

保守に対する検査の役割といくつかの対応

1. はじめに

国内の構造物も長寿命化が進み、保守に対する関心が高まっています。非破壊検査は保守の合理化の手段として活用されています。しかし、構造物の種類は多種多様であり、また同種の構造物においても製造履歴や稼働履歴などの多様化のために、構造物の残存寿命にも大きな差異が生じることも予測される。したがって、画一的な検査の適用や保守方法では極めて保守コストが増大することも懸念される。

合理的な保守手法として、リスク・ベース・メンテナンスが注目を集めている。各部位におけるリスクを定量化し、よりリスクの高い部位に対し集中的に投資することを目的としている。リスクには破壊の生じる確率と破壊が生じたときの被害の大きさが考慮される。

このようにリスクが定量化されるに伴って、非破壊検査の結果の定量化とともに、非破壊検査の多様化が強く求められてきている。本報告では、非破壊検査のニーズの多様化の検討と、当社が実施しているいくつかの非破壊検査の試みについて紹介する。

2. 非破壊検査の多様化の検討

検査による構造物のリスク低減の様子を模式的に図1に示している。構造物は運転時間の増加に伴って経年劣化が進み、寿命消費量を増加させる。しかし、この寿命消費量は構造物の製造履歴、稼働履歴や稼働環境において大きな不確実さを持っている。構造物の寿命消費は、曲線ABCと曲線AB'C'の間にはばつきを持っており、この状態

で構造物を安全に評価しようとする、最も残存寿命の短い曲線ABCで残存寿命を評価することになる。

製造履歴や稼働条件を考慮することで不確実さを低減することは可能と考えられるが、より確実にするためには非破壊検査を実施することである。適切な非破壊検査の適用により、不確実さを大きく低減できる。

しかし、非破壊検査結果にも必然的に誤差を含み、かつ検査後の稼働条件によって残存寿命は変化するので、検査後においても残存寿命に対する不確実さはなくなる。検査後の残存寿命のばらつきの範囲をDEF及びD'E'F'にあるとすると、検査後の残存寿命は、より安全側の曲線DEFで評価される。

ここで、次回の定期検査時期における残存寿命を予測すると、検査前のB₁₀₀-Bから検査によってB₁₀₀-Eまで延伸できたことになる。もし残存寿命がなお不十分な場合には、定期検査時期を前倒しするか、あるいはより誤差の少ない高度な検査を

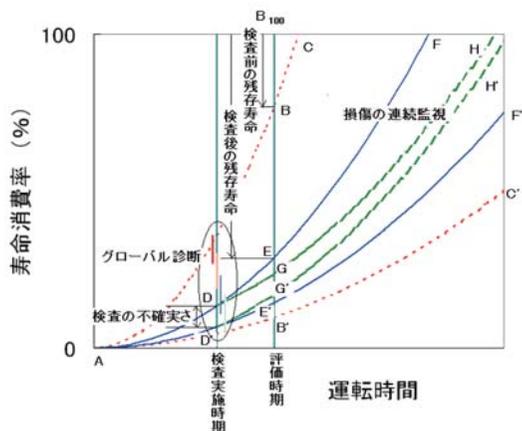


図1 検査実施によるリスク低減を示す模式図

適用して誤差を低減して評価しなおす必要があるといえる。このことより、構造物の検査は経年劣化の進捗に伴ってより精度の高い検査が要求されるといえる。

また、最も危惧される損傷を稼働中に連続監視できれば、予測される残存寿命の不確かさをより軽減でき、各時点における残存寿命を逐次予測できるので有益である（図中 DGH、DG' H'）。このため、稼働中の劣化監視技術も期待されている。

他方、残存寿命に不確かさを含む多数の特定の構造物に対して、損傷の程度をランク付けするグローバル診断も期待されてきている。グローバル診断における非破壊検査に対しては、低コストで構造物のランク付けが迅速にできることや安全側にランク付けが行われることが求められる。より経年劣化が進行しているランクに位置する構造物に対して集中的に保守することで、全体の保守コストの合理化が図られる。

3. 連続監視への取り組み

3.1 高温超音波センサの適用

高温で長期間の耐久性に優れた高温超音波センサを開発し、高温配管の減肉監視システムを開発している。この高温超音波センサは、カナダ CANDU 炉の原子炉近傍の小口径配管に適用されており、減肉を既に 10 年に亘り連続監視を続けている。また、この 10 年の連続監視の実績を踏まえ、2015 年に計画されている新型 CANDU 炉では、減肉や流速の状態監視を強化することで、定期検査の間隔を 1 年から 3 年に延長することが計画されている。

原子炉のような高温で稼働される構造物の損傷の連続監視を行うには、高温でも安定して長期間計測可能なセンサの開発が不可欠となる。圧電素子を保護板やシューに取り付ける際に接着剤を用いていた従来のセンサに対し、ニオブ酸リチウム

単結晶セラミックスの圧電素子（キューリー一点：1200℃）をろう付で接合することにより耐熱性を著しく改善した高温用超音波センサを開発し、カナダの CANDU 炉で約 300℃ で 10 年の連続監視の実績に貢献している。

高温用超音波センサの概要を図 2 に示す。また、耐熱性の試験結果の例を図 3 に示している。450℃ の電気炉中に約 5 年半放置した試験において、感度の低下もほとんど見られず極めて優れた耐熱性が実証されている。また、この結果から、300℃ においては、CANDU 炉の 10 年の連続監視実績でも更に十分な耐熱性の余裕があることも推定される。

図 4 に CANDU 炉における減肉監視部位近傍の概要を示している。多数の小口径配管が炉心部に配置されている。図 5 に高温探触子の配管への取付けの例を示している。ここではセンサと配管の間に柔らかい金箔を挟み、ねじで締め付けて、取付けたバネによって加圧することで金箔を介して超音波を試験体に直接に伝搬させている。

測定した超音波波形は最新のデジタル・シグナル・プロセッシングにより、数 μm での減肉測定を可能にしている。図 6 に本方法によって配管の減肉を連続監視した結果の例を示しているが、微小な減肉の過程をよく評価できている。なお、温度による音速変化は、配管近傍に取付けた熱伝対で温度を測定することで補正している。

3.2 光ファイバセンサの適用検討

経年劣化の連続監視に光ファイバセンサの活用も期待されてきている。光ファイバを直接にセンサとして用いるので、光通信により信号を長距離伝送できること、電磁ノイズに強いことや、光信号を利用しているため火災や爆発の恐れがないなどの特長を持っている。

当社は 2000 年に Smartec 社（スイス）より静的計測専用の SOFO V システムを、また 2005 年

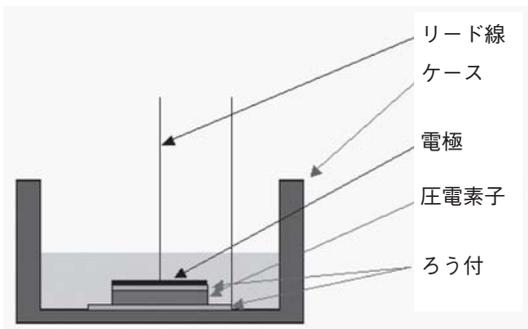


図2 高温用超音波センサの構造

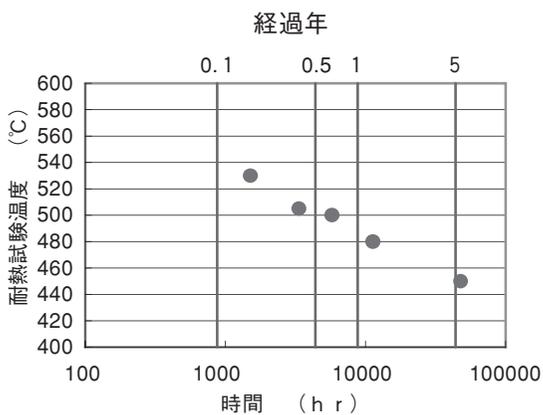


図3 高温用超音波センサの耐熱性

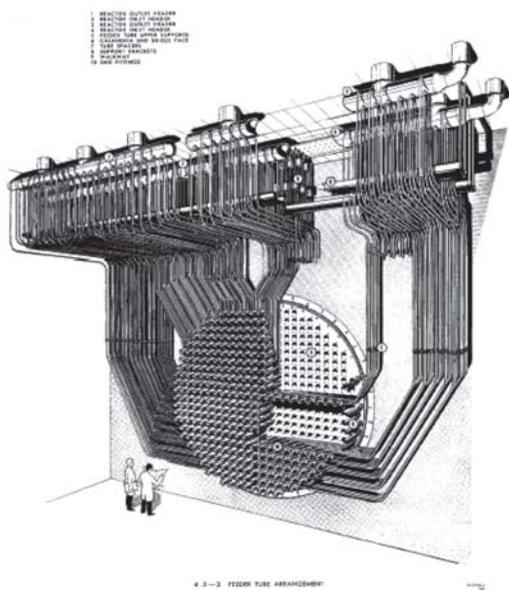


図4 監視部位の模式図



図5 高温での減肉連続監視方法の例

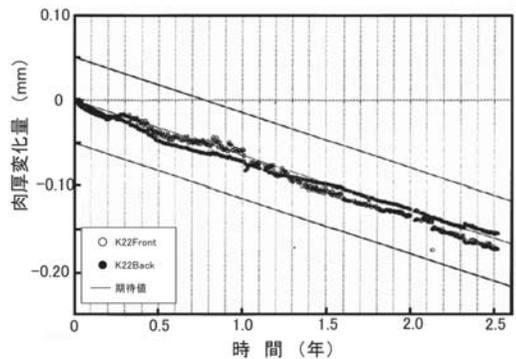


図6 高温での減肉連続監視結果の例

に動的計測専用の SOFO Dynamic を導入し、建物及び橋梁のヘルスマニタリングへの適用検討を実施してきている。

SOFO とはフランス語の “Surveillance d’Ouvrages par Fibres Optiques” の略称で、「光ファイバによる構造物のモニタリング」の意味を持っている。この SOFO システムは導入時点において既に橋梁、トンネル、ダム、杭、アンカー壁、原子力発電プラントや歴史的建造物などに多数の適用実績が紹介されていた。本システムの導入後、国内で

の普及を図るべく適用開発に取り組み、架設中の橋梁のプレキャストコンクリート床版の変形モニタリングや、建設中のビルの静的及び動的モニタリングへの適用などの実績を得ている。

図7にSOFOの標準センサの概要を示している。センサは測定用ファイバと参考用ファイバの2本で構成されており、測定用ファイバには予めプリテンションが加えられており、一方、参考用ファイバはらせん状に巻かれてフリーな状態となっている。SOFO Vシステムは、この2本の光ファイバの長さの差をマイケルソン干渉計により計測するものである。すなわち、レーザ光源より発射された光（波長：1550 nm）はセンサ内のカップラーで分割されて測定用と参考用の2本の光ファイバに導かれ、各ファイバの端部に設けられた鏡で反射し、再びカップラーで集光され、本体の計測器に導かれる。2重マイケルソン干渉計方式のため、 $2\mu\text{m}$ の分解能での高精度の測定が可能になる。

SOFO Dynamicの場合は、ヘテロダイン低コヒーレンス干渉計を介して $0.01\mu\text{m}$ という高い分解能で計測できる。この他、各種長さのセンサ（標準で $0.25\text{m} \sim 10\text{m}$ 、オプションで $10 \sim 20\text{m}$ ）を揃えており、用途に応じて変位を精度よく測定可能である。

東京豊洲地区における33階建ての高層ビル（高さ147 m）の建造中にSOFOシステムを取り付けてヘルスマニタリングを行った。この目的は、

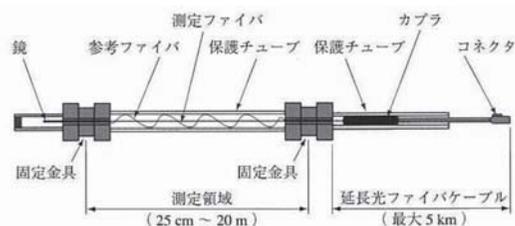


図7 SOFO標準センサの概要

(1) 建設中に柱に作用する荷重変化を長期的に測定し、構造設計検証の一助とすること、(2) 建設後に、地震、台風、地盤沈下などによる荷重分布変化を長期的に測定し、ビルの健全性を監視すること、(3) 建設中および建設後に動的計測（固有振動数、振動モード、減衰など）を行い、ビルの動的挙動の把握と健全性監視を行うことである。図8に柱へのSOFOセンサ取付けの例を示している。

図9は建設中の柱の変位の変化の測定結果の例を示している。2階の柱に設置したセンサで、上層部の階が建設されていくにつれて圧縮ひずみが増大していくが、ビルの頂上に設置されていた2基の巨大なクライミングクレーンがそれぞれ撤去された図中の期間1、期間2においてひずみの変化が生じている。特に、クレーンと共に各種の重機、ストックされていた鋼材・足場などが撤去された期間1におけるひずみの減少がより顕著に測定されている。

図10は、最大瞬間風速15m/sの強風日に、動的計測を行った例を示している。図中には、比較のためにひずみ式加速度センサによる計測結果も示しているが、ノイズのみの波形となり、微小な加速度を計測できていないのがわかる。これに対して、SOFOシステムでは、 $1\mu\text{m}$ 以下の微小な振動をも明瞭に捉えており、これの周波数分析結果よりビルの一次曲げ固有振動数： 0.38Hz が明確に捕らえられた。

この他、橋梁への適用を検討している。橋梁のヘルスマニタリングでは、橋桁のたわみがモニタリングすべき重要なパラメータの一つである。独立行政法人土木研究所内の鋼製試験橋梁にSOFOセンサを設置し、橋桁のたわみ計測を行い、実測値と比較しても妥当なたわみ分布が得られることを確認している。

2個の支点を有する1スパン梁の $1/4L$ 、 $1/2L$ 及



図8 柱へのSOFOセンサ取付例

び3/4Lの位置に上下900mmの間隔で合計6本の3m長さのSOFOセンサを取り付けた。ここで測定される変位は橋軸方向の変位であるが、曲率解析法を用いて垂直方向の変位分に変換して実測値と比較した。図11に得られた試験結果の例を示している。なお、ここでの载荷は、総重量20トンのダンプカーにより各種の荷重を与えた。

×で示した実測値は、インダクタンス式変位計で定点からの距離の変化を求めたもので、測定値には剛体変位も含まれるので、図中には剛体変位を補正した値を示している。SOFOからの測定値

