

特集 電磁非破壊検査工学の体系化

渦電流探傷試験の数値解析

Computational aspects of eddy current testing

高木 敏行

(東北大学)

遊佐 訓孝

(普遍学国際研究所)

Toshiyuki TAKAGI

Member

Noritaka YUSA

Member

1 はじめに

大型機器や構造物において、欠陥がまったく存在しないということを保証するのはきわめて困難であり、特に構造破壊による社会的損害が莫大である発電・化学プラント、航空機、大型インフラストラクチャーの定期的な保守検査はきわめて重要である [1][2]。これらの保守検査時の要となるのが、超音波探傷試験、渦電流探傷試験、放射線透過試験などの各種非破壊検査であり、特徴に応じてそれぞれに適した部位の検査に用いられている。

渦電流探傷試験 (Eddy current testing, ECT) は電磁現象を利用した非破壊検査手法の一つであり、管、棒、線材などの単純な形状のものを対象とした探傷、もしくは材質試験、形状検査、膜厚測定などの広い分野で用いられているが、特に重要であるものの一つに発電用加圧水型原子炉の蒸気発生器伝熱管の定期検査への適用がある。蒸気発生器伝熱管の数はプラント一基あたり数千にもおよび、これらを高精度かつ高速に検査することは、発電コストに直結している供用期間中検査期間の短縮という面からも不可欠な課題である。

以下、本稿では渦電流探傷試験を数値解析的側面からとらえ、次節において ECT の原理について簡単な説明を行い、3 および 4 節において近年発達が目覚ましい数値解析による ECT の順・逆問題解析についてそれぞれ解説する。なお、ここで順解析とは数値解析によって探傷信号を予測することであり、逆解析とは探傷信号より欠陥の再構成を行うことを意味するものとする。

2 ECT の原理

導体に磁場変化を与えた場合、ファラデーの電磁誘導の法則より内部に磁束密度の時間変化に応じた起電力が生じ、渦電流と呼ばれる電流が導体内部に生ずる。このとき、導体内部に欠陥や材質の変化などがあった場合その近傍での渦電流に乱れが生ずるが、これを検出用コイルのインピーダンスもしくは起電力変化として検出するのが ECT の基本的な原理である。Fig.1 に簡単な説明図を示す。ECT は非接触で高速な探傷が可能であり、さらに出力が電気信号として与えられるために、記録や解析が容易であるという優れた特徴を有している。

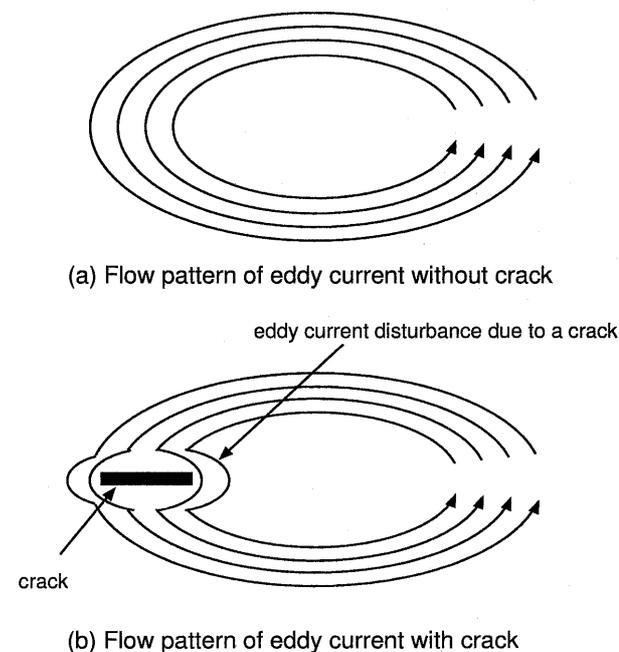


Fig. 1 Basic principle of eddy current testing.

