境界要素法論文集 Vol. 21 (2004 年 12 月), 論文 No. 03-040923 JASCOME

境界要素・有限要素併用法を用いた渦電流探傷法による自然き裂の同定手法

A Crack Shape Reconstruction using Finite and Boundary Element Method arising in Eddy Current Testing

小島 史男 [1), 河合 信弘 [2)]

Fumio KOJIMA, Nobuhiro KAWAI

1) 神戸大学自然科学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1, E-mail: kojima@cs.kobe-u.ac.jp)
2) 神戸大学自然科学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1, E-mail: nobuhiro@buna.fan.scitec.kobe-u.ac.jp)

This paper is concerned with a computational method for sizing a natural crack of SUS sample used in a boiled water pressure type of nuclear power plants. Measurements can be made by transmitter-receiver coil probe with the use of a conventional eddy current technique. The crack signals can be detected as induced currents of the receiver coil. We formulate the mathematical notation of the eddy current testing in three dimensions and develop the numerical code by applying the hybrid use of boundary and finite element method. Natural cracks are approximated by a finite number of EDM cracks and the related forward analysis can be implemented by our developed code. Finally, a parameter estimation technique is proposed for sizing each of those EDM cracks using genetic algorithm. The results of computational experiments with the laboratory data are summarized in the last section.

Key Words: Inverse problem, nondestructive testing, hybrid use of finite and boundary element method, evolutionary computation

1. はじめに

近年沸騰水型原子炉における炉内構造物（シュラウド）や再循環系配管においてひび割れや減肉が多数報告され、その検査・補修が緊急の課題となっている．プラントを安全に運転するためには欠陥の検出技術だけでなく，欠陥がプラントの安全面に及ぼす影響を定量的に評価するための高精度なサイジング技術が必須となってきている．本研究では渦電流探傷法により取得された２次元磁気イメージを用いて，ステンレス系平板の自然き裂のサイジングを行う進化計算手法の提案を行い，実験データによりその有効性を検証する．シュラウド等に発生する応力腐食割れは表面から多数の枝分かれが生じており、それに起因して深さ方向のサイジングは困難な問題となっている。筆者らはすでに加圧水型原子炉の蒸気発生器伝熱管のきず検知に関して、逆問題解析による高精度な渦電流探傷の開発をおこなってきた[1,2,3,4]。本論文では、これらの手法をステンレス系材料システムの自然欠陥検知に応用する。

逆問題解析手法によるクラックの形状同定は幾何学的形状の複雑さに伴う問題の可解性とともに、膨大な計算処理時間の短縮化などが実用化のボトルネックとなっている。ここでは、応力腐食割れ、疲労き裂などの典型的な自然き裂の態様を、位置、深さ、長さの異なる複数の単一欠陥の集合により近似する。自然き裂のモデル化により、これまでに開発した渦電流探傷シミュレータが直接適用可能となる。しかしながら、自然き裂の複数単一欠陥による逆問題解析は、推定すべきパラメータの次元を増大させることとなり、従来の順解析計算法を直接用いて推定計算を適用すれば、実用的でない計算処理時間が必要となる。本論文では、実際の検査環境条件を考慮した渦電流探傷シミュレーションを実施し、深さ、長さの異なる単一き裂に関する２次元磁気探傷イメージのデータベースを構築した。各き裂の位置を起点とした磁気イメージの重ね合わせにより、複数き裂の合成イメージを作成し、この仮想磁気イメージと実際に計測された磁気イメージとのパターンマッチングを行うことにより、もっとも可能性の高い立体き裂形状の復元を実現する計算アルゴリズムを開発した。磁気イメージのマッチングには定常遺伝的アルゴリズム(SSGA) をもちいた。

