複雑形状部検査のための渦電流探傷システムの開発

西水 亮^{1,*}, 松井 哲也¹, 小池 正浩¹, 野中 善夫²,
小島 史男³, 小林 太³, 高木 敏行⁴, 内一 哲哉⁴,
遠藤 久^{4,†}, 橋本 光男⁵, 福岡 克弘⁵

Development of Eddy Current Testing System for Complicated-Shaped Components

Akira NISHIMIZU^{1,*}, Tetsuya MATSUI¹, Masahiro KOIKE¹, Yoshio NONAKA²,
Toshio KOJIMA³, Futoshi KOBAYASHI³, Toshiyuki TAKAGI⁴, Tetsuya UCHIMOTO⁴,
Hisashi ENDO^{4,†}, Mitsuo HASHIMOTO⁵ and Katsuhiko FUKUOKA⁵

¹Power & Industrial Systems R & D Laboratory, Hitachi, Ltd., 7-2-1 Omika-cho, Hitachi-shi, Ibaraki 319-1221, Japan

²Hitachi-GE Nuclear Energy, Ltd., 3-1-1 Saiwai-cho, Hitachi-shi, Ibaraki 317-8511, Japan

³Department of System Function Science, Graduate School of Science and Technology, Kobe University, 1-1 Rokkodai, Nada-ku, Kobe 657-8501, Japan

⁴Institute of Fluid Science, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-8577, Japan

⁵The Institute of Research and Development Entrepreneur Support Center, Tokyo Institute of Polytechnic University, 4-1-1 Hashimoto-dai, Sagami-hara-shi, Kanagawa 229-1196, Japan

(Received July 7, 2007 and accepted in revised form February 22, 2008)

The objectives of this study are to develop a new inspection probe for complex structures using eddy current testing method (ECT), to establish the recognition technique of real flaw shape such as stress corrosion cracking (SCC), and to develop a rapid nondestructive inspection system. An ECT system consists of measurement and computational modules that are connected via a network circuit. The measurement module includes a flexible ECT sensor, which could fit on the curvature surface of radius larger than 25 mm with a mechanical manipulator. The computational module is used for SCC sizing. It includes a database of ECT signals that are used to execute numerical calculations. SCC sizing can be evaluated by comparing the measured ECT signals with the calculated ECT signals within the database. We have demonstrated that the system could be used to estimate the SCC length and depth sizing in 140 s. The accuracy of length sizing showed an RMS error of 3.7 mm and the depth sizing was 0.63 mm in this work.

KEYWORDS: *nondestructive inspection, eddy current testing, flexible sensor, complicated shaped parts, stress corrosion cracking, network*

I. 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・診断について種々検討が行われている。(株)日本機械学会が制定した「発電用原子力設備規格 維持規格 (JSME S NAI-2002)」¹⁾では原子炉機器について評価不要欠陥寸法が設定され、2003年より国の技術基準として適用が開始されている。これにより、欠陥が検出されてもそ

の欠陥サイズが構造強度に影響しない範囲であれば、監視を継続しつつプラント運転を継続することが許容されるようになったが、そのためには、検査技術として、これまでの欠陥の検出技術だけでなく、欠陥のサイジング技術が必須となっている。

原子炉内機器に関する現在の検査スキームでは、まず目視検査(VT)で欠陥検出し、検出された欠陥に対し、超音波探傷試験(UT)により欠陥のサイジングを行う。構造物の内部および裏面の検査技術(いわゆる体積検査)としてはUTが主体であることは技術的にも当然であるが、金属構造物の表面・表層欠陥に関しては必ずしも十分対応できない場合があり得る。一方、表面・表層欠陥の検査技術としては伝熱管や鋼材の製造時検査等に広く実用化されている渦電流探傷試験(ECT)がある。このECTは迅速検査が可

¹ ㈱日立製作所 電力グループ 電力・電機開発研究所

² 日立 GE ニュークリア・エナジー㈱

³ 神戸大学 工学部

⁴ 東北大学 流体科学研究所

⁵ 職業能力開発総合大学校

* Corresponding author, E-mail: akira.nishimizu.gg@hitachi.com

† 現在, ㈱日立製作所 電力グループ 電力・電機開発研究所

能といった特徴を有しており、特に PWR 蒸気発生器の伝熱管検査の分野では数値解析に基づく検査支援によって、欠陥のサイジングまでを実現する手法が開発されている²⁾。しかしながら、この ECT を炉内構造物に適用するには、まだ以下の課題がある。

