O-2

分割型 sin-cos プローブを用いた揺動磁場計測による移送磁場反転配位プラズマのトロイダルモード解析

Mode analysis of fluctuating toroidal magnetic field for translating field-reversed configuration plasmas by newly developed sectored sin-cos probe

○廣橋光始[1]，長田昌之[2]，関口純一[3]，浅井朋彦[3]，髙橋　努[3]
*Koji Hirohashi[1], Masayuki Nagata[2], Junichi Sekiguchi[3], Tomohiko Asai[3], Tsutomu Takahashi[3]

Abstract: On FAT-CM device, two seed field-reversed configuration (FRC) plasmas formed by field-reversed theta pinch method, are translated, collided head-on and merged into an improved FRC plasma in a confinement region. Magnetohydrodynamic (MHD) motions, for example, Wobble motion of the translating FRC plasma may disturb the head-on collision. Therefore, we develop a new magnetic probe for a measurement of a magnetic fluctuation, a sectored sin-cos probe. Characteristic of the new probe are revealed. Using this new probe, amplitudes and a phase of the magnetic fluctuation for the translating FRC plasmas will be evaluated. The relation between the characteristics of the magnetic fluctuation and the confinement properties of the merged FRC plasmas will be clarified.

１．はじめに

Figure 1 に示す FAT-CM 装置では，閉じ込め領域両端にある生成領域（R,V-Formation）において種プラズマとなる２つの磁場反転配位（Field-reversed Configuration : FRC）プラズマを逆バイアステータピンチ法（FRTP 法）によって生成する．その後，外部磁場の勾配によってプラズマを対向して移送・衝突合体させ，大きなプラズマ半径を持ち長寿命の FRC を生成する．移送されるプラズマには，Wobble 運動などの磁気流体的な巨視的運動が発生しプラズマの中心軸ずれて衝突合体する可能性がある．この場合，Figure 2 に示すように，衝突する面の磁場構造が反平行にならず磁気再結合が起き難くなり合体が効率よく起きない可能性がある．従って，各生成領域で生成され移送される FRC プラズマの巨視的運動と衝突合体後のプラズマの特性の関係を調べる必要がある．

FRC プラズマの巨視的運動を観測する方法としてプラズマ柱を囲む周方向に並べられた磁気探針によって計測したトロイダル方向の揺動磁場をモード解析することによってプラズマ柱の運動を同定する方法がある[1]-[3]．揺動磁場が方位角 θ の関数として

$$B_\theta = \sum_{\ell=0}^{\infty} B_\ell e^{i\ell\theta} \tag{1}$$

表せると考える．ここで ℓ は揺動磁場のトロイダルモード数，B_ℓ は各 ℓ モードの振幅（複素振幅）であり，各モードの磁場の振幅 B_ℓ を得ることでプラズマ柱の巨視的運動を同定できる．

本研究では，巨視的運動の最大モード数が明確でないプラズマを対象とした場合でも高次のモードの影響を抑えることができ，従来の計測方法よりも高精度なモード同定が可能な分割型 sin-cos プローブを新たに開発した．

本研究は，この新しい計測装置を用いて FRC プラズマ衝突合体実験において，両生成領域から移送されるプラズマの巨視的運動により発生する揺動磁場の振幅や位相を評価し，衝突合体におけるプラズマの振る舞いの違いや合体後のプラズマの特性との関係を調べることを目的とする．

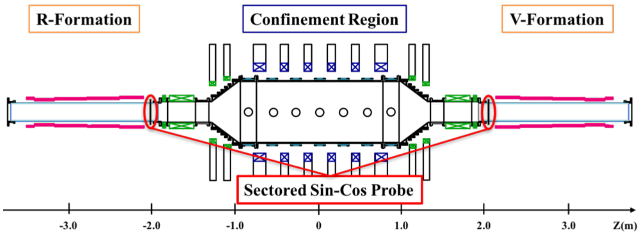


Figure 1. Schematic view of the FAT-CM device

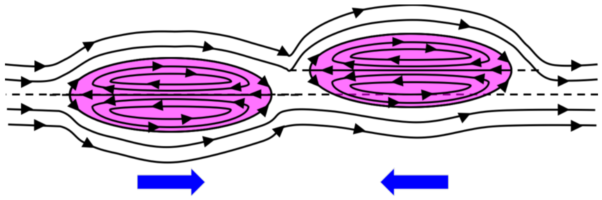


Figure 2. Radial shift of FRC plasma

1：日大理工・院（前）・物理　2：日大理工・学部・物理　3：日大理工・教員・物理

２．分割型 Sin-Cos プローブ

分割型 Sin-Cos プローブは Figure 3(a)に示すようにロゴスキーコイルを m 個に分割した形状をした磁気プローブである．全周の磁場を計測し，分割した各プローブに対応した$\sin n\theta$，$\cos n\theta$の重みをかけ，全てのプローブの値を足し合わせることでモード解析を行う．観測したいモードを n とした場合，プローブの出力に重みをかけ足し合わせた結果をそれぞれ V_{ss}, V_{sc} とすると

$$|V_{ss}| = mNaS\sum_{j=0}^{\infty}\frac{B_{\ell'}}{\ell'}\times\frac{m}{2n\pi}\left(1-\cos\frac{2n\pi}{m}\right) \quad (2)$$