２節では、まず検査環境の数学的記述に従い、単一き裂に関する２次元磁気イメージを求めるための計算手法について述べる。検査プローブのデータ取得法に適用度の高い境界

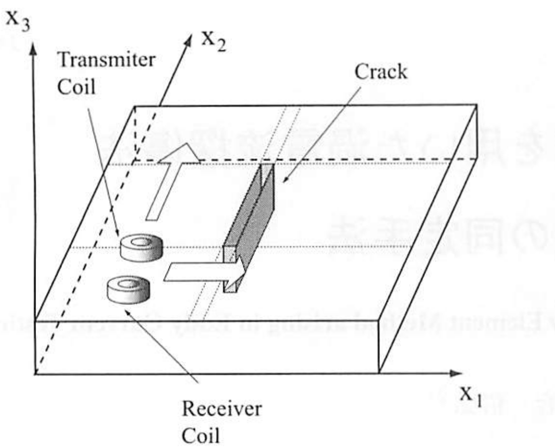


Fig. 1　Sample material and measurement technique

要素・有限要素併用法にもとづく検査モデルの構造について述べる。続く3節においては、自然き裂のモデリングに言及し、複数き裂による仮想イメージの合成法を提案し、その有効性を実験データとの比較により検証する。4節では、遺伝的アルゴリズムによる逆解析手法を提案する。き裂形状の探索空間および、それに伴うデータベースの構築法を述べ、次節では、実験データによる有効性の検証を行う。

2. 検査環境と数値解析モデル

Fig. 1 に今回対象とした試験材料とその検査方法の概略図を表す．試験材はシュラウドに使用されている SUS304 材による平板とし、その中央には放電加工による模擬欠陥 (以下 EDM スリット) があると仮定してモデルを構築する。検査プローブは多数のチャンネルを有する微小コイルが配置できるものとし、任意の2個のコイルを受信、発信コイルとして選択できる構造を考える。Fig. 1 では2個のコイルの一方が励磁（発信）コイル他の1個が検出（受信）コイルである。一般的に用いられる渦電流解析の数学モデルは，Maxwll 方程式から導かれる空間三次元の磁気ベクトルポテンシャル $\mathbf{A}$ と電気スカラポテンシャル ϕ の連成式により記述できる [1]。Fig. 1 の試験材の内部を3次元ユークリッド空間の有界領域 V とする。領域 V の近接位置に配置した励磁コイルに交流電流を印加したとき、その近接空気領域 $(R^3 - \bar{V})$ における磁気ベクトルポテンシャルは次のポアソンの方程式に従う。

$$-\frac{1}{\mu_0}\nabla^2 \boldsymbol{A} = \boldsymbol{J}_s \quad \text{in } R^3 - \bar{V} \tag{1}$$

μ_0 は真空中の透磁率を, また $\mathbf{J}_s$ は励磁コイルに印加する交流の励磁電流密度ベクトルをあらわす。一方非磁性導体である SUS 試験材の磁気ベクトルポテンシャル $\mathbf{A}$ は電気スカラポテンシャル ϕ を補助変数として以下の式で与えられる。

$$-\frac{1}{\mu_0}\nabla^2 \boldsymbol{A} + j\omega\sigma(\boldsymbol{A} + \nabla\Phi) = 0 \tag{2}$$

$$\nabla \cdot j\omega\sigma(\boldsymbol{A} + \nabla\Phi) = 0 \quad \text{in} \quad V \tag{3}$$

σ は試験材の導電率、ω は励磁コイルの交流電流の角周波数、Φ は電気スカラーポテンシャル ϕ の時間微分である。連成式 (1-3) の解 $\{\mathbf{A}, \Phi\}$ から試験材内部で発生する渦電流 $\boldsymbol{J}_e$ は

$$\boldsymbol{J}_e = -j\omega\sigma(\boldsymbol{A} + \nabla\Phi) \tag{4}$$

で求めることができる。発生した渦電流による受信コイルの磁気ベクトルポテンシャルはビオ・サバールの公式から

$$\boldsymbol{A}_c(r) = \frac{\mu_0}{4\pi}\int_V \frac{\boldsymbol{J}_e(r')}{|r - r'|}dV(r') \tag{5}$$

で与えられる。r および r' はフイールド点およびソース点を意味する3次元空間上の位置ベクトルである。結局、受信コイルの誘起電圧は次式で与えられる。

$$Z \propto -j\omega N_t \oint_C \boldsymbol{A}_c \cdot d\boldsymbol{l} \tag{6}$$

ここで N_t は受信コイルの巻き数である。実際の検出信号は、き裂の存在するときの信号 Z^c とき裂の存在しないときの信号 Z^0 との差,

$$\Delta Z = Z^c - Z^0 \tag{7}$$

を検出信号として取り扱う。Fig. 1 で示すように、以上の受発信コイルを平面的にスキャンすることにより2次元の仮想磁気イメージパターン

$$\Delta Z_{lm} = \Delta Z(x_1^l, x_2^m, \bar{x}_3) \quad \text{for} \quad l = 1, 2, \cdots, L \quad m = 1, 2, \cdots, M \tag{8}$$

