O-14

FRCプラズマにおけるCCS法の適用

Application of CCS method to the plasma shape identification of filed-reversed configuration plasmas

○岩坂純平[1]，星野拓雄[1], 関口純一[2]，浅井朋彦[2]，高橋努[2]
*Junpei Iwasaka[1]，Takuo Hoshino[1]，Junichi Sekiguchi[2]，Tomohiko Asai[2]，Tsutomu Takahashi[2]

Abstract: A new shape identification for a field-reversed configuration (FRC) has been developed. Cauchy Condition Surface (CCS) method can precisely calculate the most outer magnetic surface (separatrix shap) of plasma with a curve magnetic line. The CCS method solves the Grad-Shafranov equation using boundary element method. The CCS method requests a closed surface, which the diagnostics are installed, surround the separatrix of the plasma. We have formulated the CCS method to apply a singly connected plasma, for example, FRC plasmas.

1.　研究背景・目的

磁場閉じ込めプラズマの研究において, 生成したプラズマの形状を知ることはそのプラズマを評価するにあたり重要な要素となる. 現在, FRCプラズマにおける位置形状の同定は, 磁気プローブ, 磁束ループを用いた排除磁束法によって行われている. しかし, 排除磁束法は，一様な磁場分布（真直な磁力線）であることを仮定するため, 磁場分布が非一様になる（磁力線が曲率を持つ）プラズマ端部では形状の同定が困難であることから, 様々な境界条件で使用できる新たな形状決定法の開発が必要となっている.

本研究では, 現在トカマクプラズマの位置形状同定に使われているコーシー条件面法をFRCプラズマに適用することで上述の問題を解決することを目的とする.

2.　CCS法

プラズマを解析領域の外に出した穴の空いた領域を用いることで, プラズマ電流分布を求めずに位置形状の再構築を可能にした方法が境界要素法であり, その解析領域の工夫から, センサー曲面上での線積分を回避した方法が CCS(Cauchy Condition Surface)法である.

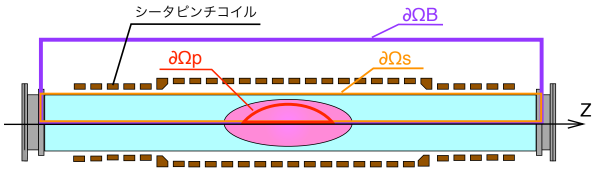

Fig.1 Boundary surface to apply the FRC plasma

CCS法は現在トカマクなどで用いられている位置形状同定法であり, その原理はマクスウェル方程式から得られる以下の電流と磁場の関係式を解くことにより, 領域内の磁束関数分布を計算することができる.

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

ここで ϕ，μ_0，j_0は，ポロイダル磁束(磁束関数に2πを掛けたもの)，真空の透磁率，トロイダル方向の電流密度である. ここで偏微分方程式の解法としてGreen関数法を使用し, 微分演算子を外して積分を含む形式に変換することで解析解を構築する.

$$\begin{aligned}\sigma\cdot\phi(x)&=\int_{\partial\Omega}[G(x,y)\cdot\nabla\phi(y)-\phi(y)\cdot\nabla G(x,y)]\\&\equiv\cdot\frac{dl(y)}{r_y}+\int_{\Omega}[\mu_0 j(y)\cdot G(x,y)]dS(y)\end{aligned} \qquad (2)$$

ここでσ　{$8\pi^2$（$x\subset\Omega$）, $4\pi^2$（$x\subset\partial\Omega$），0($x\subset$（Ω+∂Ω）以外0)}である. ∂Ω, Ωの領域の選び方によって様々な関係式が得られる. また, グリーン関数を用いたことにより偏微分方程式の解が近似表現でないため高精度の計算が期待できる. 計測点設置面上の計測量への条件を緩和するため, 仮想プラズマ面上での磁束と磁束密度(Cauchy条件)を最小二乗法で計算することにより, どの種類の計測であっても計測点の数に応じた精度が得られるため, 高い精度の位置形状の同定が可能である.

5つの境界を設定し, それぞれについて求めた解析解を離散化し行列表示にする. それらを最小二乗法により計算することで磁束関数と磁束密度を求めることができる. 連立方程式の数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.

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	$\partial\Omega_S$	$\partial\Omega_B-\partial\Omega_P$

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問題は二つあ

1:日大理工・院(前)・物理, 2:日大理工・教員・物理

る.一つ目はFRCプラズマが単連結構造であることから計測面を閉じることができないという点である.二つ目は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ことが困難なことである.閉曲面内部の電流値は既知でなければ計算することができない.

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ことで解決を図る.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.1参照).

