

## 分割型 sin-cos プローブの特性評価

### Characteristic evaluation of sectored sin-cos probe

○長田昌之<sup>1</sup>, 廣橋光始<sup>2</sup>, 関口純一<sup>3</sup>, 浅井朋彦<sup>3</sup>, 高橋努<sup>3</sup>\*Masayuki Nagata<sup>1</sup>, Koji Hirohashi<sup>2</sup>, Junichi Sekiguchi<sup>3</sup>, Tomohiko Asai<sup>3</sup>, Tsutomu Takahashi<sup>3</sup>

Abstract: Sin-cos probe and Mirnov probe array are commonly used to observe global motions of plasma current. These measurement methods have many advantages and disadvantages. Newly developed probe system: sectored sin-cos probe, which utilize the advantages and eliminate disadvantage of the both probes, has been proposed. The characteristic of the probe system is studied in a multi-pole magnetic field. The principle of the measurement system is confirmed theoretically and experimentally. The developed probe system will be applied to observe a global motion of translated field-reversed configuration plasmas.

#### 1. プラズマ電流の巨視的運動の計測法

プラズマ電流の巨視的運動の定量的な計測には、プラズマ電流が作る方位角方向 ( $\theta$  方向) の磁場のモード解析が用いられる。この計測には sin-cos プローブやミルノフコイルなどが用いられてきた[1]。sin-cos プローブとは巻き数密度を  $\sin n\theta$ ,  $\cos n\theta$  に比例させたものであり、ここで  $n$  は計測したいモード数である。今、観測する磁場を  $B_\theta = \sum_{\ell=0}^{\infty} a_\ell \cos \ell\theta + b_\ell \sin \ell\theta$  とする。このプローブで計測される量を  $V_c$ ,  $V_s$  とすると、次のように表せる。

$$V_c = \pi a_n, \quad (1)$$

$$V_s = \pi b_n. \quad (2)$$

このように sin-cos プローブは高次の項を含まず、正確にモードの大きさを計測できる。しかし、一つのモードを計測するのに 1 組のプローブが必要で、複数のモードを同位置で計測することが困難である。

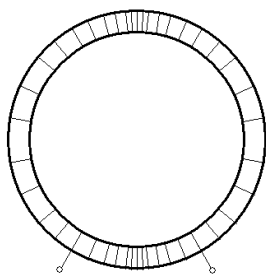


FIG.1. Sin-cos probe

ミルノフコイルは同一コイルを方位角方向に等間隔に配置したものである。コイルの個数を  $m$ , コイルで計測される量を  $V_{cm}$ ,  $V_{sm}$  とすれば、次のように表せる。

$$V_{cm} = m \left( \sum_{h=0}^{\infty} \frac{a_{mh+n}}{2} + \sum_{j=1}^{\infty} \frac{a_{mh-n}}{2} \right), \quad (3)$$

$$V_{sm} = -m \left( \sum_{h=0}^{\infty} \frac{b_{mh+n}}{2} - \sum_{h=1}^{\infty} \frac{b_{mh-n}}{2} \right). \quad (4)$$

ここで  $h$  は、整数である。このようにミルノフコイルは、複数の高次のモードを同時に計測してしまう。一方、同位置で複数のモードを計測できるといった長所もある。

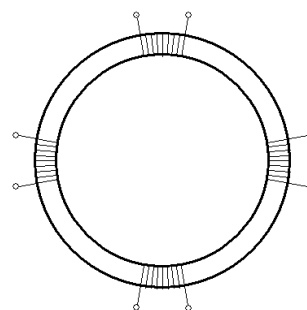


FIG.2. Mirnov coil

今回、この 2 つのプローブの長所を合わせた、新たなプローブを開発した。それが、分割型 sin-cos プローブである。このプローブは方位角方向に隙間なく、同一コイルを  $m$  個配置したものである。プローブから導かれる量を  $V_{cc}$ ,  $V_{ss}$  とすれば、次のように表せる。

$$V_{cc} = \frac{m^2}{2n\pi} \left( 1 - \cos n \frac{2\pi}{m} \right) \times \left( \frac{a_n}{n} + \sum_{h=0}^{\infty} \frac{a_{mh+n}}{mh+n} - \sum_{h=1}^{\infty} \frac{a_{mh-n}}{mh-n} \right), \quad (5)$$

$$V_{ss} = \frac{m^2}{2n\pi} \left( 1 - \cos n \frac{2\pi}{m} \right) \times \left( \frac{b_n}{n} + \sum_{h=0}^{\infty} \frac{b_{mh+n}}{mh+n} + \sum_{h=1}^{\infty} \frac{b_{mh-n}}{mh-n} \right). \quad (6)$$

