



## 研究開発ノート

## 断面積変調方式サイン／コサイン・コイルの開発

原田 高宏, 近藤 潤次  
飯尾 俊二, 嶋田 隆一  
(東京工業大学原子炉工学研究所)  
(1996年8月8日受理)

Development of Sine/Cosine Coil  
Based on Cross-Section Modulation

HARADA Takahiro, KONDOH Junji, TSUJI-IIO Shunji and SHIMADA Ryuichi  
*Research Laboratory for Nuclear Reactors, Tokyo Institute of Technology, Tokyo 152, Japan*  
(Received 8 August 1996)

## Abstract

New type sine and cosine coils whose areas of cross sections vary as sine and cosine are proposed. The measurements of current position by the new coils showed their availability.

Traditional sine or cosine coil is wound with a pitch which varies as sine or cosine. However these coils have a problem of manufacturing, *i.e.* it is not easy to wind wire exactly with a pitch of sine or cosine. This new modulation, *i.e.* varying cross section, provides handy and accurate measurements of the current position.

## Keyword:

measurement of current position, sine/cosine coil, cross-section modulation

## 1. はじめに

サイン・コイル, コサイン・コイルとは, Fig. 1 (a) に示すようにポロイダル角  $\theta$  に対して巻き線のピッチをそれぞれ  $\sin\theta$ ,  $\cos\theta$  に比例して変化させたロゴスキー・コイルのことである。このコイルのループ内に電流を通過させたとき, サイン, コサイン・コイルそれぞれ, コイル中心からの電流位置の垂直方向, 水平方向の変位の時間微分に比例した電圧を出力する[1]。

しかし巻き線のピッチを正確に変化させて製作することは容易でない。そこで, 構造の単純化のために, ピッチではなく Fig. 1 (b) のように断面積を変化させる方式を提案する。ここでは, コイルの幅を変化させることにより断面積を変化させている。断面積変調方式を用いると, 従来の方式に比べ, 精度の良い製作が容易となる。

本研究では, 実際にこの断面積変調方式を用いたサイ

ン・コイル, コサイン・コイルを製作し電流位置の測定を行い, 本方式の有効性を確認した。

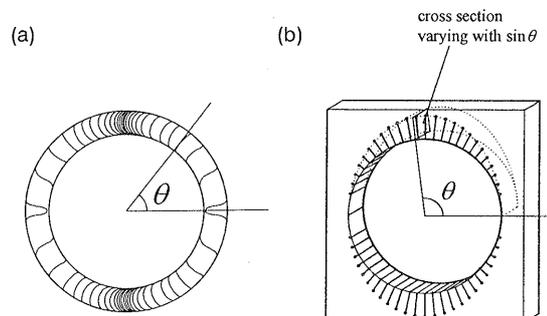
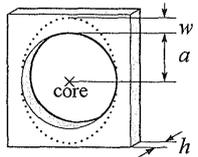


Fig. 1 Traditional sine coil (a) and cross-section varied sine coil (b).

### 2. 製作と原理

製作はFRP製の巻き枠に穴を開け、そこにエナメル線を通して行った。Table 1に製作したコイルの主な仕様を示す。

Table 1 Specifications of tested coil.

	frame material	FRP
	inner radius : $a$ [m]	0.089
	maximum width : $w$ [m]	0.01
	depth : $h$ [m]	0.015
	total number of turn : $N$ [turns]	720

電流位置の測定原理は従来のピッチ変調方式を用いたサイン・コイルと基本的に同じである。サイン・コイルにおいてコイルの断面を奥行き  $h$ , 幅  $w \sin \theta$  の長方形とすると、半径  $a$ , 総コイル巻き数  $N$  のサインコイルの出力電圧は、ポロイダル角  $\theta$  の位置の長さ  $ad\theta$  の区間における誘起電圧を積分して (1) のように表される。

$$v = \frac{Nhw}{2\pi} \frac{d}{dt} \int_0^{2\pi} B_{\theta} \sin \theta d\theta \quad (1)$$

一方、電流位置がコイル中心より垂直方向に  $\Delta \ll a$  である  $\Delta$  だけ変位した場合、コイル中におけるポロイダル磁束密度  $B_{\theta}(\theta)$  はコイル中で一様であると仮定すると (2) のように表される。

$$B_{\theta}(\theta) \cong \frac{\mu_0 I}{2\pi a} \left( 1 + \frac{\Delta}{a} \sin \theta \right) \quad (2)$$

ここで  $I$  は被測定電流の電流値である。(2) 式を (1) 式に代入して  $\Delta$  について解くと、 $\Delta$  とコイル出力電圧、測定される電流の電流値との関係は (3) 式ようになる。

$$\Delta = \frac{4\pi a^2}{\mu_0 Nhw} \frac{\int_0^t v dt}{I} \quad (3)$$

コサインコイルは同様の原理で横方向の変位を出力する。

### 3. 測定実験結果

1kV まで充電した 3mF のコンデンサから半径 0.25m, 巻き数 40turns の円形コイルに放電した際の電流を用いて、実際に測定を行った。実際は電流位置を変化させる代わりにサイン, コサイン・コイルの位置を変化させた。Fig. 2 に実験装置の概要を示す。

