

キーワード フェーズドアレイ, 開口合成, FMC/TFM, アダプティブ, 逆問題

1. はじめに

超音波探傷試験は工業製品のきずを検出, 評価するための非破壊検査技術の一手法として標準¹⁾となっている。超音波探傷試験で用いるプローブは1970年代にアレイが開発され, SAFT (Synthetic Aperture Focusing Technique)²⁾ などにも応用が進み高度な開口合成法が提唱されてきた。ここではアレイプローブによる開口合成法の総称としてFMC/TFM (Full Matrix Capture and Total Focusing Method) という呼称を用いる。FMC/TFMは超音波エコーの送受信アルゴリズムによって幾つかに区別することができ, 同一素子による送受信で動作するモノスタティック^{3), 4)}, 単一素子から送信された超音波を全ての素子で受信するマルチスタティック⁵⁾, 全ての素子で送信した超音波を全ての素子で受信するAFM (Advanced Focusing Method)⁶⁾ 等があることが知られている。取得した波形データは画像化のためにモノスタティック, マルチスタティック, AFMのいずれも同じ原理で再構成される。TFM⁷⁾ と呼ばれる再構成画像生成のためのアルゴリズムは遅延和法である。これはフェーズドアレイ機器による送受信エコーの遅延制御で試料中の各点に正確なフォーカスを合わせることと等価である。また, TFMは画像のサイズ, 解像度, 材料音速を自由に定義できることから, 従来の超音波探傷試験にはない様々な利点がある。本稿ではFMC/TFMの概要と特徴, そして適用事例について紹介する。

2. フェーズドアレイとFMC/TFMの違い

フェーズドアレイはアレイプローブを用いた超音波画像化技術の1つであり, 現在では超音波探傷試験のために広い範囲で適用が進められている。この技術は超音波の送受信に位相整合を利用することで, 電子的な音場制御によるフォーカスやステアリングを行うことができるとされている。フェーズドアレイでの送信音場の形成は, フォーカローと呼ばれる各素子の励振遅延タイミングの制御によって行われるが, 送信音場の精度はフォーカローの信頼性によって左右される。FMC/TFMはフェーズドアレイと同じくアレイプローブを用いた超音波画像化技術であるが, フェーズドアレイとは異なり, 超音波の受信にのみ位相整合を利用している。これは同一の反射源からのエコーがアレイプローブの各素子で受信されるときに, 到来時間差が生じるという性質を利用している。FMC/TFMはこの到来時間差を厳密に計測し, 再構成画像生成のための位相整合を行うことで精密な超音波画像を得る方法である。

3. アレイプローブによるFMC/TFM

3.1 モノスタティック

アレイプローブは同一の素子で送受信が行われ, これは全ての素子において繰り返される。図1に示す*i*素子で受信した波形データは $y(t, u_i)$ で表すことができる。 N_{el} の素子がある場合, 再構成点 (x, z) は次式で与えられる。

$$o(x, z) = \sum_{i=1}^{N_{el}} y\left(\frac{2r}{c}, u_i\right) \dots\dots\dots (1)$$

また, $r = \sqrt{(x - u_i)^2 + z^2}$ は素子から再構成点までの距離であり, c は材料音速で再構成点の計算時に一定の値をとる。

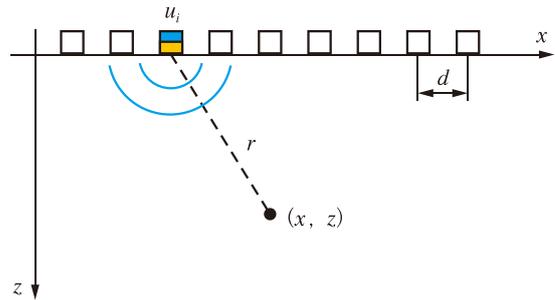


図1 モノスタティック

3.2 マルチスタティック

アレイプローブは単素子送信と全素子受信の繰り返しで動作する。受信した波形データは図2で示す送信素子*i*と受信素子*j*から, $y(t, u_i, v_j)$ と表すことができる。 N_{el} の素子がある場合, 再構成点 (x, z) は次式で与えられる。

$$o(x, z) = \sum_{i=1}^{N_{el}} \sum_{j=1}^{N_{el}} y\left(\frac{r_1 + r_2}{c}, u_i, v_j\right) \dots\dots\dots (2)$$

