

# 先進ダイバータの磁気ノズル効果による超音速プラズマ流のシミュレーション研究

東郷 訓, 滝塚知典<sup>a</sup>, Dirk REISER<sup>b</sup>, 小川雄一<sup>c</sup>, 李 躍<sup>c</sup>, 伊庭野健造<sup>a</sup>, 野尻訓平, 江角直道, 坂本瑞樹, 中嶋洋輔

筑波大学プラズマ研究センター

<sup>a</sup> 大阪大学大学院工学研究科

<sup>b</sup> Forschungszentrum Jülich GmbH, IEK-Plasmaphysik

<sup>c</sup> 東京大学大学院新領域創成科学研究科

トラス型核融合炉のダイバータ設計においてダイバータ板への熱負荷の低減は最重要課題の一つとされている。課題解決に向けて研究が進められている先進ダイバータ概念の一つである super-X ダイバータでは、ダイバータ板をトラス中心軸から大半径的により遠くに設置することで著しい発散磁場によって受熱面積の拡大を狙う。このとき磁場の収縮及び発散(磁気ノズル)によって超音速プラズマ流が発生することが実験的 [1]・理論的 [2] に示されており、実際の熱負荷の評価においてはこの効果を考慮することが重要である。しかし既存の周辺プラズマ流体モデルではプラズマの磁力線方向運動量輸送の式が放物型で記述されているため、ダイバータ板側(シース入り口)の境界条件にプラズマ流速が陽に影響を受けてしまい、自己無撞着な超音速プラズマ流のシミュレーションを困難にしている。本研究は非等方イオン温度 ( $T_{i,\parallel}$ ,  $T_{i,\perp}$ ) をプラズマ流体モデルに導入し、プラズマの磁力線方向運動量輸送の式を双曲型で記述することでこの問題を解決しようとするものである [3]。

磁気ノズルによる超音速プラズマ流のテスト計算として、Fig. 1 に示すような単純ミラー磁場配位に局所的な粒子ソース  $S$  を入れた場合の磁力線方向(座標  $s$ ) 輸送におけるマッハ数  $M$  分布を調べた。 $s = 0$  に鏡対称条件を課し、 $s = L$  にターゲット板を置いた(固体壁によるプラズマシークの効果模擬する仮想ダイバータモデル [3] を導入した)。このとき一様な電子温度  $T_e$  分布を与え、イオン温度は 0 とし ( $T_{i,\parallel} = T_{i,\perp} = 0$ )、イオンの連続の式とプラズマの磁力線方向運動量輸送の式のみを解いた。イオン音速は  $c_s = \sqrt{T_e/m_i}$  で評価される ( $m_i$  はイオン質量)。Figure 1 に  $M$  分布を示す。上流側 ( $s/L = 0 \sim 0.2$ ) では粒子ソースの効果による加速が生じている。また下流側の収縮 ( $s/L = 0.4 \sim 0.8$ )・発散 ( $s/L = 0.8 \sim 1$ ) 磁場による磁気ノズル効果でプラズマが加速し、実験 [1] で観測されるような滑らかな超音速流遷移を再現している。粒子ソースがない領域では、イオンの連続の式 ( $nM/B = \text{const.}$ 、 $n$  はプラズマ密度)、イオンのエネルギー保存則 ( $M^2/2 + e\phi/T_e = \text{const.}$ 、 $e$  は素電荷、 $\phi$  は電位)、電子密度のボルツマン分布 ( $n \propto \exp[e\phi/T_e]$ ) の連立から解析解が得られ [2]、 $B_0/B = (1/M) \exp[(M^2 - 1)/2]$  で与えられる。粒子ソースがない領域 ( $s/L = 0.4 \sim 1$ ) での数値解を解析解と比較すると、Figure 2 に示すように良い一致が得られた。このことは数値計算に用いているプラズマの磁力線方向運動量輸送の式は電場が陽に現れないために中性流体と同様の方程式となっているが、実際の加速機構は電場によるイオン加速であることを示すと共に、本研究のプラズマ流体モデルで超音速プラズマ流が自己無撞着にシミュレーションできることを示す。

講演では有限のイオン温度がある場合の結果も含めて議論を行う。

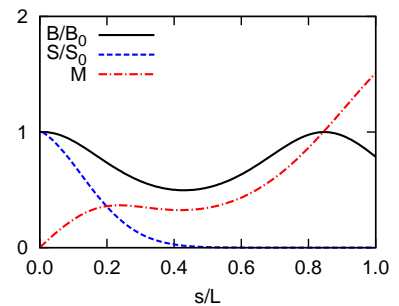


Figure 1: (実線) 規格化磁場強度分布、(破線) 規格化粒子ソース分布、(鎖線) マッハ数分布

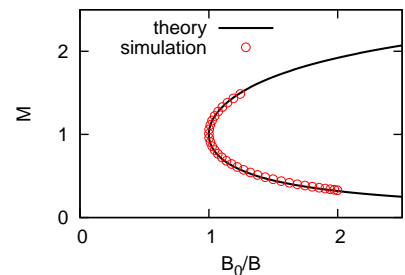


Figure 2: 粒子ソースがない領域でのマッハ数と規格化磁場強度の関係; (実線) 解析解、(丸印) 数値解

## References

- [1] M. Inutake *et al.*, J. Plasma Fusion Res. **78** (2002) 1352.
- [2] R.H. Cohen and D.D. Ryutov, Contrib. Plasma Phys. **44** (2004) 111.
- [3] S. Togo *et al.*, J. Comput. Phys. **310** (2016) 109.