

宇宙、天体あるいは実験室系のプラズマは、一般に流れをともなった平衡を形成している。核融合研究では、H モードや負磁気シアー配位といった高性能閉じ込めにおいてプラズマの流れが重要な役割を果たすことが示され、流れの働きに関心が集まっている。自然現象の例では、木星の磁気圏において強い流れによって極めて圧力が高いプラズマが閉じ込められていることが知られている。しかし、流れをもつプラズマの基本的な特性は十分に理解されているとはいえない。流れをもつ平衡と安定性の理論が、それぞれ非線形性と非エルミート性による困難をともなうからである。近年、流れをもつプラズマの自己組織化理論が作られ、二重 Beltrami 平衡モデルが提唱されている。このモデルを用いて、H モードや太陽コロナ、木星磁気圏などの平衡が自己組織化状態として記述できるようになった。本研究は、二重 Beltrami 平衡モデルに代表される強いシアー流をもつプラズマの安定性を理論的に解析したものである。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。流れを駆動することによって得られる新しい緩和状態である二重 Beltrami 平衡について解説している。次に、流れを平衡の安定性は、Kelvin-Helmholtz 不安定性 (K-H 不安定性) と磁気応力による電磁モードである Alfvén 波を基礎として理解できることを説明している。K-H 不安定性については、平面平行流の渦のダイナミクスを表す Rayleigh 方程式を用いて、その基本的な性質を解説している。最後に、シアー流をもつプラズマでは、運動の生成作用素のエルミート性が破れることを説明している。

第 2 章では、流れをもつプラズマの指数関数的な不安定性について解析している。理想 MHD 方程式を用い、非圧縮・1次元スラブプラズマを考え、分散関係を与える常微分方程式を導出している。この方程式は、K-H 不安定性と Alfvén 波との結合効果を表している。平衡状態として、最初は単 Beltrami 平衡 (無力磁場とそれに平行な Beltrami 流) を考えている。数値解析によって、1) 不安定性は、中性流体の K-H 不安定性と同様に、有限の波数でのみおこる大域的なモードであること、2) 磁場を大きくしていくと、成長率は減少し、流速が Alfvén 速度以下になると安定化すること、3) 磁場を変えても、臨界安定な波数は不変であることを示している。また、安定条件を、磁場強度で規格化した流速および磁場と流れのシアー強度 (Beltrami パラメタ) のパラメタ空間で整理している。理論的考察によって、臨界安定な固有解の存在を示し、安定性の必要十分条件を導いている。次に、二重 Beltrami 流の安定性を解析している。Beltrami 渦の組合せを、1) 不安定な渦とより大きい構造の安定な渦、2) 不安定な渦とより小さい構造の安定な渦、3) 2つの安定な渦という三つの場合に分類し、それぞれについて基本的な性質を調べている。第 1 の場

合では、流速が各点で Alfvén 速度以下になる組合せのとき、重ね合わせによって安定化されることが示されている。第 2 の場合は、成長率は重ね合わせによって大幅に減少する。第 3 の場合では、2 つの安定な渦の重ね合わせが不安定になりうることを示している。さらに、モデル方程式に磁場の曲率の効果を加えることによって、キンク不安定性に対すると流れの効果について調べている。磁場を大きくしていくと K-H モードの成長率は減少するが、さらに大きくしていくとキンク不安定性が増大し、キンク不安定性に対しては、シア一流は安定化に働いていることを示している。章の最後では、二流体効果の大きさについて評価し、イオンスキン長の小さい系では磁場によって成長率が小さくなるとその寄与が大きくなることを示している。

第 3 章では、運動の保存量を用いた変分原理から安定性を議論している。非エルミート系では、指数関数的モードの解析では安定性を完全に理解することはできず、代数的に成長する不安定性なども起こり得る。シア一流をもつプラズマでは、平衡流と揺らぎとのエネルギー交換をポテンシャルによって表現することができないので、通常のエネルギー原理を用いることができない。それに代わるものとして、揺らぎのエネルギーの代わりに運動の保存量(リアプノフ関数)を用いて安定性を議論している。磁場と流れが平行である Beltrami 流において、磁場と流速の摂動量に対する運動の保存量は、エネルギー、磁気ヘリシティ、クロスヘリシティを用いて表されることを示している。この保存量を用いて、摂動のノルムの上限が与える条件を示している。この安定性の十分条件は第 2 章で得られた条件よりも厳しいが、任意の形状とあらゆる不安定性を含む一般的条件である。

以上を要するに、本研究は流れをもつプラズマの安定性について総合的かつ綿密に解析したものであり、さまざまな系におけるプラズマ流の安定性の判定条件を明らかにしている。この研究成果は、高速流をもつ高性能核融合プラズマ閉じ込め法の開発に応用される可能性をもつものであり、システム量子工学、とくに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。