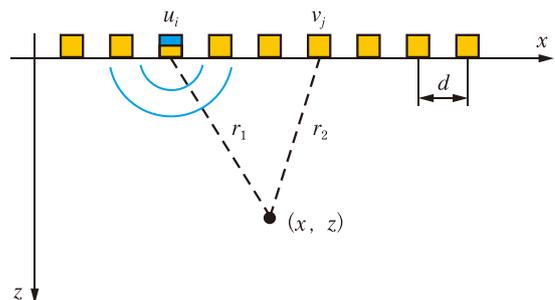


図2 マルチスタティック

また、 $r_1 = \sqrt{(x-u_i)^2 + z^2}$ $r_2 = \sqrt{(x-v_j)^2 + z^2}$ とする。

3.3 AFM

アレイプローブは全素子送信と全素子受信で動作する。受信した波形データは受信素子から、 $y(g, v_j)$ と表す。 N_{el} の素子がある場合、再構成点 (x, z) は次式で与えられる。

$$o(x, z) = \sum_{j=1}^{N_{el}} y(g(u_i, v_j, \tau), v_j) \quad \dots\dots\dots (3)$$

4. FMC/TFM の特徴

4.1 方位分解能

FMC/TFM の根源は地球物理学におけるレーダ探査のために実用化した技術であるが、その目的は単体センサが持つ、分解能の限界を超えることにある。超音波探傷試験における方位分解能はプローブの周波数と使用するアパチャーサイズに依存する。ここでフェーズドアレイと FMC/TFM の方位分解能を比較するために、表 1 の仕様のプローブを用いた探傷画像を図 3 に示す。図 3 (a) はフェーズドアレイによる探傷画像であり、図 3 (b)、図 3 (c) 及び図 3 (d) は FMC/TFM による探傷画像である。フェーズドアレイでは供試体の深い位置できざり表示が広がって表示されているが、FMC/TFM では深い位置においてもきざり表示が明瞭に表示されている。このことより FMC/TFM は方位分解能の向上に有効であることが確認できる。

4.2 コントラストノイズ比

受信時の位相整合技術を用いる FMC/TFM は試料の任意の位置に反射源を仮定し、この反射源からの反射エコーが各素

子で受信されることを仮定して、各素子で受信する反射エコーが同位相になるように受信時の遅延を与えて積算を行う。仮定した反射源の位置にきざりがあれば位相整合による積算の効果によって高い輝度値が与えられる。また、仮定した反射源の位置にきざりがなければ、ノイズの平均化によってベースノイズ低減の効果がある。

4.3 ポスト処理

先述の通り、アレイプローブを用いた超音波探傷技術の 1 つにフェーズドアレイがあるが、この技術は送受信に位相整合を利用することで詳細な探傷画像を得る。一方、FMC/TFM は送信エコーに対する位相整合技術を用いずに、受信エコーに対する位相整合を行うことで精密な画像構成を行うことができる。フェーズドアレイで送信エコーの位相整合を正確に行うためには材料音速が既知であり、かつ超音波ビームの入射面の幾何形状が一定であるという前提が必要になる。FMC/TFM は受信エコーの全波形保存を行うことで、ポスト

表 1 プローブ仕様と TFM 再構成条件

項目	仕様又は条件
アレイプローブ周波数	5MHz
アレイ素子数	128
アレイ素子間ピッチ	1.0mm
アレイ素子高さ	10.0mm
TFM 再構成範囲 (x × z)	100mm × 85mm
TFM グリット数	1 × 10 ⁶
TFM スペースサイズ	0.100mm × 0.085mm

