磁場反転配位プラズマ周辺部の電場計測

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

1 まえがき

磁場反転配位(FRC: Field-Reversed Configuration)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ラ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 セパラ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。

このFRCプラズマは、生成してまもなく自 発的に回転する(プラズマ柱の対称軸を中心 軸とする自転運動)性質があり、この回転速 度の増加によってプラズマ柱の $r-\theta$ 断面が 円形から楕円形に変形を起こし、n=2モー ドの回転不安定性が発生する。この不安定性 は回転しながら成長し、最後には放電管壁に 接触してFRCプラズマを崩壊させる。

このような巨視的不安定性を生み出す回 転の原因には、FRCプラズマ表面の電場短絡 と粒子損失という二つの機構が有力である と考えられている。しかし、回転機構を直接 捕らえた実験は行われておらず、不明な点が 多い。また、回転不安定性の抑止法として、 多重極磁場と呼ばれる安定化磁場を外部か ら印加して楕円変形を抑える方法が知られ ているが、必要とされる磁場強度が多重極磁 場の配位によって異なるという実験結果が 示されており、抑止機構についても完全には 解明されていない。

FRCプラズマの自発的な回転や回転速度 の増加,多重極磁場による回転不安定性の抑 止には、FRCプラズマ表面における電場の振 る舞いが大きく影響していると考えられる。 そこで本研究では、これらの物理的な機構を 明らかにするために、電場測定用のプローブ を新たに製作して電場計測実験を行った。

2 実験方法および測定方法

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 $l_{coil} = 1.5 \text{ m}$ 、内径は $r_w = 17 \text{ cm}$ で、放電管の内径は $r_t = 11.8 \text{ cm}$ である。また、電場測定の他に、電子密度、制動放射光強度、セパラトリックス半径、揺動磁場を測定するための計測器が設置されている。実験装置および計測器の概要を図1に示す。



図1 実験装置および計測器の概要

放電管壁に設置された電場プローブは、二枚 の銅板(面積 $S = 2 \times 10^{-3} \text{ m}^2$)とそれらを接続す るロード抵抗 R_L (= 50k Ω)で構成されている。 プローブ表面に誘起される電荷 Q は、 R_L を流 れる電流 I の時間積分で表されるので、 R_L に かかる電圧 V_L の時間積分を測定することで径 方向電場 E_L の値を得ることができる。

$$E_{r} = \frac{Q}{\varepsilon_{0}S} = \frac{\int I \,\mathrm{d}t}{\varepsilon_{0}S} = \frac{\int V_{\mathrm{L}} \,\mathrm{d}t}{\varepsilon_{0}SR_{\mathrm{L}}} = \frac{RC}{\varepsilon_{0}SR_{\mathrm{L}}}V \qquad(1)$$

ここで、*V*は*RC*(=100µs)積分回路を通し て時間積分された電圧である。電場プローブの

Detection of electric field around field-reversed configuration plasma

Yasunori OHKUMA, Taeko IKEYAMA, Masanori HIROI and Yasuyuki NOGI

概要を図2に示す。



図2 電場プローブの概要

3 実験結果および検討

製作した電場プローブにより、振幅が最大で100V/m,周波数が100kHz程度の信号が検出された。方位角方向に π /4rad間隔で設置した8個の電場プローブの信号をフーリエ解析して得られた、トロイダルモードの時間変化を図3に示す。(a)はn=1モード、(b)はn=2モードを表している。この図から、時刻 $t=35\mu$ s付近でn=2モードが発生していることが分かる。



図3 セパラトリックス周辺での径方向電場

制動放射光強度および揺動磁場の信号についても同様のフーリエ解析を行ってFRCプラズマのMHD運動を見積もり、この径方向電場の時間変化と比較した。その結果、MHD運動におけるn=1モード(装置の中心軸に対するプラズマ柱全体の移動、傾斜、回転運動)との関連性は見られなかったが、n=2モード(回転不安定性)とは相関関係があることが分かった。

そこで,装置座標系のx-y面における径方 向電場のn=2モードの振幅が最大となる角 度 θ_0^E と制動放射光強度の径方向分布から導 出したFRCプラズマの楕円断面の長軸の傾斜 角度 θ_0^{rad} を比較したところ, $t=40 \sim 50 \mu s$ の 時間では,

$$\theta_0^E - \theta_0^{\text{rad}} = 75 \sim 80 \text{ deg}$$

となることが分かった。

次に、この結果から径方向電場を作り出し ているFRCプラズマ表面の電荷密度の構造に ついて検討した。図4は予想される電荷密度の 分布を示したものである。(a)はn=2モード の分布 (n=2 mode) を想定した図で、自転 による遠心力(径方向の力)が作用している 場合、イオンのドリフト速度が電子よりも速 くなることから生じる分布である。 $\sigma_{\rm u}$ は正の 符号を持つ値である。(b)は同一符号の電荷密 度分布 (double-sided) を想定した図で、プラ ズマ柱を導体としてドリフト運動を無視した 場合、楕円の形状に合わせたクーロンの反発 力によって生じる分布である。 $\sigma_{0} \ge \sigma_{0}$ は, FRCプラズマ表面がイオン過剰(ion-rich)の 場合は正の符号,電子過剰(electron-rich)の 場合は負の符号を持つ値となる。

ラプラス方程式を用いて実験結果を検討した結果,n=2 mode分布とdouble-sided分布を重ね合わせることで電場の振る舞いを説明できることが分かった。また,double-sided分布はFRCプラズマ表面がelectron-richになっていることも分かった。



図4 FRCプラズマ表面の電荷密度分布

4 まとめ

製作した電場プローブによってFRCプラズ マ表面の電場の振る舞いを測定した。また, n=2モードにおけるFRCプラズマ表面の電 荷密度の構造を検討し, double-sided分布では electron-richであることが分かった。

(2)