

蒸気発生器伝熱管の渦電流探傷試験の研究活動

著者	宮 健三, 高木 敏行, 小島 史男, 橋本 光男, 西口 磯春, 山田 外史, 原田 豊, 下根 純理
著者別表示	Yamada Sotoshi
雑誌名	日本AEM学会誌
巻	9
号	2
ページ	116-129
発行年	2001-06
URL	http://doi.org/10.24517/00049223



分科会報告

蒸気発生器伝熱管の渦電流探傷試験の研究活動

Research activities on nondestructive evaluation technology by eddy current testing

宮 健三	(普遍学国際研究所)	高木 敏行	(東北大学)
小島 史男	(神戸大学)	橋本 光男	(職業能力開発総合大学校)
西口 磯春	(神奈川工科大学)	山田 外史	(金沢大学)
原田 豊	(原子力エンジニアリング)	下根 純理	(原子力エンジニアリング)

Kenzo MIYA	Member
Toshiyuki TAKAGI	Member
Fumio KOJIMA	Member
Mitsuo HASHIMOTO	Member
Isoharu NISHIGUCHI	Member
Sotoshi YAMADA	Member
Yutaka HARADA	
Junri SHIMONE	

1 はじめに

30年から40年を寿命として設計された原子力発電プラントのうち30年を経過するものについて、さらに30年の長期運転が検討されている。また、連続運転期間の延長による発電効率の向上も検討されている。プラント構造物で使用される材料の耐久性が改善されている一方では、供用中検査での非破壊試験方法の信頼性向上も要求されている。非破壊試験はプラントの健全性を保証する上できわめて重要である。

加圧水型軽水炉 (Pressurized Water Reactor : PWR) 発電プラントの蒸気発生器 (Steam Generator : SG) 伝熱管には渦電流探傷試験 (Eddy Current Testing : ECT) による管内面からの検査が実施されている。渦電流探傷試験はSG 1基あたり数千本もある伝熱管の検査において、非接触でかつ高速に欠陥の大きさや位置を評価できるが、試験体の深さ方向への検出性能は表皮効果により制限される。渦電流探傷試験を高度化するため、(1) 伝熱管の外表面からの検出、(2) 検査信号からの欠陥形状同定、(3) 2点からプローブ、探傷装置、信号処理および数値解析技術に関して研究開発が行われている。上記の項目(2)は信号からきずの特徴量を同定しようとする逆問題に帰着する。

日本AEM学会では、このようなECTの高精度化の要求に対応するため学会創設の初期からこの課題に取り組んできた。

第1フェーズ (1991年10月~1995年3月)

「ECT高度化研究開発分科会」(主査:高木敏行, 委員10名)を設置し, ECT信号の数値解析による予測(順解析)手法の開発を目的とし, 6ステップからなるベンチマークモデルを提案した[1][2]。これにより支持板や付着物のモデリングを含む3種類の3次元解析手法が開発されプローブ最適化支援に用いることができるレベルに達していることを示した。

第2フェーズ (1995年6月~1998年3月)

「ECT検査技術の高度化研究開発分科会」(主査:宮健三, 委員25名)を設置し, (1) ECT検査技術の調査と評価, (2) ベンチマーク試験の検討と測定法, 解析法の開発, (3) 国際協力による共同研究を主要内容として研究・調査・検討を進めた[3][4]。本分科会はECT信号からのきず位置及びきず形状の推定(逆解析)法の開発を目標とし, 分科会のみでなく国際協力の下で研究開発を進めた。電磁非破壊検査に関する国際ワークショップ(E'NDE Workshop)を提案し, 1995年以降毎年開催されている[5]-[10]。また, 公開されている文献からの検査技術に関する調査を進めた。

第3 フェーズ (1998年5月～2001年3月)

「ECTによる高精度欠陥診断技術に関する研究開発分科会」(主査:宮健三, 委員 25名)を設置し, (1) 自然き裂のモデリング, (2) き裂の定量的評価手法の確立, (3) 新プローブの提案, (4) 国際協力の実施を主要な柱として, 自然き裂の位置及び形状が予測を可能とするための新しいプローブの提案とそれによる逆解析について研究・調査・検討した. Fig.1に第3フェーズでの研究の進め方を示した. 上記(1),(2),(3)をラウンドロビテスト [4] や E'NDE ワークショップなどの国際協力活動によって進めながら自然き裂の定量的評価法の確立を目標とした.

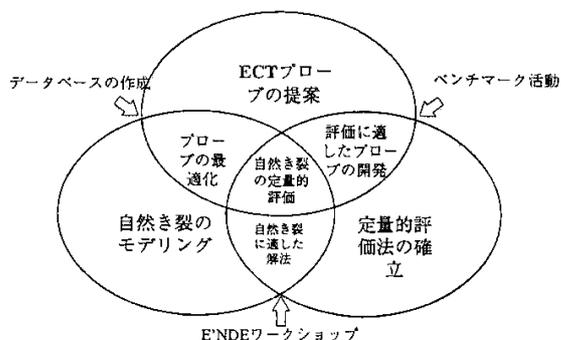


Fig. 1: An approach toward quantitative nondestructive evaluation of natural cracks.

本解説では第3フェーズにおける研究成果の概要の報告を目的として, 以下に解析手法, ECTプローブ, ラウンドロビン試験, データベースと情報発信, E'NDEワークショップについて述べる.

2 解析手法の開発

本節では, これまでおこなわれてきた渦電流探傷試験に関連する順解析手法および逆解析手法について説明する.

ここでいう順解析手法とは, 任意のき裂形状を与えたときに, これに相当するECTにおけるプローブ検出信号を数値解析する方法である.

き裂の逆解析は, これとは逆に, ECT検出信号からき裂の方向, 数, 位置および形状を推定する定量的評価手法を意味する. ここでは, これまでに分科会において開発された順問題および逆問題解析手法のうち, 主要な結果に絞って解説を試みる.

2.1 順解析手法

順解析手法はき裂形状と検出信号の関係に関する数値解析モデルを構築することにより, プローブの設計や, 検出信号からのきず形状の復元, すなわち逆解析のアルゴリズムを設計することが目標となる.

以下では, これまでに得られた順解析手法に関する成果のなかで,

- (1) ECT信号解析の高精度・高速化解析手法
 - (2) 自然き裂のモデリングとその解析手法
- について解説する.

2.1.1 ECT信号解析の高精度・高速化解析手法

ECT信号の高精度化を目的として, これまでいくつかの解析手法が提案されてきた. 有限要素境界要素併用法 [11] および辺要素有限要素法 [12][13] に関する解析コードは, そのなかでも特に有用性が確認された手法といえる. 従来の節点解析にもとづく有限要素法では, 検査領域である伝熱管内部をプローブが走査する位置ごとに, プローブコイルの再分割を行う必要があった.

提案されている有限要素境界要素併用法では, コイル領域での支配方程式を境界要素法により離散化することで, この煩雑な手続きは簡略化できる. またコイルの有限要素を考慮しない, すなわちメッシュレス化のための渦電流解析手法である.

