

# 多層型 1 次元ダイバータコードの開発と部分非接触プラズマ解析

<sup>a</sup>東郷 訓、<sup>b</sup>中村 誠、<sup>b</sup>清水 勝宏、<sup>c</sup>滝塚 知典、<sup>b</sup>星野 一生、<sup>a</sup>小川 雄一

<sup>a</sup>東大大学院新領域創成科学研究科、<sup>b</sup>日本原子力研究開発機構、<sup>c</sup>阪大大学院工学研究科

ダイバータ板の熱負荷低減の切り札として、非接触ダイバータプラズマの制御が期待されている。一方、非接触状況が強くなると放射領域が熱的に不安定となり、X 点近傍に移動して(X 点 MARFE)炉心プラズマを冷却してしまう傾向にある[1]。この熱的不安定性の制御が重要な課題となっている[2]。

2 次元コードを用いた非接触ダイバータプラズマのシミュレーションにおいては実験と定量的に一致しない場合がある[3]。一方、定量的な再現に向け重要と考えられる効果を 2 次元コードにすぐに組み込むことは計算時間の観点から不利であると考えられている[4]。そこで本研究においては、非接触ダイバータプラズマの定量的な再現において重要と考えられる効果について洞察を得やすく、特に熱的に安定であることが知られる部分非接触ダイバータプラズマ[1]を扱うことのできる多層型 1 次元ダイバータコードを作成することを目的とした。

多層型 1 次元コードではスクレイプオフ層(SOL)を 2 本のフラックスチューブに分割しそれぞれのフラックスチューブにおいて磁力線平行方向 1 次元の基礎方程式を解く。径方向輸送はソース項として扱う。特に炉心プラズマに近い内側を非接触状態、外側を接触状態として部分非接触状態のプラズマを再現することを意図する。磁力線平行方向 1 次元の流体方程式は以下で与えられる[5]。

$$\frac{\partial(mn)}{\partial t} + \frac{\partial(mnV)}{\partial x} = mS \quad (1)$$

$$\frac{\partial(mnV)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (mnV^2 + P) = M \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{1}{2} mnV^2 + \frac{1}{\gamma-1} P \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \left( \frac{1}{2} mnV^2 + \frac{\gamma}{\gamma-1} P \right) V - \kappa_{e,||} \frac{\partial T}{\partial x} \right\} = Q \quad (3)$$

ここでイオンと電子の密度・流速・温度は等しいと仮定している。 $P = 2nT$  はプラズマ圧力、 $\gamma = 5/3$  は比熱比、

$\kappa_{e,||}$  は電子の熱伝導係数である。右辺はソース項で、素過程としてイオン化反応(励起も含む)、体積再結合反応(放射再結合反応と三体再結合反応)、荷電交換反応、不純物放射を考慮する。不純物は炭素不純物のノンコロナ平衡[6]を仮定する。境界条件として、上流側( $x = 0$ )にはよどみ点の条件、下流側( $x = L$ )は Bohm 条件を課す。中性粒子モデルとして、次の連続の式を用いる[5]。

$$\frac{\partial n_n}{\partial t} + \frac{\partial \Gamma_n}{\partial s} = -S - \frac{n_n}{\tau_n} \quad (4)$$

$$\Gamma_n = \alpha(n_n v_{FC}) + \beta \left( -D \frac{\partial n_n}{\partial s} \right) \quad (5)$$

$$D = \lambda_{cx} v_{th} = \frac{v_{th}^2}{n \langle \sigma_{cx} v \rangle} \quad (6)$$

ここで  $s$  はポロイダル方向の座標軸である。中性粒子の輸送機構として、Franck-Condon エネルギーによる移流と荷電交換反応による拡散を考える。右辺第二項は径方向輸送による中性粒子ロスの効果である。境界条件として次を用いる。

$$\Gamma_{n,stag} = 0, \quad \Gamma_{n,div} = \eta_{trap} (nV)_{div} \quad (7)$$

ここで  $\eta_{trap}$  はダイバータ板での中性化率である。

計算パラメータとして ASDEX-Upgrade を参照した[7]。まずは単層で解析を行った。中性粒子の径方向輸送ロスを増やすと、非接触プラズマの定常状態が得られた。このとき非接触フロントより下流の中性粒子密度分布の勾配が負になっており、中性粒子の逆流が生じていることが分かった。今後 2 層での解析を行う。

- [1] A. W. Leonard *et al.*, Phys. Rev. Lett. **78**, 4769 (1997).
- [2] S. Takamura, J. Plasma Fusion Res. **72**, No. 9, 866 (1996).
- [3] K. Hoshino *et al.*, J. Plasma Fusion Res. Ser. **9**, 592 (2010).
- [4] R. Goswami *et al.*, Physics of Plasmas **8**, No. 3, 857 (2001).
- [5] S. Nakazawa *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion **42**, 401 (2000).
- [6] D. E. Post, J. Nucl. Mater. **220-222**, 143 (1995).
- [7] A. Kallenbach *et al.*, Nucl. Fusion **48**, 085008 (2008).