

# 非破壊試験の高精度化に関する動向

荒川 敬弘\*

Arakawa Takahiro

## 1. はじめに

非破壊検査の歴史は古く、1931年（昭和6年）には、ASMEのボイラコードに溶接部のX線検査が規定されたという。日本非破壊検査協会の設立は、1952年（昭和27年）にさかのぼり、当時は日本非破壊検査研究会として活動していた。米国非破壊試験学会（当時の名称はAmerican Industrial Radium and X-Ray Society）設立から11年後である。当初はX線検査が中心であったが、その後各種検査法の確立と規格化が進められ、戦後の高度成長に大きく貢献してきている。

一方、構造物の長寿命化が進む今日では、合理的の保全手法が求められており、非破壊検査も高精度化と種々の多様化を迎えている。非破壊検査の高精度化では、最近の著しいコンピュータ技術の進歩に支えられた、フェーズドアレイ探傷やTOFD探傷などの各種の画像化探傷手法が開発され、実用化しつつある。また、非破壊検査の多様化では、構造物の健全性を短時間でランク付けし、ランクに基づく保全計画を策定するグローバル診断、損傷を常時監視するオンライン・モニタリングあるいはクリープ損傷などのミクロ的な損傷評価が求められることがある。ここでは、フェーズドアレイ探傷やTOFD探傷などの画像化探傷技術の動向と取り組みについて紹介する。

## 2. 非破壊試験の定量化とPISC II計画

非破壊検査とは、目に見えないきずや損傷を顕在化する手法として広義に解釈できよう。この目的に対して、外乱因子による影響が少なく、一定の技量を有するものが行えばある程度安定したきずの評価結果が得られる手法として、放射線透過試験、超音波探傷試験、磁粉探傷試験や浸透探傷試験などがある。これらの非破壊試験手法は品質管理の一つの手法として広く活用されてきている。

一方、高度化した構造物の経年化が進むと共に、構造物の余寿命を正確に予測する技術が望まれてきた。すなわち、品質保証の手段として、有害なきずを確実に評価することが求められ、きずの検出限界寸法に関する議論も広く行われてきている。

超音波探傷試験に関していえば、対象きずが波長の1/3以下の微小きずであれば、きずエコー（散乱エコー）高さはきず寸法（体積）の関数となり、きずの大きさに対する検出確率を求めやすい。しかし、一般構造物で対象とするきずは波長より一般に大きく、むしろきずの形状がエコー高さに大きな影響を及ぼす。このために、対象とするきずの形状できずの検出確率は大きく変化する。横穴や放電加工ノッチなどの人工きずを対象とした検証が進むと、自然界に発生しうる自然きずを対象とした検討が強く求められてきた。

この目的に対する数多くの検討の中で、世界

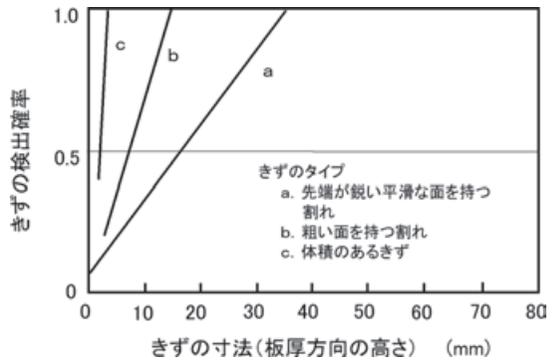
\* フェロー 工学博士

15カ国の国際共同研究となったPISC IIと呼ばれたプログラムはこれの最も大きなものの一つである<sup>(1)</sup>。このプロジェクトは、1981年にDr.R.W. Nichols（英国）を議長として開始されており、この中で実機原子炉圧力容器の一部を模擬した4体のきずを作製した大型溶接試験体が世界50チームでラウンド・ロビン・テストされている。参加した各チームはきずの大きさや形状、位置が不明の状態、それぞれに提案した探傷方法に基づいて試験し、試験体に導入されたきずを切断試験などで明らかにした後にこれらの全ての試験結果が評価された。