変形磁気ベクトルポテンシャル法に辺要素有限要素を導入した解析コードでは, コイルの移動を考慮せずに, ECT検出信号の高精度な解析を可能にしている. これらの解析コードは本分科会においてステップ1からステップ6で与えられたベンチマーク問題 [1]-[3]でその精度検証が実施された.

逆解析を行うためには, 順解析モデルを繰り返し計算実行する必要がある. このためには, 計算精度を維持しながら同時に高速化をめざした順解析モデルを構築する必要がある. 前述した有限要素境界要素併用法および変形磁気ベクトルポテンシャル法に辺要素有限要素を導入した数値解法に関する高速化法を提案し, その有効性を検証している.

以下その概略について述べる. 導体にき裂がある場合とない場合の磁気ベクトルポテンシャルをそれぞれ A および A^u で, 電気スカラーポテンシャルを ϕ およ

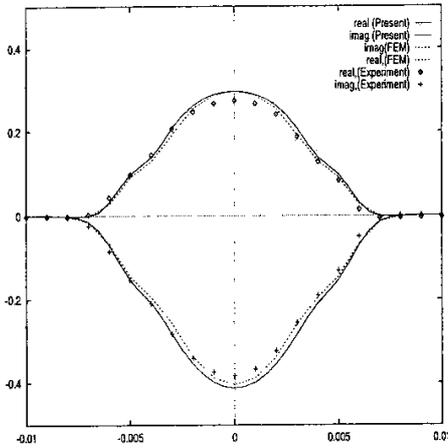


Fig. 2: Comparison of results of benchmark model using FEM-BEM code present. (step6, 300 kHz)

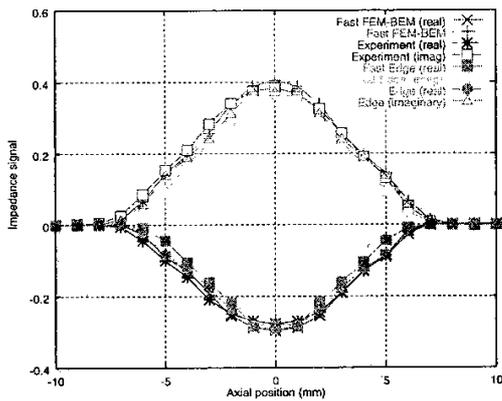


Fig. 3: Comparison of results of benchmark model using edge element code. (step3, 300 kHz)

び ϕ^u で表記し,

$$A^f = A - A^u, \quad \phi^f = \phi - \phi^u$$

とする。このとき、き裂検出信号は、励磁電流とき裂領域でのエネルギーより以下の計算式で求められる [14].

$$\Delta Z = \frac{1}{I^2} \int_{\Omega_f} \frac{\partial A^u}{\partial t} (\sigma^u - \sigma^f) \left\{ \frac{\partial (A^u + A^f)^*}{\partial t} \right\} dV \quad (1)$$

き裂のない ECT 問題をあらかじめ解いておき、これをもとにデータベースを作成しておくこと、上式の計算においては、き裂領域での磁気ベクトルポテンシャル A のみ計算すれば、検出信号のモデル出力が得られる。

これらの導出過程は有限要素境界要素併用法および辺要素有限要素法とも同じ方法である [15][16]. Fig.2 および Fig.3 において, JSAEM ベンチマーク問題に関するインピーダンス信号の実験値, 通常のコード, 高速解析コードの計算結果の比較を示す. いずれの方法においても計算精度が維持されていることがわかる. 有限要素境界要素併用法の場合, ワークステーション (SGI, Indigo2) を使用して, 41 の走査点の計算において, 12.5% き裂の解析で, 10 秒未満の計算時間が達成されている. また辺要素有限要素法においては, 精度を維持しながら, 計算時間で従来法の数十分の一から百分の一が達成されている.

2.1.2 自然き裂のモデリングとその解析手法

自然き裂に関する順解析においては, 自然き裂の態様の複雑さを考慮して, き裂接触面のモデル化を行うための疲労き裂試験の実施と, 有効な数値解析法について検討した. この目的のためにアルミ合金の CT 試験片による疲労き裂試験を実施した. その結果疲労き裂における蛇行するようなき裂は, これと等価な幅を有し一様な抵抗をもつ部分領域で置き換えることが可能であることを確認した. 特殊要素を用いた自然き裂解析法は, き裂接触面のモデルに最も適合する数値解法のひとつである. 従来の解析手法においては, 渦電流の詳細な解析のために, 有限要素の細分割が必要となった. この方法では, き裂周辺の有限要素において導電率に異方性を仮定することにより, 以下のように設定し問題を解く.

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

き裂接触面においては, き裂面に垂直な成分の導電率を低く設定することにより, 自然き裂のモデリングが

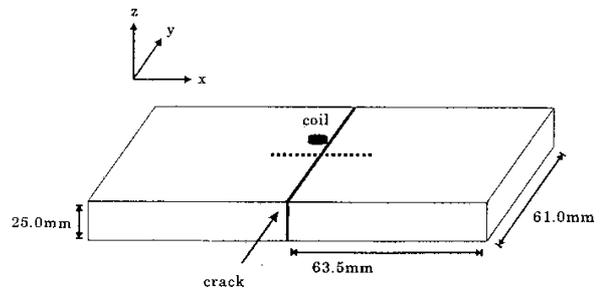


Fig. 4: Computational model using crack elements.

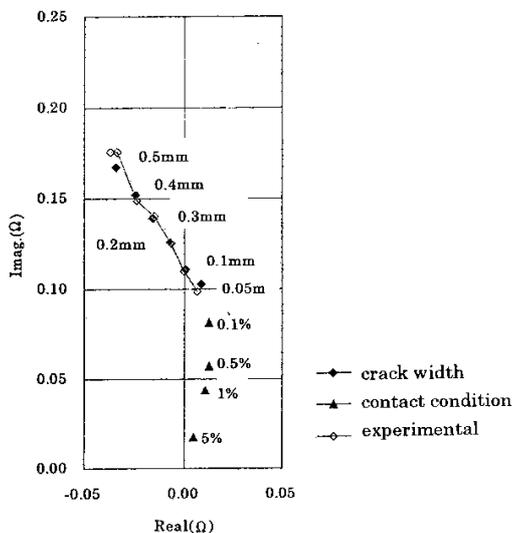


Fig. 5: Comparison between experimental and calculated impedance changes for some crack width and contact conditions.

