

# 電磁非破壊検査に関する進化計算を用いた 自然き裂モデルによる定量評価について

## QUANTITATIVE EVALUATION BY NATURAL CRACKING MODEL ARISING IN ELECTROMAGNETIC NONDESTRUCTIVE TESTING USING EVOLUTIONARY COMPUTATION

小島 史男、河合 信弘

Fumio KOJIMA and Nobuhiro KAWAI

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)

This paper is concerned with a computational method for recovering natural crack shape of the shroud of nuclear power plants. An advanced eddy current testing (ECT) is used for inspecting real cracks, such as stress corrosion cracks. Our aim is at identifying geometrical structures of cracks by combining inverse analyses with the advanced measurement techniques. A method for recovering three-dimensional crack structures is proposed with the aid of database of virtual images and with the use of evolutionary computations. The effectiveness and validity of this proposed method are demonstrated through the computational experiment using measurement data.

**Key Words:** Inverse analysis, Nondestructive evaluation, Identification, Genetic algorithm, Eddy current testing, Electromagnetics

### 1. はじめに

原子力発電プラントの高経年化に伴い、最近、沸騰水型原子炉 (BWR) 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多数のひび割れが報告され、その検査・補修が課題となっている。原子力発電プラントの点検規格の整備では、欠陥が検出されてもその欠陥のサイズが構造強度に影響しない範囲であれば、常時監視のもとでプラント運転の継続を許容する方法が議論されている。この場合、既存の検査技術よりも高度な欠陥のサイジング技術の確立が必須となっており、検査精度の高度化と検査の効率を向上させるための迅速な診断技術が求められている。原子力プラントの探傷技術としては、検査対象の部位に応じて目視検査 (Visual Testing; VT)、超音波探傷試験 (Ultrasonic Testing; UT)、渦電流試験 (Eddy Current Testing; ECT) など様々な方法が使用されている。ECT 試験は金属構造物の表面・表層欠陥の検出技術として高精度な検出能力を有しており、超音波探傷の補完技術として、原子力プラントの配管における有効な探傷技術として使われてきている。本論文では、最近問題となっている BWR シュラウド等で使われるオーステナイトステンレス合金の ECT 検査による欠陥探傷の高度化を目的とした計算技術を提案する。非破壊検査の解析は典型的な逆問題

解析の応用事例であり、これまでに多数の研究報告がある。ECT 検査においては、筆者らにより逆問題解析を用いた蒸気発生器伝熱管の配管きずの形状同定の計算手法を提案し、国際ベンチマーク問題等実データを用いてその有効性を検証している<sup>(1)(2)(3)</sup>。逆問題解析は高精度なきず形状の同定が可能であるが、一方膨大な計算を実行する必要がある、これは実プラントへの適用で残された課題となっている。本論文では計算時間の大幅な短縮をはかるため、従来提案していた測定データに適合する順問題解析結果からパラメータを同定するかわりに、順問題解析データをあらかじめ記憶させておき、測定データが付与されたとき、必要なデータを読み出して高速な逆解析を実現する逆解析手法を提案する。データベースの構築にあたっては、対象とする自然き裂のモデリングが特に重要である。考察の対象とするステンレス材料の応力腐食割れ (Stress Corrosion Cracking; SCC) は表層面から深さ方向にかけて複雑な形状を呈しており、これを検査モデルに反映する必要がある。本論文ではすでに有効性が検証されている有限要素・境界要素併用法による ECT シミュレータ<sup>(4)</sup>を用いてデータベースを構築する。2次元の測定データから SCC の表面形状を単一き裂の集合に分解し、それぞれの位置、長さ、深さをパラメータとして構築したデータベ

スから仮想パターンを高速に作成し測定データを参照する。このようにして測定データにもっとも近い仮想イメージを生成するパラメータから SCC の近似形状を復元する。逆解析には分散並列処理が有効である進化計算手法を導入し、迅速な診断を実現する。