ECT の適用の際、最も大きな問題となるのが表皮効果という現象である。外部磁場変化により導体内に誘起された渦電流は、表面にてその強度が最大であり、深さ方向とともに指数関数的に減少することが知られている。それゆえ、ECT においては表面から深い箇所が存在する欠陥の検知が困難である。このとき渦電流強度が表面におけるものの $1/e$ となる深さを表皮深さといい、次式で求められる。

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma \mu}} \quad (1)$$

ただしここで δ は表皮深さ (m), ω は角周波数 (rad/s), σ は導体の導電率 (S/m), そして μ は透磁率 (H/m) である。すなわち、周波数、導電率、透磁率が高くなるに従って表皮深さは減少し、渦電流は表面に集中する傾向が強まることになる。上式で表される表皮深さは一つの目安であり、実際にはコイル形状などによって大きな影響を受けるということも考慮せねばならないものの [3], 磁性体への ECT の適用は極めて困難であることが式 (1) より容易に説明される。

3 順問題解析

ECT は電磁誘導現象を原理としているため、工学的なモデリングには、有限要素法 (Finite element method, FEM) や境界要素法 (Boundary element method, BEM), およびこれらの併用法が用いられることが多い。ECT に関する数値解析が実施されるようになった当初は、計算機性能の制約、数値解析技術の未成熟などの理由により、三次元回転対称場の磁気ベクトルポテンシャルを変数とする支配方程式 (磁気ベクトルポテンシャル法) に有限要素法を適用する手段が多く用いられていた [4]。数値解析により欠陥の大きさとその検出信号の定性的な関係、プローブの検出性能などが評価されたが、実際の検査を想定した詳細な検討は形状に関する制限から依然として不可能であった。

計算機性能の向上および各種解析技術の高度化とともに三次元渦電流解析法の応用が報告されるようになり、様々な支配方程式および離散化手法が提案されるとともに、ECT を対象としたベンチマーク問題が Testing Electromagnetic Analysis Methods (TEAM) ワークショップにおいて問題 8 として提案された [5]。後に、加圧水型軽水炉原子力プラントの蒸気発生器伝熱管の定期検査を対象とした ECT のベンチマーク問題

が日本 AEM 学会内に設けられた研究開発分科会の主導的役割の元で提案されている [6][7]。後者においては、実際の伝熱管に放電加工により様々な形状のきずを設け、精密探傷用のプローブコイルによる探傷結果と数値解析結果が比較されている。

現在に至っては、三次元渦電流解析に基づく欠陥検出信号の予測、プローブの設計支援などが可能となった。前述のベンチマーク問題は楕円形欠陥やスロープ形状欠陥などのやや複雑な形状のものも含んでいるが、 \mathbf{A} - ϕ 法に基づく FEM-BEM 併用解析法 [8] や \mathbf{A} 法に基づく辺要素有限要素法解析法 [9][10] など、実験結果と高精度での一致を見せる各種数値解析手法が開発されている。ここでは、ECT 順問題解析手法の一例として、 \mathbf{A} - ϕ 法に基づく支配方程式の導出を解説する。

電場の強さを \mathbf{E} , 電束密度を \mathbf{D} , 磁場の強さを \mathbf{H} , 磁束密度を \mathbf{B} , 電流密度を \mathbf{J} , そして電荷密度を ρ としたとき、これらの関係式は以下の Maxwell 方程式によって表される。

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (5)$$

ただし、通常渦電流問題においては変位電流項、すなわち 2 式右辺第 2 項を無視するという近似を行う。実際、第 1 項と第 2 項との比較を行うと、

$$\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} / \mathbf{J} = j\omega \epsilon \mathbf{E} / \sigma \mathbf{E} \quad (6)$$

となり、これは例えば試験片が銅であるとするとき、周波数 100 kHz においても 10^{-16} 程度のオーダーであり、十分に許容範囲であることが確認できる。ただし時間微分には後述の複素近似を用い、また ϵ を導体の誘電率とした。非磁性体の場合、その構成式は μ_0 を真空の透磁率、 σ を導体の導電率とすると、次のように表せる。

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} \quad (7)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (8)$$

$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$ で磁気ベクトルポテンシャル \mathbf{A} を定義して、式 (3) に代入すると

$$\nabla \times \left(\mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad (9)$$

