

氏名	鵜 沢 憲
学位(専攻分野)	博士 (エネルギー科学)
学位記番号	エネ博第 173 号
学位授与の日付	平成 20 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	エネルギー科学研究科エネルギー基礎科学専攻
学位論文題目	Study of Modulational Instability and Structure of Zonal Flows in Fusion Plasmas (核融合プラズマにおける帯状流の変調不安定性と構造に関する研究)
論文調査委員	(主査) 教授 岸本泰明 教授 近藤克己 教授 福山 淳

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、磁場閉じ込め核融合プラズマ中のミクロスケールのプラズマ乱流から生成される帯状流の時空間構造とそれがプラズマの乱流輸送に及ぼす影響を明らかにすることを目的に行った変調不安定性に基づく理論解析および非線形シミュレーションに関する研究結果をまとめたもので、5章からなっている。

第1章は序論で、磁場閉じ込めプラズマ中で発生する様々なスケールの揺らぎ(乱流)の時空間特性とそれら揺らぎ間の非線形相互作用による帯状流生成の物理機構と解析手法、および、それらがプラズマ輸送に及ぼす影響について概説している。これに基づいて、乱流や帯状流のスペクトル効果や異なったスケールの乱流が帯状流生成に与える影響の重要性など、本論文における研究課題の動機付けと意義を提起している。

第2章では、乱流や帯状流をはじめとした磁場閉じ込め核融合プラズマ中の揺らぎを記述する基礎方程式について概説するとともに、本研究の中心課題である帯状流生成の基本的な物理機構である変調不安定性とその解析手法について論じている。また、本研究で対象とするミクロスケールの電子温度勾配乱流駆動の帯状流を例題に、乱流構造と帯状流の波長や成長率などの基本特性について論じている。

第3章では、これまでの変調不安定性解析において仮定されていた帯状流を単色波として扱うモデルでは帯状流の構造や成長率などが正確に評価されていないとの着想に基づいて、ミクロな電子系の乱流が生成する帯状流に対して、帯状流に対してもスペクトル幅を考慮した非線形シミュレーションを行い、両者を詳細に比較・検討した。その結果、帯状流のスペクトル構造を考慮した場合としない場合では帯状流の生成過程が本質的に異なり、成長率の増大を伴った大域的な構造を示すことを見出した。これは、乱流および帯状流のスペクトルを形成するフーリエモード間の多重結合により帯状流が半径方向に局在した波束を形成することに起因するものであることを明らかにした。本研究では、これを巨視的帯状流固有モード(Global zonal flow eigen-mode)と命名した。

これを説明する理論モデルとして、従来の帯状流のスペクトルを考慮しない変調不安定性に関する4波の結合モデルに対して、2本の単色波の和として帯状流の有限なスペクトル幅をモデル化した10波の結合モデルを提案した。このモデルによる解析結果を従来の4波モデルと比較すると、シミュレーション結果を再現して帯状流に対して高い成長率を与えることが分かり、巨視的帯状流固有モードの理論的背景を明らかにしている。

第4章では、電子系に限定した帯状流生成の解析(3章)からイオン系まで含めた大域的な解析に拡張し、イオン系乱流によって生成されるメソスケールの帯状流(平衡流)が存在した場合、それが電子スケールのミクロな乱流と帯状流生成に与える影響を調べる新しい変調不安定性理論を提案している。この理論では、これまで帯状流の分散式が複素周波数に関して3次の代数方程式によって記述されていたのに対して、11次の代数方程式によって表現される。これを解析した結果、平衡流が存在すると帯状流生成の不安定性領域が狭まるとともに最大線形成長率が低下することが分かった。これにより、平衡流は帯状流の変調不安定性に対し抑制効果があることが示されると共に、この抑制効果は平衡流の波数の増大に伴って顕

