Eddy Current Flaw Testing Probe With High Performance in Detecting Flaws During In-service Inspection of Tubing

Kiyoshi Koyama Member (Nihon University, koyama@cit.nihon-u.ac.jp)

Hiroshi Hoshikawa Member (Nihon University, hhoshi@cit.nihon-u.ac.jp)

Keywords: nondestructive testing, eddy current testing, tubing inspection, inner probe, support noise

1. Introduction

Eddy current nondestructive flaw testing (ECT) is widely used for product inspection. In the inspection of heat exchanger tubing in power plant and chemical plants, ECT is performed by using an inner probe, because of the structural restrictions of such plants. However, high levels of wobble noise and support plate noise occurs in the conventional method using a rotating pancake coil. The authors therefore propose new minimal noise eddy current inner probes. Two new types of probes have been developed: one for detecting axial flaws, and the other for detecting circumference flaws. These probes can detect flaws with a low level of noise. The phase of the flaw signal by the new probes changes according to the flaw depth. As a result, the signal phase by the new probes can be used for evaluating the depth of surface flaws.

2. New Eddy Current Probe

Figure 1 shows the new eddy current probe for detection of axial flaws. Two exciting coils winding to the circumferential direction induces eddy current in the tubing material parallel to themselves. The small detecting tangential coil arranged between two exciting coils pick up only the parallel component of the eddy current to itself.

When the tube has no surface flaw as shown in Figure 2(a), the detecting coil generate no signal because the eddy current has no parallel component to it. When there is a surface flaw disturbing the eddy current, some of the eddy current circulates parallel to the flaw and detecting coil as shown in Figure 2(b). The detecting coil generate flaw signal. When the probe is located under the support plate as shown in Figure 2(c), the detecting coil generate no signal because the eddy current has no parallel component to the detecting coil. Thus the new probe does not generate wobble noise and support plate noise.

3. Experimental Results

Figure 3 shows the flaw signal and support plate noises when the

probe scans around support plate with axial flaw of 0.9 mm depth. The figure indicates that the probe clearly detects the flaw without much interference from the wobble noise and support plate noise.

From the result of the flaw signal patterns, the authors derived the flaw depth evaluation curve based on the signal phase as shown in Figure 4. Thus flaw depth can be evaluated by applying flaw signal phase.

Fig. 2. Principle of flaw detection

Flaw : depth 60%, length 15mm, width 0.5mm

Fig. 3. Flaw signal scanning the axial flaw under support plate

Fig. 1. New eddy current probe

Fig. 4. Flaw signal phase vs. flaw depth

熱交換器細管の保守検査における きず検出性能の高い渦電流探傷プローブ

正 員 小山 潔* 正 員 星川 洋*

Eddy Current Flaw Testing Probe with High Performance in Detecting Flaws during In-Service Inspection of Tubing

Kiyoshi Koyama*, Member, Hiroshi Hoshikawa*, Member

Eddy current flaw testing that uses changes in the impedance of the test coil as the electromagnetic field interacts with the test material is a non-destructive testing method. It can be used to inspect test material at high speed without bringing the test coil into contact with the test material. Therefore, it is widely used for product inspection. In the inspection of heat exchanger tubing in power plants and chemical plants, eddy current flaw testing is performed by using an inner probe, because of the structural restrictions of such plants. However, high levels of wobble noise and support plate noise occur in the conventional method using a rotating pancake coil. The authors therefore propose new minimal-noise eddy current inner probes. Two new types of probes have been developed: one for detecting axial flaws, and the other for detecting circumference flaws. These probes can detect flaws with a low level of noise. The phase of the flaw signal by the new probes changes according to the flaw depth. As a result, the signal phase by the new probes can be used for evaluating the depth of surface flaws.

