

有限軌道幅効果を含めた新古典輸送シミュレーション

Neoclassical Transport Simulation Including Finite-Orbit-Width Effects

佐竹 真介、岡本 正雄、中島 徳嘉、洲鎌 英雄、横山 雅之、C. D. Beidler[†]核融合研、[†]Max-Planck 研究所NIFS, [†] Max-Planck-Institut für Plasmaphysik

トラス磁場配位のプラズマにおける衝突拡散による粒子、熱輸送現象は新古典輸送理論によって以前から研究されてきており、[1,2]などにその成果がまとめられている。しかし、解析的な手法によって新古典フラックスを温度、密度やその勾配などの局所的な物理量から表現しようとする局所輸送解析的な手法は、新古典輸送を引き起こす原因である弱磁場領域に捕捉された軌道の径方向ドリフト幅が、バックグラウンドの勾配長や装置のスケール長に対し十分小さいこと前提としている。この近似は実際のプラズマでは成り立たない事もあり、例えば我々はトカマクの磁気軸近傍に現れるポテト軌道の大きな粒子軌道幅の有限性を考慮した新古典輸送理論を構築し、磁気軸近傍の新古典熱伝導率 χ_i が従来の理論値よりかなり低くなることを示した [3]。ドリフト軌道の複雑さが増すヘリカル磁場配位においても、有限軌道幅効果を取り入れたモデルは新古典輸送を正しく評価する上で重要である。例えば低衝突領域ではヘリカルリップルに捕捉された粒子のバウンス平均をとった運動論方程式を解いてフラックスを求めるのが一般的な解析手法であるが [4]、実際の粒子軌道はリップルへの捕捉、脱出を繰り返すことによってグローバルに見ると大きな軌道幅を持つものも存在し、そのような粒子の大域的な運動や軌道損失の効果による輸送の非局所性は軌道幅の有限性を含めたモデルでなければ扱うことができない。

我々は δf 法モンテカルロシミュレーションを用いて、これまで主にトカマクにおける有限軌道幅効果を含めた新古典輸送計算を行ってきた。これを一般的な 3 次元磁場配位に拡張し、ヘリカル配位でのプラズマ全体の new classical transport をグローバルに計算するコード (FORTEC-3D) を開発した。 δf 法は線形化されたドリフト運動論方程式の 1 次の摂動部の時間発展を解くが、ヘリカル配位においてはイオンだけでなく、トカマクでは無視できた電子の粒子束も同程度の大きさを持つため、特に両極性条件を満たすような径電場の形成過程を径方向電流から自己無矛盾に求めるためには両粒子種のフラックス (Γ_i, Γ_e) を同時に求める必要がある。しかし電子とイオンではその大きな質量比からドリフト運動速度や軌道幅はかなりスケールの離れたものになっており、 δf コードで両方を解くのは計算資源的に困難である。そのため、我々は有限軌道幅効果の効く Γ_i については δf 法で解く一方、電子についてはバウンス平均された運動論方程式を数値的に解く GSRAKE コード [5] から $\Gamma_e(r, E_r)$ のテーブルを作成しておきこれを毎ステップ読み込むという手法を採用した。この方法によって径電場の時間発展の様子を、GAM 振動の減衰過程を含め詳細にシミュレートすることが可能となった。

ヘリカル系プラズマの新古典輸送では、 $E \times B$ ドリフトによる閉じ込めの改善が顕著であるため、両極性条件を満たす E_r を求めることが重要なテーマの一つである。これまでは解析的な新古典フラックスの表現を用いた次元輸送モデルによる径電場の時間発展の計算や、各磁気面ごとに径電場をパラメータと見て両極性条件を満たす解を探す研究が主になされてきた [6,7]。我々は今回開発したコードを用いてこの問題を有限軌道幅効果を含めプラズマ全体でグローバルに、かつ運動論的な視点から両極性電場の形成過程を解明することを目指している。今回の発表では新しく開発したコードのベンチマークと、LHD をモデルにした配位における径電場分岐を伴う計算結果例などを発表する予定である。

References

- [1] F. L. Hinton and R. D. Hazeltine, Rev. Mod. Phys. **48**, 239 (1976).
- [2] S. P. Hirshman and D. J. Sigmar, Nuclear Fusion **21**, 1079 (1981).
- [3] S. Satake *et al*, Phys. Plasmas **9**, 3946 (2002).
- [4] K. C. Shaing and S. A. Hokin, Phys. Fluids **26**, 2136 (1983).
- [5] C. D. Beidler and W. D. D'haeseleer, Plasma Phys. Control. Fusion **37**, 463 (1995).
- [6] D. E. Hastings *et al*, Nucl. Fusion **25**, 445 (1985).
- [7] M. Yokoyama *et al*, Nucl. Fusion **42**, 143 (2002).