

渦電流探傷技術 (ECT) の数値解析技術の開発

Development of Numerical Analysis for Eddy Current Testing

技 術 本 部 佐 竹 宏 次^{*1} 森 本 一 夫^{*2}

荒 木 保 夫^{*3}

エレクトロニクス事業部 森 村 弘 一^{*4}

神戸造船所 岩 橋 洋 一^{*5}

ECT は非接触で操作が簡単のため、軽水炉の蒸気発生器伝熱管の検査に広く使用されている。この ECT の高度化を目的とした新プローブ開発や検出信号評価に数値解析による支援が望まれている。本研究では伝熱管の ECT 解析が可能な軸対称解析ソフトと A-φ 法を用いた三次元の解析ソフトを開発した。また、解析が容易にでき、解析結果の管理及び検索ができるデータベース機能を有する解析システム (INSPECTOR=Integrated Numerical Analysis System to Perform Eddy Current Testing of Steam Generator) を開発し、解析作業が効率良く行える環境を作った。これによりプローブ開発や探傷信号分析の支援が可能となった。

A symmetrical and three-dimensional steady state eddy current analysis code was developed to improve eddy current testing (ECT) for steam generator tubes. This code is formulated by FEM-BEM coupling techniques, which eliminate the need for mesh regeneration of the tube domain for every movement of the probe. The calculations were carried out under various conditions including those for various types of probe, defect orientations, etc. Compared with the experimental data, it was shown that it was feasible for actual application. Furthermore, we have developed a total eddy current analysis system (INSPECTOR : Integrated Numerical Analysis System to Perform Eddy Current Testing of Steam Generator) which consists of an ECT calculation code, an automatic mesh generator for analysis, a data base and display software for the calculated results. This system makes it easier to develop an ECT probe and evaluate ECT signals.

1. ま え が き

渦電流探傷法 (Eddy Current Testing 以下 ECT と略す) は、取扱いが容易でかつ高速に検査できるため、軽水炉の蒸気発生器の伝熱管を始めとし、種々の熱交換器の検査に適用されている。検査に用いられるプローブは、欠陥の種類、欠陥方向、欠陥位置によって種々のものが必要である。また、検出性能の面についてもより微小な欠陥を検出できるプローブが要求されている。さらに、実際に実プラントの検査信号には、単に欠陥信号だけでなく、支持板や付着物等に起因する信号も一緒に検出されるため、その要因を推定して欠陥信号を抽出し、欠陥の大きさ推定を行う必要がある。このような要求に対し、新しいプローブの開発や、実プラントで検出された信号の分析を効率的に行うために、試作や実験の繰返しを行う代りに ECT の渦電流分布やコイルのインピーダンスを計算により求める数値解析技術の開発を行った。開発においては実機の状態を考えると、三次元解析が可能でかつ欠陥によるコイルのインピーダンス変化量は数分の 1 から数十分の 1 パーセントと極めてわずかであるため、高い精度の数値解析技術が必要となる。また、コイルの形は種々あり、内部に磁性体を含む等比較的複雑な構成となっている上に、プローブを移動したときのインピーダンス変化を求める必要がある。このため数値解析モデルが容易に作れることや、解析手順が簡単であることが不可欠である。しかし、従来二次元形状及び三次元形状の極めて簡単な形状については解析例はあるものの、実機で考えられる種々の状況に対応できるものは見られなかった。そこでこのような要求に基づき、主に伝熱管の ECT を対象に高精度の解析が行える数値解析技術及び簡単な手順で解析ができ、実データとの比較やデータの保管を容易にするための操作環境を実現する解析システム

(INSPECTOR : Integrated Numerical Analysis System to Perform Eddy Current Testing of Steam Generator と略す) を開発した。

2. 解 析 手 法

解析ソフトとしては、軸対称の問題が解ける解析ソフトと、三次元の任意の形状の解析が可能なソフトを開発した。

2. 1 基礎方程式

基礎方程式はマクスウェルの電磁方程式であるが、使用周波数が 1 MHz 以下と低いため、変位電流の項を省略した。以下に基礎式を示す。

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (3)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0 \quad (6)$$