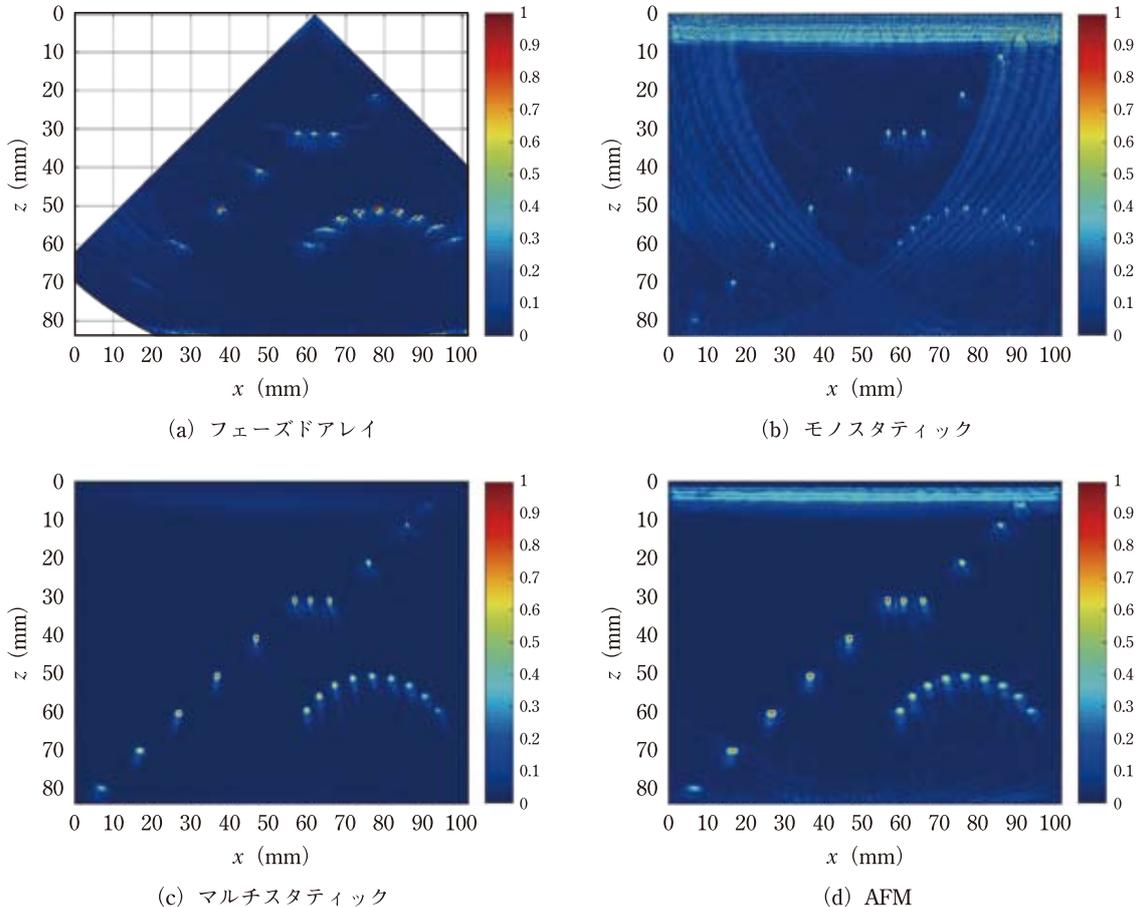


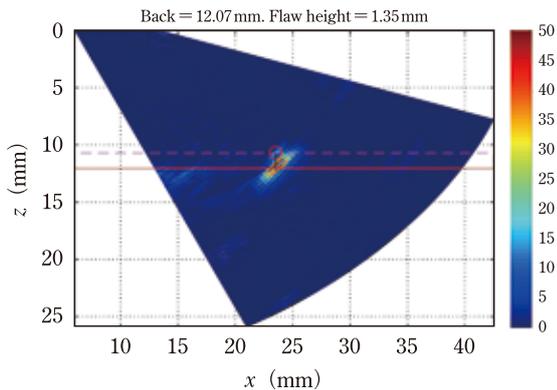
図 3 フェーズドアレイと各送信アルゴリズムによる FMC/TFM の比較

処理による音速変更及び入射面の幾何形状を考慮した探傷画像を取得することができる。また、フェーズドアレイ探傷画像の解像度は画像を構成するAスコープ数に依存するが、これはフェーズドアレイ機器のフォーカス距離によって制限される。しかし、FMC/TFMは探傷画像を構成する画素数を自由に変更することができるため、きず指示画像の拡大などを行った際に高解像度の探傷画像を出力することができる。

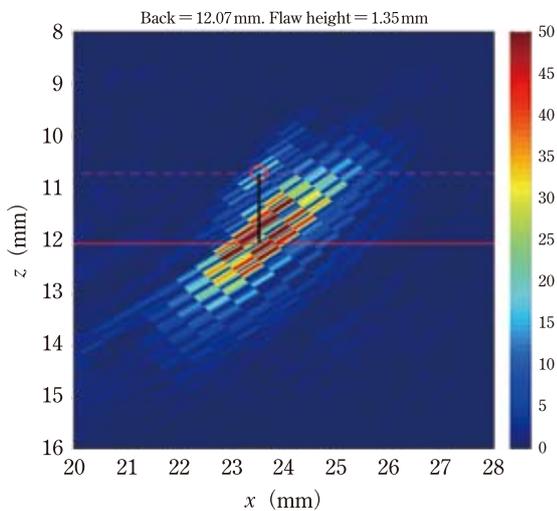
5. 適用事例

5.1 開口の小さい疲労き裂

開口の小さい疲労き裂が存在するアルミニウム合金製供試体（材質 2024-T3，板厚 12mm）に対して、フェーズドアレイ及びFMC/TFMによる探傷を実施した。