本論文の構成は以下の通りである。まずデータベース構築のための ECT シミュレータについて説明し、単一矩形き裂に関する検査モデルの精度を検証する。次に、自然き裂のモデリングについて考察し、表層部分で複数に近接して走るき裂形状に関する検査データの仮想イメージをデータベースを用いて高速に復元するための方法を提案する。さらに進化計算によるパラメータ最適化手法を用いてデータベースを用いた逆問題解析の計算手法を提案する。最後に実験による測定データを用いて提案手法の有効性を示す。

## 2. 検査モデルと ECT シミュレータ

検査モデルを構築する際に対象とした試験材料とその測定方法の概略図を Fig. 1 に示す。検査で用いるプローブは多数のコイルからなり、それぞれが励磁コイル・検出コイルの役割を果たす。実際には近接のコイル間で励磁コイルと検出コイルの組み合わせを行い、複数の受発信コイルの組み合わせを材料近接面で走査することにより 1 回の走査で 2 次元の測定イメージを得ることが可能となる。渦電流問題の支配方程式は磁気ベクトルポテンシャル  $\mathbf{A}$  と電気スカラーポテンシャルの時間積分  $\Phi$  を未知変数とした拡散系のポテンシャル方程式によって、複素フェザー表示により次式のように記述することができる<sup>(2)</sup>。

$$-\frac{1}{\mu_0} \nabla^2 \mathbf{A} + j\omega\sigma(\mathbf{A} + \nabla\Phi) = 0 \quad \text{in } V \quad (1)$$

$$\nabla \cdot j\omega\sigma(\mathbf{A} + \nabla\Phi) = 0 \quad \text{in } V \quad (2)$$

$$-\frac{1}{\mu_0} \nabla^2 \mathbf{A} = \mathbf{J}_s \quad \text{in } R^3 - V \quad (3)$$

ここで  $\mathbf{J}_s$  は励磁コイルに印加する交流電流の励磁電流密度ベクトルを表し、 $\omega$  はその交流電流の角周波数、 $\mu_0$  は真空の透磁率、 $\sigma$  は以下で定義される導電率である。また  $V$  は試験材の領域、 $R^3 - V$  は試験材周辺の空気領域を示す。式 (1-3) の解  $\{\mathbf{A}, \Phi\}$  から試験材料内部で発生する渦電流  $\mathbf{J}_e$  は

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

で求めることができる。発生した渦電流による検出コイルの誘起電圧はビオ・サバルの公式から

$$\mathbf{Z} \propto -j\omega N_t \oint_C \mathbf{A}_c \cdot d\mathbf{l} \quad (5)$$

となる。 $N_t$  は受信コイルの巻き数であり、 $\mathbf{A}_c$  はコイルにおける磁気ベクトルポテンシャルで、次式により計算できる。

$$\mathbf{A}_c(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{\mathbf{J}_e(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} dV(\mathbf{r}') \quad (6)$$

$\mathbf{r}$  は検出コイル内のフィールド点、 $\mathbf{r}'$  は試験材内部の渦電流に関するソース点を意味する位置ベクトルである。実際の検

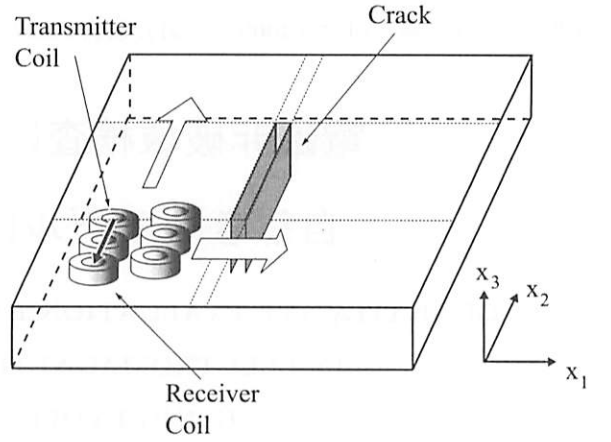


Fig. 1 Illustration of eddy current testing

出信号は、き裂の存在する時の誘起電圧  $\mathbf{Z}^c$  とき裂の存在しない時の誘起電圧  $\mathbf{Z}^0$  との差、

$$\Delta\mathbf{Z} = \mathbf{Z}^c - \mathbf{Z}^0 \quad (7)$$

を検出信号として取り扱うことが可能であり、Fig.1 で示すように、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

$$\Delta\mathbf{Z} = \{\Delta Z(X_{lm}^o)\} \quad \text{for } (l, m) \in I_{LM} \quad (8)$$