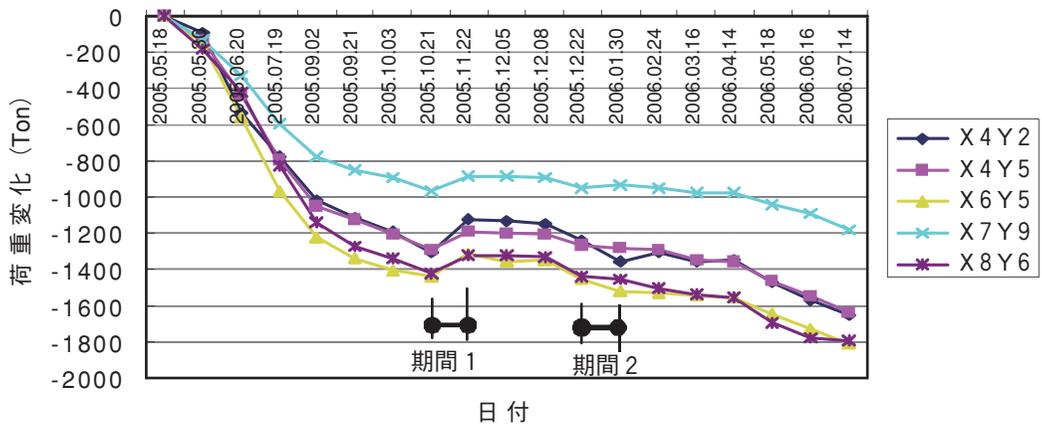


図9 SOFOセンサによる建設中の柱の変位の変化の測定例

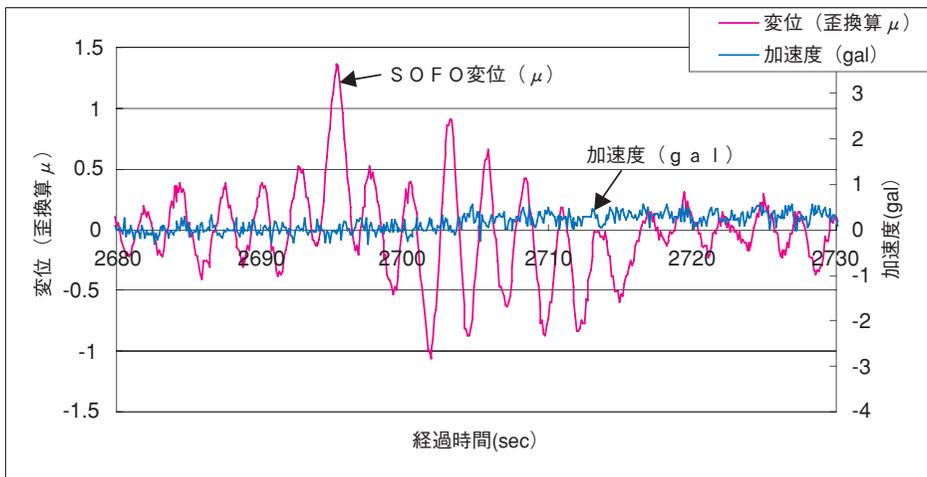


図10 SOFOによる高層ビルの強風時の変位の動的計測の例

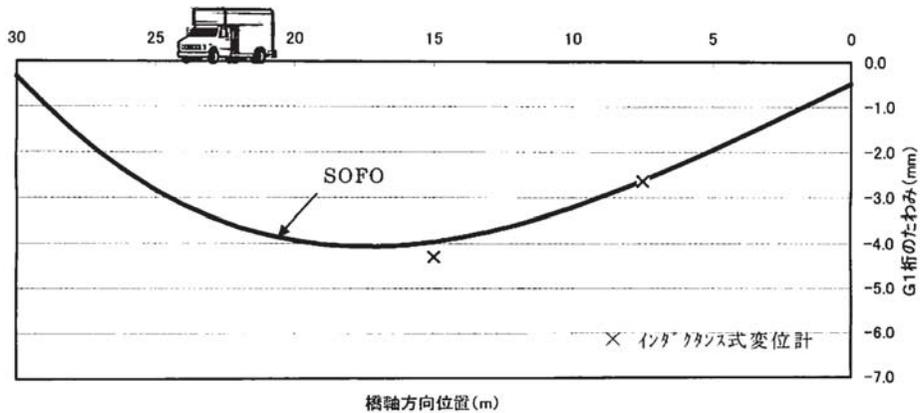


図11 SOFOシステムによる橋梁の垂直方向変位計測結果と実測地の比較例

を曲率解析法で用いて垂直方向の変位分布に換算した結果は、実測値とよく一致しており、ヘルスマonitoringにSOFOシステムが適していることが実証できた。なお、ここでの測定は静的変位を求めたものであるが、動的変位の計測も有効であることも確認している。

また、光ファイバの一部にブラッグ格子を持たせたFBGセンサの適用技術開発にも努めている。ブラッグ格子部のひずみ(又は温度)の変化に伴って変化するブラッグ格子部からの反射光の波長の変化よりひずみ(又は温度)の変化を監視する方法である

図12に計測システムのブロック図の例を示すが、ブラッグ格子部を透過および反射した光を光ファイラ(WDM フィルタ)に通した後の光量を光電変換素子で電圧に変換して測定するシステ

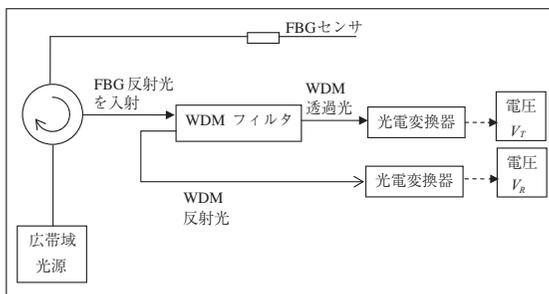


図12 WDMフィルタを使ったFBGセンサ計測システム構成図

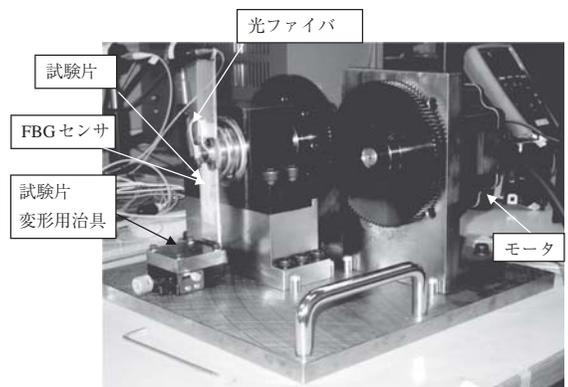


図13 FBGセンサによる回転体ひずみ計測概念確認機外観

ムであり、電気量で変化量を測定することより高速での計測が可能であることや、光の波長を直接測定するための光学系を用いていないために耐震性に優れているなどの特長を持っている。高速で微弱な変化の測定が可能であるために、AE計測への適用も可能であり、検討を進めている。

本システムを用いて、回転体の監視システムを開発した。図13に本システムの外観を示している。回転部に取り付けたFBGセンサからの信号は軸心に取り付けた光ロータリージョイントを介して外部に取り出して処理している。なお、回転体に応力を付加する目的で、下部に突起部を設けて回転体が衝突するようにして試験した。2000

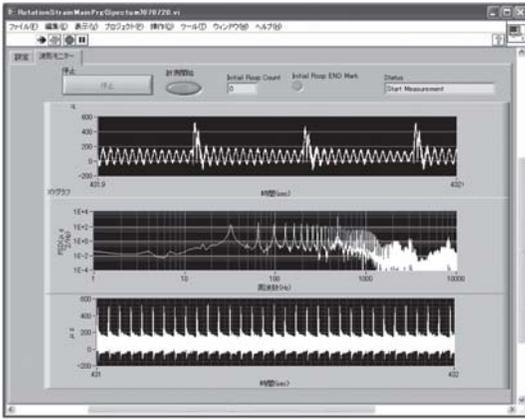


図14 ひずみ波形と周波数解析結果

rpm における計測結果の例を図 14 に示している。回転体に加わる応力のほかに、羽部の曲げによる共振周波数が計測できており、損傷に伴う共振周波数の変化の監視にも期待している。

なお、FBG センサシステムの構築では、独立行政法人 産業技術総合研究所 計測フロンティア部門 秋宗淑雄部門長と津田浩博士から多くのご指導と助言を頂いている。

4. グローバル診断への取り組み

4.1 アコースティック・エミッション（AE）試験

グローバル診断（短時間での計測で機器・構造物の広い範囲の損傷程度を評価する技術）としてアコースティック・エミッション（AE）試験によるタンク底板腐食診断に取り組んでいる。この診断手法は、欧米では既に数千基の適用実績があり、国内でも日本高圧力技術協会規格 HPIS G 110 TR 2005「AE法による石油タンク底部の腐食損傷評価手法に関する技術指針」が2005年に制定されるなど適用の機運も高まってきている。

AEでの測定精度を阻害する最大の要因として、種々の原因で発生するノイズが挙げられるが、ノイズが損傷に伴う信号に加算されることでより

過大に損傷を評価する結果となる。グローバル診断としてみれば、安全サイドの評価であり、グローバル診断の必要条件は満たされるものの、経済性を大きく損なう結果となる。このことから、腐食に伴う信号とノイズとの積極的な識別技術に注力している。特に近年のコンピュータ技術の発展は目覚しく、これに伴ってAE計測装置も高度化し、AE信号を高速で取り込むと共に、種々の処理システムも充実してきている。

ノイズの発生要因には風によるノイズ、配管を伝播してくるノイズや油の払い入れや払い出し時の内部流体の流れに伴うノイズなどが知られている。図 15 は、同一の健全なタンクに対して、異なる風環境のときにAE試験を行って、1時間で発生した1チャンネル当たりのヒット数を計測時の風速で比較した結果である。風が強くなるにつれて急激にヒット数が多くなり、健全な同一タンクの計測であることから風によるノイズが多く発生していることがわかる。

ノイズの発生が少ない環境での計測に努めるとともに、より経済的な計測法を確立するために、ノイズを積極的に除去することに努力している。ノイズ除去には、損傷に伴う信号の波形特徴を

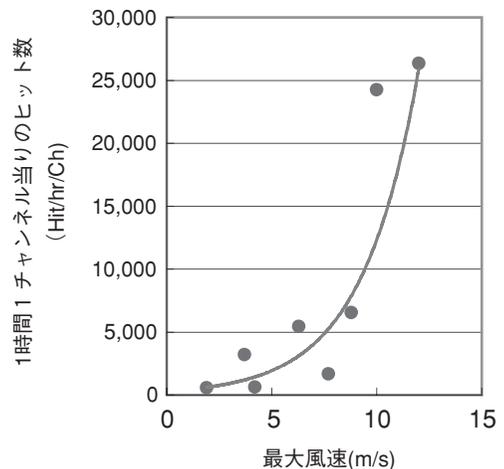


図15 ノイズ発生に及ぼす風の影響

抽出してノイズを識別する方法も時には有効である。ここでは、信号の発生位置を三次元的に標定して音源位置からノイズを特定することがタンクの AE 計測で有効なことについて紹介する。

固定屋根を持つタンクの場合、タンク内で蒸発した内容物がタンク内面で結露し、それが液滴となり液面に落下することでノイズが発生することがある。この場合、タンク側板に上下 2 段でセンサを取り付け、上段のセンサをガードセンサとして用いることが一般に行われる。

汎用の AE 計測装置による計測では、最初の信号受信から、一定の時間内に受信された信号の全てを同一の AE 事象（イベント）により発生した信号であると認識する。ガードセンサによるノイズ除去は、このイベント識別機能を利用し、同一イベントで発生した最初の信号をガードセンサに指定したセンサで受信した場合、ノイズと判断し除去する方法である。

直径 15.5m、高さ 12.2m、材質 SS400、底板の設計厚さ 9mm のコーンルーフタンクを対象として AE 計測したときの底板二次元位置標定結果を図 16 に示す。センサ (30kHz 共振型) を側板上 (高さ 1m) の周囲方向に 90 度ピッチに 4 個取り付けて測定した結果である。最大風速 3.0m/s、平均風速 0.5m/s と穏やかな環境での測定にもかかわらず、

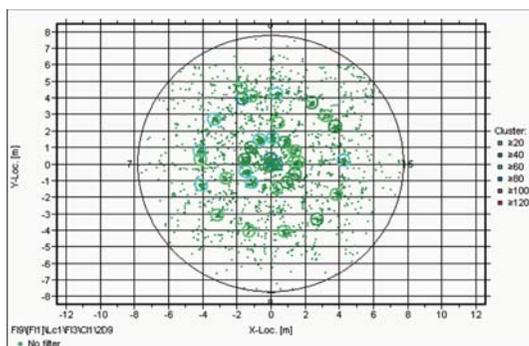


図16 液滴によるノイズを伴うタンクの AE 測定結果

ず、1 時間 1 チャンネル当たり 8187Hit と非常に多くの信号が計測され、設計肉厚を未だ割ることもない健全なタンクにもかかわらず、激しい腐食状態を示す結果となった。

これに対して、更にガードセンサとして用いるために、高さ 2m の位置に一連 (90 度ピッチ) のセンサを取り付けて計測した二次元位置標定結果を図 17 に示す。ガードセンサによるノイズ処理では、除去前と比較して、ヒット数で 91%、標定イベント数で 95% の信号が除去され、大きなノイズ除去効果があることが確認できた。しかし、1 時間 1 チャンネル当たり 739 のヒット数は、腐食のない健全なタンクと判定するにはなお、不十分である。

二段にセットした 8 個のセンサによって三次元位置標定してノイズを評価することを検討した結果を図 18 に示す。液面高さ 5.4m 近傍に音源が集中しており、液滴が液面に落下することで発生したノイズであることがわかる。これらの波形は、図 19 に示すように、腐食基礎試験で得られた腐食に伴う波形とは顕著に異なるものであった。タンク底板に標定される音源のみを評価することでより精度の高い評価が可能になると考えられる。

なお、ガードセンサによる方法で大きな改善が見られるものの、発生した AE は底面などでも反射を起こし、液面で発生した AE であってもあたかも下部の方に虚像を結ぶ場合もあり、十分にノイズを除去しきれないと考えられる。ガードセンサで除去された信号の中にも、液敵の明確な波形特徴を持つものも多く観察されている。

今回の試験で、3668 個のイベント数であった計測結果に対し、ガードセンサによるノイズ除去の結果 179 個のイベント数に、また三次元位置標定を行い、音源位置が底板位置の ± 1m の範囲のイベントを加算することで 103 個に、更に波形識別ソフトも活用することで 39 個のイベント数に

