

渦電流探傷法を用いた多方向走査によるき裂形状診断

A Method for Crack Profiles Identification in Eddy Current Testing by the Multi-directional Scan

神戸大学大学院
神戸大学大学院
神戸大学大学院

小島 史男 Fumio KOJIMA Member
池田 拓也 Takuya IKEDA Student Member
Doung Nguyen Student Member

This paper is concerned with a method for identification of crack shape in conducting materials. Multi-directional scanning strategies using Eddy Current Testing is performed for sizing complex natural crackings. Two dimensional measurements by means of multi-directional scan are used in a output least square identifications.

Keywords: Inverse Problem, Nondestructive Testing, Eddy Current Testing

1. 緒言

原子力発電プラントの高経年化に伴いステンレス鋼管等に発生する応力腐食割れ(Stress Corrosion Crack; SCC)のサイジングが重要な問題となってきた。シユラウド等、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。ECT検査データから逆問題解析を実行し欠陥の定量評価を行う場合、検査環境を模擬した順問題を繰り返し解く必要がある。これまでに単一き裂のイメージをデータベースに蓄積し、これらを合成した仮想イメージから実時間で逆問題を解く計算アルゴリズムを提言した[1]。しかしながら現場での検査においては、き裂に対して検出プローブの走査方向を制御することは困難である場合が多い。本研究では、検査プローブがき裂に対して任意の走査方向をもつ場合に適用可能なシミュレータの開発を行う。

2. シミュレータを用いたき裂形状同定

順問題解析では単一矩形き裂を想定し、き裂の端点の位置座標(x_1, x_2)および長さ、深さのパラメータをベクトル \mathbf{q} で表現する。き裂形状同定における逆問題解析の流れを Fig.2 に示す。シミュレータによる順問題解

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

析結果 $\Delta Z(\mathbf{q})$ と測定データ ΔZ_d との比較を行い、出力自乗誤差

$$E(\mathbf{q}) = \frac{1}{2} |\Delta Z(\mathbf{q}) - \Delta Z_d|^2 \quad (1)$$

が最小になるように、き裂パラメータ \mathbf{q} を調整する。

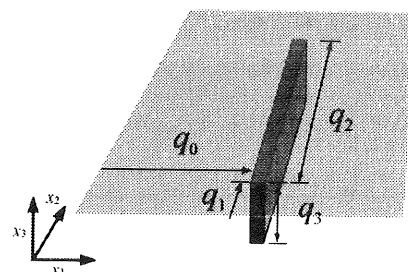


Fig.1 The shape of a crack

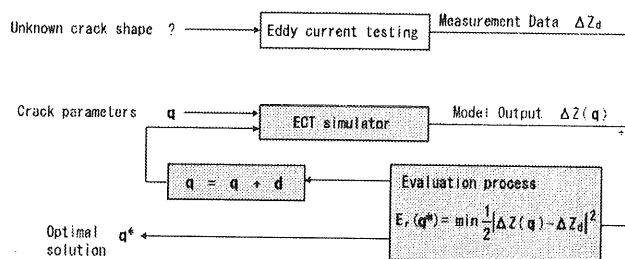


Fig.2 Inverse analysis using model based approach

Fig.2 において ECT シミュレータはマクスウェルの方程式に $A-\Phi$ 法を用い、有限要素・境界要素併用法を適用することで、以下のような有限次元の線形システムで記述できる[2]。

$$([P] + j\omega[Q](\mathbf{q}) + [K]) \begin{Bmatrix} \mathbf{A}_d \\ \Phi_d \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_b(\mathbf{J}_s) \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

ここで $\{\omega, \mathbf{J}_s\}$ は励磁コイルの各周波数と強度である。また、 $\{\mathbf{A}_d, \Phi_d\}$ は磁気ベクトルポテンシャルおよび電気スカラーポテンシャルの時間積分に相当する数値解である。入力ベクトル F_b は \mathbf{J}_s によって決まる。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。

$$\Delta Z(\mathbf{q}; \omega, \mathbf{J}_s) = [C] \begin{Bmatrix} \mathbf{A}_d(\mathbf{q}) - \mathbf{A}_d^0 \\ \Phi_d(\mathbf{q}) - \Phi_d^0 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