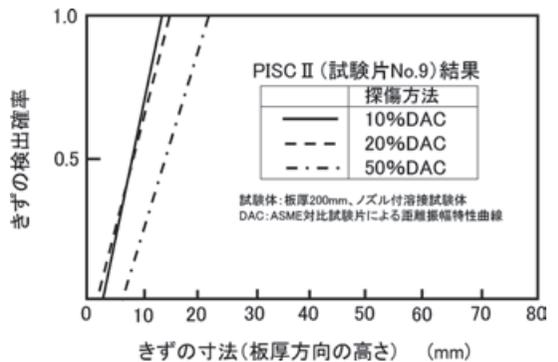
評価の結果、超音波探傷試験における探傷感度がきずの検出性に及ぼす影響、探傷方法の組合せによる検出性の違い、自動探傷と手探傷による違いや同種の探傷方法における試験結果の分散など多くの検討が行われている<sup>(2)</sup>。図1に試験の検討結果の例を示している。(a)図はきずのタイプ(形状)がきずの検出確率に及ぼす影響を示しており、(b)図はきずの検出レベル(探傷感度)が検出確率に及ぼす影響を示している。検出レベルを低くして高感度で探傷すれば検出確率は増大するが、10% DAC (DAC: 距離振幅特製曲線で距離による減衰を補正した評価の基準値) のようなあまり高すぎる探傷感度は改善にさほど寄与しないことを示している。(c)図は、探傷感度とともに探傷の組み合わせが検出確率に大きな影響を及ぼすことを示している。これらの結果を受けて、当時のASME規格 (Sec.XI) の改定も行われている。

また、従来の探傷手法に比べて、最新の探傷技術の結果が優れていたことが指摘されている。ただし、全ての新技術が優れていたわけではなく、6つの優れた探傷手法が選別されている。図2には、信頼性の高い探傷方法として推奨された探傷結果を要約している<sup>(3)</sup>。MCRPは、きずの寸法が大きく許容されない不合格欠陥だけを対象に超音

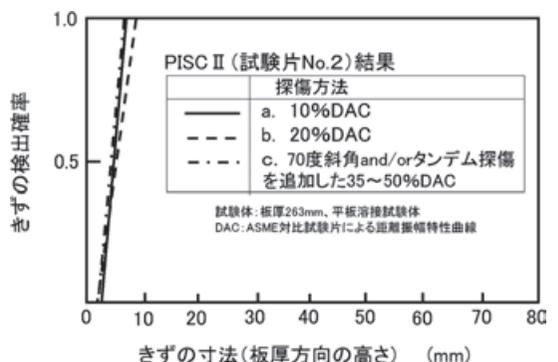
波探傷試験結果を評価したときに、正しく不合格と判定できた確率を示している。すなわち、許容されないきずを見落とすことなく、かつ精度の良



(a) きずのタイプ (形状) の影響



(b) 検出レベル (探傷感度) の影響

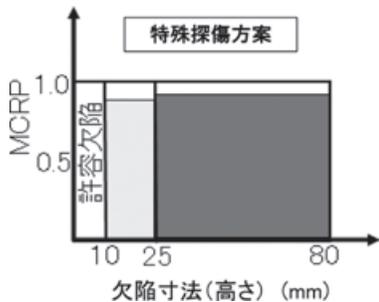


(c) 探傷方法の影響

図1 PISC IIラウンド・ロビン・テストで得られたきずの検出確率に及ぼすきずのタイプ (形状)、検出レベル (探傷感度) や探傷方法の影響

い寸法測定の結果より正しく不合格と判定できた確率である。推奨された手法の中に水浸集束探傷法や TOFD 法も含まれている。

なお、PISC II 計画の発端は、米国の圧力容器研究会議 (PVRC) が原子炉圧力容器の溶接部を



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率

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2 PISC II ラウンド・ロビン・テストで推奨された特殊探傷手法の探傷結果

模擬した 12 体の大型の溶接試験体を作製した 1968 年にさかのぼる。これら試験体の一部の試験協力が欧州及び日本に依頼され、これを受けて欧州で行われたラウンド・ロビン・テストが PISC I と呼ばれた。これらの試験結果に基づき、規模を拡大した非破壊検査の国際共同試験が欧州より提案され、PISC II が開始された。PISC II 以後も、更に PISC III が実施されている。

3. その後の非破壊検査の動向

PISC II のラウンド・ロビン・テストにおける一つの知見は、特定の方位からきずを探傷した場合に比べて、より多くの方位からきずを探傷することによって、より緩やかな探傷感度であってもより優れた探傷結果が得られることである。優れた探傷結果と評された 6 つの探傷手法においても多くの探傷手法を組み合わせた複雑な探傷方案によるものが含まれている。また、超音波ビームを集束させた集束探傷法を用いたチームの探傷精度も優れていた。