が計算できる。ただし、$(x_1^l, x_2^l, \bar{x}_3)$ は測定点の位置を表示している。

連成方程式 (1-3) は試験材が三次元空間上の閉領域，励磁コイルを含めた空気領域が開領域となっているので，導体領域では有限要素法，空気領域で境界要素法を適用するいわゆる境界要素・有限要素併用法を順問題解析に採用する [5]．Fig. 2 に示すように、有限要素および境界要素分割を

$$V = \bigcup_{e=1}^{N} V_e \qquad S = \bigcup_{e=1}^{N^b} S_e \tag{9}$$

とする．磁気ベクトルポテンシャル及び電気スカラポテンシャルの時間微分をおのおの次のように近似する．

$$\boldsymbol{A} = [N]^T[\{A_{x_1}^e\}, \{A_{x_2}^e\}, \{A_{x_3}^e\}]^T$$

$$\Phi = [N]^T\{\Phi^e\}$$

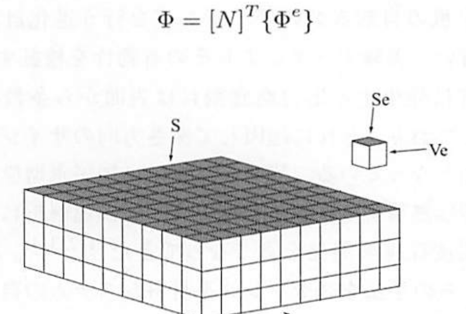


Fig. 2　Hybrid use of FEM and BEM

ここで N は導体領域(試験材料)の有限要素基底関数のベクトルである．簡単のため　係数ベクトル $\{A_d\}$ および $\{\Phi_d\}$ をそれぞれ次のように表記する．

$$\{A_d\} = \{A^e_{x_1}, A^e_{x_2}, A^e_{x_3}\}^T, \quad \{\Phi_d\} = \{\Phi^e\}^T$$

境界要素-有限要素併用法により，式(1-3)は，次の代数方程式に帰着される，

$$([P] + [Q])\{\{A_d\}, \{\Phi_d\}\}^T = \{F\} \tag{10}$$

ここで，L は，次の有限要素行列である．

$$[P] = \begin{bmatrix} [P_1] & 0 & 0 & [P_{21}] \\ 0 & [P_1] & 0 & [P_{22}] \\ 0 & 0 & [P_1] & [P_{23}] \\ [P_{21}]^T & [P_{22}]^T & [P_{23}]^T & [P_3]^T \end{bmatrix} \tag{11}$$

$$[P_1] = \frac{1}{\mu_0}\sum_{e=1}^{N_h}\int_{V_e}\{\nabla[N]\nabla[N]^T + \sigma j\omega[N][N]^T\}dV_e \tag{12}$$

$$[P_{2k}] = \sigma j\omega\sum_{e=1}^{N_h}\int_{V_e}[N]\frac{\partial[N]^T}{\partial x_k}dV_e \quad (k = 1,2,3) \tag{13}$$

$$[P_3] = \mu_0\sigma j\omega[L_1] \tag{14}$$

上式中の N_h は試験材料中の有限要素接点の総数を表す．またマトリックス $[Q]$ は空気領域から見た境界要素積分に関する係数行列であり，次のように与えられる．

$$[Q] = \begin{bmatrix} [Q_0] & 0 & 0 \\ 0 & [Q_0] & 0 \\ 0 & 0 & [Q_0] \end{bmatrix},$$

$$[Q_0] = \frac{1}{2}\{[R][G]^{-1}[H] + ([R][G]^{-1}[H])^T\} \tag{15}$$

$$[G] = \frac{1}{\mu_0}\sum_{e=1}^{N_h^b}\int_{S_e}[U^*]\left[\frac{\partial N}{\partial n}|_{S_e}\right]^T dS_e \tag{16}$$

$$[H] = \frac{1}{\mu_0}\sum_{e=1}^{N_h^b}\int_{S_e}\left[\frac{\partial U^*}{\partial n}\right][N|_{S_e}]^T dS_e \tag{17}$$

$$[R] = \frac{1}{\mu_0}\sum_{e=1}^{N_h^b}\int_{S_e}[N|_{S_e}][N|_{S_e}]^T dS_e \tag{18}$$