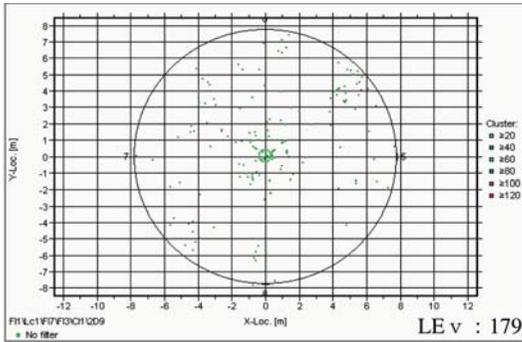


図17 ガードセンサを用いたノイズ除去によるAE測定結果

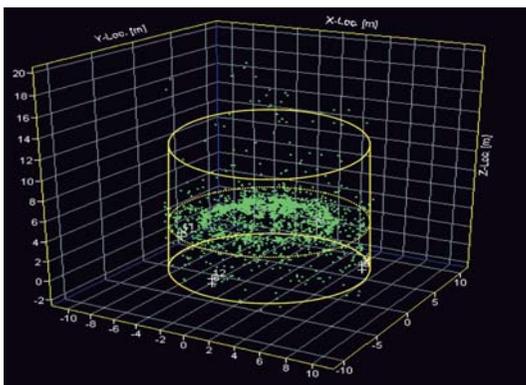
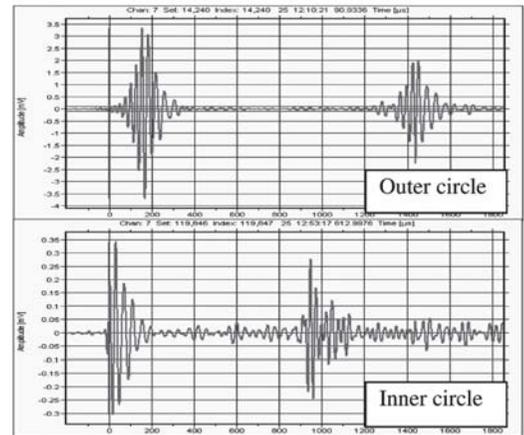


図18 三次元位置標定による液滴ノイズの識別

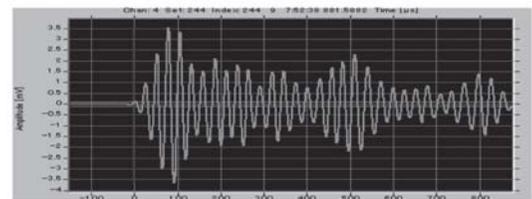
減少でき、ノイズの識別に三次元位置標定や波形識別が有効であることを確認している。

4.2 交流電磁場測定法 (ACFM)

塗膜面上から鋼材の表面検査を行える交流電磁場測定法 (ACFM: Alternating Current Field Measurement) は、検査前の前処理工程を大幅に削減でき、かつ高速の表面検査が可能であり、グローバル診断の有力な手段として開発している。交流電磁場測定法は英国で開発された電磁誘導を利用した検査手法である。コイルを試験体上に配置して交流電流を流して交流磁場を発生させ、これによって試験体表面に均一な交流電流を流す。試験体表面にきずがあり、これによって電流が乱されると、電流によって発生する磁場分布に変化が生じるので、この磁場の変化を測定してきずを



(a) 液滴ノイズ波形



(b) 腐食によるAE波形

図19 液滴ノイズと腐食によるAE波形の比較

評価できる。

図20に測定の実理を示している。電流を遮る割れなどのきずが存在すると、きず中央部の電流はきず底部に回りこんで流れ、またきずの端部ではきずの端部を迂回して流れる。このためきず端部の電流密度はより高くなると共に、回転した電流の流れが生じる。

きずの長手方向の磁束 (B_x) 分布に注目すると、きず直上ではきずの中央部で磁束は低く、きずの端部でより高い磁束が得られる。一方、板厚方向の磁束 (B_z) 分布に着目すると、きずの端部で、きずを回り込む電流による板厚方向の磁束が生じ、かつきずの両端部で回転方向が異なるために極性が逆になる。従って、きずの長手方向の磁束 (B_x) 分布と板厚方向の磁束 (B_z) 分布を測定す

ることのできる検査ができる。

このACFM法の最も大きな特長は、他の表面検査である磁粉探傷試験および浸透探傷試験では、塗膜を剥離する必要があるが、ACFM法は塗膜上から鋼材表面のき裂検査が可能なことである。また、渦流探傷試験などに比べて、リフトオフ（センサと試験体との間隔）によるき裂の検出性がさほど顕著に影響しないことである。このことは、試験体表面に塗膜が存在しても、あるいは錆が存在しても、手間隙の要する前処理を施すことなく所定の大きさの有害欠陥を検出する能力を持つ可能性があるといえる。

図21は、塗膜上からの探傷を想定して、長さ10mmで深さ3.0mmの開口き裂に対して、リフトオフ量（センサと試験体との距離）を0.0mm～5.0mmまで変化させ、得られるき裂からの信号値を比較した結果である。リフトオフ量の増大に伴って、き裂からの信号値も減少するが、その減少の割合ははるかに緩やかであり、リフトオフ量5.0mmまで信号値はノイズ値を超えて検出が可能であった。これより、塗膜上からでもき裂の検出能力があることが確認できた。

ACFM法は、この特長を活かして、欧米では石

油掘削リグ溶接部の海中での探傷を始め、鉄道レール、発電プラントや石油タンクなどに多く用いられている。国内においては、西日本旅客鉄道株式会社および財団法人鉄道総合技術研究所殿と当社の3社でACFM法を用いた台車枠検査技術を開発している。台車枠は検査時に40mmを超えるき裂が検出できれば脱線などの大きな事故が生じないことが十分に確認されている。ACFM法により疲労き裂の塗膜上からの検出性を確認したところ、長さ10mmで深さ1mm以上のき裂であれば十分に検出できることを確認した。このき裂は、台車側面ハリ部のき裂長さと同走行距離の関係より定期検査の間隔である60万kmを走行しても40mm長さに至らないことが確認されている。

この他、センサのリフトオフによるノイズを低減する目的で、 B_x - B_z 曲線によるベクトル積計算法を開発し、き裂の有無の判断を容易にする信号処理技術も開発している。また、実機での適用を容易にするために装置の携帯性の改善や小型化などを行い、更に探傷作業の電子管理化を可能にするインターフェースプログラムも開発した。開発した台車枠用ACFM検査装置を37台のボルス

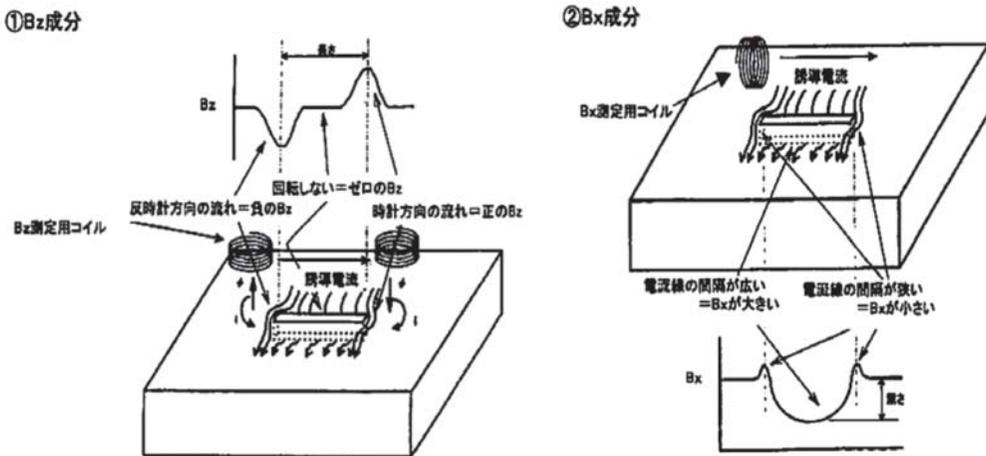


図20 交流電磁場測定法 (ACFM) の測定原理

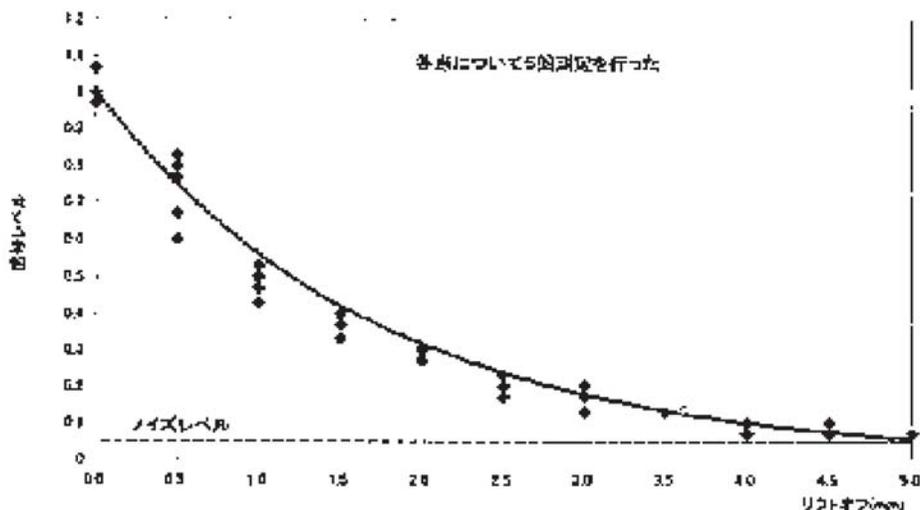


図21 リフトオフ量と信号レベルの関係の例

タレス台車枠の296箇所に対して塗膜上から探傷し、その後に塗膜を除去して磁粉探傷試験を実施して比較したが、両者ともに1箇所でき裂を検出し、同等の評価が得られることを確認している。

4.3 ガイドウェーブ探傷法

配管などにガイドウェーブを伝搬させて長距離間の腐食やきずの有無などを一度に検査するガイドウェーブ探傷法も迅速にグローバル診断する有効な手法として検討している。ガイドウェーブを送受信する機構も種々のものが開発されているが、当社は米国 SwRI (Southwest Research Institute) が開発した電磁気力の作用でガイドウェーブを発生させる MsS (Magnetostrictive Sensor) 方式を用いた手法の開発に取り組んでいる。

この方式は、永久磁石とコイル又は強磁性体プレートとコイルを組合せて、電磁気力の作用で直接試験体にガイドウェーブを発生させるもので、多数の圧電素子を用いたセンサを取付けて共振させる方式などに比べてセンサは安価で構造も単純で操作性に優れる特長を持っている。また、配管のみならず、板材や熱交換器などのチューブ材へ

の適用が可能であるという優れた特長がある。図22に本装置の概要を示している。

配管の探傷には、ガイドウェーブの振動様式によって種々のものが使われるが、主に伝搬方向に対して対称的な振動様式のLモードや、円周方向にねじられながら伝搬するTモードの波を用いている。Lモードのガイドウェーブの送受信方法は、試験体の厚み方向に永久磁石で直流磁場を印加し、その部位に交流電流を流したコイルを設置して行う。

一方、Tモードのガイドウェーブの送受信方法は、強磁性体プレートを磁歪効果で伸縮させて発生させるもので、試験面に磁化した薄い強磁性体プレートを接着/圧着し、その上に交流電流を流したコイルを設置して行う。図23にTモードのガイドウェーブを送受信させている様子を示している。

板材に対しては、板の片側表面に磁化した薄い強磁性体プレートを接着して、その上に約200mm長さのセンサを設置する。なお、板材に発生した波は板表面に平行な波であるSH波が発生する。一方、熱交換器用チューブの検査には、

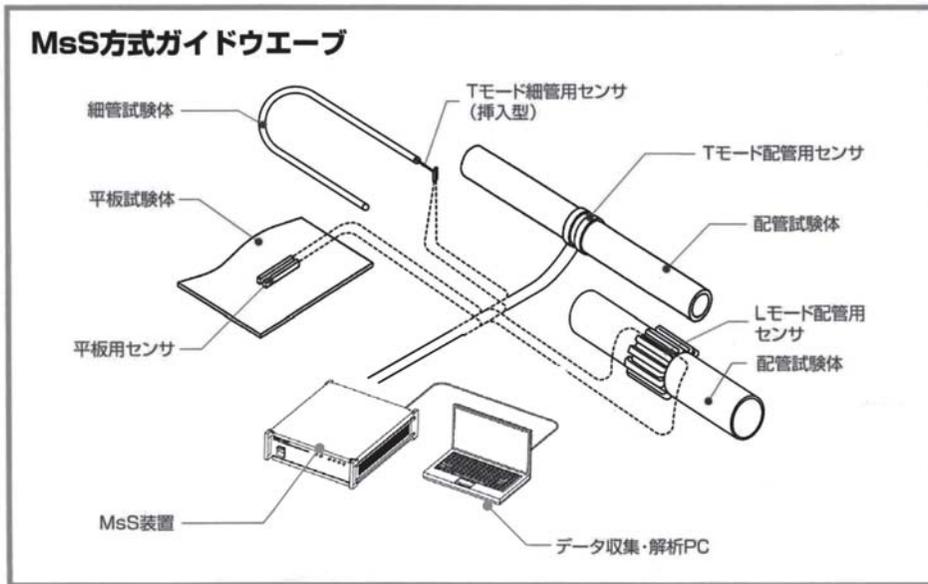


図22 MsSガイドウェーブ探傷法の概要



図23 Tモード用ガイドウェーブセンサの概要

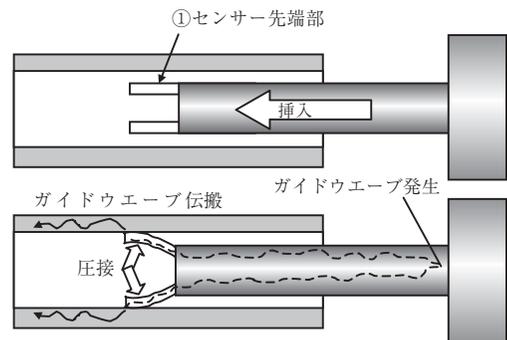


図24 熱交換器用ガイドウェーブのセンサの構造

図24に示すようにセンサ先端をチューブ内に挿入し、その後先端部をチューブ内面に圧着させて、センサ内部で発生させたガイドウェーブをチューブに伝搬させている。

図25は熱交換器用チューブ（材質：SUS304、外径：25.4mm、肉厚：2.0mm、長さ：4m）のきずの検出性を評価した結果の例を示している。きずの無い健全なチューブの場合には、送信波と端面の反射波のみで、その他の有意義なエコーは観察されていないが、3mの位置に深さ1mmで周方向に15mmのスリットおよびφ2.5mmのドリル穴

