

## 超音波アレイ映像化のための全波形サンプリング処理方式の性能評価

愛媛大学大学院 学生員 ○泉英輝  
 愛媛大学大学院 学生員 堀口貴志  
 愛媛大学大学院 正員 中畑和之

### 1. はじめに

構造部材の内部欠陥を調べるために、アレイ探触子を用いた超音波映像化が現場で導入されている。映像化の精度や欠陥の分解能の向上を意図して、全波形サンプリング処理 (Full-waveforms Sampling And Processing:FSAP) 方式<sup>1)</sup>が提案されている。FSAP方式は、アレイ探触子の振動素子から素元波の送信・受信を行い、得られた波形をコンピュータ内のメモリに保存し、全ての波形パターンを取得したのち、ポスト処理で集束ビームを再構成する手法である。最終的には、欠陥からのエコー振幅に色をつけて出力する。GPU計算を導入しているため、高速に欠陥像が得られる。FSAP方式は、全てのパターンの波形を保存しているため、計測後でも映像化が可能であり、パラメータを変えた波形処理が導入できるなどデータの加工性にも優れる。

これまで、波形取得、欠陥像の再構成、映像出力までを一元化したFSAP方式のプロトタイプ機の開発が行われてきた<sup>2)</sup>。この装置は、リアルタイムに欠陥像を出力することを目指して開発されたものであるが、現状では超音波の励振素子数が増加すると計測時間を多く要するため、シグナル強度を維持しつつ適切な励振数を選ぶことが肝要である。また、送信素子群と受信素子群を分けて映像化すれば、励振数を減らすことができるだけでなく、超音波の伝搬経路を明示的に選択するため、欠陥の分解能向上にも寄与することが期待できる。そこで、本研究では、励振素子数と励振パターンの検討を行い、FSAP方式の実用的な利用について考える。

### 2. シグナル強度を保持するための励振数の検討

アレイ探触子は、近距離音場限界距離  $N$  より遠くにビームを集束させることができない<sup>3,4)</sup>。この  $N$  は、探触子の必要最小限の励振素子数を決定する指標であり、以下にそれを示す。探触子の開口を  $D$ 、超音波の波長を  $\lambda$  とすると、 $N$  は以下の式によって与えられる。

$$N = \frac{D^2}{4\lambda} \quad (1)$$

アレイ探傷法による映像化において、ある深さにおける欠陥から得られた反射エコーの振幅は、励振する素子数の増加に対して大きくなるが、ある素子数で頭打ち状態となる。よって、映像化に必要な最低限の素子数で探傷を行うことで、探傷時間を短縮できる。本研

究では、使用素子数を変化させたときの欠陥エコーの振幅を調べた。図-1に、本実験で用いた探触子と供試体の位置関係を示す。供試体には深さ  $d$  が5~40mmの計8個の円筒状空洞が空けられている。素子群の中心が欠陥の真上に位置するように中心周波数4.1MHzの探触子を設置し、空洞に対して集束ビームを送信したときに得られたエコーの最大値を抽出した。いま、近距離音場限界  $N$  を考える。この供試体の高さは50mmであるので、この供試体のすべての深さに集束ビームを送るためには、 $d = N = 50\text{mm}$  とする。 $\lambda = 5.8[\text{km}] / 4.1[\text{MHz}] = 1.4\text{mm}$  であるので、 $d = 50\text{mm}$  のときの開口  $D$  は、16.7mmとなる。使用した探触子のピッチは0.75mmであるので、素子数は23個となる。従って、最も深い欠陥に対して集束ビームを送信するには、最低でも23個以上の素子を励振する必要がある。

図-2に、励振素子数を20~56素子までを変化させたときの、欠陥深さ  $d$  におけるFSAP方式で得られたシグナルをプロットした。図-2では、励振素子数が増えるほど、シグナル値は大きくなる傾向がある。しかし、 $d = 25\text{mm}$  を見ると、励振数を32素子以上用いても、値はほとんど変わらない。つまり、励振素子数を大きくしてもシグナル強度の改善にはならない。さらに、欠陥深さ  $d$  が10mmと40mmを見ると、 $d = 10\text{mm}$  のときの励振素子数は、近距離音場限界距離より最低でも10個必要であるが、図2より、素子数が24個以上ではほとんど値は変わらないことがわかる。 $d = 40\text{mm}$  のときは、励振素子は20個必要であるが、36素子以上の励振では値はほとんど変わらない。以上より、近距離音場限界距離から算出した素子数に16個以上を加えた素子数で励振することで、シグナル強度を保持した映像化が可能である。

