

エネルギーインフラを支える高度検査技術

Advanced Inspection Technologies for Stable Energy Infrastructure

北澤 聡
Kitazawa So
大谷 健一
Otani Kenichi小田倉 満
Odakura Mitsuru
安達 裕二
Adachi Yuji

日立グループは、地球温暖化防止対策とエネルギーの安定供給の観点から、社会の基盤であるエネルギーインフラを将来にわたって支えるための高度検査技術の開発に、積極的に取り組んでいる。代表的な検査技術として、フェーズドアレイ超音波探傷システム、ガイド波を用いたポータブル配管減肉検査システム、渦電流を用いた検査システムなどがある。いずれも短時間で信頼性の高い検査を実現する技術で、発電プラントに代表されるエネルギーインフラの高効率かつ安全な運用に大きく寄与している。

1. はじめに

世界的に環境問題への注目が集まる中、CO₂の排出量削減とエネルギーの安定供給を両立させる鍵の一つとして、エネルギーインフラを支える高度な検査技術が求められている。日立グループは、特に原子力や火力の発電プラントを長期的に安定運転するための超音波や渦電流を使った検査技術の開発を長年行っており、そこで培われた技術の一般産業分野への展開も図っている。

ここでは、これらの高度検査技術の代表例として超音波探傷、ガイド波配管減肉検査、渦電流探傷に関する技術の概要と適用例について述べる。

2. 超音波探傷

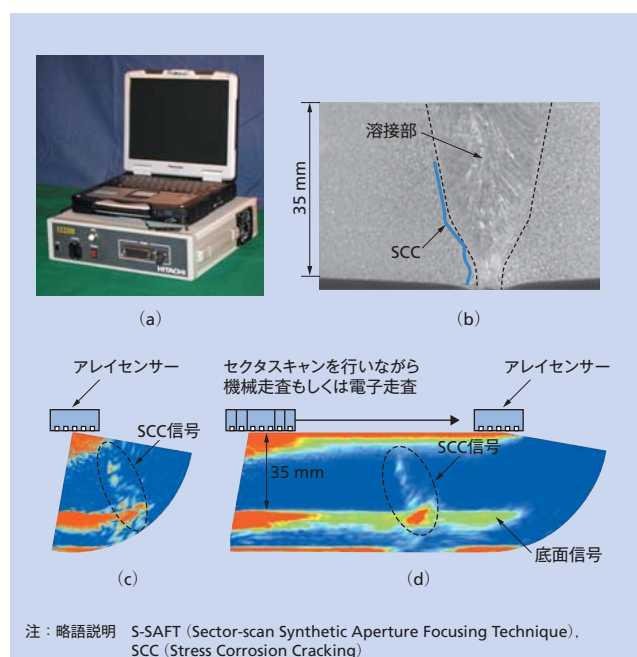
2.1 フェーズドアレイ超音波探傷

フェーズドアレイ超音波探傷は複数の圧電素子が配列したアレイセンサーを用い、各素子に位相を制御したパルス電圧を印加することにより、検査対象内部の任意の位置に超音波ビームを集束させて探傷する技術である。ビームの集束性と電子制御走査により、傷の寸法測定精度が向上し、検査時間も短縮できることが特徴である。

日立グループは、装置の小型化と高機能性を両立したフェーズドアレイ超音波探傷装置を開発し、製品化した。

この装置は独自に開発したS-SAFT (Sector-scan Synthetic Aperture Focusing Technique) 信号処理機能¹⁾を搭載している。S-SAFTは、セクタスキャンを行いながらアレイセンサーを機械走査もしくは電子走査し、複数枚のスキャン画像を合成する方法であり、従来に比べて探傷画像のSN (Signal-to-Noise) 比と空間分解能が向上する。

溶接部に発生したSCC (Stress Corrosion Cracking: 応力腐食割れ) をS-SAFTで探傷した例を図1に示す。従来法よりも明瞭(りょう)にSCC信号がとらえられている。フェーズドアレイ超音波探傷技術は、すでに原子炉内機器、配管、蒸気タービンといった発電プラントの重要部位の検査において有効性が示されている。蒸気タービンの低圧



注：略語説明 S-SAFT (Sector-scan Synthetic Aperture Focusing Technique), SCC (Stress Corrosion Cracking)

