

渦電流探傷法における階層型自然き裂モデルによるき裂診断解析法

A Method of Crack Profiles Identification in Eddy Current Testing using a Layered Model of Natural Crack

神戸大学工学部
神戸大学工学部

小島 史男 Fumio KOJIMA Member
池田 拓也 Takuya IKEDA Student Member

This paper is concerned with a method for identification of crack shape in material. Natural crack is described by a layered conducting model with respect to each finite element of a sample material. Two dimensional image is obtained by eddy current testing simulator with the layered conducting model. The inverse analysis is discussed with the background knowledge of nonlinear output least square method.

Keywords: Inverse problem, nondestructive testing, eddy current testing, natural crack

1. 緒言

近年、原子力発電プラントの高経年化に伴い、各種構造物の検査・診断が不可欠となっている。しかし、シュラウドの特に溶接部分に応力腐食割れ(Stress Corrosion Crack; SCC)等の自然き裂が発見された事例が多数報告され、その検査・補修が早急の課題となっている。シュラウド等、金属構造物の表面・表層欠陥の検査技術としては電磁現象を利用した非破壊検査技術である渦電流探傷試験(Eddy Current Testing; ECT)がある。その検査データから逆問題解析による欠陥推定には渦電流探傷シミュレータによる支援が有効であり、これまでこれを用いた原子炉のき裂形状推定の逆解析の研究が行われてきた[1]。しかし、これを用いてき裂形状の同定を行うにはその前準備としてき裂の正確なモデリングを行うことが必要不可欠である。そこで、本研究では、応力腐食割れ等の自然き裂に関する階層的導電率モデルによるシミュレータを構築し、き裂形状の推定を行う。

2. ECT 検査モデルの記述

ECT は、励磁コイルに交流電流を流すことで、磁場が発生し、その磁場が導体に作用し導体に渦電流が流れる。導体表面にき裂があると渦電流に変化が生じ、それによって起こる受信コイルの誘起電圧の変化をと

らえることにより、き裂の特徴を得る。マクスウェルの方程式に磁気ベクトルポテンシャル \mathbf{A} および、電気スカラーポテンシャル ϕ を導入することで渦電流問題の支配方程式は次のように記述できる[2]。

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

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

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

ここで、 μ_0 は真空の透磁率、 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 の時間積分である。試験体に発生したき裂はその導電率 σ の変化によって表される。

式(1)-(3)の支配方程式は有限要素・境界要素併用法により以下のような有限次元の線形システムで記述できる。

$$([P] + j\omega[Q](\sigma_h) + [K]) \begin{Bmatrix} \mathbf{A}_d \\ \Phi \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_h(\mathbf{J}_s) \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

き裂の形状は、対応する要素の導電率を変化させた導電率ベクトル $\sigma_h = \{\sigma_i^M\}_{i=1}^M$ によって表される。ただし M は導体の有限要素の分割数である。

励磁コイルの強制電流 \mathbf{J}_s に対応する受信コイルの誘起電圧は、補間マトリクス $[C]$ によって以下の式で近似できる。

$$\mathbf{Z} = [C] \begin{Bmatrix} \mathbf{A}_d \\ \Phi \end{Bmatrix} \quad (5)$$

連絡先: 小島史男、〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1、神戸大学大学院自然科学研究科、電話: 078-803-6493、e-mail:kojima@cs.kobe-u.ac.jp

3. 自然き裂のモデリング

自然き裂は、Fig.1(a)のように表面部分が完全に破断しているが、き裂が深くなっていくにしたがってき裂幅が狭くなていき、さらに深いところでは一部接触する個所があり、そこでは通電していると考えられる。以上を考慮して、き裂部分の要素にも導電率を与える、深さ方向に導電率を変化させる自然き裂に関する階層型導電率モデルを用いる(Fig.1(b))。

