

# Multi2000 超音波探傷システムを用いた 探傷手法の紹介

荒川 敬弘<sup>\*1</sup> 寺久保麻美<sup>\*2</sup>  
Arakawa Takahiro Terakubo Asami

フェーズドアレイ探触子の各素子の励起を比較的自在に制御できる Multi2000 超音波探傷システムを用いて、従来は困難であった測定を可能にする新たな手法を開発したので報告する。一つは、各素子で表面波を受信し、表面波の伝搬時間差と素子間距離の関係から、統計処理を用いて高精度に表面波音速を測定する手法であり、また一つは、試験片表層部の深さ方向に多数の交軸点を設け、集束させたビームによる TOFD 探傷を行い、得られた波形を合成することで表層部の微小き裂の深さを測定する手法である。

キーワード：フェーズドアレイ探傷、表面波音速、TOFD 法、表層部き裂、深さ測定

## 1. はじめに

超音波探傷装置もデジタル化が進み、アナログの探傷器も希少な存在となってきた。コンピュータ技術の進歩と相まって、超音波探傷試験はデジタル化により、さらに進化してきているように思える。

例えば、目的に応じた信号処理を施すことにより、マイクロ程度の減肉を監視したり<sup>(1)</sup>、探傷時のノイズレベルの低減<sup>(2)(3)</sup>に寄与することが可能である。一方、微小な素子を配列したフェーズドアレイ探触子の各素子の励起を自在に制御することによりさまざまな音場を形成して複雑な探傷を行うことが、デジタル化の進歩で可能になってきた。

Multi2000（仏 M2M 社製：インサイト株式会社販売）超音波探傷システムは、特に自在な探傷を可能にしたものの一つである。著者らは Multi2000 探傷システムを活用して、超音波探傷試験の高度化を検討しており、いくつかの例を紹介する。

## 2. Multi2000 の概要

Multi2000 探傷システムでは、予め探傷の手順をリストに表し、リストに従った探傷が行われる。

図 1 に探傷リストの例を示している。このリストの作成を支援するための多様なツールが準備されている。

探傷の手順は Sequence、Shot、Element で区分される。Sequence は素子の組合せを意味し、例えば同一の探傷を順次素子の組合せを変えて行うリニアスキャンでは、Sequence のみが 0 から順次変化する。Shot は使用する素子の組合せを一定にして行われる複数の探傷を意味し、例えばセクタスキャンでは屈折角の変化に伴って Shot が 0 から順次変化する。Element は各 Shot を構成する各素子を意味し、各素子が励起する遅延時間や各素子の感度差を補正するための補正電圧などが表記されている。

リストに表された探傷の組合せは、一つの Salvo

\*1：フェロー 工学博士 横浜国立大学 安心・安全の科学研究教育センター 客員教授

\*2：研究開発センター 研究開発グループ

と称され、複数の Salvo を組み合わせることによりさらに複雑な探傷も可能になる。例えば、セクタスキャンによる溶接部両側からの探傷に、TOFD 探傷を組み合わせると同時に探傷を行うことも可能である。この多様な機能を用いると特殊なニーズへの対応も容易になる。

### 3. 表面波音速の測定

表面波の音速は、一般に二つの表面波探触子を一定距離離して表面波を送受信し、表面を表面波が伝搬した距離を伝搬時間で除して求められる。

表面波の伝搬距離は二つの探触子の入射点間距離として求められる。しかし、探触子の入射点位

置は、くさびおよび試験片の音速に依存して変化する。未知の試験片の表面音速を測定するので、絶対音速としては誤差が必然的に生じる。

くさびを音速 3100m/sec. の表面波に併せて作製した表面波探触子を用いて音速の異なる試験片で音速を測定したときの測定誤差を、入射点位置がスネルの法則により変化するとして求めた音速の誤差の検討結果を図 2 に示す。ここでの誤差は、公称入射点間距離を 50mm とし、超音波のくさび内伝搬距離を 20.8mm として求めた。表面波音速が 2900m/sec. の試験片における誤差は 0.9% となり、この値は経年劣化や表面改質により変化が予測される音速変化率に比べて無視できない値であるといえる。

