

氏 名 那須 達丈

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2644 号

学位授与の日付 2026 年 3 月 24 日

学位授与の要件 物理科学研究科 核融合科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 磁場閉じ込め高温プラズマの電子スケール乱流の特性とマルチスケール乱流間相互作用の研究

論文審査委員 主 査 榊原 悟
核融合科学コース 教授
徳澤 季彦
核融合科学コース 教授
前山 伸也
核融合科学コース 准教授
稲垣 滋
京都大学 エネルギー理工学研究所 教授
佐々木 真
日本大学 生産工学部 准教授

博士論文の要旨

氏 名：那須 達丈

論文題目： 磁場閉じ込め高温プラズマの電子スケール乱流の特性とマルチスケール乱流間相互作用の研究

核融合発電を実現するためには、その反応率を高めるため、プラズマのエネルギー及びその閉じ込め時間を高く定常的に維持する必要がある。将来の核融合発電で用いられる核燃焼プラズマでは、DT 反応で生成される α 粒子による電子加熱が主たるプラズマ加熱機構であり、電子温度がイオン温度よりも卓越する状況となると予想されている。現在のプラズマ実験においても、電子加熱により電子温度勾配が強くなると、これに起因して外向きの電子熱流束が急激に増加し、電子温度上昇が抑制される現象、いわゆる電子温度分布硬直性が生じていることが、複数の磁場閉じ込め高温プラズマにおいて報告されている。このような電子熱流束の急増は核燃焼プラズマにおける閉じ込め性能に関する大きな懸念である。このような現象において、理論・シミュレーション研究から、電子ラーマ半径程度のスケールの乱流である電子スケール乱流の重要性が指摘されてきているものの、実験的に電子スケール乱流の特性を系統立てて調べた例はない。なお、電子温度がイオン温度に卓越する環境下においては、電子温度勾配が高くなるだけでなく、電子温度/イオン温度比 (T_e/T_i) が高く、規格化された電子・イオン間の実効衝突周波数 (ν_{ei}^*) が低くなる。そこで本研究では特にこれらのパラメータに関する電子スケール乱流の特性を調査した。電子スケールの代表的な不安定性である電子温度勾配不安定性 (ETG 不安定性) の成長率は、規格化された電子温度勾配 $R_{ax}/L_{Te} = R_{ax}(-\nabla T_e/T_e)$ 及び T_e/T_i に依存することが知られている。ここで R_{ax} は磁気軸半径を示す。また、理論・シミュレーション研究からは、電子・イオンスケール乱流間相互作用が存在することが予想されており、イオンスケール乱流の特性が間接的に電子スケール乱流の特性に影響を与えうると考えられている。イオンスケールの代表的な不安定性である捕捉電子不安定性 (TEM 不安定性) の成長率は、 R_{ax}/L_{Te} 及び ν_{ei}^* に依存する。したがって、これら 3 つのパラメータが電子スケール乱流の特性に関して重要であると考え、これまで実験的には全く行われてこなかった電子スケール乱流のパラメータ依存性を系統的に調べあげる研究を行った。

本研究の目的は、未解明であった磁場閉じ込め高温プラズマ中の電子スケール乱流の R_{ax}/L_{Te} 、 T_e/T_i 及び ν_{ei}^* に関する特性を明らかにすることである。核融合科学研究所の大型ヘリカル装置 (LHD) においてミリ波後方散乱計を用いて電子スケール乱流信号を測定し、これらのパラメータ依存性を整理した。また、電子・イオンスケール乱流間の相互作用について検証するために、電子スケール単独ではなく、イオンスケール乱流信号も局所的に同時に測定し、その強度変化を整理した。また、観測した乱流の成長/飽和機構を議論するために、線形ジャイロ運動論シミュレーションによって線形成長率・位相速度を計算し、結果を比較した。