可能となる。Fig.4 に対象とする試験片の大きさと設定条件を示す。Fig.5 にき裂幅および接触の変化によるインピーダンスの変化を示す。き裂幅の変化による計算値と実験値はよく一致している。

2.2 逆問題解析手法

逆解析によるき裂の定量的非破壊評価計算法として、ニューラルネットによる逆誤差伝搬学習、遺伝的プログラミングにファジイ推論エンジンを組み込んだ形状推定法、パラメータ推定による感度最適化手法や進化計算をもちいたき裂のプロファイリング法などが検討されてきた。自然き裂に関する定量的評価が ECT 高精度定量評価の最終的な目標であり、このための評価基準を以下のように設定した。

- (1) き裂の発生している方向の判別
- (2) 近接き裂の数に関する識別性
- (3) それぞれのき裂深さに関する推定精度
- (4) それぞれのき裂長さに関する推定精度
- (5) 推定に要する計算時間および計算機性能

ニューラルネットによる自然き裂の形状復元では、ECT 検出信号を入力とし、その信号源となるき裂形状に関するパラメータを出力とするニューラルネットワークを構築する。き裂パラメータを教師データ、対応する ECT 検出信号を入力データとして、逆誤差伝搬

法により 3 層の階層構造をもつニューラルネットの結合荷重を調整する方法が開発され、その有効性が示されている [18]。学習に使用する入力データと教師信号は実験データを用いてもよいが、一般的にはさまざまなき裂形状に関してデータを取得することは困難であるので、前節の高速順解析モデルを使用して疑似データを作成し、これを学習に利用するのが一般的である。き裂形状のパラメータとしてはき裂部分をセル上で近似しパラメータ表現することが可能である。また自然き裂では、導電率が必ずしもゼロではないので、各セルでの導電率もあわせてパラメータ表現して逆解析をおこなう。ただし、取り扱う写像を簡単なものとするために、逆解析時には内部導電率分布を陽に再構成を行わず、欠陥の境界形状のみを出力している。Fig.6 でこの方法によるき裂の再構成結果を示す。

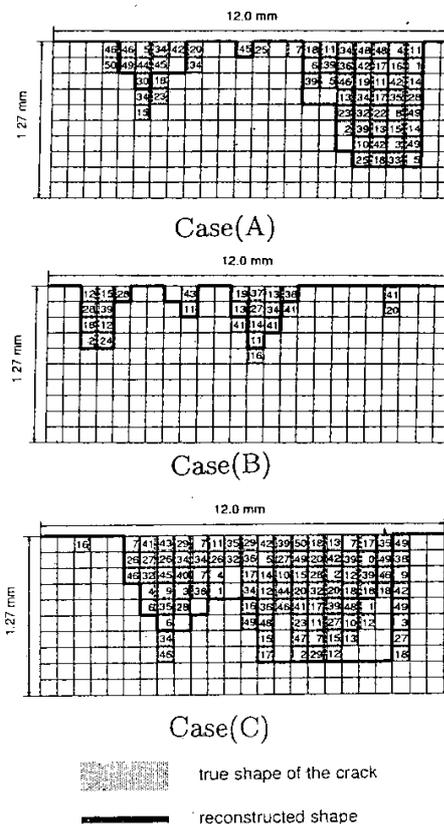


Fig. 6: Reconstruction of a modeled natural crack using a neural network approach.

一方、き裂形状を順解析モデルのなかでパラメータ表現し、モデル出力と測定信号との自乗誤差を最小にするようにパラメータを決定し、き裂形状を同定す

る計算法も確立された。

パラメータ推定法では、き裂形状から検出信号への写像に関する構造が明示的に与えられるため、形状復元の精度評価が容易にできる。しかしながら、パラメータ感度評価をおこなうために、パラメータの摂動ごとに繰り返し順解析モデルを解かねばならず、一般的に計算時間が膨大となる。本分科会では、前節で述べた辺要素有限要素法にもとづく高速順解析モデルを援用した逆解析コードを開発し、この問題を克服している [19]。

Fig.7 は自然き裂に関するラウンドロビンテスト (NFI-98-704,705,707) にこの方法を適用した結果である。

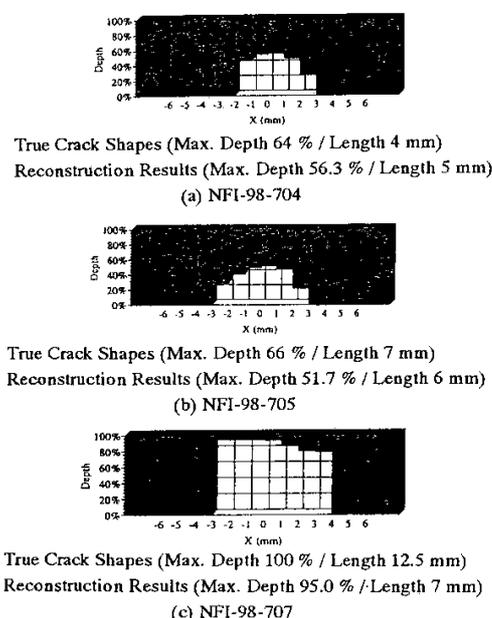


Fig. 7: Reconstruction of a natural crack using parameter estimation.

実環境においては、リフトオフ変化等のみならず、伝熱管周囲の支持板等の構造物の存在がノイズ源となり、き裂の定量評価のみならず検出も困難としてみよう。しかしながら、そのような状況下であっても、信号処理によって外部雑音源の影響を除去し、き裂形状の同定を高速かつ高精度に行うことにも成功している [20]。

き裂の定量評価においては、プローブのコイル径に関連して、空間分解能が問題となる。ハードウェア上の制約のなかで、例えば、コイル径より近接した複数き裂の識別、さらにはそれぞれのき裂形状がどこま

で同定できるかは、逆問題解析の開発において、今後重要な課題となるであろう。進化型計算によるき裂のプロファイリングはその問題を解決する可能性を有しており、現在研究が進行中である [21]。

3 新プローブの開発

この節では、本分科会での目的の一つとして ECT の高度化を目的とした新プローブの開発を行ったのでその内容を紹介する。第 3 フェーズにおいて、数多くのプローブが提案されたがここでは最終年度に行われた実機模擬試験に適用した詳細型プローブおよび高速探傷を目的としたマルチ型プローブについて紹介する。

管内を回転して検査する詳細型の 5 種類のプローブについては、最終年度に実機模擬試験により SG 適用評価を行った。開発した詳細型プローブの特徴、プローブの構造、検出特性および実機模擬試験結果を Table 1 にまとめて示す。いずれのプローブも、外面 10% の EDM (Electro-Discharge Machining) 欠陥の方向を区別して検出できる能力を持っていることが確認できた。また、実機模擬試験により実機環境における検出特性が評価された。

さらに、周方向および軸方向き裂を区別して高速に検査が可能な 2 種類のマルチプローブを開発した。開発したプローブの特徴、プローブの構造、検出特性および実機模擬試験結果を Table 2 にまとめて示す。これらのプローブは、高速探傷が可能かつ周方向にも高分解能の能力を持っている。

いずれのプローブも数値解析支援によるき裂形状診断を目的としており、それぞれのプローブの特徴を生かして、本分科会の目的である逆問題的な解析手法による診断法を組み込んだ検査システムの構築に期待できる成果が得られた。

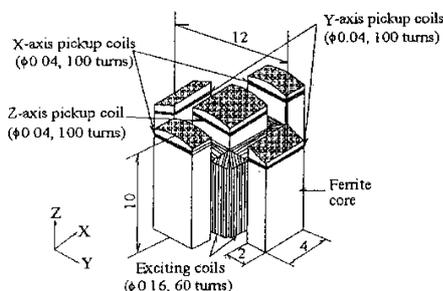


Fig. 8: Rotational magnetic flux sensor for a SG tube.