が計算できる。ただし、 $X_{lm}^o = (x_1^l, x_2^m, \bar{x}_3)$  は受発信コイル間の midpoint の位置を表示している。また  $I_{LM} = \{(l, m) \mid l = 1, 2, \dots, L, m = 1, 2, \dots, M\}$  は計測位置をあらわすインデックスである。ECT 解析では、プローブを近接平面内で走査することにより測定イメージを得るので、有限要素法による渦電流解析コードをそのまま用いると、受発信コイルの有限要素分割を頻繁に行う必要があり、オーバーヘッドが生ずる。筆者らが従来から用いている有限要素・境界要素併用法を適用すると、結局検出信号は以下の数値解析モデルにより計算することができる<sup>(4)</sup>。

$$([P] + j\omega[Q] + j\omega[R] + [K]) \begin{Bmatrix} \mathbf{A}_d \\ \Phi_d \end{Bmatrix} = [M][G]^{-1}[F](X_{lm}^o) \quad (9)$$

$$\mathbf{Z} = \{Z_{lm}\}_{(l,m) \in I_{LM}} \quad (10)$$

$$Z_{lm} = [C] \begin{Bmatrix} \mathbf{A}_d \\ \Phi_d \end{Bmatrix} (X_{lm}^o) \quad \text{for } (l, m) \in I_{LM} \quad (11)$$

上式のマトリックス  $P, Q, R$  は試験材内部の有限要素マトリクス、 $K, G, F$  はコイルを含む試験材の近接領域と試験材表面を接続する境界要素マトリクスである。また  $C$  は式 (4-5) を離散化した補間マトリクスである。

## 3. 自然き裂のモデリング

自然き裂の分類はき裂の発生要因に応じて、疲労き裂 (Fatigue Crack)、応力腐食割れ (Stress Corrosion Cracking)、粒界割れ (Inter-Granular Crack) などに分類されるが、本研究

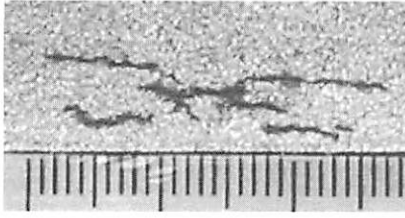


Fig. 2 Surface of real stress corrosion crack

においては、BWR プラントで問題となったシュラウドの応力腐食割れ (SCC) を考察の対象とする。Fig. 2 は SUS304 平板に 3 点曲げ後テトラチオン酸カリウム溶液に浸して人工的に発生させた応力腐食割れの表面図である。応力腐食割れ等自然き裂は表層に多くのき裂が複数存在する。本論文では Fig. 3 のごとく応力腐食割れの態様を複数の単一き裂要素に分解する。複数き裂への分解は正規化逆解析を測定画像のピーク値を解析することにより決定できる (詳細は文献<sup>(5)</sup>参照)。き裂の各要素の属性値は

- 位置情報:  $\mathbf{q}_P$  (測定基準点からの相対位置)
- 幾何学情報:  $\mathbf{q}_G$   
(き裂進展の方向、き裂幅、き裂長さ、き裂深さ)
- 物性値:  $\mathbf{q}_M$  (導電率、透磁率)

で記述する。これらの属性値の設定はプローブの分解能、検査環境、検査仕様によって具体的に決定する。このようにして Fig. 2 の自然き裂は上記の属性値  $\mathbf{q} = \{\mathbf{q}_P, \mathbf{q}_G, \mathbf{q}_M\}$  を有する複数の矩形き裂の集合としてモデリングを行う。矩形き裂の個数が  $K$  で近似したときの自然き裂のモデルは結局次式で与えられる。

$$\mathbf{q} = (\mathbf{q}^1, \dots, \mathbf{q}^K) \quad (12)$$

$$= (\mathbf{q}_P^1, \mathbf{q}_G^1, \mathbf{q}_M^1; \dots; \mathbf{q}_P^K, \mathbf{q}_G^K, \mathbf{q}_M^K)$$