ミルノフコイルに比べて、高次モードの値がそのモード数で割られているため、その寄与を低減できる。また、同位置で複数のモードが計測可能で、コイルの個数を無限に増やしたとき、このプローブの計測結果は、sin-cos プローブの計測結果と一致する。

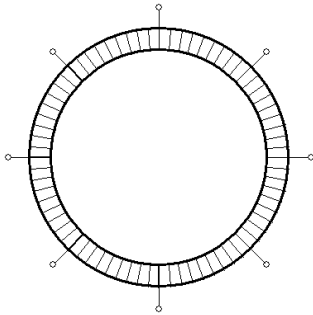


FIG.3. Sectored sin-cos probe

## 2. 多極磁場を用いたモード解析実験

第1節で提案した分割型 sin-cos プローブの特性を確認するために、最大 16 重極の多極磁場を生成できる装置作り、モード解析実験を行った。多極磁場の生成装置とは、半径 18cm の円周上に 32 個まで電極を配置できるようにしたものである。隣り合った電極を直列につなぎ、電流を流し、多極磁場を生成する。多極磁場は以下の式で表される。ただし測定する位置を  $r$ 、電極が並んでいる円周の半径を  $a$ 、電極の個数を  $2n$  とする。

$$B_{\theta} = -\frac{\mu l}{\pi} nr^{n-1} \frac{a^n \cos n\theta (a^{2n} - r^{2n})}{(r^{2n} + a^{2n})^2 - (2r^n a^n \cos n\theta)^2}. \quad (7)$$

$r \ll a$  のとき

$$B_{\theta} \approx -\left(\frac{n\mu l}{\pi a}\right) \left(\frac{r}{a}\right)^{n-1} \cos n\theta, \quad (8)$$

となる。分割型 sin-cos プローブの半径は 12.8cm であるから、 $n$  モードの磁場が大きく出る。今回は、 $n = 1$  で実験を行った。 $\theta = 0$  と  $\theta = \pi$  に置かれた真鍮棒に互いに逆向きに電流を流して（最大電流値 4.80 kA、周波数 41.9 kHz の減衰振動波形の電流を流した。）この時生成される 1 モードの磁場の大きさを、8 個のコイルから成る分割型 sin-cos プローブとミルノフコイルを用いて解析した。この値と (7) 式をフーリエ解析して求めた理論値を比較した。この結果を TABLE. 1 に示す。

TABLE. 1. Experimental results of mode analysis by the presented probe

Sectored	Mirnov	Fourier
11.6[mT]	14.2[mT]	10.7[mT]

## 3. 考察

本実験では、コイル数が 8 であるため、1 モードの磁場の計測結果には、7, 9 モードの磁場が入ってくる。この効果を検証するため、(7) 式をフーリエ解析して求めた、各モードの磁場の大きさを TABLE.2 にまとめた。

TABLE.2. Magnetic field of each mode

$B_1$	10.7[mT]
$B_7$	2.36[mT]
$B_9$	1.43[mT]

ミルノフコイルの場合、高次モードがそのまま効いてくる。このため 1 モードの磁場は

$$B_{1M} \approx B_1 + B_7 + B_9 = 14.5[\text{mT}]$$

のように計測されると予想できる。

一方、分割型 sin-cos プローブを用いた場合では、高次モードの効果がそのモード数分の一で影響するため、1 モードの磁場は

$$B_{1S} \approx B_1 + \frac{B_7}{7} + \frac{B_9}{9} = 11.9[\text{mT}]$$

のように計測されると予想できる。

これは、TABLE.1 の結果とおおよそ一致する。分割型 sin-cos プローブは高次モードの影響が小さく、ミルノフコイルに比べて精度の良い計測が可能であることが実験的にも確認された。

今後は、このプローブを用いて、移送中の磁場反転配位プラズマの巨視的運動で発生する揺動磁場の観測に用いて大域的運動と揺動磁場のパターンとの関係を調べる予定である。

## 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 Heijinoen, 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).
- [4] 宮本健郎: 「核融合のためのプラズマ物理」岩波書店 (1976) p19,20