

# タイトル

## FMC/TFM の最新技術と応用

The latest technologies of FMC/TFM and applications

The Phased Array Company Ewen Carcreff · John Lorenz

ディービー(株) 横濱 慎也 · Dominique Braconnier

### 1. はじめに

FMC/TFM (Full Matrix Capture and Total Focusing Method) <sup>(1)</sup>はアレイプローブを用いた超音波画像化技術の一手法で、この技術の根源はレーダー探査のために実用化した開口合成技術である。FMC<sup>(2)(3)(4)(5)</sup>はアレイプローブによる超音波送受信の方法として、TFM<sup>(6)</sup>は探傷画像化のために、受信したエコーの位相を整合して再構成を行う方法として知られている。FMC/TFMは、従来の超音波探傷技術に比較して、方位分解能とSN比の改善に大きな利点があるが画像化の速度に課題があることから、数年前前までは現場での適用が困難とされてきた。しかし、現在では高性能な超音波探傷装置の開発及びコンピューター技術の高度化によってFMC/TFMは現場適用が十分に可能になっている。また、FMC/TFMは波形データの全収録後にポスト処理にて材料音速、探傷画像解像度、そして超音波エコーの伝搬モードの変更を行うこともできることから、従来の超音波探傷技術にはない様々な利点がある。本稿ではFMC/TFMの概要と超音波探傷システムの紹介、そして適用事例について紹介する。

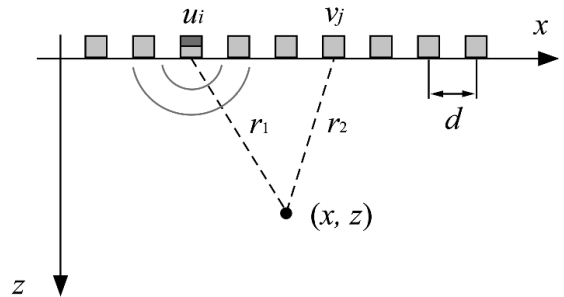
### 2. FMC/TFMの概要

FMCは超音波エコーの送受信アルゴリズムを指し、これは幾つかの方法に区別することができる。ここでは、最も一般的なマルチスタティックについて紹介をする。アレイプローブは

単素子送信と全素子受信の繰り返して動作する。受信した波形データは第1図で示す送信素子*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。

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

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



第1図 マルチスタティック

TFMはFMCによって取得した波形データを画像化するために、探傷断面に仮想的に格子を配置し、その格子全てにおいて再構成点 $o(x, z)$ の演算を行うことで完全な焦点を持たせた探傷画像を得る方法である。探傷材料音速及びアレイプローブ素子の相対的な位置が既知であれば、受信エコーは対象物中のどの位置から到来したのかが推定でき、仮想的な格子位置にきずがあれ

ば受信エコーは位相整合による積算の効果で高い輝度値が得られ、その位置にきずが無ければノイズの平均化によってベースノイズが低減される。

### 3. FMC/TFM超音波探傷システム

米国AOS社では最大256素子のアレイプローブを同時励振できるフルパラレル超音波探傷装置OEM-PAを開発している。この装置にはソフトウェア開発キットが標準で付属しているため、ユーザーの希望に合ったソフトウェアを自由に開発できる。なお、ソフトウェアの開発言語はC/C++、Matlab、LabView、Python等に対応をしている。米国TPAC社では、AOS社製フルパラレル超音波探傷装置OEM-PAをベースにFMCデータの全波形収録を行うことができるFMC/TFM超音波探傷システム（第2図）を開発した。このシステムはFMC/TFMの演算処理のために、GPU（グラフィック・プロセッシング・ユニット）による並列計算環境を導入することができ、比較的安価に入手できるGPU搭載ノートPCを組み込むことで現場探傷を十分に満足する高速な検査環境を整えている。第1表に本システムの主な仕様を記載する。

表1 FMC/TFM超音波探傷システムの仕様

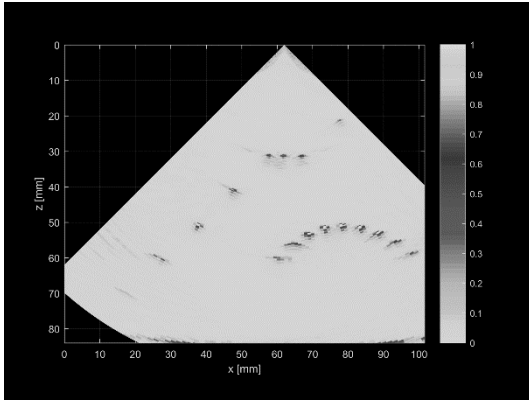
項目	仕様	
ハードウェア	送受信ch	最大 256
	励振ch	最大 256
	周波数帯域	0.3~20 MHz
	サンプリング周波数	100 MHz
	PRF	20 kHz
	データ通信速度	160 MB/s
	防塵防水性能	IP65
	エンコーダ	X, Y (2軸)
ソフトウェア	FMC方法	モノスタティック マルチスタティック AFM
	データ記録	FMC全波形収録 TFM再構成データ
	データフォーマット	MAT, HDF5
	対応プローブタイプ	リニアアレイ マトリクスアレイ 特殊マトリクスアレイ
	送受信法	パルスエコー法 ピッチキャッチ法
	ウィッジ	自由に定義可能
	アダプティブFMC/TFM	可能
	FMC波形表示	可能
	リアルタイムTFM	可能
	表示フレームレート	20 Hz以上
	TFMグリッド数	自由に定義可能
	ポスト処理	音速、解像度他
	伝搬モード変更	直射、裏面反射



