

氏名	三木 一弘
学位(専攻分野)	博士 (エネルギー科学)
学位記番号	エネ博第 172 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	Transport Dynamics Associated with Geodesic Acoustic Mode near the Critical Gradient Regime in Tokamak Plasmas (臨界勾配近傍におけるトカマクプラズマのGAMに関わる輸送ダイナミクス)
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、トカマク型核融合プラズマのイオン系の閉じ込め性能を左右するイオン温度勾配 (ITG) モードが励起される臨界勾配近傍の乱流輸送現象の解明するために行った、トロイダル配位での大域的なジャイロ流体モデルに基づく非線形シミュレーションと理論解析に関する研究結果をまとめたもので、6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において異常輸送を引き起こす揺らぎ (乱流) の臨界勾配近傍での遷移現象などの基本的な物理機構とともに、乱流間の非線形相互作用によって発生する低周波数の帯状流 (静的帯状流) による Dimits shift と呼ばれる線形理論で定義される臨界勾配の上方変移現象に関して論じている。これらの知見に基づいて、安全係数の高い磁場構造下において、トーラス形状に起因して発生する GAM (Geodesic Acoustic Mode) と呼ばれる高周波数の帯状流 (振動帯状流) が臨界勾配近傍の乱流輸送のダイナミクスに与える影響について分析し、本研究の動機づけと意義を提起している。

第2章では、トカマク装置をはじめとした磁場閉じ込めプラズマ中で発生するドリフト波による乱流現象を記述するジャイロ流体モデルに基づく基礎方程式について論じている。

第3章では、ジャイロ流体モデルに基づいて、トカマクプラズマの中心から周辺までの全領域を解析するための大域的な非線形シミュレーションコードについて概説している。また、このコードによる ITG 乱流の非線形シミュレーションを実施し、ITG 乱流と帯状流の空間構造や成長率などの基本特性について議論するとともに、安全係数などで決定される磁場構造に応じて静的帯状流と GAM のエネルギー分配比について検討をしている。その結果、この静的帯状流と GAM のエネルギー分配比は温度勾配に依存して変化し、特に臨界勾配近傍においては GAM 成分の割合が減少し、静的帯状流が卓越したプラズマ状態になることを示している。

第4章では、GAM が発生しやすい高い安全係数を持った磁場構造に対して、臨界勾配近傍での ITG 乱流の非線形シミュレーションを実施している。その結果、線形臨界勾配の近傍では ITG 乱流から生成される静的帯状流が ITG 乱流を効率的に抑制する Dimits shift 現象を再現するとともに、温度勾配の上昇に伴い GAM の励起とその空間伝播を伴う間欠的なバースト現象 (Intermittency) を見出した。これは、これまで指摘されていた静的帯状流の衝突減衰による間欠現象とは質的に異なるものであり、GAM 励起とそれに続く GAM の無衝突減衰によって特徴付けられる新しいタイプの間欠現象であることが分かった。さらに、この GAM の間欠的なバーストが繰り返される過程において、少量の GAM エネルギーの非減衰部分が静的帯状流としてプラズマ全体に穏やかに蓄積し、それが一定のレベルに達すると ITG 乱流が抑制される現象を見出した。これを GAM による「成長間欠性 (growing intermittency)」と命名し、間欠性を伴う動的過程によって Dimits shift 領域が確立されることを明らかにした。また、GAM の無衝突減衰に加えてプラズマ粒子間の衝突に起因する静的帯状流や GAM の減衰過程を取り入れた非線形シミュレーションを行った。その結果、間欠過程を経て蓄積された静的帯状流が衝突減衰を受けることから、成長間欠性より長い周期で特徴付けられる新たな間欠現象が加わり、複数の時定数を持った複雑な間欠現象

