

集束型渦電流探傷プローブの開発研究

Focusing Eddy Current Testing Probes for The Detection of Steam Generator Tube Defects

山口 良一 (Ryoichi Yamaguchi)* 渡辺 芳哲 (Yoshitetsu Watanabe)*

原田 豊 (Yutaka Harada)[†] 藤岡 琢志 (Takushi Fujioka)[‡]

The Lord Marshall of Goring[§]

要約 加圧水型原子力発電所(PWR型)の蒸気発生器には、一基あたりおよそ3400本の伝熱管があり、毎年定期検査でその健全性を確認するため、渦電流探傷装置を用いた探傷検査が行われている。この探傷検査に多く用いられている探傷用プローブには、ボビンコイル型と呼ばれているものがある。この型のプローブは、一般に探傷速度は速く、伝熱管の軸方向欠陥の検出感度は高いが、管の周方向欠陥の検出感度は低いと言われている。

そこで、本研究ではボビンコイル型の探傷速度が速いという特徴を失うことなく伝熱管の軸方向欠陥に加えて、周方向の欠陥も感度良く検出できる探傷プローブを開発することとした。

すなわち、周方向欠陥の検出感度が低いというボビンコイル型探傷プローブの欠点を補うため、プローブの内部に強磁性体のフェライトコアを埋め込むと共に、従来のボビンコイル型で用いられてきたインピーダンス検出法から、欠陥により変化した磁束だけを検出用フェライトコアに導き、欠陥の大きさを直接電圧信号として捕える画期的な検出方法を用いることで検出性能の向上を図った。このコアの形状および検出コイルの配置を最適化するために、三次元電磁場解析を行った。

その結果、従来のボビンコイル型プローブでは検出感度が低いとされた周方向の欠陥においても、高感度で探傷可能な探傷プローブの解析モデルを得ることができた。この解析モデルに基づき製作した試作プローブを用いて機械加工傷の検出性能を調べたところ、軸方向および周方向の欠陥共、従来のボビンコイル型プローブより優れた結果が得られている。

キーワード 渦電流、探傷用プローブ、ボビンコイル型、軸方向欠陥、周方向欠陥、フェライト、三次元電磁場解析

Abstract A PWR steam generator contains approximately 3,400 tubes. During an annual inspection, eddy current testing is performed as a part of the assessment of steam generator tube integrity, for non-destructive inspection of defects in these tubes. The so-called bobbin coil type is what is generally used for the eddy current testing probe. This type of probe is considered to provide higher testing speed and to possess greater sensitivity to axial defects, although its sensitivity to circumferential defects is quite low.

The aim of this study was to develop an eddy current testing probe which, while sustaining its high testing speed, is reliable in the detection of the circumferential as well as axial defects in tubes.

To compensate for the low sensitivity of the bobbin coil type probe in detecting circumferential defects, in addition to embedding ferromagnetic ferrite cores inside the probe, a further improvement was achieved in detection performance, by employing, instead of the impedance detection method which uses the conventional bobbin coil, a revolutionary detection method in which only the magnetic flux that changed due to the presence of the defect is fed into a detection ferrite core to directly determine the volume of the defect in the form of a voltage signal. To optimize the shape of the core and the arrangement of the detection coil, we performed 3-D electromagnetic field analysis.

Theoretical modelling of the inspection probes showed that circumferential defects could be detected with high accuracy. A prototype probe based on our analytical model which was used to detect machined defects showed significantly better performance and efficiency than seen with the conventional bobbin coil testing probe, for both axial and circumferential defects.