キーワード：非破壊試験，渦電流試験，管の保守検査，内挿プローブ，支持板雑音

Keywords: Nondestructive testing, Eddy current testing, Tubing inspection, Inner probe, Support plate noise

1. はじめに

発電所や化学プラントなどにおける熱交換器では，細管が破損し管の内部から漏れ出る漏洩事故を未然に防ぐために定期的な保守検査が行われている。熱交換器などの細管の保守検査においては，数千本もの管を支えるための支持板があり，その構造的な制約から管の内部に試験コイルを挿入して検査を行う内挿プローブを用いた渦電流探傷試験が適用されている。内挿プローブとしては，従来から渦電流探傷試験で多用されているパンケーキ状の小さな円形コイルを管の周方向に回転させ軸方向に移動させることを繰返す回転走査を行うプローブなどが適用されている。しかし，従来のプローブでは，プローブと試験導体との相対距離の変化による雑音や管を支えるための支持板による雑音などが発生する問題がある。このため，これらの雑音が探傷の妨げとなり小さなきずの検出が困難である。したがって，雑音を発生せずきず検出性能の高いプローブが求められている。近年では，プローブと試験導体との相対距離の変化

による雑音の小さな新しいプローブが開発されている^{(1)~(9)}が，細管の保守検査においては，相対距離の変化による雑音とさらに支持板による雑音の発生しないきず検出性能のより高いプローブが必要である。原子力発電プラントにおいては，安全性の維持が極めて厳しいことから，コイルを複数個配置してマルチ化した渦電流探傷プローブが開発されている。プローブをマルチ化することにより，きず検出性能に優れているものの，プローブコストが高く，また既存の探傷装置への適用が困難であり，複雑な電子回路を備えた専用の探傷装置を必要とする。

筆者らは，従来のプローブの回転走査機構と既存の探傷装置を利用できることも念頭に置き，渦電流探傷試験における試験導体に誘導される渦電流とコイル起電力について考察を行い，きずによって新たに発生する渦電流を選択的に検出して相対距離の変化による雑音と支持板による雑音の発生しない新しい渦電流探傷プローブを提案する。きずによって新たに発生する渦電流を選択的に検出するので，確実にきずを検出するために管に生じるきずの主な方向に応じて構造が異なる2つのプローブを考えた。すなわち，管の軸方向に長さを持つきず（以下，軸方向きず）を確実に検出するために管の周方向に渦電流を誘導しきずによって軸方向に発生する渦電流を軸方向に巻かれた検出コイル

* 日本大学生産工学部電気電子工学科
〒275-8575 習志野市泉町 1-2-1
Nihon University, College of Industrial Technology
1-2-1, Izumicho, Narashino 275-8575

で検出するプローブと、管の周方向に長さを持つきず（以下、周方向きず）を確実に検出するために軸方向に渦電流を誘導しきずによって周方向に発生する渦電流を周方向に巻かれた検出コイルで検出するプローブである。

プローブを製作して回転走査による渦電流探傷実験を行った結果、従来のプローブで問題となっている相対距離の変化による雑音と支持板による雑音とが原理的に発生せず、支持板近傍のきずをも SN 比高く検出できることを確認した。また、きずの深さや長さ、幅が異なる場合などについて探傷実験を行い、プローブの基礎的なきず検出性能について確認した。さらに、細管の保守検査では、漏洩事故を未然に防ぐために、きずの深さを知ることが重要である。実験の結果、得られるきず信号の位相角がきず深さに応じて変化するので、きず信号の位相角からきず深さの評価を行えることを確認した。従来のプローブでは、きず信号の振幅のみできず深さの評価を行っているが、信号振幅はきずの長さや幅によっても変化するので、きず深さの評価において精度が低いことが問題である。提案するプローブでは、きず信号の振幅と共に位相角を用いることによりきず評価の精度向上が期待できる。

2. 雑音の小さな渦電流探傷プローブ

〈2・1〉 誘導される渦電流とコイル起電力 電磁誘導を利用した非破壊試験法である渦電流探傷試験は、交流を流したコイル（以下、励磁コイル）によって試験導体に渦電流を誘導し、きずなどの不連続部による渦電流の変化を励磁コイルの起電力変化として、或いは励磁コイルの近傍に配置したコイル（以下、検出コイル）の起電力変化として検出し探傷を行う。そこで、励磁コイルによって試験導体に誘導される渦電流とコイル起電力について考察する。

