

# 論文審査の結果の要旨

氏名 堀 暖

プラズマは、物質の運動（マクロなモデルでは流れ場として表現される）と電磁場が不可分に結合した無限次元非線形系であり、さまざまな揺動が容易に乱流状態へ発展する。プラズマ乱流の統計的性質を理解することは、プラズマ物理学の本質的な課題であり、応用上も極めて重要である。核融合プラズマ装置の閉じ込め性能は、さまざまなスケールに広がるプラズマ乱流によって大きな影響を受けることが知られており、また天体の磁気圏や降着円盤、あるいは太陽風などの宇宙・天体プラズマにおいても、乱流による非線形な輸送現象が重要な役割を果たすと考えられている。しかし、プラズマ乱流の研究は、中性流体の乱流に関する膨大な研究と比べると、極めて未開拓である。プラズマが中性流体と比べて本質的に難しいのは、非線形に相互作用する場の変数が多いのと同時に、さまざまな特異摂動効果が多階層（マルチスケール）の統計集団を連関させるからである。

本論文は、プラズマ乱流のエネルギースペクトルについて、ホール効果の特異摂動を考慮したモデルを構築し、理論および数値シミュレーションによって研究した結果を報告したものである。論文は四つの章および補章から構成され、各章は以下の内容を記述している。

第一章は序章にあてられ、流体およびプラズマの乱流に関する研究の現状、理論的なモデルと課題についての概論が述べられている。とくに、本論文が主題とするエネルギーカスケードモデルおよびシミュレーション研究を行うシェルモデルについて、その基本概念と前提となる理論的仮定を整理している。

第二章では、乱流のエネルギースペクトルに関するカスケードモデルについて、独自の解釈と新たなモデル化を提案している。最初に、コルモゴロフによる慣性領域の理論（いわゆるコルモゴロフスペクトルを導く次元解析の理論）を紹介し、次にこれを拡張するために、カスケードでエネルギーを輸送する「担体」の概念を導入し、慣性領域のエネルギー輸送を再定式化している。中性流体の乱流では、渦のエネルギーを輸送する「担体」は渦自身であるが、プラズマの乱流では流れ場の渦とは異なる場の作用（磁場のローレンツ力やホール効果など）が「担体」となりえる。プラズマのさまざまな運動モードに応じて異なる「担体」を仮定することによって、コルモゴロフの理論に限らず、電磁流体のアルフヴェン波の乱流モデルであるクライチナンの理論も再現できることを述べている。

第三章では、ホール効果を考慮した電磁流体モデル（ホール MHD）について、エネルギースペクトルを理論的に予測している。ホール MHD 方程式は、通常の MHD モデルが妥当するマクロなスケールから、イオン慣性の効果が無視できないミクロなスケールまでのマルチスケールを表現できるモデルであり、ホール効果は高次の微分を含む非線形特異摂動として MHD モデルに付加される。エネルギースペクトルの導出にあたっては、第二章で提案した一般化されたスケールリング解析を用いている。MHD 領域（マクロスケール）では、エネルギースペクトルが波数の $-5/3$ 乗に比例し、ホール効果が効く領域（イオン慣性長のミクロスケール）では $-7/3$ 乗に比例するスペクトルが得られることを理論的に予測している。次に、ホール MHD 方程式をもとにしてシェルモデル（ホール MHD シェルモデル）を定式化している。このモデルは、慣性領域で電子（磁気）ヘリシティとイオンヘリシティの保存則を満たすように係数が決められている。ホール効果の特異摂動を除くと、イオンヘリシティの保存則はクロスヘリシティの保存則に置き換わり、MHD のシェルモデルに自然に帰着する。このホール MHD

シェルモデルを用いた数値シミュレーションを行い、その結果を示している。エネルギースペクトルは、上記の理論的予想を支持するものとなっている。なお、補章Aにおいて、MHDのモデルについて、既存のシェルモデルをまとめている。また、補章Bにおいて、本研究で定式化されたホールMHDシェルモデルの係数について、詳細を記述している。

第四章は、本論文のまとめにあてられている。

以上を要するに、本論文はプラズマ乱流の多階層的特性について、従来の次元解析を一般化したスケール解析を提案してエネルギースペクトルを予測し、さらに新たに開発した乱流モデルを用いて数値シミュレーションを行って得られた知見をまとめたものである。この研究は、理論的にも実験的にも未だ十分に解明されていないプラズマ乱流の多階層的特性について、先駆的な貢献を行ったものとして、先端エネルギー工学、とくにプラズマ理工学の発展に資するものと評価できる。

なお、本論文の第二章および第四章の成果は吉田善章、古川勝、大崎秀一、沼田龍介の各氏との共同研究のものであるが、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（科学）の学位を授与できると認める。