を加工した試験体では、それぞれ3mの伝搬距離の位置にきずエコーが明瞭に得られていることがわかる。

ガイドウェーブでは、超音波を長距離伝搬させるために、数十kHzの超音波を伝搬させることが多い。数MHzの短い波長を用いる通常の超音波探傷試験に比べるときずの評価精度にはおのずと限界がある。しかし、ガイドウェーブ技術を用いれば数十メートルの配管などの評価が一度にできる可能性があり、更に探傷部のみを露出させれば、検査部分が埋設されていようが、保温材など

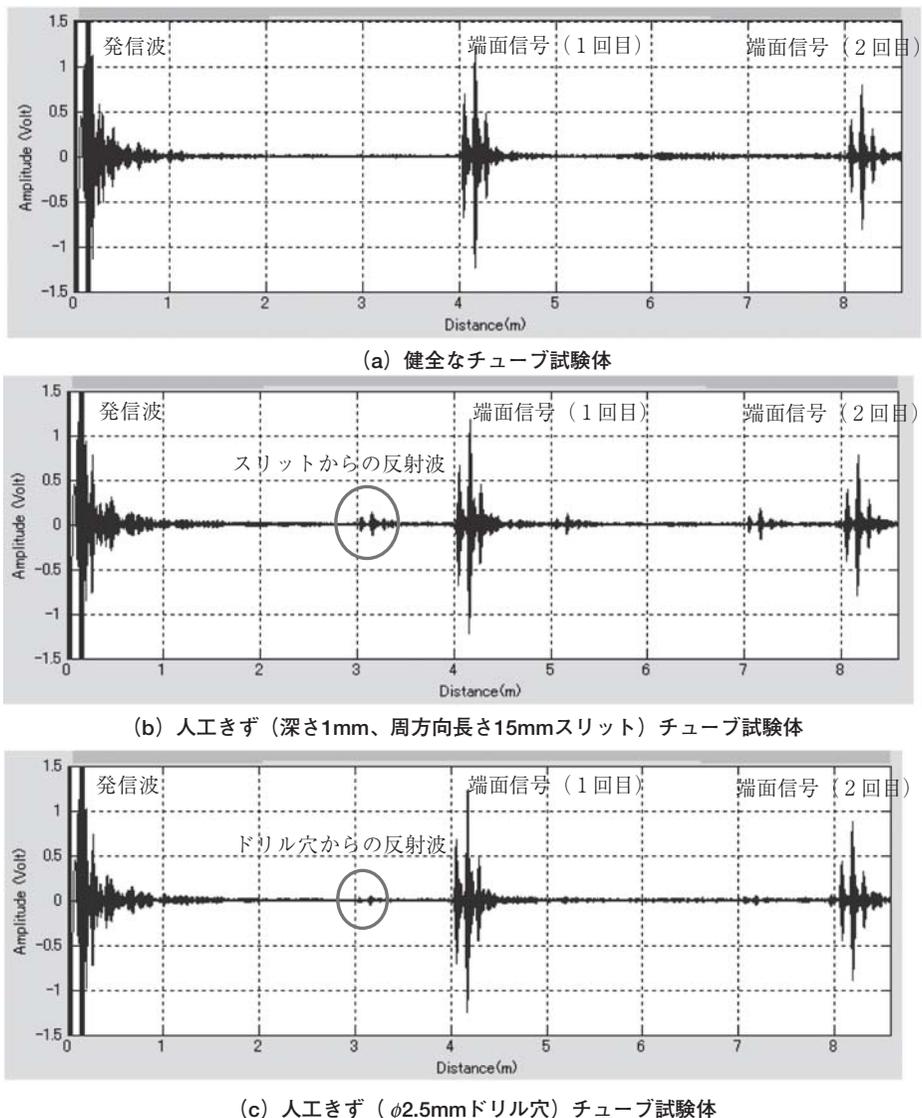


図25 ガイドウェーブによる熱交換器用チューブのきず検出性の評価試験結果の例

で覆われているようが評価できる可能性があり、グローバル診断の重要な一手段として検討を進めている。

4.4 LIMA-test システム

金属製の街路灯や電柱などは、地中埋設部において腐食が進行し、強風時などに倒壊する恐れがある。一般には定期的に地表部分を目視検査するか、埋設部を掘削して検査が行われるが、地上部から簡便に埋設部を含めて検査する手法があれ

ば、保守の合理化を図ることが期待される。この目的で、既に欧州で多数の適用実績のあるドイツ・IZFP 研究所が開発した街路灯地中埋設部の腐食検査装置 LIMA-test システムを導入し、国内での適用検討を行ってきている。

LIMA-test システムは、スキャナー、制御装置および PC(パソコン)より構成されており、スキャナー部は国内での検査物に適合するように当社で開発したもので、街路灯などの地表部に容易に着

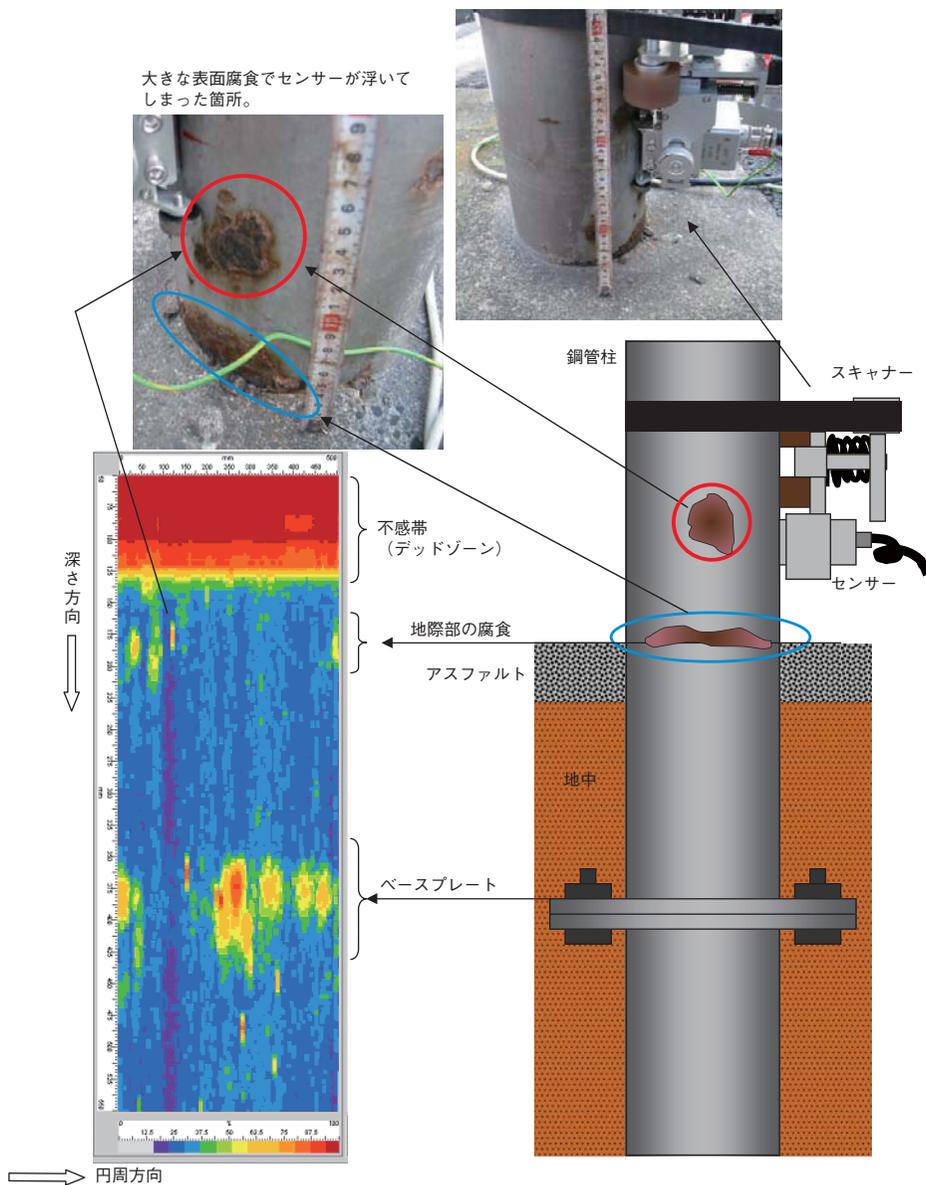


図26 実機適用試験結果 (新桜ヶ丘線32)

脱が可能である。超音波は、電磁超音波センサーより送受信されるために、試験体表面とセンサー間に液体の接触媒質を塗布する必要はない。センサーは地中部にむけてSH波である超音波を送受信しながら、ベルト式の走行機構によって街路灯などの被検査物の周囲を一周する。なお、本システムにおいて、最大1.5mまでの距離表示が可能となっているが、埋設などによる減衰や実用性を考慮し

て、応力集中部位で腐食検出を要求される地表部から200mm深さを探傷有効範囲としている。

得られた結果は探傷子位置と超音波の伝搬時間におけるエコー高さ分布として表示される。すなわち、通常の超音波探傷試験におけるBスコープ画像で評価される。腐食の激しい箇所は高いエコー高さの表示となり、腐食の度合を評価できる。図26は、実機での適用試験結果の例を示してお

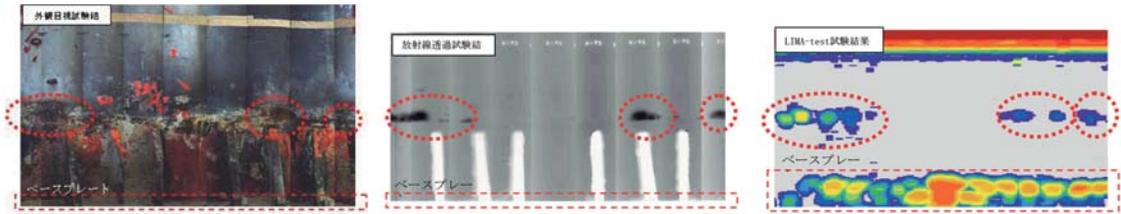


図27 実機掘削試験体での確認試験の例

り、図 27 は実機より掘削した腐食のある程度進行した試験体の探傷結果を外観および放射線透過試験結果と比較した結果を示している。

5. 自然欠陥の定量化と精密探傷技術

5.1 自然欠陥の定量化

きずの評価精度に関する議論は古くから多く行われてきている。原子炉压力容器の溶接部を模擬して溶接部に欠陥を導入した 12 体の大型の溶接試験体を世界 15 ヶ国 50 チーム間で回送して行われたラウンド・ロビン・テストを含む PISC- II 計画は、最も大きなプロジェクトの一つであろう。このプロジェクトは、Dr.R.W.Nichols（英国）を議長として 1981 年に開始されている。

各チームがそれぞれ提案した超音波探傷試験方案に従って探傷し、得られた探傷試験結果は欧州の JRC（Joint Research Center）に集められ、探傷試験後に行われた試験体の切断試験によって明らかにされたきずの実態と比較して評価された。1986 年 10 月に試験結果を評価する最終のシンポジウムがイタリアで開かれ、多くの試験結果の紹介と議論が行われている。

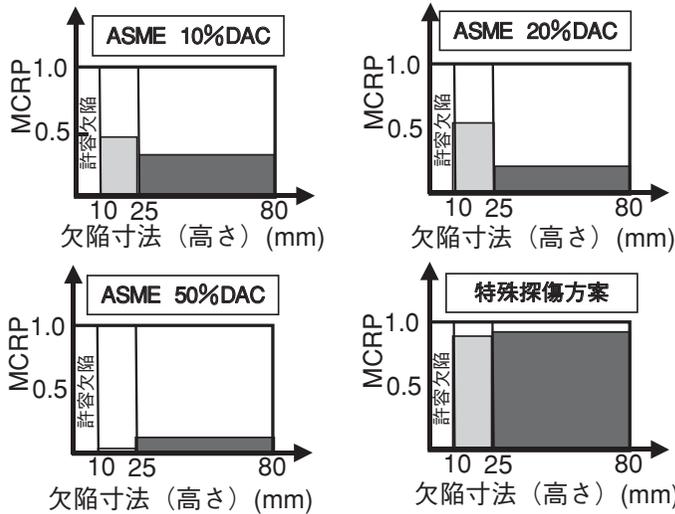
これらの試験において、当時の ASME 規格による探傷に比べて、探傷感度の修正や 70 度斜角探傷やタンデム探傷などの追加で探傷精度が改善されることが明らかになり、ASME 規格が修正されている。また、注目されるのは新しい探傷原理に基づく手法を取り入れた 6 つのチームの探傷結果が極めて優れていたということである。結果を

図 28 に示している。これらのチームには、集束探傷子を用いたチームや TOFD 探傷を取り入れたチームが含まれている。また、種々の探傷手法を組合せた複雑な探傷を行っている。

超音波探傷試験の検出性に最も大きな影響を及ぼす因子に、きずを構成する面の傾きがあげられる。超音波が割れ面に垂直に入射して、割れの最大エコー高さが得られる条件においては、割れの大きさとエコー高さを関連付けることができる。水素による遅れ割れを対象として統計的に検討して、割れの大きさとエコー高さの関係を確率式で現している。これによれば、例えば高さ（割れの幅）1mm で有効ビーム幅より長い割れのエコー高さは、図 29 のように確率分布 $R(h)$ として求められる（5MHz で、対比きず 3.2mm ϕ 横穴の距離振幅特性曲線を基準とした場合）。

ここで、もし極めて詳細に種々の方向から超音波ビームを割れに入射させ、いずれかの探傷でほぼ割れの面に垂直に超音波ビームを入射する探傷方法を適用すれば、検出レベル（閾値）をもって検出できる割れの数と検出できない割れの数の比を求めることができ、高さ 1mm の割れの検出確率を求めることができる。例えば -14dB を検出レベルとしたときの検出確率は約 92% となる。

但し、割れの面にはほぼ垂直超音波を入射させようとする、例えば屈折角 15 度ピッチ以下の斜角探傷やタンデム探傷を行う必要があり、探傷には膨大な時間を要して極めて非能率的である。通常では、二つの屈折角の斜角探傷を組合せる探傷



