

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：63902

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24740375

研究課題名(和文) 低衝突拡張磁気流体モデルを用いた巨視的プラズマ不安定性に対する微視的効果の解明

研究課題名(英文) Study of small scale effects on macroscopic plasma instability based on extended MHD models for low collisionality plasmas

研究代表者

伊藤 淳 (Ito, Atsushi)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号：70413987

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円

研究成果の概要(和文)：拡張磁気流体モデルを用いて、巨視的なプラズマのダイナミクスに対する微視的な効果に関する理論解析を行った。有限のベータ値をもつプラズマにおけるRayleigh-Taylor不安定性とKelvin-Helmholtz不安定性に対する二流体および有限イオン温度効果の線形解析を行い、高波数領域の完全安定化が消失する新たなベータ値の条件を示した。また、テアリング不安定性に対して、低衝突プラズマでは無視できない有限イオン温度効果であるジャイロ粘性項に対する熱流束の効果を解析するための新たな線形固有モード方程式を導出した。そして、流れをもつトロイダル平衡に対する安定性解析を行うための磁気座標系を構築した。

研究成果の概要(英文)：Theoretical studies of small scale effects on macroscopic dynamics of plasmas are carried out based on extended magnetohydrodynamic models. Two-fluid and finite ion temperature effects on the Rayleigh-Taylor and Kelvin-Helmholtz instabilities in finite beta plasmas are examined and new conditions for the absence of complete stabilization of high-wavenumber modes are found. Linear eigenmode equations for tearing mode instability to analyse effects of heat flux in gyroviscosity that is a finite ion temperature effect are derived. These effects are not negligible for low collisionality plasmas. Coordinate systems to study stability of toroidal equilibrium with flow are also constructed.

研究分野：プラズマ物理

キーワード：電磁流体力学 拡張MHD プラズマ不安定性 二流体MHD 有限ラーマー半径効果

1. 研究開始当初の背景

核融合及び宇宙プラズマにおいて、ミクロからマクロまで広範囲にわたる時間・空間スケールを直接的に計算することは未だ現実的ではなく、巨視的な現象に対し微視的な効果を導入する拡張電磁流体力学 (magnetohydrodynamics, MHD) モデルの重要性は広く認識されている。近年、拡張 MHD モデルを実装した大規模なシミュレーション研究が組織的に進められているが、これらの研究では、主に速度分布が Maxwell 分布に近い、衝突頻度の高いプラズマに対する Braginskii 型のモデルが用いられている。研究代表者は、これまでの研究において、無衝突磁化プラズマに対する拡張磁気流体モデルを用いて、流れをもつプラズマのトラス平衡に対して、ホール電流などの二流体効果、圧力の非等方性、ジャイロ粘性などの有限イオン温度効果といった複数の微視的な効果を導入して解析を行った。トカマクプラズマに対する近似を用いることで簡約化された平衡方程式を導出し、有限要素法を用いた数値解析コードを開発してホール電流などの二流体効果と有限イオン温度効果を含む数値解を得た。一流体平衡では、流れによって圧力の等値面が磁気面からずれるが、二流体平衡では更にイオンの磁力線への凍りつきが破れることによってイオンの流れが磁気面を横切るといった微視的な効果の影響が見られた。この研究において、衝突頻度の高いプラズマに対する拡張磁気流体モデルにはない熱流束の効果によって流れをもつプラズマの平衡状態が大きく変化することが明らかになった。この経験から、核融合及び宇宙プラズマに共通する課題である巨視的な不安定性に対する微視的な効果の解析を、新たな拡張磁気流体モデルを用いて行うことで、新たな知見が得られるという着想に至った。

2. 研究の目的

核融合及び宇宙・天体プラズマにおける巨視的なプラズマの構造とダイナミクスを記述するために MHD モデルが広く用いられているが、どちらの分野においても MHD を拡張して微視的な効果を導入する必要性が高まっている。トカマクなどの磁場閉じ込め核融合プラズマでは、強い流れのシアによって不安定性や乱流輸送が抑制されることで閉じ込めが改善し、高温・高圧の状態が達成されている領域の境界で微視的な空間スケールが無視できない急峻な構造が現れる。短波長の不安定性が系の到達できるベータ値の限界を決定することがあり、微視的な効果を考慮に入れることで短波長のモードの安定性が大きく変化し、MHD 理論に基づいたベータ限界に従わない実験結果を説明できる可能性がある。また、テアリングなどの不安定モードが、MHD にはない反磁性ドリフトによって回転することが実験において示唆

