

TASK/TX の不純物輸送モデリング Impurity transport modeling in TASK/TX

本多充¹, 本間裕貴², 松山顕之²

HONDA Mitsuru¹, HOMMA Yuki¹, MATSUYAMA Akinobu²

京大工¹, 量研六ヶ所²

Kyoto Univ.¹, QST Rokkasho²

ト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 $(1, v, \frac{1}{2}v^2, \frac{1}{2}v^2v)$ 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。

近年、TASK/TX は不純物を扱えるように拡張された。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]。不純物拡張された TASK/TX でシミュレーションを行った結果、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] 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、輸送係数の対称性は崩れる。一方で、輸送係数の対称性が崩れた状態でも両極性輸送が成立することが知られており、完全線形衝突演算子を実装した Matrix Inversion[6] と TASK/TX でそれぞれ調べたところ、ともに両極性輸送が成り立っていることを確認した。これは TASK/TX の不純物拡張が成功している証左となる。

不純物がバルクイオンである水素同位体と大きく異なる点の一つに、プラズマ内で複数の価数を持った状態で存在することがある。例えば炭素不純物は6価の完全電離状態であると仮定することが多いが、周辺部においてその仮定は必ずしも妥当ではない。また、壁やダイバータ(リミタ)の表面が炭素製と仮定すると、中性粒子による壁の物理スパッタリング、ダイバータに衝突するイオンによる物理スパッタリング、壁やダイバータでのリサイクリング、不純物入射などによる炭素不純物源などが考えられるが、いずれも不純物は中性粒子の形でプラズマ内に混入してくる。そのため、適切な不純物源のモデリングを行うためには、中性粒子から完全電離に至る多段階の電離、荷電交換過程を考慮する必要がある。現在の TASK/TX は1種類かつ1つの価数の不純物しか扱えないため、完全電離炭素イオンを不純物種として扱う場合、不純物源モデリングには工夫が必要となり、現在検討を進めているところである。

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] M. Honda. *Phys. Plasmas*, Vol. 21, p. 092508, 2014.