数値シミュレーション支援による アレイマルチコイル型渦電流探傷プローブの開発*

櫻井 望^{*1}, 黄 皓 宇^{*2}
高木 敏 行^{*2}, 内 一 哲 哉^{*2}

Development of an Arrayed Multi-Coil Eddy Current Testing Probe with the Help of Numerical Simulation

Nozomu SAKURAI, Haoyu HUANG,
Toshiyuki TAKAGI^{*3} and Tetsuya UCHIMOTO

^{*3} Institute of Fluid Science, Tohoku University,
2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi, 980-8577 Japan

This paper describes a newly developed arrayed multi-coil probe for the testing of steam generator tubes by eddy current testing. Owing to the multi-coil arrangement, it is possible to detect cracks in the whole round of the tube without rotation. Geometry of the probe was decided with the help of numerical simulation, which leads to high detectability of the probe. The signals of this probe were predicted by the edge based finite element method, and comparison between experimental and numerical results showed good agreement. Furthermore, this probe is expected to be convenient to reconstruct the crack shape from its C-scan image.

Key Words: Arrayed Multi-Coil Probes, Eddy Current Testing, Numerical Simulation, Steam Generator Tubes, Less Sensitive Regions

1. 緒言

加圧水型原子炉 (Pressurized Water Reactor, PWR) の蒸気発生器 (Steam Generator, SG) 内に存在する伝熱管の供用中検査には、非破壊検査手法の一つである渦電流探傷試験 (Eddy Current Testing, ECT) が用いられている⁽¹⁾⁽²⁾。1 次系および 2 次系冷却水の境界にあたる伝熱管 (SG 管) の破損を未然に防ぐために、ECT には高い感度が求められる。また、経済的な面から考えると試験期間の短縮によってプラントの稼働率を向上させることが重要であり、膨大な本数の SG 管の探傷試験には高い探傷速度が求められる。

現行の検査では、図 1(a) に示すようなボビン型プローブを用いて通常検査を行う。ボビン型プローブは、同軸な 2 個のコイルを用いるプローブであり、

渦電流は周方向に励磁される。このプローブでは、電流の流れを妨げるき裂、すなわち軸方向のき裂に対して高い検出性を示す。また、高速の探傷が可能であるという利点も有する。しかし、周方向のき裂に対しては検出性が低く、周方向のき裂位置の特定も原理的に不可能である。そのため、図 1(b) に示すようなパンケーキ型プローブを用いて詳細検査を行っている。

パンケーキ型プローブは、管の径に比べて小さい径のコイルを側面に配置したプローブであり、伝熱管の探傷では回転させながら探傷を行う。これにより、周方向の特定部分で渦電流が励磁される。従って、ボビン型プローブに比べると周方向き裂に対す

Fig.1 Probes for Steam Generator tubes.

* 原稿受付 2002 年 3 月 18 日。

^{*1} 東北大学大学院工学研究科 (〒980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1)。

^{*2} 正員, 東北大学流体科学研究所。

E-mail: takagi@ifs.tohoku.ac.jp

る検出性が優れている。しかし、回転走査のため探傷速度がポピン型プローブに比べ著しく遅い。また、回転によって軸のずれによるリフトオフノイズ等が生じ得る。

探傷速度および周方向き裂に対する検出性の向上という2つの課題を克服するために、これまでにマルチプローブが提案されている⁽³⁾⁽⁴⁾。その一例として、黒川らによって提案された4個の検出コイルを用いたマルチプローブ⁽⁴⁾を図1(c)に示す。このプローブは1個を励磁専用コイル、4個の検出用コイルとして用いる。このプローブはSG管の外面き裂に対して優れた検出性を示すことが確認された。

プローブ性能の更なる改善を求め、本研究ではコイル配置に工夫を施すことにより、感度を下げることなく空間分解能を向上させた新たなアレイマルチコイル型プローブを提案する。さらに、SG管を対象としたアレイマルチコイル型 ECT プローブの設計および試作とその評価を行う。具体的には、渦電流数値解析の支援によりプローブの設計および試作を行う。さらに性能評価実験を行い、数値解析と実験が一致することを確認した上で、実験により得られたき裂信号を用いて、パラメーター推定法に基づいたき裂形状を再構築する。

Fig.2 Design of exciting and sensing coils.