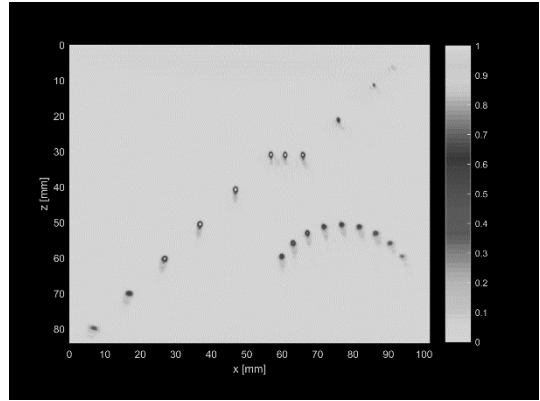
第2図 FMC/TFM超音波探傷システム  
(耐塵防水規格IP65 対応OEM-PA128/128 搭載タイプ)

### 4. フェーズドアレイとFMC/TFMの比較

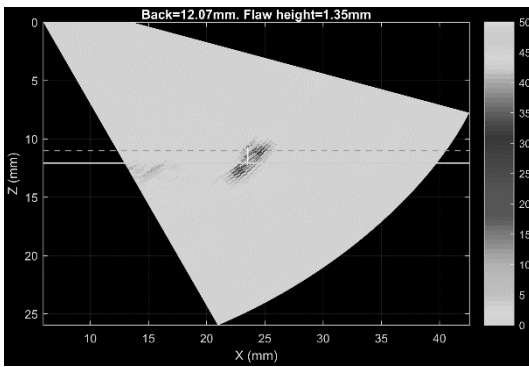
フェーズドアレイとFMC/TFMの探傷性能を比較するために、ここでは同一プローブ（中心周波数5MHz、128素子、素子中心間隔1mm）を用いた探傷画像の比較を行った。探傷試験体はアルミニウム合金製で、直径1mmのドリル横穴が5mmから80mmの深さ位置に複数加工されている。第3図のフェーズドアレイによる探傷画像では試験体の深い位置できず指示が広がって表示されているが、第4図に示したFMC/TFMによる探傷画像では、試験体の深い位置においてもきず指示が明瞭に表示されている。このことよりFMC/TFMは方位分解能に優れた技術であることがわかる。



