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画像化*

中畑 和之^{*1}, 竹内 裕幸^{*2}, 木本 和志^{*3}Ultrasonic Flaw Imaging by the FSAP Technique Using
Array Transducer for Angle Beam TestingKazuyuki NAKAHATA^{*1}, Hiroyuki TAKEUCHI and Kazushi KIMOTO^{*1} Department of Civil and Environmental Engineering, Ehime University
3, Bunkyo-cho, Matsuyama, Ehime, 790-8577, Japan

There is a phased array technique which makes use of flaw echoes, measured by every two-element combination as a pulser and a receiver, to synthesize high amplitude beams for any arbitrary angle and/or focal depth. Using this full waveform sampling and processing (FSAP) technique, we show a flaw reconstruction method for the angle beam phased array ultrasonic testing. In the case of the angle beam testing, it is necessary to estimate a beam path from a wedge to a specimen appropriately and to consider the mode conversion at the wedge-specimen interface. The main feature of our method is the use of processed wave data, called “scattering amplitude”, which is extracted from each flaw echo. First, the basic principle of the reconstruction method is described and then some flaw reconstructions are demonstrated. The resolution of the flaw images and the accuracy of flaw sizing can be improved by means of the scattering amplitude.

Key Words : Nondestructive Inspection, Ultrasonic Wave, Array Transducer, Angle Beam Testing, Full-Waveform Sampling and Processing (FSAP) Technique, Flaw Imaging

1. 緒 言

近年、アレイ探触子を用いた電子スキャン装置が、工業分野の非破壊検査においても普及しつつある。アレイ探触子は独立に駆動できる振動素子から構成され、各振動素子を電気的に制御することによって、任意の方向や深さ方向に超音波ビームを送信できる⁽¹⁾⁽²⁾。医療用のアレイ探触子と異なり、探触子の設置面直下ではなく斜め方向にのみ超音波ビームを送信したり、固体中の横波を利用したりすることを目的として、アレイ探触子と被検体の間にくさびを介した探傷が広く行われている⁽³⁾。このように斜め方向に超音波ビームを送信するものを、一般に斜角探傷用アレイ探触子と呼ぶ。この場合、図 1 に示すように、被検体表面に対してアレイ振動素子が斜めになるようなくさびの形状が用いられることが多く、これは通常の斜角探傷試験⁽⁴⁾と同じ形状である。固体中には L 波(縦波)と T 波(横波)が発生するが、くさびの材質や傾きを調整することで L 波が全反射となり、被検体中に T 波だけを発生させることができる。このため、くさびの材質として、被検体よりも音響インピーダンスが小さいアクリルやポリスチレン製がよく用いられる。

さて、著者らはこれまで、アレイ探触子を用いた固体内部の欠陥を画像化するための手段として全波形サンプリング処理 (Full-waveforms Sampling and Processing: FSAP) 方式を提案している⁽⁵⁾。FSAP 方式ではコンピュータ上で波形を重ね合わせるため、一般的な電子スキャン装置に搭載されているような遅延回路を必要とせず、単純な素子切り替え機能付きの探傷器でアレイ探触子が制御できる。これまで、アレイ探触子を被検体に直接設置した場合の FSAP 方式による超音波画像化を提案し、その有用性を検証してきた。しかし、実際にはくさびを介して

* 原稿受付 2011 年 3 月 12 日

*1 正員、愛媛大学大学院理工学研究科生産環境工学専攻 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町 3)

*2 愛媛大学工学部環境建設工学科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町 3)

*3 岡山大学大学院環境学研究科社会基盤環境学専攻 (〒700-8530 岡山県岡山市津島中 3-1-1)