Table 1: Performance of developed rotating ECT probes.

プローブ名	特徴	構造	EDM 欠陥検出特性	実機模擬試験結果
回転磁束型 回転プローブ [22][23]	・ 回転磁束を発生させき裂方向を区別して検出 ・ 周・軸・垂直の各成分の信号が検出でき、励磁電流の位相を参照して方向とき裂深さを判定	・ フェライトコアを用いた4つの励磁極を持ち、回転磁界を発生 ・ 検出コイルは4つの励磁極の表面近くおよび中央の極にコイルを設け、XYZ成分を検出 (Fig.8 参照)	・ 外面 EDM10%の周方向および軸方向が区別して検出可能	・ き裂信号は検出できているが支持板等ノイズ源の信号が大きい ・ 試験周波数を上げる必要がある
相互誘導型 回転プローブ [24][25][26]	・ 励磁コイルと検出コイルの配置から支持板等のノイズ源の発生がない ・ き裂があると渦電流に直交する渦電流分布が発生しそれを検出	・ 周方向と軸方向に渦電流を発生させる2つの励磁コイルとそれぞれのき裂検出用コイルを持つ ・ 周方向および軸方向の励磁源と検出コイルを切り替えて用いる (Fig.9 参照)	・ 外面 EDM10%の周方向および軸方向が区別して検出可能 ・ プローブの原理からリフトオフ雑音が小さく SN 比が高い	・ 原理的に支持板の影響が発生せず、高い SN 比によりき裂のみが検出された
多重周波数励磁 スペクトログラム法 回転プローブ [27][28]	・ 数十周波数の同一振幅の正弦波をたし合わせた波形を励磁 ・ 検出コイルから出力された信号のパワースペクトラムを取りそれをういてき裂深さ、き裂形状を判定	・ フェライトコアを用いた4つ励磁極を持ち XY の 2 軸の励磁 ・ 検出コイルは中央の極にピックアップコイルを設置 (Fig.10 参照)	・ 外面 EDM10%の周方向および軸方向が区別して検出可能 ・ き裂形状は 2D 画像化	・ 支持板、管板および付着物の影響をほとんど受けずにき裂のみ測定された
差動受信 TR 型 回転プローブ [29]	・ 検出コイルを選択することにより周方向および軸方向のき裂を区別して検出 ・ 差動検出によりリフトオフに強い	・ 一つの励磁コイルと周方向および軸方向き裂検出用の差動検出コイルを持つ (Fig.11 参照)	・ 外面 EDM10%の周方向および軸方向が区別して検出可能	・ 支持板、管板および付着物の影響が信号に表れるが、傷がないラインの信号を全体から引く処理により、き裂のみを検出可能
一様渦電流 回転プローブ [30][31][32]	・ 数値解析を用いて最適設計された励磁コイルにより一様な渦電流分布が発生 ・ 一様な渦電流のため数値解析が容易	・ 周方向および軸方向に一様な渦電流を発生させる励磁コイルと一つの検出コイルを持つ (Fig.12 参照)	・ 外面 EDM10%の周方向および軸方向が区別して検出可能	・ 支持板、管板および付着物を含むすべての試験で SN:4 以上で検出

Table 2: Performance of developed multi-ECT probes.

プローブ名	特徴	構造	EDM 欠陥検出特性	実機模擬試験結果
TR 型 マルチプローブ [33]	・ 各コイルを励磁および検出コイルとして切り替えることにより周方向および軸方向にき裂を区別して検出	・ 小型の検出コイルを周方向に3列、120度の探傷に周方向に10個のコイルを配置 (Fig.13 参照)	・ 外面 EDM10%の周方向および軸方向が区別して検出可能	・ 支持板、管板および付着物のある状態で外面 EDM 20%のき裂が検出可能
一様渦電流 マルチプローブ [34]	・ 数値解析を用いて最適設計された励磁コイルにより一様な渦電流分布が発生 ・ 一様な渦電流のため数値解析が容易 ・ 励磁コイルと検出コイルを選択することにより周方向および軸方向のき裂が区別して検出	・ 周方向および軸方向に一様な渦電流を発生させる励磁コイルと周方向に32個の検出コイルを持つ (Fig.14 参照) ・ マルチプレクサ回路をプローブに付属	・ 外面 EDM20%の周方向および軸方向が区別して検出可能	・ 支持板、管板および付着物のある状態で外面 EDM 40%のき裂が検出可能 ・ 軸方向走査速度 300mm/sec の高速探傷

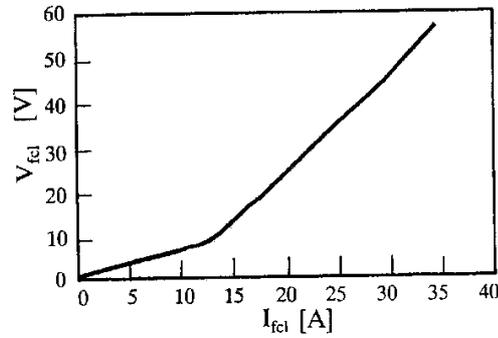


Fig. 12. Simulated volt-current characteristic for three-phase model.

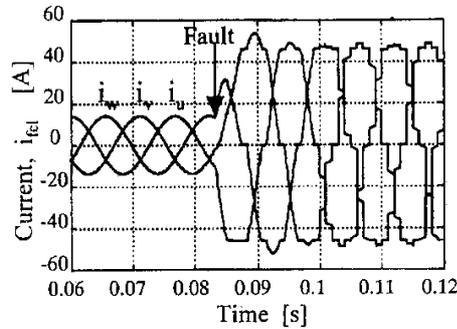


Fig. 13. Simulated current waveforms at typical operating condition.

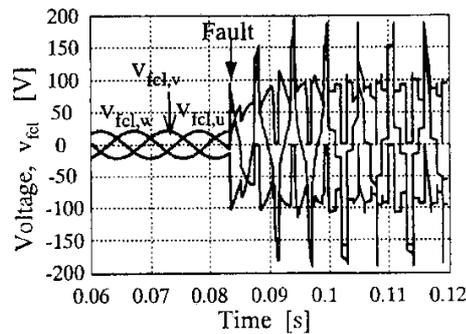


Fig. 14. Simulated voltage waveforms at typical operating condition.

current waveforms and the voltages across the three phases of the limiter for a typical fault condition. The distortion of the waveforms after the fault is due to the swing of the operating flux density of the core from the saturated state to the unsaturated state. In the simulation, the B-H characteristic of the core is represented by two straight lines; one representing the saturated region with a magnetic permeability of μ_s and the other representing the unsaturated condition with a magnetic permeability of μ_u .