されている。一方、宇宙空間における太陽風地球磁気圏境界領域のプラズマでは、強い流れをもつ太陽風と磁気圏内部のプラズマとの間で強い速度シアがあり、それによって起こる流体不安定性である Kelvin-Helmholtz (KH) 不安定性がミクロな粒子混合を促進し、太陽風のプラズマが磁気圏内部に運ばれる。この粒子混合には二次的な不安定性としておこる Rayleigh-Taylor (RT) 不安定性の短波長モードが重要な役割を果たすため、微視的な効果の影響が大きいと考えられる。

上に挙げた2つのプラズマは、どちらも無衝突に近く、強い背景磁場が存在するという共通した特徴があり、類似した拡張 MHD モデルで記述することが可能である。従来の Braginskii 型のモデルとは異なる、任意の磁場配位における低衝突磁化プラズマに対する拡張磁気流体方程式が近年導出され、それを用いた安定性解析を行うことで、核融合および宇宙プラズマに共通する課題である、巨視的なプラズマのダイナミクスに対する微視的な効果を解明することが本研究の目的である。

3. 研究の方法

(1) Rayleigh-Taylor/Kelvin-Helmholtz 不安定性

RT 不安定性の研究では、RT 不安定性の短波長モードの線形成長率がホール電流などの二流体効果、ジャイロ粘性などの有限イオン温度効果によって減少し、安定化することが知られている。これらの微視的な効果による安定化効果は、圧力のモデルに依存し、断熱モデルの場合には完全には安定化しないという結果が報告されている [P. Zhu et al., Phys. Rev. Lett. 101, 085005 (2008)]. しかしながら、ベータ値の上昇で完全安定化が消失する現象は、有限イオン温度効果のみを入れた場合で磁場が一定の平衡に対して局所解析によって議論されており、より一般的な条件のもとで、局所解析・固有モード解析・共同研究者による非線形シミュレーションの結果を相互に比較しながら解析を行う。また、シア一流によって起こる KH 不安定性は、長波長のグローバルなモードであり、短波長の RT 不安定性の解析では局所近似を用いることで代数的な分散関係式が得られたのに対し、分散関係式は固有モードに対する常微分方程式の解によって与えられる。これらの解析には、RT 及び KH 不安定性に対する固有モード方程式を導出し、それを数値的に解く計算コードを開発した。

(2) テアリング不安定性

低衝突の磁化プラズマに対する拡張磁気流体方程式を用いて、テアリング不安定性に対する線形安定性解析を行う。テアリング不安定性は、非一様な磁場において抵抗によって起こる不安定性で、磁気再結合 (リコネク

ション)を引き起こす、核融合及び宇宙プラズマに共通して重要な巨視的不安定性である。高ベータプラズマでは、ドリフトテアリングモードと呼ばれる反磁性ドリフトを伴う不安定性となる。このドリフトテアリングモードに対する解析は、これまで反磁性ドリフトの効果を比較的簡単に導入することができる高衝突のプラズマに対するBraginskiiの拡張磁気流体モデルが用いられてきたが、これに熱流束の効果が加わることで線形安定性がどのように変化するかを線形固有モード解析によって明らかにする。(3)安定性解析のための流れをもつトロイダル平衡の磁気座標

拡張磁気流体モデルを用いた安定性解析をトロイダル系に対して行うためには磁気座標の構築が必要であり、そのための基礎としてまずは強いポロイダル流をもつ有限ベータトロイダルMHD平衡の磁気座標系を構築した。流れをもつ軸対称平衡を表す一般化されたGrad-Shafranov方程式をトラスの逆アスペクト比で展開することで、ポロイダル音速程度の流れをもつ高ベータトカマク平衡に対する方程式系が得られ、円形断面の固定境界と線形の磁気面量を仮定することで磁束関数の解析解が得られる。1次の磁束関数の解は流れのない場合と等しく、2次の解に流れの効果が含まれる。この解析解から磁気座標を求めた。

4. 研究成果

(1)Rayleigh-Taylor/Kelvin-Helmholtz不安定性

拡張磁気流体モデルを用いてRT及びKH不安定性に対する二流体および有限イオン温度効果の線形解析を行った。反磁性ドリフトの効果が顕著な強い圧力勾配をもつ平衡を考え、モードの成長率と実周波数の双方への影響を解析した。