ここで $\{\mathbf{A}_d^0, \Phi_d^0\}$ はき裂のない場合の有限要素解である。

3. データベースの構築

(1)式の最小自乗問題を解くには順問題解析(2-3)式を繰り返す必要がある。計算時間の節約のため、あらかじめ $\Delta Z(\mathbf{q})$ に関するデータベースを構築する方法が考えられる。しかしながら実プラントの検査データ ΔZ_d はさまざまな走査方向をもつためデータベースの容量は膨大なものとなる。この問題を回避するため本研究ではまず1つのソース源に対して測定可能な領域内の複数の観測点の順問題解析解をデータベースに蓄積していく。検査領域に有限個のソース点を設定する。すなわち Fig.4 のような単一き裂を考え、励磁コイルの中心座標を基準とし、対象領域において $K \times L$ の格子状に励磁源の集合

$$\mathbf{J}_s^{KL} = \{\mathbf{J}_s^{kl}\}_{(k,l) \in I} \quad (I = \{(k,l) | k=1, \dots, K, l=1, \dots, L\}) \quad (4)$$

を与える。それぞれのソース源 (k,l) の各点におけるあらかじめ設定した測定有効範囲内において、Fig.5 のように $m \times n$ の格子分割を行い、格子上の各点における受信コイルの誘起電圧

$$\{\Delta Z_{mn}(\omega, \mathbf{J}_s^{kl})\}_{(m,n) \in Q} \quad (Q = \{(m,n) | m=1, \dots, M, n=1, \dots, N\}) \quad (5)$$

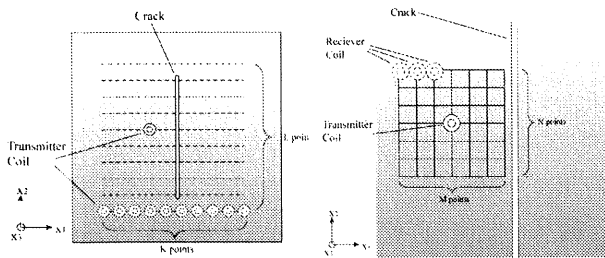


Fig.4 The position excited with a transmitter coil

Fig.5 The position detected with a receiver coil

を式(2-3)を用いて計算する。このようにしてデータベースの各要素は

$$\{\Delta Z_{mn}(\mathbf{q}) | (\omega, \mathbf{J}_s^k), (m,n) \in Q\}_{(k,l) \in I} \quad (6)$$

で与えられる。

4. 補完による測定イメージの作成

前節で構築したデータベースを用いて、き裂に対して任意の角度で走査する場合のシミュレーション出力を求めることができる。Fig.6 のようなき裂に対し、矢印の向きに P ライン走査する場合について考える。各ライン上では O 点測定する。走査ライン上のある点 (o,p) での受信コイルの誘起電圧は次の補完式で計算する。

$$\Delta Z^{op}(\mathbf{q}; \omega, \mathbf{J}_s^{KL}) = \sum_{r=1}^4 W_r \phi_r(x) \quad (7)$$

ここで $W_r \in \{\Delta Z_{mn}(\mathbf{q}; \omega, \mathbf{J}_s^k)\}$ である。ライン上の各点での値を計算することにより、任意の走査方向に対する仮想イメージ $\{\Delta Z^{op}(\mathbf{q}; \omega, \mathbf{J}_s^{KL})\}_{o=1, p=1}^{o,P}$ が得られる。

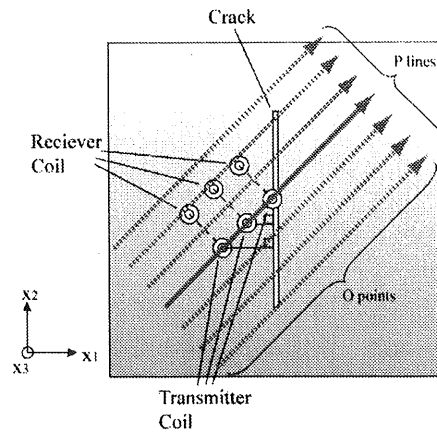


Fig.6 The simulation of arbitrary direction scans

近似的に構成する仮想イメージの精度、き裂同定の手法は当日報告する。

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.