になる。従って、回転が 0 であるベクトル関数は適当なスカラー関数の勾配で表されることから、電場が

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla \phi \quad (10)$$

で表せる。式 (2), (7) と磁気ベクトルポテンシャルの定義式を利用して、

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_0} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{J} \quad (11)$$

が得られる。更に $\mathbf{J} - \mathbf{E}$ 構成式 (式 (8)) と式 (10) より、

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_0} \nabla \times \mathbf{A} \right) = -\sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \phi \right) \quad (12)$$

となる。また、電流連続条件 ($\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$) と式 (10) より次式が得られる。

$$\nabla \cdot \sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \phi \right) = 0 \quad (13)$$

式 (12) と式 (13) が解くべき支配方程式であるが、このままでは解が一意に決定しないため、クーロンゲージ条件 $\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$ を適用し、さらにマトリックスを対称化するために、

$$\Phi = \int_{-\infty}^t \phi dt \quad (14)$$

の変換を行なうと、最終的な支配方程式は導体領域で、

$$\frac{1}{\mu_0} \nabla^2 \mathbf{A} = \sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right) \quad (15)$$

$$\nabla \cdot \sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right) = 0 \quad (16)$$

また、空気領域では、

$$\frac{1}{\mu_0} \nabla^2 \mathbf{A} = -\mathbf{J}_0 \quad (17)$$

となる。ただし、空気領域中では渦電流は発生しないために、式 (17) 右辺は励磁コイル電流などの外部強制電流 (\mathbf{J}_0) のみであり、逆に式 (16) においては、導体内に存在する電流としては、渦電流を表す $\sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right)$ のみを考慮している。

通常の ECT においては試験体近傍に設置したコイルに高周波電流を与えることで試験体に外部磁場を印加するが、このとき場もやはり正弦的に変化するものとみなし、時間微分項 $\partial/\partial t$ を $j\omega$ で置換するという作業を行う。これにより解析中で時間変化を陽に取り扱

う必要がなくなり、計算労力の低減が可能となる。なお、ここでは非磁性材料を対象とするとしたが、実際には ECT において印加される磁場変化は試験体の飽和磁場と比べてきわめて小さいため、磁性体を対象とした解析においてもほぼ同様の手法での解析が可能である [11][12]。

Fig.2,3 に順問題解析の一例を示す [13]。これは前述のベンチマーク問題において Step5 として定義されている、銅付着物もしくは磁性支持板が伝熱管外面に存在した場合を模擬したものである。Fig.3 中丸印で示したものが逆要素有限要素法コードによって得られた解析結果であり、四角で示したものが実験によって得られた探傷信号である。例えば OC60% とは探傷面と逆側の面に発生した (Outer crack) 60% 試験体深さの欠陥からの信号という意味であるが、いずれの場合においても解析結果と実験結果に非常に良好な一致が確認できる。

4 逆問題解析

続いて、ECT における逆問題解析について概説する。文献 [14] によれば、逆問題とは

- 因果の矢印に逆行する問題、すなわち結果を観測して原因を推定する問題
- 順問題とは設定が異なる問題。ただし、順問題とは「何らかの微分方程式を指定された初期条件・境界条件のもとに解く問題」である
- ある種の積分変換を逆変換する問題

のいずれかもしくは複数に相当する問題とみなすことができるが、通常 ECT においては探傷信号より欠陥形状を推定することとされている。最も単純であるのが、複素平面上の探傷信号の位相角より欠陥の深さを求める手法である。これは試験体の深い箇所にある欠陥による渦電流の乱れは位相遅れを伴って検出されるということを利用したものであり、きわめて簡便でありながら自然欠陥に対しても良好な深さ推定を行うことができる優れた手法であるということが出来る。また、何らかの信号処理によって探傷信号の特徴量を抽出し [15]、大まかな欠陥形状の推定に用いることも、以前から行われている。しかしながら、より定量的な逆問題解析、すなわち探傷信号から厳密な欠陥の形状を求めることが可能となったのは比較的近年のことである。

