

星野一生<sup>1</sup>、矢本昌平<sup>2</sup>、本間裕貴<sup>2</sup>  
HOSHINO Kazuo<sup>1</sup>, YAMOTO Shohei<sup>2</sup>, HOMMA Yuki<sup>2</sup>

<sup>1</sup>慶大理工、<sup>2</sup>量研  
<sup>1</sup>Keio Univ., <sup>2</sup>QST

## 1. はじめに

磁場閉じ込め核融合装置において、ダイバータは、炉心プラズマから流出する熱・粒子の制御に加え、核融合反応の結果生じるヘリウム灰の排気、不純物の制御など、重要な役割を担う。そのようなダイバータおよびスクレイプオフ層 (SOL) には、炉心プラズマから高エネルギープラズマが流入する一方、固体壁と接し相互作用を起こす。そのため、プラズマ輸送、中性粒子の輸送および原子・分子過程、壁損耗や外部注入により発生した不純物との相互作用、等を、相互矛盾無く総合的に取り扱う必要がある。

このようなダイバータプラズマの解析・予測には、プラズマ、中性粒子、不純物、(場合によっては壁も含め)、それぞれをモデル化し結合した統合シミュレーションが有効である。本講演では、統合ダイバータプラズマシミュレーションとして、SONICコード[1,2]の最近の開発状況と代表的な結果、今後の計画について述べる。

## 2. シミュレーションモデル

SONICコードは、プラズマ流体コード、中性粒子輸送モンテカルロコード、不純物輸送モンテカルロコードからなる統合ダイバータコードである。プラズマ輸送では、Braginskiiモデルを基にした流体方程式を、ポロイダル方向と小半径方向の2次元の実磁場配位で解く。中性粒子や不純物については、実幾何形状を考慮し、衝突過程をモンテカルロ法で扱うテスト粒子モデルを用いる。

これら3種のコードは、MPMD (Multiple-Program Multiple-Data) を基盤としたフレームワーク[3, 4]上で実行され、相互にMPIデータ通信を行いながら、相互に矛盾しない定常解が得られるまで繰り返し計算を行う。このフレームワークを用いることで、各コードの独立性・保守性を確保するとともに、今後のモデル拡張も容

易になる。実際に、不純物輸送コードを複数実行することによる多種不純物シミュレーション[4, 5]や、炉心プラズマ輸送コードとの統合シミュレーション[6]が行われた。

SONICコードは、JT-60Uの解析[7]や、JT-60SAの運転シナリオ解析[4, 5]、原型炉ダイバータ設計[8]等に用いられてきた。原型炉ダイバータを対象とした典型的なシミュレーションでは、IFERC-CSCの大型計算機JFRS-1において1000~2000プロセスを用いて、1~2週間ほどで収束解を得る。

## 3. 最近の開発状況

SONICコードに限らず海外のコードも含め、ダイバータプラズマシミュレーションコード全般として、実験で得られた傾向を定性的に再現することに成功している。しかし、より定量的な解析、特に非接触ダイバータの定量的な再現についてはまだ課題が多いのが実状である。そのため、様々なグループで様々なモデルを用いたダイバータ物理の解明研究やモデル開発が進められている。

SONICコードについては、量研を中心として、各種共同研究を活用しながらコード開発が進められている。大小様々なモデル開発・改良が行われているが、ここでは、最近のモデル改良として、非定常シミュレーション[9]と拡張熱力モデル[10]について紹介する。

### 3.1 非定常シミュレーション

従来の不純物輸送モデルは定常分布を求解していた。しかし、不純物ガス注入による非接触ダイバータ形成過程の理解や、将来にむけた制御手法の検討を進めるには、非定常シミュレーションが重要となる。そこで、不純物輸送モデルの非定常化が行われ、JT-60SAを対象とし