である．上式中の N_h^b は試験材料面の境界要素接点の総数である。この問題における境界要素の基本解は，式(1)より，

$$u^*(r, r') = \frac{1}{4\pi|r - r'|} \tag{19}$$

で与えられる．したがって，試験材料表面の境界要素接点の位置座標を r_i とすると，式(16), (17)中のベクトル $[U^*]$ 及び $[\frac{\partial U^*}{\partial n}]$ の i 番目の要素はおのおの

$$[U^*]_i = u^*(r, r') \quad r' \in S_e \tag{20}$$

$$\left[\frac{\partial U^*}{\partial n}\right]_i = \frac{\partial u^*}{\partial n}(r, r') \quad r' \in S_e \tag{21}$$

となる．また式(10)の右辺の要素ベクトルは

$$\{F\} = [R][G]^{-1}[\{F_{x_1}\}, \{F_{x_2}\}, \{F_{x_3}\}]^T \tag{22}$$

$$\{F_{x_k}\} = \sum_{e=1}^{Mc}\int_{V_e^c}[U_c^*]J_{x_k}dV_e^c \quad (k = 1,2,3) \tag{23}$$

で記述される．ここで V_e^c は発信コイルの有限要素分割(要素数 M_c)である．また $[U_c^*]$ は

$$[U_c^*]_i = u^*(r_i, r') \quad r' \in V_e^c \tag{24}$$

である．ただし，r_i は境界要素の節点座標である．$N \times M$ の測定点における発信コイルの位置座標を $(v_1^i, v_2^j, \overline{v}_3)$ で与えるとすれば、要素ベクトルは、この測定点と試験材の相対位置ごとに計算できる。したがって、検出信号はこの測定点ごとに式(10)を解き、以下の操作により検出信号を計算することができる。

$$([P] + [Q])\{\{A_d\}, \{\Phi_d\}\}^T = \{F\}(v_1^i, v_2^j, \overline{v}_3) \tag{25}$$

$$Z_{ij} = [C]\{\{A_d\}, \{\Phi_d\}\}^T(v_1^i, v_2^j, \overline{v}_3). \tag{26}$$

上式のマトリクス C は発信コイルの有限要素分割は式(5)および(6)の有限近似によって決定される補間マトリクスである。

3. き裂モデルと順問題解析

本節では前章で述べた境界要素・有限要素併用法による順解析シミュレーションについて検証する．実験データは(株)日立製作所で実施された計測結果を使用して行った．実験に用いた試験材料は板厚 10.0mm の SUS304 材(導電率 $\sigma = 1.39 \times 10^6$S/m, 透磁率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m)である．Fig. 3 のように、この材料中心部分に放電加工による，深さ 2.0mm, 幅 0.3mm，長さ 10.0mm の矩形の EDM スリットが付与されている．この実験で用いたコイルのサイズは Fig.4 に示す．コイルの巻き数は $(N_t =)$520 ターンであり、実験においては $(\omega/2000\pi =)$20kHz, $(I =)$1.0[A] の交流電流を用いた．シミュレーションにおいては、このき裂を包含する有限要素の導電率をゼロとすることで、き裂に対応する仮想イメージを作成する。き裂の直上をき裂に垂直にコイルが移動した際の実験データとモデル出力との比較を Fig.5 に示す．試験材料に複数個のき裂が存在する順解析モデルを解く場合，有限要素の節点数が多くなることにより計算時間が非常に膨大になる．本論文では、単一き裂の順解析モデル出力を個々のき