2. アレイマルチコイル型プローブ

アレイマルチコイル型プローブは、図2(a)に示すとおり3×10個のコイルをプローブ側面に配置した設計になっている。ここでアレイマルチコイルの構成要素としてTR(Transmit-receive)型を採用した。TR型プローブはパンケーキ型プローブに比べて、感度およびSN比において優れていることが分かっている⁽⁵⁾。図3(a)(b)(c)に示すように、30個のコイルを励磁および検出コイルとして組み合わせて用いる。図3(a)に示す軸方向チャンネルは軸方向き裂を対象としたチャンネルである。また、図3(b)に示す周方向チャンネルは周方向き裂を対象としたチャンネルである。図3(c)の両方向チャンネルは軸・周両方向のき裂を対象としている。

また、上述の励磁および検出に用いた3×10個のコイルとは別に、本プローブは図2(b)に示すような2種類の励磁専用コイルを内部に搭載している。この2種類の励磁専用コイルを用いて、軸方向および周方向のそれぞれにほぼ一様な渦電流を励起する。このとき、図3(d)(e)に示すように、側面に配置した3×10個のコイルを検出専用コイルとして用いることにより、軸方向き裂および周方向き裂のそれぞれが探傷可能となる。

本プローブでは以上の5パターンの励磁・検出チャンネルを適用することができる。このうち図3(a)(b)に示す軸方向および周方向チャンネルの2種類の探傷チャンネルから得られた信号振幅を比較することによって、き裂方向を明らかにすることが可能となる。また、図3(d)(e)の2パターンを利用することも可能である。著者らによってこれまでに行われた数値計算および実験からも、このTR型プローブの設計では逆解析によるき裂の定量的評価をおこ

Fig.3 Design of exciting and sensing patterns.

なう前にき裂形状の定性的な情報を比較的容易に得られることが分かっている⁶⁾。従って、二種類の異なる励磁・検出方法を組み合わせることによって、き裂の同定を行う前にき裂方向についての情報などを得ることができる。

本論文では、 3×10 個のコイルを励磁・検出コイルとして用いた TR 型について述べる。また、今回試作したプローブはプローブの有効性を検証することを目的としたため、コイルを全周の 3 分の 1 のみに配置するにとどめている。プローブ全周にコイルを配置することにより、SG 管全周を同時に探傷でき、探傷速度の向上が可能となる。さらに回転が不要という点だけでなく、微分や数値フィルタなどの数種の信号処理法が適用可能である点もアレイマルチコイル型プローブの特徴である。

3. 数値シミュレーションによるプローブパラメータの決定

本研究では、アレイマルチコイル型プローブからの信号に基づき逆問題解析によってき裂の定量的評価を行うことを目標とする。そこで、以下に示すような要件を設定しプローブを設計した。

- ・ き裂の方向を判別できる。
- ・ 材質インコネル、管厚 1.27mm、直径 22.23mm の伝熱管において 10% の外面き裂(Outer Defect, OD)が検出できる。
- ・ 逆解析を行った際に、き裂深さを管厚に対して誤差 10% 以内で認識できる。
- ・ き裂の長さを誤差 1mm 以内で認識できる。

この目標に合うプローブパラメータを決定するために、数値シミュレーションを用いる。数値シミュレーションには変形磁気ベクトルポテンシャル(Ar 法)および辺要素有限要素法(FEM)⁷⁾に基づく渦電

流解析手法を用いる。プローブ設計は (1)励磁・検出パターン決定、(2)コイルサイズの決定、(3)プローブの検出性能の試験、の順序で行った。

アレイマルチコイル型プローブでは、マルチプレクサーを用いることにより時間差をつけて励磁している。そのため、隣りあう励磁コイル同士は互いに他を干渉することはない。従って、励磁・検出コイル組のみを使用して探傷した場合の数値解析結果を用いることにより、励磁・検出コイルを複数組抱えるアレイマルチコイル型プローブの信号予測を行うことが可能である。

次にコイルサイズの決定について述べる。ここでのコイルサイズとは、コイル外径を意味し、内径は外径の半分とし、高さは固定した。コイルサイズは感度だけでなく空間分解能も考慮して選択しなければならない。例えば、コイルサイズを大きくすると感度は高くなるが、その一方で空間分解能は落ちてしまう。高い感度を保ったまま空間分解能を向上させるために、数値シミュレーションを用いてパラメータの調整を行い、適切なコイルサイズを決定する。空間分解能を向上させることにより、複数き裂を認識することが可能となる。