電磁誘導の法則に基づいて磁束密度 B の変化により誘導電界 E は、

$$\nabla \times E = -\partial B / \partial t \cdots \cdots (1)$$

となる。磁束密度 B に対して磁気ベクトルポテンシャル A は、

$$B = \nabla \times A \cdots \cdots (2)$$

と定義される。(1) 式と (2) 式から誘導電界 E は、電位勾配の効果が小さい励磁コイルの近傍においては、

$$E = -\partial A / \partial t \cdots \cdots (3)$$

である。

電流密度 J の電流による誘導電界 E によって導電率 σ の試験導体には渦電流 J_e が誘導される。

$$J_e = \sigma E = -\sigma(\partial A / \partial t) \cdots \cdots (4)$$

また、電流密度 J によって発生する磁気ベクトルポテンシャル A は、次式で与えられる⁽¹⁰⁾。

$$A = \frac{\mu}{4\pi} \iiint \frac{J}{r} dV \cdots \cdots (5)$$

ここで、 μ は透磁率、 r はコイルに流れる電流の密度 J から磁気ベクトルポテンシャル A までの距離、 V はコイル巻線の体積である。試験導体に不連続部がなく電位勾配の効果が小さい励磁コイルの近傍においては、(4) 式と (5) 式から渦電流 J_e は励磁コイルの電流 J にほぼ平行なベクトルとなる。したがって、試験導体に不連続部が無い場合の励磁コイルの近傍における渦電流は、励磁コイルの巻線と基本的に同じ方向に発生することとなる。筆者らは、有限要素解析により試験導体に誘導される渦電流の流れについて確認している。

巻数 N の検出コイルの起電力 V は、次式で与えられる。

$$V = -N \frac{\partial}{\partial t} \left[\iint_S B \cdot n dS \right] = -N \frac{\partial}{\partial t} \left[\oint A \cdot dl \right] \cdots \cdots (6)$$

ここで、 S は検出コイルの面積、 n は微少面積 dS に対する単位法線ベクトル、 dl は検出コイルの巻線に沿った単位接線ベクトルを表す。(5) 式より磁気ベクトルポテンシャルは、電位勾配の効果が小さい励磁コイル近傍においては基本的に電流と同じ向きのベクトルであるから、励磁コイルの近傍に配置された検出コイルの各巻線部分は、その巻線部分と平行な電流成分を検出することとなる。

〈2・2〉 提案するプローブの考え方 前節〈2・1〉の誘導される渦電流とコイル起電力の考察に基づいて提案するプローブを考える。

従来のプローブでは、励磁コイルによって誘導される渦電流それ自身の変化を検出して探傷を行う。渦電流は、きず以外の相対距離の変化や支持板によっても変化するので、従来のプローブでは、相対距離の変化や支持板による雑音を避けられない問題がある。筆者らは、励磁コイルによって誘導される渦電流それ自身の変化を検出するのではなく、きずによって新たに発生する渦電流のみを選択的に検出する構造のプローブにすれば、相対距離の変化による雑音と支持板による雑音が発生せず、SN 比高くきず検出を行えると考えた。

誘導される渦電流の向きが割れきずの方向と平行である場合にはきずによって発生する渦電流は小さいが、きずと直交するように渦電流を誘導すれば、きずに沿って流れる新たな渦電流が発生する。したがって、励磁コイルはきずと直交するように配置する。また、(6) 式より検出コイル起電力は検出コイルの巻線部分と平行な電流成分によって発生するから、きずに沿って新に発生した渦電流を検出するために検出コイルはきずと平行に配置する。この様な考えに基づき、雑音が発生せずきずを確実に検出するために、管に生じるきずの主な方向に応じて構造の異なる 2 つのプローブを提案する。

〈2・3〉 軸方向きずを検出するプローブ 管の軸方向に長さを持つきずを検出するために図 1 の構造のプローブ（以下、軸方向プローブ）を提案する。図 (a) は正面図、図

図1 軸方向プローブの構造

Fig. 1. New eddy current probe for detection of axial flaws (new axial flow detection probe).

図2 軸方向プローブのきず検出原理

Fig. 2. Principle of flaw detection by the new axial flow detection probe.

