

TASK/TX の不純物輸送モデリングと両極性輸送

Impurity transport modeling and ambipolar transport in TASK/TX

本多充¹, 矢本昌平¹, 福山淳²

HONDA Mitsuru¹, YAMOTO Shohei¹, FUKUYAMA Atsushi²

量研那珂¹, 京大²

QST Naka¹, Kyoto Univ.²

トーラスプラズマ中の物理量の発展をシミュレーションする流体型輸送コード TASK/TX[1, 2] を開発している。TASK/TX は通常用いられている拡散型の輸送コードと異なり、支配方程式が二流体方程式系に基づいている。二流体方程式系に対してドリフトオーダリングを取ることで輸送現象に着目した方程式系に転換されており、さらに磁気面平均を取ることで、1 次元流体方程式群となっている。また、新古典輸送を自己無撞着に扱うため、二流体方程式では通常扱わない熱流束のオーダまで解いている。すなわち、運動論方程式の $(1, \mathbf{v}, \frac{1}{2}v^2, \frac{1}{2}v^2\mathbf{v})$ の流体モーメント方程式を解いていることになる。TASK/TX は物理量間での自己無撞着性が特徴であり、その特性から従来の輸送コードでは前提となっている準中性条件や両極性条件は陽に課していない。しかし、解かれる全ての方程式が無矛盾に成立していなければ物理的・数値的に妥当な解が得られない自己無撞着な体系であるため、不純物を含む複数粒子種系への拡張は難しかった。今回、不純物に対する方程式の定式化から始め、数値実装を行うことで、1 種の不純物を含めた系へと拡張することに成功した。

ここでは完全電離の炭素を不純物種として取り扱っている。不純物を扱えるようになる利点は、実効電荷数が 1 以上の現実的なプラズマを取り扱えるだけではない。従来の新古典不純物輸送理論では、純プラズマでは電子とイオンで両極性輸送が成立する一方不純物を含む系では電子の新古典粒子束は無視できるほど小さくなり [3]、それゆえ不純物とイオンのみで両極性輸送が成り立つという前提で新古典不純物粒子束モデリングが行われてきた [4]。TASK/TX が不純物を取り扱うことができるようになったことで、不純物を含む新古典粒子束の両極性を調べられるようになった。その結果、両極性輸送は電子、重水素、炭素の粒子束を全て考慮した時に成立しており、電子粒子束は全く無視できない寄与となっていることが分かった。

このことは新古典輸送モジュール Matrix Inversion[5] や NCLASS[6] でも確認された。詳細を調べた結果、Banana-Plateau 粒子束と Pfirsch-Schlüter 粒子束においてはイオンと不純物は概ね釣り合っている一方、Ware ピンチでは電子とイオンで概ね釣り合っていた。すなわち、電子粒子束の寄与が無視できるのは平行電場が無視できる場合のみであることが分かった。

両極性輸送は衝突演算子の自己随伴性に由来する衝突における運動量保存から導かれる。しかし、完全線形衝突演算子を用いる場合、非等温異種粒子種間衝突においては自己随伴性は質量比が大きい場合に近似的に成り立つだけであり、それゆえ両極性輸送は破れる。これは、完全線形衝突演算子を実装した Matrix Inversion[7] でも確認されている。非両極性輸送は $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$ トルクを通じてプラズマ回転を惹起するため、自己無撞着な体系では僅かな破れであっても無視することができない。しかしながら、TASK/TX において完全線形衝突演算子に基づく摩擦力表式を用いているにも関わらず Matrix Inversion が非両極性輸送を予測する一方、自己無撞着な TASK/TX 体系においては完全な両極性輸送が達成された。詳細は講演にて発表する。

References

- [1] M. Honda and A. Fukuyama. *J. Comput. Phys.*, Vol. 227, pp. 2808–2844, 2008.
- [2] M. Honda and A. Fukuyama. *Comput. Phys. Commun.*, Vol. 208, pp. 117–134, 2016.
- [3] P. Helander and D. J. Sigmar. *Collisional Transport in Magnetized Plasmas*. Cambridge University Press, Cambridge, 2002.
- [4] C. Angioni and P. Helander. *Nucl. Fusion*, Vol. 56, p. 124001, 2014.
- [5] M. Kikuchi and M. Azumi. *Plasma Phys. Control. Fusion*, Vol. 37, pp. 1215–1238, 1995.
- [6] W. A. Houlberg et al. *Phys. Plasmas*, Vol. 4, pp. 3230–3242, 1997.
- [7] M. Honda. *Phys. Plasmas*, Vol. 21, p. 092508, 2014.