

二媒質材料の超音波映像化のための FSAP 方式とその高速化の検討

愛媛大学大学院 学生員 ○小澤耀生, 学生員 泉英輝
非会員 溝田裕久 正会員 中畑和之

1. はじめに

アレイ探触子を用いて内部欠陥を高精度に映像化するために、全波形サンプリング処理 (Full-wave form sampling and processing: FSAP) 方式が提案されている¹⁾。FSAP 方式はアレイ探触子の振動素子から個別に超音波を送受信し、得られた波形をコンピュータ内のメモリに保存する。全ての波形パターンを取得した後、ポスト処理で集束ビームを再構成する。この集束ビームをすべての画素に送受信し、内部欠陥の映像化を行う。FSAP 方式はアレイ素子のすべての組み合わせの波形を保存しているため、計測後も波形処理が可能である。また、映像化の対象となる範囲の各画素に集束ビームを送信しているため、分解能や S/N 比が高いことが利点として挙げられる。この FSAP 方式は、GPU 計算を導入することで高速に欠陥像を再構成できる²⁾。これまで、供試体に直接アレイ探触子を接触させて行う方法を提案しているが、実際の現場では、くさびを介して超音波を斜角入射させたり、水中にアレイ探触子を設置する場合がある。この場合、音速の異なる二媒質を伝搬することになり、伝搬経路を正確に見積もることが肝要である。そこで本研究では、二媒質材料を対象とした FSAP 方式の映像化を高速化することを目的とする。二媒質を伝搬する超音波の伝搬経路を考えると、それぞれの音速と界面での屈折を考慮する必要がある。ここでは、界面でスネルの法則を満足し、各画素までの最短経路を高速に計算するアルゴリズムを提案する。また、このアルゴリズムを GPU 計算に実装し、欠陥像の高速映像化を試みた。

2. 二媒質材料における FSAP 方式

FSAP 方式による二媒質材料の映像化手順を以下に示す。図-1 に示すように、リニアアレイ探触子の全素子数を N とすると、 i 番目の送信素子から送信され、 j 番目の受信素子で得られた欠陥エコー $M_{ij}(t)$ を波形記憶マトリクスに保存する。アレイ探触子で二媒質材料の映像化を行う場合の注意は、媒質 A と媒質 B の界面 (x_{ki}, y_{ki}) で超音波が屈折することである。まず、アレイ素子の中心座標 \mathbf{x}_0 と界面 \mathbf{x}_{k0} 、界面 \mathbf{x}_{k0} から画素 \mathbf{x}_k までの路程を分けて考える。この

基本伝搬時間は次式で表される。

$$T_{k0} = \frac{\sqrt{(x_{k0}-x_0)^2+(y_{k0}-y_0)^2}}{c_A} + \frac{\sqrt{(x_k-x_{k0})^2+(y_k-y_{k0})^2}}{c_B} \quad (1)$$

ここで c_A は媒質 A の音速、 c_B は媒質 B の音速である。超音波は、アレイ素子と映像化対象となる画素を最短経路で伝搬する。音速および媒質 A の大きさが既知の条件のもとで、式 (1) が最小となるように問題を設定すると、次式に示すように 4 次方程式の根を求める問題に帰着する。

$$(c_B^2 - c_A^2)x_{k0}^4 - \{2x_k(c_B^2 - c_A^2)\}x_{k0}^3 + \{(x_k^2 + y_{k0}^2)(c_B^2 - c_A^2) + y_{k0}^2 c_B^2 - 2y_{k0}y_k c_B^2\}x_{k0}^2 + (2x_k y_{k0}^2 c_A^2)x_{k0} - c_A^2 x_k^2 y_{k0}^2 = 0 \quad (2)$$

次に、送信素子 i から界面 (x_{ki}) 、画素 $[k]$ を経由し、受信素子 j に到達するまでの伝搬時間を考える。この経路を超音波が伝搬した場合の時間と、基本伝搬時間の差 (ディレイ) を ΔT_{ijk} とする。素子番号 i と j を変化させながらディレイを作用させ、振幅値を加算していく。画素 $[k]$ への集束ビームを $F_k(t)$ と表すことにすれば、集束ビームは次のように求まる。

$$F_k(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N M_{ij}(t - \Delta T_{ijk}) \quad (3)$$

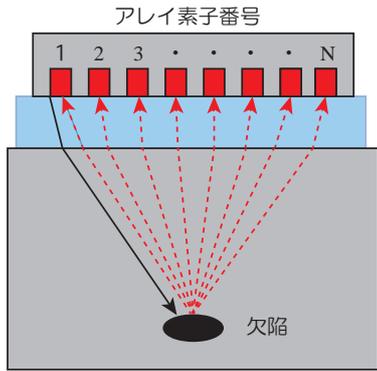
映像化のためには、 $F_k(t)$ から基本伝搬時間 $t = T_{k0}$ の振幅を抽出する。画素番号 $[k]$ を変えながら、すべての画素でこれらを実行し、画素値に色をつけて出力する。また本研究では、CUDA と呼ばれる NVIDIA 社の開発環境を用いて計算を高速に行った。FSAP 方式の映像再構成では、1 画素毎にディレイを考慮して波形を合成し、集束ビームの振幅値を計算する。ここでは GPU の 1 スレッドの計算に 1 画素の集束ビーム生成を対応させ、並列計算することで高速化している。

