マイクロループ型磁気センサアレーによる渦電流試験

正員 上坂 充 (東京大)
非会員 白田 和巳 (東京大)
正員 宮 健三 (東京大)
非会員 青木 一彦 (原子燃料工業)
非会員 高橋 歩 (住友精密工業)

Eddy Current Testing by Microloop Magnetic Sensor Array

Mitsuru Uesaka, Kazumi Hakuta, Kenzo Miya (The University of Tokyo), Kazuhiko Aoki (Nuclear Fuel Industries, Ltd.), Ayumu Takahashi (Sumitomo Precision Products Co., Ltd.)

A micro-ECT (Eddy Current Testing) probe which consists of a planar microloop inductive magnetic sensor array and a pancake-type exciting coil was developed to upgrade the ECT technology on the inspection for a steam generator (SG) tubing in a pressurized nuclear power plant (PWR). Eddy currents and resultant magnetic fields are perturbed due to a flaw in a conductor. The flaw is detected via perturbation of electromotive force (EMF) and phase from the array. Flaws manufactured by electric discharge machining (EDM) in INCONEL 600 1.25 mm² planar specimens were detected and reconstructed by using stacked database and simplified algorithm. Even outer 10% flaw could be detected. Measured EMF and phase signals were compared with numerical results obtained by using a three dimensional eddy current and field analysis code and verified. It was confirmed by the experiment that the spatial resolution of detection of the micro-ECT probe is superior to that of the conventional pancake-type ECT probe. Finally we demonstrated that we could establish the same measurement speed using the micro-ECT probe as that using the pancake-type ECT probe.

キーワード：マイクロ ECT (Eddy Current Testing), マイクロ磁気センサアレー, 非破壊検査, 原子力プラント, 欠陥同定, 渦電流解析

1. 序

原子力プラントは放射性物質を長期間内包するため、製造・建設段階において細心の注意がはらわれているのはもちろんであるが、プラントの運転に伴う経年劣化は不可避な問題であるため供用期間中の安全確保にも様々な配慮がなされている。その一つとして、供用期間中検査 (ISI: In-Service Inspection) の実施がある。ISI は原子力プラントという性格上、非破壊検査 (Non-Destructive Testing) によって行われ、特に PWR 原子力プラントの蒸気発生器伝熱管には、膨大な被検査体を比較的短い時間で簡便に探傷できることから、渦電流探傷試験 (ECT: Eddy Current Testing) が広く採用されている。この ECT は一般に、小型のポピン型やパンケーキ型のコイルをプローブとして使用し、細管壁面に渦電流を発生させインピーダンスの変化を測定するものである。しかしながら、インピーダンスという空間的に平均化された信号を測定するため

原理的に探傷性能には限界があり、十分な精度の情報を提供しない。一方で蒸気発生器伝熱管の信頼性はプラントの安全性に深く関連するため、より小さな欠陥に対する高い検出能力が求められる。特に原子力プラントの耐用年数の延長とからんで、欠陥の有無にとどまらずその形状や位置などの正確な評価に対する要求も強くなりつつある。そこで ECT の高性能化は、安全面からのみならず経済面からも重要となってきた。

本研究では、ECT プローブのマイクロアレー化の動向⁽¹⁾⁽²⁾を発展させるべく、マイクロ磁気センサアレーをパンケーキコイルに固定したマイクロ ECT プローブ⁽³⁾⁽⁴⁾を用いて、平板上の人工欠陥の測定を行った。このプローブは励磁コイルから独立したマイクロコイルにより、従来のインピーダンス測定方式のパンケーキ型プローブより優れた検出性能と空間分解能を得ることを目指したものである。今回は、プローブの改良を図り、パンケーキ型プローブとの性能比較、欠陥同定および実験データを検証すべく

図 1 マイクロ ECT プローブ I
Fig. 1. Micro-ECT probe I assembly.

図 2 マイクロコイル拡大写真
Fig. 2. Magnified photograph of micro coils.

