

ネットワーク通信を用いた ECT 迅速診断システムの開発について

Development of ECT Diagnosis System with Network Communication

神戸大学大学院	小島 史男	Fumio KOJIMA	Member
神戸大学大学院	小林 太	Futoshi KOBAYASHI	Non-Member
日立製作所	西水 亮	Akira NISHIMIZU	Non-Member
日立製作所	小池 正浩	Masahiro KOIKE	Non-Member
日立製作所	松井 哲也	Tetsuya MATSUI	Member

Abstract This paper deals with an ECT diagnosis system using network communication. This system consists of an inspection module, a computational module and a communication interface module which can visualize some inspection results from the inspection module with ECT and some analysis results from the computation module. Here, three modules are connected through network architecture and communicated each other. Moreover, an operator can control interactively the inspection and computational modules in order to diagnose a plant adequately and accurately.

Keywords: ECT Diagnosis, Network Communication, Inverse Analysis, Interactivity

連絡先: 神戸大学大学院自然科学研究化 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1
Tel: 078-803-6493 Fax: 078-803-6493, E-mail: kojima@cs,kobe-u.ac.jp

1. 緒言

近年の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。また、2002年以來 BWR プラントにおける炉内構造物(シュラウド)や再循環配管における欠陥が発見され、その検査・補修が重要な課題になっている。現在、実プラントにおいて、目視検査(Visual Testing; VT)、超音波探傷検査(Ultrasonic Testing; UT)、電磁誘導検査(Eddy Current Testing; ECT)といった非破壊検査が実施されている。これらの検査の中で、ECT は材料表面、表面内部の欠陥を探索することが可能な検査手法であり、シュラウド表面上の応力腐蝕割れ(SCC)を検査するために適した検査法である。

一方、インターネットを利用した遠隔地医療支援や教育支援が最近活発となっている。遠隔医療においては、高度な医療技術を有する都市部の病院が遠隔地の病院の診断を支援するなど、IT の活用により医療サービスの質的向上を促進することが期待されている。原子力プラントにおける迅速診断システムの構築についても、インターネットをはじめとする IT 技術の活用によって、革新的なシステム保全技術が確

立できる可能性はある。一般的に、原子力プラントは高度な診断を実施するシステムとは地理的に離れており、インターネットを利用した迅速診断が非常に重要な役割を果たすと期待されている。

本報告では、ネットワーク通信を用いた ECT 迅速診断システムの開発を行う。ECT 診断システムは、検査モジュール、計算モジュール、インターフェースモジュールから構成されている。計算モジュールでは、実プラントの検査を仮想プラントで行うことができる ECT シミュレータがあり、順解析・逆解析を行うことが可能である。また、インターフェースモジュールでは、他2つのモジュールをオペレータがインタラクティブに操作することができ、それぞれのモジュールから得られる検査、解析結果をオペレータに提示することが可能である。

2. ECT 迅速診断システム

Fig. 1 に開発する ECT 迅速診断システムの概念図を示す。前述したように本システムは

- ECT を用いた検査モジュール (Inspection Module)

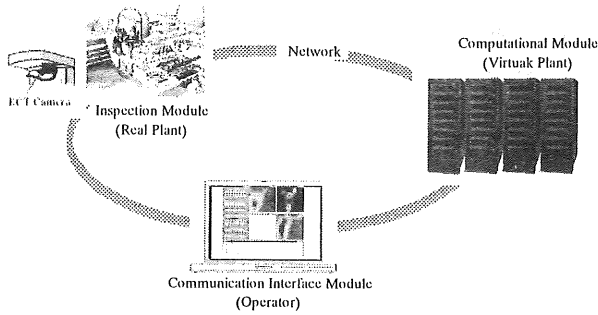


Fig. 1 ECT Diagnosis System

- 計算モジュール (Computational Module)
- インターフェースモジュール (Communication Interface Module)

