

# 音響異方性を考慮した高精度な欠陥位置特定

東京工業大学大学院 学生員 加藤 智将  
 東京工業大学大学院 正 員 廣瀬 壮一  
 東京工業大学大学院 正 員 木本 和志

## 1. はじめに

鋼材中に発生した空洞や割れ等の欠陥を非破壊的に検出・評価することは、鋼構造物の高強度化、長寿命化に伴い、益々重要な課題となっている。しかし、圧延鋼板は超音波探傷試験において無視できない音響異方性を示すことがあり、これを考慮しないと欠陥位置が正確に評価できない例が知られている。これに対して本研究では、アレイ探触子を用いて2方向の横波位相速度を計測し、その結果を用いて画像化を行うことで、高精度に欠陥表面位置を特定することができることを示す。画像化には時間反転集束法と開口合成法を用い、前者に異方性パラメータとして計測した波速を与えることで、従来方法である開口合成法よりも正確な位置推定が可能であることが分かる。

## 2. 実験概要

### (1) 試験体

図-1に示すように、二種類の鋼材A,Bを用意した。二体の試験体にはそれぞれ4個の横穴( $\phi=3\text{mm}$ )を設けた。試験体の板厚 $h$ に対して横穴の中心位置は $2h/8, 4h/8, 6h/8, 7h/8$ となっており、図に示すように、深い位置から順に1から4の番号を与え、試験体名A,あるいはBとこれら1~4の番号で各々の横穴を参照するものとする。 $L$ および $C$ 方向はそれぞれ圧延方向、圧延方向直角方向を意味し、図に示す通り、試験体長手方向が圧延方向である。また、探傷試験は、図-1の横穴1,2は試験体底面から、4は上面から、3は両面から探傷を行った。

### (2) アレイ超音波探傷試験

超音波探傷試験に用いたアレイ探傷システムの構成を図-2に示す。アレイ探傷器には東芝UT03C1Aを、探触子はJapan Probe社製のSH波の接触型リニアアレイ探触子を用いた。探触子の中心周波数は2MHz、素子数32、各素子は $12\text{mm}\times 0.7\text{mm}$ の矩形であり、それらが2mmピッチで一列に並べられている。これらの装置を用いて $32\times 32=1024$ 個のAスコープ波形を測定し、画像化処理を行う。画像化範囲の指定には、アレイ探触子中心を原点とした図-2のような座標系を用い、計測点は探触子中心が横穴の中心に一致するようとする。

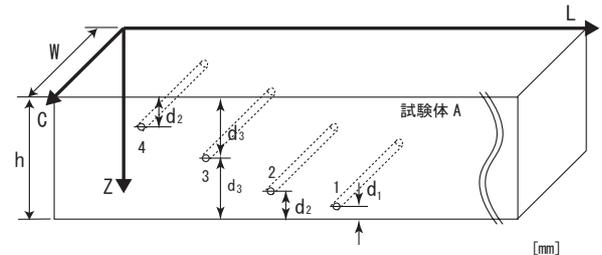
### (3) 横波位相速度の測定

SH波を使った欠陥画像化に必要な2つの横波位相速度、すなわち振動方向が $C$ 方向に一致し、表面方向、板厚方向に伝播するSH波の波速 $V_L$ と $V_Z$ を、試験体A,Bに対して別の実験により求める(図-3参照)。 $V_Z$ の評価は1回目、2回目底面エコーの到達時間差から求めた。 $V_L$ は表面方向に伝播するSH波を複数の素子で観測し、その到達時間差から最小二乗法により決定した。計測結果は以下の通り。

試験体A :  $V_Z = 3202(\text{m/s}), V_L = 3252(\text{m/s})$

試験体B :  $V_Z = 3156(\text{m/s}), V_L = 3210(\text{m/s})$

これより、鉛直方向と表面方向には1.5%程度の波速の差があることが分かった。



	h(板厚)	W(板幅)	探傷面から横穴中心部までの深さ		
			d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>
試験体A	37.357	77	4.75	9.5	18.679
試験体B	74.175	75	9.375	18.75	37.08