三次元渦電流・磁界数値解析との比較を行った。

2. 原 理

測定に使用したマイクロ ECT プローブは、石英基板 (厚さ 0.6 mm, 1 辺 14 mm) 上に 16 個の正方形銅製マイクロコイル (外寸 2.0 mm, 40 ターン, 線幅 8 μ m) をもつマイクロ磁気センサアレーの中央に、強磁性体コアをもつパンケーキコイル (外径 3.18 mm) を固定したものである。前回のプローブ⁽³⁾⁽⁴⁾ に比べ、SN 比を向上させるためにマイクロコイルのサイズを 1.2 mm $\times$ 1.2 mm から 2 mm $\times$ 2 mm へと大きくし、ターン数も 20 から 40 へ倍増させた。プローブ I の断面図と下面図を図 1 に、マイクロコイルの拡大写真を図 2 に示す。各センサには A~P の名称を付けた。測定に使用したプローブ I, II は、それぞれパンケーキコイル内に強磁性体コアをもつものともたな

図 3 欠陥による渦電流・磁界の摂動と
センサ位置

Fig. 3. Perturbation of eddy current and magnetic field due to a flaw and sensor arrangement.

いものを表す。プローブ I で内部に強磁性体コアを入れた理由は、磁束をプローブ直下に集中させ、検出の空間分解能を向上させることである。このプローブの大きさは特徴は励磁コイルとピックアップコイルを分離独立させたことで、欠陥特有の局所的な磁界分布の変化をとらえられるということである。

このマイクロ ECT プローブで 16 個のセンサを設置した理由は、それらから得られるデータより欠陥同定逆問題の研究にも供せられるようにしたためである⁽⁵⁾。しかし、高速信号処理の観点からセンサ数は少ないほうが好ましい。今回は、欠陥の方向性とプローブ走行を検討し、16 個のセンサから 4 個のみを使用して円管の周・軸方向欠陥の同定法を提案する。

図 3 に、欠陥による渦電流の摂動と、センサ面での磁界摂動の垂直成分の等高線図を示す。欠陥が存在する場合の渦電流ループと、欠陥がない場合の渦電流ループとの差をとると、前者のループのう回電流の部分と後者の欠陥付近にあたるループの一部が残る。う回電流は分散して弱いので、後者のループの一部が相対的に強く残ることになり、近似的に電流ダイポールが現われる。この近似的な電流ダイポールが、欠陥による磁界の摂動に対し支配的なため⁽³⁾⁽⁴⁾、図 3 の右図のように渦電流ループと欠陥の交点の両脇に摂動の大きい所が現われる。K 素子は最も強い摂動が現われる箇所の真上に配置されている。このプローブを欠陥上で走行させれば、K 素子から電流ダイポールの出現と消滅に対応したステップ状の信号が得られる。

3. 実 験

〈3・1〉 装 置 プローブのパンケーキコイル側を励磁コイルとしてマルチファンクションシンセサイザにより正弦波電圧を加え、マイクロ磁気センサ側はピックアップコイルとして、ロックインアンプにより励起電圧 (EMF : Electro-motive Force) つまり垂直方向の磁界強度の変化および励起電圧と印加電圧との位相のずれを測定した。マイクロ磁気センサアレーは 16 個のマイクロコイルをもつので切換えが必要であり、リレーボードを用いた。またプローブの走行は XYZ ステージユニットによって行った。ロックインアンプおよび XYZ ステージ

ニットはGP-IBに対応しているため、リレーボードを含めコンピュータによって制御し、自動測定を行った。図4に実験体系の模式図を示す。

測定した試料はINCONEL 600 (NiCrFe 合金) の平板 (1.25 mm 厚) で、放電加工 (EDM) により様々な深さおよび長さの人工欠陥が加工されている。材質と厚さはPWRの蒸気発生器細管を想定したものである。測定時には、プローブと試料との間に絶縁を確保するための約50 μm 厚のカプトンシートを挟み、プローブをそれに接触した状態から50 μm 上昇させて測定を行った。このときのリフトオフ (試料表面とセンサ面の距離) は、0.1 mm である。

(3・2) PWRSG 細管探傷のシナリオ プローブは、図5に示すように蒸気発生器伝熱管内をらせん状に走査させて探傷することを想定している。そこで、平板上で周方向欠陥や軸方向欠陥を模擬するために、図6のオンライン走行は図7でプローブのK素子とE素子が作る対角線が欠陥の真上を走行する場合、オフライン走行はその対角線が欠陥からずれて走行する場合、スライド走行はその対角線が欠陥を横切って走行する場合をそれぞれ表す。初めの二つは周方向欠陥を、後の一つは軸方向欠陥を模擬するためである。プローブが円管内面に沿って適当なピッチでらせん状に走行する場合の各素子と周方向欠陥および軸方向欠陥との位置関係を図7に示す。

