

氏 名	たけ だ かず お 武 田 和 雄
学位(専攻分野)	博 士 (エネルギー科学)
学 位 記 番 号	エ ネ 博 第 98 号
学位授与の日付	平 成 16 年 7 月 23 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	Intermittent Thermal Transport Generated by Ion Temperature Gradient Driven Turbulence (イオン温度勾配駆動乱流により生じる間欠的な熱輸送)
論文調査委員	(主 査) 教 授 近 藤 克 己 教 授 前 川 孝 助教授 中 村 祐 司

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、微視的不安定性の一種であり、特にバルク領域におけるイオンの異常熱輸送を支配し、閉じ込め改善をもたらす輸送障壁形成にも関わっていると考えられているイオン温度勾配 (ITG) モードにより駆動される乱流を数値シミュレーションにより研究しその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、本研究の背景及び目的について記してある。ITG モードと改善閉じ込めに関する研究の経緯、核融合研究における本研究の位置付け等について述べている。

第2章では、ITG モードを記述する方程式系を二流体方程式系から導出している。これは、渦度とイオン圧力に関する連立偏微分方程式系である。また、得られた方程式系に対して線形解析を行い線形安定性について議論している。さらにその結果に基づいて、与えられたパラメータに対する最も不安定な波数を導いている。

第3章では、前章で導出したトロイダル ITG モードを記述する方程式系を2種類の手法で数値的に解析している。

前半においては、トロイダル ITG モードを記述する方程式系を数値的に解析するためのコードを開発して解析を行った。系が強乱流状態にあるとき、運動エネルギーと熱輸送が間欠的なバーストを起こす現象を見出した。乱流による輸送量を特徴付けるヌセルト数 Nu のイオン温度勾配 K_i に対する依存性は、 K_i の大きさにより変化し系の輸送形態に遷移が起こることを見出した。特に K_i が大きく系が強乱流状態にあるときは $Nu \propto K_i^{1/3}$ のスケーリング則が現れることを見出した。これにより、このときの系の挙動が流体における熱対流問題やプラズマにおける抵抗性交換型乱流と同様であることを明らかにした。

後半では、上述した現象の本質的な物理を抽出しできるだけ少ない計算コストで詳細に解析するために、トロイダル ITG モードを記述する方程式系に対して、径方向にのみ多くの自由度を持つ1次元モデルを導入した。系が不安定性の臨界状態に近いとき、このモデルは系の分岐する過程を正確に再現できることを示した。また、イオン温度勾配が大きく系が強乱流状態にあるときに生じる間欠的な振動を再現することを見出した。ヌセルト数 Nu のイオン温度勾配 k_i に対する依存性は、フルシミュレーションの結果として得られた輸送状態の遷移やスケーリング則を非常に良く再現することを確認し、この1次元モデルが乱流輸送の解析に有用であることを明らかにした。

第4章では、間欠性のメカニズムを調べるために18自由度から成る少数自由度モデルを提案した。このモデルを数値的に解析した結果、系が強乱流状態にあるときに生じる間欠的なバーストが明確に再現された。間欠性が生じるメカニズムを詳細に調べた結果この現象が、

- (1) 非線形モード結合によるシア一流の生成とそれによる ITG 乱流の抑制,
- (2) 粘性によるシア一流のゆっくりとした減衰,
- (3) シア一流による乱流抑制効果の減少による ITG モードの急激な再成長,

という3つの要素の競合により生じており、系が自己組織化臨界状態にあることを明らかにした。

第5章は総括であり、本研究で得られた成果について要約している。また、直接数値計算、1次元モデル、18自由度モデルの3種類の結果を比較検討している。その結果、系に生じる間欠的な挙動は比較的低次の波数の非線形相互作用により生じており18自由度モデルがこの間欠性を記述する最小自由度のモデルであることを論じている。また、1次元モデルで径方向に高次の波数を取り入れることでITG乱流が持つ流体的な性質を再現することができ、乱流輸送の解析に有用であることを論じている。これらのモデルがITG乱流の基礎物理の解明に有用であることを導いている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、微視的不安定性の一種であり、特にバルク領域におけるイオンの異常熱輸送を支配し輸送障壁形成にも関わっていると考えられているイオン温度勾配 (ITG) モードにより駆動される乱流をシミュレーションにより研究した成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。

- 1) トロイダル ITG 方程式系を数值的に解析するためのコードを開発し、解析を行った。系が強乱流状態にあるとき、運動エネルギーと熱輸送が間欠的なバーストを起こす現象を見出した。
- 2) 熱輸送の大きさとイオン温度勾配との間に特徴的なスケーリング則が成り立つことを見出した。特にイオン温度勾配が大きい領域における系の挙動はレイリー・ベナール対流や抵抗性交換型乱流と同様であることを明らかにし、ITG 乱流の非線形ダイナミクスを理解するための重要な知見を与えた。
- 3) 上述した現象の本質的な物理を抽出しできるだけ少ない計算コストで詳細に解析するために、トロイダル ITG モードを記述する方程式系に対して、径方向にのみ多くの自由度を持つ1次元モデルと径方向の自由度を減らした18自由度から成る少数自由度モデルを新たに提案した。
- 4) 18自由度モデルを用いて系に生じる間欠性のメカニズムを詳細に解析し、この現象が
 - (1) 非線形モード結合によるシア一流の生成とそれによる ITG 乱流の抑制,
 - (2) 粘性によるシア一流のゆっくりとした減衰,
 - (3) シア一流による乱流抑制効果の減少による ITG モードの急激な再成長,という3つの要素の競合により生じており、系が自己組織化臨界状態にあることを明らかにした
- 5) 18自由度モデル、1次元モデル、直接数値計算の3つの結果を比較して、18自由度モデルが系の間欠的な挙動を記述する最小自由度のモデルであり、このモデルがITG乱流の基礎物理の解明に有用であることを示した。また、1次元モデルで径方向に高次の波数を取り入れることでITG乱流が持つ流体的な性質を再現することが可能になることを明らかにすると共に、乱流輸送の解析にも有用であることを示した。

本論文はイオンの異常熱輸送を支配し輸送障壁形成に関わっていると考えられている ITG 乱流の非線形物理を明らかにするための重要な知見を与えたものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。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16年6月8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。