から成っており、これらのモジュールはネットワークで接続されている。検査モジュールでは、実プラントにおいて ECT センサを用いて検査を行う。ここで、各プラントにおける ECT センサは直接ネットワークに接続することを仮定しており、得られた検査情報を直接他のモジュールに伝送することが可能となる。計算モジュールでは、順・逆解析を行う ECT シミュレータが実装されており、検査モジュールから得られた検査情報を基に、順・逆解析を行う。ここで、計算モジュールを構成する計算機はネットワークを用いて解析情報を同様に他のモジュールに伝送することが可能である。インターフェースモジュールは、他のモジュールをインタラクティブに操作し、さらに各モジュールから得られた検査・解析情報をオペレータに提示する。以下に、各モジュールの詳細を説明する。

2.1 ECT を用いた検査モジュール 検査モジュールでは、欠陥を発見するため、ECT センサを用いて計測を行う。ここで、電磁誘導解析(Eddy Current Analysis)は、検出コイルのインピーダンス変化を検出することで、実施される。また、16 チャンネルのマルチコイルプローブを使用し、同時に計測することで、複雑な形状の欠陥を検出できる可能性を有している。

2.2 計算モジュール SCCの認識と深さ方向のサイジングはきわめて困難な問題である。また、実プラントでの検査環境は複雑であり、

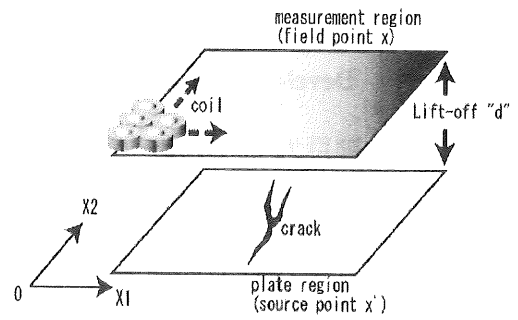


Fig. 2 Inspection with ECT Camera

完全に模擬した順解析シミュレータを実現することは、限られた計算資源のもとでは不可能である。そこで、仮想環境での単純な構成モデルの組み合わせによる計算結果を合成することにより、実プラントにおける検査環境に構造的に適応させる計算機構を開発する。ここで、SCC 形状認識は、

- 適応正則化法によるき裂表面形状認識
- 進化計算によるき裂のサイジング

という 2 段階のステップで成り立つ。

材料表面のき裂による磁場の特異性は材料表面に近接したコイルの誘起電圧変化として記録されるが、特に近接したキズに起因する信号が重なり合って、キズの枝分かれによるデータの特異性を観測磁場データから視認することは困難となる。ここでは、特徴抽出のために 2 次元の畳み込み積分に関する新しい正則化アルゴリズムを開発する。いま観測点 x でのセンサ情報 $y(x)$ は次の式で記述できる。

$$y(x) = \iint_S \frac{\rho(x')}{\sqrt{(x-x')^2 + d^2}} dx' \quad (1)$$

ここで、 d はリフトオフと呼ばれる材料表面とセンサ間の鉛直距離を示している。ソース源が近接していると表面き裂によるソース信号のピークが重なり、またそのピークもリフトオフ値の存在によりデータの特異性が失われる。したがって、上記の $y(x)$ から $\rho(x')$ を求める逆問題は典型的な不適切問題となる。そこで、式(2)に示す Bounded Variation と呼ばれる新しい修正項を付加した正則化問題を定式化する。

$$J[\rho^*] = \min_{\rho} \frac{1}{2} \|K\rho - y_d\|^2 + \frac{\alpha}{2} \|\rho\|^2 + \frac{\beta}{2} \|\rho\|_{BV} \quad (2)$$

新たな修正項を付加したことにより、上記の最

適解は偏微分方程式の解として求めることができる。適法正則化法はノイズと信号部分を選択的に切り分けてデータの平滑化を行うことにより、表面き裂の枝分かれに起因する信号の特異性を検出することが可能となる。