Keywords Eddy Current, inspection probe, bobbin coil type, axial defects, ferrite cores, circumferential defects, 3-D electromagnetic field analysis

* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

[†] (株)原子力エンジニアリング プラント部

[‡] (株)日本総合研究所 サイエンス事業部

[§] (株)原子力安全システム研究所最高顧問

1. はじめに

原子力発電所の定期検査では、蒸気発生器の伝熱管に発生した欠陥を検出するため、渦電流を利用した探傷装置が用いられている。伝熱管の中に挿入された探傷プロ - プの励磁コイルに交番電流を流すと、交番磁束によって伝熱管の管壁に渦電流が誘導される。管壁に傷があると渦電流の分布が変化し、検出コイルによってこの分布の変化が検出されるのである。

蒸気発生器の検査に用いられる探傷プロ - プは、コイルの形状から一般にポピンコイル型とパンケーキコイル型に分類される。ポピンコイル型は、コイルが伝熱管の周方向に沿って円筒状に巻かれた簡単な構造で検査速度が早いという特徴を持っている。検出性能は、誘導される渦電流が、コイルの巻かれている方向と同じ周方向に流れることから、傷の方向がこの渦電流を横切る軸方向の傷であれば、渦電流の分布は大きく乱れ、検出は容易となる。しかし、傷の方向が渦電流と同じ周方向であれば渦電流の分布の乱れは小さく、検出は困難になる。

パンケーキコイル型は、回転コイル型とマルチコイル型とに分類される。回転コイル型は伝熱管壁面を螺旋状に走査することから、探傷速度が非常に遅く、また、マルチコイル型はコイル直下の渦電流は強いが、コイル部から離れるほど弱くなり、コイルとコイルの間は検出感度が低下する欠点を有する。

本研究では、ポピンコイル型探傷プロ - プの検出速度が早いという特徴を失うことのないよう、外形の寸法が同じという条件の元で、検出性能の向上を図るべく、特にポピンコイル型での周方向欠陥の検出性能が低いという欠点を補うため、プローブの内部に透磁率が高く電気伝導度が低いフェライト等の強磁性体を埋め込み、従来のポピンコイル型には見られなかった軸方向の渦電流成分を誘導させ、軸方向の欠陥はもちろん、周方向の欠陥も容易に検出できるプローブの開発を試みることにした。

周方向の欠陥を高い感度で検出できるための条件は、軸方向の渦電流を発生することおよびこの渦電流の流れを感度よく検出できるように検出用フェライトコアと検出コイルを配置することである。そこでコンピュータを用いた三次元および二次元の電磁

場解析を行い、渦電流の軸方向成分が大きくなるよう、また、検出コイルの検出電圧が大きくなるように、フェライトコアの形状および検出コイルの配置を最適化した。

2. 蒸気発生器探傷用プローブの探傷性能試験

開発研究の実施に先立って、現在蒸気発生器探傷用として使われている渦電流探傷用プローブの探傷性能試験を実施した。

調査の対象としたプローブは、パンケーキコイル型としては、回転コイル型（自己誘導型）とマルチコイル型（相互誘導型）とし、ポピンコイル型としては、一般に広く用いられている自己誘導型と、検出コイル用のコアにフェライトを用いた相互誘導型を選定した。試験には放電加工による模擬欠陥を用いた。欠陥の形状としては、管外面の欠陥で、欠陥の方向は管の軸方向と管の周方向とし、欠陥の幅は0.15mm、長さは5mmで、その深さは管の肉厚1.27mmに対し、20、40、60、80、100%と、5段階の深さとした。

調査の結果、軸方向欠陥では高い検出性能を示したポピンコイルの相互誘導型は、周方向欠陥で検出性能が低く、周方向欠陥では高い検出性能を示したパンケーキコイルのマルチコイル型は、軸方向欠陥で低い検出性能を示した。

3. 新型探傷プロ - プの構造

図1のようなE字型のフェライトコア8個を、ポピンコイルの周方向に配置する。

E字の右面を管の内壁に対向させ、E字の二つの溝に励磁用コイルを巻き、検出用コアの内側に検出コイルを設けている。励磁用コイルに高周波電流を流すとコイルの作る磁力線は、E字の上部コア、下部コアおよびヨ - クを經由し、管壁を通過して閉じる。フェライトコアのために、この磁場は周方向に周期的に不均一に分布する。このため、管壁には軸方向成分と周方向成分を持った渦電流が発生する。伝熱管が無欠陥のとき、磁力線は上部コアから管壁を通過し下部コアに流れるため、検出用コイル部での半径方向磁束はほとんど零に近い値となる。一方、欠陥が上部コアと検出用コア、または、下部コアと