まず、ECT は検査面にセンサを密着させる必要があることから、炉内構造物のシュラウドや CRD スタブチューブのような 3 次元的に変化する形状部に対しては、フレキシブルでかつ広範囲を探傷できるセンサが必要である。さらに、検査は構造物が密集した狭い領域に対して遠隔操作により実施する必要があるため、機械式走査を必要としないセンサ構造とすることも重要となる。

次に、対象となる欠陥は、応力腐食割れ(SCC)が大半であり、その形状は表面や内部で枝分かれた複雑な形状に加えて、内部では部分的に接触しているような形態を有する。このため、伝熱管等の厚み数 mm の薄板に発生する比較的単純な形状の SCC とは異なり、枝分かれた SCC 形状の影響を踏まえて深さをサイジングすることが必要である。そのためには、隣接欠陥部に生じる複雑な渦電流の流れを考慮した数値解析に基づく欠陥形状認識技術の開発が必要である。

そこで、炉内構造物に対する検査技術の信頼性向上を目的に、**Fig. 1** に示すように検査技術と欠陥形状認識技術を統合し、迅速に表面・表層欠陥を評価できる迅速診断システムの開発に着手した。具体的には、(1)センサ開発、(2)欠陥形状認識技術、(3)検査システムの構築に関して以下の開発目標を定めた。

(1) センサは、炉内構造物のシュラウドや炉底部の迅速検査を可能とするため、マルチコイル化し、かつフレキシブル構造とすることで、平面部から曲率半径 25 mm の部位までを押付けのみで密着できること。

(2) 欠陥形状認識技術は、数値計算を導入し、SCC のモデル化とそのモデルに基づき逆問題解析を利用した SCC サイジング技術を構築すること。

(3) 検査システムは、上記のセンサと欠陥形状認識技術をネットワークで結合した迅速診断システムを構築するこ

と。

筆者らは、これまでにマルチコイル化したリジッドな ECT センサを製作し、表面検査の基礎検討を行った³⁾。このセンサは 17, 18 個の 2 つのコイル列で構成し、不感帯を低減するため、励磁および検出コイルのスキャンパターンを工夫することであらゆる方向の欠陥を検出できるようにした。また、SCC の欠陥形状評価技術として近年高度化している数値解析を導入し、SCC 特有の欠陥面の部分接触を模擬したモデルを提案した^{4~6)}。

本報では、平面から曲率半径 25 mm までの複雑形状部へ押付けのみで密着するフレキシブル型マルチコイル ECT センサを提案する。そして、数値解析による SCC の欠陥形状認識技術では新しい SCC 模擬モデルを導入し、最終的に、これらの技術を統合した迅速診断システムを構築して、欠陥形状認識性能に関する検証試験を実施したので以下に報告する。

II. フレキシブル型マルチコイル ECT センサ

1. センサ構造

炉内構造物のシュラウドや CRD スタブチューブのような 3 次元的に変化する形状部に対しては、平面から曲率半径 25 mm までフレキシブルに密着するセンサが必要である。そこで、エッチングにより銅配線を施したフィルム基板に複数のコイルを配置することでフレキシブル化を図った。コイル部は防水対策としてコーティングを施し、水中での使用を可能としている。また、バネを利用した押付機構により、押付けのみでセンサを検査面の形状に密着できるようにした。**Figure 2** に開発したフレキシブル型マルチコイル ECT センサとセンサを被検査体に押付けた様

Fig. 1 Concept of rigid inspection system with eddy current testing system

(a) Flexible multi-coil ECT sensor

(b) Press the flexible multi-coil ECT sensor for the flat plate and the part of radius of curvature 25mm

Fig. 2 Appearance of the flexible multi-coil ECT sensor and mechanical system to fit the sensor