ここでは、プローブの周方向チャンネルについて検討する。コイル直径 1 つ分だけ間隔を離して位置させた 2 つの同寸法のコイルを励磁コイルおよび検出コイルとして用いる。長さ 5mm の周方向 OD20% のき裂に対してこの検出チャンネルを軸方向に走査させたときの信号のピーク値とコイルサイズの関係を図 4 に示す。OD20% は検出性能を評価するとき用いる一般的なき裂深さである。き裂による電圧変化 ΔV はコイルの大きさに応じて変化する。また、検出コイルがき裂の無い場所にある場合の電圧を V_0 とすると、 V_0 はコイルサイズの大きさに依存して増大する。き裂による電圧変化 ΔV はき裂の大きさに依存するが、コイルがき裂よりも大きい場合は変化率 $\Delta V / V_0$ は減少する。

以上の結果より、長さ 5mm のき裂に対しては直径 2~3mm のコイルが適していることが分かる。そこで、感度およびコイルサイズに関する予備実験を行った。直径 1mm、2mm、3mm、4mm の単一コイルを用いて OD10% についての探傷試験を行った結果、直径 2mm の検出コイルが OD10% を検出できる最も小さなコイルであることが確認できた。

逆解析の観点から考えると複数き裂を検出するためには空間分解能が高い方がより適している。先の予備実験の結果に従い、コイル直径を 2mm とした

Fig.4 Parameter survey of coil size.

時の複数き裂の分離性を数値シミュレーションによって推測する。2 個の周方向き裂および検査基準線を図 5 に示す。2 個のき裂の間隔を 1mm, 2mm および 3mm の場合についてシミュレーションした。その結果, 2mm および 3mm の場合にはき裂のピークが 2 つ現れたが, 1mm の場合はき裂のピークが 1 つしか得られなかった。図 6 はき裂間隔が 2mm および 1mm の時の解析結果であり, 周方向チャンネルを用いた時のき裂 A および B のそれぞれに対する ECT 信号と A および B に対する ECT 信号の振幅を示す。これより, 本プローブは複数き裂を探傷する場合, き裂の間隔が 2mm 以上なら分離して認識可能なことがわかる。

Fig.5 Definition of two circumferential cracks and scanning line along axial direction.

(a) Distance of 2mm between cracks

(b) Distance of 1mm between cracks

Fig. 6 ECT signals of two through wall cracks.

4. 実験

4.1 実験体系

数値解析によるパラメーター選択に基づいて, SG 管を対象としたアレイマルチコイル型プローブを製作した。コイル直径は前述に示した数値評価に従い, 2mm とした。本プローブを用いて, 図 7 に示すような ECT システムを用いて探傷試験を行う。探傷器は R/D Tech 社の TC5700 を用いる。この探傷器は励磁周波数を 1kHz から 4MHz の範囲で出力が可能である。イーサネットケーブル接続によりパーソナルコンピュータを用いて制御する。

また, 複数個のチャンネルを使用する場合, マルチプレクサーを用いて TR 型チャンネルの要素となっている励磁・検出コイルのペアの切り替えを行う。マルチプレクサーのチャンネル切り替え速度は最大 17kHz である。試験周波数は 200kHz とした。プローブを固定し試験片の SG 管を軸方向に走査することにより, 管内部にプローブを挿入し内側から探傷を行う体系となる。

試験片として, 図 8 に示すような INCONEL600 の厚さ 1.27mm の管に EDM(放電加工)によって軸方向に長さ 5mm, 幅 0.2mm の矩形の外表面き裂を設けたものを用いる。なお, き裂深さはそれぞれ, 100%(1.27mm), 60%(0.762mm), 40%(0.504mm), 20%(0.254mm) および 10%(0.127mm) となっている。管厚に対するき裂深さの割合によって, き裂の深さは示される。

Fig.7 ECT system and arrayed multi-coil probe.

Fig.8 Test piece (INCONEL 600).