疲労き裂のきず高さ寸法は中心周波数 20MHz の点収束単振動子プローブを用いた水浸法による超音波探傷試験によって、約 2mm と評価されている。図 4 及び図 5 に示すフェーズドアレイの結果では、チップエコーとコーナーエコーが近接して表示され、き裂高さ寸法は 1.35mm と評価された。一方、図 5 に示す FMC/TFM の結果では、チップエコーとコーナーエコーの分離が明瞭に確認され、きず高さ寸法は 2.07mm と評価された。フェーズドアレイでの測定分解能は探傷画像を構成する A スコープ数に依存するため、プローブから離れた位置に存在する微細なきずを評価する場合においては、きず寸法測定の高精度化に限界がある。



(a) 探傷画像



(b) きず指示部の拡大画像

図 4 フェーズドアレイ法によるきず高さ寸法の評価

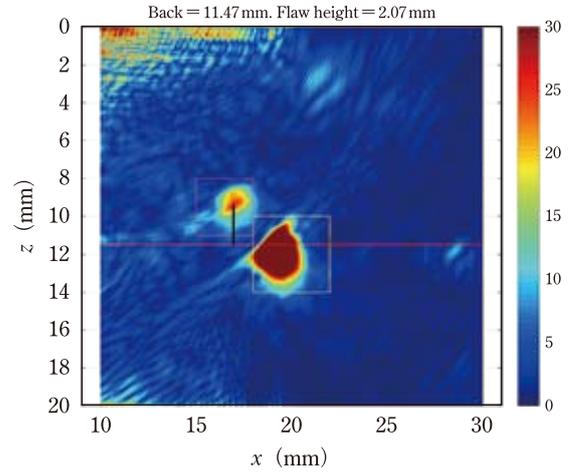


図 5 FMC/TFM によるきず高さ寸法の評価

しかし、高い方位分解能を有する FMC/TFM は、きず寸法測定の高精度化に有効な手段であり、ポスト処理と組み合わせて使用することで、より精密な評価を行うことができる。