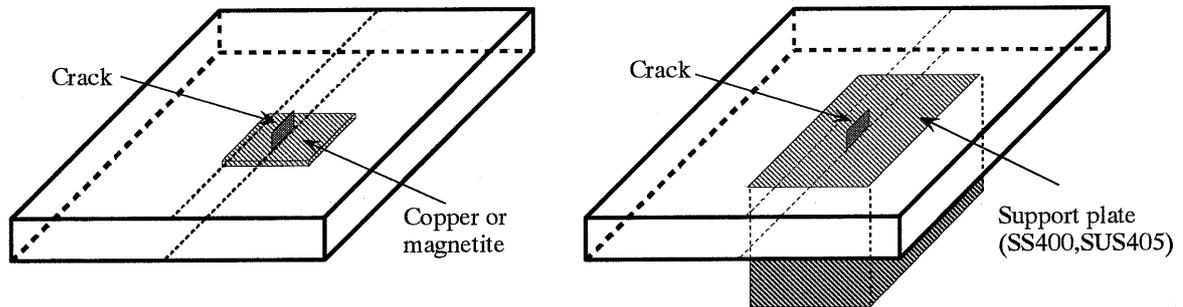


Fig. 2 Step 5: deposits and support plates. This problem includes two kinds of deposit models, and support plate models. Among deposits which located on outer surface of the SG tubes, copper and magnetite are chosen as deposits in this problem. Both of the deposits and support plates result in the causes of noise signals on realistic inspection. (a) Deposit models, and (b) support plate models are used.