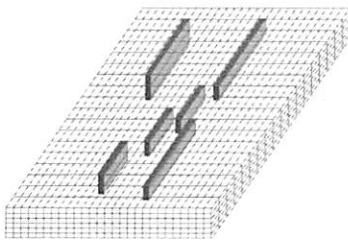


Fig. 3 Modeling of stress corrosion crack

#### 4. データベースによる仮想イメージの生成

高精度な数値解析を実現するには、き裂周辺を非常に細かく有限要素分割を行う必要があり、複数き裂の数値解析では必然的に大規模な連立方程式を解く必要がでてくる。逆問題解析は、測定データに適合する最適なパラメータ群を探索するためにシミュレータを頻繁に呼び出し実行する必要がでて

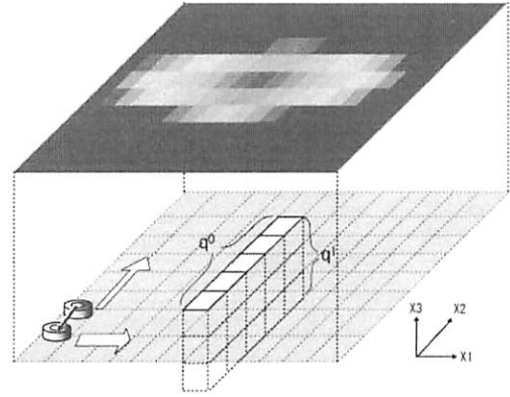


Fig. 4 Data base of magnetic image

くる。この問題を解決するために、データベースを用いて高速に自然き裂に対する仮想測定イメージを生成する手法を提案する。データベースは単一き裂の幾何学情報に関して作成する。すなわち Fig. 4 のように材料表面中央に単一のき裂  $\mathbf{q}_G^1$  を仮定し数値解析モデル (9-11) を解く。そのようにして適当なき裂形状  $\mathbf{q}_G^1[j]$  を与えて順解析

$$(\mathbf{q}_G^1[j], \mathbf{q}_M^1[j]) \rightarrow \mathbf{Z}[j] \quad \text{for } j = 1, 2, \dots, \quad (13)$$

に関するデータベースを構築する。作成したデータベースを用いて以下の手順で 2 次元の仮想イメージを作成する。

ステップ 1: き裂を材料表面のさまざまな位置に配置された複数の矩形き裂により近似し、その位置情報  $\{\mathbf{q}_P^k\}_{k=1}^K$  を与える。

ステップ 2: 個々の矩形き裂の幾何学情報として形状パラメータ  $\mathbf{q}_G^k$  を各き裂  $k (k = 1, 2, \dots, K)$  ごとに与え、データベースより各き裂に関連するモデル出力  $\mathbf{Z}(\bar{\mathbf{q}}_o, \mathbf{q}_M^k)$  を入手する。

ステップ 3: ステップ 2 で入手されたき裂要素毎のイメージをステップ 1 の位置情報にもとづき 2 次元空間上に配置して単一矩形き裂のモデル出力の重ね合わせによる仮想磁気イメージとして求める。

$$\Delta \mathbf{Z}(\mathbf{q}) = \sum_{k=1}^K \{\mathbf{T}(\bar{\mathbf{q}}_o^1; \mathbf{q}_P^k) \circ \mathbf{Z}(\bar{\mathbf{q}}_o, \mathbf{q}_M^k) - \mathbf{Z}^0\} \quad (14)$$

ただし  $\mathbf{Z}^0$  はき裂がない場合における仮想磁気イメージであり、また  $\mathbf{T}$  は固定位置  $\bar{\mathbf{q}}_o^1$  からき裂位置  $\mathbf{q}_P^k$  への写像を意味する。

