同トムソン散乱を用いた局所的なプラズマ計測と、磁気プローブを用いた局所的な磁場の反転を直接計測し、レーザー生成プラズマにおいて初めてイオン運動が付随しない電子アウトフローの直接計測に成功している。さらに、磁気プローブの周波数位相解析と伝搬特性から電子スケールの磁気リコネクションに伴い、電子スケールの特徴的な波動である whistler 波の計測にも成功している。

第４章では、電子とイオンが別々に動くような系における不安定性の計測を目指し、非平衡プラズマからのトムソン散乱について、理論と数値計算、さらに小型のレーザーを用いた要素実験の結果について述べている。トムソン散乱計測では、プラズマは平衡、定常、線形、安定という仮定がなされているが、磁気リコネクションに代表される高エネルギープラズマ現象では、プラズマは一般に非平衡、非定常、非線形、不安定であることがしばしばである。そのようなプラズマからのトムソン散乱については理論体系すら整備されていない状態である。第３章で論じた電子アウトフローの運動エネルギーを自由エネルギーとし、不安定性が起こり whistler 波等の波動が励起される可能性がある。多流体系にトムソン散乱の理論を拡張し、電子項およびイオン項について不安定性が飽和した後の準定常状態の非平衡プ

ラズマからの散乱スペクトルを理論的に示し、数値シミュレーションを用いて検証している。また、小型レーザーを用いて多流体系からの散乱スペクトルを計測する要素実験のシステムを構築している。

第５章では、高強度レーザーを用いた準相対論的プラズマ中の乱流磁気リコネクションを念頭に、高強度レーザーからの散乱光からプラズマや磁場の情報を計測する試みを述べている。第４章では、線形のプローブレーザーを用いた非線形・非平衡プラズマからのトムソン散乱の理論の構築を試みているが、ここでは非線形な高強度レーザーが作る非線形・非平衡・非定常プラズマからの散乱を議論し、実験とシミュレーションから、プラズマの密度と速度、さらにはレーザー生成強磁場の計測の可能性を論じている。

第６章では、本研究で得られた成果を総括し、今後の課題と将来への展望を述べ、本論文の結論としている。

以上のように、本論文は電子スケールの磁気リコネクションに付随する、イオン運動を伴わない電子のみのアウトフローを世界で初めて計測し、その結果生じる波動の計測に成功している。さらに、励起される波動の起源を特定するための計測手法を理論から構築し、数値計算と要素実験を用いて検証している。高エネルギープラズマ現象の更なる理解に本質的な役割を担う成果であり、高強度レーザーを用いた新たな分野の開拓も期待される。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。