

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

[PIC コードに関する成果]

PIC コードにおいて荷電粒子の運動方程式を解くために従来から用いられてきたスキームである leap frog (LF)法では、荷電粒子のラーマ半径 $\rho = v_{\perp}/\Omega$ ($v_{\perp}$: 磁場垂直方向速度、 $\Omega = qB/m$: サイクロトロン周波数、 q : 電荷、 B : 磁場、 m : 質量)を正確にシミュレーションするために、時間刻み Δt に関して $\Omega\Delta t \ll 1$ の制約があった。しかしこの制約により膨大な計算負荷を生むため、現実の系のシミュレーションを実施することの障壁となっていた。一方で近年提案された double-leap frog (DLF)法[T. Takizuka *et al.*, Plasma Fusion Res. **16**, 1203100 (2021).]では leap frog 法を 2 回繰り返すだけの計算負荷で $\Omega\Delta t > 1$ の場合でも ρ を正確にシミュレーションできるため、計算負荷を大幅に低減できる可能性がある。そこで PIC コード[K. Emoto *et al.*, Phys. Plasmas **30**, 013509 (2023).]に DLF 法を実装し、その効果を調べた。

DLF 法を実装した PIC コードを用い、非一様磁場下のプラズマの計算を $\Omega_e\Delta t \approx 1$ の条件で実施した。その結果従来の LF 法にて $\Omega_e\Delta t \approx 0.1$ の条件で実施した計算結果とほぼ同じものが得られると共に、計算時間を 1/10 以下に低減することができた。しかし、LF 法にて $\Omega_e\Delta t \approx 1$ (ρ_e を過大評価)の条件で実施した計算結果ともほとんど差がみられなかったことから、DLF 法の効果を明確に見るためにはより大きな $\Omega\Delta t$ の設定が必要になると考えられる。ただし現状のシミュレーション条件では $\omega_{pe}\Delta t \approx 1$ (ω_{pe} : プラズマ振動数)の条件にも肉迫してしまうため、さらに時間刻みを増やすには工夫を検討する必要がある。

[流体モデルに関する成果]

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。ペレットがプラズマ中で溶発している間のプラズマ密度の増加、溶発終了後の回復の様子について、実験結果を定性的・半定量的に再現する結果が得られた[A. Kunii *et al.*, J. Adv. Simulat. Sci. Eng. **12**, 211 (2025).]。

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、PIC シミュレーションという計算負荷の大きいジョブを円滑に実施することと、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。また年度途中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、DLF 法を使ったさらに大幅な時間刻みのシミュレーションを実施する予定である。

流体モデルの方では、ペレットからの溶発中性粒子の輸送や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。

5. 成果発表

(1) 学術論文

- ・ A. Kunii, S. Togo, M. Yoshikawa, N. Ezumi, Y. Nakashima, M. Sakamoto, “Temporal fluid simulation of plasma particle and energy confinement in GAMMA 10/PDX pellet injection experiments”, Journal of Advanced Simulation

in Science and Engineering **12**, 211–222 (2025).

(2) 学会発表

- ・ 國井朗光, 東郷訓, 吉川正志, 江角直道, 中嶋洋輔, 坂本瑞樹, 「GAMMA 10/PDX ペレット入射実験における磁力線方向粒子束の時間発展流体シミュレーション」, 第 15 回核融合エネルギー連合講演会, 13P13 (ポスター), 八戸 (2024 年 6 月).
- ・ A. Kunii, S. Togo, M. Yoshikawa, N. Ezumi, Y. Nakashima, M. Sakamoto, “Temporal fluid simulation of plasma particle and energy confinement in GAMMA 10/PDX pellet injection experiments”, The 43rd JSST Annual International Conference on Simulation Technology & The 23rd Asia Simulation Conference, Symposium 1, Session 3a (oral), Kobe, Japan (2024).
- ・ 江本一磨, 東郷訓, 滝塚知典, 片沼伊佐夫, 坂本瑞樹, 「完全磁化プラズマの PIC シミュレーションに向けた double leap-frog 法の実装」, 2024 年度宇宙輸送シンポジウム, STEP-2024-074 (口頭) 相模原 (2025 年 1 月).
- ・ 江本一磨, 東郷訓, 滝塚知典, 片沼伊佐夫, 坂本瑞樹, 「Double leap-frog 法を用いた磁気モーメント保存を満たす particle-in-cell シミュレーションの試行」, 日本物理学会 2025 年春季大会, 21pB1-3 (口頭), オンライン (2025 年 3 月).

(3) その他

- ・ 國井朗光, 「GAMMA 10/PDX ペレット入射実験における磁力線方向粒子束の時間発展流体シミュレーション」, 第 15 回核融合エネルギー連合講演会, 若手優秀発表賞, 八戸 (2024 年 6 月).
- ・ A. Kunii, S. Togo, M. Yoshikawa, N. Ezumi, Y. Nakashima, M. Sakamoto, “Temporal fluid simulation of plasma particle and energy confinement in GAMMA 10/PDX pellet injection experiments”, The 43rd JSST Annual International Conference on Simulation Technology & The 23rd Asia Simulation Conference, 56—59 (2024) (査読無会議論文).
- ・ A. Kunii, “Temporal fluid simulation of plasma particle and energy confinement in GAMMA 10/PDX pellet injection experiments”, The 43rd JSST Annual International Conference on Simulation Technology & The 23rd Asia Simulation Conference, Student Presentation Award, Kobe Japan, September (2024).

使用計算機	使用計算機に ○	配分リソース※		
		当初配分	移行*	追加配分
Cygnus	○	7200	0	0
Pegasus				
Wisteria/BDEC-01				
	※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			