適法正則化法により抽出された特徴を基に、表面き裂のプロファイリングを行う。特徴抽出データと観測磁場データは同一の欠陥情報を表していることから、類似点を調べることで、き裂プロファイリングの手順は、以下の通りである。

Step 1. 特徴抽出データと観測磁場データの位相合わせおよび差分データの取得

Step 2. 差分データ中で下に凸の極点部分座標の抽出

Step 3. Step 2で抽出された座標の前後における特徴抽出データと観測磁場データの傾きから符号が異なる座標の抽出

Step 3により得られた座標が欠陥座標となり、これにより、き裂の枝分かれを複数の線分による分割（セグメント）として表現する。

プロファイリングにより得られた各セグメントに、定性的性質として透磁率および導電率を、また定量的性質として長さ・深さ・幅をパラメータとしたき裂モデルを与える。それぞれのき裂ごとに電磁非破壊計算シミュレータを適用し、対応する検査出力を重ねあわせて実データと照合し、もっとも近いパラメータを特定することで、深さ方向のサイジングを行い、SCC内部のき裂進展を再構成する。ここで、パラメータのチューニングには生物進化を模倣した最適化手法であるウイルス進化型計算(VEGA)による推定機構を使用する。

2.3 インターフェースモジュール インターフェースモジュールでは、他のモジュールの情報をオペレータに適切に提示し、その提示された情報に基づき、他のモジュールを操作する双方向性が求められる。そのため、インターフェースの機能として、

- 検査データ・解析データのビジュアルティ

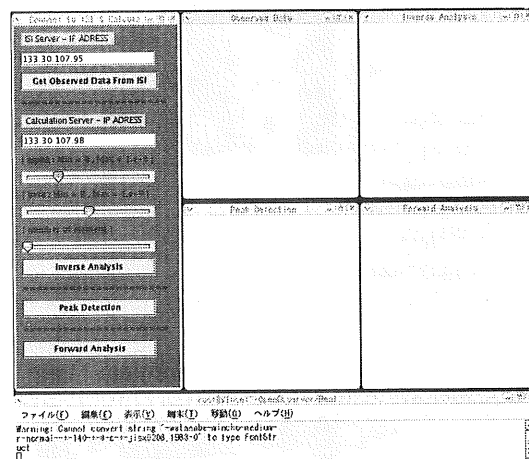


Fig. 3 Interface Module

- 検査・計算モジュールとのインタラクティブティ

が必須となる。Fig. 3に開発したインターフェースを示す。右上の4つのウィンドウは検査・解析データを可視化するウィンドウであり、左上は各モジュールとのインタラクティブティを実現するウィンドウである。ここで、ウィンドウ中には式(2)で示した適法正則化法のパラメータである α と β を任意に設定することができ、可視化したデータを基にオペレータが決定することが可能である。

3. SCC 実データによる検証実験

提案した ECT 迅速診断システムを用いて、SCC 実データによる診断を行う。ここで、検査モジュールでは、あらかじめ ECT により計測した観測磁場データを計算機に保持し、インターフェースモジュールからの要求に従い、そのデータを提供する。Fig. 5に実験を行った