Channel reference	Delay (ns)	Voltage (V)	Pulse width (ns)	Element n°	Enabled	Shot delay (ns)
Seq0,Shot0,Cha25	247.5	0.0	0	25	<input checked="" type="checkbox"/>	
Seq0,Shot0,Cha26	185.0	0.0	0	26	<input checked="" type="checkbox"/>	
Seq0,Shot0,Cha27	122.5	0.0	0	27	<input checked="" type="checkbox"/>	
Seq0,Shot0,Cha28	57.5	0.0	0	28	<input checked="" type="checkbox"/>	
Seq0,Shot1,Cha1	860.0	0.0	0	1	<input checked="" type="checkbox"/>	
Seq0,Shot1,Cha2	862.5	0.0	0	2	<input checked="" type="checkbox"/>	
Seq0,Shot1,Cha3	865.0	0.0	0	3	<input checked="" type="checkbox"/>	

(a) 送信側素子の探傷リスト

Channel reference	Delay (ns)	Gain (dB)	Element n°	Enabled
Seq0,Shot0,Cha25	1032.5	0.0	25	<input checked="" type="checkbox"/>
Seq0,Shot0,Cha26	1092.5	0.0	26	<input checked="" type="checkbox"/>
Seq0,Shot0,Cha27	1157.5	0.0	27	<input checked="" type="checkbox"/>
Seq0,Shot0,Cha28	1222.5	0.0	28	<input checked="" type="checkbox"/>
Seq0,Shot1,Cha1	400.0	0.0	1	<input checked="" type="checkbox"/>
Seq0,Shot1,Cha2	417.5	0.0	2	<input checked="" type="checkbox"/>
Seq0,Shot1,Cha3	415.0	0.0	3	<input checked="" type="checkbox"/>

(b) 受信側素子の探傷リスト

図 1 Multi2000 探傷システムの探傷リストの例

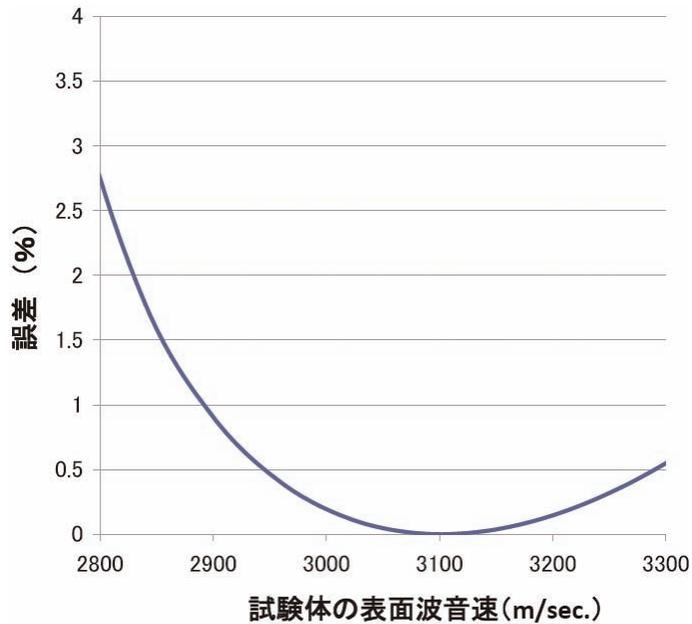


図2 表面波探触子による音速計測における試験片音速変化に伴う誤差の予測

著者らは、より正確な絶対音速を評価する計測手法として、フェーズドアレイ探触子を用いることを検討した。フェーズドアレイ探触子のそれぞれ一つの素子間で超音波の送受信を行うと、素子間で試験片表面を伝搬するレーリー波や縦波成分のラテラル波を受信できる。

図3に32チャンネルのフェーズドアレイ探触子を用い、端に位置する一つの素子を送信用に用い、残りの素子で順次切り替えて受信したときの探傷結果の例を示している。図の横軸は受信したチャンネル番号を示しており、素子間隔に伴う表面波の送受信間距離を示している。縦軸は伝搬時間であり、エコー高さが濃淡で表示されている。

図中にそれぞれ、レーリー波の送受信と考えられるエコーやラテラル波の送受信によると考えられるエコーが直線上に観察できる。この傾きより音速を求めることが可能である。フェーズドアレイ探触子の素子幅は小さく、レーリー波やラテラル波を送受信するのに適していると考えられる。

