

磁性体を考慮した三次元多層磁気面法による
トカマク・プラズマの平衡解析

**Equilibrium Analysis of Tokamak Plasma
by Three-Dimensional Multi-Layers Methods Including Magnetic Material**

梅澤 和大, 筒井 広明, 飯尾 俊二

UMEZAWA Kazuhiro, TSUTSUI Hiroaki, TSUJI-IIO Shunji

東工大
Tokyo Tech

我々は鉄心、及び、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を開発し実験を開始した。この装置のプラズマ位置制御のために多層磁気面法を改良した。この方法ではモデル化された真空容器、磁性体、ポロイダル磁場コイル、複数の電流層によって表されるプラズマを扱う。プラズマ平衡を求める際、この方法では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。

多層磁気面法ではプラズマ電流は多層の磁気面のみに流れる表面電流とし、このような電流面を複数用いる。本研究では電流面を複数の線電流を用いて近似する。今回はフーリエ級数を用いて電流面の形状を定義した (式1)。

$$a = a_0 \left(1 + \sum_{i=1}^n \{c_i \cos(n\theta) + s_i \sin(n\theta)\} \right) \quad (1)$$

ここで、プラズマの鎖交磁束を固定し、プラズマの座標及び形状を変化させたときの自由エネルギーの極小を求めることで安定平衡解を得る。自由エネルギーはプラズマ模擬コイルを含む各ポロイダル磁場コイルの相互インダクタンスと各コイルの鎖交磁束から求められる (式2)。

$$U = (1/2) \Psi^T (M)^{-1} \Psi \quad (2)$$

相互インダクタンスを計算する際、空芯の場合は楕円積分を用いる (式3)[1]。

$$M_{air} = -\mu_0 \sqrt{r_1 r_2} \left\{ \left(h - \frac{2}{h} \right) K(h^2) + \frac{2}{h} E(h^2) \right\} \quad (3)$$

$$\text{ここで, } h = \sqrt{\frac{4r_1 r_2}{(r_1 + r_2)^2 + (z_2 - z_1)^2}}$$

しかし磁性体の影響がある場合には同様の方法を用いることはできない。今回は無限長円柱で近似した解析式 (式4)[2]を使用した。

$$M_{iron} = \frac{2\mu_0 r_1 r_2}{a_c} \int_{x_{min}}^{x_{max}} \left\{ K_1 \left(\frac{r_1}{a_c} x \right) \cdot K_1 \left(\frac{r_2}{a_c} x \right) \cdot \cos \left(\frac{z_2 - z_1}{a_c} x \right) \frac{(\mu_r - 1) \cdot x \cdot I_0(x) \cdot I_1(x)}{(\mu_r - 1) \cdot x \cdot K_0(x) \cdot I_1(x) + 1} \right\} dx \quad (4)$$

磁気面中心の座標とフーリエ級数の係数を変数として、磁束と相互インダクタンスから求められる自由エネルギーの極小を算出すると図1のような結果が得られた。これは、多層磁気面法によって求めたプラズマの平衡と等磁束面である。図の長方形は真空容器、内部の点の集合は線電流で近似したプラズマを示す。

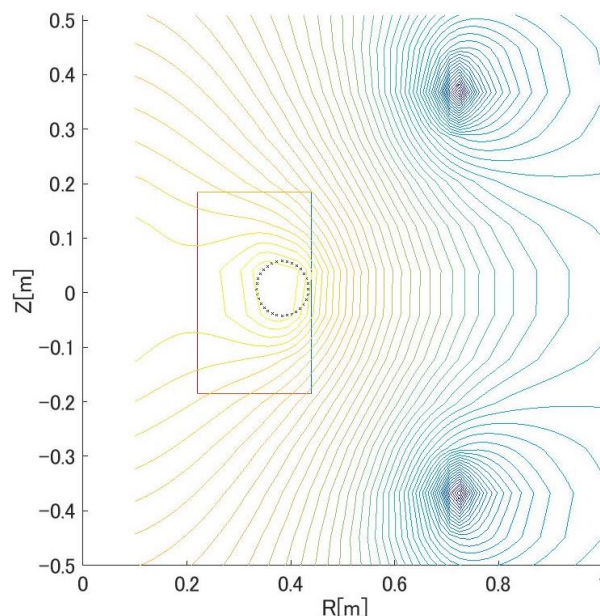


図1 PHiXにおける平衡。

[1] JAERI-M 6469, pp. 4-5, 2 1976.

[2] PLASMA PHYSICS AND FUSION TECHNOLOGY(A1400), pp. 24-26, 1980.