Fig. 3 Scan modes of flexible multi-coil ECT Sensor

子を示す。Figure 2(a)に押付機構を装着したセンサの外観写真を示す。検査はこの押付機構を駆動装置に取り付け、被検査体に押付けた状態でFig. 2(a)に示す矢印の方向に走査する。Figure 2(b)は平板に押付けた様子と曲率半径 25 mm の曲面に押付けた様子を示しており、この押付機構により、平面から曲率半径 25 mm の被検査体までセンサを密着させることができる。

このセンサは2つのコイルを励磁および検出コイルとして利用するTR (Transmitter-receiver) 型を構成要素とし、高速にスイッチングすることで広域迅速測定を可能としている。Figure 3にコイルのスキャンモードを示す。スキャンモードは大別して、励磁コイルと検出コイルをFig. 3(a)に示すX軸方向にスイッチングするXスキャンモードとFig. 3(b)に示すY方向にスイッチングするYスキャンモードを有し、全体で48パターンのスイッチングを行うことで不感帯を低減している。その点に関して次節に示す。

2. センサ走査方向と欠陥長さ方向の検出感度特性

TR型は励磁コイルにより渦電流を被検査体に発生させ、欠陥部で生じる渦電流変化を検出コイルで捉えるものであるが、2つのコイルを水平面上に配置した場合、コイルの並び方向と欠陥の長さ方向(欠陥の向き)によっては、検出感度が低下する。本センサはXスキャンモードで生じる感度の低下を、Yスキャンで補うようにしている。Figure 4に開発したECTセンサの走査方向と放電加工スリット(以下、スリットと記す)長さ方向とのなす角の検出感度特性を示す。測定はFig. 4(a)に示すSUS316Lに設けた深さ1 mmのスリットに対して、センサの走査方向とスリット長さ方向のなす角 θ を変化させて実施した。Figure 4(b)にXスキャンおよびYスキャンモードのY1スキャンとY2スキャンの特性曲線を示す。これより、Xスキャンは、なす角 θ が90度で最大感度となることがわかる。つまり、コイルの並び方向とスリットの長さ方向が平行になる場合に最大感度を示し、直交方向へ向かうに従い感度が低下する。一方、Y1スキャンとY2スキャンは

(a) Definition of EDM slit and scanning line

(b) Experimental results

Fig. 4 Characteristics between output voltage and the angle made formed by scanning line and EDM slits

Xスキャンで感度が低下する領域を補うような特性となる。開発したECTセンサは、1度の走査でXおよびYスキャンを行うことが可能であり、最も感度が低減する θ が60度付近でもSN比20以上の検出感度を有することを確認している。以上のように開発したECTセンサは、XおよびYスキャンにより、あらゆる方向の欠陥を検出することができる。

3. 欠陥深さに対する検出性

被検査体に発生する渦電流は表皮効果により表面側に集中するため、欠陥深さが増すに従い渦電流探傷の信号電圧は増加し、ある信号電圧で飽和する傾向を示す。欠陥の深さサイジングでは、その適用範囲は信号電圧の変化する深さに限られる。このため、信号電圧と欠陥深さの特性は、サイジング可能な範囲の見極めに重要となる。Figure 5に信号電圧と欠陥深さの特性を示す。センサはFig. 5(a)に示すように深さの異なるスリットに対して直交方向に走査した。試験周波数は20 kHzと100 kHzとし、探傷器の感度は、センサより十分長い深さ2 mmのスリットの測定信号を同一の振幅値に設定した。Figure 5(b)に深さに対する信号振幅の特性を示す。信号振幅は、20 kHz, 100 kHzともに深さ5 mm程度まで増加し、それ以上の深さ