#### 5. 進化計算によるき裂の定量評価

き裂の幾何学情報によるデータベースの構築により、単一矩形き裂のイメージを重ね合わせて仮想イメージを作成できるので、構築したデータベースから広範囲な解候補を構成することが可能となる。データベースにおける参照パターンは  $\mathcal{N}_{G,M} = \dim(\mathbf{q}_G) \times \dim(\mathbf{q}_M)$  通り存在するが、さらに位置情報、複数き裂重ね合わせにより全体として

$$\mathcal{N} = (\mathcal{N}_{G,M} \times \dim(\mathbf{q}_P))^K \quad (15)$$

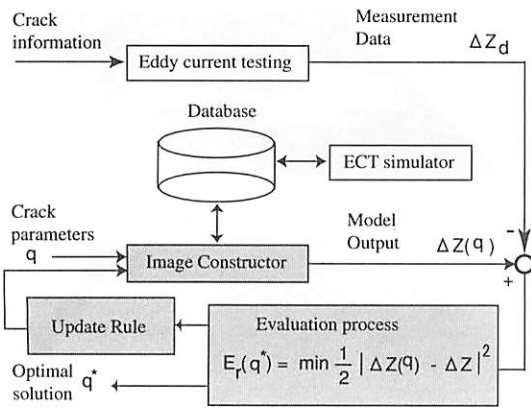


Fig. 5 Overall configuration of estimation algorithm

通りの膨大な組み合わせとなる。本論文ではパラメータの更新則として進化計算手法を採用する。この計算法は自然界における進化と遺伝の仕組みを分子生物学の見知から模倣して、複数の解候補に対して、交叉、突然変異などの遺伝的操作を単純化して取り入れることにより組み合わせ最適化問題などにおける（準）最適解を、比較的少ない計算量で効率的に求めようと試みる確率的探索手法である<sup>(6)</sup>。測定イメージを基準として、作成した参照パターンとのマッチングをとることによりもっとも適合したクラックモデル(13)が推定すべきパラメータとなる。Fig.5はこの逆問題解析の概要を示したものである。逆問題解析の実現には

- パラメータの表現型
- 適合度評価
- パラメータの更新則

が必要である。表現型は前節のイメージコンストラクタによりパラメータ  $\mathbf{q}$  に関する表現型  $\mathbf{Z}(\mathbf{q})$  が得られる。したがってパラメータの評価は実測データ  $\mathbf{Z}_d$  とのマッチングを定量化すればよい。Fig. 5 ではもっとも一般的な出力最小自乗法を例にあげている。パラメータの更新則としては、世代交代のための個体の選択、交叉、突然変異などの遺伝的操作、世代交代したときの各個体の適応度評価により適応度の高い遺伝子を含む集団へと進化させていく。欠陥形状のコーディングはき裂形状モデル(13)をそのまま遺伝子列に置き換える。遺伝子列の環境適応度 (fitness) にはコイルを周波数  $\omega$  で励磁を行うことによって得られた2次元測定イメージ  $\{\Delta Z_{lm}^d\}_{l=1, m=1}^{L, M}$  とパラメータベクトル  $\mathbf{q}$  に対応する仮想磁気イメージ  $\{\Delta Z_{lm}(\mathbf{q})\}_{l=1, m=1}^{L, M}$  のイメージ間距離

$$Er[\mathbf{q}] = \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M |\Delta Z_{lm}(\mathbf{q}) - \Delta Z_{lm}^d|^2 \quad (16)$$

を採用する。

## 6. 計算実験

実験においては、対象とするプローブの受発信コイルの性能および試験材料の形状と測定方法を考慮して以下のように項目ごとの属性値を与える。センサの分解能を考慮して矩

形き裂幅は固定値とし、き裂要素の幾何学情報は長さ  $q^0$  と深さ  $q^1$  の2つのパラメータによって規定される矩形で定義する。

$$\mathbf{q}_G = (q^0, q^1).$$

位置情報は測定基準点からき裂始点までの相対距離を2次元座標値で与える。高さ方向はプローブの制御機構によって一定に保持されると仮定する。個々のき裂の位置は  $x_1 - x_2$  平面におけるき裂長さ方向の始点の位置座標  $(q^2, q^3)$  によって表現する。

$$\mathbf{q}_P = (q^2, q^3).$$

き裂部分の物性値は、対象とする試験材 (SUS304, SUS316L) が非磁性であることからき裂要素の物性値として真空の透磁率  $\mu_0$  を、また導電率  $\sigma$  はき裂要素全体をゼロで与える ( $\sigma_c = 0$ )。このようにして、実験では、き裂の各要素の属性はき裂の始点の  $x_1$  座標,  $x_2$  座標, 長さ, 深さの4つのパラメータ列  $\mathbf{q} = (q^0, q^1, q^2, q^3)$  によって与える。なおこれらの値は環境依存であり、検査環境に応じて柔軟に変更可能である。