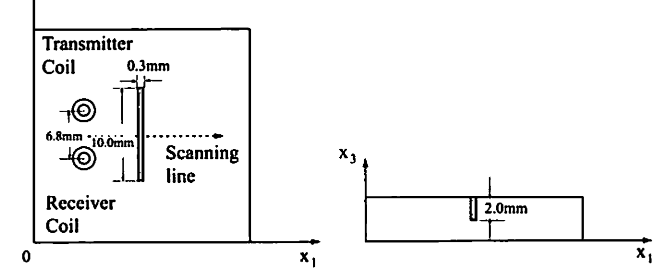


Fig.3　Sample material with single crack

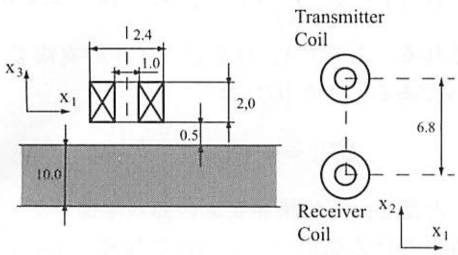


Fig.4　Coil used in the expreiments

裂位置に重ね合わせることでモデル出力を計算する．この有効性を確かめるため Fig.6 のような，幅 0.3mm，長さ 5.0mm で深さのみ異なる矩形の EDM スリットがき裂間隔 3.0mm で等間隔に並んでいる試験材を作成し、測定データと重ね合わせによる仮想イメージを比較検討した。Fig. 7 はき裂中央直上を Fig. 6 のように試験材コイルが移動した際の実験データとモデル出力を示したものである．Fig. 8 は対応する 2 次元の測定イメージとシミュレータの仮想イメージを比較している。以上の結果から境界要素・有限要素併用法によるシミュレーションで得られたモデル信号が実験で得られた検査信号と比較して十分な精度が得られていることがわかる．次節では、この順解析コードを用いたクラックの立体形状復元手法について考察する。

4. 複数き裂の立体形状復元

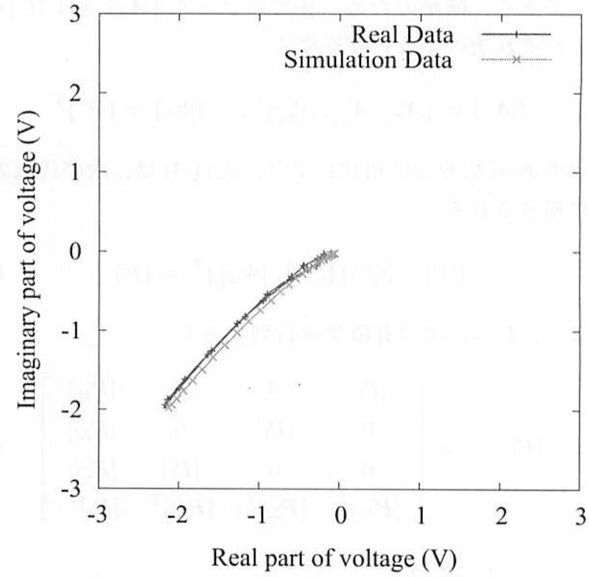
本節では，コイルの検出信号の変化 $\Delta\boldsymbol{Z}$ に関する出力情報から，試験材料に関する欠陥の立体的な幾何学情報を復元する逆解析手法を提案する．前節までの結果をもとに、遺伝的アルゴリズムを適用するための欠陥情報のコーディングをおこなう。Fig.9 で示すように，自然き裂は複数の矩形状の単一き裂の集合で近似できるものと仮定する。各き裂の欠陥幅 c_w と x_1 方向の位置 c_p があらかじめ特定されているものとすると，欠陥の形状はき裂に関する x_2 方向の始点 q^0，き裂長さ q^1，き裂深さ q^2 の三つのパラメータ $\boldsymbol{q}=(q^0,q^1,q^2)$ により表現することができる．このようにして自然き裂の i 番目の解候補をき裂の個数 K のパラメータベクトル $\boldsymbol{q}_i$

$$\begin{aligned}\boldsymbol{q}_i &= (\boldsymbol{q}_{i1},\cdots,\boldsymbol{q}_{iK}) \\ &= (q_{i1}^0,q_{i1}^1,q_{i1}^2;\cdots;q_{iK}^0,q_{iK}^1,q_{iK}^2)\end{aligned} \tag{27}$$

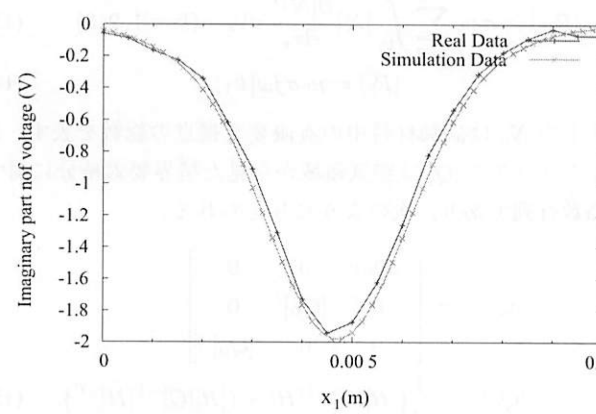
で記述する．Fig.9 にその一例を示す。き裂形状 (27) を含む有限要素の導電率をゼロとした導電率ベクトル $\sigma(\boldsymbol{q}_{ik})(k=1,\cdots,K)$ を数値解析モデル (26) に適用することにより、モデル出力の重ね合わせ

$$\Delta Z_{lm}(\sigma(\boldsymbol{q}_i)) = \sum_{k=1}^{K}\left([H]\{\{A_d\},\{\Phi_d\}\}^T - Z_{lm}^0\right)(v_1^l,v_2^m,\overline{v}_3) \tag{28}$$

