

磁場反転配位プラズマの形状測定

日大生産工 〇大熊 康典 日大・理工(院) 廣井 雅典
日大・理工(院) 池山 多恵子 日大・理工 野木 靖之

1 まえがき

磁場反転配位 (Field-Reversed Configuration : FRC) は、開いた磁力線領域内に軸対称トーラス型の閉じた磁力線領域を持ち、ポロイダル磁場のみで構成される。これらの領域の境界面はセパトリックスと呼ばれ、プラズマは主に閉じた磁力線領域、すなわちセパトリックス内部に閉じ込められている。FRCプラズマの形状は長さ方向に比べて半径方向が非常に短い超扁平なので、円柱状のプラズマとして扱われる。また、FRCは、磁気軸 (Null-point) とセパトリックスが対称軸 (z 軸) と交差する場所 (X-point) で磁場がゼロになる。セパトリックス半径 r_s は z 軸からセパトリックスまでの距離、セパトリックス長 l_s はセパトリックス両端のX-point間の距離を示す。

FRCプラズマの形状は、排除磁束半径 $r_{\Delta\phi}$ の z 軸方向分布によって見積もることができる。排除磁束半径 $r_{\Delta\phi}$ は、放電管壁に設置された磁気プローブによって検出される z 軸方向の磁場と装置中央面に設置された磁束ループによって検出される放電管内の磁束によって導出される。これはFRC実験でよく用いられる方法で、排除磁束法と呼ばれる。

排除磁束法によって得られた $r_{\Delta\phi}$ の z 軸方向分布は、FRCプラズマ中央部から半値幅に相当する長さ程度まではセパトリックス形状とほぼ一致する。しかし、端部のX-point近傍では開いた磁力線に含まれる周辺プラズマ等の影響を強く受けるので、 $r_{\Delta\phi}$ が r_s よりも大きくなる。そのため、 l_s やX-pointの位置を精度良く測定することができない。

そこで本研究では、セパトリックス長 l_s を正確に測定するための実験方法を確立する

ことを目的として、セパトリックス半径 r_s が (1) 式の関係から得られる径方向 r によって近似できる場合に、セパトリックス形状を3つのパラメータ (中央の半径 a 、中央からX-pointまでの長さ b 、形状係数 n) で決めることができる測定法を検討し、実験結果について調べた。

$$\frac{r^2}{a^2} + \frac{|z|^n}{b^n} = 1 \quad \dots(1)$$

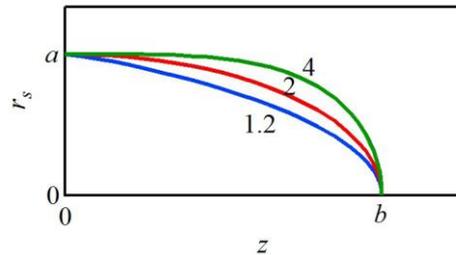


図1 FRCプラズマの形状と形状係数 n の関係

2 セパトリックス形状の測定方法

シータピンチコイル内部では磁場が一様に分布していると仮定すると、装置中央面 ($z=0$) における排除磁束半径 $r_{\Delta\phi}(0)$ は、真空放電時の磁束 ϕ_v と磁場 $B_v(0)$ 、プラズマ放電時の磁束 ϕ_p と磁場 $B_p(0)$ 、磁束ループの半径 r_ℓ によって (2) 式のように表される。

$$r_{\Delta\phi}(0) = r_\ell \left(1 - \frac{\phi_p B_v(0)}{\phi_v B_p(0)} \right)^{1/2} \quad \dots(2)$$

また、コイル内部の磁束保存を仮定すると、コイル半径を $r_w(z)$ として (3) 式が得られる。

$$r_{\Delta\phi}(z) = r_w(z) \left[1 - \left(1 - \frac{r_{\Delta\phi}^2(0)}{r_w^2(0)} \right) \frac{B_p(0) B_v(z)}{B_v(0) B_p(z)} \right]^{1/2} \quad \dots(3)$$

Separatrix shape of field-reversed configuration

Yasunori OHKUMA, Masanori HIROI, Taeko IKEYAMA and Yasuyuki NOGI

この $r_{\Delta\phi}(z)$ によって、排除磁束半径 $r_{\Delta\phi}$ の z 軸方向分布を求めることができる。

次に、セパトリックス半長 b と形状係数 n を求めるために、 $r_{\Delta\phi}(z)$ と試行係数 n' を用いて、試行関数 f を(4)式のように定義する。

$$f = \frac{z}{\left(1 - \frac{r_{\Delta\phi}^2(z)}{a^2}\right)^{1/n'}} \quad \dots(4)$$