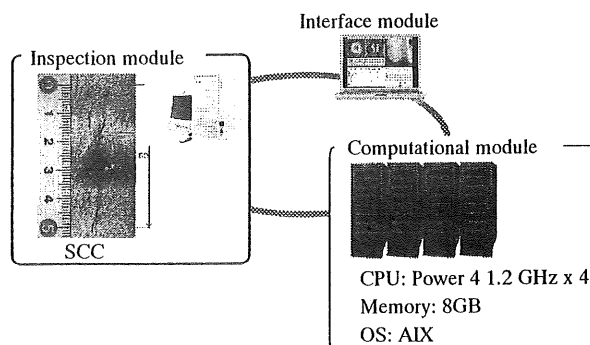
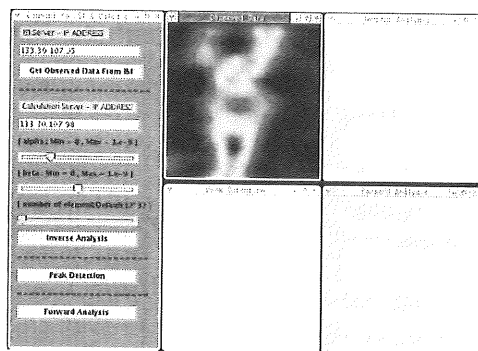
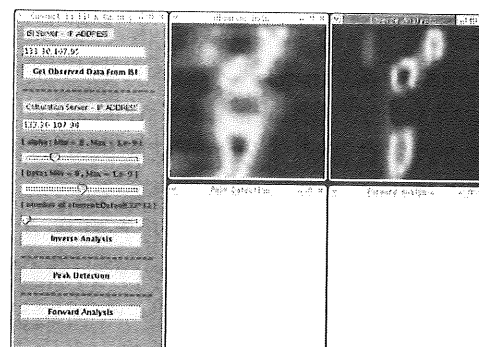


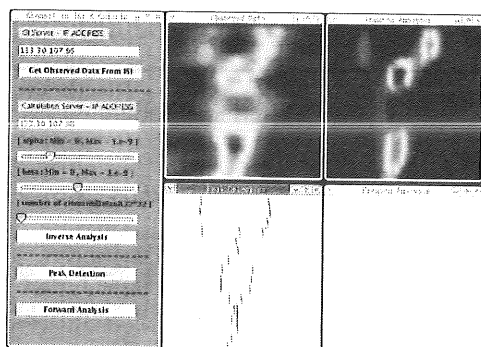
Fig. 4 Experimental Condition



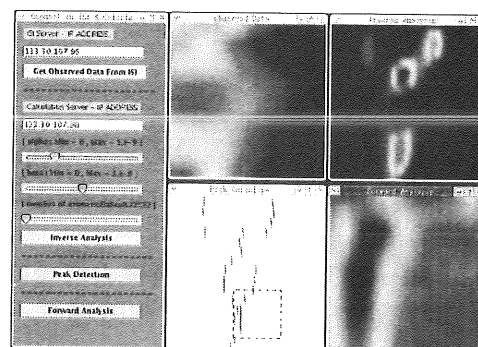
(a) Visualization of Measurement Data



(b) Visualization of Recovered Data



(c) Visualization of Crack Profiling



(d) Visualization of Forward Analysis with VEGA

Fig. 5 Experimental Result

結果を示す。図中(a)に観測データの可視化結果、(b)に適応正則化法による特徴抽出データ、(c)に欠陥プロファイリング結果、(d)に VEGA を用いた順解析データの可視化結果を示す。ここで、(d)において欠陥プロファイリング可視化ウィンドウの波線矩形は順解析の解析領域を示しており、観測データの可視化ウィンドウにおいて対応する領域の観測データが拡大表示されている。これらの結果より、開発した ECT 迅速診断システムにより SCC の診断を行うことが可能であることを示した。

4. 結言

原子力プラントを始めとする大型構造物において、ネットワークを用いた診断システムは今後発展が期待される。本論文では、ネットワーク通信を用いた ECT 迅速診断システムを開発し、応力腐蝕割れ(SCC)の診断を行った。本システムでは、検査モジュール・計算モジュール・インターフェースモジュールがネットワークで結合され、オペレータに通信を通して、さまざまな情報を提供することができる。また、

計算モジュールにおいては、適応正則化法を用いた欠陥プロファイリング、VEGA を用いたサイジングを行い、SCC の形状認識手法を提案した。

謝辞

本研究は、「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)として実施した。

参考文献

- [1] F. Kojima, "Inverse Problems related to Electromagnetic Nondestructive Evaluation", Research Directions in Distributed Parameter Systems, SIAM Publisher, Philadelphia, 2003, pp.225-241.
- [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, Vol.15, 2001/2002, pp.243-247.
- [3] C. Vogel, "Computational Method for Inverse Problem", SIAM Philadelphia, 2003.