5.2 電気抵抗溶接鋼管

FMC/TFM は受信エコーに対する位相整合技術であり図 6 に示すような、横波 (T) と縦波 (L)、そしてそれぞれに対する伝搬反射モード (TT, LL, TTT, LLL, TTTT, LLLL) を変更して探傷画像を取得することができる。図 7 は電気抵抗溶接鋼管供試体（直径 323.85mm，肉厚 6.35mm）に対して FMC/TFM を適用した結果である。アレイプローブには斜角ウエッジを適用し、供試体中に縦波及び横波が伝搬する条件としている。伝搬モード TT の画像において $x = 5\text{mm}$ ， $z = 6\text{mm}$ の位置にきず指示が確認できる。また、伝搬モード TTTT でも $x = 4\text{mm}$ ， $z = 3\text{mm}$ の位置にきず指示が確認できる。

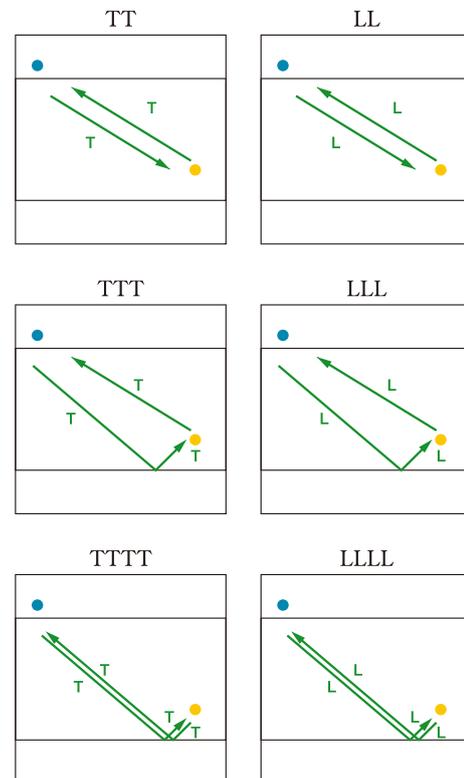


図 6 波の斜角伝搬反射モード

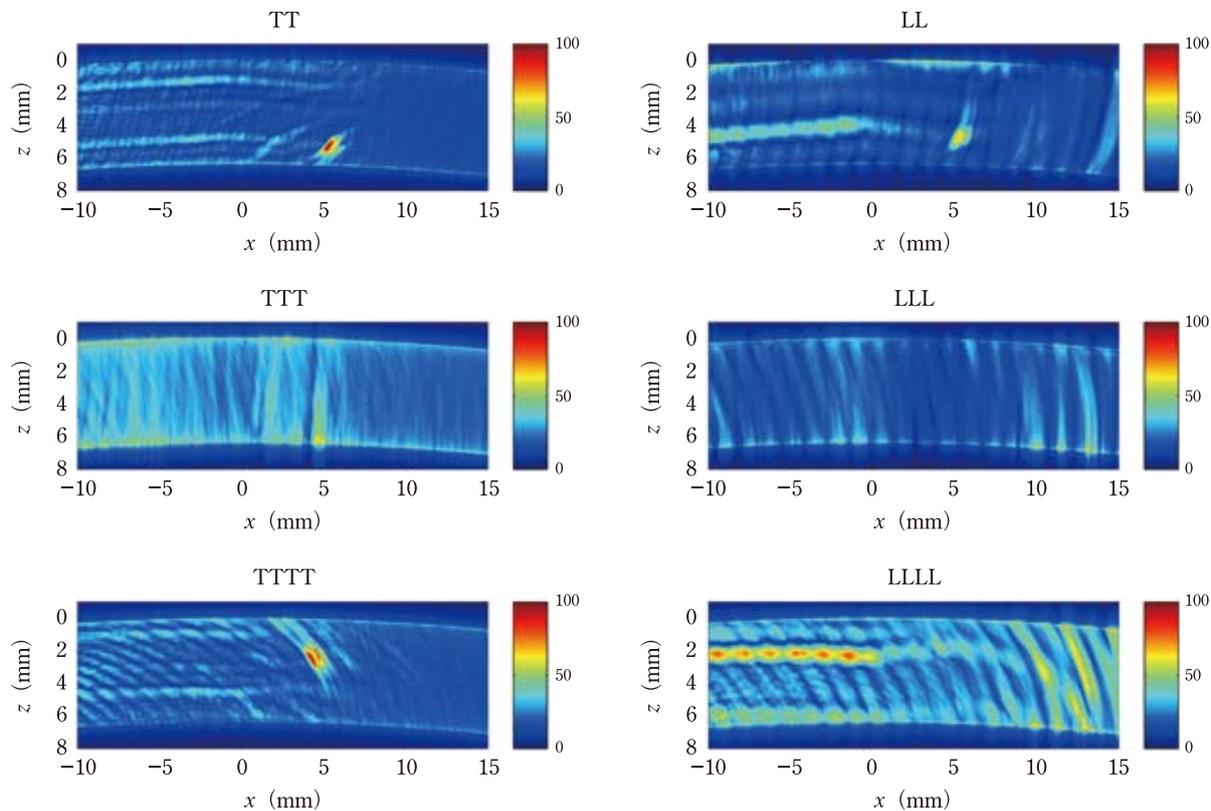


図7 電気抵抗溶接鋼管供試体に対する FMC/TFM 結果

6. FMC/TFM の高度化

6.1 GPGPU 計算による TFM 処理の高速化

GPU (Graphics Processing Unit) とは、PC のグラフィックボードに搭載されている画像処理用プロセッサであり、主にディスプレイに映像を表示するなどの役割をなしている。GPU は数百～数千個の演算コアで構成され、複数のコアを活用することで、高速かつ繊細な画像処理を実現することができる。