により、仮想イメージを求めることができる。ただし Z_{lm}^0 はきずがない場合における仮想イメージとする。発信コイルを特定の角周波数 ω で励磁すると，二次元測定イメージ



(a) Lissajous



(b) Imaginary part

Fig.5　Real data and model output for the single crack

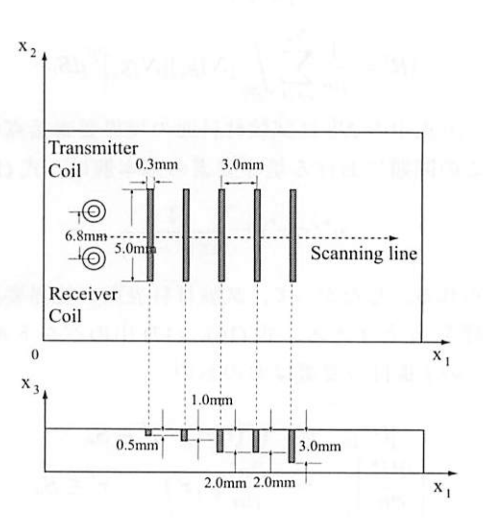


Fig.6　Sample with multiple cracks

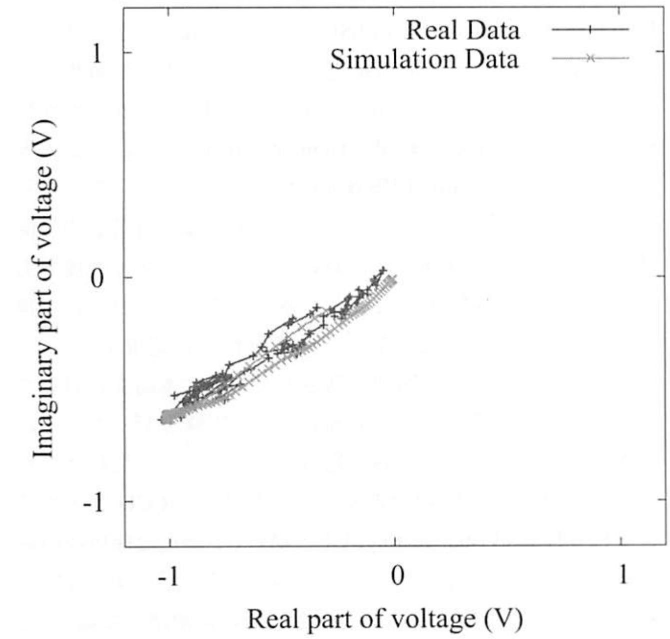
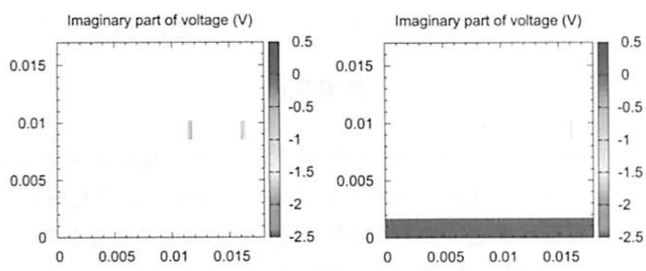


Fig. 7　Real data and model output for multiple cracks (Lissajous)