ここで、 $\vec{H}$ は磁界、 $\vec{J}$ は電流密度、 $\vec{E}$ は電界、 $\vec{B}$ は磁束密度、 μ は透磁率、 σ は電気伝導度である。このとき、境界条件として、磁束密度及び電流密度の法線成分と、磁界の接線成分が連続である必要がある。これらの方程式を定式化し離散化する代表的な手法を表 1⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾ に示す。ECT を対象とした場合にはコイルを移動させながら解析する必要があるため、コイルと伝熱管を独立にモデリングできることが不可欠となる。このために、付着物や構造物等で複合的な材質となる伝熱管周囲は、有限要素法 (Finite Element Method 以下 FEM と略す) を適用しコイルを含む空間部は境界要素法 (Boundary Element Method 以下 BEM と

*1 基盤技術研究所基礎工学研究室 *4 技術情報・制御技術センター

*2 基盤技術研究所研究企画室主務 *5 原子力品質保証部主務

*3 高砂研究所電子技術研究室

表1 ECT 数値解析法の比較
Comparison of numerical analysis methods for ECT

手 法	概 要	適用性	計算時間	モデル作成	総合評価
T- Ω 法 (FEM)	電流ベクトルポテンシャル T ($J = \text{rot } T$) とスカラーポテンシャル Ω を変数とし、電流が流れる導体中は T , Ω を、空気中は Ω のみを用いて FEM で解析する。	×	△	×	×
T 法	変数として T を用いる。導体内は T を用いて FEM を適用する。空気中は導体表面上での方程式を与えて解析する方法。	×	△	◎	△
A- ϕ 法 (FEM)	ベクトルポテンシャル A とスカラーポテンシャル ϕ を変数とし、全領域を FEM で解析する方法。	○	○	×	○
A- ϕ 法 (FEM・BEM)	変数として A と ϕ を用いるが、空気領域に BEM を、他の部分に FEM を適用し、両方法を結合した方法。	○	△	◎	◎

評価レベル：×, △, ○, ◎の順に高い評価

略す)で扱った。一方、軸対称の場合は、軸対称形状の問題(例えばボビンコイルや全周減肉など)に限られるため、モデル全体を分割して解析するハンディは特にないため FEM のみで扱った。

2.2 数値解析方法

前述の基礎方程式を解く場合、ベクトルポテンシャル A ($\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$ によって定義される) 及びスカラーポテンシャル ϕ を用いることにより、式(5)は自動的に満足される。また ECT の場合には、交流定常状態であるため、時間微分は $j\omega$ に書き直しが可能である。ここで ω は角周波数である。これらを導入すると、式(1)~(4)から次式が導かれる。

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) = \sigma(j\omega \vec{A} + \nabla \phi) \quad (7)$$

また電界は以下のように表される

$$\vec{E} = -j\omega \vec{A} - \nabla \phi \quad (8)$$

また、式(6)は式(4), (8)を用いて以下のように表される。

$$\nabla \cdot \sigma(j\omega \vec{A} + \nabla \phi) = 0 \quad (9)$$

他方、電流源を含む領域では、空間一様で μ_0 を真空中の透磁率とすれば次式となる。

$$\frac{1}{\mu_0} \nabla^2 \vec{A} = -\vec{J} \quad (10)$$

FEM の定式化には、ガラキン法を用いた。式(7), (9)より次式が得られる。

$$[K] \begin{Bmatrix} \vec{A} \\ \phi \end{Bmatrix} = \{F\} \quad (11)$$

軸対称のケースについては上記 FEM の式のみを用いて A , ϕ を求める。しかし、三次元については前述のように BEM と FEM を組合せる。なお、BEM の定式化はグリーンの定理を用いて式(10)を境界積分方程式に変形し、離散化することにより次式が得られる。

$$[H] \{\vec{A}\} + [G] \left\{ \frac{\partial \vec{A}}{\partial n} \right\} = \{D\} \quad (12)$$

式(11), (12)を重ね合わせて、連立方程式を作り、これを解いて A と ϕ を求める。コイルインピーダンス Z は A 及びコイル駆動電流 I の値を用いて下式から計算される。

$$Z = \frac{j\omega \oint \vec{A} \cdot d\vec{l}}{I} \quad (13)$$

3. 解析結果の実験検証^{(5)~(7)}

開発した解析ソフトの解析精度を確認するために、ECT プローブにより伝熱管を検査するときに生じる渦電流を解析し、コイルインピーダンスを求め、実験値との比較を行った。