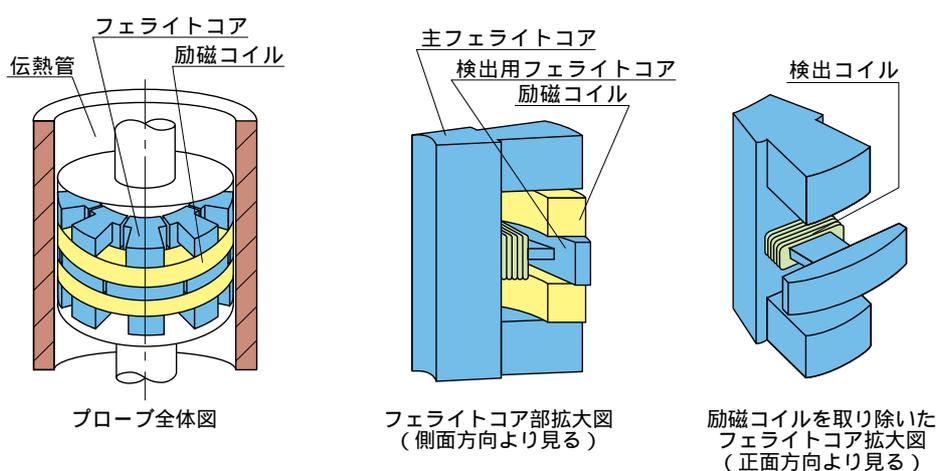


図1 新型探傷プローブの構造図

検出用コアの間に位置すると、軸方向成分と周方向成分を持った渦電流の存在により軸方向欠陥、周方向欠陥に係わらず半径方向の磁束のバランスが崩れて、検出用コアと上部コアまたは下部コアを周回する磁束が発生する。

すなわち、欠陥があるときは検出コイルに出力信号が発生し、欠陥がないときには出力信号は発生しない。問題は、コイルおよびコアの配置等を最適化することにある。この目的のために後述のように、三次元および二次元の電磁場解析を実施した。

4. 電磁場解析

プローブの探傷性能試験の結果、ボビンコイル型プローブでは、伝熱管管壁の欠陥の方向が軸方向の場合は検出性能が高いが、周方向の場合は検出性能が低いことが明らかとなった。これは、管壁に誘導する渦電流成分のうち、周方向の欠陥の検出に有効な成分と思われる軸方向の渦電流成分が存在しないためである。そこで、電磁場解析ソフト「JMAG-DYN」¹を用いて、伝熱管管壁の渦電流がどのような方向に分布して流れるのか、フェライトコアを組み込むことでその周方向や軸方向の電流成分がどのように変化するのか、コアの形状による影響、検出コイルの適正配置等を解析することとした。

4.1 最初の電磁場解析モデル

最初の解析では、フェライトコアはリング形状とし、8個をボビンコイルに沿って円周状に配置したモデルとした。また、コアの寸法は厚さ0.5mm、幅1.0mmと断面積を小さくし、できるだけ磁場を集中させることを考えた。

解析は三次元モデルで行い、結果は、周方向電流成分 $6.9 \times 10^5 \text{ A / m}^2$ に比べ軸方向成分は、 $4.9 \times 10^4 \text{ A / m}^2$ (7.1%)と値は小さいが、発生することが確認された。

