

トカマクプラズマにおけるイオンサイクロトロン波加熱の
積分形誘電率を用いた運動論的波動伝播解析

**Kinetic full wave analysis of ion cyclotron heating in tokamak
plasmas using integral form of dielectric tensor**

福山淳

FUKUYAMA Atsushi

京都大学

Kyoto University

不均一磁化プラズマ中の波動伝播と吸収の解析において、マクスウェル方程式の境界値問題を解く波動光学的手法は、アンテナ構造や容器壁形状を容易に取り入れることができ、遮断領域を含めた伝播解析が可能である。そのため、大きな計算資源を必要とするが、汎用性が高く、広い分野で利用されるようになってきている。しかしながら、冷たいプラズマでは誘電率テンソルが波数を含まないため容易に解析が可能であるが、有限温度プラズマでは粒子運動に伴う空間依存性のために、誘電率テンソルが波数依存性をもつ。そのため、波数を冷たいプラズマ近似で評価する、波数が小さいとして展開し微分演算子で近似する手法等が用いられてきた。一方、フーリエ展開法では波数を定めて誘電率テンソルを計算することができるが、すべてのフーリエ成分が結合するため、非常に大きな計算資源を必要とする。そのため、誘電率テンソルの空間依存性を空間積分で表す手法を新たに開発した。この手法では、粒子の位置と速度の関係を用いて、誘導電流を計算する際に用いられる速度積分を粒子が電界を感じた位置に関する積分に置き換えることにより、積分形の誘電率テンソルを求め、相関範囲が限定されるため、計算資源を減少させることができる。

これまでに、不均一プラズマにおける有限温度分散とランダウ減衰、不均一磁化プラズマにおけるサイクロトロン減衰、有限ラーモア半径効果によるバーンシュタイン波へのモード変換等の一次元解析に適用し、その有効性を確かめてきた。今回は2次元波動伝播解析に積分形誘電率テンソルを適用するための定式化を示すとともに、有限要素法を用いてトカマク配位におけるイオンサイクロトロン波加熱の解析に適用し、従来のフーリエ展開を用いた解析との比較を行った。

誘電率テンソルの定式化にあたっては、磁力線に沿ったポロイダル方向にはランダウ共鳴とサイクロトロン

共鳴を記述する Plasma Resonance Kernel Function (PRKF)

$$R_n(\xi, \eta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\infty d\tau \tau^{n-1} \left[-\frac{1}{2} \frac{\xi^2}{\tau^2} - \frac{1}{2} \eta^2 \tau^2 + i\tau \right]$$

を適用し、径方向には有限ラーモア半径効果を記述する Plasma Gyro Kernel Function (PGKF)

$$G_n^{(i)}(X, Y) = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^\pi d\theta \times \exp \left[-\frac{X^2}{1 + \cos \theta} - \frac{Y^2}{1 - \cos \theta} \right] f_n^{(i)}(\theta)$$

($f_n^{(1)} = \cos n\theta / \sin \theta$, $f_n^{(2)} = \sin n\theta$, $f_n^{(3)} = \sin n\theta / \sin^2 \theta$, $f_n^{(4)} = \cos \theta \sin n\theta / \sin^2 \theta$) を適用する。ここで ξ は2点間の、 X, Y は2点と巡回中心との間の座標の差に比例する変数である。このような積分核変数を用いて、過去に粒子が感じた電界が、現在の粒子が運ぶ電流に与える影響を記述することができる。この手法では波数を用いることなく、波動の伝播を記述することができ、有限要素法を用いた波動伝播解析に有効である。

講演では、磁気面座標における定式化と円形断面トカマクにおける解析について、有限要素法による解析 (task/wm) と従来のフーリエ展開による解析 (task/wm) の結果を報告する。