

弱相対論Vlasov-Maxwell方程式系に基づく 波動伝播・吸収モデリングと磁気圏型プラズマ装置への適用

学生証番号 47206079 氏名 中澤 拓也
(指導教員 西浦 正樹 准教授)

Key Words: plasma, hot plasma dispersion, electron cyclotron wave, full wave simulation

1. 研究背景

惑星の磁気圏では、プラズマが自発的に電子密度ピークを持った構造をとる自己組織化現象が観測されている。そこでは高い β =粒子圧力/磁場圧力が維持され、安定なプラズマ閉じ込めが実現されている[1]。そのような磁気圏に着想を得て磁気圏型プラズマ閉じ込め装置 RT-1は設計された。RT-1では磁気浮上した超伝導コイルによるダイポール磁場中にプラズマを閉じ込めており、惑星磁気圏と同様に高い β 値と安定なプラズマ閉じ込めが実現されている。RT-1中のプラズマ生成と加熱は2.45GHzの電子サイクロトロン波 (EC 波) が利用される。一般にプラズマ中の電磁波伝播は高密度領域で遮断層が存在する。しかし、遮断密度 n_{cutoff} を超えたプラズマ生成が観測されており、またその先には密度境界の存在が観測されている[2]。

2. 研究目的

遮断密度 n_{cutoff} を超えたプラズマ生成及び密度境界が存在するメカニズムは不明である。そこで、電子サイクロトロン波 (EC 波) の波動伝播や吸収効率の観点から現象にアプローチする。プラズマ中の波動伝播と吸収をfull waveシミュレーションにより模擬し、実験で観測された密度境界現象を説明することを目的とする。

3. 研究方法

電磁波の伝播にはFull Wave法を用いた。Full Wave法とは、Maxwell方程式から求めた波動方程式を解くことである。本研究では有限要素法をCOMSOL Multiphysics®を用いて解き、定常解を求めた。

(1) Coldプラズマ近似を用いたシミュレーション

プラズマ中の波動はColdプラズマ近似とし、さらに波の減衰を模擬するために衝突減衰項を導入した誘電率 $\vec{\epsilon}_{\text{Cold}}(\mathbf{B}, n_e)$ を用いた。ここで \mathbf{B} は磁場、 n_e は電子密度である。この誘電率によりFull Waveシミュレーションを行った。図1に磁場と密度分布パラメータを示す。

(2) 弱相対論的Hotプラズマ近似を用いたシミュレーション

実験から30keVオーダーの電子が観測されているため、弱相対論効果や電力吸収を評価できるHotプラズマ近似による誘電率 $\vec{\epsilon}_{\text{Hot}}(\mathbf{B}, n_e, \mathbf{k}, T)$ を実装し、full waveシミュレーションを行った。ここで \mathbf{k} は波数、 T は電子温度である。

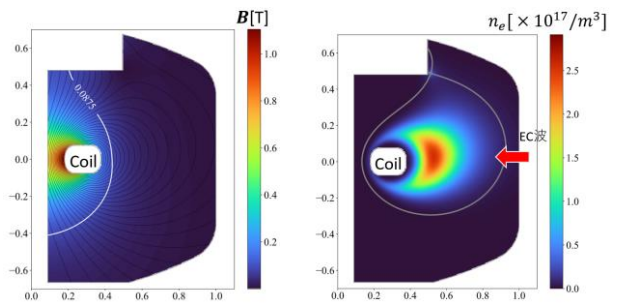


図1(a). 磁場強度分布 図1(b). 電子密度分布

4. 研究成果

(1) Coldプラズマ近似における3次元波動伝播

図2にColdプラズマ近似における3次元波動伝播を示す。図中白線はプラズマ閉じ込め領域 (Separatrix) を示し、ピンク線はO-mode遮断層を、赤線はX-mode遮断層を、黄線は共鳴層を示す。

図2(a)に真空容器壁面を吸収境界条件とした場合の、ピーク電子密度 $n_e > n_{\text{cutoff}}$ のRT-1内部の電場強度分布を示す。入射されたEC波は遮断層近傍で屈折されて直接ECR層に到達しないことがわかる。

図2(b)に真空容器壁面を完全導体境界条件とした場合の、 $n_e > n_{\text{cutoff}}$ での電場強度分布を示す。得られた電場強度分布から、真空容器壁面での多重反射によりECR層に到達した。また、EC波は180°反対側の領域の周辺部にも伝播した。さらに、浮上コイルの強磁場側からの伝播も存在した。すなわち、遮断層が存在しても、EC波による加熱の可能性が示された。

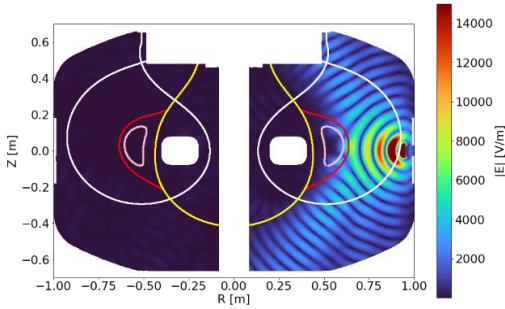


図2(a). 吸収境界条件の電場強度分布

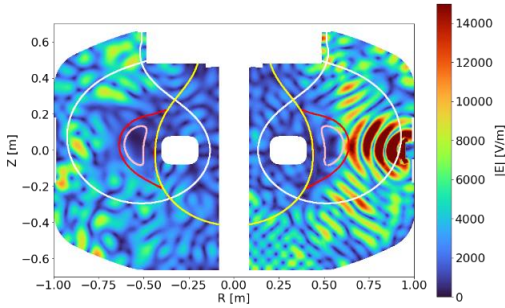


図2(b). 完全導体境界条件の電場強度分布

(2) Coldプラズマ近似における電力吸収量評価

先行研究で、EC波の入射電力を変調し、その時の蓄積エネルギーの変化率から、RT-1のEC波の吸収効率が実験的に求められている[2]。実験では、電子密度を高くすると、吸収効率は減少し、密度限界領域で吸収効率は0に漸近する。数値計算でこの現象が説明できるかを検証する。