(3・3) 周方向欠陥の検出 プローブIを用いた、K素子とE素子が作る対角線が欠陥の真上を通る理想的な走行で、長さ3 mm、プローブに対向した面に存在する、

板厚に対して深さ40%の欠陥を測定したときの、プローブ座標に対するC, J, K素子の信号の変化を図8に示す。いま、内・外面欠陥を、それぞれプローブに対向する面、しない面に存在する欠陥を意味し、IF, OFと記述する。従って、上記欠陥をIF 40% 3 mmで表す。

ここで、この測定を図9のようにモデル化して考える。プローブのパンケーキ型コイルによって励起される渦電流のピークループ半径は約2 mmと計算されている。また、欠陥の中心をプローブ座標の原点としている。以下、図9のように電流ダイポール⁽³⁾⁽⁴⁾を用いて図8の測定結果を説明する。

図5 マイクロECTプローブを用いた伝熱管における探傷の模式図

Fig. 5. Schematic drawing of inspection of tube by micro ECT probe.

図6 走行パターン

Fig. 6. Probe motion patterns.

図7 各素子と周方向欠陥および軸方向欠陥との位置関係

Fig. 7. Location of sensors and circumferential and axial flaws.

図4 測定システムの概要

Fig. 4. Block diagram of experimental setup.

図 8 C, J, K 素子における EMF 信号と位相信号の変化

Fig.8. EMF and phase signals from C, J, K sensors.

プローブがプローブ座標の -3.5 mm まで進むと欠陥と渦電流ループが交差し、これに対応して先ほど述べた電流ダイポールが出現する。C 素子はこの電流ダイポールの影響を受けるので信号が立ち上がり始める。一方、J 素子と K 素子はそれから遠い位置にあるので信号の変化はない。 -0.5 mm のとき欠陥と渦電流ループの交差がなくなり C 素子の信号は急激に落ちる。J 素子と K 素子は影響を受けない。更に 0.5 mm まで進むと渦電流ループがまた欠陥と交差し、その点に新たな電流ダイポールが出現

図 9 電流ダイポールの出現・消滅の模式図
Fig.9. Schematic drawing of current dipoles.

表 1 欠陥長の同定結果

Table 1. Results of evaluation of flaw length.

Length (mm)	Dev (mm)	100%	IF				OF			
			20%	40%	60%	80%	20%	40%	60%	80%
2	0.0	3.2	3.2	3.3	3.2	3.2	3.6	2.7	3.0	3.1
	0.5	3.3	3.8	3.3	3.3	3.4	4.8	3.7	3.0	3.3
	1.0	3.4	3.5	3.8	3.5	3.6	3.2	2.5	3.1	3.2
3	0.0	2.9	3.7	3.4	3.4	3.2	3.7	3.3	3.2	3.2
	0.5	3.2	3.6	3.5	2.7	3.3	3.3	3.4	3.3	3.2
	1.0	3.3	3.3	3.6	3.7	3.3	3.0	2.8	4.1	3.3
5	0.0	3.0	4.8	4.2	4.2	3.8	4.9	4.7	4.3	4.0
	0.5	3.2	4.4	4.6	4.2	3.8	4.6	4.6	4.3	3.9
	1.0	3.3	5.3	4.4	4.2	4.0	4.1	4.7	4.6	4.2
7	0.0	3.9	6.8	6.2	5.8	5.3	6.3	6.4	6.2	5.7
	0.5	4.0	6.9	6.6	6.0	5.5	7.2	5.8	6.0	5.6
	1.0	4.2	6.0	6.0	6.4	5.7	8.5	6.1	5.8	5.8
10	0.0	6.9	9.4	9.4	8.9	8.5	10.4	9.1	9.2	9.0
	0.5	6.9	10.5	9.2	9.1	8.5	8.4	9.6	9.4	9.0
	1.0	6.9	9.7	8.9	8.6	8.6	10.2	10.2	9.0	9.1

