

有限軌道幅効果を含む運動論的統合コード TASK/FP による輸送解析

Transport Analysis with the Finite Orbit Width Kinetic Integrated Transport Simulation Code TASK/FP

安齋亮慶, 福山淳, 本多充, 村上定義

Akiyoshi Anzai, Atsushi Fukuyama, Mitsuru Honda, Sadayoshi Murakami

京都大学 工学研究科 原子核工学専攻

Department of Nuclear Engineering, Kyoto Univ.

核融合炉の運転において効率的にプラズマを制御するために、立ち上げ時を含めて高エネルギー粒子の挙動をより正確に記述する必要があり、速度分布関数を含めた解析が必要である。Fokker-Planck 方程式を数値的に解く統合輸送シミュレーションコード TASK/FP の開発により、プラズマの速度分布関数の時間発展を記述するより正確なシミュレーションを行うことができるようになってきた [1]。しかし従来の TASK/FP による解析には粒子の軌道幅を 0 とする近似が用いられており、大きな軌道幅を持つ高エネルギー粒子による径方向拡散や衝突加熱分布の評価の精度に問題があった。

本研究においては、TASK/FP に有限軌道幅効果を導入し [2]、径方向熱拡散係数及び熱流束について、新古典輸送理論から求められる理論値との比較を行った。有限軌道幅効果の導入のために、エネルギー ϵ 、磁気モーメント μ 、トロイダル角運動量 P_ζ を使用した保存量空間 (ϵ, μ, P_ζ) から、運動量 p 、軌道上の最大磁束となる点におけるピッチ角 θ_m 、軌道上の最大磁束となる点のポロイダル半径 ρ_m を用いた保存量空間 $\mathbf{I} = (p, \theta_m, \rho_m)$ へと変数変換し、次のような軌道平均 Fokker-Planck 方程式を使用した。

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathcal{J}_I f(\mathbf{I}, t) = \frac{\partial}{\partial I_i} \mathcal{J}_I \left[D^{ij} \frac{\partial}{\partial I_j} - F^i \right] f(\mathbf{I}, t) + \mathcal{J}_I H(\mathbf{I}) \quad (1)$$

ここで \mathcal{J}_I はヤコビアンであり D^{ij} , F^i は軌道平均された拡散および移流係数で、局所的な座標 $\mathbf{u} = (p, \theta, \rho)$ と軌道平均 $\langle \rangle$ を用いて次のようにかける。

$$D^{ij} = \left\langle \frac{\partial I^i}{\partial \mathbf{u}} \cdot \overleftrightarrow{D}^{uu} \cdot \frac{\partial I^j}{\partial \mathbf{u}} \right\rangle \quad (2)$$

$$F^i = \left\langle \frac{\partial I^i}{\partial \mathbf{u}} \cdot \mathbf{F}^u \right\rangle$$

有限軌道幅効果の導入にあたり、粒子軌道を分類し、適切な境界条件を設定する必要がある [3]。

Fig.1 に保存量空間における軌道の分類を示す。水色の領域は捕捉軌道を描く粒子の領域、灰色が co 通過粒子の領域、紫色が counter 通過粒子の領域、白が損失粒子を含む禁止領域である。また、赤の線がピンチ軌道という counter 通過軌道と捕捉軌道との間の境界面に近い軌道をもつ粒子の面である。

Fig.2 に境界面を横切る粒子束の境界条件を示す。粒子数を保存させるため、捕捉領域 B からピンチ軌道面の点 P を通る赤色の粒子束と、P を通り co 通過領域 A に出る緑色の粒子束および P を通って counter 通過領域 C に遷移する青色の粒子束の和が等しくなるように境界条件を設定した。

衝突による運動量変化に伴い生じる径方向の熱拡散について、新古典輸送の Rosenbluth, Hinton, Hazeltine の理論 (RHH), Chang-Hinton の式 (CH), Hinton-Hazeltine の理論 (HH) それぞれの熱拡散係数の解析値と比較した結果を Fig.3 に示す。今回の解析では、有限軌道幅効果 FP と新古典輸送における拡散係数は、プラズマ中心および周辺部において違いが見られた。イオンの熱拡散係数については 0.3 付近から新古典輸送理論の値の傾向を再現するものの、新古典輸送の理論の拡散係数に比べ全体的に値が小さくなっていった。この原因については今後の解析が必要である。プラズマ中心

に近い領域で、両者が異なっている原因は、通常の新古典輸送理論ではプラズマ中心に存在するポット軌道などの特殊な軌道の効果が含まれていないことが原因と考えられる。

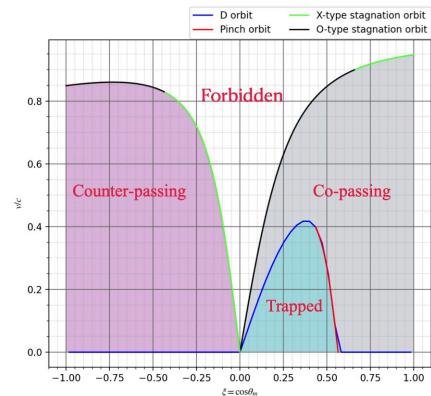


Fig. 1: 軌道領域分類図

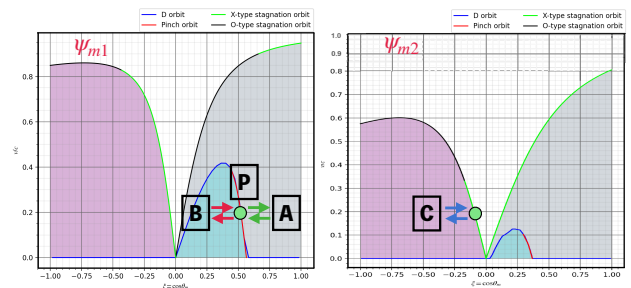


Fig. 2: 軌道遷移と境界面

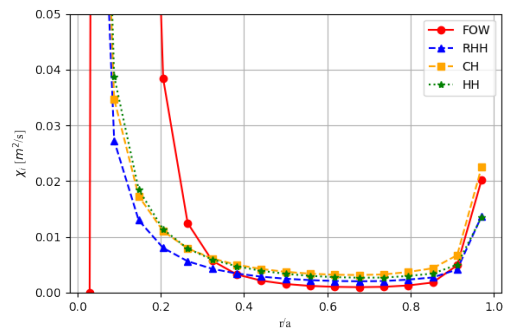


Fig. 3: イオン熱拡散係数の理論値との比較

- [1] H.Nuga and A.Fukuyama. *Progress in nuclear science and technology*, 2:78–84, 2011.
- [2] Y.V.Petrov and R.W.Harvey. *Plasma Phys. Control. Fusion*, 58:115001, 2016.
- [3] J.A.Rome and Y.M.Peng. *Nuclear Fusion*, 19:1193–1205, 1979.