以下に手法と結果の要旨を示す。

電子スケール乱流の特性：

■ R_{ax}/L_{Te} 依存性

電子温度勾配を独立にスキャンするために電子を選択的に加熱する電子サイクロトロン共鳴加熱 (ECH) を用いた。通常、電子温度勾配をスキャンしようとする T_e/T_i も変化してしまうが、 T_e/T_i の変化を避けて R_{ax}/L_{Te} 依存性のみを測定するために、ECH を $r_{eff}/a_{99} \approx 0.2$ と $r_{eff}/a_{99} \approx 0.6$ に入射し、これらの間の加熱パワーバランスを制御することによって、 $r_{eff}/a_{99} \approx 0.5$ において T_e/T_i を変化させずに ∇T_e のみを変化させることに成功した。その結果、 $k_{\perp}\rho_{te} = 0.15$ の電子スケール乱流を、 $-1 < R_{ax}/L_{Te} < 12$ の広い範囲で計測することに成功した。 $R_{ax}/L_{Te} > 8$ の高 R_{ax}/L_{Te} 領域においては、 R_{ax}/L_{Te} の増加につれて、電子スケール乱流が急激に強まっていくこと、電子熱流束も電子スケール乱流強度と同様の依存性で増加すること及び実験で得られた位相速度は電子反磁性方向に ~ 1 km/s であることが分かった。シミュレーションの結果もそれと一致することから、ETG 乱流であると考えられる。一方で、シミュレーションでは安定となる $R_{ax}/L_{Te} < 8$ の低 R_{ax}/L_{Te} 領域においても、実験で得られた電子スケール乱流強度は R_{ax}/L_{Te} の減少につれて緩やかに減少するが、 $R_{ax}/L_{Te} \sim 0$ でも乱流が存在することを発見した。

■ T_e/T_i 依存性

\bar{n}_e を一定に制御しつつ、ECH パワースキャンによって、 T_e/T_i 比を $1.5 < T_e/T_i < 2.5$ の範囲で変化させ、 $k_{\perp}\rho_{ti} = 3$ ($k_{\perp}\rho_{te} \sim 0.1$) の電子スケール乱流を $r_{eff}/a_{99} = 0.9$ において計測することに成功した。 T_e/T_i の増加に伴って乱流強度が増加することを明らかにした。一方、シミュレーションでは、 T_e/T_i の増加に伴って成長率が減少しており、定性的に一致しないことが分かった。なお位相速度が電子反磁性方向で、 T_e/T_i の増加と共にその速さが増加する傾向は一致した。

■ v_{ei}^* 依存性

v_{ei}^* スキャンを目的とした n_e スキャン実験を行った。 T_e/T_i 依存性の影響を避ける目的で T_e を一定に保つため、ECH パワースキャンをしつつ、周辺の ECE 信号が時間一定になるようにガスパフのフィードバック制御を行う手法を初めて行った。これによって、観測位置 $r_{eff}/a_{99} = 0.95$ で $0.16 < v_{ei}^* < 0.38$ のスキャンに成功した。電子スケール乱流強度は、 v_{ei}^* の増大に伴って低下し、位相速度は ~ 5 km/s で電子反磁性方向であり、この傾向が線形計算でも得られることが分かった。

マルチスケール乱流間相互作用：

■ 電子・イオンスケール乱流間相互作用

電子スケールとイオンスケール ($k_{\perp}\rho_{ti} = 3$, $k_{\perp}\rho_{te} = 0.2$) の乱流の T_e/T_i 依存性の局所的な同時計測に成功した。 T_e/T_i が増加して閾値 $T_e/T_i \approx 2$ を超えるのに伴い、実験で得られた電子スケール乱流強度は増加する一方で、イオンスケール乱流強度は飽和してほぼ一定となる異なる変化の傾向が得られた。これらの結果は、線形シミュレーションの成長率の傾向と、どちらのスケールでも一致しなかった。このとき、電子スケール乱流強度とイオンスケール乱流強度との間の強度相関を調べた結果、イオンスケール乱流が飽和し電子スケール乱流強度が増加する時間において強

い相関があり、イオンスケール乱流の変化が $\approx 10\text{ms}$ 先行することが分かった。イオンスケールの線形不安定性の成長によって発生した揺動のエネルギーが、カスケードによって電子スケールに転移し、電子スケール乱流が強まったと考えられる。

本研究では R_{ax}/L_{T_e} 、 T_e/T_i 及び v_{ei}^* に対する電子スケール乱流の特性を世界で初めて系統的に調べ上げた。その結果、将来の核燃焼プラズマにおいて予想される高 R_{ax}/L_{T_e} 、高 T_e/T_i 、低 v_{ei}^* のどの傾向も電子スケール乱流強度を増加させることが分かった。この結果は、将来の核燃焼プラズマでは、より一層、電子スケール乱流の影響が無視できなくなることを示唆する。特に、代表的な電子スケール乱流である ETG 不安定性の定性的な傾向とは異なり、 T_e/T_i が増加した際でも電子スケール乱流が強くなることは特筆に値する。イオンスケールの TEM/ITG 乱流から電子スケールへとカスケードによるエネルギーの転移が起こっている可能性があることが示唆されたことから、電子スケール乱流の特性の調査に関して、イオンスケール乱流との相互作用を検証することの重要性を実験から指摘した。本研究では、低プラズマ電流かつ低 β 値のプラズマで静電的乱流を対象としたが、核融合発電ではより高い β 値になるため、今後の課題として、高 β 値のプラズマにおける電子スケール乱流の影響を調べることが重要となる。

