

準光学光線追跡コードPARADEの電子サイクロトロン放射計測への適用  
**Application of a quasioptical code PARADE for  
 electron cyclotron emission diagnostics**

柳原洸太<sup>1</sup>, 久保伸<sup>2</sup>  
 Kota YANAGIHARA<sup>1</sup>, Shin KUBO<sup>1</sup>

量研<sup>1</sup>, 中部大<sup>2</sup>  
 QST<sup>1</sup>, Chubu Univ.<sup>2</sup>

電子サイクロトロン放射(ECE)計測は、電子温度の空間分布を高時間分解能に計測可能であり、様々な核融合実験装置で広く用いられている計測手法である[1]。ECEは磁場の周りを巡回運動する電子のサイクロトロン周波数(=磁場強度に依存して決まる)の整数倍の周波数を持つ電磁波が放射される過程であり、計測アンテナで受信した放射波動場の周波数と強度から、計測視線において対応する磁場強度位置での放射温度を知ることができる。受信した各周波数の放射波動場それぞれに対応する計測視線の経路、及びその経路に沿った放射波動場の強度分布の評価には、これまで幾何光学的な光線追跡計算が利用されてきた。しかし実際のECE計測アンテナは一般に計測視線を横切る方向(視線断面方向)にも有限の感度分布を持つ。したがってより正確な放射強度の評価には、放射波動場の視線断面方向の分布まで考慮して計算する必要がある。そこで本研究では、実際のECE計測アンテナが有する3次元(視線+断面2方向)的な感度領域と、その領域内で放射される波動場の全てを考慮して受信放射強度を評価する新しい準光学ECE評価モデルを提案する。

本研究では準光学的な光線追跡コードPARADE[2]を用いることで、実際のECE計測アンテナが有する3次元的な感度領域を評価する。計測アンテナが受信するECE波動場の放射・伝搬過程は、そのアンテナから入射する波動場の伝搬・吸収の逆過程として考えられることを利用し、PARADEを用いて計測アンテナから仮想的に入射する波動場の発展分布を計算することで、その分布がそのまま計測アンテナが持つ3次元的な感度分布として得られる。そして有限な感度が見込まれる各点において放射波動場を評価し、感度で重み付けして積分することで計測アンテナが実際に受信する総放射強度を評価する。このアイデアを元に、計測アンテナに受かる準光学的なECEを評価する新しいモ

デル式を、総エネルギー流束の保存則から導出した。新しく導いたモデル式が視線断面方向を考慮しない従来のモデル式と数学上は形式的に一致することを利用し、光軸の経路に沿った積分形に帰着させることで、数値計算時の簡便性を確保している。また、導いた積分形のモデル式を元にECE評価モジュールを作成し、PARADEと組み合わせてJT-60SAで想定されるプラズマに対して実際に放射温度の評価・検証を行った。また視線断面方向に電子温度勾配が大きい状況下では、アンテナの3次元的な感度分布を考慮したことによる評価放射温度の修正が見られることも確認できた。

視線断面方向に広がる放射波動場まで準光学的に考慮できる本ECE評価モデルの開発により、視線断面方向に(感度領域の空間スケールから見て)変化スケールの小さなプラズマに対する放射温度の評価精度向上、あるいはその計測そのものの妥当性検証への活用が期待できる。具体的にはプラズマのサイズが小さい場合(プラズマの変化スケールも小)、装置磁場が低い場合(放射波動場の波長が長いほど感度領域は大)、プラズマの密度が高い場合(回折によって感度領域が拡大)等は、視線断面方向に広がる情報が受信放射強度に与える影響が大きく、計測視線に沿う方向の情報のみを考える従来モデルに比べ、より精度の高い評価が期待できる。またECEイメージング計測の場合、各チャンネルが見込む感度領域のオーバーラップも評価できる他、磁気軸から離れた経路を辿る計測視線は屈折で曲がりやすく、磁気面に対して浅い角度の伝搬経路を描くため、その視線断面は磁気面を跨ぐ方向、すなわち変化スケールの小さい方向に近づくことで、上述した断面方向の不十分性が現れる。新しく開発した準光学ECEモデルは、これらの不正確性を定量的に評価する強力なツールになり得る。

[1] G. Bekefi, Wiley, New York, (1966),

[2] K. Yanagihara et al., Phys. Plasmas (2019).