著となることが分かった。さらに、この抑制効果は、これまで一般的に用いられてきた電場強度の空間勾配ではなく電場強度そのものに比例することを見出した。また、この不安定性の抑制効果は平衡流による帯状流の実周波数の増大に起因しており、これが変調不安定性に対して周波数の不整合をもたらすことによるものであることを理論的に明らかにした。

電子スケールの乱流が生成する帯状流に対して、乱流および帯状流の有限のスペクトル幅を有するとともに、イオン系乱流によって生成されるメソスケールの帯状流（平衡流）も共存した非線形シミュレーションを行い、異なったスケールの平衡流存在下での統合的な解析を行った。その結果、帯状流の生成に関して、帯状流の有限なスペクトル幅による成長率の増大と異なったスケールの平衡流による成長率の減少が互いに競合し乱流と帯状流が定常レベルに達する一方、平衡流の半径方向の波長が短くなるとともに帯状流のエネルギーが平衡流に部分的に移行することが新たに分かった。

5章では、本研究で行った変調不安定性による理論解析および非線形シミュレーションに関して、得られた主要な結論と今後の課題について述べている。

## 論文審査の結果の要旨

本論文は、磁場閉じ込め核融合において重要な役割を果たすプラズマ乱流から生成される帯状流の時空間構造とそれが乱流輸送に及ぼす影響を明らかにすることを目的としたものであり、ミクロな乱流と帯状流の相互作用を記述する変調不安定性理論および非線形シミュレーションによる解析を行い、以下に示す重要な結果を得た。

- 1) 有限スペクトル幅を持った電子スケールの乱流が生成する帯状流に対して、帯状流を単色波で近似するこれまでのモデルに対して、帯状流のスペクトル幅を考慮したシミュレーションを行い、両者を詳細に比較・検討した。その結果、帯状流のスペクトル構造を考慮した場合としない場合では帯状流の生成過程が本質的に異なり、成長率の増大を伴った大域的構造を示すことを見出した。これは乱流および帯状流のスペクトルを形成するフーリエモード間の多重結合による帯状流の波束形成に起因することを明らかにした。本研究では、これを巨視的帯状流固有モード (Global zonal flow eigen-mode) と命名した。
- 2) 巨視的帯状流固有モードの理論モデルとして、従来の帯状流のスペクトルを考慮しない4波の結合モデルに対して、帯状流の有限なスペクトル幅を2本の単色波の和としてモデル化した10波の結合モデルを提案した。このモデルは4波モデルと比較すると、シミュレーション結果を再現して高い成長率を与えることが分かった。
- 3) 電子系に限定した帯状流生成の解析から、イオン系まで含めた大域的な解析に拡張し、イオンスケールの平衡流が存在した場合に、それが電子スケールのミクロな帯状流生成に与える影響について調べた。帯状流生成の複素周波数に関する11次の代数方程式で記述される分散関係式を導き、それを解析することにより、マクロな平衡流は帯状流の変調不安定性に対し抑制効果があることを明らかにするとともに、その抑制効果は電場強度そのものに比例することを見出した。また、この不安定性の抑制効果は、帯状流の実周波数の増大が変調不安定性に対して周波数の不整合をもたらすことが原因であることを明らかにした。
- 4) 電子系乱流が生成する帯状流に対して、帯状流が有限のスペクトル幅を有するとともにイオン系乱流によって生成されるメソスケールの帯状流（平衡流）が共存した場合の統合的な非線形シミュレーションを行い、平衡流の半径方向波長が短くなるとともに帯状流のエネルギーが平衡流に部分的に移行する現象を見出した。

以上の研究は、核融合プラズマの乱流輸送を支配する帯状流の生成過程を正確に予想するためには、帯状流のスペクトル効果や他スケールからの平衡流の効果を取り入れた大域的な解析が重要な役割を果たすことを示したものであり、今後の核融合プラズマの乱流輸送の抑制・制御や閉じ込め改善のための理論的指針を与えるものである。

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、平成20年2月21日に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。