この(4)式と(1)式から(5)式が得られる。

$$f = b^n z^{1-\frac{n}{n'}} \quad \dots(5)$$

(5)式から、 $n = n'$ のときに $f = b$ となり、 f は位置 z の依存性が無くなるのが分かる。したがって、 n' を適切な値にすることでセパトリックス半長 b を決定することができる。

セパトリックス形状におけるパラメータを、 $a/r_w = 0.4$ 、 $b/r_w = 2.4$ 、 $n = 2$ とした場合についてモデル計算を試みた結果を図2に示す。 $n' = 1.98$ のときに $0.3 \leq z/r_w \leq 2$ の範囲で $f/r_w = 2.396$ の値が得られ、この測定法の妥当性と有用性が確認された。ここでは $a = r_{\Delta\phi}(0)$ とした式

$$f = \frac{z}{\left(1 - \frac{r_{\Delta\phi}^2(z)}{r_{\Delta\phi}^2(0)}\right)^{1/n'}} \quad \dots(6)$$

を用いた。

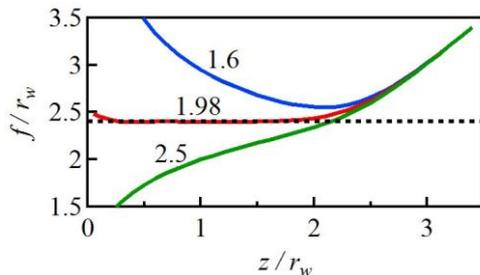


図2 試行係数 n' と試行関数 f の関係

3 実験結果および検討

本研究には、日本大学理工学部にある実験装置NUCTE IIIを使用した。この装置は、円筒形の θ ピンチコイルと放電管で構成されている。コイルの長さは $l_{\text{coil}} = 1.5$ m、内径は $r_w = 17$ cmで、放電管の内径は $r_t = 11.8$ cmである。先に述べた磁気計測器の他に、電子密度、制動放射光強度、揺動磁場、電場を測定するための計測器が設置されている。

図3に、磁気計測によって得られた排除磁束

半径 $r_{\Delta\phi}$ の z 軸方向分布を示す。

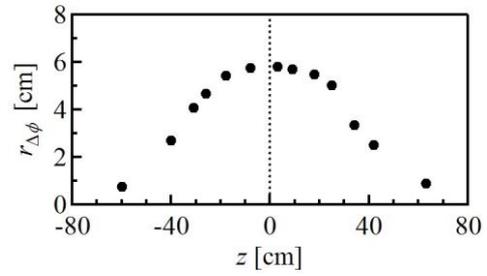


図3 排除磁束半径の z 軸方向分布

また、図4に、 z 軸の(-)側で得られた $r_{\Delta\phi}$ (白丸)を $z=0$ で折り返して(+)側に重ね、(+)側の $r_{\Delta\phi}$ (黒丸)と合わせて z 軸方向依存性を平滑化した結果(実線)を示す。破線は(1)式に対して $a = 5.85$ cm、 $b = 40$ cm、 $n = 2.65$ としたセパトリックス形状である。

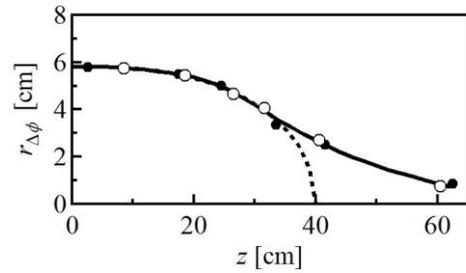


図4 排除磁束半径の z 軸方向分布

(6)式を用いて n' と f の関係を検討した結果、 $n' = 2.65$ のときに 10 cm $\leq z \leq 30$ cmの範囲で $f = 40$ cmの値が得られた。これにより、図3の実験結果では、セパトリックスの形状が $a = 5.85$ cm、 $b = 40$ cm、 $n = 2.65$ となることが分かった。

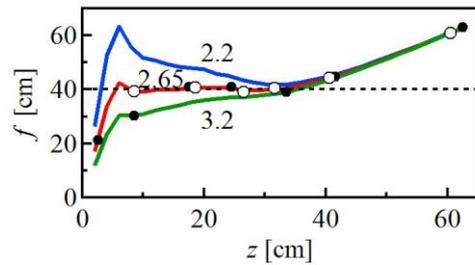


図5 試行係数 n' と試行関数 f の関係

4 まとめ

FRCプラズマのセパトリックス形状を、磁気計測結果と $r^2/a^2 + |z|^n/b^n = 1$ の関係式から求める測定方法を提案し、検証を行った。その結果、セパトリックス形状が3つのパラメータ(a 、 b 、 n)で精度良く測定され、新たな測定法の有用性が確認された。