によってプラズマの輸送が支配されることを明らかにした。

第5章では、これまでの乱流と静的帯状流の捕食-被食 (predator-prey) 関係による2場の力学系モデルを、GAM励起に本質的な圧力摂動と磁力線に沿ったイオン音波を含む4場モデルに拡張することにより、成長間欠性を含む新たな乱流輸送モデルを構築・提案した。この4場モデルを数値的に解析することにより、これまでの静的帯状流による臨界勾配の上方変移に加えて、成長間欠現象の基本的なダイナミクスであるGAMのバースト的励起と無衝突減衰による間欠現象、静的帯状流の蓄積、および最終段階における乱流の抑制を定性的に再現することに成功した。

さらに、提案した4場モデルの数学的構造に着目し、この方程式系における4次元位相空間における固定点近傍での解軌道の安定性解析を行い、成長間欠現象の数学的表現と物理描像を明らかにする研究を行った。その結果、シミュレーションで見出した成長間欠現象は乱流駆動、GAMによる無衝突減衰、静的帯状流の蓄積という3種類の固有状態に分解されることが分かり、成長間欠性に伴う静的帯状流の蓄積とそれによる乱流抑制の物理機構、さらに、それが現出するための条件を明らかにした。

7章では、本研究で行った臨界勾配近傍の非線形シミュレーションと理論解析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、トカマク型核融合プラズマにおいてイオン系の閉じ込め性能を支配するイオン温度勾配 (ITG) モードが励起される臨界勾配近傍の乱流輸送現象を解明するために行ったものであり、臨界勾配近傍でのトロイダル配位における大域的なジャイロ流体モデルに基づく非線形シミュレーションと理論解析を行い、以下に示す重要な知見を得た。

- 1) 臨界勾配近傍でのITG乱流の非線形シミュレーションを行った結果、ITG乱流から非線形過程を通して生成される低周波数の帯状流 (静的帯状流) がITG乱流を抑制し、線形理論から決まる臨界勾配が高い圧力勾配方向に変移 (Dimits shift) する現象を再現するとともに、より安全係数の高い磁場構造では、温度勾配の上昇に伴いGAM (Geodesic Acoustic Mode) と呼ばれる高周波で振動する帯状流の励起とその空間伝播を伴う間欠的なバースト現象を見出した。これは、これまでの静的帯状流の衝突減衰による間欠現象とは質的に異なるものであり、GAM励起とそれに続くGAMの無衝突減衰によって特徴付けられる新しいタイプの間欠現象であることが分かった。さらに、GAMの間欠的なバーストが繰り返される過程において、GAMエネルギーの少量の非減衰部分が静的帯状流としてプラズマの広い領域に穏やかな時間スケールで蓄積し、それが一定のレベルに達するとITG乱流が抑制される現象を見出した。これをGAMによる「成長間欠性 (growing intermittency)」と命名し、帯状流によるDimits shift領域が間欠性を伴う動的な過程によって確立されることを初めて明らかにした。
- 2) 成長間欠性現象を理解するために、これまでの乱流と静的帯状流の捕食-被食 (predator-prey) 関係による2場の力学系モデルを、GAM励起に本質的な圧力摂動とイオン音波を含む4場モデルに拡張し、成長間欠性を記述する新しい方程式系を構築・提案した。この4場モデルを数値的に解析することにより、成長間欠現象の基本的なダイナミクスであるGAMのバースト的励起と無衝突減衰による間欠現象、静的帯状流の蓄積、および最終段階における乱流の抑制を定性的に再現することに成功した。さらに、4場方程式系の4次元位相空間における固定点近傍での解軌道の安定性解析を行い、その結果、成長間欠性現象は乱流駆動、GAMの無衝突減衰、静的帯状流の蓄積という3種類の固有状態の線形結合によって表現されることを明らかにするとともに、間欠現象に伴う静的帯状流蓄積とそれによる乱流抑制の物理機構やそれらが現出するための条件を導出した。

以上の研究は、核融合プラズマにおける臨界勾配近傍の乱流輸送においては、これまで指摘されていた静的帯状流だけでなく、トーラス形状効果に起因して発生する高周波帯状流であるGAMが重要な役割を果たすことを明らかにした理論研究として、今後の核融合プラズマの閉じ込め・輸送研究に重要な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。