(a) Definition of EDM slit and scanning line

(b) Experimental results

Fig. 5 Characteristics between output voltage and depth of EDM slits

では飽和する傾向を示すことがわかる。これより、本センサは深さ 5 mm 程度までのサイジングに適用できると考えられる。

4. 空間分解能

次に、空間分解能の評価のため隣接する欠陥の識別性について実験的に検討した。試験体として、**Fig. 6(a)**に示す深さの異なるスリットを 2, 3 および 4 mm 間隔で設けた 3 種の試験体を準備した。センサは、コイルの並び方向とスリットの長さ方向が平行となるように配置し、**Fig. 6(a)**に示す矢印方向に走査した。**Figure 6(b)**, (c) および (d) に試験周波数 100 kHz の検出波形を示す。**Figure 6(b)**はスリット間隔 2 mm の試験体を探傷した結果で、波形は 1 つの大きなピークになり、5 つのスリットの明確な確認は困難である。一方、**Fig. 6(c)**, (d) に示すスリット間隔 3 mm 以上は、5 つのピークを確認できることから隣接スリットの識別が可能であると考えられる。なお、この識別性は、本センサのコイル直径 2.5 mm とほぼ等しい値であり、コイル径に依存すると考えている。

5. SCC の検出性

次に、SUS304L の母材部に付与した SCC の検出性を検討した。SCC は 3 点曲げにより応力を加えた状態で試験体をテトラチオン酸カリウム液に含浸させ発生させた。**Figure 7** に SCC の表面写真と試験周波数 100 kHz での

(a) Definition of EDM slit and scanning line

(b) Slits interval 2mm (c) Interval 3mm (d) Interval 4mm

Fig. 6 Experimental result of spatial resolution evaluation **Fig. 7** C scope image of SCC specimen (Imaginary part)

平面画像(以下、C スコープ画像と記す)を示す。この C スコープ画像は開発したセンサを **Fig. 7** に示すように配置し、矢印方向へ 20 mm 走査した結果である。これより、C スコープ画像は、SCC の表面形状をよく再現していることがわかる。また、信号が消失する範囲で SCC 長さを評価すると 52.5 mm となり、表面写真での長さ(51 mm)とほぼ一致することがわかる。以上のように、本センサにより模擬 SCC を鮮明に画像化できることを確認できた。

III. 数値計算による SCC 欠陥形状認識技術

1. SCC のモデル化

近年の計算機性能の向上と数値解析技術の高度化によって、渦電流探傷を対象とした数値解析支援が多数報告され

ており⁵⁾、欠陥形状認識には数値解析を利用することが有効である。しかし、SCCは結晶粒界に沿って腐食が進展するために欠陥の幅が狭く、かつ破面では部分接触により電気導通することから、数値解析の完全な適用は困難であった。そこで、これまでにSCCの解析モデルとして、導電率を与えた欠陥モデルを利用することで、破面の部分接触を模擬し、SCCの探傷信号を再現できることを報告した^{6,7)}。今回、その考え方をさらに発展させた新モデルを検討した。

まず、Fig. 8に製作したSCCの断面写真を示す。SCCはこのように細かに内部分岐した形態を示すことがあるが、欠陥モデルとしては単純化を図る必要があるため、1本の矩形スリットで模擬する。Figure 9に、このSCCの探傷結果(実測値)と同じ深さで破面の電気導通を考慮しないモデル(導電率 0(S/m))の数値計算結果を示す。数値計算は有限要素法による3次元電磁場解析を利用し、試験周波数は100 kHzとした。この結果より、信号位相はいずれもY軸方向であるが、信号の大きさは数値計算の方が実測値より2倍以上大きいことがわかる。この理由として上述した破面の部分接触が考えられる。そこで、破面の部分接触の模擬方法として、スリットに様な導電率を与えたモデルにより数値計算を実施した。Figure 10

Fig. 8 Cross-section profile of SCC

(a), (b)および(c)に、スリットに与える導電率を母材の0, 4 および20%とした結果を示す。これより、導電率を与えることで信号の大きさは小さくなるが、一方、その位相はスリットに与えた導電率比により変化し、SCCの実測値とは異なってくるのがわかる。そこで、次に位相への影響を調べるために、導電率は0(S/m)で深さを変化させたモデルで数値計算を実施した。Figure 11は深さを1.0 mm から2.4 mm まで変化させた結果を示しており、当然強度は変化するものの、いずれの信号も位相はY軸方向に発生していることがわかる。以上のことから、信号強度に関しては部分接触を考慮すべきであるが、位相に関しては部分接触のないモデルが一致しており、定性的ではあるが、表面直下では部分接触がなく、深部では部分接触を考慮することが、より現実的であると考えられる。実際のSCC断面(Fig. 8 参照)でも、表面直下では粒内割れの状態を示し、割れのギャップが数百 μm 程度あるのに対し、深部では粒界割れの状態でギャップは数十から数 μm