図1 | フェーズドアレイ超音波探傷装置と探傷画像
フェーズドアレイ超音波探傷装置「ES3300」の外観を(a)、溶接部に発生したSCCを(b)、SCCの従来セクタスキャン画像を(c)、S-SAFT画像を(d)にそれぞれ示す。

ロータホイールのダブテイル部（動翼植込み部）の健全性を確認することを目的に、スリットを設けた試験体でのフェーズドアレイ超音波探傷例を図2に示す。ロータに設置した回転機構でホイール上のセンサーを移動させながら探傷を行う。同図(d)に示すように、スリットからの反射信号（3か所）が明瞭にとらえられている。超音波を用いると、翼をホイールから外さない状態で検査できるため、検査工程を大幅に短縮することができる。

2.2 三次元フェーズドアレイ超音波探傷システム

三次元フェーズドアレイ超音波探傷システムは、検査速度のさらなる向上を目的に開発したものである²⁾。このシステムでは、圧電素子を二次元的に配列したマトリクスアレイセンサーを用い、超音波ビームを電子的に三次元走査する。各圧電素子に印加するパルス電圧の位相を制御することにより、任意のパターンの三次元走査を行うことができる。さらに、探傷結果をモニタ上にCAD（Computer-aided Design）データと重ねて三次元表示させることが可能であるため、データ取得から評価までを効率よく短時間で行える。また、従来法よりも超音波ビームの集束性が高くなるため、傷の寸法測定精度も向上する（図3参照）。

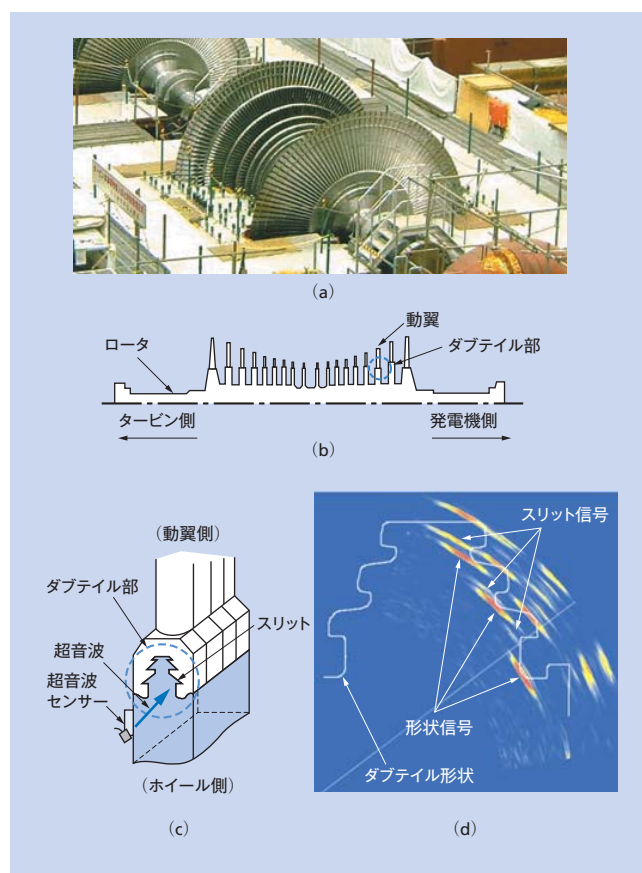


図2 | 蒸気タービン低圧ロータホイールのダブテイル部の超音波探傷
蒸気タービンの外観を(a)、蒸気タービンのロータ軸方向断面図を(b)、ダブテイル部の構造とセンサー設置位置を(c)、ダブテイル部のフェーズドアレイ超音波探傷画像を(d)にそれぞれ示す。

ステンレス鋼に複数の平底穴を加工した試験体の探傷結果をCADデータと重ねて表示した例を同図(d)に示す。試験体底面と平底穴先端での反射信号が三次元的に明瞭にとらえられている。一般的に超音波探傷では、傷と形状の反射信号を区別するためには、ある程度の専門的な知識や経験が必要であるが、CADデータと重ねることにより、信号の判別が容易になる。次に、深さ3 mmのスリットを