3.1 二次元軸対称形状に対する解析結果

ECT への数値解析の適用性を確認するために、まずボビンコイルにより軸対称状に発生する渦電流を計算した。全周減肉の場合について、解析により求めたインピーダンスの変化と実験値との比較を図1に示す。10%から75%にわたって解析値は実験と良く一致しており、わずかなインピーダンス変化も精度良く解析されていることが分かる。

次に支持板が伝熱管の外側にあるモデルの解析を実施した。この場合には、支持板の透磁率が高いため、支持板の表面に発生する渦電流の浸透深さは数十 μm と小さく、表面近くで渦電流密度が急激に変化する。したがって、FEM の要素として一次四辺形要素を用いた解析では精度が不十分なため、二次要素を用いて精度を上げた解析を行った。図2に渦電流分布の解析結果を示す。支持板の表面近くで渦電流が分布している状態が確認できる。またインピーダンス変化の解析値と実験値を比較したところ両者は良く一致しており、支持板の影響が十分な精度で解析できることが確認された。

次に、伝熱管外面に高導電性物質が付着したモデルについての

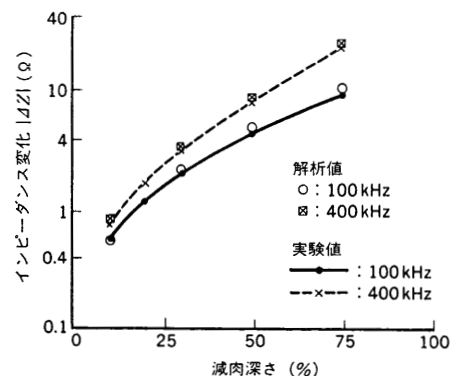


図1 減肉の解析結果と実験結果の比較
Comparison between calculated and experimental impedances for wall thinning

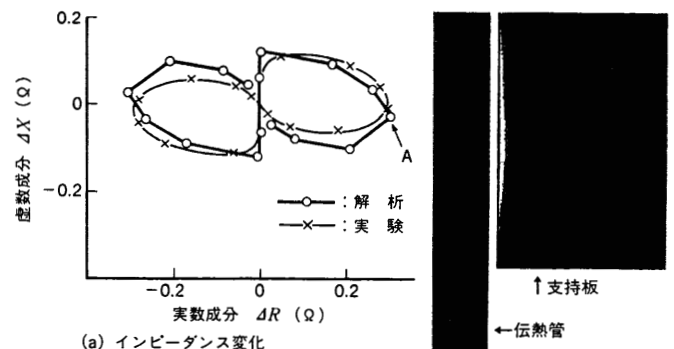


図2 支持板部を100 kHzで探傷した場合のインピーダンスの実験と解析の比較
Comparison between calculated and experimental impedances of bobbin coil for support plate portion at 100 kHz

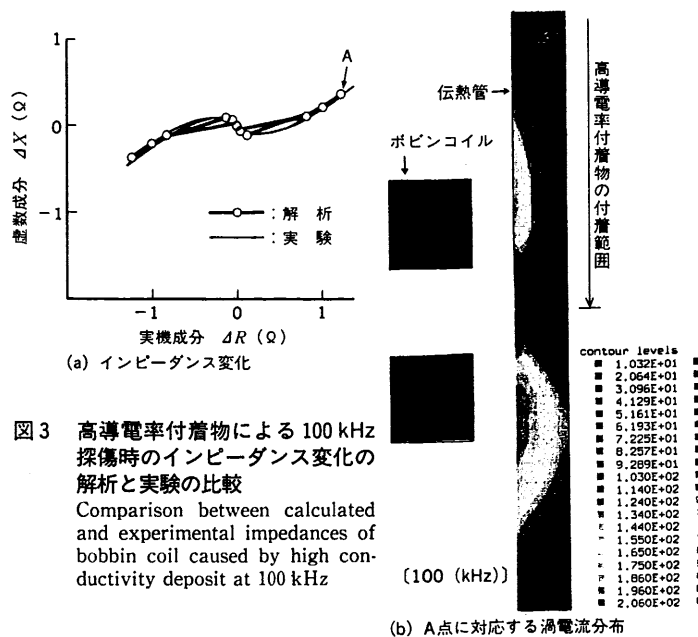


図3 高導電率付着物による100 kHz探傷時のインピーダンス変化の解析と実験の比較

Comparison between calculated and experimental impedances of bobbin coil caused by high conductivity deposit at 100 kHz

