

論文審査の結果の要旨

氏名 白石 淳也

近年、流れをもつプラズマに関する研究が注目を集めている。核融合プラズマにおいては、自発的な流れの発生、シア流による揺動の安定化や乱流輸送の抑制(閉じ込めの改善)等が観測されている。更に超高速流が生み出す動圧の効果を応用するプラズマの高効率閉じ込め方式が研究されている。宇宙・天体プラズマでは、木星磁気圏や降着円盤等で高速プラズマ流が独特な渦構造を形成している。プラズマ流の研究は、核融合プラズマから宇宙・天体プラズマに亘るプラズマ基礎物理の重要な研究課題となっている。

本論文は、流れをもつプラズマの平衡に関する理論研究をまとめたものである。プラズマの巨視的(流体力学的)平衡は、磁場、流れ場、圧力場等のベクトル場、スカラー場が非線形に結合しバランスを構成することを表現する非線形偏微分方程式系によって記述される。この方程式系の解析は極めて困難な数学的問題を含み、一般的理論は殆ど未解決である。但し、空間次元(独立変数の次元)が二以下の場合については、ある程度一般論が展開できる。流れが無い場合については、既に厳密な理論が構築されており、平衡状態はグラッド・シャフラノフ方程式と呼ばれる楕円型の非線形偏微分方程式により記述され、境界値問題として解ける。しかし、流れをもつ平衡の場合には、グラッド・シャフラノフ方程式は一般化され、一定の速度領域で双曲型に遷移すること(圧縮流の場合)、及び特異点をもつこと(非圧縮流の場合)が知られている。そのため、高速プラズマ流の平衡は極めて重要な問題でありながら、限られた条件でのみ解析が行われてきた。本論文では、上記の数学的困難が生まれる物理的メカニズムを明らかにし、それを克服する特異摂動理論を構築している。論文は六つの章から構成され、各章は以下の内容を記述している。

第一章は序論にあてられ、流れをもつプラズマの平衡解析の重要性および理論的困難についてまとめている。また、本論文のプラズマ物理学における位置づけや応用について詳述している。

第二章では、流れをもつプラズマの平衡における理論的困難について数学的に分析している。磁気流体力学(MHD)方程式の特性方程式の解析、及び一般化されたグラッド・シャフラノフ方程式の数学的構造の解析により、双曲遷移という困難が現れることを示している。また、非圧縮流の場合には、プラズマ流と磁場の縮退により、特異点が生成されることを示している。

第三章では、特異点の困難を克服するために、特異摂動を導入している。特異摂動は微小係数と高階微分の積で表される。MHDは固有のスケールを持たないが、特異摂動を導入することにより固有のスケールが持ち込まれる。本論文では、高温プラズマで重要な特異摂動として、ホール効果を導入している。ホール効果によりプラズマ流と磁場の縮退が解けて、プラズマ流の多様な構造を記述できるようになることを示している。具体的な応用例として原始星の降着円盤の構造を解析し、ホール効果により複雑な流れの構造を記述できることを実証している。

第四章では、ホール効果により特異点が解消されるメカニズムについて記述している。ホール効果により、プラズマ流と磁場の縮退が解けた新しい分枝の平衡が存在し、その分枝の平衡でのみ特異点が解消される。この分枝は一次元系では現れない。また、縮退が解けない分枝では依然特異点が存在する。ホール効果により特異点を取り除いた一般化グラッド・シャフラノフ方程式の数値実験を行い、

特異点により隔てられた領域が接続される様子を明らかにしている。

第五章では、ホール効果がトロイダル効果と結合することにより、MHD では見出せない多様な平衡構造が現れることを示している。これは、第四章において明らかにされた、プラズマ流と磁場の縮退が解けることによる平衡の多様化とは異なるメカニズムである。MHD を満たす平衡とホール MHD に特有な平衡を導出し、高速流をもつ実験室プラズマを模擬した系で数値実験を行っている。その結果、二つの平衡が定性的に異なる性質をもつことを明らかにしている。

第六章は、本論文のまとめにあてられている。

以上を要するに、本論文は流れをもつプラズマの平衡に関して、理論的な困難とその数学的原因を明らかにし、それを克服する特異摂動理論を構築し、特異摂動により多様な平衡構造が生み出されることを示している。その成果は高速流でプラズマを閉じ込める核融合炉心概念や、宇宙・天体現象の解明に応用され、先端エネルギー工学、特にプラズマ物理学に資するところが大きい。

なお、本論文の第三章及び第五章の成果は、吉田善章、古川勝の各氏との共同研究によるものであり、第四章は吉田善章、大崎秀一の各氏との共同研究によるものであるが、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。