4 ラウンドロビン試験

各研究機関で開発された ECT プローブの性能比較を目的として、人工 IGA/SCC を含む伝熱管形状の試験片を用意して国内外の機関による回送試験を行い、各プローブの性能評価を実施することとした。性能評価にあたっては検出性だけでなく、測定者にとって未知形状の欠陥についての形状推定も同時に実施した [4]。

未知の試験片としては複数の EDM 欠陥を付与した上で管外面に樹脂マスクを付けた試験片 1 本と人工 IGA/SCC 試験片 3 本を、既知の試験片としては欠陥深さを推定するための EDM 欠陥を付与した校正試験片 2 本を用意した。これらの試験片を順次回送し推定欠陥形状等の報告を集計した。

4.1 評価方法

各研究機関で開発されたプローブに対して実機での適用性を評価する為に評価基準を策定した。評価は、通常検査用(全長検査用)と詳細検査用(局所検査用)との2種類に分けて考え、それぞれに必要なとされる基準を定義した。この基準は試験対象がインコネル管であること、通常検査用であれば半径約 150 mm の U 字管部を通過可能であること、同じく通常検査用であれば検査速度 400 mm/s であること、欠陥方向の識別が可能であること、詳細検査用の場合深さ 20% の EDM 欠陥を検出可能であること、等の 18 項目である。

参加機関からの結果報告には統一されたデータフォーマットを使用し、検査プローブ情報シート、プローブ図、欠陥検出原理、出力信号例、校正試験片による欠陥深さ校正曲線等の提出を要求した。

回送試験終了後提出された試験結果とマスク EDM 試験片の実測値や人工 IGA/SCC 試験片の破壊結果との比較を行った。Fig.15 はマスク EDM 欠陥の形状でありその最大深さ等を Table 3 に示す。本試験片には 2 群 7 個の複合外面 EDM 欠陥を加工してあり周方向・軸方向を組み合わせてある。人工 IGA/SCC 試験片の破壊試験結果を Table 4 に示し、その深さ形状概略図を Fig.16 に、断面写真を Fig.17 に示す。

各プローブの評価は、欠陥検出性、欠陥深さ、欠陥長さの 3 項目について実施した。評価基準においてノイズ信号の定義を行っているものの、各機関で検出原理の異なるプローブに対し S/N 比を正確に比較するのは一般には困難である。このため今回の評価では

各機関から報告された値をそのまま採用した。

Table 5 に各評価項目と評価点の対応を示す。

- a) 欠陥検出性
浅い欠陥に対する S/N 比を比較するため校正試験片に付与した外面 10% 及び 20% の EDM 欠陥に対する S/N 比を 5 段階に分類し、評価を実施した。
- b) 深さ推定精度
マスク試験片及び人工 IGA/SCC 試験片に対する欠陥の実測深さと推定深さの絶対差を 5 段階評価した。
- c) 長さ推定精度
マスク試験片及び人工 IGA/SCC 試験片に対する欠陥の実測長さとは推定長さの絶対差を 5 段階評価した。

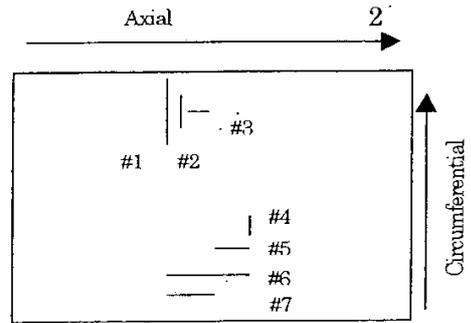


Fig. 15: Masked EDM Sample

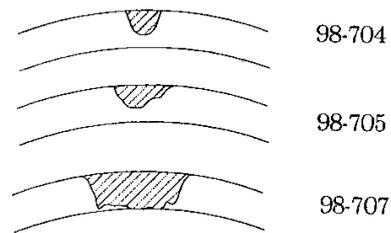


Fig. 16: Artificial IGA/SCC samples.

4.2 結果の比較

Table 6 に参加機関及び各機関が用いたプローブの一覧を示す。評価対象となったのは合計国内外 9 機関・13 種のプローブであり、内 11 種で欠陥形状推定

Table 3: EDM slit size of the masked EDM sample.

Crack Number	Group A			Group B			
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
Max Depth(%)	21	44	31	24	46	29	50
Length (mm)	10.3	4.6	3.0	2.5	5.0	12.1	7.0
Width (mm)	0.21	0.21	0.31	0.21	0.22	0.22	0.24
Direction	C	C	A	C	A	A	A
Shape	Rectangle	Ellipse	Ellipse	Slope	Slope	Rectangle	Rectangle

C:Circumferential Defect, A:Axial Defect

の報告があった。この中で通常検査用は2種で、残りはすべて詳細検査用であった。なお、13種のうち11種までが相互誘導型を基本原理とするプローブであった。

機関名・プローブ名を伏せた評価結果を Fig.18 に示す。これらの中ではプローブ F が最高得点を示している。さらに、実機検査で使用するためには、検出性、深さ評価性能が最も重要であるため、これらに対し重み付けした合計得点結果を Fig.19 に示す。この結果でもプローブ F が最高得点を示した。なお、プローブ L, M の得点が低いのはマスク EDM 試験片、人工 IGA/SCC 試験片双方に対する試験が未実施のためである。

浅い外面欠陥に対する S/N 比を見るとプローブ E, G, I が比較的優れているが、これらはあくまでも各機関からの報告による S/N 比に基づいているため同一の評価方法が適用可能であれば異なる結果となる可能性がある。

実機適用基準を各プローブに当てはめた適用性評価は殆どのプローブが研究室ベースであったため実施せず、前述の性能評価のみとした。

4.3 実機模擬回送試験

前述の回送試験は伝熱管の直管部が対象であるがこれに対し実機の損傷は構造物(管支持板や管板)近傍に多く見られる。然るに構造物や構造物近傍に多く見られる導電性又は磁性体付着物は欠陥信号に対する妨害信号源であり、これらの存在下では欠陥検出性が大きく低下する。先の回送試験で用いた各種プローブ(国内機関のみ)の妨害信号源存在下における欠陥検出性を確認するため、構造物近傍を対象とした実機模擬回送試験を実施した。

Table 4: Crack size of artificial IGA/SCC samples.

Sample name	98-704	98-705	98-707
Max. Depth(%)	64	66	100
Length(mm)	4.0	7.0	12.5
Width(mm)	3.0	0.5	0.7
Direction	C	C	C
Type	IGA/SCC	IGA/SCC	IGA/SCC
Number of crack	a few	single	single

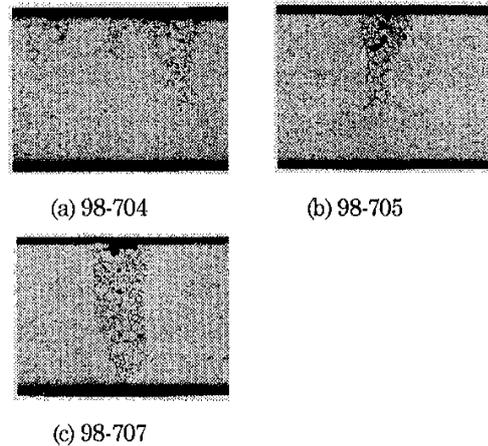


Fig. 17: Cross sectional view of artificial IGA/SCC samples.