する。いずれの素子もこの電流ダイポールに近いので、強い影響を受け、C 素子は再び信号が上がり、J 素子と K 素子の信号も一気に立ち上がる。 3.5 mm では二番目に発生した電流ダイポールが消滅するので、すべての素子の信号が一気に落ちる。このように、C 素子の信号は二つの電流ダイポールの影響を受けて二つのピークをもつので欠陥長さ判定に使用するの是不適であるが、K 素子の信号はその近傍にできる電流ダイポールの出現と消滅に対応したステップ状の信号変化を示す。その半幅幅 (F. W. H. M. : Full Width of Half Maximum) は正確に欠陥長に対応しており、また半値が生じているプローブ座標から欠陥位置も知ることができる。表 1 に測定から得られた欠陥長を示す。更に、欠陥による EMF 信号・位相信号の擾動の最大値をそれぞれ ΔEMF , $\Delta\theta$ と定義すれば、それらの値から内側欠陥か外側欠陥かの識別と深さの判定が、後述するように可能である。

また、検出が難しいとされている OF 10% 5 mm の欠陥についても S/N 比が不十分ではあるが、かろうじて長さや位置を測定することができた (図 10 参照)。

〈3・4〉 検出の死角の克服 プローブ軌道からずれた位置にある欠陥の検出において、図 5 のように 2 mm ピッチで走査することを考えれば、プローブの走行軌道の欠陥からのずれ (Deviation; 以下 D_{ev} と表現する) は 1.0 mm まで考えれば十分なので、 $D_{ev}=0.0, 0.5, 1.0\text{ mm}$ の測定を行った。パンケーキ型プローブでは、 D_{ev} がある

図 10 OF 10% 5 mm 欠陥の K 素子の信号
Fig. 10. K sensor signal for OF 10% 5 mm flaw.

図 11 Deviation と $\Delta EMF(K)/\Delta EMF(J)$ の関係
Fig. 11. $\Delta EMF(K)/\Delta EMF(J)$ versus deviation.

と〈3・8〉節で述べるように死角が存在する。しかしマイクロ ECT プローブでは、 D_{ev} が大きくなるほど K 素子の信号は減少するが、逆に J 素子の信号がこれを補完するように増大するので死角が存在しない。

また、 $D_{ev} - \Delta EMF(K)/\Delta EMF(J)$ 校正曲線 (図 11 参照) から D_{ev} を同定することができる。

〈3・5〉 軸御方向欠陥の検出 2 mm ピッチの走査に対し、渦電流ピークループの直径は数値解析より約 4 mm であるので、あらゆる軸方向欠陥は少なくとも 1 回は軸方向欠陥検出用の H 素子 (図 7 参照、この実験では K 素子を使った) の近辺で渦電流ピークループと交差するはずである。H 素子はその近辺に出現した近似的な電流ダイポールの影響を敏感にとらえるので、必ず欠陥を感知することができ、死角は存在しない。

このことを考慮しながら、プローブをスライド走行させたときの K 素子の信号のピーク値を 1 周ら旋状に走査するごとに取り出して、プローブの軸方向座標に対してプロットすると、オンライン走行における信号波形と同等なものが見られる。周方向欠陥のときと同様に、欠陥長さや

図 12 欠陥同定のアルゴリズム
Fig. 12. Algorithm of flaw reconstruction.

深さを求めることができる。

〈3・6〉 欠陥同定 以上の結果を踏まえ、図 12 に示すようなアルゴリズムで測定データから欠陥の種類を同定するプログラムを作成した。ここでは K 素子、J 素子、L 素子を周方向欠陥検出に、H 素子 (この実験では K 素子を使った) を軸方向欠陥検出に割り当てた。周方向欠陥は、例えば図 11、図 13、図 14 のような $D_{ev} - \Delta EMF(K)/\Delta EMF(J)$ 校正曲線と各 D_{ev} における $\Delta EMF(K)$ -Depth 校正曲線、 $\Delta \theta(K)$ -Depth 校正曲線をあらかじめ用意しておけば、測定された $\Delta EMF(K)$ 、 $\Delta \theta(K)$ 、 $\Delta EMF(K)/\Delta EMF(J)$ 、欠陥長さから D_{ev} と欠陥深さと内側欠陥か外側欠陥かの判定ができる。また、軸方向欠陥は必ず H 素子の真下を通過するので、そのときの EMF 信号のピーク値をプローブの軸方向座標に関してプロットすれば、 D_{ev} のない周方向欠陥と同じ信号波形が得られ、周方向欠陥と同相なアルゴリズムで欠陥の長さや深さが決定できる。