近年、この高い演算能力を持つ GPU を画像処理以外の汎用的な数値計算に利用する GPGPU (General Purpose computing on GPU) に注目が集まっており、これは人工知能の開発などにも使われている。GPGPU は、大量のデータを CPU 側のメモリから GPU 側のメモリ (VRAM) に転送し、転送されたデータを GPU で並列処理することで、CPU 単体よりも高速に処理を行うことができるため、TFM 再構成のための演算にも適用⁸⁾が進められている。

6.2 アダプティブ FMC/TFM の適用

超音波探傷試験は材料の内部検査が可能で多くの部位に適用されているが、検査側面が平滑ではない複雑な形状を有している部位ではプローブの倣い性が悪いという課題がある。アダプティブ FMC/TFM は水浸法又は水を充填したフレキシブルウエッジ等を用いてアレイプローブから試料表面までの距離を測定し、その測定された距離を TFM 再構成演算ごとに反映して、精密な探傷画像を得る方法である。図8に中心周波数 5MHz、素子数 64 のアレイプローブに水を充填したフレキシブルウエッジを組み合わせて、溶接供試体の余盛上に適用した様子を示す。図9の探傷画像では緑色の曲線によって示された余盛形状と溶接中心部における融合不良が確認できる。

6.3 逆問題による FMC/TFM 結果の解析

非破壊検査の目的はきずの検出と欠陥の有無の判定であるが、材料や構造物の安全性や余寿命を評価するためには欠陥

の詳細な情報を得る必要がある。通常、超音波探傷試験は試料表面から探傷が行われ、探傷によって得られた試料内部の情報は試料表面において取得される。したがって、非破壊検査に求められる課題は表面において限定的に得られた情報から、欠