Table 5: Points Evaluated.

S/N	Depth (Diff.)	Length (Diff.)	Point
<1	NDD	NDD	0
<2	20%<	5mm<	1
<5	≤20%	≤5mm	4
<10	≤10%	≤3mm	7
10≥	≤5%	≤1mm	10

NDD:No Detectable Degradation

Table 6: List of participants and probes.

Organization	Country	Probe name	Operating principle
Tohoku Univ.	Japan	Differential receiver type TR probe	Defferential T/R
Oita National College of Technology	Japan	Rotational magnetic flux type probe	Rotational magnetic flux T/R
Oita Univ.	Japan	UNI-PIPE	Multi-frequency spectrogram
		MAT-PIPE	Multi-frequency spectrogram
Kanazawa Univ.	Japan	Planar type meander/figure-of-eight coil	Differential T/R
Polytechnic Univ.	Japan	Uniform eddy current rotational probe	Uniform eddy current T/R
Nihon Univ.	Japan	Rotational mutual-induction probe	Uniform eddy current T/R
Technical Univ. of Szczecin	Poland	Defferential eddy current probe	Differential bobbin tipe T/R
Institute of Chemical Technology	Czech	Dubble ring probe	differential T/R
Nuclear Engineering Ltd. (NEL)	Japan	Rotational T/R probe	Absolute T/R
		Rotational + point probe	Differential impedance
		Rotational pancake probe	Absolute impedance
		High performance array probe	Array T/R

Table 7: Samples for field mock-up round robin test.

Sample	Defect type	Defect location	Defect direction	Defect depth
00-17	EDM	Straight area	OA	20%
00-18			OC	
00-21		Expansion transition area	IA	
00-22			OC	
93-114	IGA/SCC	Straight area	OC	54%
93-205		Expansion transition area	OC	57%

OA:Outer Axial Defect, OC:Outer Circumferential Defect, IA:Inner Axial Defect

Table 8: S/N ratio comparison of field mock-up round robin test.

Sample	Noise source		Probe								
	Structure	Deposit	A	B	C	D	E	F	G	H	I
00-17	---	---	15	6	4	18					
	TSP	Permalloy	27		5	21	16	10	3	3	9
00-18	---	---	246	3	2	4					
	TSP	Permalloy	82		2	5	18	13	5	4	6
00-21	---	---	25			10					
	TS	Permalloy	51			11	14	5	3	3	4
	TS	Copper	61			7	14	3	3	3	4
00-22	---	---	149			4					
	TS	Permalloy	100			4	3	6	2	2	3
	TS	Copper	30			4	3	6	2	2	3
93-114	---	---	54			3					
	TSP	Permalloy	29			3		7	4	3	7
95-205	---	---	103			7					
	TS	Permalloy	158			7		11	4	3	4
	TS	Copper	312			7		11	5	3	4

TSP:Tube Support Plate, TS:Tube Sheet

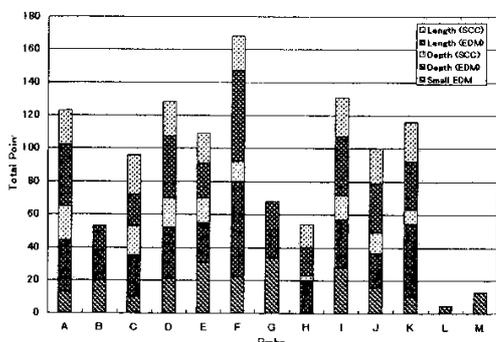


Fig. 18: Total performance of probes.

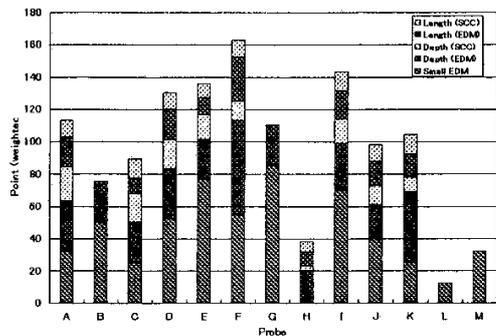


Fig. 19: Total performance of probes. (Weighted)

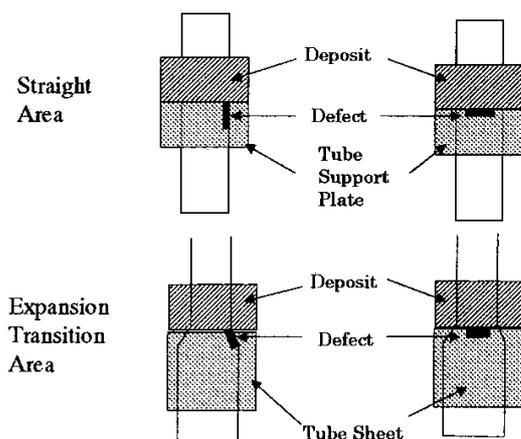


Fig. 20: Layout of noise source setting.

試験片は合計6本でEDM欠陥及び人工IGA/SCCを直管部又は拡管境界部に導入してある (Table 7). また模擬構造物 (管支持板, 管板) 以外に妨害信号源として厚さ $30 \mu\text{m}$, 幅 10mm の銅箔及び磁性体 (パーマロイ 45) 箔を準備し Fig.20 に示す通りに試験片全周に巻き付けた.

各機関によって評価されたSN比を Table 8 に示す. 表中のプローブ名 (A, B, C...) は便宜上のものであり前述の回送試験との対応は無い. 結果はプローブ A のSN比が突出しているが, これはノイズの定義が他のプローブと若干異なる可能性もある. またプローブ B, C はプローブの仕様上拡管部への試験が実施できなかったものの, これら以外のプローブでは全てのケースにおいて欠陥検出が可能であることが判明した.

5 データベースの構築と情報発信

5.1 論文データベース

渦電流探傷 (ECT) による高精度な欠陥診断技術の研究に沿って, 「電磁現象を利用した非破壊材料評価法」, ならびに 「自然き裂の性状評価」 に関する文献を公開データベースおよび主要な ECT 関連学会の論文誌等から抽出し, 2 種類の論文データベースを構築した.

5.1.1 ECT 関連の論文のデータベース

1980 年から 2000 年末までの ECT 関連の論文を抽出した. その結果, 抽出された文献の数は 476 編である. 論文は, 1995 年以降の 6 年以内の論文が 70% を占めており, 最新の論文内容により構成されている. 論文は, 内容別に検査手法の開発, 実験結果の評価, 解析手法・結果, データ処理, 逆問題手法等にて分類され, 作成した summary および論文を画像として取込みデータベース化した.

本データベースは, html 形式と MS Access 上のデータ形式の 2 種類にて構築した. html 形式のデータベースは, 日本 AEM 学会のホームページ上に公開している. MS Access 上のデータベースは, 表題のキーワード, 著者名, 分類別, ならびに出典先・年代によって検索できるようになっている. 分類の論文数からは, 新しい ECT プローブの開発と特性の改善に関する内容 (掲載数 108 編), 各種のプローブでの

フィールド試験結果の報告 (72 編), 順問題の数値解析に関する内容 (150 編) が目立つが, 近年においては検出信号の処理 (35 編) ならびに逆問題による欠陥形状の同定 (51 編) に関する論文が増加していることが注目される. これは, 高精度な ECT プローブの開発による, 信号データの高度な処理による有効なデータの抽出の必要性, 有効な逆問題手法開発の進展等によるものと思われる.