MCRP：不合格欠陥を正しく不合格と判定した各探傷グループの平均確

特殊探傷グループの内容

探傷方法	DDF	CRF	CAF
複雑な探傷技術の組合せ	0.97	0.86	0.96
ASME, 複雑な探傷技術の組合せ	0.94	1.0	0.62
TOFD	1.0	0.93	0.38
複雑な探傷技術の組合せ	0.97	0.86	1.0
集束探傷法(水浸法)	0.8	0.79	0.76
ALOK法の複雑な組合せ	0.81	1.0	0.31

DDF：きずの検出確率

CRF：不合格欠陥を正しく不合格と判定した確率

CAF：許容欠陥を正しく合格と判定した確率

図28 PISC II ラウンド・ロビン・テストで得られた各探傷手法グループ別の探傷結果の比較

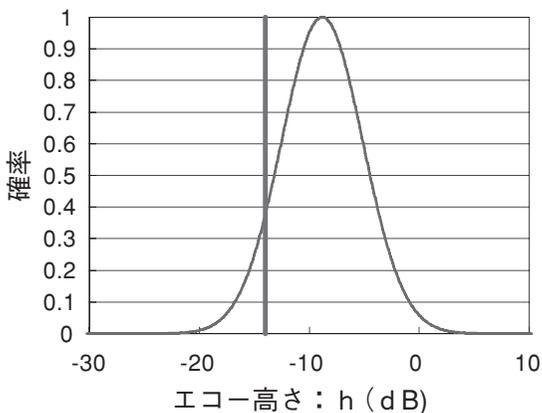


図29 幅 1 mm の細長い割れ (低温割れ) に超音波ビームがほぼ垂直に入射したときのエコー高さ分布の計算例 (5MHz、3.2φ 横穴対比きず)

が行われるが、この場合には、必ずしも超音波ビームは割れ面に垂直入射するとは限らない。このために、探傷で得られるエコー高さは、割れ面への超音波ビームの入射角に起因してエコー高さが低下して、閾値を超えなくなり検出されない割れが生じる。この確率を図 30 に曲線 ABCD で示している。ここで、B 点は探傷における検出レベル (閾値) を示している。従って、エコー高さ分布を示す確率関数 $R(h)$ に割れの傾きを考慮した検出確率を示す曲線 ABCD を掛け合わせて得られる関数 $S(h)$ が検出された割れのみに対するエコー高さ分布を示す結果となり、これより検出確率が

求められる。

ここで、直線 BC は、探傷の数を増やしてより詳細な探傷を行うほど傾きが急になり、検出確率が上がる。ただし、探傷の数が増えるだけ検査に時間を要することになる。これに対して、フェーズドアレイ探傷は、電子的に超音波ビームを扇状に走査することができる。従って、割れ面に超音波ビームが垂直に近い角度で入射する確率が増大し、**図 30**における直線 BC の傾きを急にして、結果として探傷時間を増大させることなく検出確率を向上できる。

一方、きずの寸法を測定する場合、探触子を走査させ、得られるエコー高さと音源位置の関係を求め

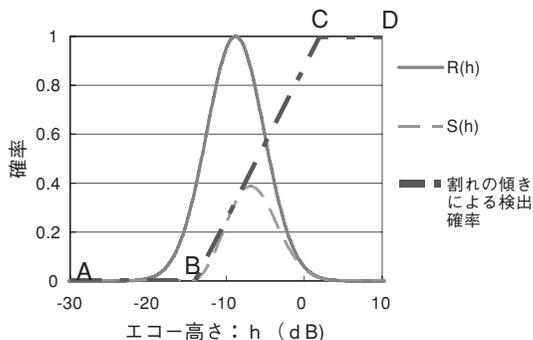


図30 割れの傾きを考慮した割れの検出確率の求め方

てきずの像を求め、エコー高さの閾値を設けて二値化した像より寸法を得ることを原則としている。このときの閾値としては、用いる対比きずのエコー高さを基準とする方法や、きずからの最大エコー高さを基準とする方法など種々の方法が提案され、それぞれの探傷規格で基準化されている。

一般に閾値のレベルを低くして高感度の探傷を行うと、きずの像は大きくなる。特に、超音波ビームが拡散する平板の振動子を用いた通常の探触子を用いた場合には、特にこの傾向は顕著になる。一方、閾値を高くした場合には、きずの傾きによる影響が顕著になり、きずの一部しか寸法を測定しなくなる。閾値を順次低くしていくと、いずれかのレベルで誤差の平均値はゼロとなるが、このときの標準偏差は一般に大きく、寸法の測定誤差はあまり改善しない。

より改善した測定を行うには、集束探触子を用いることが有効である。通常探触子の場合と比較してきず高さの測定精度を**図 31**に示しているが、集束探触子を用いる場合には、誤差の平均値がゼロになる閾値において誤差の標準偏差値もゼロに近づき、測定精度が改善できているのがわかる。

集束探触子は、一般に凹面上の圧電素子を用い

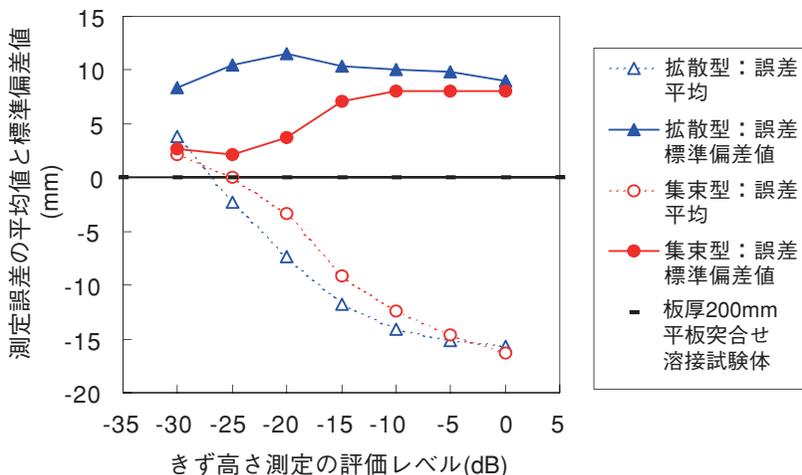


図31 通常探触子と集束探触子による場合のきず高さ測定精度の比較

て超音波ビーム集束させている。ただし、集束位置は一定の深さに限定され、集束位置を離れた位置では超音波ビームは広がりを持つので、きずの深さによって異なる集束探触子を使い分ける必要があり、探傷にはかなりの時間を要する結果となる。

一方、フェーズドアレイ探傷では電子的に超音波を任意の深さに集束させ、特に集束位置の情報のみを採取させるダイナミックフォーカシングによれば、短時間に精度のよいきずの像を得ることができる。

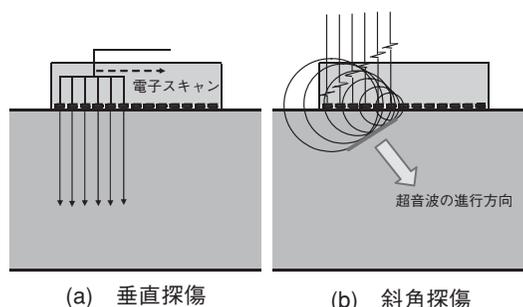
なお、超音波探傷では一般に1mm前後の超音波を用いており、集束位置といえどもビームの太さには波長のオーダーでの太さがあり、レーザーのように点に集束させることはできない。更にきずの高さ測定精度を改善する方法にTOFD法があり、これらの最新技術の適用技術を開発することにより短時間で精度の高い探傷を可能にしている。

5.2 新技術の適用

(1) フェーズドアレイ探傷

フェーズドアレイ探傷は、微小に分割した素子を並べて、それぞれを独自に励起できるようにしたフェーズドアレイ探触子が用いられる。隣接する複数の素子を同時に励起させて、一つの垂直探触子と同様の音場を形成させ、励起する素子を順次一つ毎ずらせていけば、**図 32(a)**に示すように垂直探触子を機械的に走査する代わりに電気的な走査が可能になり、高速な画像表示ができる。

より重要な活用方法は、各素子の励起タイミングを順次ずらすことによって得られる。例えば、**図 32(b)**に示すように、隣接する素子の励起タイミングを順次片側に遅らせていくと、A-A'面のよう素子面に傾いた向きに進行する超音波が発生し、斜角探傷の電子走査が可能になる。また、順次励起させるタイミングを少しずつ変えることで、潜水艦のソナーのように、超音波の進行方向の角度が順次変化する扇状の走査（セクタ走査）



**図32 フェーズドアレイ探傷
(電子走査式超音波探傷法)の原理**

が可能になる。

一方、素子の励起の時期を対象的に変化させることで、超音波ビームを集束させたり、より拡散させたりもできる。通常は、両端の素子から順次励起させることで得られる集束ビームがより重要である。励起させる素子の数（振動子の大きさ）と素子を励起させるタイミングを調整することにより集束深さをある程度自在に変化できる。

図 33は、凹面振動子を用いた従来の集束探触子とフェーズドアレイ探触子による、種々の深さ位置の横穴を探傷した結果を比較したものである。フェーズドアレイ探傷では、電気的に集束深さを変化させつつ、かつ集束位置における情報のみを画像化するダイナミックフォーカシング行っているため、それぞれの深さの横穴が鮮明に描かれている。一方、従来の集束探触子では、超音波ビームが集束する深さの横穴の像は鮮明であっても、集束位置から離れた深さの横穴の像は、急激に幅の広い不鮮明な像として示されているのがわかる。

セクタスキャンやダイナミックフォーカシングを用いることによりフェーズドアレイは探傷時間を節約しつつ高精度な探傷を可能にできる他、通常の手探傷では時には評価が困難になる複雑形状の部位への適用や、組織の荒い高減衰材などに適用しても効果が得られる。

図 34はボイラスプレー管（材質：2.25Cr-1Mo、

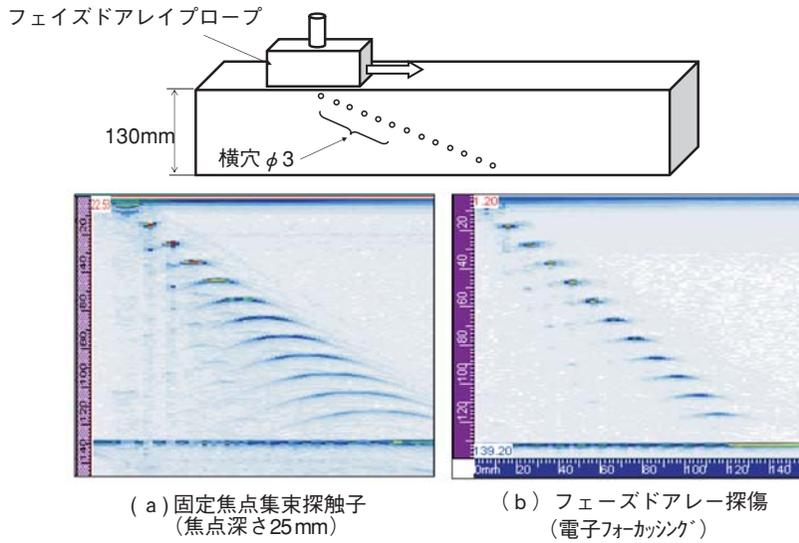


図33 固定焦点（深さ25mm）集束探触子法とフェーズドアレイ探傷（電子フォーカシング）の探傷結果の比較

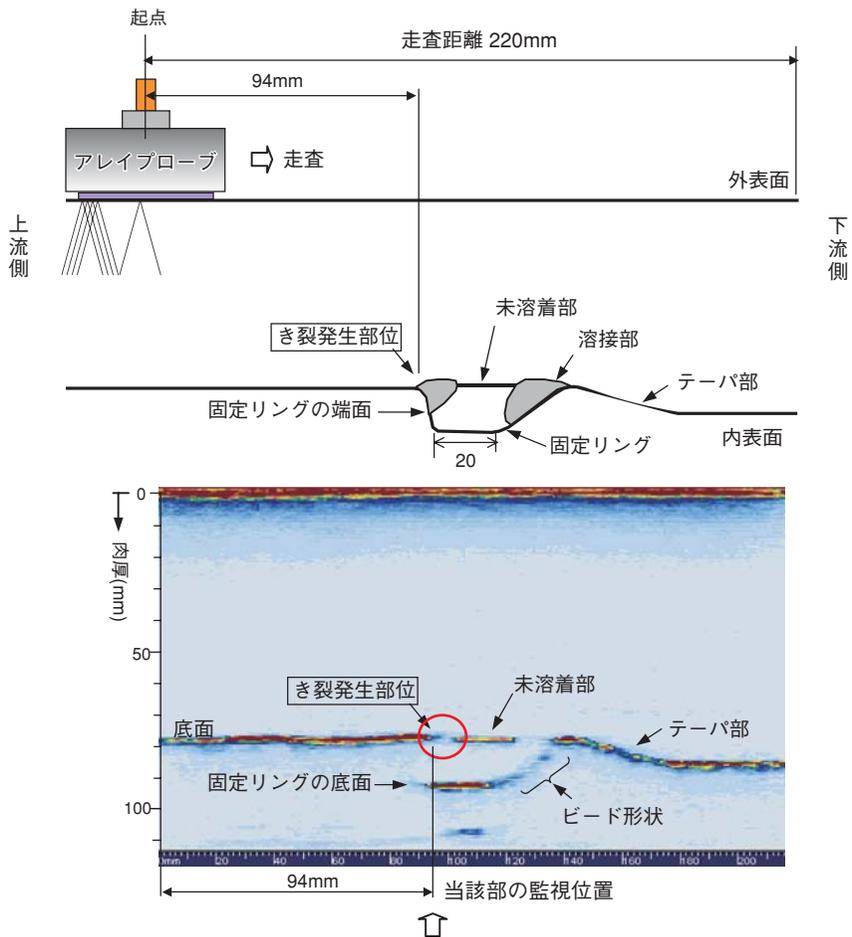


図34 裏面に複雑な取付け物のあるボイラスプレー管のフェーズドアレイ探傷の例

外径：φ570mm、肉厚：83mm）の裏面の複雑な取付け物の様子をフェーズドアレイ探傷で評価した例を示している。管内面には固定リングが隅肉溶接で取付けられているが、取付けの様子が明瞭に示されている。探傷は5MHzで64チャンネル（素子寸法：1×27mm）のフェーズドアレイ探触子を用い、+40～-40度のセクタスキャンと裏面に相当する位置に集束させた探傷を行っている。また、隅肉溶接部に種々の深さのノッチを作製してノッチの検出性を検討したところ、0～60度のセクタスキャンを用いることで深さ3mm以上のノッチを評価できることを確認している。