図3 は、水素による遅れ割れを対象として、探傷方法の異なる二つの探傷方法で得られた最大エ

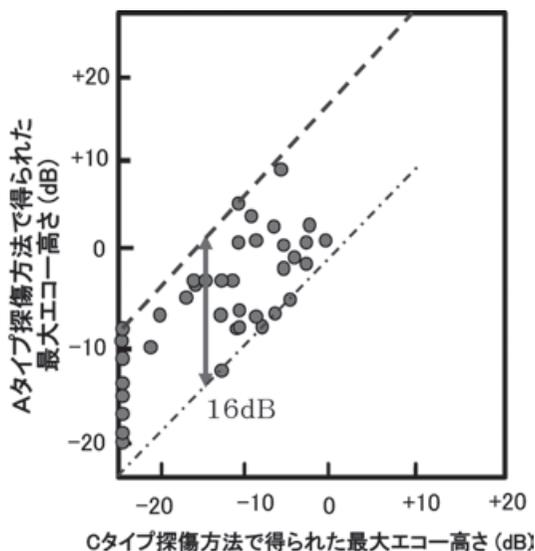
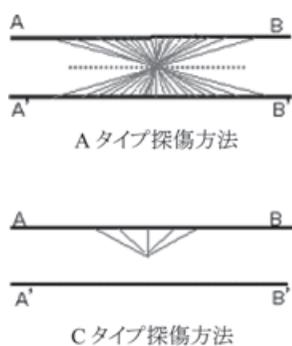


図3 探傷方法 (探傷方位の粗密) の違いによる最大エコー高さの変化の例

コー高さを比較した結果を示している。一つの探傷方法（Aタイプ探傷方法）は、タンデム探傷や垂直探傷を含んで、屈折角15度間隔の斜角探傷を行って、割れに対して15度間隔の全方位（タンデム探傷を板表面に平行なビームの方位と仮定）から超音波をきずに入射させて探傷を行う方法である。また一つのもの（Cタイプ探傷方法）は、垂直探傷と屈折角45度及び60度の斜角探傷だけで探傷を行う方法である。図では同一の割れに対して、種々の方向から探傷を行うことにより最大で16 dBも高いエコー高さが得られることがわかる。このように、種々の方位からきずを狙って探傷することによりきずの検出確率を改善し、信頼性を高めることが可能であるが、反面数多くの探傷を行うために探傷時間は膨大になる。

しかし、この時間を多く要する複雑な探傷も、フェーズドアレー探傷法を用いれば、短時間で探傷が可能になってきており、信頼性の向上に寄与している。フェーズドアレー探傷とは、微小な振動子を隣接して配置し、各微小振動子を励起させるタイミングをコンピュータで制御したものである。例えば、複数の微小振動子を同時に励起させて、通常より大きな平板の振動子と同等の超音波ビームを形成し、励起させる微小振動子を一つ毎に順次ずらせていけば、探触子を機械的に走

査する代わりに電気的な高速走査が可能になる。さらに、各微小振動子が励起する時間を適宜制御することで、各微小振動子で励起された超音波が互いに干渉しあって伝搬し、超音波ビームの試験体への入射方向を任意に変えるセクタスキャンが可能になる。図4にフェーズドアレー探傷の原理を模式的に示している。

一方、PISC II計画で推奨された探傷方法に集束探触子を用いた探傷手法もあるが、振動子に曲率を付けて特定の深さで焦点を結ぶようにした集束探触子による探傷では、きずの深さに応じて最適の集束探触子を選別して使用する必要があるために、探傷が極めて煩雑で長い探傷時間を必要とする。フェーズドアレー探傷の使用で、この複雑な探傷も短時間で実施できるようになっている。すなわち、超音波ビームが集束する深さ位置を順次電子的に変化させ、最も超音波ビームが集束した位置の情報のみを画像化するダイナミックフォーカシングを用いることで、短時間の探傷で測定精度を改善できるようになった。

図5に、種々の深さに同形状の横穴（φ3 mm）を設けた試験体に対して、従来の固定焦点の集束探触子（凹型の圧電素子を用いて一定の深さに焦点を結ぶようにした探触子）を用いて探傷した結果と、フェーズドアレー探傷でのダイナミック