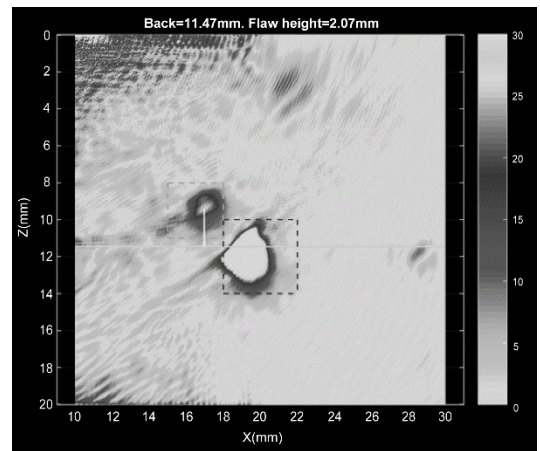
第3図 フェーズドアレイ探傷画像



第4図 FMC/TFM探傷画像



第5図 フェーズドアレイ法によるきず高さ寸法の計測



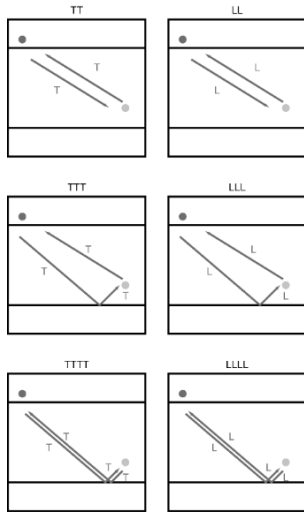
第6図 FMC/TFMによるきず高さ寸法の計測

### 5. 開口の小さな疲労き裂への適用事例

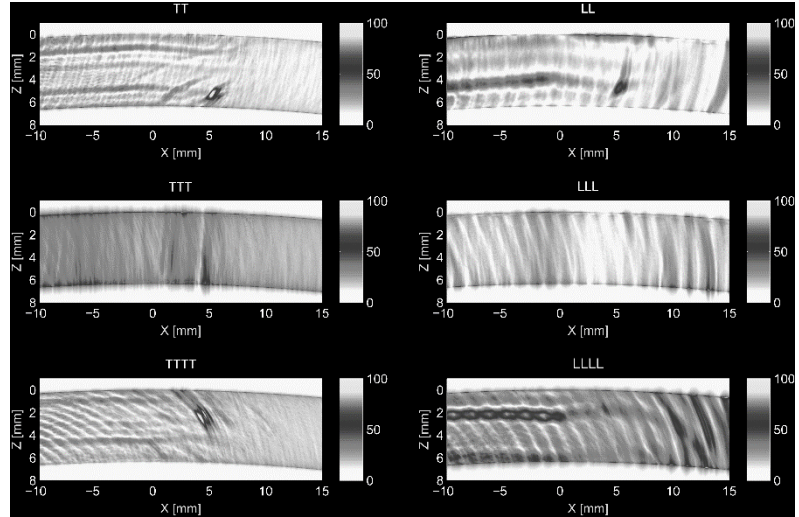
開口の小さな疲労き裂が存在するアルミニウム合金製試験体（材質 2024-T3、板厚 12 mm）に対して、フェーズドアレイ及びFMC/TFMを実施した。疲労き裂のきず高さ寸法は中心周波数 20 MHz の点収束単振動子プローブを用いた水浸法による超音波探傷試験によって、約 2 mm と評価されている。第 5 図に示すフェーズドアレイの探傷結果ではチップエコーとコーナーエコーが近接して表示され、き裂高さ寸法は 1.35 mm と評価された。一方、第 6 図に示す FMC/TFM の探傷結果ではチップエコーとコーナーエコーの分離が明瞭に確認され、きず高さ寸法は 2.07 mm と評価された。

### 6. 溶接鋼管試験体への適用事例

FMC/TFMは全波形収録後のポスト処理によって第7図(a)に示すs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。第7図(b)は電気抵抗溶接鋼管試験体（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、供試体中に縦波と横波の両方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 mm、Z = 6 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 mm、Z = 3 mmの位置にきず指示が確認できる。



(a)



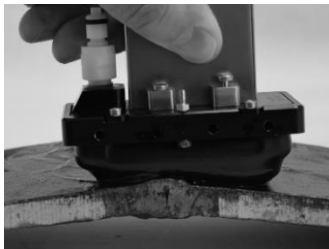
(b)

第7図 斜角伝搬反射モード(a)と電気抵抗溶接鋼管試験体に対するFMC/TFM結果(b)

## 7. FMC/TFMの高度化

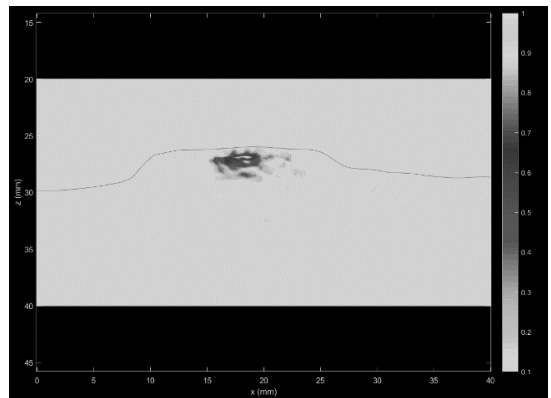
### ～アダプティブFMC/TFM～

超音波探傷試験は様々な材料の内部検査に適用されているが、検査面側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再構成演算毎に反映して、精密な探傷画像を得る方法である。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、溶接試験体の余盛上に適用した様子を第8図に示す。第9図の探傷画像では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。



プローブ仕様  
 中心周波数：5 MHz  
 素子数：64  
 素子ピッチ：0.6 mm  
 素子高さ：9 mm

第8図 溶接試験体へのアダプティブFMC/TFM



第9図 溶接試験体へのアダプティブFMC/TFM

## 8. おわりに

FMC/TFMは従来の超音波探傷技術に対して方位分解能及びSN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、昨今のコンピューター技術の向上により、現場探傷のために必須とされる高速な応答性も有している。さらには超音波探傷試験を行ううえで、従来からの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も開発されており、様々な現場での適用拡大が望まれる。

#### 参考文献

- (1) 村井純一・横濱慎也・ブラコニエドミニク:“アレイ型探触子を用いたリアルタイム開口合成法と適用事例”, 第23回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集, 2016年1月
- (2) M. Karaman, P.-C. Li, and M. O'Donnell: “Synthetic aperture imaging for small scale systems”, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, vol. 42, no. 3, pp. 429–442, May 1995.
- (3) 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, vol. 114, no. 1, pp. 225–234, July 2003.
- (4) 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, vol. 38, no. 8, pp. 701–711, December 2005.
- (5) Ewen Carcreff, Dominique Braconnier and Gavin Dao: “Fast total focusing method for ultrasonic imaging”, Ultrasonics Symposium (IUS), 2015 IEEE International, October 2015.
- (6) 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):2450–2462, November 2008.