3. 二媒質材料の高速映像化と性能検証

媒質 A をポリスチレン板 (縦波音速 2320m/s) とし、媒質 B としてアルミニウム (縦波音速 6368m/s) 中の人工欠陥の映像化を行った。図-3 に示すように、供試体には直径 2mm の 5 つの貫通横穴が作成されている。媒質 A の高さは 30mm である。ピッチが 0.8mm、素子

キーワード : FSAP 方式, GPU 計算, 超音波映像化, 二媒質

連絡先 〒 790-8577 愛媛県松山市文京町 3, E-mail: nakahata@cee.ehime-u.ac.jp



受信素子番号

	1	2	...	j	N
1	M ₁₁	M ₁₂			M _{1N}
2					
⋮					
i				M _{ij}	
N					M _{NN}

送信素子番号

図-1 FSAP方式における波形取得方法(上)と波形記憶マトリクス(下)

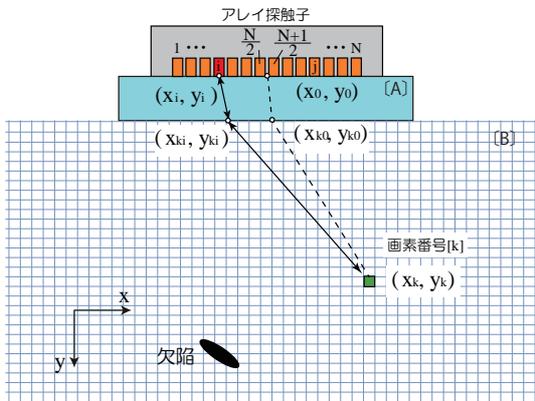


図-2 FSAP方式における素子位置と画素

数64のリニアアレイ探触子(公称中心周波数3MHz)を用いて,探触子を図-4のように設置して実験を行った.映像化範囲は40mm×40mmとした.再構成された画素値を図-5に示す.ここでは,映像化領域のうち最大振幅で正規化したものを表示している.図-5より,欠陥の位置を明確に再現できていることがわかる. CPUで計算を行った場合に要した計算時間は174.8sである.一方,本手法にGPUを導入した場合の計算・映像化時間は2.1sであった.

4. 結論

本研究では,FSAP方式を用いて二媒質材料の欠陥の映像化を行った.FSAP方式は各画素に集束ビームを送信するため,画素毎に超音波の伝搬経路の計算が必要になる.ここでは,界面でスネルの法則を満

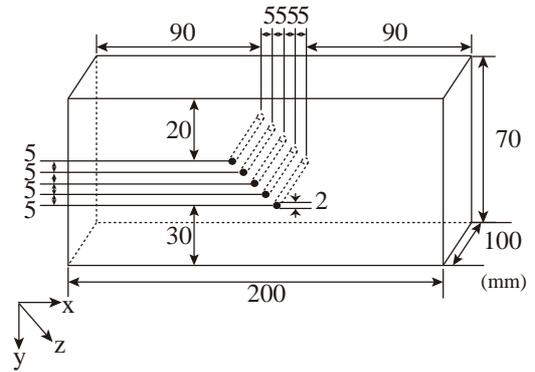


図-3 アルミニウム供試体

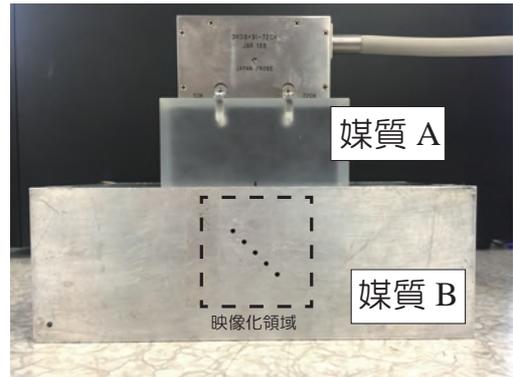


図-4 アレイ探触子,媒質A,Bの配置

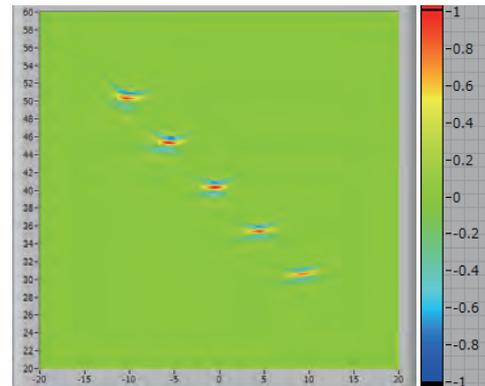


図-5 映像化結果

足し,二媒質を伝搬する超音波の経路を高速に計算するアルゴリズムを提案した.それをGPU計算に実装した結果,高速に欠陥像が映像化できた.本研究ではポリスチレンを介してFSAP方式の検証を行ったが,水あるいは空気を介したときの映像化にも取り組みたい.

参考文献

- 1) 中畑和之,竹内裕幸,木本和志,斜角探傷用アレイ探触子を用いたFSAP方式による内部欠陥の超音波映像化,日本機械学会論文集,77巻,779号,pp.106-116,2011.
- 2) 中畑和之,堀口貴志,GPU計算を実装した全波形サンプリング処理方式による内部欠陥の三次元超音波映像化,日本機械学会論文集,81巻,832号,15-00471,2015.