図-1 試験体の緒元

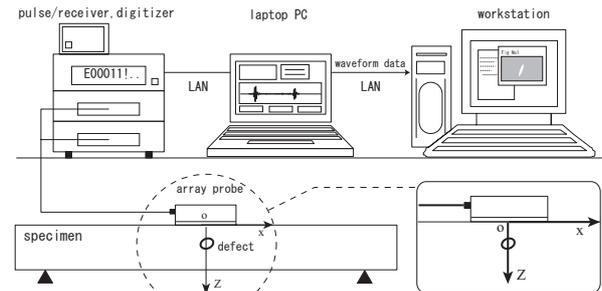


図-2 アレイ超音波探傷システム

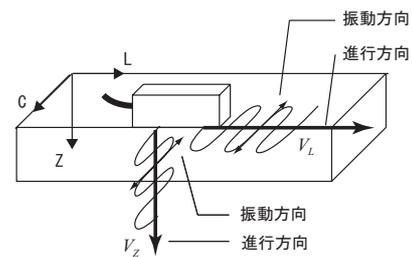


図-3 計測を行うSH波の振動方向と進行方向

## 3. 画像化手法と欠陥位置の推定方法

図-4に示すように、欠陥全体を含む適当な大きさの画像化領域を定める。アレイ探触子の素子数は $N$ とし、各素子の中心位置を $x_i, (i = 1, \dots, N)$ とする。 $i$ 番目の素子で送信し、 $j$ 番目の素子で受信した波形を $f_{ij}(t)$ とし、 $\{f_{ij}(t)|i, j = 1, \dots, N\}$ を用いて、欠陥上端部の画像化を行うことを考える。

### (1) 時間反転集束法

もっとも強い散乱源の位置を $x_{sc}$ 、超音波が探触子内部の

シユー材を伝播する時間を  $s$  とすれば、散乱波が波形  $f_{ij}(t)$  において観測される時間は  $s + |x_i - x_{sc}|/c(\theta) + |x_j - x_{sc}|/c(\theta)$  となる。そこで、

$$B(x) = \sum_{i,j}^N f_{ij} \left( s + \frac{|x_i - x_{sc}|}{c(\theta)} + \frac{|x_j - x|}{c(\theta)} \right) \quad (1)$$

なる  $x$  の関数を考える。  $B(x)$  は  $x = x_{sc}$  において大きな値を持つから、これを用いて主要な散乱源の画像化を行うことができる。ただし、  $x_{sc}$  は未知であるため、  $B(x)$  が散乱体を含む適当な閉領域を  $\Delta R$  として、  $\Delta R$  で最大値  $B(x_{sc})$  をもつと考え、式 (1) の最大値を探索することで  $x_{sc}$  を推定した。ここで、異方性の影響を考慮するため、  $\theta$  を入射角として、伝播方向と位相速度の関係は以下の式で与えた。

$$c(\theta) = \sqrt{(V_L \cos \theta)^2 + (V_Z \sin \theta)^2} \quad (2)$$

(2) 開口合成法

時間反転集束法との比較のために、開口合成法でも画像化を行った。開口合成法では、計測した波形  $f_{ij}(t)$  の時刻  $t$  に現れるエコーは、波速を  $c$  として  $c(\theta)t = |x_i - x| + |x_j - x|$  となるいずれかの位置  $x$  に散乱体があるものと考えて、

$$S(x) = \sum_{i,j}^N f_{ij} \left( \frac{|x_i - x|}{c(\theta)} + \frac{|x_j - x|}{c(\theta)} \right) \quad (3)$$