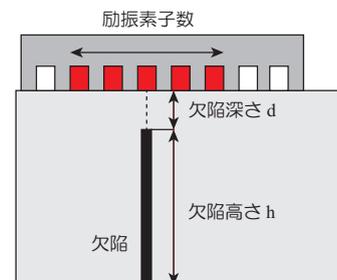


図-1 探触子と供試体の位置関係

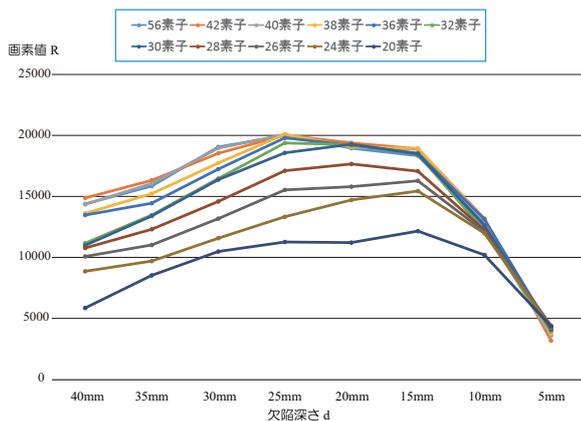


図-2 素子数を変化させた場合の異なる欠陥深さにおける欠陥エコー強度

### 3. 励振素子群を分割した場合の映像化時間

プロトタイプ機では、映像化に使用する送信・受信素子群を設定することができる。例えば、64素子のアレイ探触子ならば、No.1~32の素子群で送受信、No.33~64の素子群で送受信と、2つのパターンに分けることもできる。この場合、2つのパターンの映像化結果を重ね合わせて出力する。このようにするメリットは、波形記憶マトリクスの容量が大幅に削減できるため、波形計測に要する時間を短縮できることである。ここでは、駆動素子群を  $n$  とし、1つの素子群の素子数を  $r$  とする。1素子群で1つの映像を出力し、各素子群の映像を加算する。 $nr \leq 64$  を満たすような最も大きい素子数  $r$  を用いる。 $n$  を変化させた場合の、ビーム再構成および欠陥再構成に要する GPU 計算時間を図-3にプロットした。図-3より、駆動素子群  $n$  が4では計算時間が半分に短縮された。しかし、 $n$  が4以降は横ばいとなった。この検証から、複数の駆動素子群による映像を重ね合わせて出力することで、検査時間の短縮が期待できる。

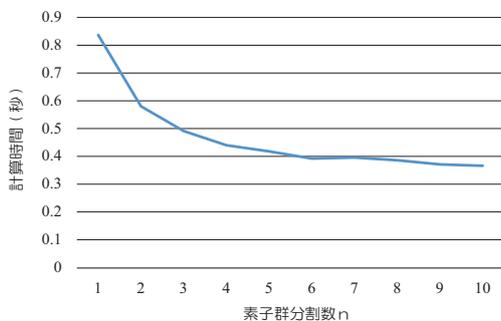


図-3 駆動素子群を変化させた場合の GPU 計算時間

### 4. 超音波の送・受信方向による深さ方向の分解能

深さ方向に複数の欠陥が存在する場合、これらを分離して映像化することを試みる。励振素子群を選ぶこ

とで、深い位置にある欠陥に選択的にビームを送信することを考える。ここでは、中心より左側の素子群で超音波を送信し、右側の素子群でエコーを受信し、そのときの欠陥画像を出力した。64素子全てで波形を送受信した場合、素子群が12個ずつの場合の映像化の結果を図-4に示す。使用素子数を少なくすると、深い位置の欠陥が再構成できることがわかる。よって、深さ方向の欠陥を分離したい場合は、送信方向と受信方向を鋭角に設定すればよいことがわかる。

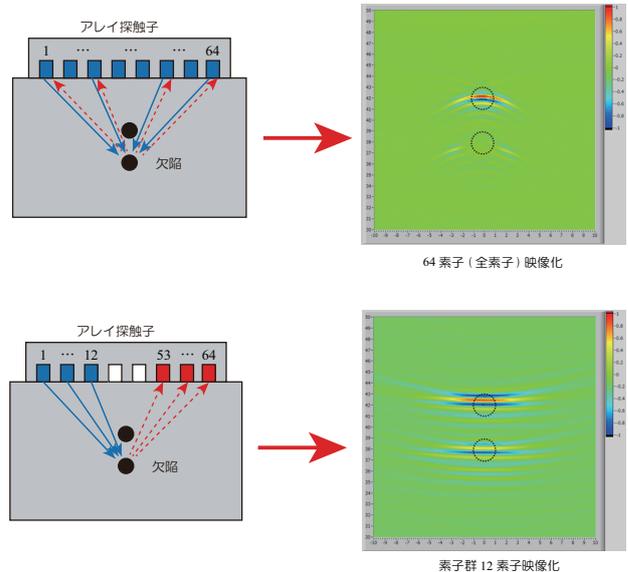


図-4 送受信素子群を選択し、鋭角で送受信した場合の映像化

### 5. 結論

FSAP方式による超音波映像化は、近距離音場限界距離から算出される開口幅から求められた素子数に、さらに16素子ずつ加えた素子数で駆動すれば、シグナル強度を保持した映像化が可能であることが分かった。また、アレイ素子を複数の素子群に区切り、各素子群で得られた映像化結果を重ね合わせることで、映像化時間の短縮が確認できた。さらに、超音波の送信および受信方向を選択的に指示することによって、深さ方向の欠陥分解能が向上することを示した。

#### 参考文献

- 1) 中畑和之, 平田正憲, 廣瀬壮一, 全波形サンプリング処理方式を利用した散乱振幅からの欠陥再構成, 非破壊検査, Vol.59, No.6, pp.277-283, 2010.
- 2) 堀口貴志, 徳増純男, 中畑和之, FSAP方式による任意の曲率を有する材料のリアルタイム内部イメージング, 信学技報, Vol.113, No.439, US2013-103, pp.51-54, 2014.
- 3) S Schuhmacher, P Zanger, K.J Langenberg, A system model to predict the results of ultrasonic scattering experiments, *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol.13, pp.147-154, 1994.
- 4) 中畑和之, 石川千智, 河野尚幸, 超音波リニア・マトリクスアレイ探触子3次元放射音場のモデル化その性能比較, 日本機械学会論文集, A編, 75巻 759号, pp.1468-1475, 2009.