

開放端非一様磁場系での高温プラズマ輸送解析コードの開発

Code development for high-temperature plasma transport analyses in open and inhomogeneous magnetic field systems

東郷 訓

筑波大学プラズマ研究センター

1. 研究目的

磁場閉じ込め核融合炉の実現に向け、炉壁にかかる熱負荷を高精度に評価できる周辺プラズマ(開放端非一様磁場系)のシミュレーションコードの開発が急務である。本研究は、非一様磁場と電子旋回運動に現実的な計算時間で対応可能な particle-in-cell (PIC) コードと、炉壁近傍のプラズマの時間発展を追跡できる流体モデルの開発を目的とする。

2. 研究成果の内容

核融合炉では炉壁にかかる熱負荷を低減するため、プラズマが壁に届く前に消失する「非接触プラズマ状態」を制御することが重要となっている。しかし間欠的に高い熱流束が生じる現象(ELM)により非接触プラズマ状態が解消される可能性が指摘されており、非定常的現象の解明が必要である。筑波大学プラズマ研究センターの GAMMA 10/PDX 装置(G10)では、開放端磁場系であることを活かし、ELM 模擬実験が実施されている[M. Yoshikawa *et al.*, Plasma Fusion Res. **17**, 1202093 (2022).]。そこで開放端磁場系におけるプラズマの磁力線方向一次元輸送の時間発展を解けるプラズマ流体モデルである AIP モデル[S. Togo *et al.*, J. Adv. Simulat. Sci. Eng. **9**, 185 (2022).]を用い、G10 での ELM 模擬実験のシミュレーションによる再現を目指している。

G10 では ELM 模擬を行うための方法の一つとしてペレット(水素氷)をプラズマ中に入射している。そこでプラズマ中のペレットからの溶発中性粒子レートを与える neutral gas shielding (NGS)モデル[Y. Nakamura *et al.*, Nucl. Fusion **26**, 907 (1986).]を AIP モデルに組み込み、ペレット入射時のプラズマの時間発展を調べた。昨年度までのモデルでは、溶発中性粒子が作る溶発雲の半径を固定し、ペレットから溶発雲への中性粒子の供給と溶発雲内でのイオン化反応による中性粒子の消滅が釣り合うという仮定の下でイオン化反応率と荷電交換反応率を決定する簡素なモデルを使用していた[A. Kunii *et al.*, J. Adv. Simulat. Sci. Eng. **12**, 211 (2025).]。今年度は溶発中性粒子に密度連続の式を適用することで、前モデルでの仮定を緩和した。さらに中性粒子が持つ運動量・エネルギーの効果も考慮し、モデルを詳細化した。その結果、前モデル同様に定性的に実験結果を再現しつつ、定量的にはエネルギーバランスが変化し、中性粒子が

持つエネルギーの考慮の重要性が示唆された。

一方、ダイバータ板近傍での非接触プラズマに対する ELM 由来の高熱粒子束の影響を調べることを目指して、AIP モデルへの中性粒子流体モデルの実装を開始した。

3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

研究の実施に当たり、大容量のデータ出力を要する時間発展シミュレーションのために保存容量を確保することが必要であり、学際共同プログラムでのリソースが多いに役立った。また学類から研究を開始する学生も参加可能であり、教育の観点でも大いに意義があった。

4. 今後の展望

PIC コードの方では、シミュレーション条件の見直しを進め、**double leap-frog** 法を使った大幅な時間刻みのシミュレーション手法の確立を目指す。流体モデルの方では、非接触プラズマ領域の中性粒子の輸送を考慮するモデルの実装を進め、非接触プラズマの過渡的な挙動を調べる予定である。特に AIP モデルは、ELM で顕著になりうるイオン圧力非等方性を考慮できることが特徴であり、従来のプラズマ流体モデルでの先行研究([Y. Li et al., *Plasma Fusion Res.* **13**, 3403054 (2018).])などとの比較からその影響にも着目する予定である。

5. 成果発表

(1) 学術論文

(2) 学会発表

- A. Kunii, S. Togo, M. Yoshikawa, N. Ezumi, T. Okamoto, Y. Nakashima, Y. Hayashi, M. Sakamoto, “Time-dependent fluid simulation of the dynamic response of detached plasma to transient heat and particle flux at GAMMA 10/PDX”, 14th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, P73 (poster), Tsukuba, Japan (2025).
- 國井朗光, 東郷訓, 吉川正志, 江角直道, 岡本拓馬, 林祐貴, 坂本瑞樹, 「溶発中性粒子の輸送過程を考慮した GAMMA 10/PDX ペレット入射実験の時間発展流体シミュレーション」, 第 42 回 プラズマ・核融合学会 年会, 3P67 (ポスター), 京都市 (2025).

(3) その他

- 國井朗光, 「Temporal fluid simulation of plasma particle and energy confinement in GAMMA 10/PDX pellet injection experiments」, 令和 7 年度日本シミュレーション学会賞「奨励賞」 (2025).

- ・ 國井朗光, 筑波大学学長表彰 (2025).
- ・ 國井朗光, 東郷 訓, 吉川正志, 江角直道, 坂本瑞樹, 「GAMMA 10/PDX ペレット入射実験における軸方向粒子閉じ込めの時間発展流体シミュレーションによる解析」, シミュレーション, 45 巻 1 号, pp.41—46 (2026).

使用計算機	使用計算機に○	配分リソース※		
		当初配分	移行*	一般利用による追加
Pegasus	○	5040		
Miyabi-G				
Miyabi-C				
※配分リソースについてはノード時間積をご記入ください。 *バジェット移行を行った場合、「+2000」「-1000」のように記入				