上記アルゴリズムに従いあらかじめ作成したデータベースを用いて、 $D_{ev}=0.0, 0.5, 1.0$ mm における 2, 3, 5, 7, 10 mm 欠陥の ΔEMF 、 $\Delta \theta$ の値から欠陥同定を行った結果を表 2 に示す。おおむね良好な結果を得たが、誤診も数例見られる。その原因としては、パンケーキコイルとセンサアレーの位置決め誤差、プローブと欠陥との相対位置決め誤差が考えられる。実機に应用する場合には上記位置決めに関して標準的機械加工精度 ($\sim 50 \mu\text{m}$) 程度の精度が必要となろう。

〈3・7〉 コアの効果 プローブ I とプローブ II での測定結果を比較すると、EMF 信号の波形、強度ともにほとんど有意な差が観測されなかった (表 3 参照)。強磁性体コアは、空間分解能の改善に効果があると期待されたが、著者らの数値解析コードが強磁性体を取り扱えないため、実験よりその効果を調べた。しかし、今回の実験データからはその効果は確認されなかった。

〈3・8〉 パンケーキ型プローブとの性能比較 本節で

図 13 欠陥深さと EMF 信号波高値の関係
Fig. 13. $\Delta EMF(K)$ versus flaw depth.

図 14 欠陥深さと位相信号波高値の関係
Fig. 14. $\Delta \theta(K)$ versus flaw depth.

は、マイクロ ECT プロブとパンケーキ型プロブとの間で、欠陥の長さの判定精度と検出の死角に関して性能比較を行う。検出性能を調べるためパンケーキコイルの中心が IF 40% 3 mm 欠陥の上を走行するときのプロブ座標に対するインピーダンス信号の変化を LCZ メータを使用して調べた。

図 15 に結果を示す。波形が二つのピークをもつことからわかるように、マイクロ ECT プロブの C 素子と同じように、パンケーキ型プロブでは二つの電流ダイポールの影響を受ける。そのため、信号波形の半値幅は欠陥長よりも長くなってしまい、微小欠陥に関しては二つのピークをもつ。これからパンケーキ型プロブの空間分解能は 7 mm 程度と評価される。

また、従来のパンケーキ型プロブでは 2 mm ピッチで螺旋状に走査を行うが、周方向欠陥を検出するとき、欠陥からわずかにずれ (D_{ev}) が生じるだけで信号が急激に下がるので、死角が生じて検出落ちや深さの過小評価を起こす。IF 40% 10mm 欠陥に関して、最大信号の D_{ev} による影響を調べた結果を図 16 に示す。 $D_{ev}=1$ mm で信号はほ

表 2 欠陥同定アルゴリズムによる判定結果
Table 2. Results of flaw reconstruction by the algorithm.