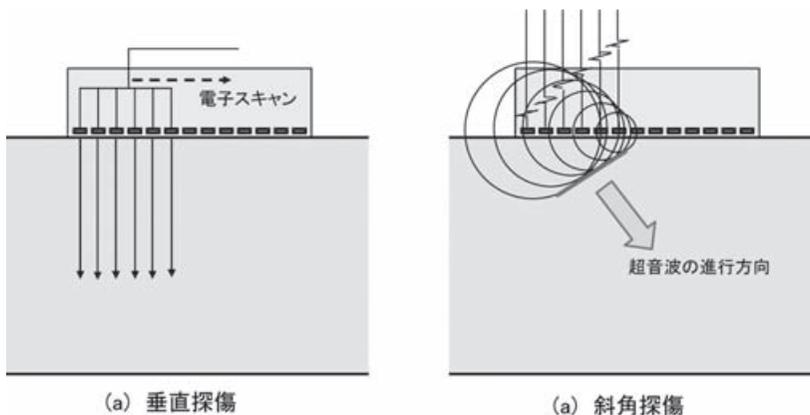


図4 フェーズドアレー探傷法の原理

フォーカシング機能を用いて探傷した結果を比較している。固定焦点の従来の集束探触子によると、焦点位置に一致した深さの横穴の輪郭は明瞭に示されているが、反面、焦点位置から離れた深さの横穴の輪郭は不鮮明になっている。ダイナミックフォーカシングによれば、全ての深さの横穴の輪郭は、従来の固定焦点の場合に比べて鮮明になっている。

このように、PISC II 計画で実証されたより精度良い探傷が、電子機器技術やコンピュータ技術の著しい発展に伴って、極めて短時間で実践できるようになったといえる。また、PISC II 計画時は開発されて間もない TOFD 探傷技術も、現在では国内でもかなり普及し、実機に適用されるようになってきている。

この方法は、**図 6** に示すように、二つの斜角探触子を対向して一定距離に配置して、片方を送信用とし、他方を受信用として探傷する方法である。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）が現れる。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（B 波）が得られる。得られた信号波形の振幅（エコー高さ）をカラー（濃淡）表示させると、一つの探傷波形は一本の線で表示でき、これを探触子の直線走査に対応して並べると TOFD 探傷画像が得られる。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（濃淡）表示される。

き裂部に超音波を入射させると、面での反射の他に、き裂端部で回折波が発生する。面での反射波を受信しないように探触子を配置して、端部での回折波を受信し、これの伝搬時間から幾何学的にき裂の端部位置を正確に測定できる。従って、板厚方向のき裂の寸法を正確に計測できる。

なお、きずの端部からの回折波の伝搬時間と端部位置との関係は、探触子位置ときずとの相対位置の関数でもある。このためにきずの深さ位置を正確に測定するには、探触子をきずの長手方向に直交する方向にも走査させ、2つの探触子間距離の中央にきずが位置するときの最も短い伝搬時間を用いて深さを測定する。

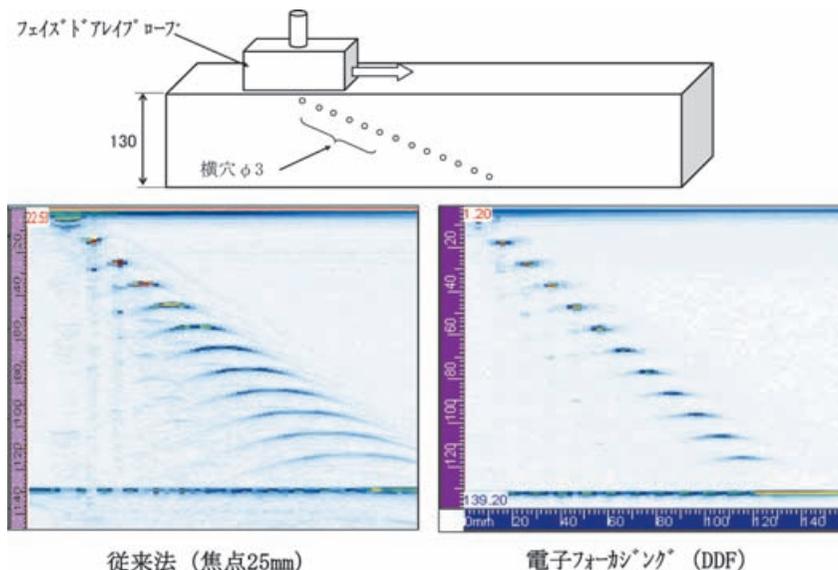


図5 固定焦点（深さ 25mm）集束探触子とフェーズドアレイ探傷（電子フォーカシング）の探傷結果の比較

図7は疲労き裂を三点曲げ試験で進展させ、そのときのき裂の進展過程を常時監視するために、試験片に固定した二つの探触子によってTOFD探傷した結果である。このようにき裂の先端における回折波を捉えることができれば、測定した超音波の伝搬時間より幾何学的にきずの高さの変化を精度よく測定することができる。なお、本試験は耐熱性に優れたろう付式高温探触子を取り付けて行ったもので、300℃における高温でもき裂進展を監視できることを確認している<sup>(4)</sup>。