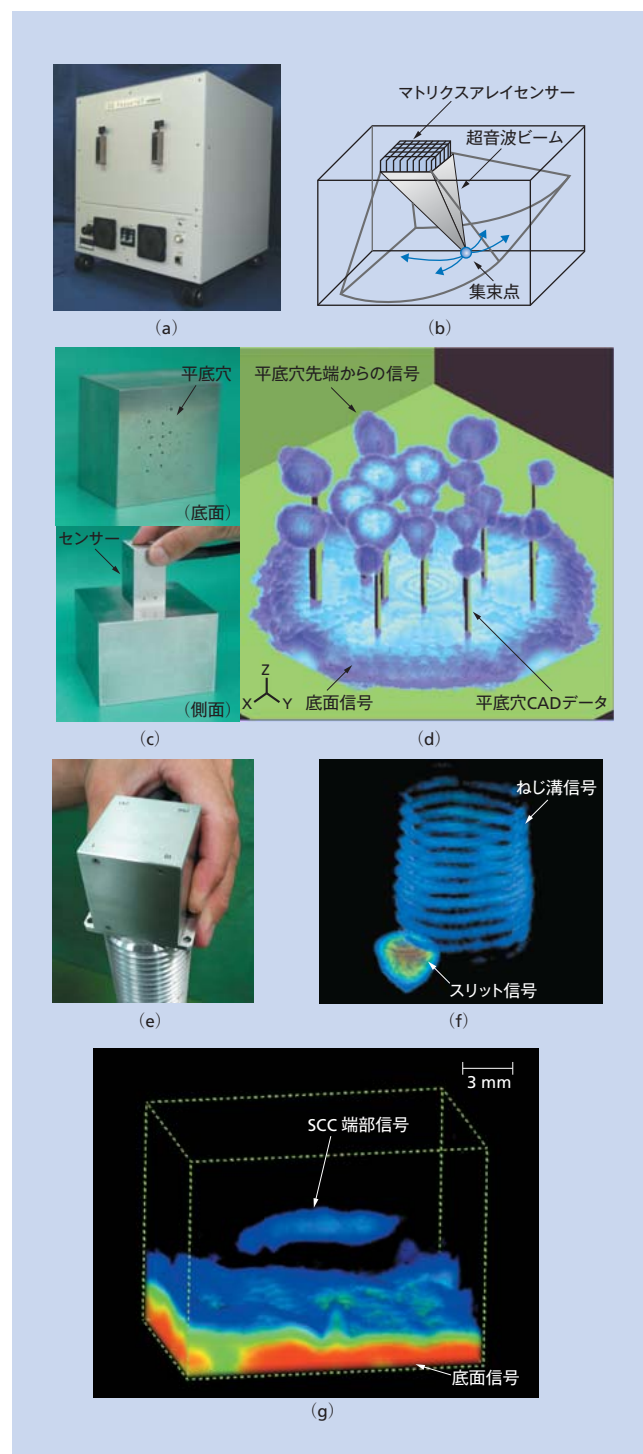


図3 | 三次元フェーズドアレイ超音波探傷システムと三次元探傷画像
送受信装置の外観を(a)、三次元ビーム走査を(b)、平底穴ステンレス試験体を(c)、ステンレス試験体の三次元探傷画像を(d)、M24ボルト試験体を(e)、傷を模擬した深さ3 mmのスリットが付与されているボルト試験体の三次元探傷画像を(f)、SCCの三次元探傷画像を(g)にそれぞれ示す。

付与したM24ボルト試験体を探傷した例を同図の(f)に示す。センサーやボルトを固定した状態でこのような画像が得られるため、短時間で多数の検査を行うことができる。最後に、SCCを探傷した例を(g)に示す。溶接線に沿ったSCC端部信号が明瞭に現れており、SCCの空間的な広がりを推定することができる。これらの例において、データ取得から三次元画像の表示までにかかる時間は数秒である。