(a) Measurement image　　(b) Virtual image

Fig. 8　2D magnetic image

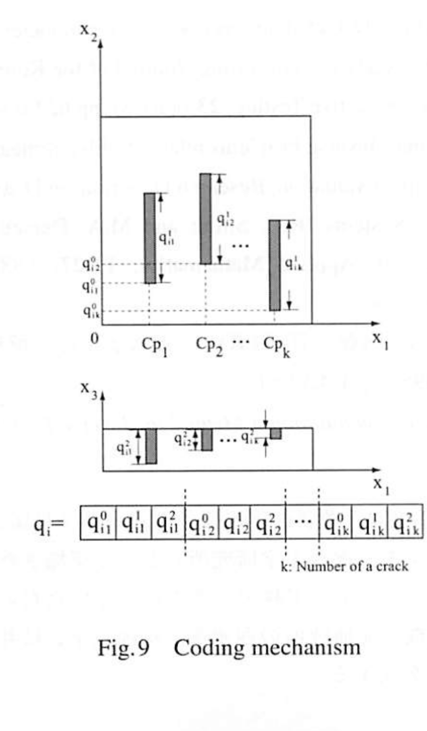


Fig. 9　Coding mechanism

$\{\Delta Z^d_{lm}\}^{L,M}_{l=1,m=1}$ が収集され、同時に解候補遺伝子固体 $\boldsymbol{q}_i$ に対応するモデル出力 $\{\Delta Z_{lm}(\boldsymbol{q}_i)\}^{L,M}_{l=1,m=1}$ が式 (28) により計算される．この遺伝子固体 $\boldsymbol{q}_i$ の環境適応度は，イメージ間の距離

$$fitness_i = \sum_{l=1}^{L}\sum_{m=1}^{M}\frac{1}{\rho_{lm}}|\Delta Z_{lm}(\boldsymbol{q}_i) - \Delta Z^d_{lm}|^2 \qquad (29)$$

によって評価できる．本研究では，GA の世代交代モデルとして定常状態 GA(SSGA) を採用する [6]。これは 1 世代においてランダムに選ばれた 2 個体に対し，交叉，突然変異を行い個体群中で最も適応度の低いものを削除し、適応度の高い解候補を抽出していき、最終世代における最良個体から複数クラックの立体復元を行う手法である。

5. 計算実験とその結果

本節では，前節で提案した示した非破壊検査に SSGA を適用した計算機シミュレーション実験の結果を示す．実験データの取得および実験に用いた試験材は 3 の Fig. 6 と同じである。逆解析実験においては、深さおよび長さの異なる 5 個の人工き裂 (EDM Crack) を等間隔

$$\text{Case 1} : 3.0mm, \quad \text{Case 2} : 2.0mm, \quad \text{Case 3} : 1.0mm$$

で作成した 3 種類の試験材により実施した。インピーダンス変化は x_1 方向に 0.2mm 間隔で ($L=$)91 点，x_2 方向に 1.7mm 間隔で ($M=$)11 点測定した．き裂の幅 c_w は全て 0.3mm とし、($K=$)5 個のき裂の形状パラメータ $\boldsymbol{q}$ を推定し、き裂の近接した 3 つの場合 (Case 1,2,3) の場合について各き裂の形状推定を行った．個々のき裂の形状パラメータ (q^0, q^1, q^2) は有限要素の分割の仕方に依存した離散値をとり，各パラメータの許容集合は，

$$\begin{aligned} q^0 &= \{0.0000, 0.0017, 0.0034, 0.0051, 0.0068, \\ &\quad 0.0085, 0.0102\} \qquad (30) \\ q^1 &= \{0.0017, 0.0034, 0.0051, 0.0068, 0.0085, 0.0102\} \\ q^2 &= \{0.0005, 0.0010, 0.0020, 0.0030, 0.0050\} \end{aligned}$$

とした．解候補のモデル出力に関するデータベースは上記のパラメータおよび測定条件（スキャニング方向、励磁周波数）の組み合わせのもとで構築した。実験で用いた SSGA における遺伝子個体数，世代数，交叉率，及び突然変異率は Table 1 にまとめる。使用計算機は CPU が Celelon $1.3GHz$、使用メモリーは $512MB$、オペレーテイングシステムは Linux OS(Fedora core 2)、プログラムは gcc(Version 3.3.1) のコンパイラを使用した。この計算に要した時間は Case 3 の場合で 8 分 13 秒であった。ここでは、Case-1, Case-2 および Case3 における真の形状と推定結果を Table 2 に示す．Table において記号 “*” は誤った推定値を求めており括弧内に対応する真値を示している。

Table 1. Control parameters used in SSGA

Number of generation	1000
Number of gene population	100
Cross over rate	0.5
Mutation rate	0.05