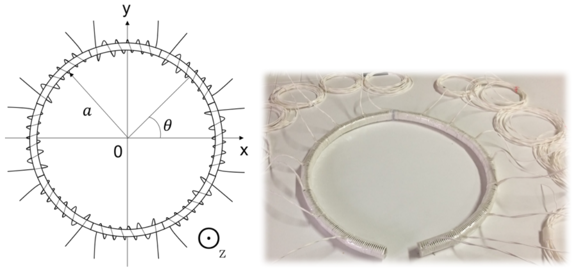
$$|V_{sc}| = mNaS\sum_{j=0}^{\infty}\frac{B_{\ell'}}{\ell'}\times\frac{m}{2n\pi}\left(1-\cos\frac{2n\pi}{m}\right) \quad (3)$$

となる．ここで $\ell' = mj \pm n$ は $\ell = n$ モードを観測する場合に混入するモードであり，j は整数で，N は各プローブの単位長さあたりの巻き数，S はプローブの断面積である．

分割型 sin-cos プローブは，$1/\ell'$の効果によって混入する高次のモードの影響を抑えることができるため，核融合プラズマ実験に一般的に用いられるミルノフコイル[1]に比べ低次モード解析の精度を向上できる（Figure 4）．ミルノフコイルの解析解を V_m とすると

$$|V_m| = mN'S\sum_{j=0}^{\infty}B_{\ell'}\times\frac{\sqrt{2}}{2} \quad (4)$$

となる．ここで N'はプローブの巻き数である．また，Table 1 に示すように分割数 m を増やすことによって混入する高次モードを減らすことができるため，磁気プローブの巻き数と断面積の積を$\sin n\theta$, $\cos n\theta$に比例させ全周を計測する sin-cos プローブ[2]に比べ作製が容易なだけでなく，同位置計測で複数のモードの同定が可能な利点をもつ．



(a)　　**(b)**

Figure 3. Sectored sin-cos probe

Table 1. Relation between sector number m and included mode in analysis result ℓ' in case of n=1

m	$\ell'=mj\pm n$ (j=0,1,2,…)
4	1,3,5,7,9,11,13,15,17,…
8	1,7,9,15,17,…
16	1,15,17,…

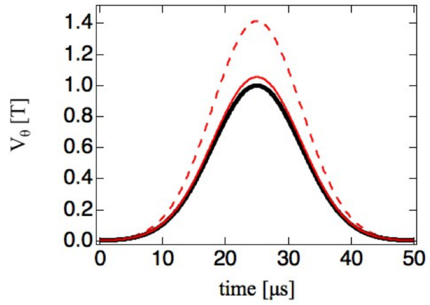


Figure 4. Mode analysis results of Mirnov Coil (dashed line) and Sectored Sin-Cos Probe (solid line). Amplitude of n=1 (bold line) in case of n=1, m=4, $B_1=B_3$

３．まとめ

分割型 sin-cos プローブは，１つのプローブで複数の低次モードが観測可能である利点を持ち，ミルノフコイルと異なり高次のモードの混入を抑えることができる．また，分割数に応じて観測可能なモードを増やすことができる．

Figure 3(b)に製作した分割型 sin-cos プローブを示す．揺動磁場の解析では$V_\theta = \sqrt{|V_{ss}|^2 + |V_{sc}|^2}$より係数を消去して$V_\theta = \sum_{j=0}^{\infty} B_{\ell'}/_{\ell'}$として求める．本発表では，開発した分割型 sin-cos プローブの特性と移送 FRC プラズマの揺動磁場計測実験結果について報告する．

４．参考文献

[1] S. V. Mirnov: “A probe method for measuring the displacement of the current channel in cylindrical and toroidal discharge vessel”, Plasma Phys. **7**, 325 (1965)

[2] R. J. J van Heijninoen, et al.: “Coil systems for measuring rotational asymmetries in the self magnetic field of a discharge”, Plasma Phys. **14**, 205 (1972)

[3] S. Kumashiro, et al.: “Source of Fluctuating Field on Field reversed configuration plasmas”, JPSJ **62**, 1539 (1993)