(100 (kHz))

(b) A点に対応する渦電流分布

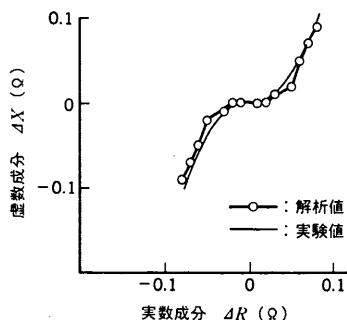


図4 ボビンコイルのインピーダンスの解析値と実験値の比較 (5 mm長さ 50 %深さの外面スリット, 探傷周波数 100 kHz)

Comparison between calculated and experimental bobbin coil impedances (5 mm long, 50% deep slit at outer surface, 100 kHz)

解析手法について検討した。この場合、付着物厚さは数 μm から数十 μm と伝熱管に比べると極めて小さく、探傷周波数が100 kHz程度の場合、渦電流の浸透深さは約200 μm となり、上記付着物中を流れる渦電流密度は深さ方向にほぼ一様と考えられる。そこで、付着物のある部分に厚みをもたない面電流が流れたと仮定し、対面する面要素に面電流を与えた。このような考え方に基づいて行った解析により得られた渦電流分布を図3に示す。この図より渦電流分布の乱れがよく分かる。また解析と実験により求めたインピーダンス変化の比較を行ったところ実験値と解析値は良く一致しており、このような解析法の妥当性が確認された。

3.2 三次元形状に対する解析結果

実機の伝熱管のECTを解析する場合、モデル形状が三次元となる場合が多い。そこで、三次元の解析コードを開発し実験値と比較し、解析機能を調べた。まず、最初に通常検査によく用いられているボビンコイルを用いて探傷する場合に適用した。解析により求めたインピーダンスと実験値とを比較したところ図4に示す。この図より解析結果は実験値と良く一致しており、十分な解析能力を有していることが分かる。

プローブの中にはコイルのほかに磁性体を含む場合もあるため、このようなケースに対し、プローブを含む範囲にもFEMを適用し、他の空気中の領域に対してはBEMを適用した手法を用いることとした。一例としてフェライトコアの周辺にコイルを巻いたプローブを用いて軸方向に走査し周方向欠陥を探傷する場合の解析を行った。解析及び実験により得たインピーダンス軌跡を図5(a)に示す。またインピーダンス軌跡のA点に対応する渦電

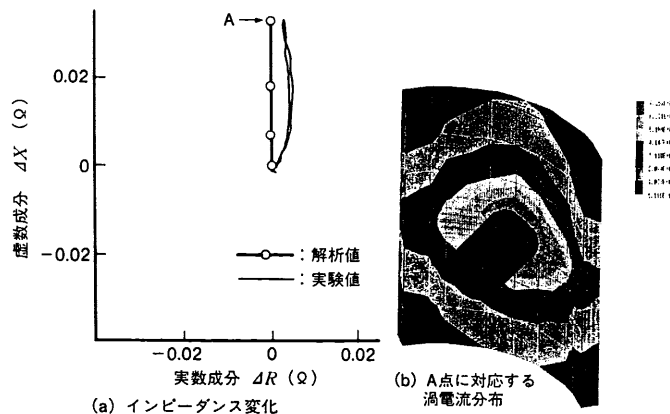


図5 特殊コイルのインピーダンスの解析結果と実験値の比較 (10 mm長さ 50 %深さの外面スリット, 探傷周波数 100 kHz)

Comparison between calculated and experimental special coil impedances (10 mm long, 50% deep circumferential slit 100 kHz)

流分布解析結果を図5(b)に示す。解析結果と実験結果との比較では、良く一致することが確かめられた。

以上の結果から、開発した解析ソフトは支持板や付着物等の影響や各種プローブへの適用等、伝熱管の欠陥をECTを用いて検出する場合を十分解析できる機能を有していることが確認された。