TOFD法を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なので、探傷速度も一般に速い。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なり、端部からの回折波とノイズや微小きずからの散乱波との識別が困難になることもある。図8は、用いる探触子によって疲労き裂先端からの端部エコーの識別が大きく異なる例を示している<sup>(5)</sup>。

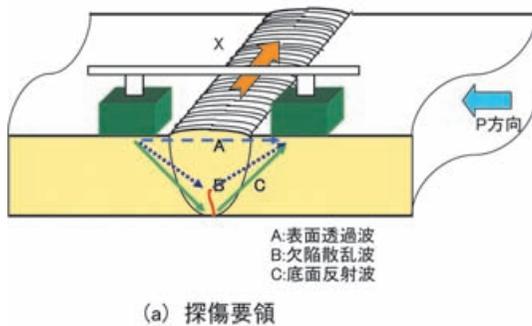


図6 TOFD探傷法の原理

また、図9は円盤の中央位置に各種形状の端部を置き、円周から二探触子法で端部からの回折波の強度を測定した結果を示している<sup>(6)</sup>。端部への超音波の送信方向と受信方向のなす角度(2θ)が小さくなると、疲労き裂の端部の回折波の強度がいかに低下するかを示している。従って、

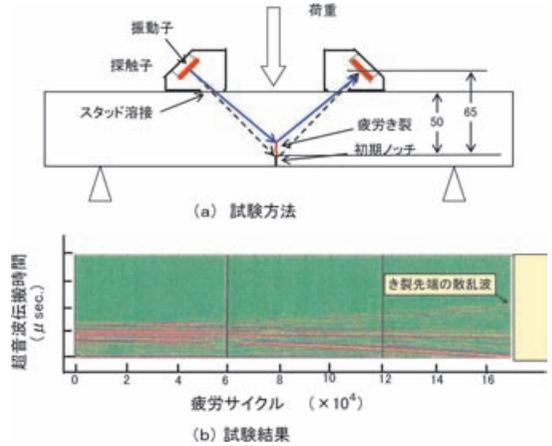
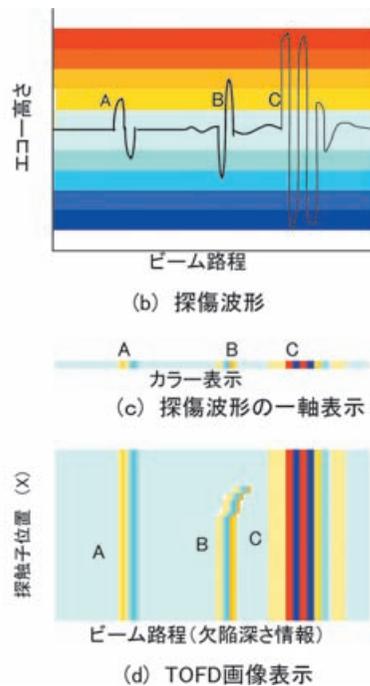


