

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 近藤 重雄

従来の定義では、プラズマとは電離した気体を意味し、したがって、平均すると電氣的に中性の荷電粒子多体系を指すのが一般的であった。核融合エネルギーの研究に関連して進歩してきた高温プラズマの物理も、主として中性プラズマを対象としたものである。しかし、なかでも、中性条件を取り除いた「非中性プラズマ」の研究は、プラズマ物理の視界を格段に広げるとともに、天体・宇宙物理学、凝縮系物理学、非線形光学など、さまざまな分野の基礎となる新たな学問領域を創成するものとして注目されている。

非中性プラズマや重力多体系である銀河などは、その「自己場」が「回転」とバランスする平衡を形成する。本論文は、回転する系における集団運動について、非中性プラズマ及び銀河を比較しつつ、線形波動・不安定性和非線形構造形成（ソリトン）を理論的に研究したものである。非中性プラズマの高速回転流が生み出す強い反磁性効果は、高性能の先進的核融合に応用できると考えられており、本研究でなされた安定性に関する解析は、磁場のシャワーが静電的不安定性に対して極めて有効な安定化効果をもつことを示している。また、非線形波動の研究は、銀河のソリトンの構造をプラズマ中の電子波及びイオン波のソリトンとの比較・対照によって統一的に捉えたものであり、自己場と回転との関係に関する基本的概念の体系化に資するものである。論文は、以下のように構成されている。

第1章は緒論にあてられている。非中性プラズマと銀河の運動を記述する流体方程式系について述べ、粒子レベルで見た微視的な相似性とそこから導かれる巨視的方程式系の相似性について解説している。また、非線形解析の基礎となるソリトンの性質について KdV 方程式と非線形 Schrödinger 方程式を比較しながら解説している。

第2章では、流体方程式系から導かれる局所的な線形波動・不安定性について一般的に論じ、非中性プラズマと銀河の共通性と差異を整理している。銀河では、回転によるコリオリ力がプラズマにおけるローレンツ力と等価な役割をする。銀河を周回する円軌道のまわりでコリオリ力によって星が振動する運動を epicyclic 振動と呼ぶが、これがプラズマにおけるサイクロトロン振動と対応している。またプラズマでは密度の揺らぎによって生じる静電振動はプラズマ振動であるのに対し、銀河では密度の揺らぎは Jeans 不安定性を引き起こす。すなわち、プラズマ振動数と Jeans 不安定性成長率（虚数周波数）が対応して

いる。さらに、プラズマにおいて磁場に垂直方向の静電振動は高域混成振動と呼ばれるが、これに対応する銀河の振動として Lin-Shu 密度波が位置づけられる。

第3章では、線形波動の分散関係を、媒体の非一様性を考慮した大域的なモードへ拡張して解析している。非中性プラズマにおける磁場に垂直な静電振動（高域混成振動）は、非一様なバックグラウンドの渦の場に置かれると、いわゆる diocotron 振動となり、流れの変曲点があると不安定になる。銀河における Lin-Shu 密度波も同様の振動モードを与え、これらは中性流体の Kelvin-Helmholtz モードと数学的に同等である。本章の後半では、diocotron 不安定性のシア磁場による安定化について論じている。シア磁場が存在すると、磁場に垂直方向の運動と平行方向の運動（プラズマ振動）が結合し、前者によって発生する電荷の揺らぎを後者が短絡するため、不安定性が抑えられる。このことをモードの固有関数の性質を論じることで示した。

第4章では、銀河と非中性プラズマにおける非線形波動について述べている。本章の前半では、Lin-Shu 密度波を非線形領域に拡張し、逡減摂動法によって非線形 Schrödinger 方程式を導出している。これにより、銀河の渦巻構造は、密度波の包絡ソリトンとして説明される。本章の後半では、角度方向の1次元近似流体方程式系に対し逡減摂動法を適用することで KdV 方程式を導出している。また非中性プラズマと銀河に対して、1次元流体方程式の厳密解からも孤立波の存在を示した。

以上を要するに、本論文は自己場と回転流をもつプラズマ（非中性プラズマ及び銀河）における集団現象を統一的に解析することで、自己場と回転流が平衡する系の線形波動・不安定性と非線形効果について基礎的な理論を与えるものであり、非中性プラズマを用いた先進的核融合や天体・宇宙物理の未解決問題に新たな知見を与えるものである。本研究は、システム量子工学におけるプラズマ理工学の発展に貢献するところが大きい。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。