図8 溶接供試体へのアダプティブ FMC/TFM

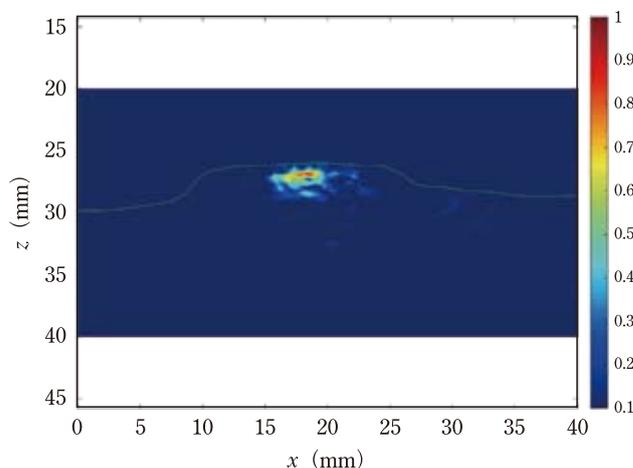


図9 溶接供試体のアダプティブ FMC/TFM 結果

陥の位置、寸法、形状、分布等を決定することにある。すなわち、これは結果から原因を求める問題として扱うことができ、逆問題と呼ばれる解析法を用いることができる。ここでは、FMC/TFMのための解析アプローチの1つとしてペナルティー関数法⁹⁾による一例を紹介する。深さ40mmの位置に中心間距離2mmの直径1mmドリル横穴が2つ加工されたアルミニウム合金製供試体に対して、FMC/TFMを適用した探傷画像を図10に示す。使用したプローブは中心周波数3MHz、素子数64、素子ピッチ0.8mmであり、アルミニウム合金中での波長は約2.2mmとなる。近接した2つのドリル横穴のきず指示は、散乱波及び波長に起因する強いアーチファクトがきず指示上に重なった結果となっている。図11にペナルティー関数法による繰り返し処理を適用した探傷画像を示す。ドリル横穴付近に確認されていたアーチファクトは完全に消失し、それぞれのドリル横穴がきず指示として明瞭に確認することができる。また、図12は40mm深さ位置におけるそれぞれのラインプロファイル比較測定を行った結果であり、ペナル

ティー関数法の有効性を確認することができる。FMC/TFMのための逆問題の適用は、組織や結晶粒などによる散乱等の課題に対して有効とされ、今後の発展が期待される。

7. 規格化の動向

現時点ではFMC/TFMは海外を含め規格化はされていないが、FMC/TFMワーキンググループはASME Boiler and Pressure Vessel Code Section Vで議論を開始しており、現在はFMC/TFMに使用される用語の標準化が進められている。なお、規格化までのスケジュールは、必須附属書(Mandatory appendix)が2019年12月までに発行される予定である。

8. おわりに

アレイプローブによるFMC/TFMは、フェーズドアレイに比較して方位分解能及びコントラストノイズ比に優れた超音波画像化技術であり、探傷試験後であってもポスト処理による材料音速及び画像解像度の変更を行うことができる特徴がある。また、超音波探傷を行う上で従来から課題となっていた複雑な形状を有する試験体表面に対応するアダプティブFMC/TFMや欠陥の詳細情報決定のための逆問題アプローチなども提案されており、今後も技術の高度化が期待できる。

参考文献

- 1) J. Krautkramer and H. Krautkramer : Ultrasonic Testing of materials, Springer-Verlag, Berlin, (1990)
- 2) J. Seydel : Ultrasonic synthetic-aperture focusing techniques in NDT, Research techniques in nondestructive testing, 6, pp.1-47, (1982)
- 3) M. Karaman, P.-C. Li and M. O'Donnell : Synthetic aperture imaging for small scale systems, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 42(3), pp.429-442, (1995)
- 4) F. Lingvall, T. Olofsson and T. Stepinski : Synthetic aperture imaging using sources with finite aperture: Deconvolution of the spatial impulse response, The Journal of the Acoustical Society of America, 114(1), pp.225-234, (2003)
- 5) C. Holmes, B. W. Drinkwater and P. D. Wilcox : Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for nondestructive evaluation, NDT&E International, 38(8), pp.701-711, (2005)
- 6) E. Carcreff, D. Braconnier and G. Dao : Fast total focusing method for ultrasonic imaging, Ultrasonics Symposium (IUS), 2015 IEEE International, (2015)
- 7) A. J. Hunter, B. W. Drinkwater and P. D. Wilcox : The wavenumber algorithm for full-matrix imaging using an ultrasonic array, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 55(11), pp.2450-2462, (2008)
- 8) M. Sutcliffe, M. Weston, B. Dutton, P. Charlton and K. Donne : Real-time full matrix capture for ultrasonic non-destructive testing with acceleration of post-processing through graphic hardware, NDT&E International 51, pp.16-23, (2012)
- 9) E. Carcreff, D. Braconnier, S. Bourguignon and A. Duclos : Improvement of the total focusing method using an inverse problem approach, Ultrasonics Symposium (IUS), 2017 IEEE International, (2017)