実験で用いる試験材料は板厚 10.0mm の平板でシュラウドに用いられている 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]) を用いた。渦電流探傷試験による計測データは (株) 日立製作所から提供を受けた。Fig. 6 は測定に用いるプローブの仕様を示したものである。2つのコイル列, 6つのコイルで構成されており, このうち左上のコイルで励磁を行い, 左下のコイルで受信を行う。各コイルと試験体との間隔 (Lift off) には均一の厚さ (0.5mm) の薄いフィルムを挿むことにより一定となっている。またコイルの巻き数は 520turn で 20kHz, 40kHz, 100kHz の3つの周波数の交流電流を流して励磁を行うことができる。プローブの移動による測定は  $x_1$  方向に 0.5mm 間隔で 21点,  $x_2$  方向に 1.7mm 間隔で 11点測定を行った。

試験材料の有限要素分割は材料の幅、奥行き、厚み方向にそれぞれ  $11 \times 16 \times 5$  に分割し、全体で 1224 個の有限要素を用いた。き裂のモデル化においては、き裂を包含する有限要素の導電率をゼロとシミュレータを動作させた。

計算機によるシミュレーション実験に使用した計算機環境を Table.1 に示す。

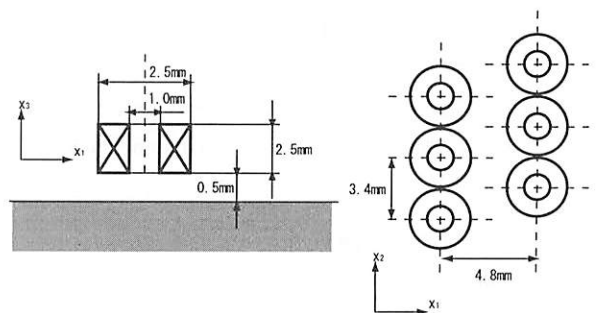


Fig. 6 Coil used in the experiment

Table 1 Computational Environments

Processor (CPU)	IBM Power PC 1.4GHz
Main Memory [MB]	4096 MB
Operating System	AIX
Compiler	xlc(Version 6)

6.1. 仮想イメージの精度評価

重ね合わせによる仮想磁気イメージの有効性を確かめるため Fig.7 に示す深さのみ異なる 5 個の矩形の EDM スリットが等間隔に並んでいる試験材料の測定データと対応する仮想イメージを比較する. 単一矩形き裂に対する, 計測実験による測定データと計算機シミュレーションによるモデル出力との比較を 20[kHz], 40[kHz], 100[kHz] の三つの周波数の測定データで行った. 周波数 20[kHz] の場合の実験データとモデル出力の比較を Fig. 8 に, またき裂の真上を  $x_1$  方向にスキャンしたときの実験データとモデル出力の比較を Fig. 9 に示す.