実際の SG 管の探傷試験において、ポピン型プローブによる通常検査は 400mm/s 以上の速度で行われる。アレイマルチコイル型プローブはこの条件下で使用されることを想定するが、今回の実験では、サンプリング周波数つまりマルチプレクサの切り替え速度を 2kHz とし、探傷速度は 15mm/s とした。即ち、2 つの測定点の距離は $7.5\mu\text{m}$ である。実際の検査速度の 400mm/s は実現可能であるが、走査方向の分解能は 0.2mm に落ちる。使用している ECT 装置の最大サンプリング周波数は 20kHz となっており、このサンプリング周波数を用いると分解能は 0.02mm となり理論的に問題は無い。また、感度に関しても実験における探傷と比べてほとんど落ちないと考えられる。

4.2 実験結果

探傷結果において出力は電圧である。C-スキャングラフは 10 個の検出コイルから得られた信号を用いることにより、軸方向、周方向および電圧により等高線あるいは 3 次元グラフとして表したものである。軸方向き裂 OD60% を軸方向チャンネルおよび周方向チャンネルのそれぞれを用いて試験した。この結果を 3 次元グラフとして表し、真上および斜め方向から見たものを図 9 に示す。軸方向き裂を対象

(a) Axial channel (b) Circumferential channel
Fig.9 Experimental ECT signals of an axial OD60% crack.

(a) OD20% (b) OD10%
Fig.10 Experimental ECT signals of an axial small crack with axial channel.

とした(a)の軸方向チャンネルの方が明らかに大きな信号を得ていることが分かる。この 2 つの信号を比較することにより、き裂の方向を判別できることが分かる。

また、一様励磁型軸方向チャンネルおよび一様励磁型周方向チャンネルを用いて軸方向き裂を探傷した結果、軸方向を対象としたチャンネルからの信号はもう一方の信号よりもはるかに大きな信号が得られた。従って、TR 型チャンネルと同様に一様励磁型チャンネルを用いることにより、き裂方向の判別が可能である。

つぎに、プローブの検出能力を評価する。軸方向チャンネルによる OD10% および OD20% の探傷結果を図 10 に示す。このとき、信号処理後の OD10% の SN 比は 4.0 であり、OD10% まで検出可能であることが確認できる。他の 4 チャンネルに対しても対応した方向のき裂を探傷した結果、表 1 に示すように OD10% まで検出が可能である事を確認した。

4.3 数値シミュレーションとの比較

数値解析は Ar 法および辺要素 FEM を用いた。ECT 信号の計算時においては、アレイマルチコイル型プローブが有する複数組の励磁・検出コイルの信号を求める代わりに、1 対の励磁・検出コイルからの信号を用いて C-スキャングラフを描いた。図 11 に C-スキャングラフで表した実験および計算の結果を示す。図 11 に示すように 2 つのグラフの形状は一致していることが分かる。

ECT では、C-スキャンに比べ B-スキャンの方がき裂の同定に有効である。しかし、探傷器からの出力信号は励磁電流やフィルタによる位相差などが不明であるため、実験と数値計算の結果を直接比較することはできない。そこで振幅や位相を調節することが必要となる。

OD60% について探傷実験および数値解析を行い、実験で得られたき裂信号のピーク値を解析結果のピーク値に一致させる。式 $S' = \alpha e^{j\theta} S$ を用いて、ピー

Table 1 Signal to noise ratios for OD10%.

Channel	Axial	Circumferential
Axial channel	4.2	
Circumferential channel		5.3
Mixed channel	3.7	2.5
Axial channel with uniform field	4.5	
Circumferential channel with uniform field		3.7

ク値の振幅および位相のそれぞれが一致するときの変換パラメーターを求める。ここで、 S および S' は変換前後の実験信号であり、 α は拡大係数、 θ は回転角度である。ここで求めた α および θ を用いて、OD40%の実験信号を同様に変換した。

B-スキャンにおける解析結果と変換後の実験結果の比較を図12に示す。ここでも2つの曲線は十分な一致を得ていることが分かる。信号の軌道が複雑ではないので、その位相からき裂深さの推測に利用することが可能である。アレイマルチコイル型プローブによるECT信号のこれらの特徴は、プローブ設計当初の目標と数値解析による予測を満足するものである。また、実験信号と数値解析による信号が一致していることより、本プローブは逆解析に適している。

4.4 不感帯

アレイマルチコイル型プローブは探傷を行う際に回転させないため、空間分解能が低下するいわゆる不感帯の問題を抱えており、これが検出性およびき裂の再構築に与える影響が懸念される。軸方向については探傷サンプルを設定に応じて測定できるが、

(a) Numerical Results (b) Experimental Results
Fig.11 Comparison of C-scan of numerical and experimental results.

Fig.12 Comparison of B-scan of numerical and experimental results of an OD40% crack.