図7 TOFD探傷法による疲労き裂進展の監視結果



TOFD 探傷では、このような微弱な回折波を確実に捉えることが重要である。

TOFD 探傷は、一般に広い範囲の監視領域を設

定して探傷することにより、短時間の探傷が可能なのも一つの特徴としており、探触子としては指向性の鈍い探触子を使用される傾向がある。し

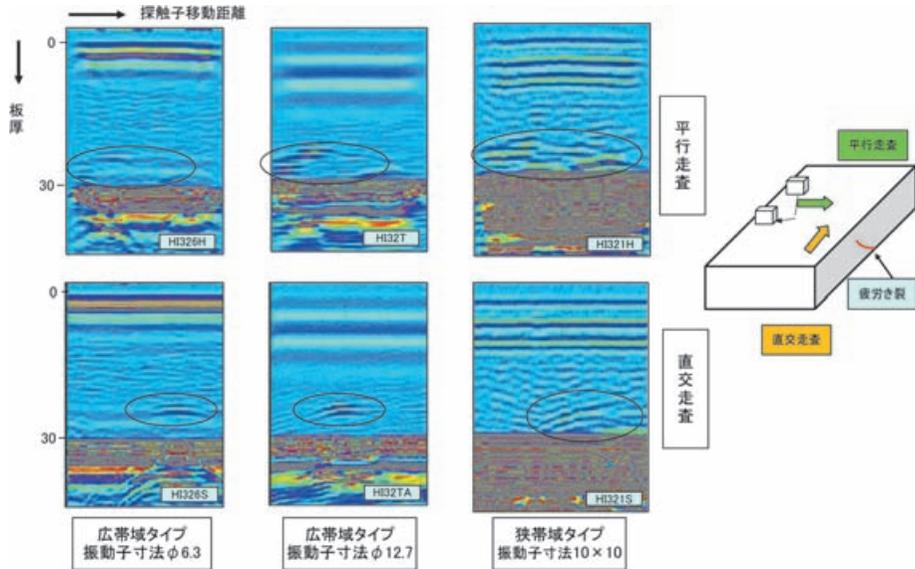


図8 用いる探触子による TOFD 探傷画像の SN 比の違い

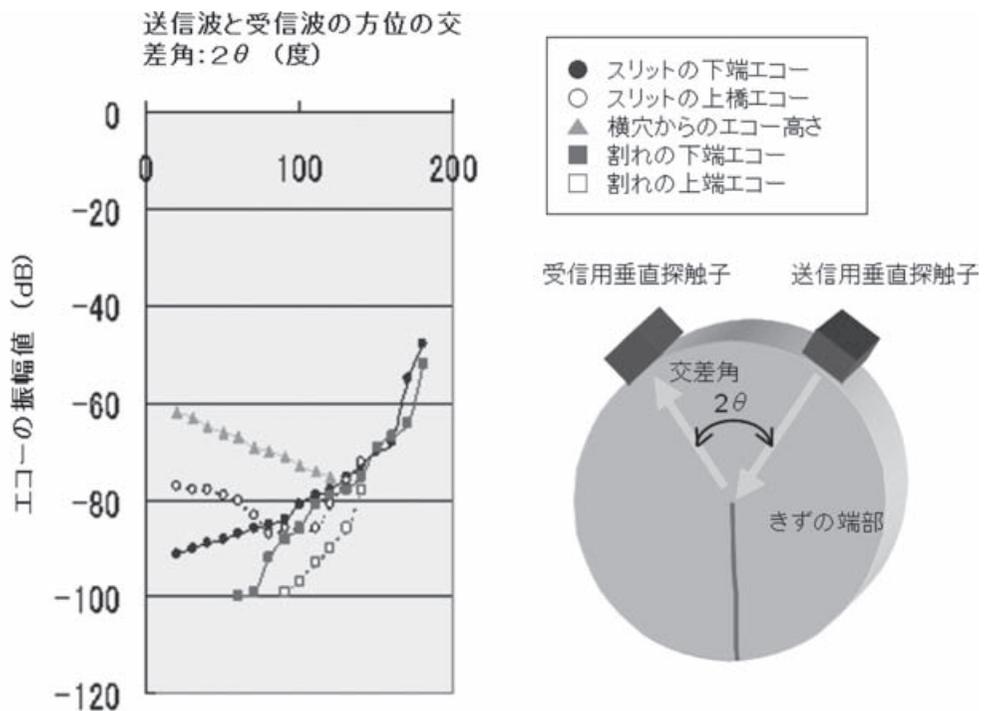


図9 各種形状のきず端部での回折エコーの振幅値の比較

かし、反面指向性の鈍い探触子ではノイズレベルが増大してき裂などの端部の微弱な回折波とのSN比が低下する。図8の結果よりも、振動子寸法が小さく指向性の鈍い探触子（指向性は波長と振動子寸法の比で表わされる）の方のき裂端部のSN比がより低下していることが伺える。

フェーズドアレー探傷を活用することにより、高速の探傷速度を維持したままSN比を改善することが期待され、検討している。すなわち、二つのフェーズドアレー探触子を送受信用に用いて、二つの超音波ビームの屈折角の変動を連動させ、交軸点における送受信波の音圧の高くなる領域のみのデータを採取して画像化する方法である。図10にフェーズドアレー TOFD 法を模式的に示している。

また、SN比の改善にリアルタイムウェーブレットを用いた信号処理技術の適用に取り組んでいる。従来はウェーブレット解析の演算に時間を要し、ポスト処理でしか適用ができなかった。しかし、コンピュータ技術の進歩と高速演算技術の開

発に伴ってリアルタイムでの適用が可能となり、従来の時間軸と信号の振幅値での評価に、更に周波数軸を加えた探傷を行うことにより、信号とノイズの識別を容易にした探傷が可能になった。