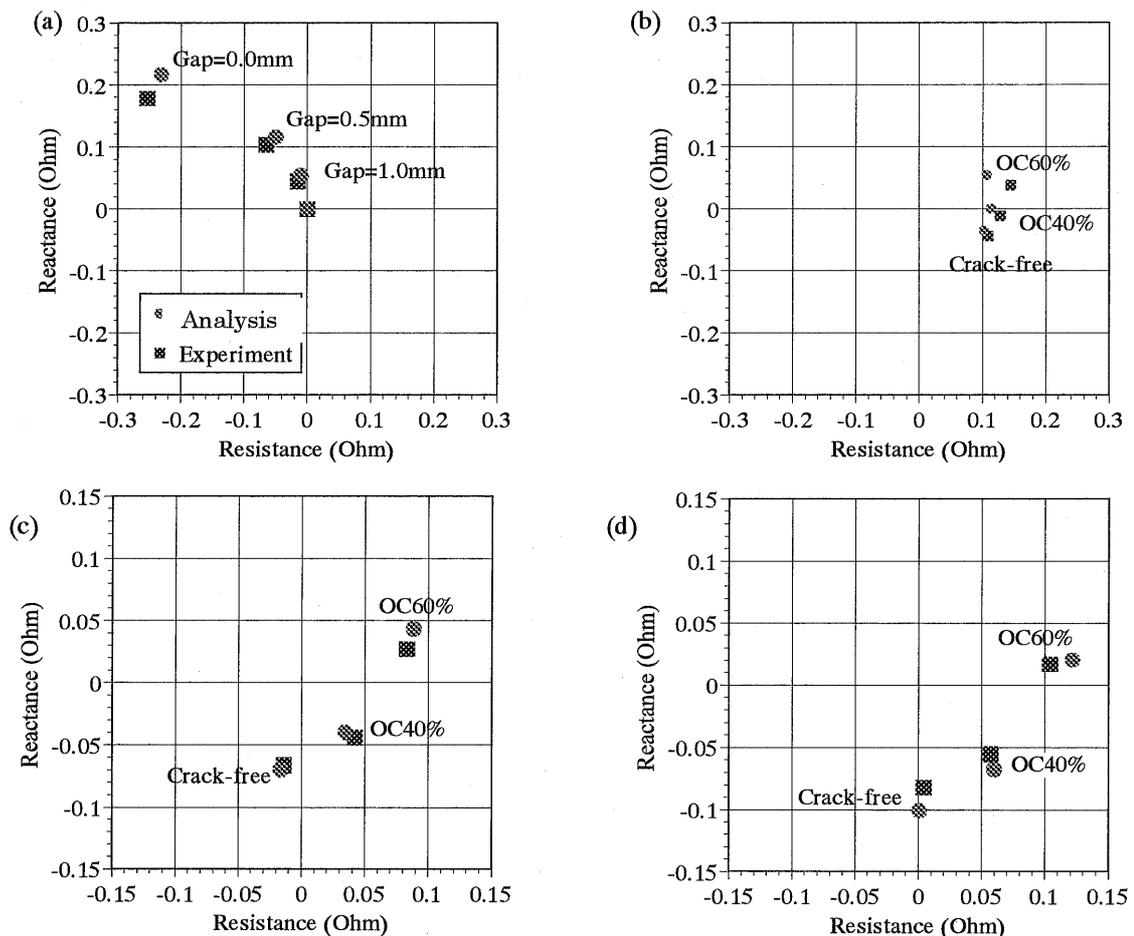


Fig. 3 Predictions of eddy current responses due to an outer rectangular crack 19% deep and comparison with experiment at 300 kHz in step 5. The eddy current responses are plotted in cases of (a) copper sheets 0.08 mm thick, (b) magnetite, (c) SS400, or (d) SUS 405 block with/without cracks, as the coil locates over the center of the crack.

通常逆問題とは不適切性もしくは不安定性と呼ばれる特徴を備えている。これらはすなわち、解が存在しないかもしくは唯一に決定できない、または微小な入力の変乱によって解が大きく異なったものとなってしまふ可能性があるということであり、ECT における逆問題解析においては、探傷信号より存在する欠陥の数・形状が決定できない、ノイズの混入によって実際とはまったく異なった欠陥と推定されてしまうということに相当する事柄である。これだけでも逆問題解析が前節の順問題解析と比べて著しく困難なものであるということは容易に想像がつくが、さらに加えて、実際の ECT 逆問題解析を考えた場合、もう一つ計算時間という大きな問題があると言わざるを得ない。解析的に求まるごくわずかの例外を除いては逆問題解析のためには数多くの順問題解析が必要であり、大規模な連立方程式を数多く解くことが要求される ECT 逆問題は、当初大型計算機などを用いる必要があるものと考えられていた [16]。

このような要求にこたえ、Badics[17]らやChen[18]らは解析領域を欠陥とその周辺の局所的な領域のみとする高速解析手法を提案した。これにより探傷信号を求めるための計算時間は従来の数十分の一から数百分の一にまで短縮され、現実的な時間のうちに欠陥形状の再構成を行うことが可能となった。また、Huangらは同様の手法を磁気ベクトルポテンシャルと辺要素を用いた解析に適用し [9]、支持板部、拡管境界部などの外部雑音源下での高速解法を確立させている [12]。

ECT 逆問題解析の手法は二種類に大別することができる。一つは、測定信号 \mathbf{Z}^{obj} と再構成された欠陥からの信号 $\mathbf{Z}(x)$ から、例えば

$$\varepsilon = \|\mathbf{Z}^{obj} - \mathbf{Z}(x)\|^2 \quad (18)$$

のように総誤差関数 ε を定義し、共役勾配法や遺伝的アルゴリズムなどの非線形最適化手法を用いてこれを最小化する手法である。ただしここで x を欠陥を特徴づけるパラメータとした。この場合、初期値などの条件が適当であれば常に妥当な結果を得ることが出来るという特徴があるものの、最適化の過程において数多くの反復計算が要求されるため、逆解析に要する計算時間は短いものではない。もう一つの手法は、数多くの既知データをもとにして欠陥形状-探傷信号間に存在する写像そのものを求め、逆解析のために用いるというものである。初期値依存性等の問題が少なく、また反復計算を要しないために瞬時の逆解析が行えると