図3に、数値計算と実験結果の吸収効率の比較を示す。遮断密度以上でも電力吸収量が存在し、また密度限界に近づくとも電力吸収量が低減する傾向は一致する結果を得た。しかし密度限界以上の領域では電力吸収量がいまだ存在している。この原因として電子温度の詳細な空間的变化を模擬できていないことが考えられる。

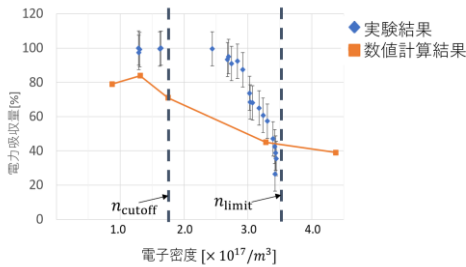


図3. EC波の吸収効率の密度依存性

(3) Hotプラズマ近似を用いた誘電率の導入

(2)で述べた問題点を解決するために、温度分布や変化を考慮できる弱相対論的Hotプラズマ近似の誘電率 $\vec{\epsilon}_{\text{Hot}}(\mathbf{B}, n_e, \mathbf{k}, T)$ [3]をプログラム上で実装した。図4(a)に誘電率の分散関係を示す。

$\vec{\epsilon}_{\text{Hot}}(\mathbf{B}, n_e, \mathbf{k}, T)$ を青線で、 $\vec{\epsilon}_{\text{Cold}}(\mathbf{B}, n_e)$ を緑線で示している。

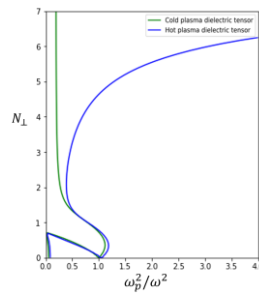


図4. $\vec{\epsilon}_{\text{Hot}}$ 分散関係

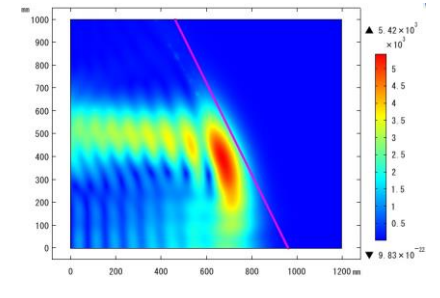


図5. EC波電場強度分布

(4) 弱相対論的Hot Plasma近似による波動伝播

弱相対論的Hot plasma近似の誘電率を用いてEC波の伝播を簡易モデルである矩形領域でシミュレーションした。図5にO-modeの波動伝播結果を示す。O-modeに対して遮断密度(図中ピンク線)での反射を確認した。X-modeに対してX-mode遮断層での反射を確認した。

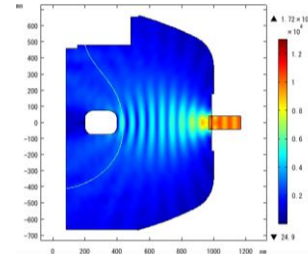


図6. 弱相対論的Hot Plasma近似のRT-1電場強度分布

(5) Hot Plasma近似によるRT-1中の波動伝播結果

最後にRT-1モデルによる2次元波動伝播を計算した。真空容器壁面は吸収境界条件とし、2.45GHzのEC波の伝播を計算した。図5に $n_e=1 \times 10^{15} [1/m^3]$ の時の計算結果を示す。入射されたEC波は非一様な磁化プラズマ中を伝播した。EC波の電力吸収に関してはプログラムの修正で改善できる見通しがあり、またO-mode入射に対して遮断密度での反射も確認した。

5. 結論

本研究では密度限界のメカニズムに着目し、EC波の伝播・吸収効率を評価した。

衝突減衰項を導入したColdプラズマ近似の計算結果から、(1)真空容器での多重反射を受け、遮断層が存在してもEC波がECR層に到達すること、(2)密度限界に近づくとも電力吸収量が低減する実験と同様の傾向を得た。

弱相対論的Hot Plasma近似を用いた計算手法を構築した。その結果、(3)矩形領域での波動伝播計算によりO-modeに対して遮断密度で、X-modeに対してX-mode遮断層でのEC波の反射を確認した。

(4) RT-1での2Dモデル波動伝播計算により、非一様な磁化プラズマ中のEC波の伝播・反射を確認した。

参考文献

- [1] S. M. Krimigis *et al.*, Science **206**, 977 (1979).
- [2] T. Mori, *et al.*, Plasma Fusion Res. **14** (2019)
- [3] F. Volpe, Phys. Plasmas **14** 122105(2007)