を計算する。これを  $x$  の関数として表示することで欠陥の画像化を行う。

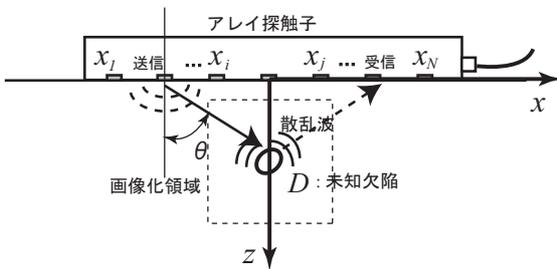
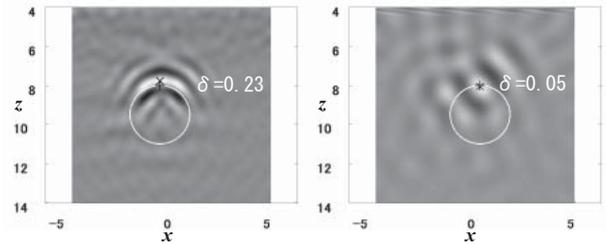


図-4 アレイ素子の配置と画像化領域

4. 画像化結果

図-5 は、異方性を考慮した場合の開口合成法、時間反転集束法による画像化結果の一例である。横穴周辺 10mm×10mm の領域を画像化し、その結果をグレースケールで表示したもので、図の横軸は  $x$  軸、縦軸は  $z$  軸、図中の白い円は、実際の横穴の位置を表している。画像のピーク位置から横穴上端部の位置を推定し、推定結果 (×) と実際の位置 (+) をプロットした。その差を  $\delta$  とし、A1～A4、B1～B4 に対する横穴位置推定の結果を、横軸を横穴の番号、縦軸を  $\delta$  としてまとめたものを図-6、7 に示す。図-6 は時間反転集束法において、異方性を考慮した場合と、等方性、すなわち  $V_Z = V_L$  として推定した場合を比較したものである。これを見ると、試験体を等方性として時間反転集束法を行うと、横穴位置が実際よりも深い位置に与えられ、異方性とする、実際の欠陥位置に近づいていることが分かる。このことから、時

間反転集束法で高精度な横穴位置推定を行う際には、音響異方性を考慮しなくてはならないことが分かる。図-7 は異方性を考慮した場合の、開口合成法と時間反転集束法の横穴位置推定精度の違いを比較したものである。推定精度は横穴の位置によっては同程度のものもあるが、平均的には時間反転集束法の方がよいことが分かる。



開口合成法 時間反転集束法  
図-5 横穴 A2 の画像化結果

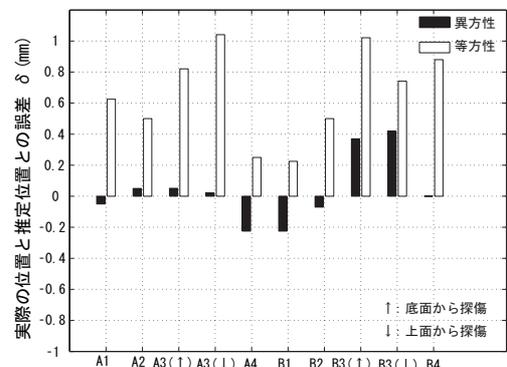


図-6 時間反転集束法を用いた場合の欠陥位置推定精度

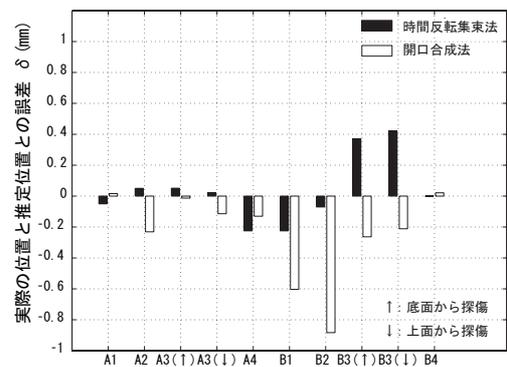


図-7 時間反転集束法と開口合成法の比較 (異方性とした場合)

5. 結論

本研究で得られた結論は以下の通りである。

- 時間反転集束法を用いると横穴上端部を検出することができる。
  - 異方性を考慮することにより、横穴位置の評価精度が向上する。
  - 開口合成法より時間反転集束法の方が精度がよい。
- 今後の研究として、時間反転集束法と開口合成法の結果を用いて、欠陥位置だけでなく、欠陥形状の推定を行うことが考えられる。