図35は、沸騰水型原子炉圧力容器ノズル部の異材継手部のきずの検出性を検討した結果を示している。この異材継手部は、管台の低合金鋼と

SUS配管をつなぐもので、低合金鋼の開先面および内面には予めSUS系でバタリングされ、その後オーステナイト系の溶接金属で突合せ溶接されている。オーステナイト系溶接部は結晶粒が粗大化して超音波の伝搬を阻害するほか、音速異方性があるため超音波の直進を阻害するので、一般に探傷が困難になる。このため、熟練した技術者が、音速異方性のより少ない縦波を用いた特殊な探傷手法により十分な探傷時間を用いて探傷するのが一般的である。

フェーズドアレイ探傷を用いれば、縦波によるセクタスキャンをきずを検知した位置で溶接線に平行な直線走査のみによって、極めて客観的で迅速な評価が、従来の高度な技術を用いた場合と同等以上の精度で得られることを確認している。

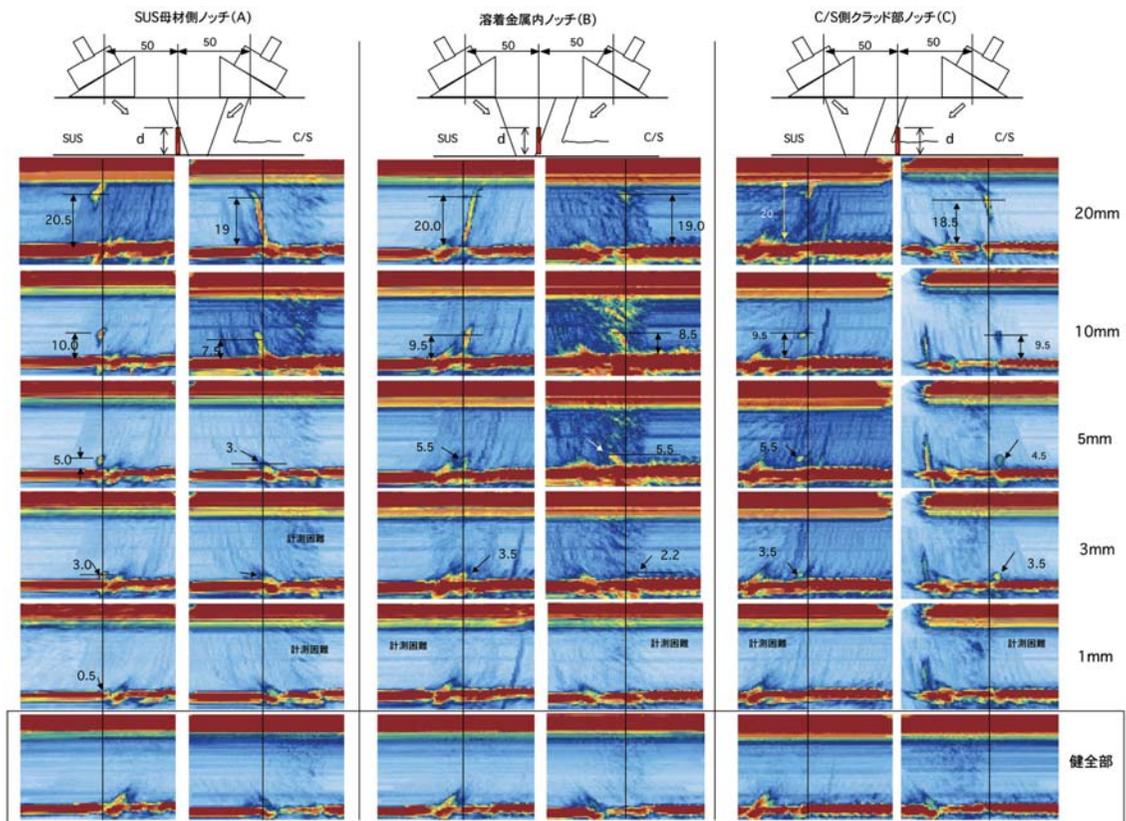


図35 異材継手部のフェーズドアレイ探傷法セクタスキャンによるきず高さ結果の例

水力発電所は昭和初期に建設され、クリーンエネルギーとして現在なお発電を続けているものも多い。これらの精度高い余寿命評価が求められており、特に建屋基礎に埋め込まれている水車ケーシング・ステーベンなどの評価が期待されている。これらの素材は古くに製造された鋳物であり、現在の製品に比べると組織や成分にばらつきが多い。

余寿命評価には、きずの寸法を精度高く求める必要があり、セクタスキャンとダイナミックフォーカシングを併用したフェーズドアレイ探傷法を適用している。実機より切り出したサンプルを用いて、従来のパルス反射式探傷法に比べて十分に評価精度の高いことを確認している。図

36 に探傷結果の一例を示している。

(2) TOFD 法

TOFD 法は、図 37(a) に示すように、きずを挟んで二つの斜角探触子を対抗して配置し、きずの長手方向に直線的に探触子を走査する方法である。このとき、二つの探触子間の距離は一定となるように、ジグを用いて固定しておく。きずのない健全部では、表面を伝搬するラテラル波（A波）と裏面で反射する反射波（C波）のみが得られる。内部にきずが存在すると、更にきずの端部で回折して得られる回折波（C波）が得られる（図 37(b)）。得られた信号波形の振幅値（エコー高さ）をカラー（または濃淡）表示させると、一本の線でエコー高さを表示でき（図 37(c)）、これを探触

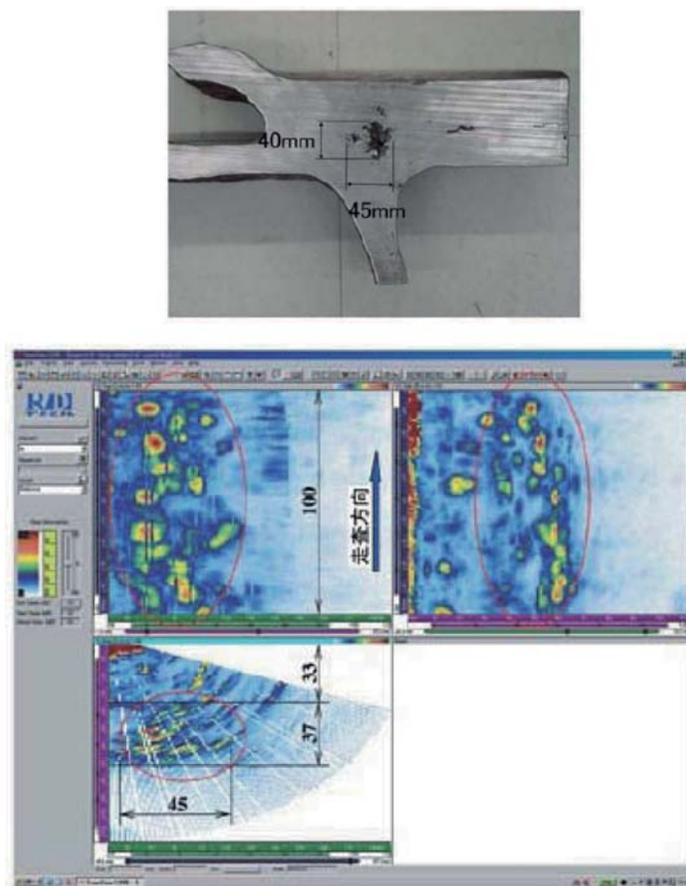


図36 水車ケーシング・ステーベンのきずの断面マクロ写真とフェーズドアレイ探傷結果の例

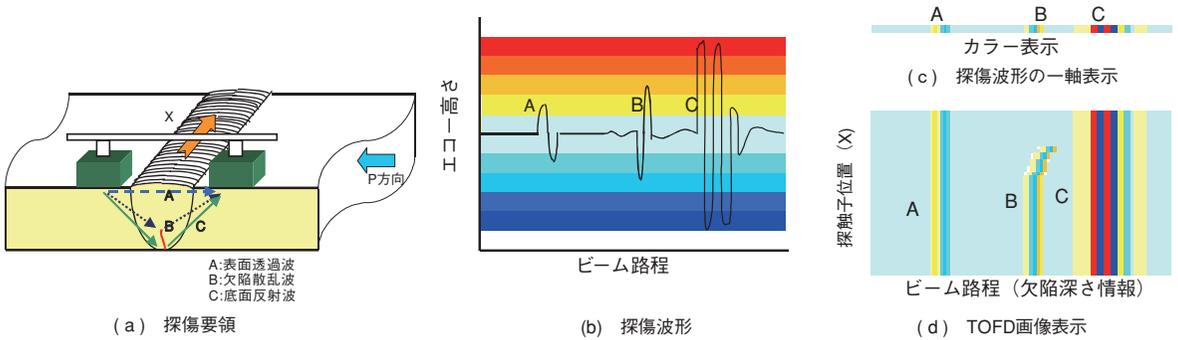


図37 超音波TOFD法の概要

子の直線走査に対応して並べると探傷画像が得られる (図 37(d))。従って、探傷画像は探触子位置と超音波が送受信される伝搬時間の関係を示し、得られた音圧はカラー (または濃淡) で表示される。

TOFD 法では、きずの端部 (き裂などが内部にあるときには、上端と下端) を経由して得られる回折波の伝搬時間を用いて、幾何学的に端部位置を求めることになる。時間軸の値は極めて精度よく測定できるので、結果として、きずの端部位置を正確に求めることができ、またきずの高さ (板厚方向の寸法) を正確に測定できる。なお、きずの深さ位置は、探触子ときずとの相対位置によって変化する。このため、深さ位置を正確に求めるには、きずの長手方向に直行する方向に探触子を走査し、きずが二つの探触子間の中央に位置するときの最もビーム路程が短くなる時の深さ位置を測定する。

図 38 は、疲労き裂を三点曲げ試験で進展させ、き裂の進展過程で TOFD 法によりき裂高さを測定して、測定時のきずの実測値と比較した結果である。TOFD 法でき裂高さを測定した時点で、破面にビーチマークを残しておく (荷重を変えたサイクルで少しき裂を進展させ、その時点のき裂進展位置を残しておく)、試験終了後にき裂面で破断させてき裂面上に残されたビーチマークの位置を読み取って、き裂高さの測定時の実測値を求めた

ものである。き裂の進展を精度よく監視できているのがわかる。

このように、TOFD 法は比較的簡便にき裂の高さを得ることができ、またきずの検出に用いる場合には、溶接線方向に探触子を直線的に走査するだけでかなりの範囲を探傷でき、探傷速度も速いなどの特長を持っている。反面、面での反射波に比べるとはるかに微弱な端部の回折波を受信するために、探傷の感度は極めて高く、探傷に留意すべき点も多い。このため、種々の確認試験を行い、実機適用を図っている。

図 39 は、ボイラ耐圧部配管 (2.25Cr - 1 Mo 鋼) への超音波 TOFD 法の適用の状況と探傷例を示している。なお、ボイラ主蒸気配管などの高温高压配管では、クリープ損傷が懸念され、損傷評

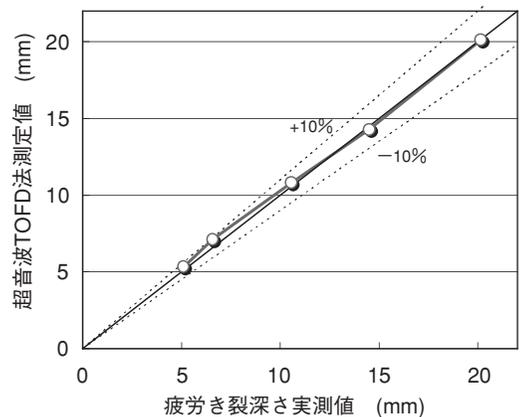


図38 超音波TOFD法による疲労き裂の進展計測精度

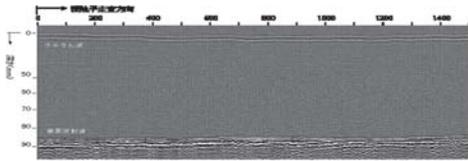


図39 ボイラ耐圧部配管への超音波TOFD法の適用の状況と探傷例

価が必要とされている。クリープ損傷は、損傷の初期には結晶粒界に微小なボイドが発生し、やがて微小ボイドが連結して微小き裂となり、マクロのき裂に発展して破壊に至る現象である。超音波TOFD法では損傷初期のボイドの状態を評価することはできないが、ミクロのき裂が連結し始める寿命比73%以上では評価できる可能性が高いこ

とを確認している。

(3) クリープ損傷評価の超音波ノイズ法

クリープ損傷をボイド発生初期の段階より評価する方法として超音波ノイズ法を適用している。クリープ損傷の評価方法としては組織検査法、硬さ測定法や、ミニチュアのサンプルを構造物から採取して評価する方法など多くの方法が提案されている。しかし、これらの方法は、いずれも試験体表層部のクリープ損傷を評価するための手法である。近年、9%あるいは12%などのCrを含有する高Cr鋼が用いられ始めるに伴い、クリープ損傷がより内部の方で先行して起こることが懸念されている。超音波ノイズ法は内部のクリープ損傷を感度よく評価しうる方法として開発しており実機への適用を図っている。

この方法は、図40に示すように、底面エコーの手前にゲートを設けてノイズ波形を採取し、周波数解析する方法である。クリープ損傷によって微小ボイドが発生すると、微小ボイドによる散乱エコーもノイズ成分を形成する。特徴の最も現れる高い周波数成分範囲の積分強度を求めて、ノイズ値とする。超音波ノイズ分析法とは、このノイ