Results of the Doctoral Thesis Defense

博士論文審査結果

Name in Full

氏 名 那須 達丈

T i t l e

論文題目 磁場閉じ込め高温プラズマの電子スケール乱流の特性とマルチスケール乱流間相互作用の研究

出願者は、プラズマ閉じ込めに大きな影響を及ぼす微視的乱流、特に将来の核燃焼プラズマにおいてより重要性を増す電子スケール乱流の特性を実験的に明らかにする研究を行った。これまで、電子ラーマ半径程度のスケールを持つ電子スケール乱流の要因として、電子温度勾配が急峻化することで強く励起される電子温度勾配不安定性がその候補の一つと考えられているが、これよりも少し大きなスケールのイオンスケール乱流との相互作用の影響も指摘されていた。しかし、高温プラズマ中の電子スケール乱流のパラメータ依存性やイオンスケール乱流と電子スケール乱流との相互作用について実験的な検証はまだ誰も成しえていなかった。出願者は、これらの乱流を高い時間・空間分解能で観測するための、ミリ波散乱計やドップラー反射計の開発および性能の向上を行い、大型ヘリカル装置 LHD で同時同位置計測ができる観測システムを構築した。

電子スケール乱流およびイオンスケール乱流に大きな影響を及ぼすと考えられる、1) 電子温度勾配依存性、2) 電子とイオンの温度比依存性、3) 衝突周波数依存性について、他のパラメータの影響を排除しつつ各パラメータのみを変化させるように工夫した実験方法を考案して実験提案した。上記計測器の準備と合わせて本課題の実験価値が LHD 実験グループに認められ専用のマシンタイムが配分され、プラズマ実験にて詳細なデータを取得することができ、乱流の特性をまとめることができた。1) 電子温度勾配依存性に関しては、電子温度勾配がある閾値を超えると急激に電子スケール乱流強度が強まり、同時に熱流束も増加することを実験的に初めて明らかにした。これは JET 等の大型トカマク装置で観測されている電子温度勾配の硬直化を示す実験結果と同様であり、電子スケール乱流が LHD だけでなくトカマク装置においても同様に影響している可能性を示唆する重要な成果であると評価され、核融合分野で最も重要な国際会議である IAEA FEC2023 会議において世界中の研究機関を代表する研究者らによって構成される委員会から口頭発表研究課題として採択された。また電子温度勾配が無い領域でも一定強度の電子スケール乱流が存在していることも合わせて発見した。2) 電子とイオンの温度比および 3) 衝突周波数依存性に関しても、乱流強度の観測に成功しそれぞれに対する依存性に関するデータを得た。電子とイオンの温度比が増大すると電子スケール乱流強度が増大していること、一方、衝突度が増大すると電子スケール乱流強度は減少することを明らかにした。これらの観測結果を線形のジャイロ運動論的ブラソフシミュレーション GKV コードを用いた不安定性の成長率と位相速度の計算結果と比較すると、後者の衝突度に関する依存性は成長率および位相速度の双方ともに定性的に一致するが、前者の電子温度とイオン温度の比に関しては計算結果では成長率が低下し一致しないことが分かった。この原因を考察するため、イオンスケール乱流と電子スケール乱流強度間の相互相関について調査解析し、イオンスケール乱流が 10ms 先行して応答していることを明らかにした。この結果は、エネルギーがカスケードして電子スケール乱流に影響を与えている可能性を示唆した。

以上の研究成果は、査読付き国際学術誌において3編の主著論文として掲載済みである。これらの論文内容に関して、6件の学会発表賞（土岐コンファレンス、日本物理学会、プラズマ・核融合学会等）を受賞している。また、7件の国際会議発表を質疑応答も含め英語で行うなど、高い語学力を有している。修了に必要な単位も取得済みである。

2026年1月28日に公開発表会および審査委員による博士論文の内容についての口頭試問を行ったが、公開発表会の参加者および審査委員からの質疑に対して的確に回答しており、研究内容や関連する理論シミュレーション解析手法などの十分な理解が確認できた。以上のことから審査委員会は、出願者の研究成果が課程博士に係る学位論文の内容として相応しく、本論文が博士(理学)の学位の授与に値すると判断した。