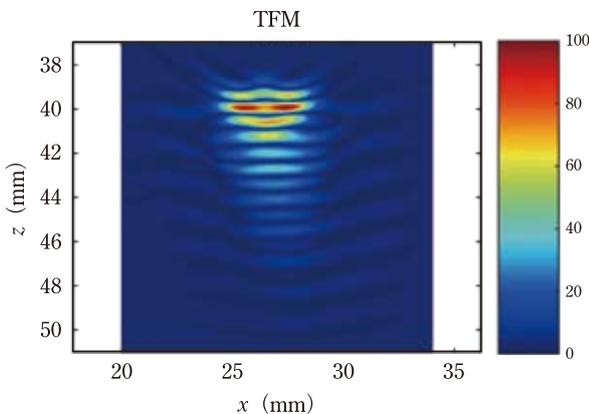


図10 FMC/TFM 探傷画像

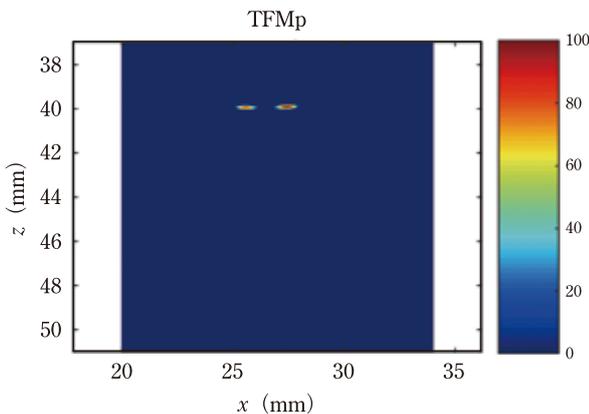


図11 ペナルティー関数法による解析画像

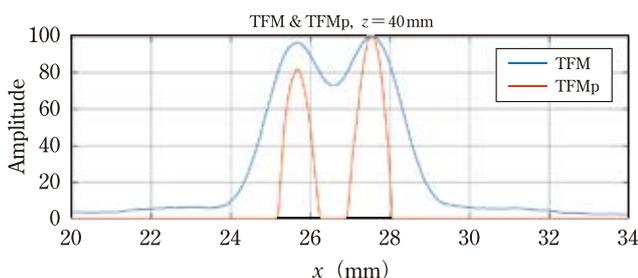


図12 ラインプロファイルの比較



Ewen CARCREFF

The Phased array Company (9365 Allen road, West Chester, Ohio-45069 USA) Research and development

材料の非破壊評価に適用される超音波イメージングの研究開発に従事。2014年フランスル・マン大学にて学位取得。Ph.D. (音響工学及び信号処理)

<http://www.thephasedarraycompany.com/>



横濱 慎也 ディービー (株) (530-0026 大

阪市北区神山町 2-1 若杉梅田ビル 601)

超音波検査技術に関するソリューション開発及び調査業務に従事

<http://www.db-kk.com/>



Dominique BRACONNIER

ディービー (株) (530-0026 大阪市北区神山町 2-1 若杉梅田ビル 601) 代表取締役社長

非破壊検査業界にて 25 年の経験があり、超音波を専門とする。FMC/TFM に関する ASME 規格委員会の一員

<http://www.db-kk.com/>