(b) は側面図を表す。軸方向プローブは、管の周方向に巻かれた円形の2つの励磁コイルとその間に置かれ軸方向に巻かれた矩形の検出コイルから構成される。検出コイルの径方向の長さは、励磁コイルの外径の半分以下である。

図2には、管表面に誘導される渦電流を示す。2つの励磁コイルに逆向きの交流を流すと、図2(a)に示すようにきずなどの不連続部がない場合には、〈2・1〉節で述べた様に励磁コイルの巻線方向である管周方向にのみ渦電流が誘導され、検出コイルの巻線方向である管軸方向の渦電流成分はない。(6)式より検出コイルはそれ自身の巻線方向と平行な電流成分を検出するから、きずなどの不連続部がない場合には、検出コイルの巻線方向に渦電流成分が存在しないので起電力は発生しない。プローブと管との相対距離が変化しても、励磁コイルによって誘導される渦電流の大きさは変化するが、プローブが管の中心軸に対して傾かない限りは、検出コイルの巻線方向には渦電流は流れない起電力が生じず、従来のプローブで問題となっている相対距離の変化による雑音は原理的に発生しない。

図2(b)に示すように軸方向にきずがある場合には、誘導される渦電流の一部がきず長さ方向に沿って軸方向に流れる。検出コイルは軸方向に巻かれているから、きずに沿って軸方向に流れた渦電流によって起電力が発生し、きずの検出が行える。きずに沿って流れる渦電流はきずの両側で流れる向きが逆であるので、プローブが周方向に回転するときずの前後で極性の異なる信号が得られる。

図2(c)に示すように支持板近傍に励磁コイルが位置して

図3 周方向プローブの構造

Fig. 3. New eddy current probe for detection of circumferential flaws (new circumferential flow detection probe).

図4 周方向プローブのきず検出原理

Fig. 4. Principle of flaw detection by the new circumferential flow detection probe.

も、周方向に巻かれた2つの励磁コイルや試験導体である管及び支持板等が軸対称の配置である限りは、渦電流は励磁コイル巻線方向に流れ、検出コイルの巻線方向には流れないので、支持板による雑音は原理的に発生しない。支持板の近傍に軸方向のきずがある場合には、支持板による雑音が発生しないから、従来のプローブに比べてSN比高くきず検出が行える。

〈2・4〉周方向のきずを検出するプローブ 管の周方向に長さを持つきずを検出するために図3の構造のプローブ(周方向プローブ)を提案する。図(a)は正面図、図(b)は側面図を表す。周方向プローブは、管内表面に平行に置かれ軸方向に長辺を持つ矩形に巻かれた2つの励磁コイルと周方向に巻かれた矩形の検出コイルから構成される。2つの励磁コイルは相対して配置しており、検出コイルは励磁コイルの中央に配置されている。

図4には管に誘導される渦電流を示す。きずなどの不連続部がない場合には、〈2・1〉節で述べた様に図4(a)に示すように励磁コイル1側と2側共に励磁コイルの巻線方向に渦電流が誘導され、検出コイルが位置する励磁コイルの中央部分では周方向には渦電流が流れない。(6)式より検出コイルはそれ自身の巻線方向と平行な電流成分を検出するか

図5 周方向プローブを回転走査したときのきず検出
Fig. 5. Circumferential flow detecting image of the new circumferential flow detection probe.

ら、きずなどの不連続部がない場合には、起電力は発生しない。プローブと管との相対距離が変化しても、プローブが管表面に対して傾かない限りは、検出コイルの巻線方向には渦電流が流れないので、起電力が生じず、相対距離の変化による雑音が原理的に発生しない。

図4(b)に示すように励磁コイル1側に周方向にきずがある場合には、誘導される渦電流の一部がきずの長さ方向に沿って周方向にも流れる。検出コイルは周方向に巻かれているから、きずに沿って周方向に流れた渦電流によって起電力が発生し、きず検出が行える。きずに沿って周方向に流れる渦電流はきずの両側で流れる向きが逆であるので、プローブが軸方向に移動するときずの前後で極性の異なる信号となる。さらに、周方向プローブの場合には、プローブが周方向に回転すると図5に示すようにきずを励磁コイル1と励磁コイル2が通過するので、極性の異なるきず信号が発生する。