Fig. 9 Comparison between the experimental waveform and simulation waveform

(a) Electric conductivity ratio of the slit model 0% (b) Electric conductivity ratio of the slit model 4% (c) Electric conductivity ratio of the slit model 20%

Fig. 10 Simulation waveforms with using electrical conductivity slit model

Fig. 11 Simulation waveforms with using electrical insulator model

Fig. 12 Simulation model of SCC

Fig. 13 Comparison between the experimental waveform and simulation waveform

程度まで狭くなっていることから、SCCの深部で部分接触を考慮することがより現実的であると予想される。以上の知見から、SCCの複雑さを考慮した導電率を変化させた新しいモデルを提案する。

Figure 12 にスリットの表面側は部分接触なしとし、深さ方向に部分接触を増加させた新モデルを示す。このモデルの導電率は、表面直下は 0(S/m)で、最深部を Fig. 10 で信号強度が一致した母材の 20%とし、全体を 4 段階の導電率と設定した。Figure 13 にこの新モデルを利用した数値計算結果を示す。この計算結果は、SCCの実測結果と、強度、位相ともによく類似した波形となり、よく一致

Fig. 14 2D ECT signals of rectangular shape model

Fig. 15 Flow diagram for flaw sizing process with a database of numerical 2D ECT signals

していることがわかる。このように、位相も再現できる新モデルにより、SCCに対しても次節に示す ECT 信号の重ね合わせを利用したサイジング手法を適用することが可能となる。

ここで、今回採用した 4 段階の導電率分布については、SUS 材の模擬 SCC から得られた結果であり、実欠陥への適用性に関しては、インコネル材等の材質依存性、複雑に枝分かれした形状や内部で広がった形状などの SCC 性状依存性に対する検討が必要であると考えるが、計算資源の節約の観点からもあまり複雑なモデルは困難なことから、本論文では以下本モデルにより SCC サイジングを行い、その妥当性を評価することとした。

2. SCC のサイジング法

測定データの C スコープ画像で得られる 2 次元探傷結果から SCC をサイジングするには、SCC の位置を決定した後、数値解析を繰り返し実施することが必要であるが、計算時間の増大を招き実用上の問題がある。そこで、これまでに ECT 信号は単一矩形モデルの重ね合わせにより再現できることを筆者らが提案し、Figure 14 に示す長さが異なる単一矩形モデルを用いて、ECT 信号の 2 次元平面の解析結果をデータベース化し、評価の高速化を図った⁸⁾。このサイジング法は Figure 15 に示すように、データベースから抽出した 2 次元 ECT 信号(複素ベクトル)を重ね合わせることで、複数欠陥の合成 ECT 信号を作成し、測定による 2 次元データとのパターンマッチングを行う

ことにより、振幅と位相を考慮した最も可能性の高い欠陥形状を推定する手法である。本手法の隣接するスリットに対する深さサイジング精度を検証するため、Fig. 6 に示すスリット間隔 2, 3 mm に加えて 1 mm の試験体を用いて試験を実施した。この検証では、スリットを対象とするため、部分接触のないモデルを用いたデータベースを利用している。Table 1 に本手法による評価結果を示す。下線の評価値は誤評価を示す。これより、3 mm 間隔で隣接するスリットに対しては、すべてのスリット深さを評価できおり、2 mm 間隔のスリットでは、スリット 4 を除いて評価できていることがわかる。一方、スリット間隔が 1 mm では、評価精度が低くなる傾向を示す。以上より、単一矩形モデルの ECT 信号の重ね合わせによる評価性能は、3 mm 以上の間隔で隣接するスリットに対しては、精度よく深さサイジングできることがわかった。

なお、SCC に対しては、前項で論じた導電率を変化させた新モデルを用いて、長さ深さを変化させた解析結果をデータベース化することで、同等の空間分解能で SCC を評価できると考え、本手法を利用した迅速診断システムを構築し、SCC のサイジング精度に関する検証試験を実施した。