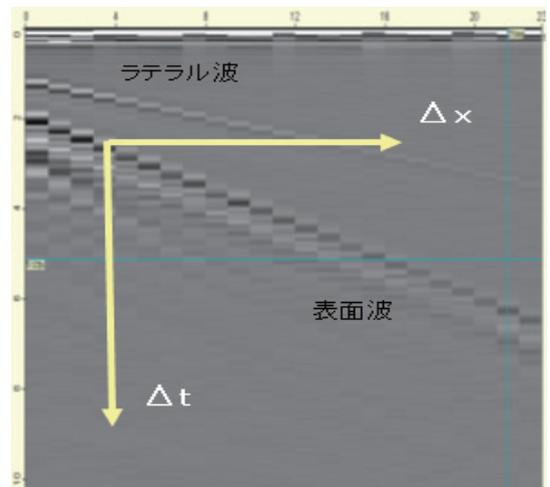


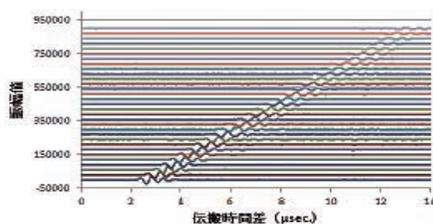
図3 フェーズドアレイ探触子の素子間の送受信結果の例

SN比を改善し、より精度よく音速を求めるために、外部より表面波探触子でレーリー波を送信し、フェーズドアレイ探触子の各素子で順次受信することを行った。すなわち、各素子での伝搬時間差を求める結果になる。伝搬時間差を求めるために、二つの波形のうち一つの波形を $\Delta t$ ごと移動させ、二つの波形の積の累積値を求め、最大となる累積値のときの $\Delta t_n$ を伝搬時間差とする波形相関法を用いた。得られた各素子の伝搬時間差と伝搬距離との関係より最小二乗法により傾きを求め、これより音速を算定した。図4に、音速測定の手順の概要と測定例を示している。

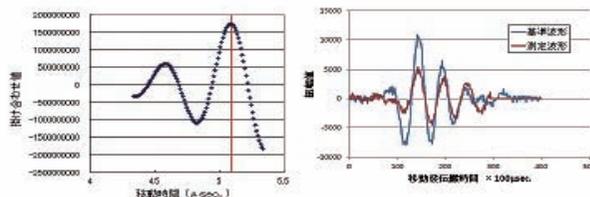
本測定法が音速の微小変化の測定に有効であるかを検証するために、温度変化に伴う音速変化の測定を行った。試験は温湯中にオーステナイト系

ステンレス鋼製試験片を浸し、試験片温度を温かくした後に徐冷する過程の音速変化を求めた。温度は熱電対により監視した。

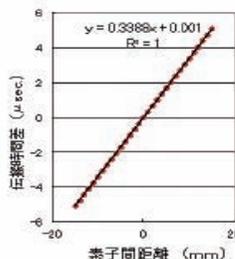
用いた送信用の表面波探触子は、公称周波数2.25MHzであり、受信用フェーズドアレイ探触子は2.25MHzで素子間隔1mmの32チャンネルである。結果を図5に示しているが、わずか15℃の温度差であるにもかかわらず音速の変化を精度良く捉えているといえる。今回の計測のサンプリング周波数は100MHzであり、超音波の最大伝搬距離差においてのサンプリングピッチは約3m/sec.の音速差の誤差に相当する。統計処理を用いることより、さらに高精度の探傷が可能になっているといえる。