図4(c)に示すように支持板近傍に励磁コイルが位置すると支持板に沿って励磁コイル1側と2側共に周方向に渦電流が流れ、検出コイルは周方向の渦電流を検出することとなるが、励磁コイル1における検出コイルの巻線方向と励磁コイル2における検出コイルの巻線方向とは逆向きであるので、(6)式より起電力は相殺し、支持板による雑音は原理的に発生しない。支持板の近傍で励磁コイル1に周方向のきずがある場合には、励磁コイル1における周方向に発生する渦電流と励磁コイル2における周方向に発生する渦電流とは異なるから、支持板近傍のきずを検出できる。以上の様に相対距離の変化による雑音と支持板による雑音が原理的に発生しないからSN比高くきず検出が行える。

筆者らは、有限要素解析により試験導体に誘導される渦電流の流れについて確認した。図6にスリット状きずのある平板導体に矩形の励磁コイルが相対して配置したときの導体表面に誘導される渦電流の流れを示す。渦電流の流れの向きを矢印の方向で、渦電流の大きさを矢印の大きさで示す。図より励磁コイル近傍においてコイル巻線方向に渦電流が誘導され、またきず近傍ではきずに沿って流れる渦電流を確認できる。

3. 実験方法

実験に用いた軸方向プローブの励磁コイルの寸法は、外

図6 矩形コイルによってきずのある試験体に誘導される渦電流

Fig. 6. Eddy current distribution in conducting plate with slit flaw by a rectangular coil.

径18 mm、巻線断面積 $2 \times 2 \text{ mm}^2$ であり、検出コイル寸法は、軸方向に長さ4 mm、径方向に7 mm、巻線断面積 $1 \times 1 \text{ mm}^2$ である。検出コイルの軸方向長さが4 mmで励磁コイルの巻線幅が2 mmであるのでプローブの軸方向幅は8 mmとなる。また、周方向プローブの励磁コイルの寸法は、軸方向に長さ25 mm、周方向に8 mm、巻線断面積 $2 \times 2 \text{ mm}^2$ であり、検出コイルの寸法は、周方向に長さ4 mm、径方向に18 mm、巻線断面積 $1 \times 1 \text{ mm}^2$ である。検出コイルは励磁コイル内側に位置し、励磁コイルの周方向長さが8 mmであるのでプローブの周方向幅は8 mmとなる。

試験体としては、外径21 mm、管肉厚1.5 mmの黄銅管を細管として、またドーナツ状の外径61 mm、厚さ20 mm、幅15 mmの鋼材を支持板として用いた。黄銅管の外面には軸方向及び周方向に長さ5, 10, 15, 25 mmで深さを管肉厚に対して100%, 80%, 60%, 40%, 幅0.2, 0.5, 0.8 mmのスリットをそれぞれ放電加工してきずとした。軸方向に長さのあるスリットを軸方向きずとし、周方向に長さのあるスリットを周方向きずとする。

実験を種々の試験周波数で行ったが、本実験で使用了試験体に対する渦電流の浸透深さから、試験体の外面きずを感度良く検出できた9 kHzの試験周波数とした。渦電流探傷試験では、試験周波数を高くすると渦電流の浸透深さが浅くなり外面きずの信号が小さくなる。また、試験周波数を低くするときず信号位相の変化の割合が小さくなるので、試験体毎に適切な試験周波数を設定して検査を行っている。プローブと試験体との相対距離を0.5 mmとした。管内部に挿入したプローブを周方向に1回転させた後、軸方向に0.5 mm移動することを繰り返して管内表面において2次元に回転走査した。きずが単独にある場合や支持板近傍にきずがある場合などについて探傷実験を行った。支持板ときずとの位置関係例を図7に示す。

また、きず検出性能の比較のために、外径6 mm、巻線断面積 $1 \times 1 \text{ mm}^2$ の円形コイルを従来の渦電流探傷プローブとして用い探傷実験を行った。

図7 支持板下におけるきず位置

Fig. 7. Flaw position under the support plate.

図8 従来のプローブによる渦電流探傷信号

Fig. 8. Eddy current flaw signal by the conventional probe.

図9 軸方向プローブによる渦電流探傷信号

Fig. 9. Eddy current flaw signal by the new axial flow detection probe.