解析による渦電流の分布を、「図2 三次元電磁場解析結果(リング型フェライトコアの場合)」に示す。

また、フェライトコアを組み込まないボビンコイル型では、周方向の電流成分($6.3 \times 10^5 \text{ A / m}^2$)のみが現れ、軸方向の電流成分はもちろん現れなかった。

a. 解析条件

(a) 伝熱管

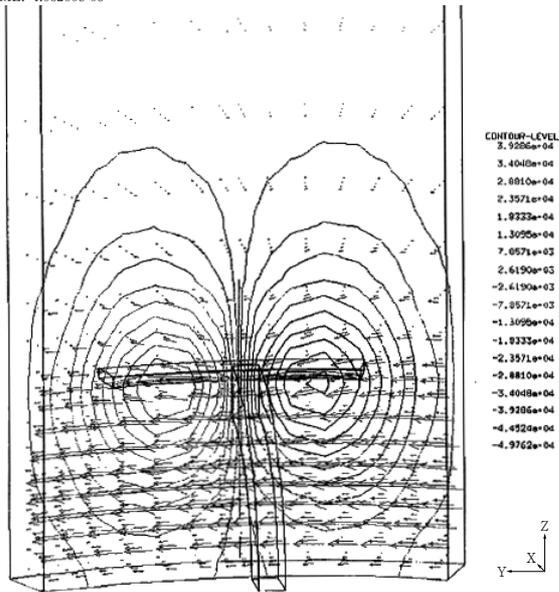
電気伝導度 : $1.0 \times 10^6 \text{ (S / m)}$
比透磁率 : $\mu_r = 1$

(b) プローブ

励磁コイル巻き数 : 60 ターン
探傷周波数 : 400 KHz

¹JMAG-DYN : (株)日本総合研究所の二次元 / 軸対称 / 三次元の汎用動磁場解析ソフトウェア

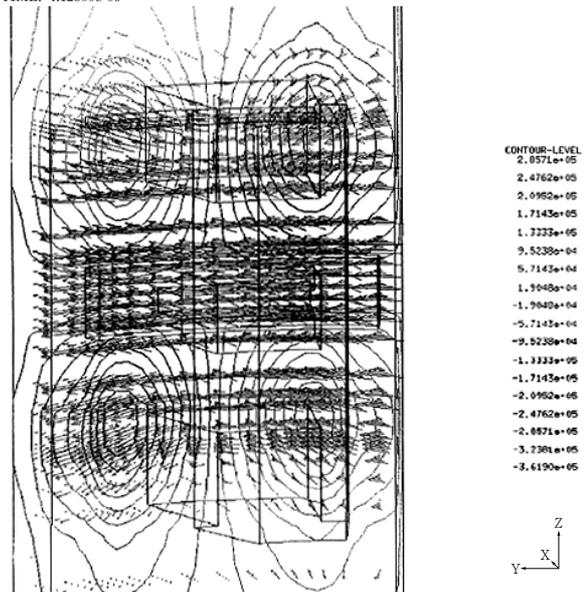
STEP: 16 << STEP1 (B) NEW-TYPE, WITHOUT DEFECT >> at 1993.11.12
TIME: 4.06200e-06



EDDY-CURRENT EDDY-CURRENT (JZ)
MIN: 0.00000e+00 ELEMENT ID. 2049 MIN: -5.13575e+04 NODE ID. 3863
MAX: 7.07323e+05 ELEMENT ID. 4659 MAX: 5.13575e+04 NODE ID. 3913

図2 三次元電磁場解析結果（リング型フェライトコアの場合）

STEP: 33 << INVESTIGATION2 (Fan-shaped with defect) >> at 1994.08.10(Wed)
TIME: 4.12500e-06



EDDY-CURRENT EDDY-CURRENT(JZ)
MIN: 0.00000e+00 ELEMENT ID. 1648 MIN: -3.70150e+05 NODE ID. 11576
MAX: 2.17597e+06 ELEMENT ID. 5713 MAX: 3.70150e+05 NODE ID. 11864

図3 三次元電磁場解析結果（扇型フェライトコアの場合）

印加電流 : 80 mA
コイル断面積 : $2.25 \times 10^{-6} \text{ (m}^2\text{)}$
電流密度 : $2.133 \times 10^6 \text{ (A / m}^2\text{)}$

(c) フェライトコア ($\text{MnO-ZnO-Fe}_2\text{O}_3$)

