

# アレイ型超音波探触子を用いたリアルタイム開口合成法の紹介

ディービー株式会社 横濱慎也

## 概要

従来の超音波探傷法における方位分解能は超音波探触子の周波数および開口に依存するため、その改善のためには探傷周波数を高くする、または超音波探触子の開口を大きくする必要があった。一方、開口合成法は従来の超音波探傷法に比較して方位分解能を改善できる手法であり、高精度の探傷画像を取得できる特長がある。本稿ではアレイ型超音波探触子を用いたリアルタイム開口合成法の概要について紹介する。

## 1. 緒言

超音波探傷試験は工業製品のキズを検出、評価するための非破壊検査技術の一手法として標準となっている。超音波探傷試験で用いる超音波探触子は 1970 年代にアレイ型が開発され、それにより Synthetic aperture focusing technique (SAFT)などの高度な開口合成法が提唱されてきた。SAFT は、各素子がパルス-エコー法により動作するモノスタティックと、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があり、マルチスタティックはモノスタティックに比較して遥かに多くの A-スキャンデータを得ることができる。取得したデータはイメージ化のためにモノスタティック、マルチスタティックのいずれも Total focusing method (TFM)と呼ばれる処理で再構成される。この標準的なアプローチは再構成イメージを生成するためにコヒーレント加算に基づく。これは正確なディレイ計算により再構成イメージの各点にフォーカスを絞ることと等価になる。また、TFM は探傷イメージのサイズ、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。しかし、開口合成法にはデータ転送速度の課題と TFM 再構成を行うための計算処理時間の課題があり、フィールドでの適用が困難とされてきた。本稿では開口合成法の概要とフィールドへの適用のためのリアルタイム開口合成法について紹介する。

## 2. 開口合成法の概要

### 2-1 モノスタティックキャプチャー

アレイ型超音波探触子の全ての素子は、パルス-エコー法によってのみ動作する。各素子は送信と受信で動作し、これは全ての素子において繰り返される。図 1 に示す  $i$  素子から送受信された A-スキャンデータは  $y(t, u_i)$  で表すことができる。  $N_{el}$  の素子がある場合、TFM 再構成点  $(x, z)$  のためのコヒーレントな総和は次式で与えられる。

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

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計算時に一定の値をとる。

### 2-2 マルチスタティックキャプチャー

アレイ型超音波探触子は単素子送信と全素子受信で動作する。A-スキャンデータは図 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、TFM 再構成点  $(x, z)$  は次式で与えられる。

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

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

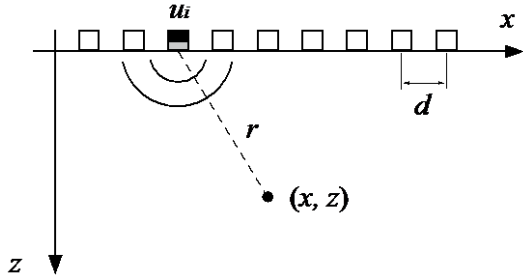


図1 モノスタティックキャプチャー

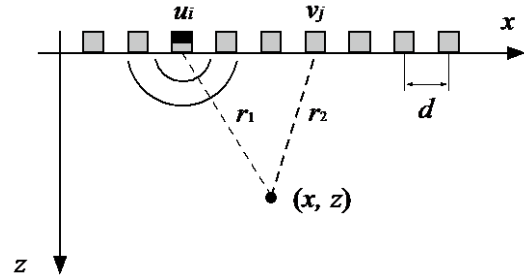


図2 マルチスタティックキャプチャー

### 3. 開口合成法の課題

開口合成法をフィールドで適用するためには、A-スキャンデータ転送速度と TFM 再構成処理時間の二つの課題を解決する必要がある。

#### 3-1 データ転送速度

アレイ型超音波探触子の素子が  $N_{el}$  あるとき、A-スキャンデータの総数はマルチスタティックで最大  $N_{el}^2$  となるため、超音波探傷装置から PC へのデータ転送速度がボトルネックとなっていた。しかし、Advanced OEM Solution NDT 社では USB3.0 通信での 80 MB/s 以上のデータ転送に対応した、フルパラレル超音波探傷装置が開発されており、この課題が解決できる。