短波長のRT不安定性は固有関数が局在化する性質をもつことから、まず短波長モードに対する線形局所解析によって、RT不安定性のベータ値、圧力勾配、密度勾配などに対する依存性を調べた。図1は4つのベータ値におけるRT不安定性の成長率の波数依存性を表しており上部はMHDに二流体効果のみを入れた場合で、下部は二流体効果と有限イオン温度効果を同時に入れた場合の結果である。二流体効果のみを入れた場合、二流体効果と有限イオン温度効果を同時に入れた場合も有限イオン温度効果のみを入れた場合と同様にベータを上昇させると高波数領域での完全安定化が消失するが、その臨界ベータ値はそれぞれ異なっていることが明らかになった。二流体効果のみを入れた場合には、ベータを上昇させるとMHDよりも成長率が大きくなることが明らかになった。また、有限イオン温度効果のみを入れた場合のベータ値依存性を詳しく解析した結果、磁場が一定でない場合にはベータ値を逆に下降させるこ

とで完全安定化が消失する可能性があることを示した。次に、図2はMHD、有限イオン温度効果のみを入れた場合(FLR)、二流体効果のみを入れた場合(TF)、二流体効果と有限イオン温度効果を同時に入れた場合(TF+FLR)の4通りの場合に対する実周波数(上部)と成長率(下部)の波数依存性を示したものである。実周波数は、二流体効果によって電子の反磁性ドリフトの影響を受け、有限イオン温度効果によってイオンの反磁性ドリフトの影響を受ける。それらの効果はパラメータに対して複雑な依存性を示す。成長率の波数依存性についてもパラメータに対して複雑な依存性が見られ、4つの場合の大小関係は一意には定まらないことが明らかになった。RT不安定性の非線形シミュレーションとの比較には、長波長領域は局所解析では表せないため、固有モード方程式を解くための行列計算コードを開発して数値解析を行った。長波長領域での4つの場合の振る舞いと、有限イオン温度効果のみを入れた場合には短波長でもモードが局在化しないために局所解析とは大きくずれることが、固有モード解析とシミュレーションで一致した。

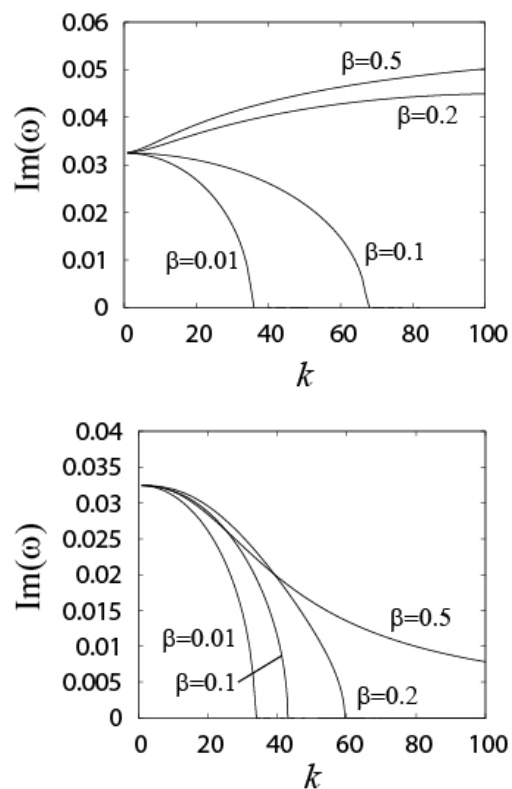


図1 Rayleigh-Taylor不安定性の波数依存性

Kelvin-Helmholtz不安定性に関しては、線形固有モード解析により固有値と固有関数を数値解析によって求め、反磁性ドリフトの効果があがる場合には、ベータ値依存性の圧力勾配と速度シアの符号の関係に対する非対称性が見られた。KH不安定性の場合にも、有限のベータ値において二流体効果が不安