(a) 手順1の測定例



(b) 手順2の測定例



(c) 手順3の測定例

図4 フェーズドアレイ探触子を用いた表面波音速の測定手順の概要と測定例

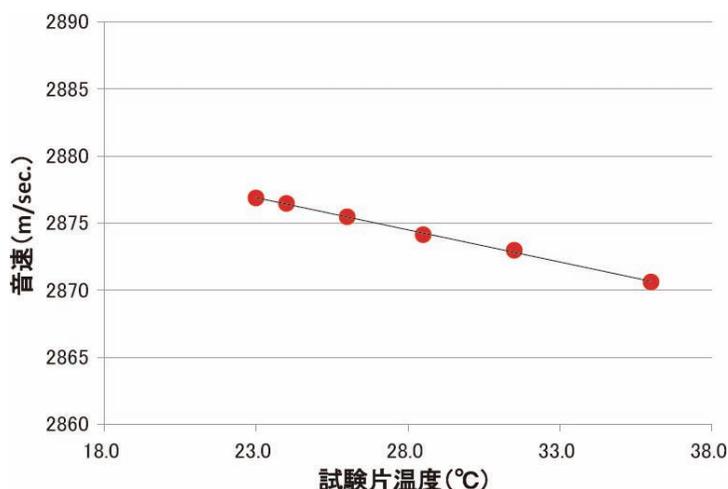


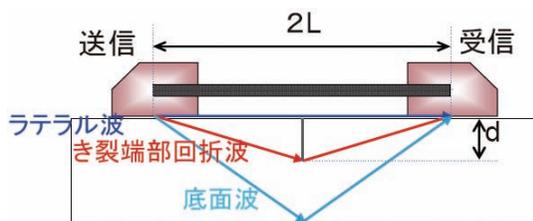
図5 オーステナイト系ステンレス鋼の表面波音速の温度依存性の測定結果

#### 4. 表面微小きずの深さ測定

き裂の精度良い深さ測定法として、TOFD法が知られている。図6に示すように、この方法は、二つの斜角探触子を一定間隔で対向させて配置して超音波を送受信する方法である。き裂のない場合には、表面を伝搬するラテラル波と裏面で反射する底面エコーの波形のみが得られる。一方、き裂が存在すると、き裂端部からの散乱波が受信される。この散乱波の伝搬時間より幾何学的にき裂端部の深さを求めることができる。しかし、き裂の端部が表層部近傍にある場合には、ラテラル波とき裂端部の散乱波が互いに干渉し、き裂端部を明確に識別することができなくなり、表層部の微小き裂の深さ測定は困難とされている。

表層部の微小き裂の測定精度向上を目的にMulti2000超音波探傷システムの活用を検討した。対向した二つの探触子の入射点間距離を極力短くするためのくさびを試作し、かつ二つのフェーズドアレイ探触子を搭載して、交軸点を深さ方向に順次変化させるアレイTOFD探傷をMulti2000探傷システムで行った。

屈折角45度の二つの縦波用くさびを対称形に



き裂端部回折波とラテラル波の伝搬距離差:  $\Delta w$

$$\Delta w = 2 \times (L^2 + d^2)^{(1/2)} - 2L$$

図6 TOFD法によるき裂深さ測定の概要

貼り合わせ、対称軸には超音波の透過を妨げるための音響分割面を設けたくさびを使用した。二つのくさびを貼り合わせたのは、可能な限り二つの入射点間距離を短くし、より浅い位置に集束位置を設定するためである。このくさびに10MHzで32chの二つのフェーズドアレイ探触子(素子間隔0.6mm)を対向して搭載した。フェーズドアレイ探触子を用いたのは、交軸点深さを種々変化させるためのセクタスキャンと集束探傷を同時に行うためである。図7に、探傷方法の概要を示している。

交軸点を深さ方向に種々変化させることにより、き裂の端部位置に近い交軸点で正確なき裂の像を捉えることを期待した。さらに得られた全ての探傷画像を加算することによってき裂の端部を強調できることを期待した。

交軸点を変化させると、試験片への超音波の入射点位置が変化する。このためにラテラル波の伝搬時間も変化する。しかし、き裂端部の回折波は、最短時間で伝搬する経路を通る（スネルの法則）ので、伝搬時間は変化しないと考えた。従って、交軸点の異なる波形の和を求めると、伝搬時間が変化するラテラル波は減衰し、伝搬時間の等しいき裂端部の回折波は強調され、SN比を改善することが期待された。

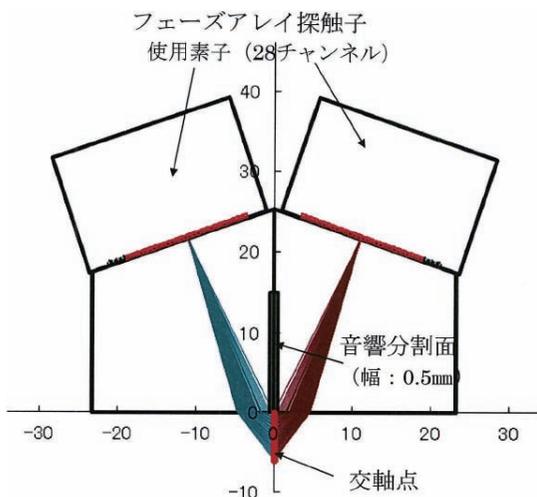


図7 探傷要領

図8に交軸点の異なる波形の重ね合せの効果を模式的に示している。(a)図は、伝搬経路の予測図であり、交軸点の比較的浅い場合とより深い交軸点の場合で、ラテラル波の伝搬距離は変化するが、きず端部の回折波では、最短伝搬時間となる同一の伝搬経路になると考えられる。(b)図は、重ね合せの効果を示しており、きずのない場合は交軸点の差で伝搬距離の異なるラテラル波が減衰