E-mail: nakahata.kazuyuki@ehime-u.ac.jp

Fig. 1 Conventional array transducer for the angle beam ultrasonic testing

斜め方向に超音波を送信する場合が多く、本研究では斜角探傷用アレイ探触子を使用する場合を想定し、FSAP 方式の拡張を行うことを目的とする。

斜角探傷用アレイ探触子を用いる場合、欠陥に到達するまでに超音波はくさびと被検体の 2 媒質を伝搬することになる。くさび - 被検体界面において、超音波は屈折・モード変換するため、超音波の路程を適切に評価することが重要となる。本研究では、くさび内部を伝搬した L 波が界面でモード変換して、被検体中に T 波が発生する場合を想定し、欠陥からの散乱 T 波を超音波画像化に用いる。ここでは、波形記憶マトリクスから必要となる波形パターンを抽出して集束ビームを合成し、画素までの路程に相当する時刻の振幅をプロットする Sampling Phased Array 法⁽⁶⁾を画像化の基本原理とする。しかし、この方法は、得られた欠陥エコー（原波形）にディレイを考慮して重ね合わせるだけのものであり、欠陥の画像化結果はこの波形に大きく依存する。ここでは、原波形ではなく、原波形から欠陥の散乱波成分である散乱振幅⁽⁷⁾⁽⁸⁾を抽出し、これを画像化に用いる。散乱振幅は空洞欠陥の場合、矩形状波形となるため⁽⁹⁾、低周波数帯の探触子や、帯域が狭い探触子を用いた場合でも、比較的高い分解能で欠陥像を再構成できる。

2. 全波形サンプリング処理 (FSAP) 方式による画像化

2.1 サンプリングの手順

工業用の電子スキャン装置のように遅延回路を制御することによって集束ビームを作るのではなく、FSAP 方式ではコンピュータのメモリ上の演算でビームを合成する。図 2 に、総素子数が 4 個のリニアアレイ探触子の場合の FSAP 方式による超音波の送受信を示す。素子番号 1 で送信した超音波は欠陥で散乱し、そのエコーは 1 から 4 番の素子で受信される。このとき、4 つのエコー ($V_{11}(t)$, $V_{12}(t)$, $V_{13}(t)$, $V_{14}(t)$) が波形記憶マトリクスに保存される (マトリクスの赤い部分)。次に送信素子を変えて、同様に各々の素子で受信していくと、波形記憶マトリクスの要素が全て埋まることになる。アレイ探触子の素子の総数が N 個ならば、組み合わせは N^2 パターン存在す

Fig. 2 Signal matrix $V_{ij}(t)$ in which flaw signals by every two-element combination as a pulser and a receiver are stored

る．ここで、波動の相反性より $V_{ij}(t) = V_{ji}(t)$ ($i, j = 1, 2, \dots, N$) が成り立つため、実際には全部のパターンを保存する必要はなく、組み合わせは $(N^2 + N)/2$ パターンでよい．FSAP 方式の特徴は、全素子による送受信パターンを保存しているため、PC 上で任意の方向に超音波を送信すること（ビームステアリング：首振り、フォーカシング：集束）が何度でも実行可能となることである．

図 3 は、通常の電子スキャン装置で得られる欠陥エコーと FSAP 方式によって PC 上で合成したエコーを比較したものである⁽⁵⁾．これは、探触子の中心から屈折角が 45 度の方向に直径 2mm の貫通横穴（以下、横穴）が来るようにアレイ探触子を設置し、アルミニウム被検体の横穴からのエコーの比較を行ったものである．総素子数 64 個のうち素子番号 24 から 47 までの 24 素子を用いて、電子スキャン装置から各素子に適切なディレイを与えて励振した場合の横穴からのエコーを図 3 中に赤色で示し、FSAP 方式によって PC 上で合成したエコーを青色で示している．計測装置等の非線形が多少あるので、横穴からのエコーの形状は完全には一致しないが、FSAP 方式は電子スキャン装置で得られる欠陥エコーをほぼ再現できている．以上のことから、FSAP 方式は通常の電子スキャン装置による超音波送受信を代替できるものであり、FSAP 方式によって全波形パターンを記録しておけば、検査対象とする任意の画素に集束ビームを送信することができ、波形取得後に別室で超音波アレイ探傷が可能である．