3.　プログラム開発

現在CCS法を用いて精度よく領域内の磁束関数を計算することができている(Fig.3参照).計算条件は装置を覆うようにソレノイドコイルを設置し,センサー設置領域($\partial\Omega_S$)を横長の長方形,仮想プラズマ領域($\partial\Omega_A$)を円形とし,その中心に円環電流が流れている状態を仮定した(Fig.2参照).

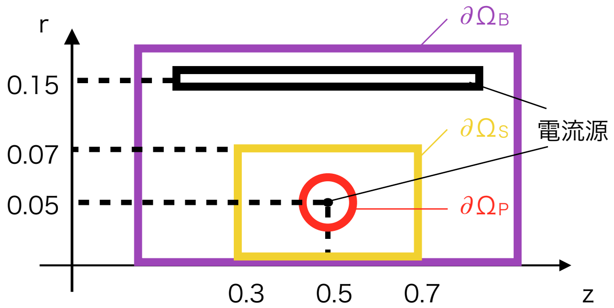

Fig.2　Boundary condition of CCS method

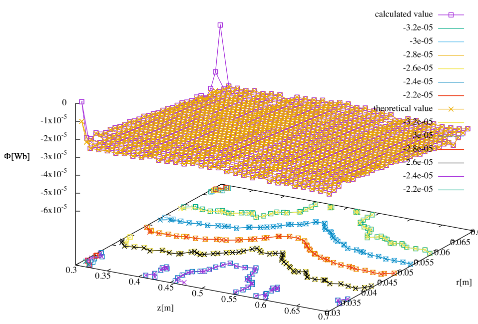

Fig.3　Contour plot of magnetic Flux Function using the closed surface (Tokamak like closed surface) and estimated magnetic flux function

次に実際の計測のように真空容器の外からプラズマを囲むように計測器を設置することができない条件(Fig.4参照)で計算を行うと中心軸付近に向かって誤差が大きくなった.

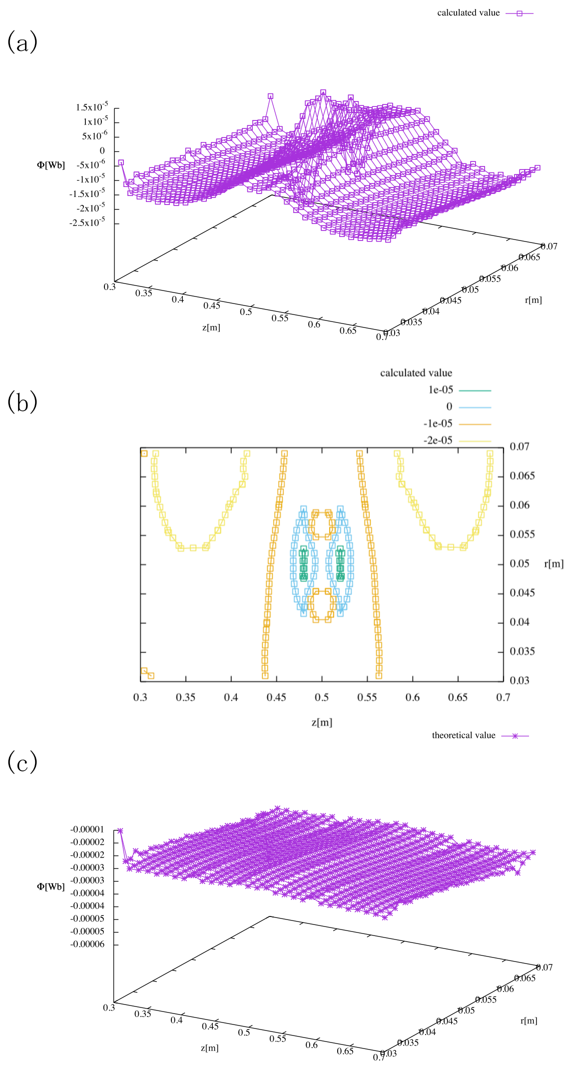

Fig.4 Estimated flux function profile (a) and Contour plot (b)by CCS method using FRC like boundary surface, and (c)input flux function

Fig.3とFig.4の比較から，FRCプラズマのような計測装置の配置（放電管表面での測定値のみ）での測定値のみを境界値に組み込むことでは正確なセパラトリックスを求めることは困難であることがわかった.今後,実験装置に合わせて金属フランジの境界条件やFRCプラズマの対称性などの条件を組み込むことでどのようになるか検討を行う.

4.　まとめ,今後の展望

計測面全域で電流値,磁束関数,磁束密度を計測できる場合では精度よく計算できるプログラムを作成することができた.しかしFRCへの適用を実現するため境界条件を工夫する必要がある.

5.　参考文献

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

1:日大理工・院(前)・物理,2:日大理工・教員・物理