定化に働くことが明らかになった。また、RT不安定性の非線シミュレーションにおいて現れる二次的 KH 不安定性に、同様の反磁性ドリフトの効果が見られた。

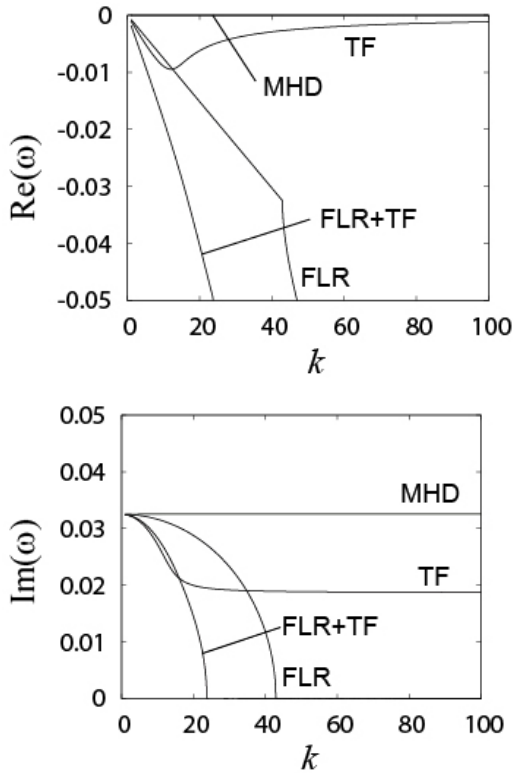


図2 Rayleigh-Taylor 不安定性の実周波数と成長率の波数依存性

(2) テアリング不安定性

ドリフトテアリング不安定性は電子とイオンの反磁性ドリフトの効果を導入することで現れ、その解析には主に二流体 MHD 方程式にイオンの有限イオン温度効果であるイオンジャイロ粘性項を加えた方程式系が用いられる。従来用いられる二流体方程式系は衝突頻度の高いプラズマに対するものであり、速度分布が Maxwell 分布で近似できることにより、高次の流体モーメントを無視することで閉じた方程式系が得られている。より低衝突の有限ベータプラズマに対する流体モーメント方程式では、非等方な圧力方程式とジャイロ粘性項に現れる磁力線に平行な方向の熱流束を無視することができない。熱流束は Maxwell 分布からのずれからくる 3 次の流体モーメントである。非一様な磁場において有限温度をもつ磁化プラズマに対して 3 次の流体モーメント方程式まで求めた高精度な方程式系を用いてドリフトテアリング不安定性に対する磁力線に平行な方向の熱流束の効果を解明するための線形固有モード方程式を導出した。このような複雑な流体モーメント方程式から比較的簡潔な線形固有モード方程式を導出するため、プラズマの流速を熱速度程度として、反磁性ドリフトをそれに対する 1 次のオーダーとする MHD オーダリングを採用し、この条件での流体方程式

系から 1 次の反磁性効果のみを残し、圧力非等方性、磁力線に平行な方向の熱流束を平衡状態では無視して摂動だけに導入し、また電子の温度は一定とした。これにより、スラブ平衡における線形摂動に対しては 5 つの要素からなるジャイロ粘性力の中の 2 つのみを残すことができ、平行な方向の熱流束を比較的簡単に導入することができた。得られた固有モード方程式系は、非等方な圧力と熱流束の摂動に対する方程式を含み、ドリフトテアリング不安定性の解析に必要な有利面近傍の領域を扱うことのできる、低衝突プラズマにおけるより高精度な方程式系となっている。

(3) 安定性解析のための流れをもつトロイダル平衡の磁気座標

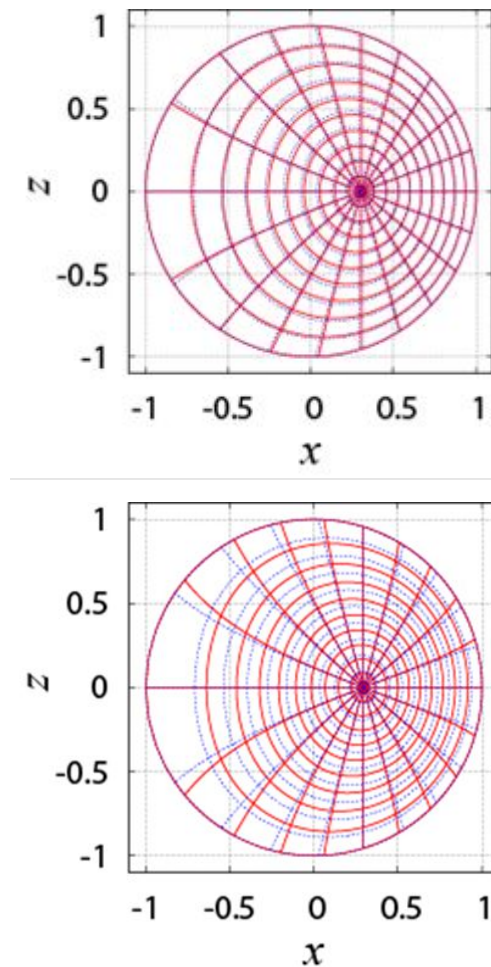


図3 流れをもつ平衡の磁気座標系。亜音速の場合(上)と超音速の場合(下)

拡張磁気流体モデルを用いた安定性解析をトロイダル系に対して行うために必要な磁気座標の構築のための基礎として、まずは強いポロイダル流をもつ有限ベータトロイダル MHD 平衡の磁気座標系を構築した。軸対称平衡に対しては、ポロイダル断面を磁気面量と任意のポロイダル角で 2 次元平面を構成する。1 次の磁束関数に対する解析解は、圧力勾配が急峻となるトーラス外側で座標が