2.2 原波形を用いた場合の画像化

著者らの前論文⁽⁵⁾では、リニアアレイ探触子を被検体に直接設置する場合の画像化の手順を示しているが、ここでは、斜角探傷用アレイ探触子を用いる場合の定式化を示す．リニアアレイ探触子の全素子数を N とする．画像化領域は 2 次元波動場とし、座標の基底ベクトルを e_1 と e_2 とし、画像化領域の任意の点の座標を $x = x_1 e_1 + x_2 e_2$ と表す．

i 番目の素子から超音波が送信され、 j 番目の素子で超音波が受信される場合を考える．図 4 に示すように、画像化領域を計 M 個の画素に分ける．いま、 k 番目の画素（以後、画素 $[k]$ ）に集束ビームを送信することを考える．画素 $[k]$ の座標 $x^k = (x_1^k, x_2^k)$ とアレイ探触子の中心座標 $z^0 = (z_1^0, z_2^0)$ の位置関係から、アレイ探触子から画素までの伝播時間 T^{k0} （以下、基本伝搬時間とよぶ）を計算する．斜角探傷用アレイ探触子を用いる場合の注意は、くさび $[w]$ と被検体 $[s]$ の界面 y^{k0} で超音波が屈折することである．本研究では、くさび内部の L 波が界面において屈折し、被検体内部で T 波になる場合を考える．界面において超音波の経路が折れ曲がるので、アレイ素子 z^0 と界面 y^{k0} 、界面 y^{k0} から画素 x^k までの路程を分けて考える．このときの基本伝搬時間は

$$T^{k0} = \frac{\sqrt{(x_1^k - y_1^{k0})^2 + (x_2^k - y_2^{k0})^2}}{c_T^{[s]}} + \frac{\sqrt{(y_1^{k0} - z_1^0)^2 + (y_2^{k0} - z_2^0)^2}}{c_L^{[w]}} \quad (1)$$

と算定できる．ここで $c_T^{[s]}$ は被検体の T 波の音速、 $c_L^{[w]}$ はくさびの L 波の音速である．アレイ素子 z^0 と画素 x^k を

Fig. 3 Comparison between signals from a side drilled hole of diameter 2mm (Red line shows measured signal with a commercial electronic scanner “ES-3100”, blue line shows a synthesized signal with the FSAP technique)

Fig. 4 Beam path from an array element to a position (Pixel No. k) for imaging via interface of wedge-specimen

決めると、スネルの法則:

$$\frac{\sin \theta_L^{[w]}}{c_L^{[w]}} = \frac{\sin \theta_L^{[s]}}{c_T^{[s]}} \quad (2)$$

から界面の入射位置 y^{k0} は一意に決まる (波線理論⁽¹⁰⁾)。次に、アレイ探触子の i 番目の送信素子の座標を z^i とすると、送信素子と画素 $[k]$ までの伝播時間 T^{ki} は次式で表される。

$$T^{ki} = \frac{\sqrt{(x_1^k - y_1^{ki})^2 + (x_2^k - y_2^{ki})^2}}{c_T^{[s]}} + \frac{\sqrt{(y_1^{ki} - z_1^i)^2 + (y_2^{ki} - z_2^i)^2}}{c_L^{[w]}} \quad (3)$$

ここで、 y^{ki} は i 番目の送信素子から発せられた超音波の界面の入射位置である。式 (1) の基本伝搬時間と式 (3) の差は

$$\Delta T^{ki} = T^{ki} - T^{k0} \quad (4)$$

となる。同様に j 番目の受信素子 z^j と画素 $[k]$ までの伝播時間 T^{kj} は次式のようにになる。

$$T^{kj} = \frac{\sqrt{(x_1^k - y_1^{kj})^2 + (x_2^k - y_2^{kj})^2}}{c_T^{[s]}} + \frac{\sqrt{(y_1^{kj} - z_1^j)^2 + (y_2^{kj} - z_2^j)^2}}{c_L^{[w]}} \quad (5)$$

ここで、 y^{kj} は受信経路における界面の位置である。式 (1) の基本伝搬時間と式 (5) の差は次のようになる。

$$\Delta T^{kj} = T^{kj} - T^{k0} \quad (6)$$

式 (4) と式 (6) より、超音波の送受信として考えた場合のトータルのディレイは次のようになる。

$$\Delta T_{ij}^k = \Delta T^{ki} + \Delta T^{kj} \quad (7)$$

次に、式 (7) を用いて $V_{ij}(t)$ を ΔT_{ij}^k だけシフトする。素子番号 i と j を変化させながらディレイ ΔT_{ij}^k を作用させ、 $V_{ij}(t)$ 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。

$$F^k(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N V_{ij}(t - \Delta T_{ij}^k) \quad (8)$$

