

## 論文審査の結果の要旨

氏名 佐々木 真

本論文は、トカマクプラズマにおいて乱流に駆動された径方向振動電場の現象（測地線音波）の理論的研究をまとめたもので、全 10 章 127 頁からなる。第 1 章はイントロダクションであり、プラズマの特徴である非線形非平衡性、核融合プラズマやトカマク装置について述べた後、本論文の研究対象であるトカマク装置の径方向の励起について述べている。その中で特に径方向シアを持つ径電場が  $E \times B$  フローにより径方向シアを持つポロイダル流を生成し、径方向への輸送を抑制する働きを持つことからその特性を理解することの重要性について述べている。トカマクにおいては、乱流に励起された径電場によるポロイダル流は、ゼロ周波数で有限径方向波数を持つ静的ゾーナルフロー（静的 ZF）と、有限周波数、径方向波数を持つ測地線音波（geodesic acoustic modes, GAMs）の 2 種が存在するが、GAM に関するこれまでの実験観測事実について概観したのち、理論的に未解決であることを指摘し、GAM 周波数の離散性、径方向波数のパラメタ依存性、GAM の非線形結合（GAM 高次高調波）などの理論の必要性について述べている。

第 2 章では、基礎となるジャイロ運動方程式の解説を行っている。

第 3 章および第 4 章では、GAM の分散関係、ポロイダル構造への有限ラーマー半径効果を明らかにするために、ジャイロ運動論の方程式と電荷の準中性条件を基礎方程式として解析を行っている。静電ポテンシャル揺動に対するイオン速度分布関数の線形応答から GAM のポロイダル固有モードの解析を行い、GAM の静電ポテンシャル揺動、密度揺動のポロイダル構造、有限ラーマー半径効果を取り入れた結果、磁場曲率によるイオン軌道のずれ効果と静電ポテンシャル揺動が結合することにより、GAM は有限ラーマー半径効果の次数に応じ、異なるパリティのモード（ポロイダル断面の上下で対称な成分と反対称な成分）が交互に出てくることを明らかにしている。

第 5 章では、GAM の有限ラーマー半径効果（径方向波数）を含んだ分散関係を用いて、GAM 径方向固有モードを解析している。分散関係における径方向波数を径方向微分へ置き換えることで径方向固有方程式を導き、プラズマ境界を考慮することにより、GAM は径方向へ波打ち（有限の波数を持ち）、特徴的波長のパラメタ依存性を明らかにした。これにより、周波数、減衰率の離散性や径方向構造に対応する減衰率が得られ、径方向構造の選択則への基礎を与えている。これらの結果はトカマク型実験装置である JFT-2M での静電ポテンシャル、周波数の径方向構造や TEXTOR での離散的周波数の観測と定性的に矛盾しない結果となっている。

第 6 章では、実際の実験条件での GAM を再現するために多イオン系での GAM のポロイダル固有モード解析を行い、GAM 周波数、減衰率への不純物効果を解析的に明らかにして

いる。GAM 周波数は不純物の増加と共に減少し、減衰率は増加することを示している。この結果は実験条件を再現するだけでなく、核融合反応観測方法である GAM spectroscopy への基礎を与える結果である。

第 7 章では、MHD 流体方程式の導入を行っている。

第 8 章では、GAM の非線形ダイナミクスについて考察するため電磁流体方程式を用い、非線形項であるレイノルズ応力に乱流振幅によるモデル化を採用し解析を行っている。GAM が径方向への進行波成分を持つ場合、GAM 同士が非線形結合することにより、高次高調波が準モードとして強制的に励起され、3 次非線形性まで考慮すると、レイノルズ応力の 1 次では GAM を励起する項、3 次では GAM を安定化させる項が現れ、GAM 成分の非線形飽和振幅、2 倍高調波を解析的に導く成果を得た。その理論的結果を JFT-2M での実験結果と比較し、両者は実験の誤差範囲で一致することを示した。この研究は GAM の非線形過程に対してレイノルズ応力モデル妥当性を検証した最初の例であり、高く評価される。

第 9 章では、GAM 非線形ダイナミクスの研究を GAM が定在波成分を持つ場合においても考察している。磁気面を横切って内側へ進む波と外側へ進む波が結合することで、ゼロ周波数で有限径方向波数を持つ波（静的 ZF）が高次高調波に加え励起されことを明らかにした。この GAM から静的 ZF へのエネルギー流は従来解析されていない新しい機構である。

第 10 章は、まとめと今後の展望である。

以上、本論文は高温プラズマの乱流駆動された径方向振動電場の理論的解析を行ったものでメソスケールの構造形成や非線形効果など、従来の知見を超える成果を与えている。本論文の結果の一部はすでに論文として出版されており、指導教官の高瀬雄一氏、伊藤公孝氏等との共著であるが、論文提出者が主導してモデルを考案し解析を行ったものであり、論文提出者の寄与が十分であると判断する。したがって博士（理学）の学位を授与できると認める。