いう長所があるものの、実際には写像を決定するために相当量のデータが必要となり、それらの選択には誤行錯誤的な面が強いという大きな欠点を有することが多い。

近年では、それまでのいわゆる人工欠陥から、自然欠陥へとその研究対象が変わりつつある。放電加工による人工欠陥が実際にプラント等で問題となる自然欠陥とかなり異なったものであるということは数多く指摘されており [20][21]、破面の接触による内部導電率の分布、複雑な境界形状などによって、自然欠陥の取り扱いはいさわめて困難なものとなっている。このような中、1999年には人工応力腐食割れ (Stress corrosion crack, SCC) や粒界内割れ (Inter granular attack, IGA) を対象としたラウンドロビンテストが実施され [19]、各国の研究機関によって測定および逆解析が行われたということは、大いに注目されるべきものである。

各種逆解析技術の詳細については他稿に譲るものとして、ここでは近年得られた逆解析結果の一例を Fig.4(a),(b) に示す [22]。これらは実機の蒸気発生器伝熱管に発生した自然欠陥の形状を、ニューラルネットワークを用いた逆解析技術を用いて探傷信号より求めたものであり、図中網掛けの領域が逆解析によって得られた欠陥形状を、太線が破壊試験の結果得られた真の欠陥形状を示している。欠陥がいずれも単独で存在しており、またいくつかの既知情報があったとはいえ、非常に良好な形状再構成結果が得られていることが確認できる。

ECT 逆問題解析では、放電加工による人工的な欠陥であればかなり複雑な形状のものであっても逆解析が可能となり、また自然欠陥の形状再構成もある程度可能となった。現在のところ最も大きな問題と見られているのが複数の欠陥が近接して存在する場合の取り扱いである。実機における自然欠陥は負荷の大きい箇所に集中して発生する傾向があるが、近接する複数欠陥からの信号は互いに干渉し、各々からの信号の単純な重ね合わせとはならないということが確認されている [23]。これまでの欠陥形状の逆解析においては、多くのものは単独の欠陥を対象とするか、もしくはそうでなくとも欠陥数をあらかじめ既知として解析を行っており、実際に数と形状の両者を未知として解析を行った例は少ない [24]。実際のところ、可能になったとはいえ逆解析技術に関しては依然として実験室レベルであるといわざるを得ず、今後実機適用可能な、より現実的な環境下での逆解析技術の確立が強く望まれている。

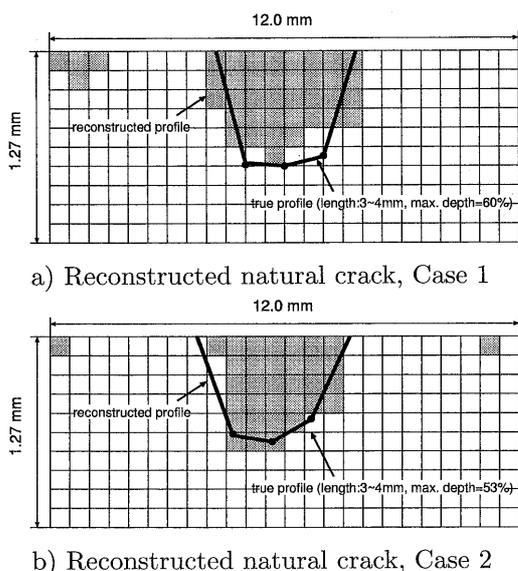


Fig. 4 Reconstructed profiles of natural cracks occurred in an actual steam generator tube.

5 まとめ

本稿においては、ECTの原理と順・逆問題解析手法についての概説を行った。ECTの解説として数値解析の観点から解説したが、実際には電気回路やプローブの設計、そしてノイズ低減のための各種信号処理などもECTにおいては欠かすことのできない技術であることをここに断っておきたい。また、ECTにはパルスECTやリモートフィールドECTなどの、やや亜種ともいえるものもあるのだが、これらについての解説も割愛させていただいた。

日本AEM学会は、学会創設初期から研究開発分科会を組織し、各種実験や数値解析手法の開発のみならず、ECT関連の研究論文データベースの作成、ベンチマーク問題の提案、そして電磁非破壊検査に関する国際ワークショップ(E'NDE Workshop)を通じての国際協力などを行うなどECTの高度化に多大な貢献を行ってきた。その具体的活動内容などについては次号以降の解説記事において紹介の予定である。