三次元フェーズドアレイ技術は発電プラント検査への適用が計画されており、その後は、一般検査向け装置としても展開していく予定である。

3. ガイド波配管減肉検査

細長い材料の中を長手方向に伝播(ば)する超音波であるガイド波を用いたポータブル配管減肉検査システムを開

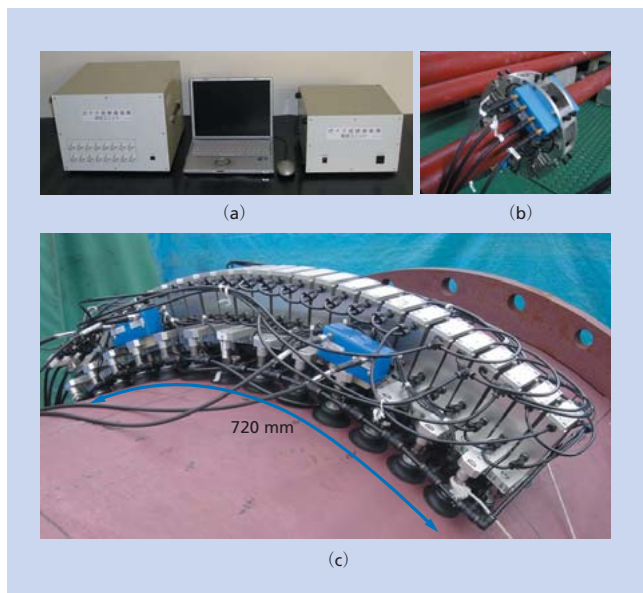


図4 | ポータブルガイド波検査システムの外観
ガイド波送受信装置を(a)、50 A用配管センサーを(b)、大口径配管用部分設置型センサーを(c)にそれぞれ示す。

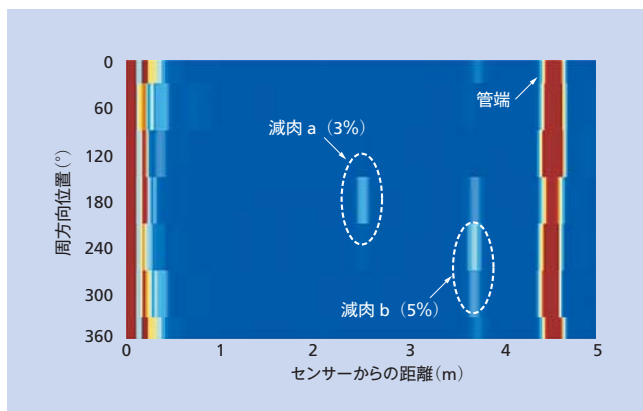


図5 | 500 A配管の部分設置型センサーによる測定例
配管の内厚は9.5 mmで内面にポリエチレンライニングが施工されており、断面積に対して3%欠損の模擬減肉aと5%欠損の模擬減肉bが180°と270°の位置にそれぞれ付与されている。この測定は部分設置型センサーの位置を60°ピッチで変えながら測定した。

発した³⁾(図4参照)。従来は、配管を覆っている保温材を全面除去する必要があったが、このシステムでは一部の保温材の脱着だけで数十メートル範囲の減肉を一括検査できる。センサーは50 Aから800 A程度まで配管径に応じて数種類あり、直管や口径の小さい曲げ管で、管断面積に対して1%欠損の減肉まで検出することができる。

また、大口径配管やタンク点検向けに、部分設置型のセンサーも開発中である。模擬減肉を付与した500 A配管で、部分設置型センサーの検出性能を確認した結果を図5に示す。模擬減肉を付与した角度位置で反射波の強度が大きくなっており、このケースでは減肉の周方向位置の特定も可能であることを示している。現在、発電プラントなどでのフィールドデータの蓄積と評価方法の確立を進めており、今後実機へ適用していく予定である。

4. 渦電流探傷

4.1 伝熱管検査用渦電流探傷システム

渦電流探傷法は、金属の表面近傍の傷を検査するのに適した手法である。日立グループは、渦電流を用いた熱交換器の伝熱管検査システムを開発した⁴⁾(図6参照)。センサーを管内部に挿入して機械的に走査する。対象としている伝熱管は非磁性材であり、その両端は管板と呼ばれる磁性材で保持されている。管板には貫通穴が加工されており、その中で管径を押し広げて密着させ、伝熱管を固定する。以下、この領域を拡管部と記す。