画像化のためには、基本伝搬時間 $t = T^{k0}$ に相当する $F^k(t)$ の値を抽出し、その値を画素上にプロットする。画素を $[k] = [1] \sim [M]$ まで変えながらこれらを実行し、最終的には F^k の値にカラーマップをつけて表示することにより、欠陥像を出力する。

2.3 欠陥からの散乱振幅による画像化

式 (8) は欠陥エコー（原波形）をそのまま用いるときの欠陥の再構成式であるが、欠陥エコーの波の数が多い場合や低周波の場合には高分解能な像が得られない．そこで、本研究では欠陥エコーから抽出した散乱振幅⁽⁷⁾⁽⁸⁾を利用する．散乱振幅は空洞欠陥からの散乱の場合、理論的には負の振幅を持つ矩形波として表される⁽⁹⁾．き裂状欠陥の場合は負と正方向のインパルスとなるため、これを用いれば高分解能な画像化が期待できる．以下に、欠陥エコーから散乱波成分を抽出するためのデータ処理方法について述べる．

ここでは、超音波計測系が線形時不変 (LTI) システムであるとする．アレイ探触子で計測された欠陥エコーは、探触子の周波数特性、アンプによる周波数特性、電気回路の影響等によって変調されたものとなっている．図 5 の左側に示すように、欠陥エコー $V_{ij}(t)$ はこれらの影響関数 (伝達関数) を用いて次のように表すことができる．

$$V_{ij}(t) = \beta(t) \otimes \alpha^{[w]}(t) \otimes \alpha^{[s]}(t) \otimes P_i^{[w]}(t) \otimes P_i^{[s]}(t) \otimes P_j^{[w]}(t) \otimes P_j^{[s]}(t) \otimes T_i(t) \otimes T_j(t) \otimes C_i(t) \otimes C_j(t) \otimes S_{ij}(t) \quad (9)$$

ここで、 $\otimes$ は時間に関する合成積を表す．式 (9) において、 β はアレイ探触子の帯域特性や計測装置の電気回路等の影響を表す関数、 $\alpha^{[w]}$ と $\alpha^{[s]}$ はくさび [w] と被検体 [s] の波動減衰を表す関数、 $P_i^{[w]}$ と $P_i^{[s]}$ は送信経路 [i] におけるビームの伝搬距離の関数、 $P_j^{[w]}$ と $P_j^{[s]}$ は送信経路 [j] におけるビームの伝搬距離の関数、 C_i と C_j は超音波ビームの回折補正、 T_i と T_j はくさび-被検体界面の超音波の屈折率 (付録で詳細を示す)、 S_{ij} は散乱振幅を表している．計測系の線形性を仮定すると、 $V_{ij}(t)$ はフーリエ変換域 (周波数域) で以下のような単純積で書き表すことができる．

$$V_{ij}(\omega) = \beta(\omega) \alpha^{[w]}(\omega) \alpha^{[s]}(\omega) P_i^{[w]}(\omega) P_i^{[s]}(\omega) P_j^{[w]}(\omega) P_j^{[s]}(\omega) T_i(\omega) T_j(\omega) C_i(\omega) C_j(\omega) S_{ij}(\omega) \quad (10)$$

i を虚数単位、 ω を角振動数とすれば、上式で、例えば $S_{ij}(\omega) = \mathcal{F}\{S_{ij}(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} S_{ij}(t) \exp(i\omega t) dt$ である．いま、 $P_i = P_i^{[w]} P_i^{[s]}$ 、 $P_j = P_j^{[w]} P_j^{[s]}$ とおいて式 (10) を書き直すと、

$$V_{ij}(\omega) = \beta(\omega) \alpha^{[w]}(\omega) \alpha^{[s]}(\omega) P_i(\omega) P_j(\omega) T_i(\omega) T_j(\omega) C_i(\omega) C_j(\omega) S_{ij}(\omega) \quad (11)$$

