

クーロン衝突による高エネルギー粒子の径方向拡散の評価
Evaluation of radial diffusion of energetic particles with Coulomb collisions

藤田隆明, 松浦圭佑, 舟橋良哉, 岡本敦
 Takaaki Fujita, Keisuke Matsuura, Ryoya Funabashi, Atsushi Okamoto

名大院工
 Nagoya Univ.

高エネルギー粒子による加熱・電流駆動を評価する代表的な方法として、モンテカルロ法（粒子軌道計算）と運動論方程式を解く方法がある。前者は3次元磁場効果などを容易に取り入れられるが、計算コストが高い。後者は計算コストは低い、粒子軌道の磁気面からずれ及びそれに伴う小径方向の拡散が無視される。

運動論的方程式にトロイダルドリフトを導入すれば、径方向拡散を含む高エネルギーイオンの解析をモンテカルロ法より低い計算コストで実施可能になると期待される。軸対称平衡において正準角運動量の保存から求めた無衝突粒子軌道上の点でのクーロン衝突による粒子速度・ピッチ角・軌道の変化をバウンス平均することで径方向の拡散係数を求めた。

軸対称平衡の ψ のRZ格子において、正準角運動量 P_ϕ の等高線($P_\phi = P_{\phi b}$)を追跡することで無衝突軌道を求める。軌道を初期値問題としてルンゲクッタ法などで解く場合は誤差の蓄積を防ぐため細かいステップ幅が必要となるが、保存量を用いているので軌道の概形はステップ幅によらず、計算コストが極めて低い。

得られた無衝突軌道に沿って、クーロン衝突による粒子速度・ピッチ角・軌道の変化をバウンス平均する。

粒子の径方向位置を表す座標として $\psi^* = P_{\phi b}/q_f$ を取る(q_f は粒子の電荷)。衝突項は以下で表される($\langle \cdot \rangle_B$ はバウンス平均)。第1項、第2項はそれぞれ速度の大きさ及びピッチ角の変化に対応する項であり、第3項が径方向位置の変化を表す。 $\Delta\psi^*$ は単位時間あたりの ψ^* の変化量である。

$$\begin{aligned} \langle C(f) \rangle_B &= \langle C_v(f) \rangle_B + \langle C_\xi(f) \rangle_B + \langle C_{\psi^*}(f) \rangle_B \\ C_{\psi^*}(f) &= -\frac{\partial}{\partial \psi^*} \{ \langle \Delta\psi^* \rangle f \} \\ &\quad + \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial (\psi^*)^2} \{ \langle (\Delta\psi^*)^2 \rangle f \} \end{aligned}$$

上式の $\langle \Delta\psi^* \rangle$ 、 $\langle (\Delta\psi^*)^2 \rangle$ は、正準角運動量 P_ϕ と粒子のトロイダル方向速度 v_ϕ の関係からクーロン衝突による $\langle \Delta v_\phi \rangle$ 、 $\langle (\Delta v_\phi)^2 \rangle$ を用いて以下の式で求められる。

$$\langle \Delta\psi^* \rangle = mR \langle \Delta v_\phi \rangle / q_f$$

$$\langle (\Delta\psi^*)^2 \rangle = (mR/q_f)^2 \langle (\Delta v_\phi)^2 \rangle$$

計算例を図1に示す。プラズマ電流 2 MA、トロイダル磁場 3.67 T、大半径 3.45 m、小半径 0.82 m、非円形度 1.5 のプラズマの規格化小半径 0.66 の位置におけるエネルギー 100 keV の重水素イオンを対象としている。ピッチ角パラメータ $\xi = v_{\parallel}/v$ の絶対値が小さい粒子ほど拡散係数が大きいことがわかる。これは $\langle (\Delta v_\phi)^2 \rangle$ の ξ 依存性に対応している。

講演では、得られた拡散係数とクーロン衝突を含む粒子軌道計算の結果との比較についても報告する予定である。

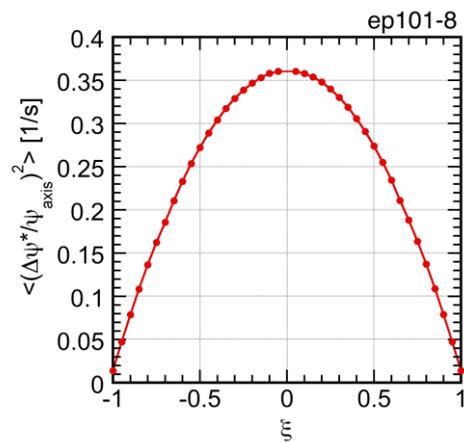


図1 ψ^* における拡散係数のピッチ角パラメータ依存性