IV. 迅速診断システムによる検証試験

1. 測定システム

本システムは次に示す 3 つのモジュールをネットワークでつないだ迅速診断システムである。各モジュールは、検査現場での測定を模擬した検査モジュール、測定データや評価結果を確認する可視化モジュール、数値解析によるサイジング処理を行う計算知能モジュールである。ネットワーク型とすることで、例えば、事務所や設計といった現場以外の遠隔地におけるデータのリアルタイム共有化や数値解析支援によるサイジング処理で評価の迅速化を図ることができる。

Figure 16 に構築した迅速診断システムを示す。検査モジュールは、フレキシブル型マルチコイル ECT センサ、探傷器、センサを走査するマニピュレータにより構成される。センサはマルチプレクサ Box を介して探傷器に結線され、測定データは探傷器制御用コンピュータに蓄積する。可視化モジュールは測定データの取得および C スコープ画像の表示、計算知能モジュールへの解析依頼、解析結果の表示の機能をもつもので、評価者は測定データと計算知能モジュールでの解析データを実際に比較することで、推定された欠陥形状の妥当性を検証することが可能となる。計算知能モジュールは、データベースをもつ解析

Table 1 Depth evaluation result (20 kHz)

Slit No.	EDM slit definition Depth (mm)	Evaluation result (mm)		
		EDM slits interval 1 mm	EDM slits interval 2 mm	EDM slits interval 3 mm
Slit 1	0.5	<u>1.0</u>	0.5	0.5
Slit 2	1.0	1.0	1.0	1.0
Slit 3	2.0	<u>1.0</u>	2.0	2.0
Slit 4	3.0	<u>2.0</u>	<u>2.0</u>	3.0
Slit 5	3.0	<u>2.0</u>	3.0	3.0

Fig. 16 Eddy current testing system for sizing SCC

サーバからなり、可視化モジュールからの指令に基づきサイジングを実施する。データベースは、スリット用として導電率 0(S/m)のモデル、SCC 用として導電率を変化させた新モデルを用いて構築した。**Figure 17** に可視化モジュール画面を示す。画面上には、検査データの C スコープ画像と計算知能モジュールで推定した画像が同一画面に表示される。

2. 試験体

検証試験には、**Fig. 18** に示す曲面の欠陥評価用試験体と **Fig. 19** に示す SCC 試験体を用いた。いずれも、SUS316L 材の母材で製作した。曲面の欠陥評価用試験体は、曲率半径 25 mm の曲面に長さ 4, 10, 20 mm, 深さ 2, 4 mm のスリットを設けた。また、SCC 試験体は応力

Fig. 17 Screen of showing c scope image of a measured data and calculated image for a estimator

Fig. 18 Dimensions of specimen and specifications of EDM slits

Fig. 19 SCC fabrication and dimensions of specimen

を付与した状態で塩化マグネシウム水溶液に浸漬させて製作し、浸漬時間が異なる 2 体を準備した。**Figure 20** に SCC 試験体の浸透探傷(PT)結果および ECT 試験後の切断調査の結果を示す。Figure 20(a)に示す SCC 試験体 A は、長さ 55.0 mm, 最大深さ 5.16 mm(深さサイジング領域), Fig. 20(b)に示す SCC 試験体 B は長さ 37.5 mm および 21.0 mm などの SCC の複合欠陥で全長は 40.5 mm, 最大深さは 2.83 mm(深さサイジング領域)である。なお、これらの SCC 性状も Fig. 8 に示す SUS304L 材と同じように表面直下では粒内割れの状態を示し、深部では粒界割れとなり、枝分かれする傾向を示している。

3. 試験結果

試験は、ネットワーク型迅速診断システムを用いてマニピュレータによるセンサ操作性、サイジング性に関する検討を実施した。

マニピュレータによるセンサ操作性の確認として、曲面の欠陥評価用試験体の V1 スリットをマニピュレータにより 5 mm/s で走査した場合と完全に密着させて手動走査した結果を比較した。その結果、マニピュレータ走査による信号振幅は最大で 2.12 V, 手動走査による信号振幅は最大で 2.14 V とほぼ一致し、マニピュレータによるセンサ走査が問題なく実施できていることを確認した。

