

( 続紙 1 )

京都大学	博士 (エネルギー科学)	氏名	武藤 幹弥
論文題目	Global Gyrokinetic Study of Profile Formation and Turbulent Transport in Tokamak Plasmas (大域的ジャイロ運動論を用いたトカマクプラズマにおける分布形成と乱流輸送に関する研究)		
(論文内容の要旨) (枠内に 1700 字程度)			
<p>本論文は、カーボンニュートラルなエネルギー源として注目されている核融合発電の実用化に向け、プラズマの磁場閉じ込めを研究した結果をまとめたもので、7章からなっている。</p> <p>第1章は序論で、核融合エネルギー、磁場閉じ込め核融合方式としてのトカマク型、そしてプラズマ閉じ込めの基本が解説されている。その後、磁場閉じ込め核融合では、閉じ込められたプラズマは微視的不安定性によって乱流状態になることおよびプラズマ乱流による粒子やエネルギーの輸送は密度および温度の上昇を妨げるため、乱流輸送の理解および制御は重要な研究課題であることが説明されている。最後に、グローバルジャイロ運動論シミュレーションによりトカマクプラズマの密度・温度分布形成と乱流輸送に関する3つの課題に取り組んだことが述べられている。</p> <p>第2章では、ジャイロ運動論の説明が述べられている。リー摂動法を用いてジャイロ座標へ座標変換することによりジャイロ運動論方程式が導かれること、位相空間分布関数の時間発展を表すジャイロ運動論ブラソフ方程式、ジャイロ座標における場の方程式であるジャイロ運動論ポアソン方程式が順番に説明されている。</p> <p>第3章は、2章で説明されたジャイロ運動論方程式系を数値シミュレーションするグローバルジャイロ運動論シミュレーションコード GKNET が解説されている。コードで用いられている方程式系の規格化、ジャイロ運動論ブラソフ方程式の数値解法、ジャイロ運動論ポアソン方程式の数値解法が順番に説明されている。</p> <p>第4章は、以下の様にエントロピーに着目した分布形成と乱流輸送の解析結果が述べられている。核融合実験装置で観測される温度分布の雪崩現象は典型的なメソスケールを持つ揺動である。このメソスケール揺動は、実験装置サイズであるマクロスケールと乱流を駆動するドリフト波不安定性を持つミクロスケールの中間のスケールを持ち、グローバルジャイロ運動論シミュレーションによって初めて解析可能になる現象である。本研究では、大域現象であるメソスケール揺動に対応したエントロピーのダイナミクスを記述する方程式を用いて、トカマクプラズマにおけるイオン温度勾配乱流のグローバルジャイロ運動論シミュレーション結果を解析し、エントロピー対流により、温度分布の雪崩現象後にある時間差をもって熱流束の雪崩現象が起きることを示した。</p> <p>第5章では、以下の様に磁気島周辺におけるプラズマの分布形成が述べられている。磁場閉じ込め核融合プラズマでは、磁気面を形成することによりプラズマを閉</p>			

じ込めるが、この磁気面が壊れて磁気島が生じる場合がある。本研究では、磁気島周辺のプラズマ分布形成を、メゾスケール構造を取り扱える利点を有したグローバルジャイロ運動論シミュレーションを用いて調べた。そして、イオン温度勾配乱流と磁気島の非線形相互作用により磁気島と同様な形状の渦状の流れが生じ、この流れの周期的な生成消失により、イオン温度分布が周期的に平坦化することを初めて明らかにした。この結果は、磁気島内のプラズマ分布形成は、磁気島内の渦状流れに影響されることを示す。

第6章では、以下の様に不純物に影響された分布形成と乱流輸送の解析結果が述べられている。核融合プラズマ閉じ込め装置内には、燃料プラズマに加えて閉じ込め装置などから発生する不純物プラズマが存在する。不純物がある場合、不純物モードと呼ばれる不安定性が生じ、乱流を駆動する。本研究ではこの不純物乱流による輸送について解析を行った。その結果、不純物乱流は、燃料プラズマを外側に吐き出し不純物プラズマを内側に集めること、さらに不純物乱流はイオン温度分布をよりピークさせることを初めて明らかにした。この結果は、不純物が外側から注入された場合に起こるプラズマ閉じ込め改善に不純物乱流が重要な役割を果たすことを示す。

第7章では、3つの課題に対して以下の結論が述べられている。(1)エントロピー対流により、温度分布の雪崩現象後にある時間差をもって熱流束の雪崩現象が起こることを示した。(2)磁気島内のプラズマ分布形成は、磁気島内の渦状流れに影響されることを示した。(3)不純物が外側から注入された場合に起こるプラズマ閉じ込め改善に、不純物駆動乱流が重要な役割を果たすことを示した。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、カーボンニュートラルなエネルギー源として注目されている核融合発電の実用化に向け、プラズマの磁場閉じ込めを研究した結果をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

磁場閉じ込め核融合では、閉じ込められたプラズマは微視的不安定性によって乱流状態になる。プラズマ乱流による粒子やエネルギーの輸送は密度および温度の上昇を妨げるため、乱流輸送の理解および制御は核融合研究において重要な課題の1つである。申請者は、グローバルジャイロ運動論シミュレーションによりトカマクプラズマの密度・温度分布形成と乱流輸送に関する3つの課題に取り組み、以下の研究成果を得て、国際学会誌 *Physics of Plasmas* に主著者として3編の論文を発表した。

1. エントロピーに着目した分布形成と乱流輸送の解析

核融合プラズマで観測される温度分布の雪崩現象は典型的なメソスケールを持つ揺動である。本研究では、そのようなメソスケール構造を取り扱える利点を有したグローバルジャイロ運動論シミュレーションを用いてイオン温度勾配乱流の解析を行い、エントロピー対流によって、温度分布の雪崩現象後にある時間差をもって熱流束の雪崩現象が起きることを初めて示した。

2. 磁気島周辺におけるプラズマの分布形成

磁場閉じ込め核融合プラズマでは、プラズマを閉じ込める磁気面が破壊されて磁気島が生じる場合がある。本研究では、グローバルジャイロ運動論シミュレーションを用いて、イオン温度勾配乱流による磁気島周辺の分布形成を調べ、磁気島内のプラズマ分布形成は、磁気島内の渦状流れに影響されることを初めて示した。

3. 不純物に影響された分布形成と乱流輸送の解析

核融合プラズマ閉じ込め装置内には、燃料プラズマに加えて閉じ込め装置などから発生する不純物プラズマが存在する。本研究では、不純物に駆動された乱流による輸送について解析を行い、不純物が外側から注入された場合に起こるプラズマ閉じ込め改善に、不純物駆動乱流が重要な役割を果たすことを初めて示した。

以上のように本研究は、グローバルジャイロ運動論シミュレーションによって、これまでのローカルジャイロ運動論シミュレーションでは扱えなかった核融合プラズマの分布形成と乱流輸送の問題に新たな理解を与えた。よって、本論文は博士(エネルギー科学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和6年1月22日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。

論文内容の要旨、審査の結果の要旨及び学位論文の全文は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。ただし、特許申請、雑誌掲載等の関係により、要旨を学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日：            年        月        日以降