密になるため、圧力駆動型不安定性の解析に適している。流れがある場合の2次の磁束関数を含む場合の解を数値的に求め、流れによる磁場構造の変形に対応した磁気座標が得られた(図3)。図4は各磁気面における圧力のポロイダル分布を示したもので、亜音速流の場合には(左図)トーラス外側で圧力が高くなり、超音速流の場合(右図)にはトーラス内側で圧力が高くなる。この座標系を用いることで、次の圧力の磁気面平均が数値的に求まる。この量の径方向分布のポロイダルマッハ数に対する依存性を調べた結果、亜音速領域では超音速領域に比べ、より中心にピークした分布になることが明らかとなった。また、式を逆アスペクト比で展開することで解析解が得られ、ポロイダル流速が小さい場合に数値解と良い一致を示した。

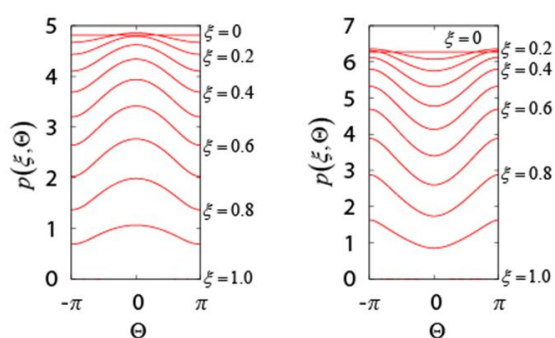


図4 各磁気面での圧力のポロイダル分布

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2件)

R. Goto, H. Miura, A. Ito, M. Sato and T. Hatori, Formation of large-scale structures with sharp density gradient through Rayleigh-Taylor growth in a two-dimensional slab under the two-fluid and finite Larmor radius effects, Phys. Plasmas **22**, 032115, 2015, 査読有, DOI: 10.1063/1.4916061.

R. Goto, H. Miura, A. Ito, M. Sato and T. Hatori, Hall and Gyro-Viscosity Effects on the Rayleigh-Taylor Instability in a 2D Rectangular Slab, Plasma and Fusion Res. **9**, 1403076, 2014, 査読有, DOI: 10.1585/pfr.9.1403076.

[学会発表](計 9件)

A. Ito, Parameter dependence of two-fluid and finite Larmor radius effects on Rayleigh-Taylor and Kelvin-Helmholtz instabilities in finite beta plasmas, 2015 International Sherwood Fusion Theory

Conference, March 16-18, 2015, ニューヨーク(米国).

伊藤淳, 拡張MHDモデルにおけるテアリング不安定性に対するジャイロ粘性テンソル中の磁力線方向の熱流束の効果, Plasma Conference 2014, 朱鷺メッセ(新潟県新潟市), 2014年11月18-21日

A. Ito, Effect of parallel heat flux in the gyroviscous tensor on tearing mode instability in two-fluid magnetohydrodynamic model, 56th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, October 27-31, 2014, ニューオリンズ(米国).

A. Ito, Magnetic flux coordinates for high-beta tokamak equilibria with flow, 56th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, October 27-31, 2014, ニューオリンズ(米国).

伊藤淳, 高ベータ簡約化MHDモデルにおけるポロイダル音速程度の流れをもつ平衡とその安定性, 日本物理学会2013年秋季大会, 徳島大学(徳島県徳島市), 2013年9月25-28日

A. Ito, Toroidal Equilibria with Flow in High-Beta Reduced Magnetohydrodynamic Models, 12th Asia Pacific Physics Conference of AAPPs, July 14-19, 2013, 幕張メッセ(千葉県千葉市)

A. Ito, Eigenmode analysis of Rayleigh-Taylor and Kelvin-Helmholtz instabilities in the extended MHD model, 2013 International Sherwood Fusion Theory Conference, April 15-17, 2013, サンタフェ(米国).

伊藤淳, 拡張磁気流体モデルにおけるRayleigh-Taylor/Kelvin-Helmholtz不安定性の線形解析, 日本物理学会第68回年次大会, 広島大学(広島県東広島市), 2013年3月26-29日

伊藤淳, 磁化プラズマにおけるRayleigh-Taylor/Kelvin-Helmholtz不安定性に対する微視的效果の線形固有モード解析, 第29回プラズマ・核融合学会年会, クローバープラザ(福岡県春日市), 2012年11月27-30日

[その他]

ホームページ等

<http://www-fps.nifs.ac.jp/atsushi/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊藤淳 (Ito, Atsushi)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教
研究者番号: 70413987