欠陥長	Dev	100%	IF				OF			
			20%	40%	60%	80%	20%	40%	60%	80%
2	0.0	81.72 0.06 IF	18.20 0.15 IF	32.89 0.09 IF	50.09 0.0- IF	62.62 0.0- IF	13.16 0.10 OF	32.57 0.10 OF	60.34 0.0- OF	69.42 0.0- OF
	0.5	81.14 0.53 IF	19.20 0.68 IF	34.93 0.55 IF	51.34 0.45 IF	63.61 0.47 IF	10.25 0.62 OF	33.74 0.39 OF	53.11 0.32 OF	67.90 0.37 OF
	1.0	83.29 1.0+ OF	31.58 1.0+ OF	39.18 1.0+ IF	51.80 1.0+ IF	61.50 1.0+ IF	25.33 0.0- OF	34.39 0.73 OF	47.22 0.82 OF	64.79 0.89 OF
3	0.0	100.0+ 0.0- IF	20.19 0.50 IF	40.20 0.18 IF	57.45 0.07 IF	79.58 0.10 IF	18.18 0.0- OF	40.13 0.11 OF	55.90 0.0- OF	78.89 0.0- OF
	0.5	95.47 0.42 IF	22.63 0.91 IF	42.57 0.72 IF	63.77 0.59 IF	80.33 0.62 IF	19.18 0.34 OF	38.84 0.70 OF	58.59 0.47 OF	78.11 0.46 OF
	1.0	94.51 0.96 IF	32.26 1.0+ OF	37.29 1.0+ IF	54.38 1.0+ IF	82.33 1.0+ OF	15.00 0.88 OF	38.04 0.89 OF	53.77 1.0+ OF	75.91 0.94 OF
5	0.0	100.00 0.0- ×	21.14 0.27 IF	43.57 0.13 IF	80.58 0.0- OF	83.48 0.0- IF	20.08 0.04 OF	40.68 0.00 OF	62.76 0.0- OF	82.83 0.0- OF
	0.5	100.0+ 0.13 ×	23.99 0.77 IF	45.72 0.72 IF	64.85 0.47 IF	82.14 0.37 IF	20.46 0.43 OF	41.36 0.54 OF	61.26 0.45 OF	80.72 0.37 OF
	1.0	100.0+ 0.67 ×	20.30 1.0+ IF	41.57 1.0+ IF	64.58 1.0+ IF	81.44 0.94 IF	20.53 0.92 OF	40.32 1.0+ OF	58.55 0.83 OF	79.73 0.91 OF
7	0.0	100.0+ 0.0- ×	21.23 0.22 IF	40.65 0.05 IF	60.45 0.0- IF	79.90 0.0- IF	20.95 0.38 OF	40.16 0.16 OF	60.89 0.13 OF	80.17 0.08 OF
	0.5	100.0+ 0.0- ×	23.61 0.87 IF	42.82 0.66 IF	80.19 0.56 IF	79.98 0.45 IF	20.33 0.53 OF	40.51 0.52 OF	59.83 0.49 OF	80.12 0.57 OF
	1.0	100.0+ 0.59 OF	17.93 1.0+ IF	41.35 1.0+ IF	59.88 1.0+ IF	80.22 1.0+ IF	20.12 0.79 OF	37.11 1.0+ OF	57.09 0.84 OF	78.58 1.00 OF
10	0.0	98.72 0.0- OF	20.50 0.23 IF	45.06 0.49 IF	59.08 0.06 IF	77.13 0.0- IF	25.19 0.60 OF	42.08 0.43 OF	61.53 0.30 OF	78.09 0.0- OF
	0.5	95.18 0.46 IF	31.46 0.96 IF	47.84 1.0+ IF	60.06 0.53 IF	78.04 0.47 IF	16.07 0.74 OF	43.78 0.92 OF	62.35 0.71 OF	74.36 0.0- OF
	1.0	94.33 0.94 OF	18.87 1.0+ IF	36.86 1.0+ IF	59.57 1.0+ IF	79.61 1.0+ IF	20.00 0.78 OF	40.00 1.0+ OF	56.52 1.0+ OF	77.14 0.89 OF

表 3 検出精度におけるコアの効果 (200 kHz)
Table 3. Effect of core on detection accuracy (200 kHz).

	Probe I (コアあり)			Probe II (コアなし)		
	$\Delta EMF(mV)$	$\Delta \theta (deg)$	半値幅(mm)	$\Delta EMF(mV)$	$\Delta \theta (deg)$	半値幅(mm)
100% 10mm	8.11	71.76	7.0	6.69	75.88	7.0
IF40% 10mm	0.73	12.30	9.3	0.59	12.72	9.4
OF40% 10mm	0.23	0.44	9.8	0.22	0.54	9.2
100% 3mm	3.04	34.79	3.1	3.21	38.44	3.1
IF40% 3mm	0.58	9.08	3.5	0.53	13.44	3.5
OF40% 3mm	0.21	0.39	3.5	0.25	2.45	3.3

ぼ 1/2 に減少している。これに対して、マイクロ ECT プロブでは<3・4>節で述べたように、K 素子を J 素子が補完するので死角が生じない。

パンケーキ型プロブとマイクロ ECT プロブとの性能の比較を表 4 に示す。これより、マイクロ ECT プロブのほうが現状のパンケーキ型プロブよりも優れた検出能力をもっていることがわかる。

<3・9> 探傷速度 実機のパンケーキ型プロブの円

図 15 パンケーキ型プローブのインピーダンス信号
Fig.15. Impedance signal from pancake-type probe.

図 16 パンケーキ型プローブによる軸方向欠陥の信号
Fig.16. Impedance signal from pancake-type probe as a function of deviation.

