

氏 名 後藤 涼輔

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1745 号

学位授与の日付 平成27年3月 24 日

学位授与の要件 物理科学研究科 核融合科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 拡張 MHD モデルを用いた Rayleigh-Taylor 不安定性の成長
に対する Hall 項及びジャイロ粘性の影響の数値シミュレーション研究

論文審査委員 主 査 教授 榊原 悟
准教授 三浦 英昭
教授 藤堂 泰
研究副主幹 相羽 信行 独立行政法人
日本原子力研究開発機構
教授 荒木 圭典 岡山理科大学

論文内容の要旨
Summary of thesis contents

本研究は、高波数 Rayleigh-Taylor(RT)不安定性の線形/非線形成長に対する、有限ラーマー半径(FLR)効果及び Hall 効果等の微視的效果の影響を明らかにすることを目的としている。

RT 不安定性は、基礎的な流体力学的不安定性であると認識され、広範な分野において研究が行われている。大気や水といった中性流体中だけでなく、電磁場の影響を受ける電磁流体中でも RT 不安定性が起こる事が知られている。電磁流体中の RT 不安定性が研究されている分野としては、宇宙物理や核融合プラズマを例として挙げる事が出来る。

RT 不安定性の特徴の一つは、高波数ほど成長率が高い事である。これまで MHD 不安定性の解析には、一流体 MHD モデルが用いられてきた。しかしながら、無衝突プラズマを考えた場合には、一流体 MHD モデルは微視的スケールにおいて破綻する事が早くから指摘されている。一流体 MHD モデルでは、高波数モードの成長に影響すると予測される FLR 効果や Hall 効果等を取り扱わないため、本モデルは高波数を含む RT 不安定性の解析モデルとして不十分であると言える。よって本研究では、二次元矩形領域における RT 不安定性について、一流体モデルに FLR 効果及び Hall 効果を加えた拡張 MHD モデルの非線形シミュレーションを実施し、不安定性の線形・非線形成長に対する微視的效果の影響を解析した。

本論文は 7 章から構成されており、概要は以下の通りとなっている。

第 1 章では、研究背景と先行研究、特に一流体 MHD モデルの拡張に関して述べる。FLR 効果による高波数 RT 不安定性の安定化研究など拡張 MHD モデルに関する解析や、拡張 MHD モデルを用いた高波数モードまで精度良く解析を行う 3 次元シミュレーションの困難さについてまとめ、我々の研究目的に対する拡張 MHD モデルの妥当性について記述する。

第 2 章では、本研究における高波数不安定モードに対する問題意識とこの問題に対する取り組みの概略についてまとめ、プラズマの流体モデル及び本研究で採用している拡張 MHD モデルについて述べる。

第 3 章では、本研究で用いる手法と他の手法についての比較、数値的安定性について検討を行う。本研究の初期段階で検討した風上差分法や超粘性などについて述べる。

第 4 章では、圧力勾配が計算領域全体に及ぶ初期平衡分布での高波数 RT 不安定性の非線形シミュレーションについて報告する。線形段階における線形成長率、非線形段階の混合幅、エネルギースペクトル、密度分布等に対する微視的效果の影響の解析を行った。微視的效果に対する線形成長の安定化の観点からは、Hall 効果と FLR 効果の組み合わせが重要であり、Hall 効果もしくは FLR 効果のどちらか一方では大きな低減効果が得られない事を示した。また、この安定化が完全であるか、あるいは小さいが有限な成長率が残る不完全な安定化となるかはベータ値に依存する事を明らかにし、先行研究と無矛盾であることを確認した。非線形段階の解析では、混合幅(乱流領域の幅)の解析から、FLR 効果、Hall 効果の導入に伴う線形成長率の減少が非線形成長の開始時刻の遅延をもたらすものの、急激な非線形成長のため、一流体モデルの場合と同程度まで混合幅が成長することが明らかになった。また、Hall 効果と FLR 効果が加えられた場合には、急峻な密度勾配が形成されること、運動エネルギースペクトルにおいては、高波数モードの成長率の低減が

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

低波数モードの長時間成長をもたらすなど、高波数モードの抑制が必ずしも RT 不安定性全体の抑制にはつながらない事を明らかにした。

第 5 章では、圧力勾配が局在化している初期平衡分布での高波数 RT 不安定性の非線形シミュレーションを行った。線形段階では、Hall 効果及び FLR 効果を同時に加えた場合に、高波数モードの成長率の完全安定化が起こるパラメータ領域の存在を明らかにした。また、Hall 効果及び FLR 効果が同時に加えた場合、非線形段階において密度場の大規模構造が形成されるなど、反磁性ドリフトが存在する場合に高波数の重要性が低下する現象が見られた。エネルギースペクトルを用いた解析から、Hall、FLR 効果は高波数モードの安定化をもたらす得るが、これは同時に低波数モードの一層の成長をもたらす事、速度場のエネルギースペクトルの低波数成分だけではなく高波数成分の振幅も大きくなる事が明らかになった。又、Hall 及び FLR 効果を同時に加えた場合には、低波数密度場構造が形成され、界面では速度差が駆動する二次的 Kelvin-Helmholtz(KH)不安定性が発生する事を明らかにした。

