東京大学 大学院新領域創成科学研究科
基盤科学研究系 先端エネルギー工学専攻
2010 年 3 月修了　修士論文要旨

非一様磁場と密度勾配における抵抗性ドリフト波の線形安定性解析

学生証番号　086069　氏名　忠地　慧
（指導教員　古川　勝　准教授）

Key word：resistive drift wave，plasma nonuniformity，compressibility，stability analysis

磁場閉じ込め核融合プラズマ研究における最も重要な問題の一つにプラズマ粒子やエネルギーの「異常輸送」の機構解明がある．そして，ドリフト波は異常輸送を引き起こす主な原因と考えられている. 抵抗性ドリフト波乱流を記述するためのモデルとしては，Hasegawa-Wakatani 方程式 [1] が広く用いられてきた．また，洲鎌らは，曲率とシアーを持つ磁場及び密度勾配が存在する場合のモデル方程式を用いてドリフト波乱流を研究している [2]．以上はトカマクやステラレーターを念頭に置き，強い磁場の存在を仮定しており，$\mathbf{E}\times\mathbf{B}$ ドリフトの圧縮は小さいと考えられている．一方で，先進核融合を目指した磁気圏型プラズマ閉じ込め装置では，トカマクやステラレーターに比べて磁場の非一様性が顕著に大きい．したがって，そのような磁場配位における抵抗性ドリフト波に対しては，$\mathbf{E}\times\mathbf{B}$ ドリフトの圧縮性が強く効くと考えられる. その基礎研究として本研究では，１次元スラブプラズマを考え，磁場が一方向にあり，それを横切る方向に磁場強度及び密度の変化がある平衡における抵抗性ドリフト波安定性を扱う．

また，プラズマの線形安定性解析でよく用いられる手法の一つにモード解析（分散関係）がある．モード解析では，平衡のまわりで線形化した方程式の固有値問題を解き，モードの周波数に相当する固有値 ω が虚部を持つかどうかを調べる．線形化方程式の生成作用素がエルミート作用素である場合，一般的に点スペクトルと連続スペクトルで分解可能であり，また，固有関数は直交する．連続スペクトルを持つ場合は，それに属する固有関数は二乗可積分ではなくなる．一方で，非エルミート作用素である場合，このスペクトル分解可能性や固有関数の直交性が保証されない. したがって，スペクトル（固有値）がどのような構造を持つのか調べることが重要な意義を持つが, ドリフト波についてはよく調べられていない.

以上のような背景を踏まえ，本研究では磁場の空間変化に対する線形ドリフト波の安定性解析を行い, １. 静電的ドリフト波のスペクトル構造と，それに対する非一様密度勾配の効果, ２. 静電的及び電磁的ドリフト波安定性に対する非一様磁場による $\mathbf{E}\times\mathbf{B}$ ドリフト圧縮性の効果を調べることを目的とした.

１. の場合は Hasegawa-Wakatani 方程式を基に数値計算と解析的手法を用いて, 固有値の並びや固有関数の直交性を調べた．Hasegawa-Wakatani 方程式を x 方向に関する微分方程式として解いた場合，点スペクトルのみであること，固有値の集積点が $\omega = 0$ であることが分かった．また，密度勾配が x 方向にゆっくり変化する場合に，摂動論を用いて微分方程式を解き，点スペクトルのみであること，固有値の集積点が $\omega = 0$ であること，$\mathrm{O}(\varepsilon)$ で直交性が破れることが分かった．x 方向の固有値問題として数値計算をし，得られた解と解析解を比較した結果，固有値 ω は０付近で密になっており，視覚的にも固有値の集積点が $\omega = 0$ であることが確かめられた.

２. の場合は１次元スラブプラズマで,z 方向に磁場 $\mathbf{B}_0 = B_0\hat{z}$ があり，x 方向に密度と磁場強度の勾配があるときのモデル方程式を導き, 磁場勾配に対する線形ドリフト波の安定性を分散関係式と数値解析から議論した．その際, 周波数のオーダリングによって３タイプのモデルによる検討を行った.

$k_z C_s \ll k_y v_{de} \ll k_z v_A$ の場合は，不安定成長すると考えられる．分散関係の近似式から安定条件が得られたが, それを満たすようなパラメータ値では，分散関係の妥当性が失われてしまうためである．また, 数値計算から得られた磁場勾配に対する ω_i のグラフからも不安定成長する様子が観察できた．$k_z C_s \sim k_y v_{de} \ll k_z v_A$ の場合は，不安定成長すると考えられる．分散関係の近似式から得られた B_0' に対する成長率のダイヤグラムは減衰を示したが, 分散関係の数値計算から得られた磁場勾配に対する ω_i のグラフでは不安定成長する解が観察できた．したがって全体としては不安定成長する．$k_z C_s \sim k_y v_{de} \ll k_z v_A$ の場合は，ω の４次方程式であり，４つ得られた解のうち，２つが大きなオーダで不安定成長と減衰を示す．したがって全体としては不安定成長する.

[1]A. Hasegawa and M. Wakatani, Phys. Rev. Letters 50 (1983) 682.
[2]H. Sugama, M. Wakatani and A. Hasegawa, Phys. Fluids 31 (1988) 1601.