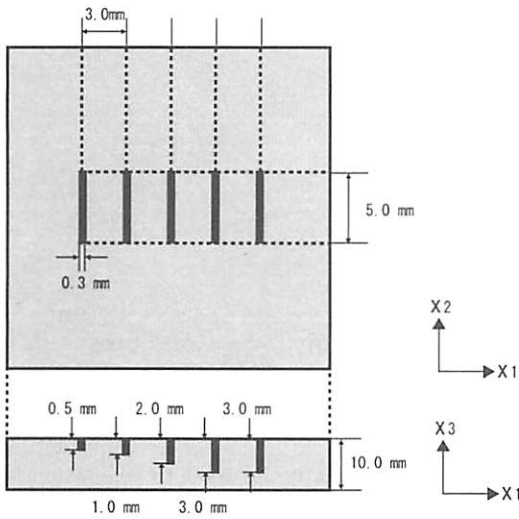


Fig. 7 Dimension of sample with cracks

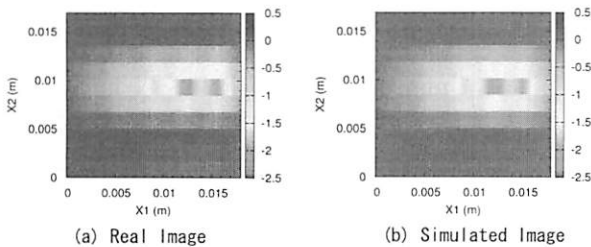


Fig. 8 Comparison of real and simulated Image

6.2. 逆解析の実験結果

逆解析シミュレーションにおける個々のき裂の形状パラメータ  $\mathbf{q} = (q^0, q^1, q^2, q^3)$  のうち, き裂の長さ  $q^0$  およびき裂深さ

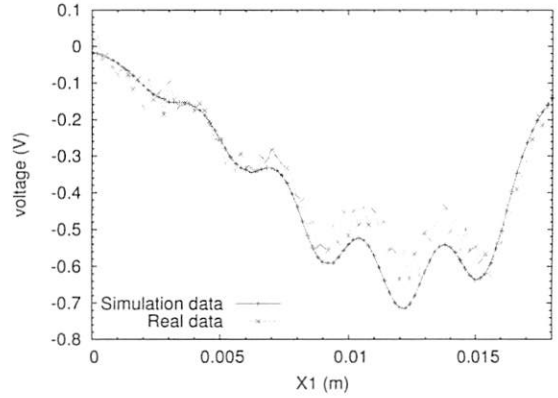


Fig. 9 Sectional plan of  $x_1$  direction (20kHz)

$q^1$  は有限要素の分割に依存した離散値をとる. き裂の始点位置の  $x_1 - x_2$  座標  $((q^2, q^3))$  は測定領域内の全ての座標とする. ただし, 試験材料に施した矩形き裂の  $x_1$  方向の間隔およびき裂の個数 ( $K$ ) は既知であるため, 各き裂の  $x_1$  座標  $q^2$  は固定しき裂の個数は 5 とする. 各パラメータの許容集合は,

$$q^0 = \{x | x = 0.0010 \times n, n \in N, 1 \leq n \leq 14\}$$

$$q^1 = \{0.0005, 0.0010, 0.0020, 0.0030, 0.0040, 0.0050\}$$

$$q^2 : \text{Fixed}$$

$$q^3 = \{x | x = 0.0001 \times n, n \in N, 1 \leq n \leq 180\}$$

とした. ただし  $N$  は自然数である. 解候補となる矩形き裂の 2次元磁気イメージに関するデータベースは上記のき裂長さ  $q^0$ , 深さ  $q^1$  および励磁周波数 ( $\omega/2\pi$ ) の組み合わせのもとで構築した. 進化計算における欠陥形状のコーディングは上記のき裂形状のパラメータ  $\mathbf{q}$  をそのまま遺伝子列に置き換える. 遺伝子列の選択・淘汰に関しては, 一世代の進化で一個体のみを入れ替える定常状態 GA(SSGA) により欠陥形状の同定を行う. 計算機実験で用いた SSGA における遺伝子個体数, 世代数, 交差率, および突然変異率を Table.2 にまとめる. き裂間隔の異なる材料, あるいは 5 個以上の近接き裂のシミュレーション実験等多数の数値実験を実施した. ここでは, 仮想イメージの評価実験で使用した試験材および測定データによる逆解析実験の結果を以下にまとめる. 3 種類の励磁周波数により検証を行った. 40kHz の場合の適合度の世代推移を Fig. 10 に, また 10000 世代での最良個体の立体復元図を Fig. 11 に示す. また 20kHz, 100kHz の推定結果と真値との誤差を Table 3 にまとめる.

