

## 多層磁気面法によるトカマクプラズマの非軸対称平衡解析

## Non-axisymmetric Equilibrium Analysis of Tokamak Plasmas by Multi-layers Method

王 靖霆<sup>1</sup>, 筒井 広明<sup>2</sup>WANG Jingting<sup>1</sup>, TSUTSUI Hiroaki<sup>2</sup>,東工大・融合系<sup>1</sup>, 東工大・研究院<sup>2</sup>TSE, Tokyo Tech.<sup>1</sup>, IIR, Tokyo Tech.<sup>2</sup>

我々は従来のトカマクに非軸対称磁場を印加することで、垂直位置不安定性を伴わない縦長断面形状を持つ配位を提案し、位置安定化のためのサドルコイルをもった小型トカマク装置、PHiX(Plasma with Helical fields initiative eXperiments)を開発し実験を開始した。PHiXに設置された矩形の分割サドルコイルが生成する非軸対称磁場が、フィードバック制御なしでも不安定なプラズマ上下位置を安定化することを実証した[1]。そして、3次元多層磁気面法で、非軸対称磁場の受動的に安定な平衡配位の解析を行い、サドルコイルの閉じ込め特性を数値計算で解明することは本研究の最終的な目的である。今回は、3次元多層磁気面法の計算コードの開発を説明する。

多層磁気面法 (multi-layers method) とは仮想仕事の原理を用いた平衡解析の手段である。プラズマ平衡を求める際、Grad-Shafranov 方程式を解かず自由エネルギーの極小から導いており、安定平衡解を求められる。自由エネルギーの極小を求めるにあたって、系は磁束保存系とした。プラズマを多層の磁気面 ( $\psi = \text{const.}$ ) で模擬し、平衡状態では電流面と一致し、プラズマ電流はその磁気面にのみ流れる表面電流であると仮定する。フーリエ級数を用いて電流面の形状を定義する。

$$\rho = \rho_0 \left( \sum_{i=1}^n (a_{1i} \cos(n\theta + a_{2i}) + a_{3i} \sin(n\theta + a_{4i})) \right. \\ \left. \sum_{i=1}^n (a_{5i} \cos(n\phi + a_{6i}) + a_{7i} \sin(n\phi + a_{8i})) \right) \quad (1)$$

$$R = R_0 + R_1 \left( \sum_{i=1}^n (b_{1i} \cos(n\phi + b_{2i}) \right. \\ \left. + b_{3i} \sin(n\phi + b_{4i})) \right) \quad (2)$$

$$Z = Z_0 + Z_1 \left( \sum_{i=1}^n (b_{4i} \cos(n\phi + b_{5i}) \right. \\ \left. + b_{6i} \sin(n\phi + b_{7i})) \right) \quad (3)$$

ここで、 $\rho, R, Z$  はそれぞれプラズマ小半径、磁気軸 ( $R, Z$ ) 座標である。フーリエ級数を  $n$  まで展開する。

磁場を生成する外部コイルと真空容器は複数のリングコイルで近似する。真空容器模擬コイルを流れる電流は渦電流を模擬する。電流源を含む系の平衡配位は、電流源が供給するエネルギーを含めた自由エネルギーを定義することで、自由エネルギー極小条件で求めることができる。線電流系の自由エネルギーは、

$$U = \frac{1}{2} \sum_{\psi_i = \text{const.}} \psi_i I_i - \frac{1}{2} \sum_{I_j = \text{const.}} \psi_j I_j \quad (4)$$

で与えられる。ここで、 $\psi_i, I_i$  は  $i$  番目の線電流の鎖交磁束および電流である。第1項は、プラズマ、真空容器など電源のつながっていない部分のエネルギー、第2項は、電源のつながっている外部磁場コイルのエネルギーを表す。磁束  $\psi_i$  と電流  $I_i$  は以下の関係で与える。

$$\psi_i = \sum_j M_{ij} I_j \quad (5)$$

ここで、 $M_{ij}$  は相互インダクタンスである。

磁気軸座標と磁気面のフーリエ級数の係数を変数として、プラズマの形を変化しながら、相互インダクタンスを求めて系の自由エネルギーの極小値を探す。極小ときの解は安定平衡解である。

## References

- [1] S. Naito, M. Murayama, S. Hatakeyama, D. Kuwahara, Y. Suzuki, H. Tsutsui, and S. Tsuji-Iio. Stabilization of vertical plasma position in the phix tokamak with saddle coils. *Nuclear Fusion*, 61(11):116035, oct 2021.