管軸方向進行速度は360 mm/sであるが、本実験ではXYZ ステージの性能限界である10 mm/sしか出すことができなかった。そこで、ロックインアンプの信号応答性を30分の1にすることでパンケーキ型プローブと同等な条件にしようと試みた。実際は、ロックインアンプの時定数を調整した。この時定数は交流信号の振幅値算出速度を決めるパラメータで、小さすぎると平均化機能が弱まり雑音が大きくなり、大きすぎると時間応答性が悪くなる。プローブ走行が速くなれば、応答性を良くするために小さい値を選択する必要がある。実験で使用したロックインアンプの時定数の最小値は1 msであった。

そこで本実験では、マイクロECTプローブで走行速度360 mm/s、ロックインアンプ時定数1 msの測定を想定した。これは速度10 mm/s、時定数30 msのときの応答

表 4 パンケーキ型プローブとマイクロECT
プローブの検出精度比較

Table 4. Comparison on detection accuracy between pancake-type probe and micro-ECT probe.

	パンケーキ型 プローブ	マイクロECT プローブ
ピックアップ コイル	パンケーキ コイル	マイクロセンサ
空間分離能	約7mm	約3mm
検出の死角	有	無

図 17 時定数による EMF 信号の波形変化
(1 ms, 30 ms)

Fig.17. Change of a shape of EMF signal for the time constants of 1 and 30 ms.

波形の上に、速度10 mm/s、時定数1 msのときの雑音成分をのせたものとほぼ同等である。図17に示されたように、OF 20% 10 mmの欠陥に対していずれの時定数の場合も半値幅9.7 mmと同定することができるので、現状のパンケーキ型プローブと同等な探傷速度においても前述の欠陥同定が可能であることが示された。

4. 数値解析

三次元渦電流数値解析を図18に示す計算体系で行った。直方体要素を採用し、図中でx方向に対称性を入れて10分割、y方向に35分割、また厚さ方向には2層に分割した。y軸上の要素は真ん中で分断されているため、結果的にはx方向19要素考慮していることになる。欠陥の存在はy軸上の幅の狭い要素の導電率を零として模擬している。要素分割数に関しては、大型計算機の個人使用メモリー限界(512 MByte; HITACS-3800/480, 1994年4月現在)までを行っている。手法としてはA-φ法を採用し

図 18 計算体系
Fig. 18. Configuration for numerical analysis.

た。磁気ベクトルポテンシャル A とスカラーポテンシャル ϕ に関する支配方程式は次のようになる。

$$\frac{1}{\mu_0} \nabla^2 A - \sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \phi \right) = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \phi \right) = 0 \quad (2)$$

ここで、 σ : 導電率、 μ_0 : 真空透磁率
マクスウェル方程式、オームの法則は(1)式に盛り込まれ、(2)式は電流連続の式に対応し、スカラー場 ϕ を決めるために必要となる。離散化手法は導体に有限要素法、空間には境界要素法を適用した⁽⁶⁾。

IF 40% 10 mm 欠陥におけるコアなしのプロブ II の C, J, K 素子における EMF 信号を計算した結果を図 19 に示す。欠陥長 $t=10.0$ mm, リフトオフ $d=0.7$ mm であり、欠陥は導電率 0 の要素とした。欠陥信号波形はほぼ一致したが、絶対値に関しては EMF 信号の波高値が 1 割程度ずれている。この相違の原因は、測定側からは励磁コイルとマイクロ磁気センサアレーの位置決め誤差とマイクロ ECT プロブと欠陥との位置決め誤差であり、計算側からは要素分割依存性が考えられる。今後、更に良好な一致を得るためには、上記誤差要因を除去していく必要がある。

図 19 数値解析および測定から得られた EMF 信号

Fig. 19. EMF signals from numerical analysis and measurement.

5. 結 論

マイクロ ECT プロブに関し、下記の結論が導かれた。

(1) マイクロ ECT プロブを用いて、PWR-SG 伝熱管と同じ材質の平板 (1.25 mm 厚 INCONEL 600) に

おける欠陥の検出を行った。その結果、空間分解能 3 mm (パンケーキ型プローブ 7 mm), 検出限界深さ 10% であり, 死角が存在しないことが検証され, 現状のパンケーキ型プローブより優れた検出能力を実証した。また, 探傷速度においても従来型と同等な速度を達成できることを確認した。