第 6 章では、研究に関する総括を行っている。第 4 章及び第 5 章の解析から、一流体 MHD モデルの場合に比べて Hall 効果及び FLR 効果が加わった場合には、高波数モードの役割が相対的に低下し、密度場などに大規模構造が登場する一方、速度場などでは低波数モードのみ成長する傾向は見られず、変数種によって高波数モードの重要性が著しく異なることや二次的 KH 不安定性が発生する事が明らかになった。これらの研究成果の、当初研究目的に対する位置づけや核融合プラズマとの関連性などについて述べる。

附録では、第 4・5 章で行ってきた二次元シミュレーションの応用として、トーラスプラズマを解析するための一般化座標系を用いたシミュレーションコードの概略及び初期結果についてまとめた。近年、非円形断面をもつトーラスプラズマが実験装置では主に生成され、高い閉じ込め状態が達成されている。こうした非円形断面をもつトーラスプラズマの解析では、任意の基底ベクトル方向に沿った座標系およびメッシュを切ることで高い精度でプラズマを解析することが可能であると考えられる。そのため、本章では一般化座標系での拡張 MHD 方程式の表現およびシミュレーションコードの概略についてまとめた。

本論文は、Rayleigh-Taylor(RT)不安定性の非線形発展に対する非理想的効果を、数値シミュレーションによって調べたものである。RT不安定性は、基礎的な流体力学的不安定性として多数の研究が行われており、RT不安定性への非理想的効果（Hall項、ジャイロ粘性項）についても、Rosenbluthなどの先行研究が存在する。本論文では、非理想的効果の影響の研究が十分ではなく、核融合プラズマの不安定性の理解にも通じる、低ベータ値・低密度比を持つ平衡におけるRT不安定性に対して非理想的効果が与える影響を明らかにすることを目的として数値シミュレーションを行ったものである。

本論文では、核融合を目指した高温プラズマ実験を想定し、ベータ値を10%程度、温度が非一様となる平衡を用いた不安定性シミュレーションを行った。圧力勾配がHall項に現れる長さスケール、イオン表皮長に比べて広く分布する場合、および圧力勾配がイオン表皮長よりも十分に狭い領域に局所的に分布する場合の二種類の平衡状態を考え、この両者に対し非線形数値シミュレーションおよび線形安定性解析を実施した。

圧力勾配が広く分布する平衡においては、Hall項、ジャイロ粘性項がそれぞれ単独では線形不安定モードに対して大きな安定化効果を示さない(Hall項は不安定化に作用する)のに対し、Hall項とジャイロ粘性項の組み合わせによって高波数モードの成長率が大きく低減されることを示した。また、非線形発展においては、Hall項とジャイロ粘性項の両者が方程式に加えられた場合にのみ密度勾配が極めて急峻化すること、他方で大密度勾配領域の周辺に乱流領域が発生しないことなどを示した。

次に、圧力勾配が局所的に分布する平衡に対して、申請者は数値シミュレーションによる線形段階および非線形段階における不安定性解析を行った。圧力勾配が広く分布する平衡の場合、反磁性ドリフトがほとんど発生しないことに対し、圧力勾配が局所的に分布する平衡では、成長率と同程度の大きさの固有周波数でドリフト波が発生することを示した。数値シミュレーションとWKB法による線形安定性解析から、Hall項とジャイロ粘性項が加えられた場合には高波数不安定モードが完全に安定化する事を明らかにした。非線形段階においても、Hall項とジャイロ粘性項の両方が加えられた場合に限り、密度勾配が急峻な領域で密度等高線に沿う剪断流が生じ、これに伴うKelvin-Helmholtz (KH)型の二次不安定性が発生すること、特に密度比が低い場合にはこれがRT不安定性特有のマッシュルーム構造の崩壊を促進すること、この構造の周辺には乱流的な構造が現れにくいことを示した。急峻な密度勾配とKH不安定性の関連について、剪断流発生時に、ジャイロ粘性項が剪断幅を狭める方向に速度を誘起することなどを示した。また、ドリフト流により、マッシュルームが初期勾配の向きに対して斜めに成長するなど、ドリフト流形成による場の構造の変化と不安定化の低減を示した。

上記二つの平衡に対するシミュレーション結果において、Hall項とジャイロ粘性項の両者が加わった場合に(i)強い安定化効果と(ii)場の乱れの低減が共通して現れることを強調した上で、本研究と核融合プラズマを対象とした実験およびシミュレーションとの関連性について議論を行った。本論文の結果は、核融合プラズマにおいて観測される不安定性の成長および飽和の物理機構を正しく理解する上で、安定化に寄与する非理想的効果を考慮した非線形シミュレーションの重要性を示している。

本論文では、RT不安定性の安定化においてHall項とジャイロ粘性項の組み合わせが重要であること、また、RT不安定性の非線形発展とその際に生じる二次不安定性を研究成果

(別紙様式 3)

(Separate Form 3)

として報告している。これらは新規性を有する結果であり、学術的にも評価できることから、学位論文としての価値があると判断した。