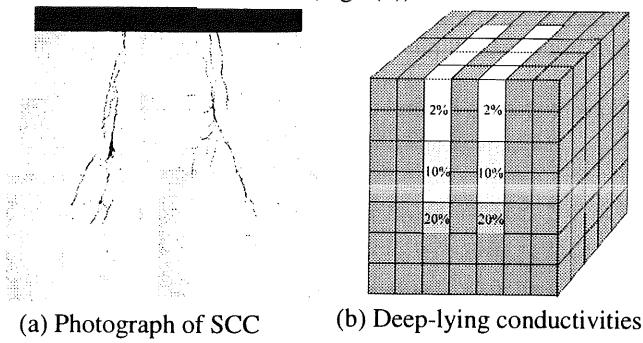


Fig. 1 Modeling of SCC

4. 逆解析によるき裂形状推定

自然き裂は材料表面で多数の枝分かれを繰り返しており、幾何学的に特徴を捉えるのは困難とされている。そこで、自然き裂を短形き裂の集合として扱う。個々のき裂の状態を Fig.2において x_1 方向の位置、 x_2 方向のき裂の下端の位置、長さ、深さの 4 つのパラメータ列 $\mathbf{q} = (q^0, q^1, q^2, q^3)$ で表現する。き裂を表わしている短形き裂の個数を K とすると、このき裂の形状はパラメータベクトル $\mathbf{q} = (\mathbf{q}_1, \dots, \mathbf{q}_K)$ で表わされる。

本研究の逆問題解析はコイルを周波数 ω で励磁を行うことによって得られる 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

$$Error[\sigma(\mathbf{q})] = \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M |\Delta Z_{lm}(\mathbf{q}) - \Delta Z_{lm}^d|^2 \quad (6)$$

の最適化問題として扱う。

応力腐食割れを付与した試験体(SUS316)の渦電流探傷試験による測定データと、階層型導電率モデルを用いて構築したシミュレータによるモデル出力を利用し、き裂形状の推定を行った。欠陥推定の目標精度を、 x_2 方向の長さに対しては $\pm 20\%$ 、 x_3 方向の深さに対しては $\pm 1\text{mm}$ 以内の誤差とした。測定データから推定され

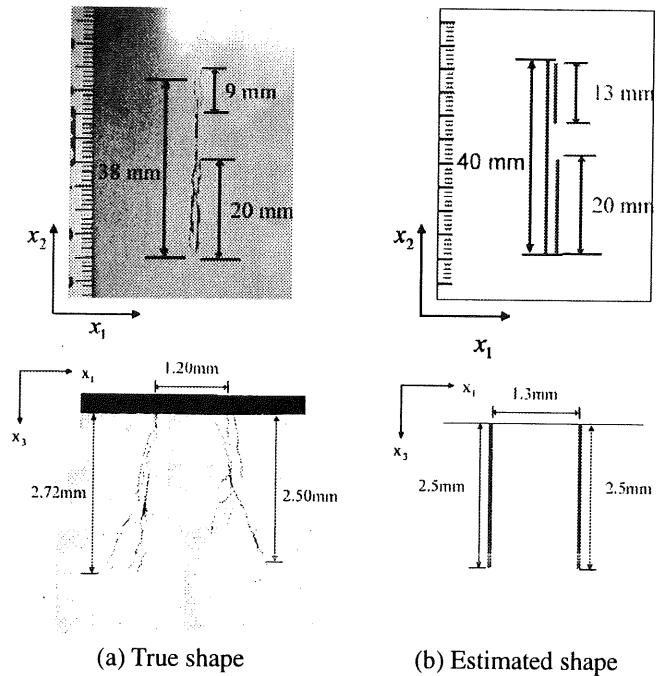


Fig. 2 True and estimated shape

た結果を Fig.2 に示す。

5. 結言

本研究では、渦電流探傷試験における検査のシミュレータの開発を行い、その際、き裂のモデルとして階層型導電率モデルを適用した。

階層型導電率モデルを使用した順解析結果を利用し、逆問題解析により、き裂形状の推定を行い、目標精度を達成した。

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) エネルギー総合工業研究所）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機器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。

参考文献

- [1] 小島史男、河合信弘、 “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、Vol.21、2004、pp.13-18.
- [2] 坪井始、内藤督、“数値電磁解析法の基礎”、養賢堂、1995、pp.57-61.