

論文審査の結果の要旨

氏名 沼田 龍介

本論文は、Nonlinear Processes in Two-Fluid Plasmas (二流体プラズマにおける非線形現象) と題している。プラズマにおいて流れは普遍的に存在し、磁場と非線形相互作用することにより多様な構造をつくり出す。粒子（電子、イオン）の運動が問題となるマイクロの階層と、マクロスケール（天体や磁気圏などのスケールあるいは実験装置のスケール）の階層は大きく隔たっているが複雑に連関しており、中間（メソ）スケールに様々な非線形現象を引き起こす。これを理論的に理解することがプラズマ物理の重要な課題である。本研究は、プラズマの二流体モデル、及びマイクロスケールの粒子運動モデルを用いて数値シミュレーションをおこない、プラズマ中でおこる自己組織化と異常散逸（無衝突過程によるエントロピー生産）の非線形ダイナミクス（動的プロセス）を明らかにしたものである。

プラズマのマクロスケールでの運動を記述する最も簡単なモデルは、理想電磁流体力学（MHD）方程式系である。これは、プラズマの安定性解析などには有用であるが、特性長をもたないので、スケール階層の問題を扱うことができない。二流体方程式は、理想 MHD 方程式系にホール効果による特異摂動を加えたモデルであり、イオンスキン長というマイクロスケールを特性長として規定する。イオンスキン長の階層で磁場の強い変動が生み出されると、磁場ヌル近傍においてイオンの運動が非可積分（カオス）になり、カオスによるミキシングの効果によって無衝突でも強力なエネルギー散逸が起こる。本研究は、二流体方程式を用いてマクロスケールとマイクロ（イオンスキン長）スケールを架橋し、またマイクロスケールで起こるカオスの効果について粒子運動方程式を用いて解析している。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。プラズマや流体における自己組織化、乱流について Taylor, Kolmogorov などの研究について紹介し、関連する計算機および計算手法の発展について概説している。さらに、MHD 方程式に基づく理論の問題点として、プラズマ流にともなう特異点の発生や、磁気リコネクションを説明する Petschek のモデルにおける空間構造の矛盾について指摘している。

第 2 章では、二流体 MHD モデルの特徴と、これに関する理論、特にダブルベルトラミ平衡解について解説している。二流体 MHD モデルでは、イオンと電子の運動が分離することによって現れるホール効果を表現することができる。ホール効果は、MHD 方程式系に対する特異摂動であり、スケール階層の形成や、MHD モデルでは記述できない流れの構造などが決定される。ダブルベルトラミ平衡解は、これらの基本的な特徴を表象する特解であるが、これが予測する構造が非線形ダイナミクスにおいて現れるか否かが、本研究の主題として位置づけられる。

第 3 章は、二流体 MHD モデルで記述されるプラズマの自己組織化過程を明らかにするためにおこなった数値シミュレーションについて記述している。非線形、圧縮性二流体方程式を数値シミュレーションするプログラムを自ら開発している。この過程で、境界条件の数学的妥当性を検討している。一様プラズマ中のアルフヴェン波分散関係を再現するこ

とによって、計算の妥当性と精度を検証している。次に、高いエネルギー、ヘリシティを持った不安定な平衡を初期条件とし、非線形ダイナミクスのシミュレーションをおこない、自己組織化された準終状態の構造を分析してダブルベルトラミ平衡解に近いことを確かめている。また MHD モデルで同条件のシミュレーションをおこない、両者を比較して二流体効果（ホール効果）が磁場に直交する方向のプラズマ流を生成すること（ダブルベルトラミ平衡解の特徴）を確認している。ダブルベルトラミ平衡の自己組織化は、エネルギーと電子およびイオンの正準ヘリシティというマクロ変数に関する修正 (adjust) 過程として特徴付けられる。このことを検証するために、これらマクロ変数の時間変化を計算し、理論が予測する保存量の強圧性(coercivity)を実証している。

第4章は、粒子運動のミクロ（イオンスキン長）階層におけるカオスと、そのマクロな効果について考察している。磁場がゼロとなる特異点（磁場ヌル）を含む非一様な電磁場配位においては、電場で加速された荷電粒子の運動はカオスになる。これは磁場ヌルで粒子が散乱されたと考えることができ、強力なエントロピー生産機構となる。このエントロピー生産を無衝突抵抗として定量的に評価している。ただし、ここで考えている系は開放系であり、通常のリアップノフ指数を用いて統計的な定量化をおこなうことができない。そこで局所リアップノフ指数を導入し、これが正の定常値をとる部分領域として磁場ヌル近傍の局所的なカオス領域を同定している。また、カオス領域における無衝突抵抗は、局所リアップノフ指数の時定数によって制限されることを示している。最後に、イオン運動のカオスによる無衝突抵抗を、マクロなスケールで起こる磁気リコネクション現象に適用するメソモデルを導出している。カオスによる抵抗を用いることによって、これまでの磁気リコネクションモデルがもっていた矛盾を解消することに成功している。

以上を要するに、本研究は、多階層性をもつプラズマの非線形現象について二流体モデル及び粒子運動モデルを用いた数値シミュレーションをおこない、自己組織化におけるマクロ変数の変化、無衝突抵抗などを定量的に評価したものであり、その結果はプラズマ物理の発展に貢献するところが大きい。したがって、博士（科学）の学位を授与できると認める。