4. 実験結果

〈4・1〉 支持板近傍の探傷結果 支持板近傍の管外面に深さ60%のきずがある場合について、プローブを管内表面において2次元に回転走査したときの渦電流探傷結果を示す。図8には、従来のプローブによる探傷結果を示す。渦電流探傷信号は、励磁コイルの電流に対して同相成分(In-phase component)と90度進相成分(Quadrature component)の複素信号で得られるが、図では信号の振幅で表した。また、図中のz-axisは管の軸方向を、 θ は管の周方向を示す。渦電流それ自身の変化を検出する従来のプローブでは、支持板によって渦電流の流れが変化するため、支持板による大きな雑音が発生し、明瞭なきず信号が得られていない。このために、支持板近傍のきず検出が困難であることがわかる。一方、図9に示す軸方向プローブと図10に示す周方向

図10 周方向プローブによる渦電流探傷信号

Fig. 10. Eddy current flaw signal by the new circumferential flaw detection probe.

図11 周方向プローブにおける支持板雑音ときず信号

Fig. 11. Support plate noise and flaw signal obtained by the new circumferential flaw detection probe.

プローブの場合には、支持板による雑音が非常に小さく、明瞭なきず信号が得られている。すなわち、支持板近傍のきずを雑音小さく検出できることがわかる。両プローブ共にプローブの走査によって極性の異なる信号を得るが、図においては信号の振幅で表したので2つ山の信号として表示されている。更に、周方向プローブでは、プローブの回転走査によって励磁コイル1と2がきずを通過するため、きず信号が2回発生するので4つ山の信号として表示されている。

きずがない位置においてプローブを回転走査して発生する支持板による雑音(N)の最大振幅ときずの上を回転走査して得られるきず信号(S)の振幅との比を各プローブについて求めた。図11に例として周方向プローブにおける支持板雑音ときず信号との軌跡を複素平面上に示す。図中の支持板雑音(N)ときず信号(S)とよりSN比を求めた。従来のプローブのSN比は1.2であったのに対して軸方向プローブでは7.5、周方向プローブでは8.3と非常に高いSN比を得られた。提案するプローブは、SN比高く支持板近傍のきず検出が行えることがわかる。

〈4・2〉 基礎的なきず検出特性 きずの深さや長さ、幅

図 12 きず深さが異なる場合のきず信号
Fig. 12. Flaw signals for different flaw depths.

図 13 きず長さが異なる場合のきず信号
Fig. 13. Flaw signals for different flaw lengths.

図 14 きず長さに対するきず信号振幅の変化
Fig. 14. Flaw signals amplitude vs. flaw length.

などが異なる場合について探傷実験を行い、プローブの基礎的なきず検出特性の確認を行った。図 12 には、きずが単独にある場合において、長さと同様に深さの異なるきずに対して軸方向プローブを走査して得られたきず信号を複素平面上に示す。きず深さが浅くなると信号振幅は小さくなるものの深さ 40% の外面きずをも検出できていることがわかる。また、きず深さに応じて信号位相が変化していることがわかる。

図 13 には、深さと幅は同じで長さの異なるきずに対し

図 15 きず幅が異なる場合のきず信号
Fig. 15. Flaw signals for different flaw widths.

図 16 きず幅に対するきず信号振幅の変化
Fig. 16. Flaw signals amplitude vs. flaw width.

て軸方向プローブを走査して得られたきず信号を複素平面上に示す。図 14 には、きず長さ 15 mm のきず信号振幅で正規化したときのきず長さに対するきず信号振幅の変化を示す。プローブの軸方向幅 8 mm より十分に長いきずに対してはきず信号振幅がほぼ同じであり同感度できず検出を行えるが、きず長さが短くなるときず信号振幅が小さくなることからわかる。これはきずが短くなるときずに沿って流れる渦電流が小さくなるためである。一方、きず信号振幅はきず長さで変化するが、きず信号の位相角は、きず長さによらずほぼ一定であることがわかる。