5.1.2 自然き裂関連論文のデータベース

本研究開発分科会の研究目的である, 機械き裂 (EDM 等) から自然き裂を対象にした高精度 ECT プローブ, 数値シミュレーションならびに逆問題解析手法の開発に関して, 「自然き裂, 複雑なき裂」関連のデータベースの構築を行った. 本データベースは, 「応力腐食割れ (SCC)」, 「粒界腐食損傷 (IGA)」, 「自然き裂 (Natural Crack)」について, ECT 技術に関わらず非破壊検査技術全般との関連において検索を行った. その結果, 抽出された文献の数は 205 編である. 本データベースからは, 検査手法として ECT ならびに超音波探傷法 (UT) に関する論文が多く見受けられるが, その他に SEM 画像, acoustic emission, CCD 映像, データ処理に関する論文も見受けられる. また, 欠陥性状については SCC 関連の論文が多く収集されている.

5.2 研究者データベース

ECT 関連と自然き裂関連の 2 種類のデータベースから著者のデータを抽出し, 研究者データベースを作成した. 研究者データベースは, 研究者の名前, e-mail address, 住所, 論文題目など 9 項目が登録されている. 登録数は, 1884 件である. Fig.21 は, 研究者データベースから各国の ECT 関連の研究者数について調べた結果である. 米国が 27%, 日本が 19%, 西欧 (フランス, イタリア, ドイツ, イギリス, 他) が 31%, である.

5.3 情報発信

本研究開発分科会では, 技術向上をはかり ECT 分野における広く国際的な研究交流を展開するため, 上記のデータベースおよび委員会の活動状況をホームページ (<http://wwwsoc.nii.ac.jp/isaem/>) に掲載, また CD-ROM としても情報の公開を行っている. ECT

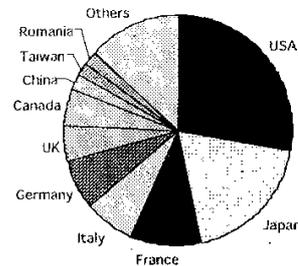


Fig. 21: Country ratio of ECT researchers.

関連の新技术の展開に寄与する貴重な資料を提供できたものと確信する.

6 電磁非破壊検査に関する国際ワークショップの開催

電磁非破壊検査に関する国際ワークショップ (International Workshop on Electromagnetic Non-destructive Evaluation, E'NDE Workshop) は, 電磁現象を用いた非破壊評価技術に関して,

- (a) 最新技術に関する情報交換
- (b) 革新的技術の発掘
- (c) ベンチマーク試験の提案・議論

の場を提供し, これらを通して先進的電磁非破壊検査技術の開発に資することを目的としている. また, 電磁現象を用いた非破壊診断評価学の学問的体系を確立することも重要な目的の一つである.

E'NDE ワークショップでは, ベンチマーク試験についての測定法や解析手法及びその結果について議論する場として位置付けられ, 日本 AEM 学会の主催または共催により毎年開催されている. さらに E'NDE ワークショップを通して非破壊評価分野における日本の主導的立場を確立することも, 本ワークショップの目的の一部である. Table 9 に示すように, これまで 7 回のワークショップが開催され, 来年度のワークショップがすでに企画されている.

本ワークショップにて発表された論文は, 査読の後に IOS プレス社より出版されている [5]-[10].

E'NDE ワークショップは電磁現象を応用した非破壊材料評価法に関する研究者が集まり最新の成果について発表し議論する場として定着している. これまでは, 蒸気発生器伝熱管を対象とした渦電流探傷法につ

Table 9: E'NDE workshops.

第1回 E'NDE-London 1995年9月21日, 22日 発表35件 議長:W.D. Dover (University College London)
第2回 E'NDE-Tokyo 1996年10月28日, 29日 発表43件 議長:宮健三 (東京大学)
第3回 E'NDE-Reggio Calabria 1997年9月14日-16日 発表42件 議長:R. Albanese (University of Reggio Calabria)
第4回 E'NDE-Chatou 1998年9月17日, 18日 発表34件 議長:D. Lesselier (LSS), A. Razek (LGEP)
第5回 E'NDE-Des Moines 1999年8月1日-3日 発表45件 議長:S. Udpa (Iowa State University)
第6回 E'NDE-Budapest 2000年6月28日-30日 発表51件 議長:J.Pavo (Budapest University of Technology and Economics)
第7回 E'NDE-Kobe 2001年5月17日-19日 発表48件 議長:小島史男 (神戸大)
第8回 E'NDE-Saarbruecken 2002年6月13日-14日 議長:G. Dobmann (Fraunhofer Institute)

いての研究発表が多いが今後は、溶接部欠陥、材料劣化などにさらに広がりを見せると考えられる。

7 まとめ

本解説では、日本 AEM 学会における蒸気発生器伝熱管を対象とした渦電流探傷試験に関する研究活動について概説した。特に、1998 年からの 3 年間にわたる第 3 フェーズの研究活動を示した。

第 1 フェーズ、第 2 フェーズ、第 3 フェーズを合わせた 10 年間は原子力発電プラントの蒸気発生器伝熱管の非破壊検査を高度化し以って体系化することに特化して活動を展開してきた。体系化は順問題の解析手法の高度化と欠陥のサイジング（ここでは、再構成、と呼ばれている）技術の開発の 2 つに分けられる。

前者は電磁場解析の高効率化と高精度化であり、後者は AI 的手法 (ニューラルネットワークや遺伝的アルゴリズムなど) の開発であったり、物理モデルに基いた手法の効率化であったりした。特に第 3 フェーズでの成果の概略は本解説にまとめられている通りであるが、世界的にも突出した成果が得られている。伝熱管の非破壊検査技術は目標を達成し十分に高度化され、社会的な必要性に答え、また学問的にも重要な知見を多く生み出し、体系化に貢献したのと考えられる。

謝辞

本解説は PWR5 電力会社と (株) 原子力エンジニアリングの委託により日本 AEM 学会内に設置された「ECT による高精度欠陥診断技術に関する研究開発」分科会の成果の一部である。