周方向の探傷サンプル数は周方向に配置した検出コイルの数に限られてくる。そのため、軸方向チャンネルを用いて軸方向き裂の探傷を行う場合、検出コイルとき裂との位置関係によってはそのき裂を正しく検出できない可能性もある。この問題を定量的に評価するために、数値解析を用いて最大信号と比較したところ、図13に示すとおりとなった。ここで、縦軸はき裂信号の大きさを示し、横軸はプローブ走査線上におけるき裂中心から検査点までの距離を示す。また、 d はき裂と検査点との周方向の距離を示している。コイルサイズは2mmなので、検査点とき裂のずれ d は最大で1mmとなる。図より、 d が最大の1mmとなる時、信号のピーク値は本来の大きさの半分程度になることがわかる。

また、試作したアレイマルチコイル型プローブを用いて実際に探傷した結果を図14に示す。軸方向チャンネルに有する10個の検出コイルの内、隣りあう2つのコイルから得られるECT信号に注目する。き裂と検出コイルの相対位置を角度により表しているが、図13における $d=1$ に対応する $\theta=6^\circ$ 付近においてECT信号がもっとも大きく減少しており、ピーク値の60%程度まで下がっていることがわかる。

Fig.13 The effect of less sensitive zone with numerical ECT signals.

Fig.14 Experimental ECT signals at less sensitive zone.

4.5 逆解析

近年、高い精度の数値シミュレーション技術が確立され、さらに高速シミュレーション技術も発展してきた⁽⁸⁾⁽⁹⁾。これらの数値シミュレーション技術を用いて逆解析を行い、き裂の再構築を行う。

き裂の再構築は図 15 に示すような流れで行う。まず、解析モデルにき裂形状を与え、高速順問題解析⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾を用いて ECT 信号を求める。ここで用いる高速順問題解析法は Ar 法および辺要素 FEM に基づくものである⁽¹²⁾⁽¹³⁾。つぎに、数値解析によって得られた信号を実験信号と比較する。数値計算による信号が実験信号と異なる場合には、計算値と実験値の差が許容値以下に収まるように最急降下法を用いる⁽¹⁴⁾。このようにき裂形状の修正を行った後、ECT 信号を再計算する。上記の作業を繰り返すことにより、き裂形状の再構築を行う。

図 13 における $d=0.5$ すなわち不感帯での軸方向 OD40% のき裂信号を数値解析により計算し、この

Fig.15 Flow of reconstructing crack shape.

Fig.16 Reconstruction of crack shape from numerical ECT signals of less sensitive zone.

信号を用い、上記のパラメーター推定法に基づいて再構築を行う⁽¹³⁾。この結果を図 16 に示す。ここで、縦軸はき裂深さを示し、横軸は軸方向を示す。このき裂の再構築においては、 $9 \times 1.27 \times 0.2 \text{ mm}^3$ の領域をき裂が存在する Suspect Region⁽¹⁰⁾として用いた。結果より、不感帯にき裂が位置するとき信号の大きさは、順解析では図 13, 14 のように減少するが、逆解析ではほぼ正確にき裂形状の再構築を行えることが分かる。

これは、き裂深さは信号の大きさではなく位相と関係しているため、深さに関しては変化しないためである。逆解析の結果と実験結果との誤差が大きいか場合には、最急降下法を用いて修正し再度計算を行い、目標の値に収まるまで繰り返し計算を行う。この誤差についての評価関数の推移と計算回数の関係を図 17 に示す。実験による不感帯での ECT 信号を元にして逆解析を行い、図 18 に示すようにき裂の再構築を行った。き裂の全長は 5mm であり、深さについてはそれぞれ図に示すとおりである。図中の白線の矩形は真のき裂の形状を示している。これよりき裂の両端の部分では実際のき裂と再構築したものと若干のずれがあることが分かる。これは、ECT 信号にローパスフィルターおよびハイパスフィルター

Fig.17 Relation of evaluation function vs. iteration number.

Fig.18 Reconstruction of crack shape from experimental ECT signals.

Table 2 Computational time and crack sizes.

Crack	Time *(s)	Reconstruction results	True Results
OD60%	121	64.5%/5mm	60%/5mm
OD40%	95	40.0%/5mm	40%/5mm
OD20%	95	25.5%/5mm	20%/5mm
OD10%	35	8.0%/5mm	10%/5mm

*By a workstation with 21164 Alpha processor, 667MHz.

