O-20

境界積分方程式による FRC プラズマの形状決定法の開発

Development of Sharp Identification of Field-Reversed Configuration Plasma Based on Boundary Integral Equation

○小林汰輔[1], 岩坂純平[1], 関口純一[2], 浅井朋彦[2], 高橋努[2]
*Taisuke Kobayashi[1], Junpei Iwasaka[1], Junichi Sekiguchi[2], Tomohiko Asai[2], Tsutomu Takahashi[2]

Abstract: A new sharp identification of Field Reversed Configuration (FRC) has been developed. Cauchy Condition Surface method is a method that can precise calculate outer most magnetic surface of plasma with curve magnetic line. To try to fit CCS method to FRC plasma, setting boundary condition was evaluated by calculated flux and flux density at boundary region using boundary integral equation.

1．概要

私達の研究室の実験装置 NUCTE-Ⅲでは磁場反転配位プラズマ(Field Reversed Configuration)を生成し，磁場による閉じ込め実験を行っている．FRC プラズマは単連結構造となっており，電流方向はトロイダル方向のみ持つという特徴を持つ．現在研究で用いている解析手法ではプラズマ全体の形状を特定するのは困難であることから[1]新しい形状決定法の開発が求められている．今回 CCS 法を用いた形状決定法を用いるために境界積分方程式を解き磁束密度と磁束関数を求めるプログラムの開発を行なった．

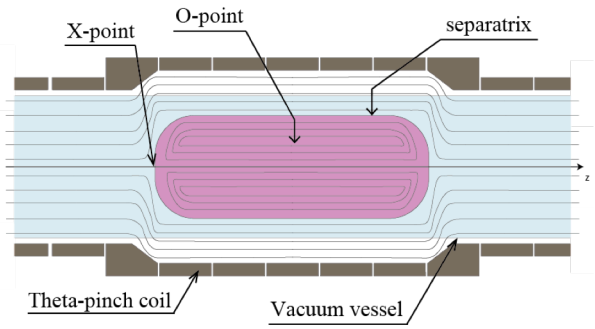

Fig.1 Field-Reversed Configuration

2．CCS 法

2.1. 解析原理

CCS(Cauchy Condition Surface)法は現在トカマクやヘリカル方式で用いられている位置形状同定法であり，その解析原理は以下のマクスウェル方程式により求められる電流と磁場の関係式から始まる.[2]

$$\nabla\cdot\left(\frac{\nabla\phi}{r^2}\right)=-\frac{\mu_0 j_\theta}{r} \quad (1)$$

ここでϕ, μ_0, j_θは磁束，真空の透磁率，トロイダル方向の電流密度である．この偏微分方程式の解法としてグリーン関数$G_{(x,y)}$を用いた以下の積分形式解を用いた．

$$-\gamma\psi=\int_{\partial\Omega}\left[G_{(x,y)}\nabla\psi-\psi\nabla G_{(x,y)}\right]\cdot\frac{d\mathbb{S}}{r_{\tilde{y}}^2}+\int_\Omega G_{(x,y)}\mu_0 j_\theta\frac{dV}{r_y} \quad (2)$$

$$\gamma\equiv\left\{8\pi^2(x\subset\Omega),4\pi^2(x\subset\partial\Omega),0\left(x\subset(\Omega+\partial\Omega)\text{以外}\right)\right\}$$

ここでψは磁束関数$\left(\psi=\frac{\phi}{2\pi}\right)$であり，添え字について，x,y は磁束関数の解析点と積分点である.左辺の解析点はある閉曲面(FRC プラズマは回転対称と考えることができるため実用上は閉曲線)を設定し，閉曲面での磁場と磁束関数(右辺第一項)と閉曲面内の電流(右辺第二項)と等しいため，右辺の値が既知であれば領域内の磁束関数が求まる．CCS 法はこの解析点と閉曲面の設定を工夫し境界積分方程式を解くことでプラズマ面を求めている．

設定される方程式は Table.1 の５つである．ここで添字$\partial\Omega_P$, $\partial\Omega_S$, $\partial\Omega_B$はそれぞれプラズマ面,測定面,境界面であり，これらの組み合わせで閉曲面となる．境界面では磁束や磁束密度は 0 と考える．計測面は設置された計測器に沿って形成される．離散化したこれらの積分方程式を行列表示にして，最小二乗法により閉曲面上の k 磁束関数と磁束密度を計算するのだが，連立式の多さからセンサー数の条件を緩和し，数に応じた精度で形状を計算することができる．

プラズマ面はプラズマ表面の位置がわからないのだから考えることはできないのだが，プラズマの中に十分含まれた面を仮想プラズマ面と与えることができれば，その面で求められる値を使い求めた真空