電気伝導度 : 33.3 (S / m)
比透磁率 : $\mu_r = 5000$
配置 : 円周方向に8個均等配置とする。

(d) モデル分割数

1 / 16 モデル

4.2 三次元解析モデルでの改良

リング型のフェライトコアを組み込んだ最初の解析モデルでは、周方向欠陥に有効と思われる軸方向の渦電流成分は、思っていたほど大きな値を示さなかった。この要因を考察すると、当初はフェライトコアの断面積を小さくすることで、磁場の集中する効果が高くなると推定していた。しかし、解析の結果からは、フェライトコアを通過する磁路の磁気抵

抗が高いため、緩やかな磁場の分布しか示さなかったことによるものと考えられる。

そこで我々は改良モデルとして、フェライトコアを通過する磁路の磁気抵抗が小さくなるように、また、伝熱管管壁の渦電流の軸方向成分の分布が、均等に繰り返されるように解析を進めた結果、コアの厚さが厚い場所でおおよそ3.5 mm、幅がおおよそ2.0 mmと、コアの断面積を大きくすると共に、管壁に向かって開いた扇型フェライトコアのモデルへ達した。

また、今回のモデルでは、上部コアと下部コアの中心部に、検出用のコアおよびコイルを配置し、伝熱管の上部管壁の外側に、深さ60%の周方向の欠陥を設け、欠陥のある場合とない場合での、検出コイルに誘起する電圧の違いも、解析により確認することとした。

解析は最初と同じく三次元モデルで行い、その結果は、周方向電流成分 $2.1 \times 10^6 \text{ A / m}^2$ に比べ軸方向成分は、 $3.6 \times 10^5 \text{ A / m}^2$ (17.1%) と値は大きくなった。この値は、最初のリング型コアモデルの軸方向電流成分値 ($4.9 \times 10^4 \text{ A / m}^2$) と比べ、おおよ

7.5倍まで高めることができた。

また、検出コイルに誘起した電圧の解析値は、欠陥のない場合は0(mV)となったが、欠陥のある場合は検出コイル1ターンあたり 3.0×10^{-5} (V)で、60ターンでは、1.8(mV)となった。

a. 解析条件

(a) 欠陥

形状 : 外面周方向
 深さ : 約60% (0.76mm)
 長さ : 約5mm
 幅 : 約0.2mm

(b) モデル分割数

1 / 8モデル

その他の条件は最初の解析モデルと同じ。

解析による渦電流の分布を、「図3 三次元電磁場解析結果(扇型フェライトコアの場合)」に示す。

しかし、検出コイルを通過する磁束成分のうち、欠陥を捕らえることに寄与しない軸方向の磁束成分

z が、欠陥に有効に働く半径方向の磁束成分 r に比べ、200倍と大きな値を示した。

r (半径方向成分) : 1.18×10^{-11} (Wb)

z (軸方向成分) : 2.60×10^{-9} (Wb)

この値は、プローブの製作にあたって、検出コイルの歪みを考えると検出コイルに大きな誤差信号を誘起する可能性があり、欠陥の測定に大きな障害となりうる。そこで、この磁束の成分比率 z/r の値が小さくなるような、検出コイルの適切な配置を探るべく、二次元の電磁場解析を試みることにした。