図11はリアルタイムウェーブレットを組み込んだTOFD探傷システムの表示パネルを示している。表示パネルの左上段は取り込んだ探傷波形を示し、この取り込んだ原波形に基づくTOFD探傷画像（画像の縦軸は時間軸で、横軸は探触子位置を示す）を左中段に示している。左下段には探傷波形の周波数解析結果を示している。

右上段には取り込んだ探傷波形のウェーブレット解析結果をリアルタイムで表示しており、縦軸は周波数で、横軸は時間軸を示し、音圧をカラーで表示している。また、同図には破線の横バーが表示されているが、これを用いてきずエコーのSN比を改善できる周波数波形を抽出することができる。右中段には、抽出した周波数の探傷波形を示し、右下段に抽出した探傷波形によるTOFD探傷画像を示している。

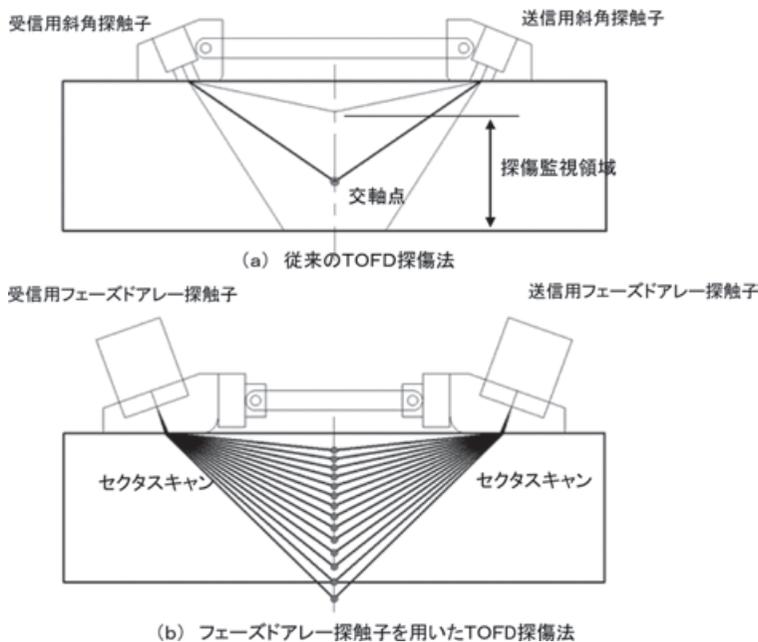
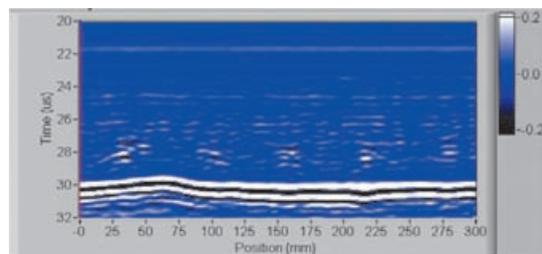


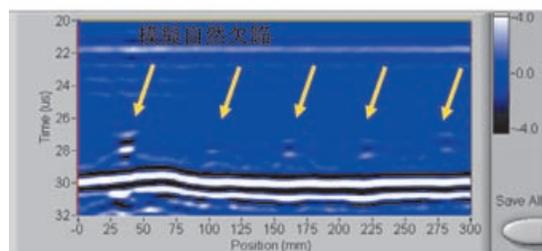
図10 フェーズドアレー探傷を活用したフェーズドアレー TOFD 探傷の模式的説明図

図 12 は、9%Ni 鋼（板厚 50 mm）を Hastelloy 系溶接金属で溶接した試験体の溶接部に予め設けた 5 つの高温割れ模擬欠陥を TOFD 探傷したときの、原波形による TOFD 探傷画像と特定周波数の抽出により求めた TOFD 探傷画像を比較して示している<sup>(7)</sup>。原波形による TOFD 探傷画像にはきずエコーによる像の他にも多くのノイズによる模様が観察されている。このようにノイズの多い探傷では、従来はベテランの技術者の経験に大きく依存してきたが、信号処理技術の適用により、ある程度の技量をもつ探傷者であれば容易に判断できる画像を提供でき、探傷の支援ツールとして活用することを期待している。