１：日大理工・院(前)・物理, ２：日大理工・教員・物理

領域の磁束関数は本来の値と解析上等しくなる．これより境界値を求めた後にそれらの値を使い,閉曲面内の真空領域の値を求めることでプラズマ表面の位置が同定できる．

Table.1 連立方程式

	解析点	積分範囲(閉曲面)
1	$\partial\Omega_S$	$\partial\Omega_B - \partial\Omega_S$
2	$\partial\Omega_P$	$\partial\Omega_S - \partial\Omega_P$
3	$\partial\Omega_S$	$\partial\Omega_S - \partial\Omega_P$
4	計測点	$\partial\Omega_B - \partial\Omega_P$
5	$\partial\Omega_P$	$\partial\Omega_B - \partial\Omega_P$

2.2. FRC プラズマへの適用

FRC プラズマに適用するにあたって直面する問題は二つある．一つ目は計測器の設置条件から計測面を閉じることができないという点である．これは FRC プラズマが単連結構造であることに起因する．二つ目の問題は金属導体に流れる誘導電流の扱いである．設定した閉曲面内部に存在する電流源は既知でなければならないが，閉じ込め容器端部に設置されている真空フランジに流れる電流は測定する事は困難である．

これらの問題は解析上での工夫で解消を行う．一つ目の問題は計測面を z 方向に十分伸ばし境界面と接続する事を検討している．設定する閉曲面は Fig.2 に記載した．二つ目はプラズマの配位持続時間の間は金属導体内に磁場がしみこまないと考え境界条件として組み込む等の工夫をすることで解消する．

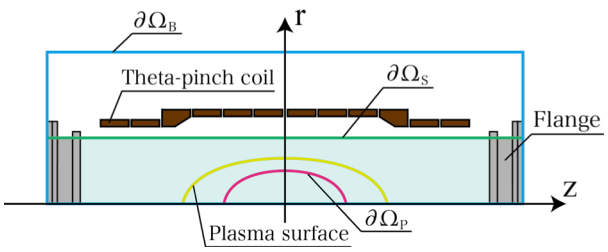

Fig.2 境界条件

3．開発状況

3.1. プログラム開発

現在境界積分方程式を解く過程において設定した境界領域中の未知の値を求めたときの数値解の依存性を検証中である．テストプログラムとして,円環電流を$(r,z) = (0.13m, 0m)$に設置し，$r = 0.13m$での磁束と磁束密度を計算した．今回はメッシュを 25mm に設定し，100mm ごとのメッシュの値を未知としてそこでの磁束と磁束密度を求めた．$\partial\Omega_S$領域の長さを 8m，6m，4m，2m と変え計算解の依存性を Fig.3 に示したが，計算領域を長くすることで解が収束する結果には至らなかった．今後も継続しプログラムの評価,改良を行う．

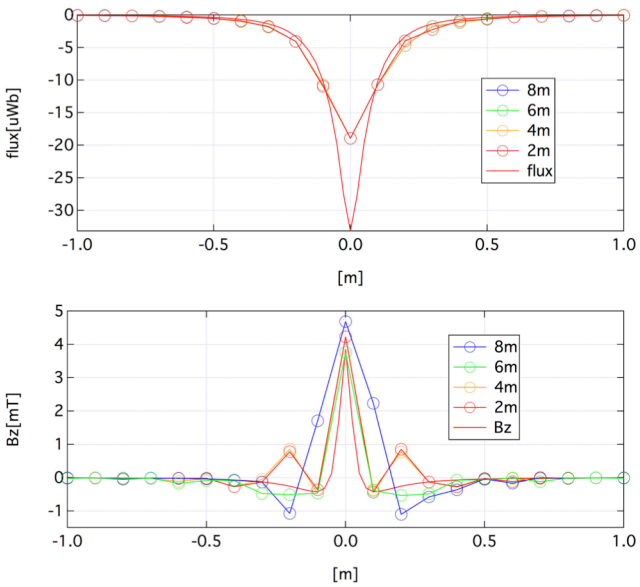

Fig.3 数値解の計算領域依存性
(上 ： 磁束 ， 下 ： 磁束密度)

3.2. 実験

解析のために必要なパラメータは計測面での磁場と磁束,閉曲面内の電流である．Bz プローブは 2m の放電管に 55mm の等間隔に設置する．フラックスループはコイル内で磁束が保存すると過程しコイル内は計測器一つ，コイル外では 55mm の等間隔に設置．ロゴスキーコイルは各コイルに設置し計測を行う．Bz プローブとフラックスループは Fig.4 のような配置となる．

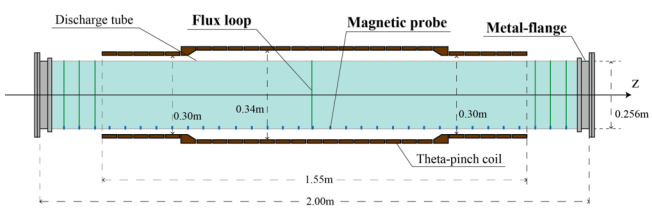

Fig.4 実験条件

4．参考文献

[1]M.Tuszewski,W.T.Armstrong,Rev.Scl.lnstrum,54,163 (1983)

[2] K.Kurihara, Nucl. Fusion 33, 399 (1993)