(2) 励磁コイル内に設置した強磁性体コアの影響を実験で調べてみたが, 欠陥の長さ判定および信号強度とも, 今回の実験では強磁性体コアの効果は観測されなかった。

(3) 測定データから欠陥同定を行い比較的良好な結果を得た。一部誤診も見られたが, 測定の高精度化やデータベースの充実によって改善される見込みである。

(4) マイクロ ECT プローブからの EMF 信号に関しての測定値と三次元数値解析値の比較を行った。欠陥による信号波形は良好に一致した。しかし, 励起コイルとマイクロ磁気センサアレーとの位置決め誤差およびマイクロ ECT プローブとの欠陥位置決め誤差など実験からくる誤差と, 要素分割依存性など計算からくる誤差の影響で, 10% 以上の不一致が生じる場合もあった。今後は実験と計算の両面で誤差要因を除去する必要がある。

今後の課題は, 更なる検出精度の向上と実機の円管体系における実証, そのためのフレキシブルマイクロ磁気センサアレーの開発である。

(平成 6 年 7 月 7 日受付, 同 7 年 3 月 3 日再受付)

文 献

- (1) J. A. Nyenhuis, H. A. Sabbagh, et al.: "Data Acquisition for Experimental Verification of an Eddy Current Model for Three Dimensional Inversion", *IEEE Trans. Magnetics*, **MAG-23**, No. 5, 3789 (1987)
- (2) D. C. Hurley, K. H. Hedengren, et al.: "An Eddy Current Array System for Aircraft Engine Inspections", *Rev. Progress Quantitative Nondestructive Evaluation*, **13**, 1111 (1994)
- (3) M. Uesaka, T. Nakanishi & K. Miya: "Flaw Reconstruction by Micro ECT Probe", *ibid.*, **13**, 327 (1994)
- (4) M. Uesaka, T. Nakanishi, K. Miya, et al.: "Micro Eddy Current Testing by Micro Magnetic Sensor Array", *IEEE Trans. Magnetics*, **31**, No. 1, 870 (1995)
- (5) A. Gottvald: "Inverse Problems of ECT Part I, II", *JSAEM Studies in Applied Electromagnetics 3* (Japan Society of Applied Electromagnetics), p. 51 (1994)
- (6) F. Matsuoka: "Calculation of a Three Dimensional Eddy Current by the FEM - BEM Coupling Method", *Electromagnetomechanical Interactions in Deformable Solids and Structures*, North-Holland, p. 169 (1987)

上 坂 充 (正員) 1957 年 7 月 13 日生。1985 年東京大学大学院工学系研究科原子力工学専門博士課程修了。同年 4 月石川島播磨重工業(株)入社。1991 年 4 月東京大学工学部附属原子力工学研究施設助教授。電磁非破壊検査, 加速器工学, 高温超電導に関する研究に従事。工学博士。日本原子力学会, 日本機械学会, 日本物理学会, 日本 AEM 学会会員。

白 田 和 巳 (非会員) 1968 年 10 月 18 日生。1992 年立教大学理学部物理学科卒業。現在, 東京大学大学院工学系研究科修士課程存学中。電磁非破壊検査に関する研究に従事。日本原子力学会, 日本 AEM 学会会員。

宮 健 三 (正員) 1940 年 6 月 13 日生。1969 年東京大学工学系大学院原子力工学専攻博士課程修了。同年新日本製鐵(株)製品技術研究所, 1972 年東京大学工学部助教授 (原子力工学研究施設), 1978~79 年メリーランド大学客員教授, 1983 年 11 月東京大学工学部教授 (原子力工学研究施設)。核融合炉工学, 電磁構造工学の研究に従事。工学博士。日本原子力学会, 日本機械学会, 日本 AEM 学会, 低温工学会, プラズマ・核融合学会会員。

青 木 一 彦 (非会員) 1956 年 2 月 18 日生。1984 年京都大学大学院工学研究科原子核工学専攻博士課程修了。同年 4 月原子燃料工業(株)入社。現在, エンジニアリングサービス部課長。材料の高温水腐食, 電磁非破壊検査, 経年劣化関連の業務に従事。工学博士。日本原子力学会, 日本材料学会, 日本 AEM 学会会員。

高 橋 歩 (非会員) 1959 年 1 月 13 日生。1981 年京都大学工学部機械工学科卒業。同年 4 月住友精密工業(株)入社。現在, 同社にて各種センサ開発に従事。