謝辞

本稿に掲載された研究結果の一部は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学会内に設けられた「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] 産業界における非破壊検査 I, 非破壊検査, Vol.50, No.3 (2001), pp.130-152.
- [2] 産業界における非破壊検査 II, 非破壊検査, Vol.50, No.4 (2001), pp.198-211.
- [3] D.J. Hagemaier, Eddy Current Standard Depth of Penetration, *Materials Evaluation*, Vol.43, No.11 (1985), pp.1438-1442.
- [4] R. Palanisamy and W. Lord, Finite element modeling of electromagnetic NDT phenomena, *IEEE trans. on Magn.*, Vol.15, No.6 (1979), pp.1479-1481.
- [5] J.C. Verite, A coil over a crack. (Results for benchmark problem 8 for TEAM workshop), *COMPEL*, Vol.9, No.3 (1990), pp.155-167.
- [6] T. Takagi, M. Hashimoto, F. 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*, 5 (1995), pp.149-162.
- [7] T. Takagi, M. Uesaka and K. Miya, Electromagnetic NDE research activities in JSAEM, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation*, IOS Press (1997), pp.9-16.
- [8] F. Matsuoka and A. Kameari, Calculation of three dimensional eddy current by FEM-BEM coupling method, *IEEE trans. on Magn.*, Vol.24, No.1 (1988), pp.182-185.
- [9] 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.
- [10] 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. on Magn.*, Vol.34, No.5 (1998), pp.2581-2584.
- [11] W. Cheng, K. Miya, K. Demachi and N. Yusa, Development of coupling FEM-BEM method for steam generator inspection, *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol.19(A), pp.433-440.
- [12] H. Huang, T. Takagi and H. Fukutomi, A novel crack reconstruction method for steam generator tube ECT with noise sources outside, *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol.19(A), pp.513-520.
- [13] T. Takagi and H. Fukutomi, Benchmark activities of eddy current testing for steam generator tubes, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation (IV)*, IOS Press (2000), pp.235-253.
- [14] 岡本, 武者, 逆問題とその解き方, オーム社, (1992).
- [15] L. Udpa, S. S. Udpa, Application of signal pro-

- cessing and pattern recongnithion techniques to inverse problems in NDE, *Int. J. of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 8 (1997), pp.99-117.
- [16] 福富, 高木, 谷, 小島, 辺要素有限要素法と TrustRegion 法を用いた渦電流におけるき裂深さの推定法, 非破壊検査, Vol.47, No.10 (1998), pp.233-240.
- [17] Z. Badics, Y. Matsumoto, S. Kojima, Y. Usui, K. Aoki, F. Nakayasu and A. Kurokawa, Rapid flaw reconstruction scheme for 3D inverse problem in eddy current NDE, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation*, IOS Press (1997), pp.303-309.
- [18] Z. Chen, K. Miya and M. Kurokawa, Rapid prediction of eddy current testing signals using $A-\phi$ method and database, *NDT&E International*, Vol.32 (1999), pp.29-36.
- [19] 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.
- [20] W. R. Randle, B. D. Woody, Caution about Simulated Cracks in Steel for Eddy Current Testing, *Material Evaluation*, (1989), pp.44-48.
- [21] Z. Badics, Y. Matsumoto, K. Aoki, F. Nakayasu, A. Kurokawa, Finite element models of stress corrosion cracks (SCC) in 3-D eddy current NDE problems, *Nondestructive testing of materials*, IOS Press (1995), pp.21-29.
- [22] N. Yusa, Z. Chen and K. Miya, Quantitative evaluation of natural crack in steam generator tube from eddy current signals, *Int. J. of Applied Electromagnetics and Mechanics*, (submitted).
- [23] B.P.C. Rao, C.B. Rao, T. Jayakumar and B. Raj, Simulation of eddy current signals from multiple defects, *NDT&E international*, Vol.29, No.5 (1996), pp.269-273.
- [24] R. Albanese, F. C. Morabito, A. Formisano, R. Martone, Multiple defect analysis via neuro-fuzzy approaches, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation(II)*, IOS Press (1998), pp.101-106.