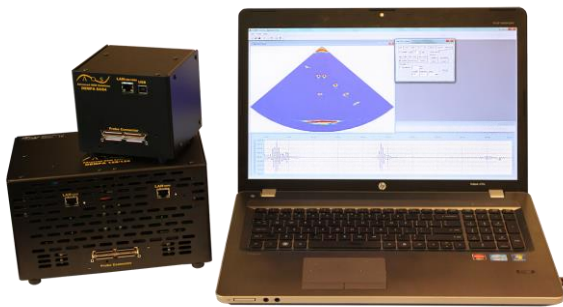


図3 Advanced OEM Solution NDT 社製フルパラレル超音波探傷装置

主な仕様	
データ通信方法	Ethernet (10 MB/s)
	USB3.0 (80 MB/s)
PRF	20 kHz
インターフェース (DLL 付属)	C++, C#
	Matlab® LabView®
チャンネル数	16/16, 32/32, 16/128, 32/128, 64/64, 128/128, 256/256

#### 3-2 TFM 再構成処理

再構成の計算処理のために PC 等が必要となるが、フィールドでの適用にはラップトップタイプ PC を用いることが必須となる。技術の進歩によりラップトップ PC にも GP-GPU を搭載したものが製品化され、GPU を用いた並列計算環境を整えることが容易となっている。表 1 と図 4 に CPU と GPU による並列計算の条件と、再構成イメージサイズに対する計算時間のグラフを示す。TFM 再構成処理に関する課題は GPU を用いた並列計算の実行によって解決ができる。

表 1 CPU と GPU による計算条件と構成

計算環境	並列計算 実行内容	ハードウェア
CPU 1 スレッド	並列計算なし	Intel®core™ i7 4910MQ 8 コア
CPU 並列計算 (OpenMP®)	再構成イメージ M スレッド分割	
GPU 並列計算 (NVIDIA® CUDA™)	スレッド毎 1 ピクセル	NVIDIA® Quadro® K2100M 576 コア

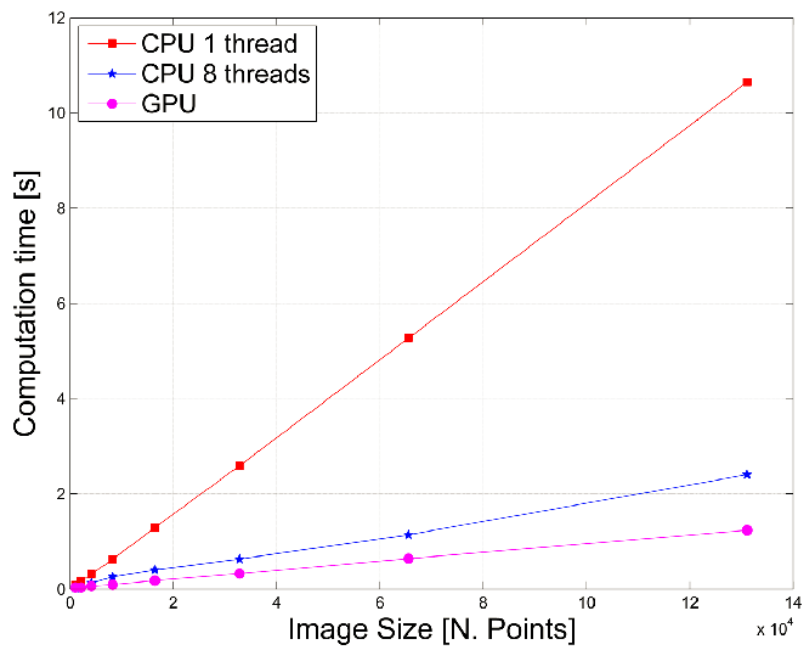


図 4 CPU と GPU の計算時間の比較

#### 4 開口合成法の利点

従来のフェーズドアレイ超音波探傷試験法での方位分解能は探触子の周波数と開口に依存するため、分解能を向上させるには探傷周波数を高くする、あるいは探触子の開口を大きくする必要があった。開口合成法では単素子送信の広い指向角での超音波伝搬によって得られる反射源の多重化と全素子受信による大きな開口の効果によって、方位分解能と遠距離分解能の向上が得られる。図 5 に Advanced OEM Solution NDT 社製フルパラレル超音波探傷装置とアレイ型探触子、及び 1mm 径の人工キズを付与したアルミニウム合金製テストブロックを示す。アレイ型探触子は周波数 5 MHz、素子ピッチ 1.0 mm、素子数 64 である。図 6 にはフェーズドアレイ法と開口合成法による取得イメージの比較を示した。開口合成法ではフェーズドアレイ法に比較して方位分解能と遠距離分解能が向上していることが確認できる。