4.3 二次元モデルでの電磁場解析

検出コイルの適切な位置を決めるため、二次元モデルによる電磁場解析を行った。

解析の結果は、検出コイルの配置を励磁コイルの外側にした場合、三次元解析で課題となった磁束成分の比率は、

z (軸方向成分)/ r (半径方向成分): 183倍

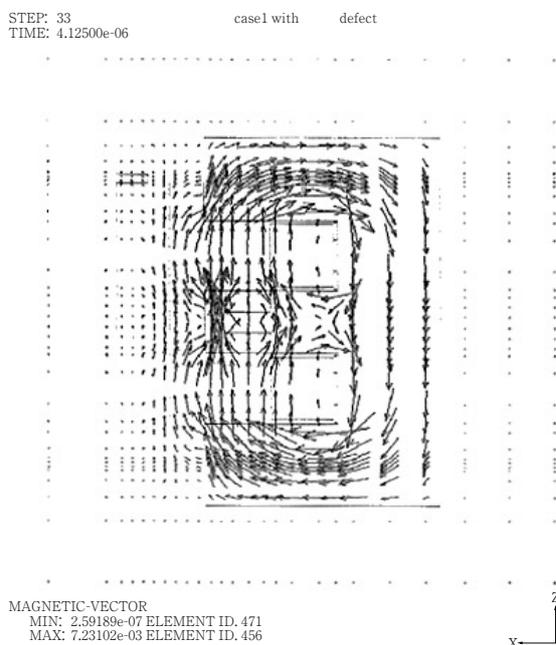


図4 二次元電磁場解析結果(検出コイルを外側配置とした場合)

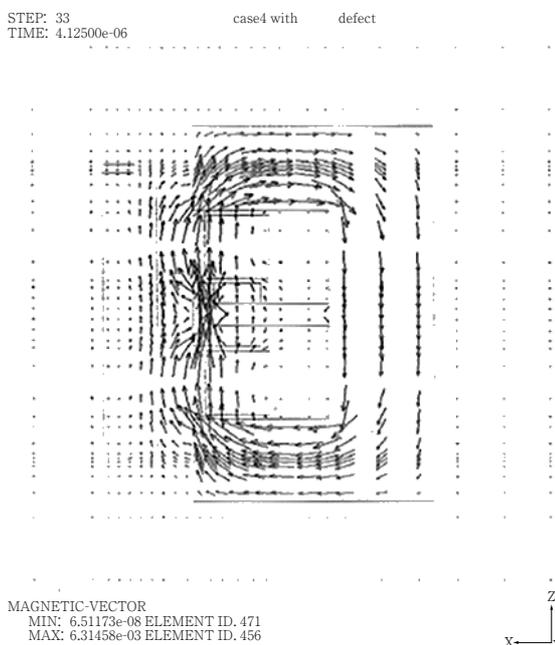


図5 二次元電磁場解析結果(検出コイルを内側配置とした場合)

となった。

解析による磁場分布の結果を、「図4 二次元電磁場解析結果(検出コイルを外側配置とした場合)」に示す。

また、検出コイルを励磁コイルの内側にした場合、軸方向成分は外側配置に比べ随分減少することが確認された。その磁束成分の比率は、

$$z \text{ (軸方向成分)} / r \text{ (半径方向成分)} : 76 \text{ 倍}$$

となった。更に、検出コイル部分の検出用コアの厚みを薄くしたもので電磁場解析を試みた結果、この成分比率を更に下げることができた。その磁束成分比率は、

$$z \text{ (軸方向成分)} / r \text{ (半径方向成分)} : 54 \text{ 倍}$$

となり、三次元電磁場解析で課題となっていた検出

コイルの製作上の歪みによる誤差信号は、およそ1/4まで抑えることができた。

解析による磁場分布の結果を、「図5 二次元電磁場解析結果(検出コイルを内側配置とした場合)」に示す。

5. プロープの製作および探傷性能の評価

これまでの解析により得られたプローブの構造をもとに、プローブの試作品を製作することとした。

製作にあたっては、製作者を交えてフェライトコアの加工や組立に関し、その手順や手法を話し合った結果、コアを分割して製作することや、コアの形状を一部変更することが製作面から必要となった。

また、探傷性能の評価にあたっては、プローブの開発に先立ち行われた各種プローブの探傷性能調査に合わせて、放電加工による人工欠陥を用い、管の外周周方向の欠陥および、軸方向の欠陥について、どの程度まで検出が可能であるかを評価することと