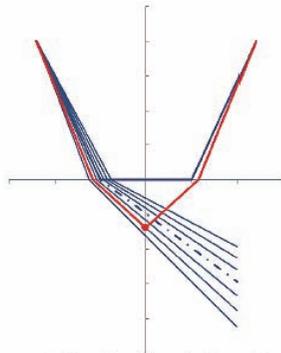
し、伝搬経路の等しいきず端部の回折波が重ね合せて強調される様子を示している。

交軸点の異なる TOFD 探傷画像を重ね合わせる手法を用いて、人工放電加工ノッチの深さ測定精度の検証を行った。用いた試験片は、板厚 20mm の鋼製試験片表面に、長さ 10mm で深さ 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.75、1.0、1.5 および 2mm の表面開口放電加工ノッチを設けたものである。

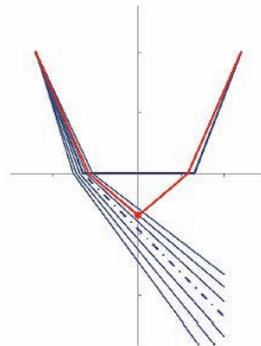
今回の探傷では、32ch のうち、よりくさびの対称軸に近い 28ch の素子を用いて、より浅い交軸点位置での超音波の屈折角をより適正にするように配慮した。交軸点位置は、くさびの対称軸上で試験体表面直下の深さ 0.01mm から深さ 6.4mm の間を 40 等分し、41 個の交軸点を設定し、41 回の TOFD 探傷を連続して行った（鋼試験片の場合に屈折角約 36 度から 77 度のセクタスキャンを設定した結果となる）。それぞれの交軸点近傍で超音波ビームが集束する集束探傷を行っている。

深さ 1.0mm のノッチの探傷結果の例を図9に示す。代表的な交軸点深さで探傷したときの探傷画像を、異なる交軸点深さの 41 回の探傷画像を合成した画像と比較している。各交軸点深さの単独の探傷画像からはノッチ先端からの回折波の明確な特定は困難であるが、合成した探傷画像からはノッチ先端の回折波を明確に特定することができ、深さの測定が可能であるのがわかる。

それぞれの探傷画像に、試験片表面を伝搬したラテラル波が観察されるが、ラテラル波の伝搬時間は交軸点深さが深くなるほどより長くなり、交軸点異なる 41 回の探傷波形を合成した探傷画像のラテラル波のパルス幅はきわめて短くなっているのがわかる。交軸点深さが深くなると、超音波の入射点間距離が長くなり、ラテラル波の伝搬時間も長くなると考えられる。また、伝搬時間がわずかに変化する 41 回の探傷波形を合成すると、ラテラル波はパルスの最初の部分を残して平滑化