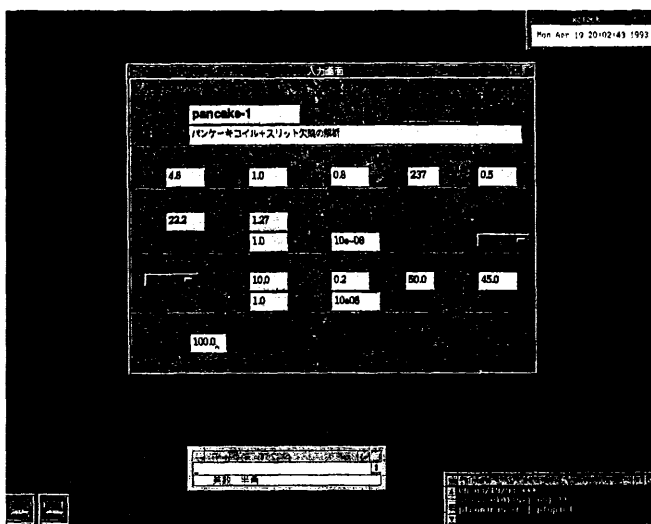
4. 解析システム

ECTによる伝熱管の探傷を解析するシステムの中心となる解析ソフトは、十分な能力を有することが確認された。しかし、プローブの開発や実際の供用期間中検査で得られる信号の要因推定に用いる場合には、簡単な操作で必要な解析結果を容易に得ることが要求される。このためにマンマシンインタフェースを含めた周辺のソフトの充実が必要である。すなわち、(1)解析に必要な入力データを要素分割や材料データ割付けや解析条件入力等手間のかかる作業を逐次行うことなく、容易に作成できること、(2)解析結果が直感的に把握できること、(3)解析結果等多量のデータを整理保管し、必要なときには直ちに取出すことができること等の機能を持ったシステムにする必要がある。これらの要求に対応するために一連の解析を計算機との対話形式で実施するECT解析システムを構築しINSPECTORと名付けた。

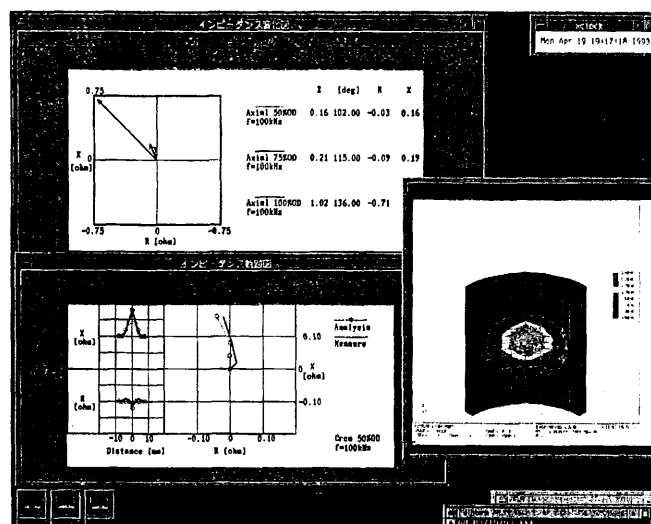
本システムは、高速(約26 MFLOPS)のエンジニアリングワークステーション(EWS)上で動作する。計算機としてEWSを用いた理由は、計算機を占有することができるため、待ち時間がなく、計算速度はスーパーコンピュータに劣るにもかかわらず、結果を得るまでの時間が短いことのためである。

本解析システムの機能は以下に示すとおりである。

- (1) 自動解析モデル生成機能 図6(a)に示す画面を用いて伝熱管及び欠陥に関する情報を入力すれば、自動メッシュ分割機能により解析入力データを作る。したがって、操作者は有限要素法の要素分割の方法等について知っておく必要はなく、容易に解析モデルの作成が可能である。
- (2) 可視化機能 マルチウィンドウを利用して図6(b)に示すようにインピーダンス変化、インピーダンス軌跡、渦電流分布等の解析結果のうち必要なデータを同時に表示できる。さらに、実験結果も重ね書きすることができ、解析結果と比較することにより、解析結果の評価が容易となる。
- (3) データベース機能 本システムは解析モデル、解析結果及び実測データをデータベースソフトが管理している。各々のデ