なお、ここでは特定の周波数波形の抽出する例を示したが、複数の周波数の探傷波形を抽出して、開発したアルゴリズムを用いて探傷画像を構築するシステムも開発している。



(a) 原波形によるTOFD探傷画像



(b) リアルタイムウェーブレットで抽出した波形によるTOFD探傷画像

図 12 9%Ni 鋼 Hastelloy 系溶接金属に作製した模擬自然欠陥のリアルタイムウェーブレットを用いた TOFD 探傷結果の例

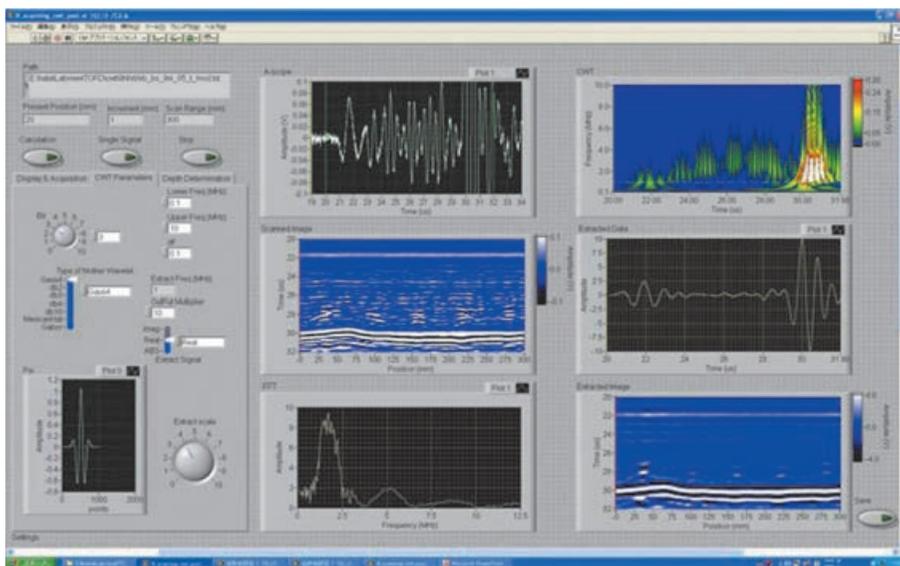


図 11 リアルタイムウェーブレットを組み込んだ TOFD 探傷システムの表示パネル

## 5. まとめ

構造物の経年化が進む中で、合理的な保全技術が求められており、非破壊検査結果の高精度化も求められ、種々の画像化探傷が実用化されている。この中でフェーズドアレー探傷と TOFD 探傷の役割について、1980 年代に行われた世界 15 カ国の国際共同研究の PISC II 計画での結果も用いて解説した。同時に検査技術者の高齢化に伴って、世代交代と技術伝承を円滑に進めることも重要になっている。この目的に対する一つの手段として、リアルタイムウェーブレットを用いた信号処理技術の検査支援ツールとしての役割について紹介した。

コンピュータ技術の進歩は今後もますます期待でき、非破壊検査の高精度化や多様化の目的に活用していくことにより合理化が図られていくと考えて開発に取り組んでいる。

## 参考文献

- 1) 荒川：非破壊試験の欠陥検出能力の動き、溶接学会誌、第 55 巻 (1985)、第 4 号、pp.35-42
- 2) Crutzen et al.:The PISC II Project; Initial Conclusions regarding the procedures in the round-robin tests, NDT Internationals, Vol.18 (1985),

No.5, p 243-s

- 3) Evaluation of the PISC- II trials results, PISC II Report No.5 (Sep-1986) (Joint Research Centre S.P./I.07.C1.86.62, Nuclear Energy Agency CSNI No.121) p.72
- 4) T.Arakawa, M.Tanosaki, K.Yoshikawa On-line monitoring techniques of crack propagation using brazed-type ultrasonic sensors for high temperature use, 13th International Conference on NDE in the nuclear and pressure vessel industries, 1995 May (Kyoto), pp.217-221
- 5) 荒川 敬弘、中西 保正、加藤 謙治、芝田 三郎、久保 善昭：球形ホルダーへの超音波 TOFD 法の適用、非破壊検査、49 巻、12 号 (2000)、PP.823-833
- 6) H.Asano, K.Kawahara, T.Arakawa, M.Kurokawa : Qualification of Final Closure for Disposal Container II -Applicability of TOFD and Phased Array Technique for Overpack Welding-, 28th MPA-Seminar, Oct. 2002, (Stuttgart Germany)
- 7) 畠中、中島、荒川、黒川、水谷：超音波探傷へのリアルタイム信号処理技術の適用、保守検査特別研究委員会ミニシンポジウム (日本非破壊検査協会)、No.004-677 (2008 年 9 月) pp.11-16



フェロー  
工学博士  
荒川 敬弘  
TEL. 045-791-3522  
FAX. 045-791-3547