拡管部の構造を同図(a)に示す。拡管部の境界では管外面から疲労割れが生じる可能性があるため、特に検査が必要な場所である。しかし境界部では、管内面の段差や、磁

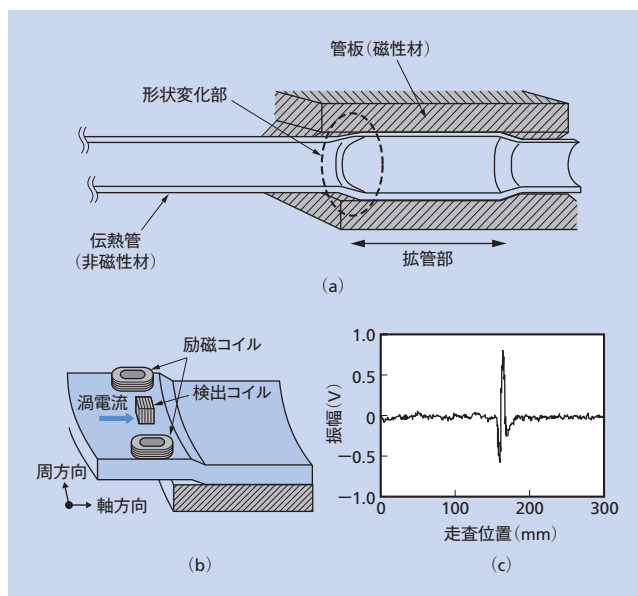


図6 | 伝熱管検査用渦電流探傷システム
伝熱管拡管部の構造を(a)、センサーの配置を(b)、肉厚の50%の深さの人工割れを管外面に付与した場合の検出信号を(c)にそれぞれ示す。



図7 | フレキシブル渦電流探傷センサー
曲面にも追従するフレキシブル渦電流探傷センサーを曲げた状態を示す。

性材である周囲の管板によって渦電流探傷信号にノイズが重畳する。このシステムはこのような拡張部でも検査が可能である。センサーは、同図 (b) に示すように、管の長手方向に渦電流を流して周方向の渦電流を検出する独自のコイル配置となっており、二つの励磁周波数を利用してノイズを低減している。拡張部の形状変化部に肉厚の50%の深さに達する人工割れを管外面に付与した場合の検出信号を同図 (c) に示す。

4.2 フレキシブル渦電流探傷センサー

日立グループは、複数のコイルをフレキシブル基板上に配列したフレキシブル渦電流探傷システムも開発した(図7参照)。複数コイルによって検査領域が拡大し、従来の単一コイルセンサーよりも迅速な検査が可能となった。また、センサーが検査面に追従して曲がるため、平面だけでなく曲面でも検査可能である。独自開発の信号処理法によって、ノイズと傷信号は明瞭に識別される⁵⁾。

これらの渦電流探傷技術は、発電プラントや一般産業製品の検査に適用されつつあり、今後も適用対象の拡大を図っていく。

5. おわりに

ここでは、高度検査技術の代表例として超音波探傷、ガイド波配管減肉検査、渦電流探傷に関する技術の概要と適用例について述べた。

近年、地球温暖化は世界規模で深刻な問題として大きく取り上げられており、これに向けた対策は、国境を越えて取り組むべき大きな課題の一つとなっている。CO₂の排出量削減とエネルギーの安定供給を両立させる鍵の一つは、発電プラントに代表されるエネルギーインフラの高効率、かつ安全な運用が握っており、日立グループの高度な検査技術が大きく寄与できると考えている。

参考文献

- 1) 菊池, 外: フェーズドアレイ式超音波探傷装置の開発, 日本保全学会, 第5回学術講演会要旨集, p. 310~311 (2008)
- 2) 北澤, 外: 三次元超音波探傷システム「3D Focus-UT」の開発, 日本非破壊検査協会, 平成20年度秋季大会講演概要集, p. 11~12 (2008)
- 3) 三木, 外: ガイド波を用いた大口径配管の減肉検査技術, 日本保全学会, 第6回学術講演会要旨集, p. 561~564 (2009)
- 4) 成重, 外: 渦電流探傷技術による伝熱管拡張部の検査方法に関する検討, 日本非破壊検査協会, 平成21年度春季大会講演概要集, p. 201~202 (2009)
- 5) A. Nishimizu, et al.: Development of eddy current testing system for components in reactor pressure vessels, Proc. 5th Int. Conf. on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, San Diego, USA, May 10-12, 2006, pp. 895-901 (2006)

執筆者紹介



北澤 聡
1996年日立製作所入社, 電力システム社 エネルギー・環境システム研究所 原子力開発センタ 予防保全プロジェクト 所属
現在, 超音波検査技術の開発に従事
工学博士



小田倉 満
2003年日立製作所入社, 日立GEニュークリア・エナジー株式会社 日立事業所 原子力品質保証部 所属
現在, 原子力発電所の非破壊検査技術の開発に従事



大谷 健一
1991年日立製作所入社, 日立GEニュークリア・エナジー株式会社 日立事業所 原子力設計部 所属
現在, 原子力発電所の検査装置の設計に従事



安達 裕二
1979年日立製作所入社, 電力システム社 日立事業所 品質保証本部 火力水力品質保証部 所属
現在, 原子力・火力発電所の検査技術の開発に従事