サイン・コイルは前述した通り、出力の時間積分を電流値で割った値が、コイル中心に対するプラズマの移動距離  $D$  に比例する。 $\Delta$  の異なる 5 点において、出力積分/電流のコンデンサ放電時からの時間変化を Fig. 3 に示す。破線は被測定電流の波形である。それぞれの測

定において  $\Delta$  は一定であるので、それぞれ、放電初期を除いて  $\Delta$  の測定値は一定となっている。

出力の時間積分を電流値で割った値と被測定電流の移動距離  $\Delta$  との関係を Fig. 4 に示す。(3) 式はサイン・コイルのソレノイド中心の軌道が真円であることを前提としているが、実際に製作したものは楕円である。また、実際はコイルの断面内で磁束密度は一様ではない。これらの影響を考慮した場合の、より厳密な理論曲線もあわせて示す。これより、(3) 式を用いた理論直線がこれ

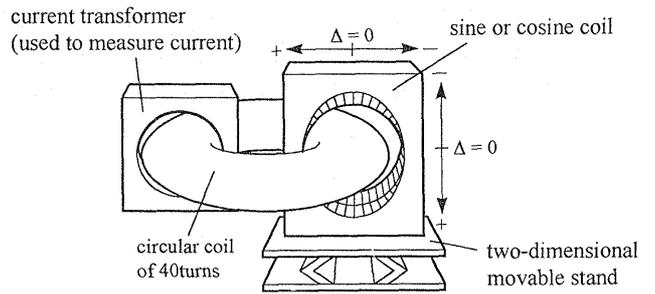


Fig. 2 Schematic arrangement of experiment.

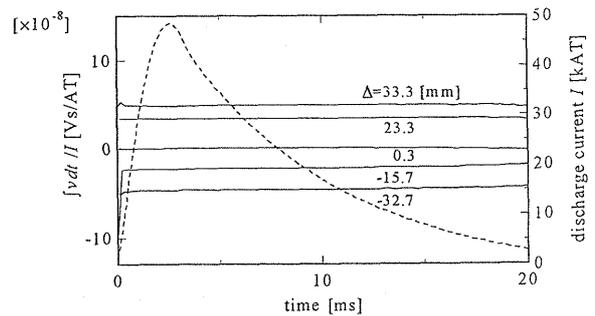


Fig. 3 Temporal variation of  $\int v dt / I$ . Dashed curve shows the discharge current.

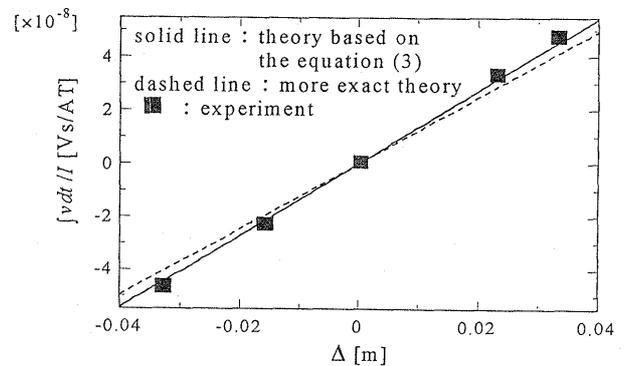


Fig. 4 Relationship between  $\int v dt / I$  and current position with respect to the center of sine coil  $\Delta$ .

とほとんど一致していることがわかる。

実測値は理論式とよく一致した。実測値の絶対値の方がやや大きくなっており、理論直線と、実測値の一次近似直線との傾きの誤差は5.2%である。これはコイル断面の製作誤差や測定誤差によるものと考えられるが、非常によい線形性を示しており、較正して使用すれば実用上問題は無い。

Fig. 2のようなトーラス形状の電流を測定対象とする場合は直線電流の場合と違い、トーラス内側の磁界が余分に大きくなってしまふ。よってコサイン・コイルにおいてはこの効果に対する補正が必要となるものの、サイン・コイルの場合とほぼ同様の結果が得られ、理論直線と、実測値の一次近似直線との傾きの誤差は3.8%であった。

#### 4. まとめ

製作が容易な断面積変調方式サイン/コサイン・コイルにおいて、非常に良い製作精度が得られ、断面積変調方式サイン/コサイン・コイルの有効性が実証できた。

サイン、コサイン・コイルを用いると複雑な計算コードを必要とせずに電流の重心位置の測定が行えるが、製作が困難であることが問題であった。しかし本方式を用いることで精度の良い製作が簡単に行えるようになる。

#### 参考文献

- [1] I. H. Hutchinson, *Principles of Plasma Diagnostics* (Cambridge University Press, London, 1987) p.25