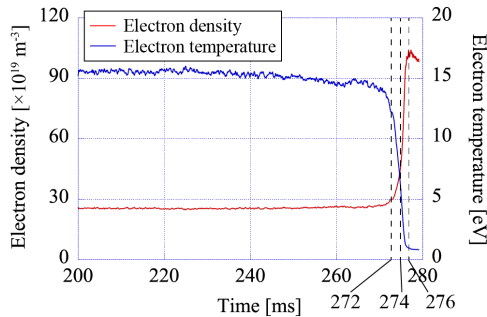


図1 外側ダイバータストライク点での電子密度・電子温度の時間発展。横軸はAr入射開始からの経過時間。

て不純物ガス注入による非接触ダイバータの形成過程が解析された[9]。

不純物の無い状態の重水素プラズマに対し、Ar不純物入射をはじめると、図1のように、およそ270msまではダイバータプラズマは接触状態のままであったが、その後、5ms程度の時間スケールで急激に低温高密度化が進み非接触状態へと遷移する結果が得られた。この遷移の間、ストライク点近傍でAr不純物密度が急増し、放射損失が増大したことにより、非接触ダイバータへと遷移する様子が明らかになった。

今後、非接触ダイバータの実時間制御手法の開発へ向け、このような非定常シミュレーションにより非接触ダイバータの動特性の理解を深めていく事が重要である。

### 3.2 拡張熱力モデル

SOL・ダイバータ領域における不純物輸送は、主にプラズマ流による摩擦力と温度勾配に起因する熱力のバランスにより決定される。どちらも背景プラズマとのクーロン衝突に起因する力であるが、熱力については、高衝突度を仮定したモデルが使われ続けてきた。しかし、原型炉のようにSOLプラズマが高温になると衝突度が低くなり、従来モデルでは熱力を過大評価し、実験とは異なりSOL領域へ不純物を閉じ込めてしまう傾向がある。

そこで、温度勾配ではなく、熱伝導によるエネルギー流速を用いる拡張熱力モデルが開発され、SONICにも実装された[10]。フリーストリーミングエネルギーで熱伝導を制限する熱伝導モデル(Heat Flux Limiterモデル)を用いることで、不純物輸送における熱力に衝突度依存性を取り入れた。初期解析の結果、図2のように、高磁場側で熱力の過大評価が解消し、SOL領域の不純物密度が減少する結果が得られた。

今後、熱伝導モデルをさらに高度化するとともに、それによるプラズマ輸送、不純物輸送へ

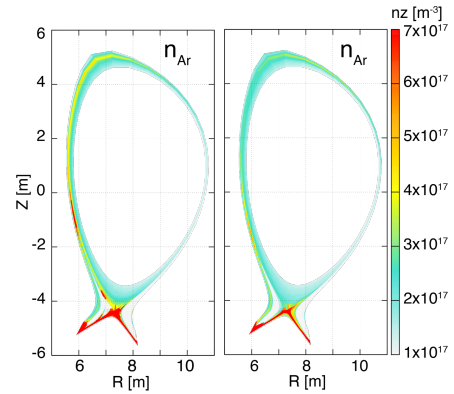


図2 Ar不純物の空間密度分布。従来熱力モデル(左)および拡張熱力モデル(右)

の影響を評価し、原型炉設計研究へ反映していく必要がある。

### 4. 今後の展望

以上のようなモデル開発・改良に加え、実験データとの詳細な比較やコード間ベンチマークによるコードの妥当性検証、実装モデルの違いによる結果への影響評価等も並行して進んでいる。

また、SONIC以外でも国内で様々なダイバータシミュレーション研究が進んでいる。そのような知見をSONICへ取り入れ、より信頼性のある統合モデルを開発し、総合的なダイバータプラズマ物理の理解、将来装置における性能予測およびその制御手法の確立等を進めていくことが重要である。

### References

- [1] H. Kawashima, *et al.*, Plasma Fus. Res., **1** (2006) 031.
- [2] K. Shimizu, *et al.*, Nucl. Fusion, **49** (2009) 065028.
- [3] K. Hoshino, *et al.*, Plasma Fus. Res., **9** (2014) 3403070.
- [4] K. Hoshino, *et al.*, Contrib. Plasma Phys., **58** (2018) 638.
- [5] S. Yamoto, *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion, **62** (2020) 045006.
- [6] M. Yagi, *et al.*, Contrib. Plasma Phys., **52** (2012) 372.
- [7] K. Hoshino, *et al.*, J. Nucl. Mater., **463** (2015) 573.
- [8] N. Asakura, *et al.*, Nucl. Fusion, **61** (2021) 126057.
- [9] 矢本昌平、他、第37回プラズマ・核融合学会年会、2020年12月。
- [10] Y. Homma, *et al.*, Nucl. Fusion, **60** (2020) 046031.