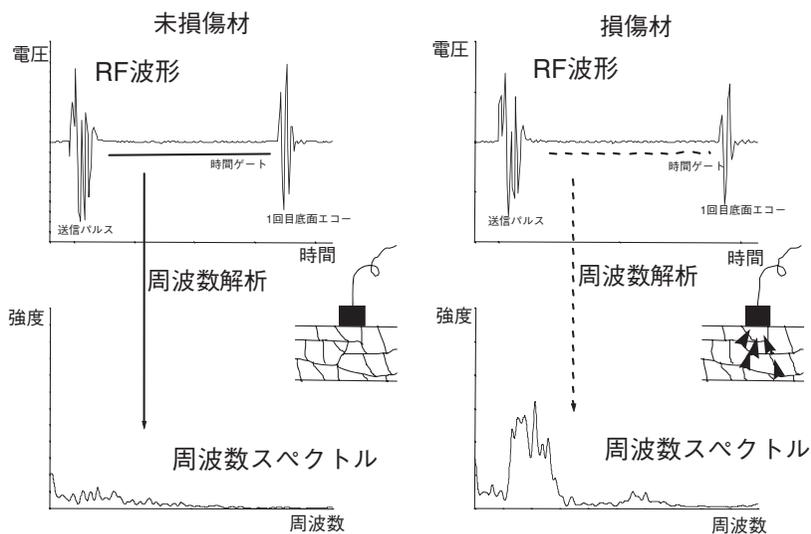
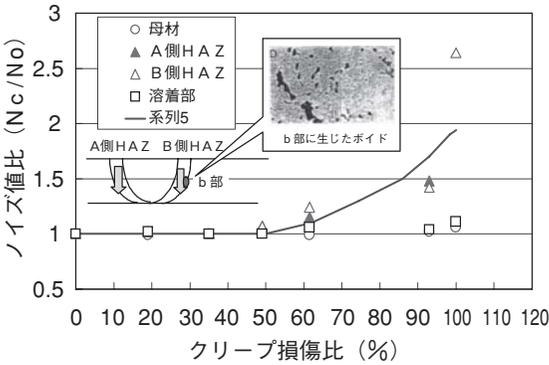


図40 超音波ノイズ法の原理

ズ値を監視する方法である。

2:1/4Cr-1Mo 鋼に対するノイズ分析法の確認試験の例を図41に示す。測定は、溶接部を挟んで両側（図中A側およびB側）の溶接熱影響部の他に、母材部と溶接金属部で実施している。Cr-Mo 鋼のクリープ損傷は溶接熱影響部において進行することが知られており、母材部や溶接金属部で測定したノイズ値比にはほとんど変化が見られ



クリープ損傷比: (クリープ試験時間/クリープ破断時間) × 100

図41 クリープ損傷材のクリープ損傷比とノイズ値比の関係

ていない。これに対して、溶接熱影響部で測定したノイズ値比は、クリープ損傷比が約50%を超えると増大している。このノイズ値は、クリープ損傷で発生するボイドの面積率とよい相関関係にあることも確認している。

なお、クリープ損傷の発生領域を画像化して損傷の評価精度を改善する目的で、ゲートを板厚方向に分割してクリープ損傷を評価する新ノイズ分析法を開発し、適用を図っている。図42に測定例を示している。溶接線に直行する方向に探触子を順次移動させながら測定をし、結果を画像化した結果である。クリープ損傷が進行している領域を把握することができている。

なお、ノイズ分析法は(株)IHIで開発された方法であり、当社は測定方法を完全に手順化すると共に、データベース化を通してクリープ損傷を評価する事業を実施している。

(4) ウェーブレット解析による信号処理技術

オッシロスコープにウィンドウズを内蔵した装置が活用され始めている。これにパルサーを組

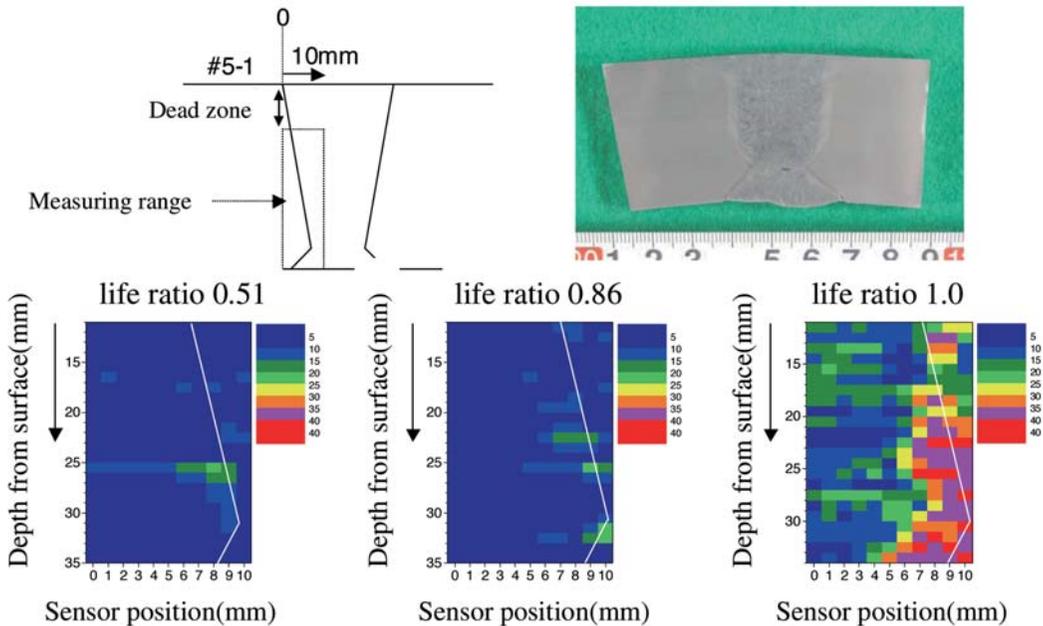


図42 画像化した超音波ノイズ分析法の例（寿命比と超音波ノイズ値画像）

み込んで種々の損傷に対する専用の検査システムを構築できる。ソフトの切り替え、あるいは差し替えによって各損傷に対応できる。損傷の評価精度の改善には SN 比の改善が共通して不可欠であり、SN 比改善のためにウェーブレット解析を組み込んだ超音波探傷システムの開発に取り組んでいる。

ウェーブレット解析は時間軸の情報を失うことなく周波数解析する手法であり、試験体の超音波の散乱減衰や損傷部からの反射波の波形特徴より最も評価に適した周波数の波形を選択して SN 比を向上できる。また、複数の周波数の波形を構築したアルゴリズムにより演算することで SN 比の向上に寄与できる。

ウェーブレット解析は比較的古くより多くの分野で活用され、効果を得てきている。しかし、ウェーブレット解析には現在のコンピュータ技術を用いても時間を要し、高速での処理を求められる現場でのリアルタイムでの超音波探傷試験への適用は困難であった。現在、東工大の協力を得て、周波数軸上でコンボリューションを行うことにより、演算時間を著しく短縮したリアルタイムウェーブレット解析の超音波探傷試験への適用に取り組んでいる。

図 43 は、従来の時間軸上でのコンボリューション演算による連続ウェーブレットの演算時間と周波数軸上でコンボリューションしたリアルタイム連続ウェーブレットの演算時間をデータ数に対して比較した結果を示している。

板厚 80mm のオーステナイト系ステンレス鋼肉盛溶接金属部の底面エコー高さを測定し、連続ウェーブレット解析した結果を図 44 に示す。マザーウェーブレットに周波数分解能の高いガボールウェーブレットや時間軸分解能の高いメキシカンハットウェーブレットなどを使い分けることができる。ここではガボールウェーブレットによる

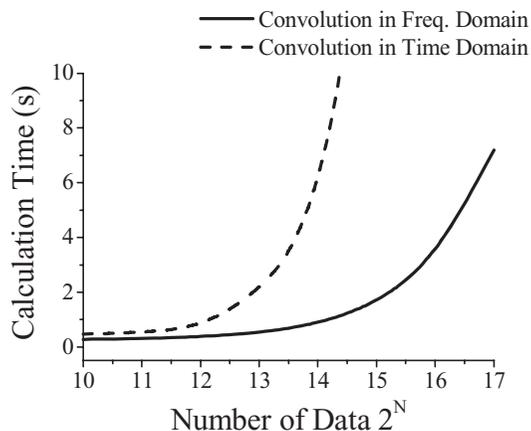


図43 リアルタイムウェーブレットと従来の時間軸コンボリューションによるウェーブレットの演算時間の比較

結果を示している。連続ウェーブレットの解析より、底面エコー高さの周波数はいずれも低い周波数帯に偏在していることがわかる。また、原波形と 1.2MHz における抽出波形を比較しているが、連続ウェーブレットより適切な周波数を求めて波形を抽出することで SN 比を改善できることがわかる。

リアルタイムウェーブレットを組み込んだ溶射肉厚測定専用の超音波探傷試験を開発し実用している。例えば、ボイラでは構造の多様化や燃料の多様化が進み、高温腐食や耐摩耗性を向上するために溶射の適用が多くなっている。溶射部の肉厚が寿命に及ぼす影響が大きく、溶射膜厚の管理が重要である。

図 45 には、6.3MHz の周波数の波形を抽出することが溶射部と母材界面エコーの SN 比の改善に有効であることを示す一例を示している。なお、ここでは既にポスト処理で実機へ適用してきた過去の実施例との整合性を持たすために、あえて離散ウェーブレットを用いている。

本システムは、オッシロスコープ LeCroy Waverunner を用いており、カスタム演算機能を用いている。信号解析には Matlab のプログラミ

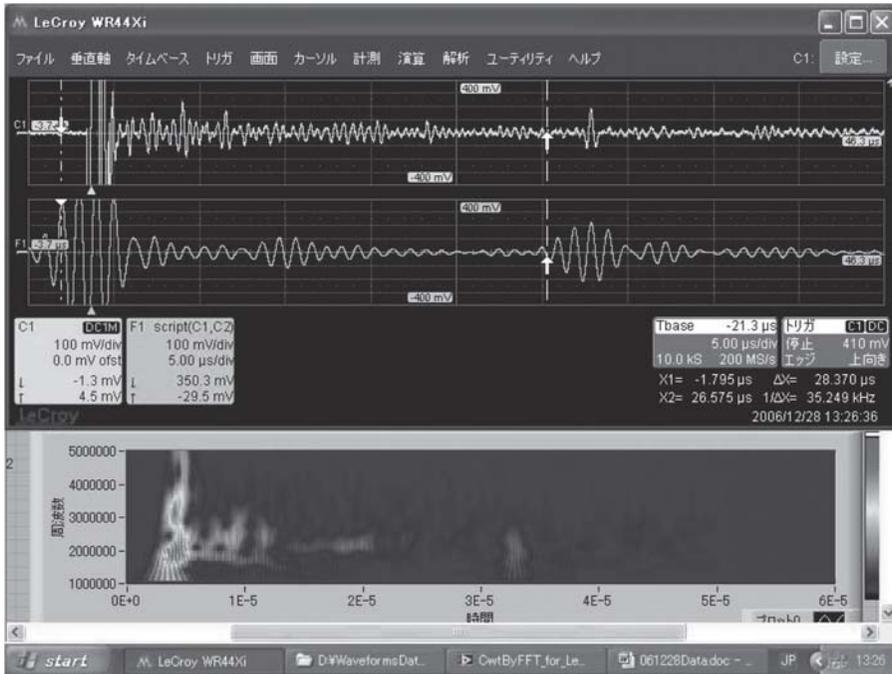


図44 リアルタイムウェーブレット結果の例 (ガボールマザーウェーブレット)

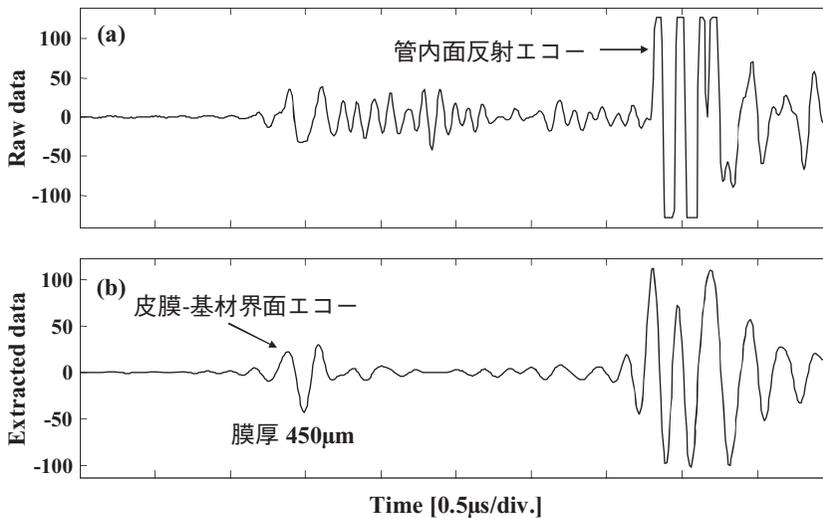


図45 ウェーブレット解析による溶射膜厚測定精度向上の例
(a図：原波形、b図：ウェーブレット処理後の波形)

ングを用いている。開発した装置のフロントパネルを図46に示す。4つの波形が示されているが、上段が原波形であり、下の3つの波形が特定周波数範囲での波形を示している。カーソルを用いて時間軸を読み取ることができ、読み取られた時間

は、内部の検定線に基づいて直接溶射膜厚が表示される。

このリアルタイムウェーブレットの活用で、従来の採取したデータを事務所で専用のパソコンで処理していたときに比べ、作業時間を約2/3に短

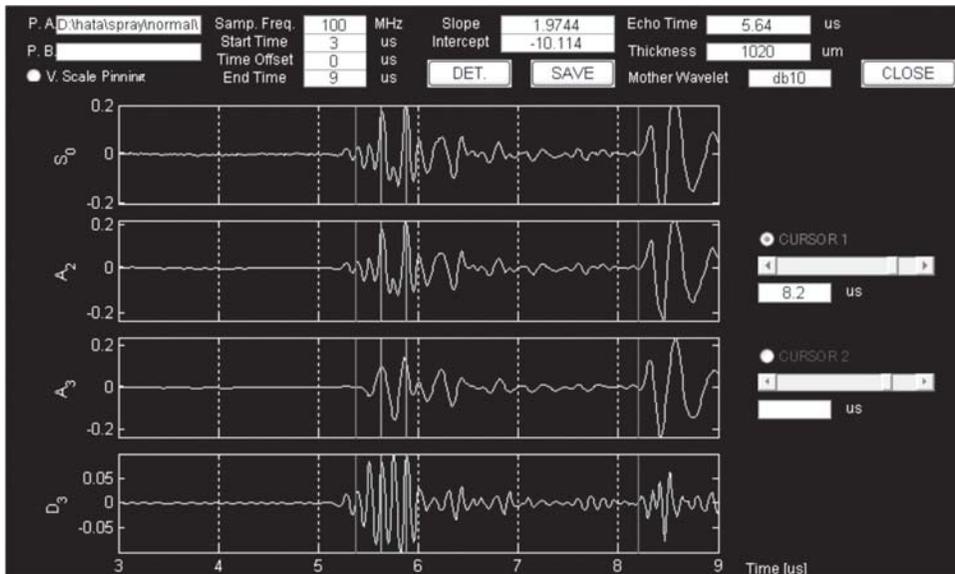


図46 リアルタイムウェーブレット解析を用いた溶射膜厚測定専用検査装置のフロントパネルの例

縮できたほか、探触子の接触不良などに基づく後掛かりをなくし、データの信頼性向上に寄与できている。

なお、リアルタイムウェーブレットを搭載した超音波探傷システムの開発では東京工業大学 水谷助教授並びに黒川氏に多大のご指導とご援助を賜っている。

(5) デジタルラジオグラフィの適用

放射線透過試験では、放射線像をフィルムに捉えた後にこれを保管するのが一般である。放射線透過試験は、フィルム上に透過度計などを同時撮影して、適正に検査が行われたことを証明できるなど、極めて記録性に優れた手法ではあるが、一つのプラントで保存されるフィルム枚数も一般に相当な量となる。このため、フィルムの保管に大きなスペースが必要になるほか、経年変化を評価するために、過去のデータとの照合を行う際には膨大なフィルムからの検索に時には膨大な時間を要する結果となる。このために、フィルム上のデータを電子化することが期待されている。

