

低密度プラズマにおけるフルート不安定性の粒子シミュレーション

Particle simulation of the flute instability in the low density plasma

窪田遼人, 片沼伊佐夫, 佐藤周平, 奥山陽平, 加藤俊介, 小田弦之介, 角田昌輝

R.Kubota, I.Katanuma, S.Sato, Y.Okuyama, S.Kato, G.Oda, M.Tsunoda

筑波大学 プラズマ研究センター

Plasma Research Center, University of Tsukuba

GAMMA10 ではフルート不安定性の発生を抑制するために、アンカー部に ICRF で高温イオンを形成している。また、高温イオンの量が少なくなると、確かにフルート不安定性が発生してプラズマが維持できなくなることも実験的に明らかになっている。ところで、GAMMA10 では本実験を行う前に壁のクリーニングを目的として ECR-DC を行っており、そこでは低密度プラズマを生成している。このプラズマは、アンカー部に高温イオンが存在しないにもかかわらず安定である。本研究は、低密度領域での安定性に関して粒子シミュレーションによって明らかにすることが目的である。

まず数値解析でこれを示し、次にシミュレーションでさらに詳しく調べる。シミュレーションでは低密度プラズマにおけるフルート不安定性の研究を行うために、二次元の静電粒子コードを用いる。このコードは、運動方程式とポアソン方程式を連立させ、粒子位置の時間発展を追跡している。

シミュレーションを実行する前に、フルート不安定性の成長率を分散式を解くことで求めた。この分散式は次の微分方程式で与えられ、周波数 ω の固有値問題として shooting 法によって数値的に解いた。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_{\perp} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) - k_y^2 \epsilon_{\perp} \phi + \frac{k_y}{\omega_{ci}} \frac{k_y g / \omega_{ci}}{\omega(\omega + k_y g / \omega_{ci})} \frac{d\omega_{pi}^2}{dx} \phi = 0 \quad (1)$$

ここで、 ϕ は電位、 k_y は波数、 g は遠心力加速度、 ϵ_{\perp} はプラズマの誘電応答関数で、 $\epsilon_{\perp} = 1 + (\omega_{pi}/\omega_{ci})^2$ である。 ω_{ci} はイオンサイクロトロン周波数、 ω_{pi} はイオンプラズマ振動数である。図 1,2 では ω_{ci}/ω_{pi} を横軸に取り、縦軸に成長率 $\gamma = \text{Im}(\omega)$ をプロットした。特に、密度分布が系の x 方向の長さを L_x として step 関数 $n(x) = n_0 \theta(L_x/2 - x)$ で与えられるとき、分散式は

$$\omega^2 = \frac{-|k_y|g}{(2\omega_{ci}^2/\omega_{pi}^2 + 1)} \quad (2)$$

となる。この場合、式 (1) を $x = 0, L_x$ において $\phi = 0$ の境界条件で解くと、図 1 のようになり、式 (1) は式 (2) を含んでいることが分かる。図 2 は滑らかな密度分布 $n(x) = n_0(a \tanh(L_x/2 - x) - a \tanh(L_x/2) + b)/(a \tanh(-L_x/2) - a \tanh(L_x/2) + b)$ (ここで、 $a = -0.5, b = 0.5$) の場合に同様のプロットを実行し、低密度領域を拡大した図である。式 (1) を数値的に解くことによって、低密度領域でフルート不安定性の成長率が有限の値で 0 になる様子を示している。

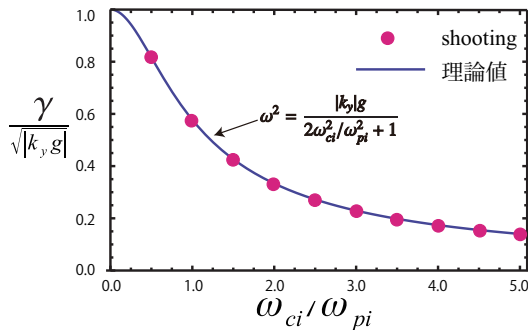


図 1: 密度分布が step 関数の場合の成長率

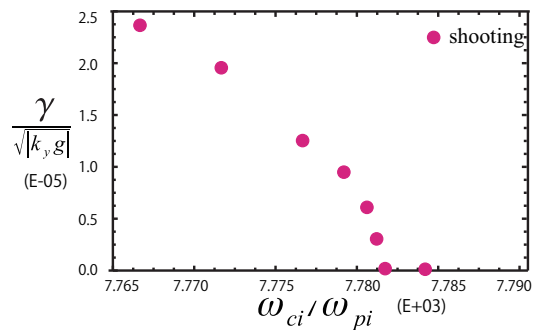


図 2: 滑らかな密度分布の場合の成長率

本講演では、粒子シミュレーションの結果から、この安定領域近傍でのフルート不安定性の振る舞いの詳細について述べる。