

インターチェンジモードに対する捕捉高エネルギーイオンの効果 Effects of Trapped Energetic Ions on the Interchange Mode

西村 征也

Seiya NISHIMURA

神戸市立工業高等専門学校

Kobe City College of Technology

トカマクやヘリカル系の磁場閉じ込め装置においては、外部からの加熱や熱核融合反応によって高エネルギーイオンが発生する。高温プラズマを維持するためには、高エネルギーイオンによって効率よく背景プラズマを加熱する必要がある。しかし、高エネルギーイオン駆動型の電磁流体力学的 (MHD) 不安定性が発生すると、高エネルギーイオンの損失が増大し、加熱効率が低下する。高エネルギーイオンに関しては、高エネルギーイオン駆動型のアルフベン固有モードがよく知られている。トカマクにおける魚骨型振動は捕捉高エネルギーイオンによって駆動されることが知られている [1]。ヘリカル系においても魚骨型振動に似たモードが観測されており、インターチェンジモードとの関係が議論されているが、詳細な物理機構は明らかになっていない [2]。

本研究においては、トロイダルプラズマにおける理想 MHD 波動と捕捉高速イオンに対するエネルギー原理を再訪問する。プラズマ流体の変位 (プラズマ流体速度の時間積分) が存在すると仮定したとき、理想 MHD 波動と捕捉高エネルギーイオンから成る系に対するエネルギー原理は以下で近似される。

$$\delta I + \delta W_{\text{MHD}} + \delta W_{\text{K}} = 0 \quad (1)$$

ここで、 δI は理想 MHD 波動の運動エネルギー変分、 δW_{MHD} は理想 MHD 波動のポテンシャルエネルギー変分、 δW_{K} は捕捉高エネルギーイオンのポテンシャルエネルギー変分である。ただし、上式において高エネルギーイオンの密度および圧力は、背景プラズマのそれよりも十分に小さいと仮定した。 δI と δW_{MHD} は理想 MHD モデルによって与えられる。本研究では、捕捉高エネルギーイオンに対するドリフト運動論的方程式に基づき、 δW_{K} の定式化を行った。

このモデルをヘリカル系の理想インターチェンジモードと捕捉高エネルギーイオンに対して適用した。プラズマの径方向の変位のみを考え、有利面近傍に局在したモード分布を仮定することにより、拡張された理想インターチェンジモードの分散関係を得た [3]。分散関係は積分方程式であるが、モードの分布に対する試行関数近似を用いることにより、安定性を議論することができる。捕捉高エネルギーイオンが存在しない場合は理想インターチェンジモードに対応し、安定性は Suydam 条件によって与えられる。一方、捕捉高エネルギーイオンが存在する場合、Suydam 条件が満たされていても不安定なモードが発生しうる。解析の結果、捕捉高エネルギーイオンの歳差ドリフトに近い回転周波数を持つモードが励起されることが分かった。また、不安定な理想インターチェンジモードが存在する場合、捕捉高エネルギーイオンによってモードの成長率が促進されるとともに、モードに有限の回転周波数が与えられることが分かった。さらに、分散関係における被積分関数の極小条件から、拡張された理想インターチェンジモードの固有値方程式を得ることができる。この固有値方程式を数値的に解いた結果、モードの分布が捕捉高エネルギーイオンの効果によって径方向に広がるという結果が得られた。

[1] L. Chen, R. B. White, and M. N. Rosenbluth, Phys. Rev. Lett. **52**, 1122 (1984).

[2] K. Toi *et al.*, Nucl. Fusion **40**, 1349 (2000); X. D. Du *et al.*, Phys. Rev. Lett. **114**, 155003 (2015).

[3] S. Nishimura, Phys. Plasmas **22**, 072505 (2015).