次に欠陥サイジング精度の確認として、曲面の欠陥評価用試験体と SCC 試験体 A および B を用いて試験を実施した。試験は周波数 20, 40, 100 kHz, センサ走査速度 5 mm/s, 走査距離 40 mm とした。欠陥サイジングのための逆問題解析には、定常遺伝的アルゴリズムを利用した⁸⁾。

Figure 21 に曲面の欠陥評価用試験体の試験周波数 20 kHz の C スコープ画像を示す。Fig. 21(a)に測定結果、(b)に本システムによる評価結果を示す。評価結果の画像中の黒線は推定したスリットの表面部である。結果より、本システムによる評価画像は、試験結果の画像と比較し、スリット信号の位置や信号強度の傾向を再現できていることがわかる。**Figure 22** に SCC 試験体 A の試験周波数 20,

Fig. 20 Surface shape and depth of SCC

Fig. 21 Comparison between the experimental results to EDM slits and evaluation result with ECT system

Fig. 22 Comparison between the experimental results to SCC specimen A and evaluation result with ECT system

40, 100 kHz の C スコープ画像を示す。Fig. 22(a)は測定結果、(b)は本システムによる評価結果である。SCC 試験体 A の評価結果は、2 本の単一矩形モデルの合成として評価された。これは Fig. 20(a) に示す SCC 試験体 A の表面形状が直線でなく若干曲がった形状をしていることによる。

次に、長さおよび深さサイジングの結果を示す。サイジング精度は、評価値と真値との差を(1)式で示す平均二乗誤差で評価した。なお、サイジング結果には別途製作した平板の疲労割れ試験体の測定結果も加えた。

Fig. 23 Length evaluation result

Fig. 24 Depth evaluation result

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (X_i)^2} \quad (1)$$

〔 X_{rms} : 平均二乗誤差, N : データ数, X_i : 真値と評価値の差〕

Figure 23 に長さサイジングの結果を示す。SCC 試験体 B に関しては、Fig. 20(b) に示す PT 結果と同じように複数の欠陥として評価しており、各欠陥の長さや全長をプロットした。Figure 23 より、スリットの平均二乗誤差は 1.0 mm、SCC は 3.7 mm で評価できることを確認した。SCC の誤差が大きくなった原因は、試験体 A の全長を 6.3 mm 過小評価したことによるが、この原因は、欠陥長さが開発したセンサの測定範囲 57 mm に近い端部の信号の評価精度が悪化したことによると考えている。

Figure 24 に深さサイジング結果を示す。深さは断面観察の結果を真値としてプロットした。また、サイジング精

度は、欠陥を矩形モデルで近似することによる精度の低下(例えば、モデル端部での精度低下)を含めて誤差評価することとし、最大深さを示す1点のみでなく、切断調査したすべての点を対象とした。そのため、Fig. 24に示すSCCや疲労割れは、1つの深さ評価値に対して複数の真値が存在する。一方、スリットは矩形なので1点のプロットとなる。この結果より、今回製作したSUS材の深さ約5 mm以下の欠陥に対して、スリットの平均二乗誤差は0.58 mm, SCCは0.63 mmおよび疲労割れ試験体は0.34 mmで評価できることを確認した。なお、検査に要した時間は、センサの走査開始からサイジング終了まで140秒、このうち、欠陥サイジング(逆問題解析)に要した時間は59秒であった。この時間は操作者の熟練度、探傷器の仕様およびコンピュータの能力等に依存するものの、これまで実用化の課題であった逆問題解析に要する計算時間の点においては、有限要素法等の数値解析を繰り返し実施する手法⁵⁾と比較すると、より短い時間で評価できると考えている。

ここに示した結果は、母材部のSCCを対象としているが、その起点は溶接部や熱影響部である場合が多い。そこで本システムの検査範囲を広げるために溶接部のもつ磁性の影響に関する検討を今後の課題と考える。