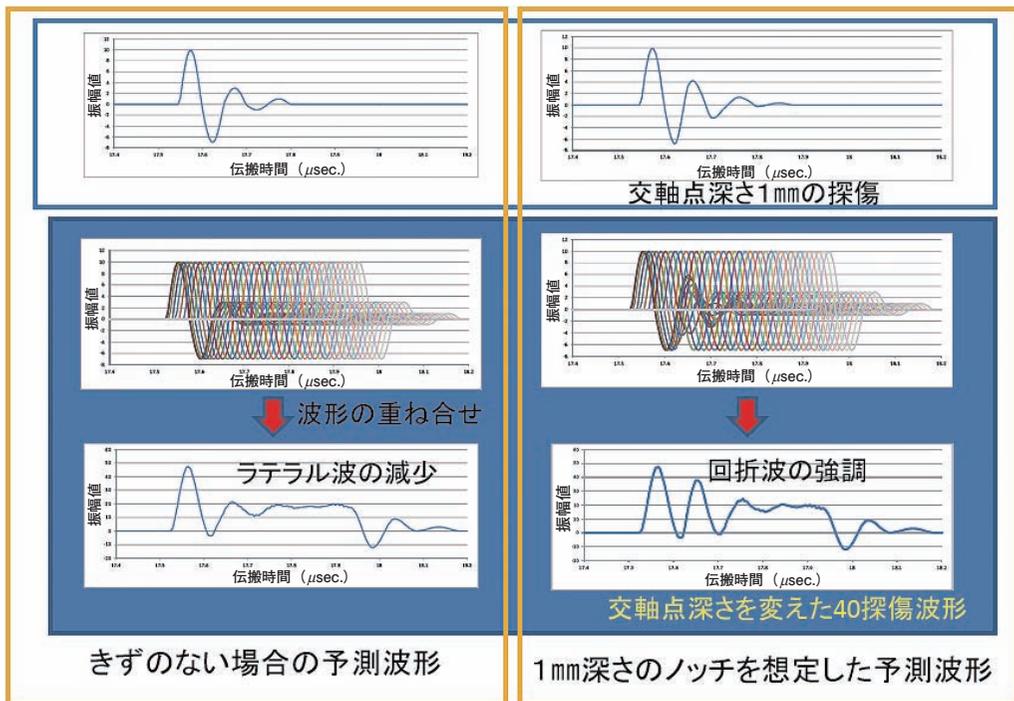


交軸点が比較的浅い場合



交軸点がより深い場合

(a) 伝搬経路の予測



(b) 重ね合せの効果

図8 交軸点の異なる波形の重ね合せによる SN 比改善の様子

されてパルス幅も短くなると考えられる。

各ノッチに対する測定結果を図10に示す。なお、図中には、直径32mmの配管の軸に直交する方向に設けた深さ0.1、0.2、0.3、0.4、0.5および0.75mm深さの表面開口放電加工ノッチの同様の手法による深さ測定結果も併せて示している。0.2mm深さまでのノッチでは、指示は明瞭に得られているが、

深さ測定は困難であったが、0.3mm以上の深さのノッチでは、ラテラル波ときず端部の回折波の伝搬時間差は、いずれもノッチ深さと良い相関関係にあり、また伝搬経路より予測した値とも一致していた。これより、従来は測定が困難であった微小な表層部きずの評価が可能になったといえる。

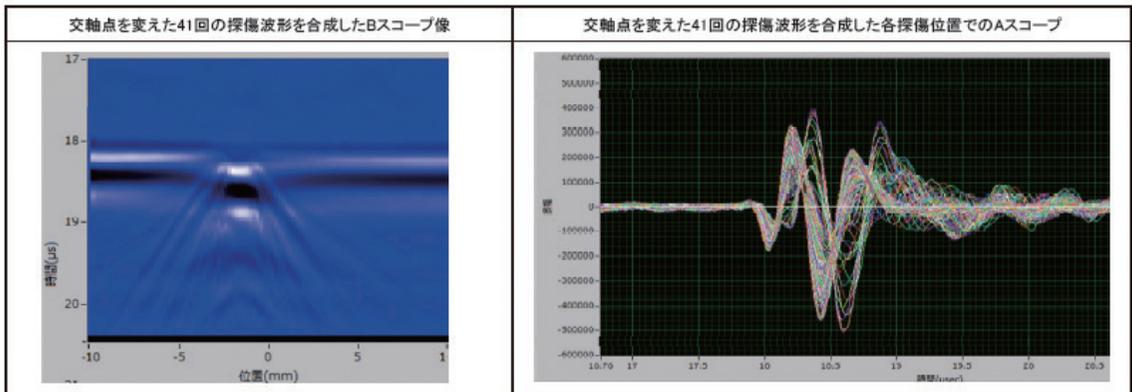
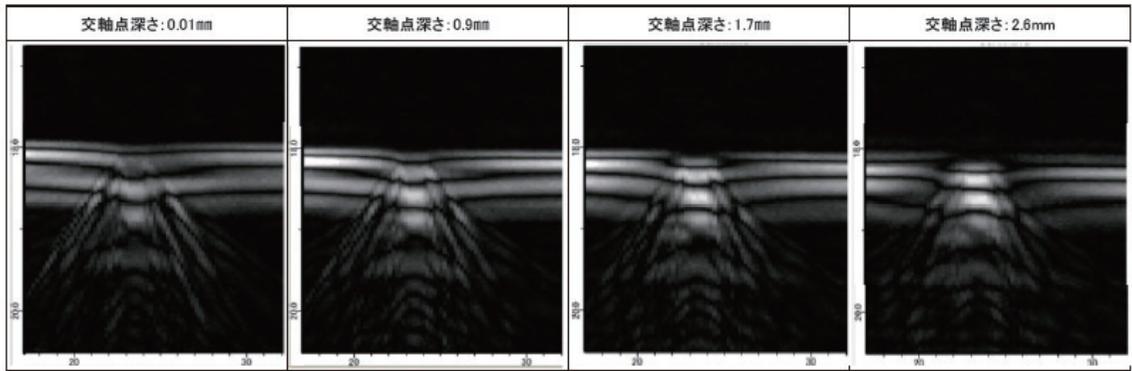


