

準光学コードPARADEの適用：
 トカマクにおける電子サイクロトロン共鳴加熱及び電流駆動
Application of a quasioptical code PARADE :
electron cyclotron resonance heating and current drive in tokamaks

柳原 洸太¹
 Kota YANAGIHARA¹

量研¹
 QST¹

準光学光線追跡コード“PARADE”は、任意の非一様非等方媒質中において任意の位相・強度分布を持って伝搬する波動ビームの振る舞いを、屈折、回折、偏波、散逸の全てを考慮して記述する[1-4]。これまでにPARADEコードは大型ヘリカル装置(LHD)における電子サイクロトロン共鳴加熱(ECRH)実験の解析・予測シミュレーションに導入され、トムソン散乱計測から実験的に得られる電子密度・温度分布を用いて実際のLHDプラズマにおける電子サイクロトロン波ビームの振る舞いを再現できるよう整備された。そして最近、電子サイクロトロン波ビーム伝搬の直接計測実験との比較により、PARADEコードの妥当性、更には他コードに対する優位性が実験的に証明された[5]。

今回はこのLHDでの実験検証を経て確度を増したPARADEコードを、大型トカマク装置、具体的にはJT-60SAとJA-DEMOにおけるECRH及び電子サイクロトロン電流駆動(ECCD)実験の予測シミュレーションに導入したので、その結果について報告する。これら2つの装置やITERに代表される今後の大型トカマク装置において、その電子温度は数十keVもの高温に達することが期待され、電子サイクロトロン波ビームの伝搬・吸収の正確な評価には、相対論による影響の十分な考慮が必要となることが予想される。そこで主に波の伝搬を記述する分散テンソルのエルミート部分には、任意の波数に対応する新しい弱相対論的な分散モデル[6](従来コードにはコールドモデルが多い)を、主に波の吸収を記述するアンチ-エルミート部分には、フル相対論的な分散モデル(従来コードには準垂直な波数にのみ対応可能な弱相対論的なモデルが多い)をそれぞれ新たに実装し、この問題に対応した。なお、このときフル相対論的な分散モデルで課題だった速度空間での2次元積分

が要求する高い計算コストは、共鳴曲線に沿った1次元積分に置き換える新手法を開発することで解決し、妥当な計算時間内での評価を実現した。ECRHはPARADEコードに標準で備わる散逸計算より評価できるが、ECCDの評価機能は従来のコードと同様にオプションとして追加実装する必要がある。そこで随伴法[7]に基づく専用の評価ルーチンの開発も新たに行った。

JT-60SA及びJA-DEMOにおけるシミュレーションを通じて、上述の様々なアップグレードの結果得られた要点を4つにまとめる。(1)従来の幾何光学的な光線追跡を準光学に拡張することで、加熱電力吸収分布が広がることを確認した。これは有限のビーム幅を考慮できたことによる。(2)次に伝搬評価に弱相対論的な効果を導入したことで、共鳴層近傍における入射ビームの軌道変化が確認され、従来は全吸収と評価されていた入射条件が一切吸収されない可能性すらあることを示した。(3)また吸収評価に相対論による影響をフルで導入したことで、特に斜め入射時に従来と大きく異なる吸収過程を確認した。(4)マルチ光線追跡コードによる駆動電流分布と大きな違いが現れない条件を用意して駆動電流分布を比較し、妥当な一致を示すことを確認した。以上より今後の大型核融合装置におけるECRH/CD解析には相対論の考慮が必須であること、PARADEはその要請を満足する準光学的なECRH/CD評価コードとして利用できることを示した。会議ではこれらの結果の背景にある基礎的な物理まで含め、より詳細な議論を報告する。

- [1] I. Y. Dodin et al., Phys. Plasmas (2019),
- [2] K. Yanagihara et al., Phys. Plasmas (2019),
- [3] K. Yanagihara et al., Phys. Plasmas (2019),
- [4] K. Yanagihara et al., Phys. Plasmas (under review),
- [5] K. Yanagihara et al., Nucl. Fusion, (2021),
- [6] F. Volpe, Phys. Plasmas (2007),
- [7] N. B. Marushchenko et al., Phys. Plasmas (2011).