

**FDTD 法による内部導体装置 Mini-RT プラズマ中の電磁場解析**  
**Electromagnetic Wave Propagation Analysis using Finite-Difference Time-Domain Method in Mini-RT Plasma**

東京大学大学院新領域創成科学研究科先端エネルギー工学専攻 河合 智賀

**1. はじめに**

本研究室では内部導体装置 Mini-RT において、電子バーンシュタイン波(EBW)を用いたプラズマの加熱実験が行われている。この実験の数値シミュレーションを実現するため、当装置内プラズマにおける電磁波の伝搬について FDTD 法(有限差分時間領域法)に基づくマルチスケール計算手法を開発して数値解析を行った

**2. FDTD 法**

**2.1 プラズマを媒質とする系**

線形媒質では Maxwell 方程式に現れる  $\mathbf{J}$  は  $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$  といった構成方程式を用いて  $\mathbf{E}$  で表すことができるが、プラズマでは一般に  $\sigma$  がテンソルとなるため、定式化が複雑となる。本研究では、Hojo らの手法を参考に、自由電流項  $\mathbf{J}$  も独立した方程式として FDTD 法に組み込む方法を採用した。[2]

**2.3 サブグリッド法**

EBW は電磁波モードと比較して短波長 ( $k_{\perp} \rho_s \approx 1, \rho_s$  はジャイロ半径) のモードなので、FDTD 法でモード変換を正しく追跡するためには EBW に合わせて計算格子を細かく取る必要があり、計算に使用するメモリや時間が必要以上に増大する。このような問題に対して、解析領域の限られた部分だけで時空間の格子を細かくするサブグリッド法が考案されている。[1] 今回はプラズマを媒質とする系での FDTD 法におけるサブグリッド法についても検証した。

**3. 結果**

**3.1.1 次元モデル**

外部磁場  $\mathbf{B} = B_0(x)\hat{z}$  のもと  $x=0$  で  $J_y$  に正弦波を

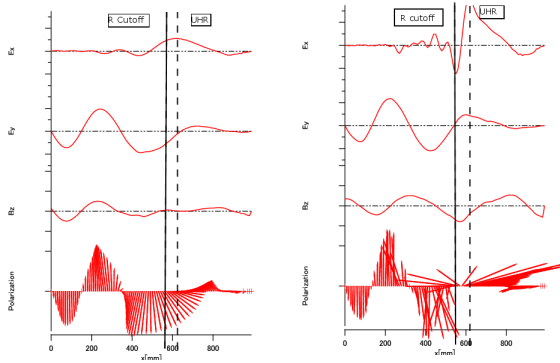


Fig.1 1次元系での X 波の伝搬

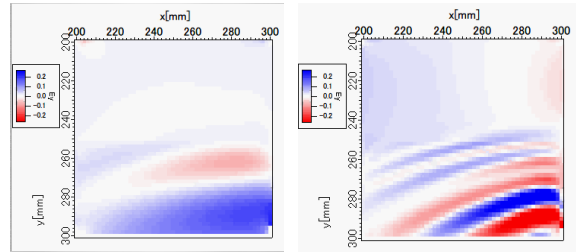


Fig.2 サブグリッド法による計算

励振した場合の X 波の x 方向への伝搬を図(1),(2)に示す。図は上から  $E_x, E_y, B_z$  電場の偏光を表す。実線は R カットオフを、点線は高域混成共鳴(UHR, Upper Hybrid Resonance)を示し、その間が遮断領域である。

波が強磁場・高密度側に伝播するにつれ、UHR 層付近から  $\mathbf{k} \parallel \mathbf{E}$  となる  $E_x$  が成長し、短波長で伝播している様子がわかる。このモードが、熱いプラズマモデルの分散関係における EBW の分枝と接続して電磁波から静電波へのモード変換がおきることが予想される。

**3.2 サブグリッド法**

Mini-RT プラズマの密度分布と磁場配位を模した 2 次元系において、UHR 近傍でサブグリッド法を実装した。磁場、密度勾配とほぼ垂直となる  $E_y$  についてプロットした計算結果を図 2 に示す。図中、中央より下半分がプラズマの存在する領域である。1 次元モデルにおける X-mode の伝播と同じく UHR 層に向かって、 $\mathbf{k} \parallel \mathbf{E}$  となる  $E_y$  が短波長となっている様子がわかる。このモードはサブグリッド法を用いない計算で見えなかった部分であり、このような系に関してサブグリッド法が適用可能であることが確認された。

**4. 結論**

本研究では、冷たいプラズマ近似の範疇での波動の伝播を主に扱った。この近似の枠内で、上述のような FDTD 法にプラズマを組み込む方法の妥当性が検証できた。今後の課題として、熱いプラズマモデルにもこの定式化が適用できるように修正を加えるという点が挙げられる。

**参考文献**

[1] 宇野享, FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析, コロナ社, 1998.  
 [2] A.Fukushi, H. Hojo, A.Itakura et al., J. Plasma Fusion Res. SERIES, 6, 745-747 (2004).