の信号処理を加えたことによる影響も考えられるが、不感帯の影響により ECT 信号が低くなっているためであると考えられる。また、表 2 に逆解析の計算時間および実際のき裂と再構築したき裂の深さと長さを示す。ここでの深さは、最深点での値を示す。図 18 より不感帯で得られたき裂信号から再構築されたき裂と実際のき裂は若干のずれがあるものの、ほぼ一致していると言ってよい範囲である。従って、本プローブは不感帯の影響を受けることなくき裂の再構築が可能であると言える。

5. 結言

加圧水型原子力発電プラントの蒸気発生器における伝熱管の探傷速度の向上を目指し、渦電流数値解析の支援を得て、感度を下げることなく探傷速度を増加させることのできるアレイマルチコイル型渦電流探傷プローブを開発した。得られた結果を以下にまとめる。

1. 試作したアレイマルチコイル型プローブを用いた実験により、き裂方向の判別および OD10% の検出が可能であることが確認できた。
2. 変形磁気ベクトルポテンシャル法および辺要素有限要素法を用いた数値解析により信号を評価したところ、数値解析と実験の結果は十分な一致をみた。
3. アレイマルチコイル型プローブにより得られた実験結果を用いて、き裂形状の再構築を行ったところ、実用的な計算時間のもとで実際のき裂と再構築したき裂の形状は深さ、長さともによく一致した。
4. 不感帯におけるき裂信号を用いてき裂形状の再構築を行ったところ、実際のき裂形状とはほぼ一致した。従って、不感帯の影響は無いと言ってよい。

本研究は文部科学省科学研究費「特別推進研究」(COE)(2)(11CE2003)の成果の一部である。試験片作製に際して技術的にご協力いただいた東北大学流体科学研究所佐藤武志技官に感謝の意を表す。

文献

- (1) 高松 洋, 宮 健三, 陳 振茂, "加圧水型原子力発電所における電磁非破壊検査技術開発の経緯", 日本 AEM 学会誌 vol.8, no.1, pp.95-101, 2000.
- (2) 高木敏行, 福富広幸, "電磁解析技術による渦流探傷試験" 非破壊検査協会, 47-2, pp.85-91, 1988.
- (3) R. Leclerc and R. Samson, "Eddy current array probe for corrosion mapping on ageing aircraft," Review of progress in *Quantitative Nondestructive Evaluation*, vol. 19A, pp.489-296, 1999.
- (4) M. Kurokawa, R. Miyauchi, K. Enami and M. Matsumoto, "New eddy current probe for NDE of steam generator tubes," *Electromagnetic Nondestructive Evaluation (III)*, IOS press, pp.57-64 1999.
- (5) H. Fukutomi, M. Hashimoto, T. Takagi and J. Tani, "Performance assessment of mutual induction type ECT probe by 3-D eddy current analysis," *Nonlinear Electromagnetic Systems, Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics (10)*, IOS Press, pp.724-727, 1996.
- (6) H. Huang and T. Toshiyuki, "Shape reconstruction of natural cracks with a differential TR ECT probe," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, vol.20A, pp.764-771, 2001.
- (7) H. Fukutomi, T. Takagi, J. Tani, M. Hashimoto, T. Shimone and Y. Harada, "Numerical evaluation of ECT impedance signal due to minute cracks," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol.33, no.2, pp.2123-2126, 1997.
- (8) Z. Chen and K. Miya, "ECT inversion using a knowledge-based forward solver," *J. Nondestructive Evaluation*, vol.17, no.3, pp.167-175, 1998.
- (9) H. Hirokyu, H. Huang, T. Takagi and J. Tani, "Identification of crack depths from eddy current testing signal," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol.34, no.5, pp.2893-2896, 1998.
- (10) H. Huang, T. Takagi, H. Fukutomi and J. Tani, "Forward and Inverse Analysis of ECT Signals Based on Reduced Vector Potential Method Using A Database," *Electromagnetic Nondestructive Evaluation (III)*, IOS press, pp.313-321, 2001.
- (11) 黄 皓宇, 福富広幸, 高木敏行, "ノイズを含む渦流探傷信号の高速シミュレーション", 機論 A, 65-638, pp.2024-2031, 1999.
- (12) T. Takagi, H. Huang, H. Hirokyu and J. Tani, "Numerical evaluation of correlation between crack size and eddy current testing signals by a very fast simulator," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol.34, no.5, pp.2581-2584, 1998.
- (13) H. Huang and T. Takagi, "Fast signal prediction of noised signals in eddy current testing," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol.36, no.4, pp.1719-1723, 2000.
- (14) Norton, S. J. and Bowler, J. R., "Theory of eddy current inversion," *Journal of Applied Physics*, 73(2), pp.501-511, 1993.