参考文献

- [1] T. Takagi, M. Hashimoto, H. Fukutomi, M. Kurokawa, K. Miya, H. Tsuboi, M. Tanaka, J. Tani, T. Serizawa, Y. Harada, E. Okano and R. Murakami, Benchmark Models of Eddy Current Testing for Steam Generator Tube: Experiment and Numerical Analysis, *Int. J. of Applied Electromagnetics in Materials*, Vol.5, (1994), pp.149-162.
- [2] T. Takagi, M. Uesaka and K. Miya, Electromagnetic NDE Research Activities in JSAEM, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation*, (1997), IOS Press, pp.9-16.
- [3] T. Takagi and H. Fukutomi, Benchmark Activities of Eddy Current Testing for Steam Generator Tubes, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation (IV)*, IOS Press, (2000), pp.235-252.
- [4] T. Takagi and K. Miya, ECT Round-robin Test for Steam Generator Tubes, 日本 AEM 学会誌, Vol.8, No.1 (2000), pp.121-129.
- [5] R. Collins, W. D. Dover, J.R. Bowler and K. Miya (Eds.), *Nondestructive Testing of Materials*, ISBN: 90 5199 239 4, IOS Press, (1995).
- [6] T. Takagi, J. R. Bowler and Y. Yoshida (Eds.), *Electromagnetic Nondestructive Evaluation*, ISBN: 90 5199 325 0, IOS Press, (1997).
- [7] R. Albanese, G. Rubinacci, T. Takagi and S. S. Udpa (Eds.), *Electromagnetic Nondestructive Evaluation (II)*, ISBN: 90 5199 375 7, IOS Press, (1998).
- [8] D. Lesselier and A. Razek (Eds.), *Electromagnetic Nondestructive Evaluation (III)*, ISBN: 90 5199 444 3, IOS Press, (1999).
- [9] S.S. Udpa, T. Takagi, J. Pavo and R. Albanese (Eds.), *Electromagnetic Nondestructive Evaluation (IV)*, ISBN: 1 58603 023 X, IOS Press, (2000).
- [10] J. Pavo, G. Vertesy, T. Takagi and S.S. Udpa (Eds.), *Electromagnetic Nondestructive Evaluation (V)*, ISBN: 1 58603 155 4, IOS Press, (2001).

- [11] F. Matsuoka, Calculation of a Three Dimensional Eddy Current by FEM-BEM Coupling Method, *Proceedings of IUTAM Conference on Electromagnetomechanical Interactions in Deformable Solids and Structures*, (1987), pp.169-174.
- [12] J.C. Nedelec, Mixed Finite Elements in R^3 , *Numer. Math.*, 35 (1980), pp.315-334.
- [13] A. Kameari, Three Dimensional Eddy Current Calculation Using Edge Elements for Magnetic Vector Potential, *Applied Electromagnetics in Materials*, (1988), pp.225-236.
- [14] Z. Badics, H. Komatsu, Y. Matsumoto, and K. Aoki, Inversion Scheme based on Optimization for 3D Eddy Current Flaw Reconstruction Problems, *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol.17, No.2 (1998), pp.67-78.
- [15] Z. Chen, K. Miya, and M. Kurokawa, A Knowledge Based Method for Fast Evaluation of ECT Signals, *NDT&E International*, Vol.32, No.1 (1999), pp.29-36.
- [16] T. Takagi, H. Huang, H. Fukutomi, and J. Tani, Numerical Evaluation of Correlation between Crack Size and Eddy Current Testing Signal by a Very Fast Simulator, *IEEE Trans. Magnetics*, Vol.34, No.5 (1998), pp.2581-2584.
- [17] M. Tanaka, H. Tsuboi, K. Ikeda, and M. Kimura, Computational Results for Benchmark Problem Step5-3: Conductor with a Crack and a Support Plate, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation (IV)*, IOS Press, (2000), pp.219-226.
- [18] N. Yusa, Z. Chen and K. Miya, Quantitative Profile Evaluation of Natural Crack in Steam Generator Tube from Eddy Current Signals, *Int. J. Applied Electromagnetics and Mechanics*. (submitted)
- [19] H. Huang, T. Takagi, H. Fukutomi, and J. Tani, Forward and Inverse Analyses of ECT Signals based on Reduced Vector Potential Method Using Database, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation (II)*, IOS Press, (1998), pp.313-321.
- [20] 黄皓宇, 福富広幸, 高木敏行, ノイズを含む渦流探傷信号からの逆問題解析, 日本機学会論文集 (A 編), 第 66 卷, 641 号 (2000), pp.63-70.
- [21] N. Kubota and F. Kojima, Coevolutionary Optimization in Uncertain Environments, *Proceedings of the 4th Japan-Central Europe Joint Workshop*, (2000), p.5.
- [22] M. Oka and M. Enokizono, Non-destructive Testing by Using the Rotational Magnetic Flux Type Probe for SG Tubes, *Short Papers of the 7th International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation*, (2001), Kobe, pp.23-24.
- [23] M. Oka and M. Enokizono, Eddy Current Testing Using Rotational Magnetic Flux Type Probe for SG Tube, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation (V)*, IOS Press, (2001), pp.234-241.
- [24] 柄澤英之, 小山潔, 星川洋, 配管の渦流探傷用新型内挿プローブについて, JSNDI 平成 11 年度秋季大会講演概要集, (1999), pp.1723-1740.
- [25] 柄澤英之, 小山潔, 星川洋, 渦流探傷における配管の周方向きず検出用新型内挿プローブについて, JSNDI 平成 12 年度春季大会講演概要集, (2000), pp.97-98.
- [26] 若梅博志, 小山潔, 星川洋, 配管の渦流探傷における支持板による雑音の小さな相互誘導内挿プローブについて, JSNDI 平成 13 年度春季大会講演概要集, (2001), pp.53-54.
- [27] T. Chady, M. Enokizono, T. Todaka, Y. Tsuchida and R. Sikora, Flaws Detection and Characterization Using the Multi-frequency Excitation and Spectrogram ECT Method, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation (IV)*, IOS Press, (2000), pp.87-94.
- [28] T. Chady and M. Enokizono, Multi-frequency Exciting and Spectrogram-based ECT Method, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, (2000), pp.700-703.
- [29] H. Huang and T. Takagi, Shape Reconstruction of Natural Cracks with a Differential TR ECT Probe, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 20A, (2001), pp.764-771.
- [30] M. Hashimoto and D. Kosaka, Development of Rotation ECT Probe Detecting Axial and Circumferential Cracks using Uniform Eddy Current Excitation Coils, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation (V)*, IOS press, (2001), (in press)
- [31] M. Hashimoto, D. Kosaka, K. Ooshima and Y. Nagata, Numerical Analysis of Eddy Current Testing for Tubes Using Uniform Eddy Current Distribution, *Proceedings of the 10th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics*, May, 2001, Tokyo, pp.507-508.
- [32] Y. Nagata, D. Kosaka and M. Hashimoto, Development of Rotation Uniform Eddy Current Probe and Field Mock-up Test of Steam Generator on Nuclear Power Plant, *Proceedings of The Third Asian Symposium on Applied Electromagnetics*, May, 2001, Hangzhou, China, pp.98-99.
- [33] H. Huang and T. Takagi, An Arrayed Multi-coil Eddy Current Testing Probe Designed with Help of Numerical Simulation, (to be presented in COM-PUMAG 2001).
- [34] M. Hashimoto, D. Kosaka, K. Ooshima and Y. Nagata, Development of ECT Multi-probe Detecting Axial and Circumferential Cracks Using Uniform Eddy Current Excitation Coils, *Short Papers of the 7th International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation*, May, 2001, Kobe, pp.19-20.