フィルム画像を電子化するには、画像読取り

器（ディジタイザ）を用いてデジタル画像を得るフィルムディジタイジングを用いる。当社は、GE Inspection Technologies 社の解像度 50um の FILM Digitizer FS50 を採用して取り組んでいる。フィルム像をデジタル化することで各種の画像処理技術を適用でき、きずを強調することで経年変化をより容易に判断することに寄与できる。

一方、放射線透過試験時にフィルムを用いずにデジタル画像を得る方法も用いられてきており、配管などの減肉調査などに活用されてきている。しかし、日本工業規格にこれらのデジタルラジオグラフィに関する規定がなく、溶接部の検査への国内での適用の制約となっている。一方、国外規格では既に規格に取り入れている場合もあり、これらに関連する輸出工事に対する積極的な活用を進めている。

対象とした海外工事における透過度計識別度（板厚に対する画像より識別できる最小の線径の比率）の要求は2%であったので、これを満足させるために、線源に焦点寸法の小さな（ミニフォーカス）線源を採用し、X線画像処理装置 FCR（Fuji

Computed Radiography) と組合せることで2%の透過度計識別度を満足できることを確認した。FCRとは輝尽性蛍光体に放射線像を補足した後に、画像読取装置で輝尽発光を電気信号に変換して画像を表示させるものである。

フィルム濃度に相当する画像の任意点でのQL値から裏ビード高さの管理を行った。この目的では基準厚さにより測定システムの校正が必要となるので厚さ0.5mm毎のステップウェッジをFCR画像に取り込み、これのQL値を基準として用いた。図47に測定の例を示す。

本工事では、4B配管(肉厚:6.0mm)18,000継手対象に1日平均400枚の撮影枚数で10ヶ月の工事期間で完了した。1枚の照射に対して、通常のフィルム法では9.3分を要するのに対して、FCRの採用で7.5分と約20%の照射時間の短縮にも寄与できている。

6. まとめ

構造物の保守に対する非破壊検査の役割について検討した。構造物の多様化や稼動履歴の多様化に伴って非破壊検査も多様なニーズへの対応が必要になっている。この検討結果に基づくいくつかの対応を紹介した。連続監視システムに関しては、カナダCANDU炉で適用されている高温探触子による減肉連続監視の様子と、SOFOセンサ

及びFBGセンサの光ファイバセンサの連続監視について紹介した。また、グローバル診断ではアコースティック・エミッション(AE)試験によるタンク腐食診断でのノイズ除去に関する検討や、交流電磁場測定法(ACFM)、MsS方式のガイドウェーブ探傷法やLIMA-testシステムの高速探傷技術の開発状況や実機適用状況を紹介した。

また、超音波探傷試験に関する定量化に関して紹介した後に、更に高精度な探傷を工業的な検査時間で実施するためのフェーズドアレイ探傷技術やTOFD探傷などの技術を紹介し、クリープ損傷評価のためのノイズ分析法、ウェーブレット解析技術を用いた信号処理技術を取り込んだ新しい検査システム構築に向けて開発状況を紹介し、最後に、デジタルラジオグラフィの適用について紹介した。

なお、保全に関してはここに示した監視技術や各種の非破壊検査技術のみならず、応力(ひずみ)測定、振動測定や形状測定などの各種の計測技術も重要な役割を果たす。例えば、吊橋、斜張橋などは多くのケーブルで支えられており、ケーブルの張力は橋の保全における重要監視項目の一つとなっている。当社は、ケーブルの固有振動数を加速度センサで計測し、これよりケーブル張力を解析する技術(振動法)を有しており、国内外で多くの適用実績を持っている。なお、高温環境下の

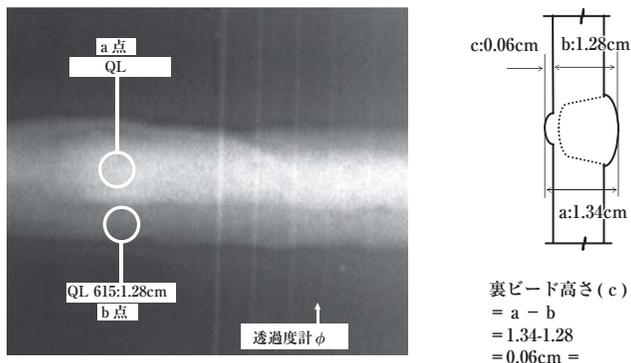


図47 X線画像処理装置FCR (Fuji Computed Radiography) を用いた裏ビード高さ管理の例

応力（ひずみ）計測は、「研究開発支援のための技術」の3.1項で、翼振動計測は3.3項で、また三次元形状計測は3.7項に紹介しているので参照願いたい。

また、損傷は、複雑な形状の場所や接近が困難な部位に発生することがある。このため、損傷が顕在化した部位あるいは危惧される部位に対する探傷技術の開発に努めるとともに、狭隘部の検査用ロボットを開発しているが、検査用ロボットの開発については、「社会産業の安心・安全に寄与する製品展開」の5.原子力関連機器の項でも紹介している。

少しでもご参考になるところがあれば幸いである。

文責

技術研究所所長 工学博士 荒川 敬弘
計測事業部 技師長 技術士（機械部門）
三上 隆男
検査事業部 技術部部长 佐藤 秀一

参考資料

- 1) 笹原：リスク評価に基づく非破壊検査、IIC REVIEW No.29 (2003年4月)、pp.35
- 2) 荒川、中島、畠中、中村：保守に対する検査の役割といくつかの対応、日本非破壊検査協会 保守検査特別研究委員会ミニシンポジウム (2007年9月)、資料No.004-674、pp.87-96
- 3) 熱田：超音波を用いたコロージョンオンラインモニタリングの開発、IIC REVIEW No.21 (1999年4月)、pp.33-42
- 4) 鈴木、垣田：連続高温肉厚監視システム、IIC REVIEW No.24 (2000年10月)、pp.43-45
- 5) 笹原、荒川：高温でのモニタリング、RUMPES (CIW 通信：日本溶接協会)、Vol.17、No.2、p.p.8-9
- 6) P. Kielczynski et al.: Recent Developments

in Ultrasonic Devices for Monitoring Critical Parameters in Canadian Nuclear Reactors, IEEE International Ultrasonic Symposium (Oct.-1998)

- 7) 三上：SOFOシステム、IIC REVIEW No.24 (2000年10月)、pp.29-33
- 8) 三上：光ファイバによる動的変位計測システム (SOFO Dynamic)、IIC REVIEW No.35 (2006年4月)、pp.54-58
- 9) 三上：光ファイバセンサによる高層ビルのヘルスマニタリング、IIC REVIEW No.36 (2006年10月)、pp.2-8
- 10) 三上：光ファイバ変位センサによる橋梁ヘルスマニタリング技術「その1」、IIC REVIEW No.37 (2007年4月)、pp.35-43
- 11) 三上：光ファイバ変位センサによる橋梁ヘルスマニタリング技術「その2」、IIC REVIEW No.38 (2007年10月)、pp.15-25
- 12) 中島、荒川：FBGセンサによる高速ひずみ計測技術について、IIC REVIEW、No.38 (2007年10月)、pp.37-44
- 13) 天野、中村、田上：AE法によるタンク底板腐食検査技術の研究開発、IIC REVIEW No.25 (2001年4月)、pp.6-11
- 14) 中村、萩原、荒川、田上、井戸：AE法によるタンク底板腐食検査技術の概要、IIC REVIEW No.31 (2004年4月)、pp.47-55
- 15) 森田、荒川、畠中、萩原：石油タンク底板の腐食AE波検出に関する研究、圧力技術、Vol.40、No.4、(2002)、pp.31-40
- 16) 中村：AE測定技術の概要、IIC REVIEW No.32 (2004年10月)、pp.45-49
- 17) 中村、滝沢、荒川：高速AE測定システム AMSY-5の特徴 (技研：中村他)、IIC REVIEW No.34 (2005年10月)、pp.56-60
- 18) 中村、荒川、滝沢、鳩、前田、鈴木：タンクAE計測における液滴ノイズの識別及び除去

- 方法の検討、日本非破壊検査協会平成19年度春季大会講演概要集、pp.181-182
- 19) 中村、荒川：タンク AE 計測におけるノイズ除去に関する検討、IIC REVIEW No.39 (2008年4月)、pp.56-62
- 20) 大黒：交流磁場測定法による探傷、IIC REVIEW、No.30 (2003年10月)、pp.46-50
- 21) 大黒、藤原、笹原、大津山、武藤、養祖、坂本、牧野：ACFMによる台車枠検査技術の開発、IIC REVIEW、No.35 (2006年4月)、pp.33-38
- 22) 大黒、藤原、大津山、小林、武藤、坂本、養祖：ACFMによる台車枠検査技術の開発 その2、IIC REVIEW、No.36 (2006年10月)、pp.17-24
- 23) 小林、田仲：新しい台車枠探傷技術 (ACFM) の開発、JREA、Vol.50(2007)、No.9、pp.32766-32768
- 24) 笹原：超音波ガイドウェーブ、IIC REVIEW、No.26 (2001年10月)、pp.20-22
- 25) 本間：ガイド波を利用した超音波技術貫通配管におけるガイドウェーブの適用検討、IIC REVIEW、No.31 (2004年4月)、pp.33-39
- 26) 本間、小林：ガイドウェーブ検査技術の開発状況、IIC REVIEW、No.39 (2008年4月)、pp.20-30
- 27) 本間：街路灯地中埋設部の腐食検査装置、IIC REVIEW、No.33 (2005年4月)、pp.36-43
- 28) 荒川：非破壊試験の欠陥検出能力の調査の動き、溶接学会誌 第55巻 第4号 pp.35-42
- 29) 荒川：非破壊検査技術 第4回 超音波探傷試験の検出性、IIC REVIEW No.33 (2005年4月)、pp.2-11
- 30) T.Arakawa, S.Hirose, T.Senda : The detection of weld cracks using ultrasonic testing、NDT INTERNATIONAL、Vol.18、No.1 (Feb.1985)、pp.9-16
- 31) T.Arakawa : An approach on detection of crack surface and flaw tip by ultrasonic testing、IIW Commission XI (Joint minisymposium with Commission V) XI-811-04
- 32) T.Arakawa, N.Ooka : Dimensional measurement accuracies obtained by focused ultrasonic beam on flaws in heavy section steel plate weldments、ASME/JSME PVP conference (July 1995 Hawaii)、PVP Vol.313-1、International Pressure Vessels and Piping Codes and Standards: Volume 1 pp.315-321
- 33) 芝田、梶ヶ谷、中川：フェーズドアレイ法による複雑な裏面形状を有するボイラ配管の割れ探傷技術、IIC REVIEW No.39 (2008年4月)、pp.11-19
- 34) 芝田：フェーズドアレイ法による異材継手の欠陥検出技術、IIC REVIEW No.38 (2007年10月)、pp.7-14
- 35) 船戸、引地：水車ステーバーンの超音波フェーズドアレイ法の適用、IIC REVIEW No.37 (2007年4月)、pp.2-7
- 36) 芝田、米山、荒川、笹原：超音波 TOFD 法の適用拡大 石川島播磨技報 Vol.38、No.2 1998年3月 pp.119-123
- 37) 猪股：TOFD-UT 技術の紹介、IIC REVIEW No.22 (1999年10月)、pp.28-31
- 38) 芝田：超音波 TOFD 法によるきず検出技術、IIC REVIEW No.24 (2000年10月)、pp.34-42
- 39) 本間：新しい検査技術「TOFD法による健全性評価」、IIC REVIEW No.26(2001年10月)、pp.23-27
- 40) 芝田：ボイラプラントの耐圧部配管における非破壊検査の現状、IIC REVIEW No.28 (2002年10月)、pp.26-33
- 41) 米山、中代、村上、芝田、大友：石川島播磨

技報 第 28 卷 (1988) 第 5 号

- 42) 荒川、畠中、芝田：クリープ損傷評価のためのノイズ分析法、IIC REVIEW No.34 (2005 年 10 月)、pp.26-31
- 43) 畠中、井戸、降駒、荒川：9% Ni 鋼溶接部の超音波 TOFD 法による探傷へのウェーブレット信号処理技術手法の適用検討、非破壊検査 第 53 卷 2 号 (2004)、pp.88-92
- 44) 中島、荒川：リアルタイムウェーブレットの超音波探傷への応用、日本非破壊検査協会平成 19 年度春季大会講演概要集、pp.165-166
- 45) 畠中、中島、荒川、梶ヶ谷、熊谷、井戸：超音波による溶射皮膜膜厚計測へのリアルタイムウェーブレット解析の実機適用、IIC REVIEW、No.38 (2007 年 10 月)、pp.45-50
- 46) 庄司：デジタル X 線画像処理システム (FCR) の溶接継手検査への適用、IIC REVIEW、No.33 (2005 年 4 月)、pp.74-77
- 47) 庄司、栗原：HRSG スタブ管溶接部の超音波探傷法、IIC REVIEW、No.26 (2001 年 10 月)、pp.31 ~ 35
- 48) 芝田、梶ヶ谷：縦波斜角モード変換法による SUS304 隅肉溶接部のルート部き裂の探傷技術、IIC REVIEW、No.36 (2006 年 10 月)、pp.9-16
- 49) 庄司：内挿式超音波肉厚測定システム、IIC REVIEW、No.30 (2003 年 10 月)、pp.73 ~ 77
- 50) 山田：狭所内点検ロボットの開発、IIC REVIEW、No.22 (1999 年 10 月)、pp.45-48