図 15 には、深さと長さは同じで幅の異なるきずに対して軸方向プローブを走査して得られたきず信号を複素平面上に示す。図 16 には、きず幅 0.5 mm のきず信号振幅で正規化したときのきず幅に対するきず信号振幅の変化を示す。きず幅が狭くなるときず信号振幅が小さくなるものの、きず信号の位相角は、きず幅によらずほぼ一定であることがわかる。周方向プローブについても同様な結果が得られることを確認している。

これらの結果よりきず信号の位相角は、きず深さに応じて変化しきずの長さや幅などに対しては変化しないことがわかる。すなわち、きず信号の位相角よりきず深さの評価を行えることが期待できる。

Flaw: depth 60%, length 15mm, width 0.5mm

(a) the new axial flow detection probe

(b) the new circumferential flow detection probe

図 17 支持板近傍のきずによる信号

Fig. 17. Flaw signal for flaw placed under the support plate.

〈4・3〉 きず深さの評価 細管の保守検査においては、漏洩事故を防ぐために、きず深さを知ることが重要である。渦電流探傷試験では、複素平面上におけるきず信号の傾き角度である信号位相からきず深さの評価が行われている⁽¹¹⁾。

図 17 には、きずの深さ 60% で図 7 に示した支持板に対するきず位置が異なる場合について、図 (a) に軸方向プローブ及び図 (b) に周方向プローブを走査して得られたきず信号を表す。支持板に対するきずの位置が異なるときず信号の軌跡は支持板による影響で変化するが、きず深さが同じであれば信号位相はほぼ同じであることがわかる。したがって、きずが単独にある場合や支持板近傍にある場合とによらず、きず信号の位相角からきず深さの評価を行えることが期待できる。

図 18 には、深さ 100% のきずによる信号の位相角を 0 deg として、きず深さに対する信号の位相の変化を示す。きずが単独に存在する場合だけでなく支持板近傍にきずが存在する場合でも、きず深さに応じて信号の位相が変化することがわかる。従来のプローブでは、同じ深さのきずでも相対距離の変化による雑音や支持板による雑音のため信号位相が変化するので、信号の振幅に基づいてきずの評価が行われている。しかし、信号の振幅は、きずの深さだけでな

Flaw: length 15mm, width 0.5mm

図 18 きず信号位相によるきず深さの評価

Fig. 18. Flaw depth estimation according to the flaw signal phase.

く長さや幅で変化するので正確なきず深さの評価が困難であるのが現状である。これに対して、提案するプローブでは、信号の振幅と共に位相を用いることによりきず深さ評価の精度を向上できると考える。周方向プローブについても同様な結果が得られ、きず深さに応じて信号位相が変化することを確認している。

5. おわりに

熱交換器などで使用されている細管の渦電流探傷試験におけるきず検出性能の向上を志向して、雑音の小さな渦電流探傷プローブを提案した。提案したプローブのきず検出特性について検討し、以下の知見を得た。

(1) 提案する渦電流探傷プローブは、プローブと試験導体との相対距離の変化による雑音や支持板による雑音が、従来のプローブに比べて非常に小さい。

(2) 従って、支持板近傍の小さなきずも SN 比高く検出できる見通しを得た。

(3) 支持板に対するきずの相対位置の違いによりきず信号の軌跡は異なるが、きず信号の位相角はほぼ変化しない。

(4) また、支持板の有無によらずきず深さに応じてきず信号の位相が変化する。

(5) きず信号の振幅はきず長さや幅で変化するが、きず信号の位相角はきず深さが同じであればほぼ変化しない。

(6) 従って、きず信号の位相に基づいてきず深さの評価を行えると期待できる。

(7) プローブの幅より十分に長いきずに対してはきず長さによらずにほぼ同じ信号振幅を得られるが、プローブ幅より短いきずに対してはきずに沿って流れる渦電流が小さくなるのできず信号振幅が小さくなる。

(8) 軸方向プローブと周方向プローブとを 1 組として管内表面を周方向への回転と軸方向への移動を繰り返す回転走査を一度行えば、軸方向及び周方向のきずを同時に探傷可能であると考えられる。

今回はプローブ寸法などを一定として検討を行ったが、今後プローブ寸法のきず検出性能に与える影響や磁性体の管の場合など更なる検討を行う予定である。

(平成 17 年 8 月 31 日受付, 平成 18 年 2 月 28 日再受付)