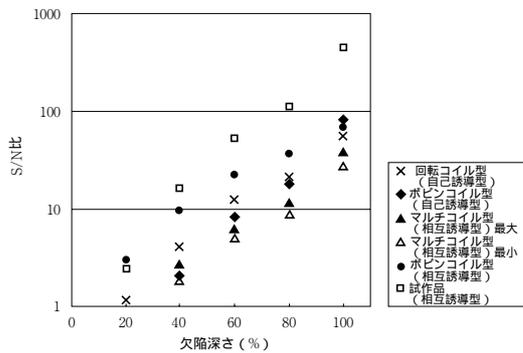


図6 EDM外面軸方向欠陥サンプル探傷結果

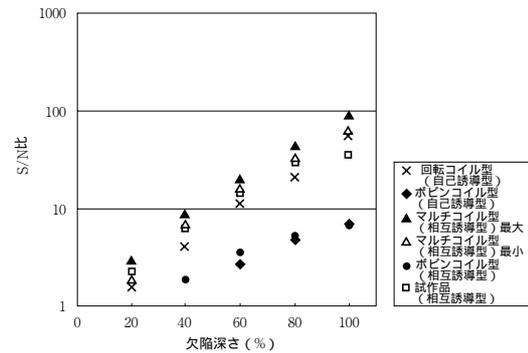


図7 EDM外面周方向欠陥サンプル探傷結果

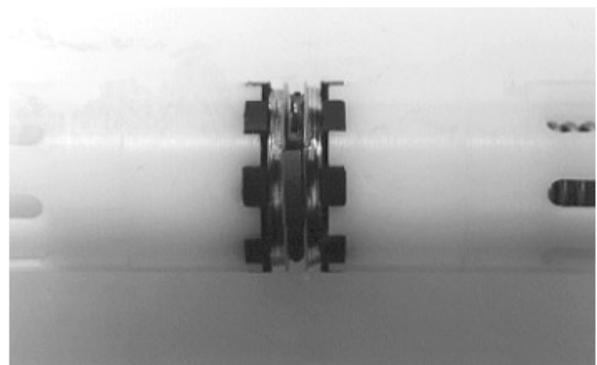
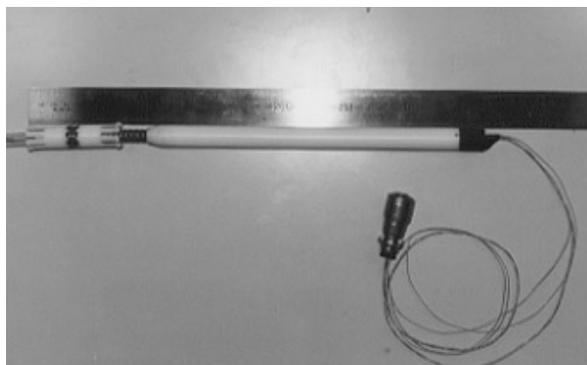


写真1 過電流探傷プローブ試作品

した。

放電加工（EDM）欠陥における探傷の結果は、「図6 EDM外面軸方向欠陥サンプル探傷結果」および、「図7 EDM外面周方向欠陥サンプル探傷結果」に示す。

この探傷結果からは、今のところ、軸方向および周方向の欠陥共、従来のボビンコイル型プローブより優れた性能を有する結果が得られている。

また、今回試作した渦電流探傷プローブの全体を、「写真1 渦電流探傷プローブ試作品」に示す。

6. むすび

今回の研究では、当面の目標としてきたボビン型プローブでは検出が難しいとされてきた周方向の欠陥の検出を容易にすると共に、軸方向の欠陥についても同時にかつ高感度で検出することが確認された。また、プローブの製作にあたってフェライトや型枠用のプラスチック等の部品が使われたが、これ

らの部品一つ一つに特異な加工技術や組立技術が使われており、それぞれの技術を上手に取り扱っていくことが、更に良い製品を生み出していくものと思われる。本研究を遂行するにあたり、アスワン電子（株）、およびニッコーシ（株）の方々に大変お世話になり、ここに感謝の意を表する。

参考文献

- (1) 熊谷信昭，電磁気学基礎論，オーム社，1987
- (2) 村田健郎 名取亮 唐木幸比古，大型数値シミュレーション，岩波書店，1994
- (3) 渦流探傷試験 ，財団法人 日本非破壊検査協会，1989
- (4) 渦流探傷試験 ，財団法人 日本非破壊検査協会，1990
- (5) 平賀貞太郎 奥谷克伸 尾島輝彦，フェライト，1986