V. 結 論

原子炉炉内構造物の複雑形状部を検査できるフレキシブルなセンサとSCCのサイジング機能を備えた渦電流探傷システムを提案し、以下の結果を得た。

1. フレキシブル型マルチコイル ECT センサの開発

炉内構造物のシュラウドやCRDスタブチューブのような曲面を含み3次的に形状が変化する複雑部の検査を目的に、平面から曲率半径25 mmまでフレキシブルに密着するマルチコイルセンサを開発した。センサにはバネを利用した押付機構を装備することで、押付けのみで検査面に密着させることを可能とした。本センサの基本性能は、欠陥深さに対する検出性として、深さ5 mmのスリットまで信号振幅変化が得られること、空間分解能として3 mm間隔で隣接したスリットを識別できることを確認した。

2. SCCの欠陥形状認識技術

SCCの欠陥形状認識技術として、数値計算支援によるサイジング法を検討した。SCCは欠陥の幅が狭く、かつ破面では部分接触により電気導通する特徴があるため、有限要素法による3次元電磁場解析により、導電率や欠陥深さが信号振幅や位相に与える影響を把握した。これを踏まえて、SCCのモデル化として欠陥面での部分接触を段階的に変えた新しいモデルを提案した。このモデルにより、SCCの測定データと同様の信号が得られることを確認し、モデルの妥当性を検証した。

欠陥サイジングは、欠陥信号を単一矩形スリットの信号の重ね合わせで近似する手法を利用した。また、迅速に評価するために、あらかじめ単一矩形モデルの計算結果をデータベース化した。隣接するスリットに対する深さサイジングの検証試験により、本手法は3 mm以上の間隔で隣接するスリットに対して精度よく深さサイジングできることを確認した。

3. 迅速診断システムの検証試験

フレキシブル型マルチコイルECTセンサと数値計算支援によるサイジング法を利用して、検査モジュール、可視化モジュールおよび計算知能モジュールの3モジュールをネットワークで結合した迅速診断システムを構築し、システムの検証試験を実施した。試験は、SUS316L母材の曲率半径25 mmに設けた深さ4 mm以内の3つのスリット、平板に付与した深さ約5 mm以内の2つのSCCに対して実施した。その結果、マニピュレータによる押付走査のみで良好に探傷ができることを確認した。また、本システムの欠陥サイジング精度として、欠陥長さは、放電加工スリットを平均二乗誤差1.0 mm, SCCを3.7 mm, 欠陥深さは、放電加工スリットを平均二乗誤差0.58 mm, SCCを0.63 mmで評価できることを確認した。

本技術開発は、革新的実用原子力技術開発提案公募事業(助)エネルギー総合工学研究所「構造物適応型の電磁誘導非破壊検査システムの実用化開発」平成14から16年度として実施した。

— 参考文献 —

- 1) 財団法人日本機械学会, 発電用原子力設備規格 維持規格(2002年改訂版)(JSME S NA1-2002).
- 2) 川田かよ子, 川瀬直人, 黒川政秋, 他, “インテリジェントECTシステム(蒸気発生器伝熱管検査用新型ECT(渦流探傷)システム),” 検査技術 6月号, 66-72 (2005).
- 3) 櫻井 望, 黄 皓宇, 高木敏行, 他, “数値シミュレーション支援によるアレイマルチコイル型渦電流探傷プローブの開発,” 日本機械学会論文集(A編), **68**, 1801-1808 (2002).
- 4) 大島賢一, 橋本光男, “渦電流探傷試験におけるSCCの数値解析モデル化の検討,” 日本AEM学会誌, **10**[4], 348-388 (2002).
- 5) 黄 皓宇, 高木敏行, “渦電流探傷シミュレーションとコンピュータの能力向上,” 日本AEM学会誌, **9**[3], 322-329 (2001).
- 6) 長屋嘉明, 高木敏行, 黄 皓宇, 他, “テンプレートマッチングを用いた画像処理による渦電流探傷信号からの複数欠陥の同定,” 日本機械学会論文集(A編), **69**[684], 60-67 (2003).
- 7) T. Matsui, A. Nishimizu, M. Koike *et al.*, “Development of eddy current testing system for SCC sizing inspection,” *The 6th Int. Conf. on Nuclear Thermal Hydraulics, Operations and Safety (NUTHOS-6)*, Oct. 2004, ID: N6P336.
- 8) 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による自然き裂の同定手法,” 日本計算数理工学会誌, **16**, 13-18 (2004).