

イオン混合モードの再考察 Revisit of Ion Mixing Mode

矢木雅敏¹⁾、三木一弘¹⁾、宮戸直亮¹⁾、B. D. Scott²⁾
M. Yagi¹⁾, K. Miki¹⁾, N. Miyato¹⁾, B. D. Scott²⁾

¹⁾量研、²⁾マックスプランクプラズマ物理研究所
¹⁾QST, ²⁾IPP Garching

トカマクにおいては燃料供給をガスパフやペレット等を用いるため、粒子源はプラズマの周辺部に存在する。核燃焼プラズマでは中心ピークした分布が望ましく、そのような分布を作るには粒子ピンチ効果(内向きの粒子束)が必要とされる。粒子束は電子の非断熱応答により生じ、例えば炉心プラズマでは、捕捉粒子に起因する非断熱応答が粒子ピンチを作り出すことが知られている。一方、プラズマ周辺では衝突効果が重要であり、通過粒子の非断熱応答が粒子ピンチを作り出す可能性が指摘されていた。Ion Mixing ModeはB. Coppiにより提案されたモデルであるが、スラブITG(Ion Temperature Gradient driven drift wave)が磁力線方向の熱拡散による電子の非断熱応答により粒子ピンチを生成するモデルであり、プラズマの立ち上げ期における密度分布形成を説明するために提案された[1]。

我々のグループでは δf ジャイロ運動論モデル[2]を用いてプラズマ周辺部における粒子輸送のシミュレーション研究を進めてきた[3]。密度勾配長が負の値を持つ場合の粒子フラックスを評価し、粒子ピンチが起こっていることを確認した。解析的な評価により、これが Ion Mixing Mode モデルと矛盾しないことがわかったが、このモデルが 1)トロイダル曲率(トロイダル ITG)を考慮していないこと、2)磁力線方向の波数を一定と仮定していること、3)密度勾配長が正の値を持つことを想定して導出されたモデルであること等、いくつかの問題点があった。今回、これらの効果を考慮し、解析的な分散式を導出した。

分散式は形式的に

$$C = n + \frac{1}{2} - \frac{2iD}{n + 1/2}$$

と書ける。ここで n は径量子数であり、係数 D は磁力線方向の熱拡散に起因する非断熱応答効果、係数 C は ITG モードを記述する。 $D = 0$ のリミットではトロイダル/スラブ ITG モードの分散式が得ら

れる。まず $D = 0$ リミットにおいて考察する。一般的にトロイダル ITG は $\eta_i > \eta_{ic} > 0$ の場合は不安定となるが、シミュレーションで用いたパラメータでは $\eta_i < 0$ であり、この場合モードが不安定化するかどうかはこれまで検討されていない。ここで $\eta_i \equiv L_n/L_T$ は密度勾配長とイオン温度勾配長の比を表す。分散式を数値計算で解いたところ、 $\eta_i < 0$ でも n の増加にともない成長率が増加するモードが存在することが確認できた。モードの周波数は小さいが n の増加に伴い、電子ドリフト波の方向からイオンドリフト波の方向へ遷移することが明らかになった。用いたパラメータではトロイダル ITG を駆動する項が卓越することから、これはトロイダル ITG の一種であると考えられる。 $D \neq 0$ では、トロイダル ITG とは別のモードが存在することが明らかとなった。成長率は n が増加するにつれて減少するので、非断熱応答が直接駆動する不安定性であり、周波数は電子のドリフト周波数に一致する。従って電子ドリフト波の一種であると結論される。ジャイロ運動論シミュレーションで観測されている長波長モードは電子のドリフト周波数の近傍で観測されているので、このモードが粒子ピンチを担っている可能性がある。一方トロイダル ITG の成長率に対する衝突の効果は弱い。 $n \geq 2$ ではトロイダル ITG が支配的となるが、現行のモデルではイオンの衝突減衰やランダウ減衰を考慮しておらず、トロイダル ITG の成長率を過大評価している可能性がある。引き続きモデルの高度化を進め、シミュレーション結果の定量的理解を進める。

[1] B. Coppi and C. Spight, Phys. Rev. Lett. 41 (1978) 551.

[2] B. Scott, Phys. Plasma A17(2010) 102306.

[3] K. Miki, et al., MC2017 (2017)

https://www.kns.org/intpaper/lists/sc_subject_area/1:11:MC2017