図5 超音波探傷装置、アレイ型探触子及びアルミニウム合金製テストブロック

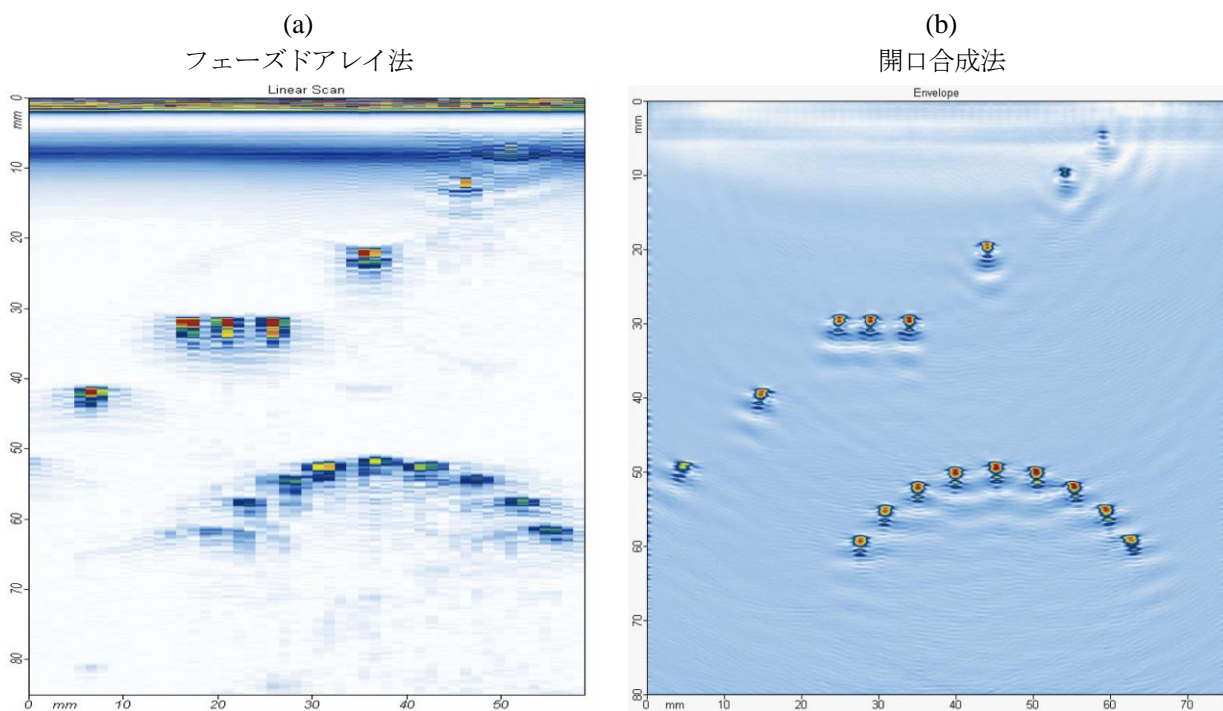


図6 フェーズドアレイ法と開口合成法による取得イメージの比較  
(a) アパチャー16素子49ステップによるリニアスキャン法  
(b) 64素子4096サイクルによるマルチスタティック法

## 5. 結言

アレイ型超音波探触子を用いたリアルタイム開口合成法をフィールドで適用するためには、A-スキャンデータ転送速度と TFM 再構成処理時間の二つ課題を解決する必要がある。前者は高速データ転送に対応した機器を選択することで解決ができる。また、後者はラップトップ PC に搭載する GP-GPU での NVIDIA® CUDA™ 環境による並列計算によって解決ができる。今後は開口合成法の特長である方位分解能を生かすことができる具体的なアプリケーションの開発を進めていく。