図9 深さ1mmの開口ノッチの探傷結果：交軸点を変えた各探傷のBスコープ像（上段）と、41回の探傷結果を合成した波形によるBスコープ像およびAスコープ（下段）の比較

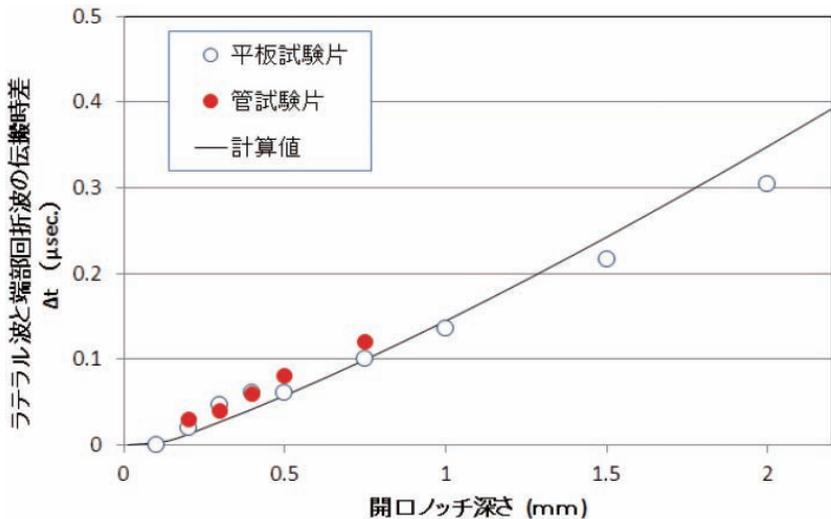


図10 表層部の微小放電加工ノッチに対する深さ測定結果  
(ラテラル波とき裂端部の回折波の伝搬時間差とノッチ深さの関係)

## 5. まとめ

Multi2000 探傷システムは、素子の自在な組合せや、励起のタイミングを自在に設定できる機能を搭載し、ユーザーとのインターフェースが開かれたシステムの一つである。このシステムを用いて、新たな探傷手法の構築が可能であることを紹介した。この他にも、複数の探傷 (Salvo) を組み合わせて、溶接線の両側からのフェーズドアレイやその他の探傷を同時に行う方法へも適用している<sup>(4)</sup>。

今後も、デジタル化の進歩と共にユーザーへのインターフェースがより自在に使い勝手の良いものになっていくことを期待している。特に、探傷データの電子カルテとしても、ユーザーのパソコンとの探傷データの通信により多様化していくことを期待している。

## 参考資料

- (1) 熱田・加藤・斎藤・荒川・畠中「高温での減肉の高精度連続監視」、IIC REVIEW、No.42、pp.37-42、2009-10
- (2) 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手法の検討」、非破壊検査第 53 巻 2 号、2004 年
- (3) 中島「リアルタイムウェーブレットの超音波探傷への応用」、IIC REVIEW、No.37、pp.19-28、2007-4
- (4) 荒川「石油タンク底板溶接部のコーティング上からの非破壊検査技術の検討」日本高圧力技術協会技術セミナー資料「第 13 回エネルギー貯槽等技術基準と安全性」、2013 年 2 月



フェロー 工学博士  
横浜国立大学 安心・安全の科学  
研究教育センター 客員教授  
荒川 敬弘  
TEL. 045-791-3522  
FAX. 045-791-3547



研究開発センター  
研究開発グループ  
寺久保 麻美  
TEL. 045-791-3522  
FAX. 045-791-3547