Table 2. Estimated parameter values

Case 1			
Index	q^0	q^1	q^2
$k=1$	0.0068	0.0051	0.0005
$k=2$	*0.0051 (0.0068)	*0.0085 (0.0050)	0.0010
$k=3$	0.0068	0.0050	0.0020
$k=4$	0.0068	0.0050	0.0030
$k=5$	0.0068	0.0050	0.0030
Case 2			
Index	q^0	q^1	q^2
$k=1$	0.0068	0.0051	0.0005
$k=2$	0.0068	*0.0068 (0.0050)	0.0010
$k=3$	0.0068	*0.0068 (0.0050)	0.0020
$k=4$	0.0068	0.0051	*0.0020 (0.0030)
$k=5$	0.0068	0.0051	*0.0030 (0.0030)
Case 3			
Index	q^0	q^1	q^2
$k=1$	0.0068	0.0051	*0.0010 (0.0005)
$k=2$	*0.0051 (0.0068)	*0.0068 (0.0050)	0.0010
$k=3$	0.0068	0.0051	*0.0010 (0.0020)
$k=4$	0.0068	*0.0034 (0.0050)	*0.0020 (0.0030)
$k=5$	0.0068	0.0051	*0.0020 (0.0030)

6. おわりに

沸騰水型原子炉材料であるステンレス系材料の自然き裂のサイジングに関する計算手法を提案した。3次元の有限要素・境界要素併用法を渦電流探傷の検査モデルに適用し、受発信コイルより取得される2次元イメージのモデル出力の計算法を与えた。提案した手法は自然き裂のモデルを位置、長さ、深さの異なる単一の人工模擬欠陥 (EDM き裂) の集合で与え、また複数き裂の計算には、これら単一欠陥の出力の重ね合わせにより求める高速解法を採用した。実験データとの比較によりこの手法の妥当性を検証した。この順解析手法を援用し遺伝的アルゴリズム SSGA を用いた複数き裂のサイジングをおこなった。欠陥の推定計算に必要となる順解析データはデータベースとして事前に保存し、測定データとの比較検証に用いた。実験の結果、1mm 間隔 (Case 3) で誤差が大きくなっているが、2mm 間隔 (Case 2) では、1つの欠陥をのぞいてほぼ良好に推定できていることがわかる。計算処理時間はローエンドの計算機環境において約2分から8分程度であり、十分な高速性能を得たことが確認できた。なおここで提案した計算手法を疲労き裂、応力腐食割れに適用するには、いくつかの解決すべき問題が残されている。本論文においては、き裂開口幅を一定 (0.3mm) として実験を行った。これは人工き裂の製作上の限界に起因しているが、き裂幅と信号との相関は重要な問題である。通常検査は、CCD カメラによる視覚検査 (Visual Testing, VT と略称) と渦電流探傷法の組み合わせにより実施されており、き列幅が大きい場合には、VT 検査のみで十分である。一方き列開口幅が微小な場合は、現状では実験による検証が困難であり、0.3mm 以下の開口幅をもつき裂に関しては幅に相当する導電率の変化により検出性能を向上させる方策について検討中である。また応力腐食割れで問題となっているき裂深さの方向性については、これを鋭敏に検出可能な解析手法に関して研究を進めている。

参考文献

(1) 小島史男, 岡本十蔵, 大野泰彦：有限要素境界要素併用法を用いた電磁場逆解析による蒸気発生器細管材料のき裂形状推定に関する計算手法、日本機械学会論文集（C編）, **63**-612(1997), pp. 2650-2656.

(2) 小島史男, 久保田直行, 谷口勝久: 簡略化ファジイ推論を用いた原子炉蒸気細管内のき裂深さ推定に関する推定手法, 日本機械学会論文集（C編）, **65**-637(1999), pp. 3614-3620.

(3) F. Kojima : Defect shape recovering by parameter estimation arising in eddy current testing, Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, **23**-6(2003), pp.622-634.

(4) F. Kojima : Inverse Problems related to Electromagnetic Nondestructive Evaluation, Research Directions in Distributed Parameter Systems (R.C. Smith and M.A. Demetriou Eds.), Frontiers in Applied Mathematics, **FR27**, (2003) SIAM Philaderphia.

(5) 坪内　始, 内藤　督 (編著): 実践数値電磁界解析法, 養賢堂, (1995), pp.1-4,57-61.

(6) C. Vogel, *Computational Method for Inverse Problem*, SIAM (2003).

謝辞：本論文は「革新的実用原子力技術開発提案公募事業」((財) エネルギー総合工学研究所) として実施された技術開発の一部である。また実験データの提供をいただいた日立製作所電力電機開発研究所の西水亮、小池正浩、松井哲也氏に深甚の謝意を表する。