

Study of self-consistent evolution of non-axisymmetric eddy currents and plasma equilibria

非軸対称渦電流とプラズマ平衡の自己無撞着な時間発展に関する研究

京都大学 エネルギー科学研究科 エネルギー基礎科学専攻 中村研究室 山下湧志朗

本論文はトカマクにおけるプラズマの磁気流体力学 (MHD) 平衡と導体壁に流れる渦電流の自己無撞着な長時間の時間発展について、非軸対称性を一貫して考慮できる数値シミュレーション手法を提案および検証したものであり、全5章で構成される。

1. Introduction

閉じ込めの良い縦長断面プラズマは垂直方向の位置不安定性を持つため、プラズマの維持には導体壁による受動安定化が必須である。また、概ね軸対称系であるトカマクでも近年では非軸対称性が重要となる場面が増しており、導体壁と非軸対称性の効果を同時に考慮できるシミュレーション手法への需要が高まっている。

現在までに確立された導体壁を考慮できる非軸対称シミュレーションコード群は磁気流体力学 (MHD) に基づく時間発展を解くものであり、長時間スケールの計算に適した統合計算コード、すなわち MHD 平衡と輸送などの時間発展を矛盾なく解き進める手法に基づく非軸対称シミュレーションコードは未確立である。そこで本研究では、導体壁と非軸対称性を一貫して考慮可能な統合計算手法を確立することを目的とする。

2. Eddy current calculation [1]

統合計算用に開発した薄壁近似渦電流計算コードについて、その計算原理と検証計算の結果をまとめた。開発したコードは面電流のスカラーポテンシャル表現による効率的な定式化と有限差分法による簡素な実装を特徴としている。

センターソレノイド電流に誘起される渦電流を模擬した検証計算では、軸対称計算におけるフィラメントモデルとの定量的な結果の一致と、非軸対称計算結果の定性的な妥当性が確認された。

3. Coupled Calculation of MHD Equilibrium and Eddy Current [2]

既存の静的3次元MHD平衡ソルバーと第2章で開発した渦電流コードの連携により、平衡と渦電流の自己無撞着な時間発展を解く数値計算手法を提案した。渦電流が作る磁場を変数として、暫定磁場分布を入力とした平衡計算とそれに基づく渦電流計算を行うことで、暫定入力磁場に対応した出力磁場が得られる。この入出力の残差は自己無撞着な解からの乖離を示す指標となるため、残差が減少するようガトー微分に基づいて最適化されたパラメータを用いて磁場分布を更新することで、最終的に自己無撞着な時間発展

を表す磁場分布が得られる。

検証計算においては、既存手法では対応できない任意方向の変位が生じる条件下でも、提案手法では物理的に妥当な解へスムーズに収束することが確認された。また、真空容器がベローズを模した非軸対称抵抗分布をもつ場合の電流減少シミュレーションにおいて、ポロイダル渦電流分布によるトロイダル磁場の変調に対応してプラズマの非軸対称変形が見られることを示した。さらに、計算結果における磁場強度のリップル率の評価から、真空容器による非軸対称磁場成分はプラズマに影響を与えうる大きさであることが示唆された。

4. Validation of Integrated Calculation [3]

第3章で開発した渦電流と MHD 平衡の準静的な時間発展を計算するコードに、プラズマ内での磁場拡散およびプラズマ外部のポロイダル磁束分布を計算するモジュールを加えることで、平衡計算の入力変数である真空磁場、回転変換、総トロイダル磁束を自己無撞着な解に収束させる計算手法を開発した。提案手法に基づく統合計算コードを実装し、既存の軸対称統合コードとの比較検証および非軸対称性がある場合の計算を行った。

ITER の 15MA シナリオに基づく初期平衡に、総トロイダルプラズマ電流を一定に保つ境界条件のもと温度変化を与え、その後の垂直変位を伴う時間発展を模擬する検証計算を行った。軸対称計算では温度上昇時、下降時ともに既存コードと同様のプラズマ挙動が再現されたことから、計算手法の妥当性が確認された。また、ポートを模擬した非軸対称抵抗分布を与えた計算では、ポートを設けない場合と軸対称の絶縁領域を設ける場合の中間的な変位挙動を示したことから、非軸対称計算でも物理的に矛盾のない結果が得られたといえる。さらに、プラズマに軸対称性を課して同様の計算を行うと変位速度が変化したことから、一貫した非軸対称計算の重要性が示唆された。

次に、境界条件として総トロイダルプラズマ電流が未知の場合に対応した計算手法を示し、ディスラプション時の電流クエンチを模擬した軸対称計算において既存コードとの比較を行った。開発したコードによる軸対称計算結果は既存コードの結果を一定の時刻まで再現したことから、総電流が未知の場合の計算手法も概ね確立されたといえる。

5. Conclusions

本研究では MHD 平衡、渦電流、磁場拡散を自己無撞着に解く非軸対称統合計算手法を開発し、実装したコードの妥当性を検証した。開発したコードは標準的な三次元平衡ソルバーを用いているため、既存研究との親和性が高い。また、モジュール構造により既存の統合コードと同様の柔軟な運用が想定され、今後の非軸対称計算の進展が期待できる。

[1] Yushiro Yamashita *et al.* Plasma and Fusion Research (2022) 17: p.1403104.

[2] Yushiro Yamashita *et al.* Journal of Plasma Physics (in press)

[3] Yushiro Yamashita *et al.* (in preparation for submission)