7. おわりに

本論文では, BWR シュラウド等で用いられるステンレス合金で発生する自然き裂の定量的非破壊評価を目的とした迅速な逆解析アルゴリズムを開発・提案した. 検査項目と測定機器の性能を考慮してきずの位置・形状・物性値に関する仕様を決め, すでに開発した境界要素・有限要素併用法による ECT シミュレータを用いて順解析データベースを構築す

Table 2 Control parameters used in SSGA

Number of generation	10000
Number of gene population	100
Cross over rate	0.5
Mutation rate	0.05

る方法を開発した。自然き裂のイメージは有限個の単一き裂イメージの重ね合わせで合成することにより多様な参照パターンの生成が可能になり、き裂データベースからの呼び出し参照による測定データとのマッチングが従来のモデルベース逆問題解析に比べて処理時間が飛躍的に向上した。各種シミュレーションによる実験のほか、実験データを用いた検証では3mm間隔のき裂の識別能力（長さ5mm以下で精度±1mm）および深さ1[mm]以上の実欠陥における深さの精度（3mm以下で精度±1mm）の形状認識精度目標を達成している。また上記目標精度では、通常のPCで数十秒以内で本手法による計算処理が達成されており、高速な逆問題解析が提案した方法で可能となった。SCC等SUS材料の自然き裂に関して本手法を適用しその精度評価を現在行っている。自然き裂の態様は特に深さ方向において複雑であり、データベースの改良および解析方法の自動化等現在検討している。

謝辞

実験データの提供を受けた日立製作所電力・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。また本研究の一部は、「革新的実用原子力開発提案公募事業」（(財)エネルギー総合研究所）として実施したものであり、あわせて謝意を表す。

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，機械学会論文集（C編），63-612(1997)，pp. 2650-2656.
- (2) F. Kojima, N. Kubota, F. Kobayashi, and T. Takagi: Shape recovery of natural crack using evolutionary programming related to eddy current testing, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 15-4(2002), pp. 243-247.
- (3) F. Kojima: Inverse Problems related to electromagnetic nondestructive evaluation, Research Directions in Distributed Parameter Systems, SIAM FR-27(2003), pp. 219-236.
- (4) 小島史男：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，境界要素法論文集，21(2004)，pp. 13-18.

- (5) F. Kojima and K. Ito : Reconstruction of magnetic charge densities using regularization of bounded variations under noisy observations, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 19-2(2004), pp. 309-313.
- (6) D.B. Fogel: Evolutionary Computation: Toward a New Philosophy of Machine Intelligence, (1999), IEEE.

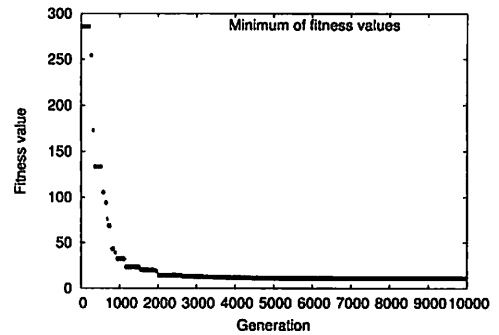


Fig. 10 Fitness evaluation of the evolutionary process (40kHz)

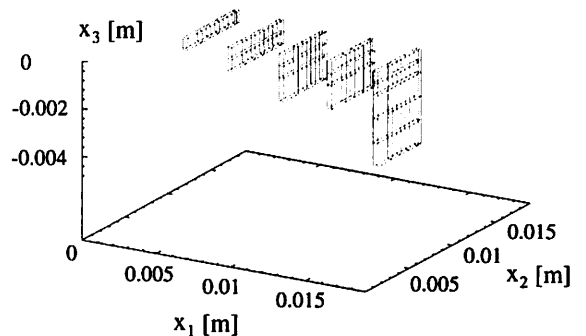


Fig. 11 Best individual at the 10000th generation (40kHz)

Table 3 Accuracy of estimated crack shape

	20 kHz		100 kHz	
	Depth [mm]	Length [mm]	Depth [mm]	Length [mm]
1	0.5	7 (+2)	0.5	6 (+1)
2	1	5	1	5
3	2	6 (+1)	2	5
4	3	4 (-1)	2 (-1)	5
5	3	5	2 (-1)	6 (+1)