文 献

- (1) B. Wincheski, J.P. Fulton, S. Nath, M. Namkung, and J.W. Simpson: "Self-nulling Eddy Current Probe for Surface and Subsurface Flaw Detection", *Materials Evaluation*, Vol.52, No.1, pp.22–26 (1994)
- (2) K. Krzywosz: "Latest Eddy Current Applications in Nuclear Industry", 13th International Conf. Nuclear & Pressuer Vessel Industries Kyoto Japan, pp.61–65 (1995)
- (3) H. Hoshikawa and K. Koyama: "Eddy Current Testing Probe using Rotating Direction Eddy Current", *Journal of The Japan Society of Applied Electromagnetic and Mechanics*, Vol.3, No.3, pp.36–42 (1995) (in Japanese)
星川 洋・小山 潔:「回転渦電流を利用した渦流探傷プローブ」, 日本 AEM 学会論文誌, 3, 3, pp.36–42 (1995)
- (4) G.L. Burkhardt, J.L. Fisher, J.S. Stolte, S.R. Kramer, and K.L. Cobble: "NDE of Aging Aircraft Structure using Orthogonal-axis Eddy Current Probes", *Review of Progress in QNDE*, Vol.16, pp.1021–1027 (1997)
- (5) H. Hoshikawa and K. Koyama: "A New Eddy Current Probe using Uniform Rotating Eddy Currents", *Materials Evaluation*, Vol.56, No.1, pp.85–89 (1998)
- (6) K. Koyama and H. Hoshikawa: "Fundamental Characteristics of Uniform Eddy Current Probe in ECT", *Journal of the Japanese Society for Non-Destructive Inspection*, Vol.49, No.11, pp.775–781 (2000) (in Japanese)
小山 潔・星川 洋:「渦流探傷試験における一様渦電流プローブの基礎的特性に関する研究」, 非破壊検査, 49, 11, pp.775–781 (2000)
- (7) H. Hoshikawa, K. Koyama, and H. Karasawa: "Study of a New Surface Eddy Current Probe without Lift-off Noise", *Journal of the Japanese Society for Non-Destructive Inspection*, Vol.50, No.11, pp.736–742 (2001) (in Japanese)
星川 洋・小山 潔・柄沢英之:「リフトオフ雑音が発生しない渦流探傷用上置プローブに関する研究」, 非破壊検査, 50, 11, pp.736–742 (2001)
- (8) H. Hoshikawa and K. Koyama: "A New Eddy Current Probe with Minimal Lift-off Noise and Phase Information on Discontinuity Depth", *Materials Evaluation*, Vol.61, No.3, pp.423–427 (2003)
- (9) H. Hoshikawa and K. Koyama: "Proposition for a New Eddy Current Probe for Flaw Depth Evaluation with Minimal Lift-off Noise", *Journal of the Japanese Society for Non-Destructive Inspection*, Vol.53, No.5, pp.288–293 (2004) (in Japanese)
星川 洋, 小山 潔:「きず深さの評価を目指したリフトオフ雑音が小さい渦流探傷上置プローブの提案」, 非破壊検査, 53, 5, pp.288–293 (2004)
- (10) For Example, N. Kumagai: *Electromagnetic Theory*, Corona Publishing Co., Ltd. (1991) (in Japanese)
例えば, 熊谷信昭:「電磁理論」, コロナ社 (1991)
- (11) ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Sec. V Article 8 (1978 Winter Addenda)

星 川 洋 (正員) 1942 年 7 月 21 日生。1965 年 3 月山形大学卒業。1967 年 3 月山形大学大学院修士課程修了。同年 4 月より日本大学生産工学部に勤務。1989 年 4 月同教授。現在は主として渦電流探傷に関する研究に従事。工学博士。

小 山 潔 (正員) 1963 年 3 月 24 日生。1986 年 3 月日本大学卒業。1988 年 3 月日本大学大学院博士前期課程修了。1991 年 1 月より日本大学生産工学部に勤務。2001 年 4 月同助教授。現在は電磁気の応用計測に関する研究に従事。博士 (工学)。