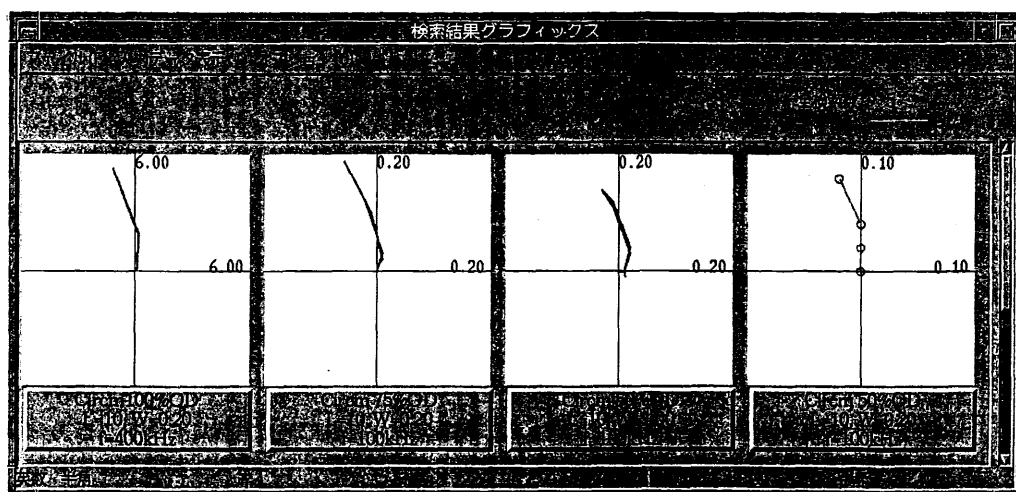
(a) 入力作業画面



(b) 結果の表示例

図6 入力作業画面及び結果の表示例

CRT display for input procedure and sample screen of displayed result

図7 特定位相を有するインピーダンス波形の検索結果表示例
CRT display of searched impedance with special phase

ータを取出す場合には、図6と同様の画面により探傷条件を入力することにより検索機能が作動し、対応するデータ又は、類似のデータが抽出される。このような機能を用いれば、特に解析時間のかかる三次元解析の場合にも、過去の同一又は類似した解析結果を直ちに抽出でき、重複することがなくなり、トータルの解析時間を短縮できる。また、ある特定の信号波形の要因分析には図7に示すように類似信号の波形パターンの検索も可能であり、要因推定を支援することができる。

5. 結 論

伝熱管のECT検査の解析を行うことができる軸対称及び三次元の解析ソフトを開発し、実験との比較を行い実際に想定される条件及びコイル形状の解析に適用できることを確認した。また、解析が容易にでき解析結果も管理及び検索ができるデータベースの種々の表示機能を有する解析システム (INSPECTOR) を開発し、解析作業が効率良く行える環境を作った。これによりECTプローブの開発や探傷信号の分析の支援が可能となった。

謝 辞

本解析ソフトの開発に当たり、御指導頂きました東京大学工

部付属原子力工学研究施設の宮 健三教授に心より感謝致します。

参 考 文 献

- (1) 中田高義ほか、T-Q法を用いた非線形三次元渦電流問題の解析法、Paper of Technical Meeting of Rotating and Machinery and Static Apparatus Vol.RM-8 6-40 SA-86-33 (1986) p.149~157
- (2) 宮 健三ほか、3次元渦電流解析手法T法の理論的背景について、SA-87-40, RM 87-77, (1987), p.47~56
- (3) Ida, N. et al., A Finite Element for Three-dimensional Eddy Current NDT Phenomena, IEEE MAG-21 No. 6 (1985)
- (4) Matsuoka, F., Calculation of Three Dimensional Eddy Current by FEM-BEM Coupling Method, Proc. IUTAM (1987)
- (5) Satake, K. et al., Three-dimensional Analysis on Eddy Current Testing for S/G tubes, IEEE Trans. on MAG Vol. 28 (1992) p.1 466~1 468
- (6) 森本一夫ほか、ECT理論解析技術の開発、非破壊検査協会春季大会予稿 (1993)
- (7) 佐竹宏次ほか、ECT理論解析技術の開発 (その2)、非破壊検査協会秋季大会予稿 (1993)