となる．

上式の $\beta(\omega)$ を解析的に決定するのは困難であるので、ここでは参照波を用いたデコンボリューションによって $S_{ij}(\omega)$ を抽出する．参照波は厚さ D の固体片の上部にアレイ探触子を設置した場合に、ある素子から超音波を送信し、同じ素子で計測される底面からの反射 L 波である (図 5 の右側参照)．参照波は周波数域で次のように表すことができる．

$$V^{\text{ref}}(\omega) = \beta(\omega) \alpha^{[\text{ref}]}(\omega) \exp(ik_L D) \exp(ik_L D) C^{\text{ref}}(\omega) C^{\text{ref}}(\omega) R(\omega) \quad (12)$$

Fig. 5 Ultrasonic measurement setup for flaw imaging and transfer functions in LTI system

ここで、 $\alpha^{[\text{ref}]}$ は固体片を伝搬する波動の減衰関数、 k_L は L 波の波数、 $R(\omega)$ は固体片の底面からの平面波の反射率である。 $C^{\text{ref}}(\omega)$ の回折補正の表現については Schmerr と Song らが理論式⁽¹¹⁾を示している。欠陥エコーの式 (11) を参照波の式 (12) で割ることによって、欠陥からの散乱波と伝搬経路に関する成分だけを抽出する。もし固体片としてくさびと同じ材質を用いると $\alpha^{[\text{ref}]} = \alpha^{[w]}$ であるので、 $P_i(\omega)P_j(\omega)S_{ij}(\omega)$ は次のようなデコンボリューション処理によって抽出できる。

$$P_i(\omega)P_j(\omega)S_{ij}(\omega) = \frac{V_{ij}(\omega)}{V^{\text{ref}}(\omega)} \frac{\exp(2ik_L D) \{C^{\text{ref}}(\omega)\}^2 R(\omega)}{\alpha^{[s]}(\omega) T_i(\omega) T_j(\omega) C_i(\omega) C_j(\omega)} \quad (13)$$

ここで、回折補正 $C_i(\omega)$ と $C_j(\omega)$ について、画素毎に逐一計算することも可能であるが、現実的に計算時間が多く必要となる。そこで、本研究では、簡単のため $C_i(\omega)$ と $C_j(\omega)$ は周波数や素子の組み合わせによらない定数 (const.) と仮定する。実際、アレイ素子の素子幅は波長よりも小さく、またアレイ素子と画素の距離は遠方近似が成立する程度に離れているので、欠陥に到達する超音波は平面波と近似でき、回折補正 $C_i(\omega)$ と $C_j(\omega)$ は無視してもあまり影響はないと考える。また、本研究は金属を対象とし、限定した周波数帯域で超音波を送受信するため、 $\alpha^{[s]}(\omega)$ は周波数の変化による影響は小さいと仮定した。以上の仮定より、式 (13) は

$$P_i(\omega)P_j(\omega)S_{ij}(\omega) = \frac{V_{ij}(\omega)}{V^{\text{ref}}(\omega)} \frac{\exp(2ik_L D) \{C^{\text{ref}}(\omega)\}^2 R(\omega)}{T_i(\omega) T_j(\omega)} \quad (14)$$

と書ける。上式では $C_i(\omega)$ 、 $C_j(\omega)$ や $\alpha^{[s]}(\omega)$ は定数としたが、定数に本質的な意味はないので 1 とした。

式 (14) を実行するとき、 $V_{ij}(\omega)/V^{\text{ref}}(\omega)$ の計算は注意が必要である。欠陥エコーは、探触子の周波数ピークに強く依存して帯域をもっており、共振帯域から外れた周波数帯域では $V_{ij}(\omega)$ と $V^{\text{ref}}(\omega)$ は共に値が 0 に近くなる。つまり、 $V_{ij}(\omega)/V^{\text{ref}}(\omega)$ は 0/0 の計算を行う危険性をはらんでいる。これを避けるために、ここでは Wiener filter⁽¹²⁾ を援用する。Wiener filter を用いれば、

$$\frac{V_{ij}(\omega)}{V^{\text{ref}}(\omega)} = \frac{V_{ij}(\omega) V^{\text{ref}}(\omega)^*}{|V^{\text{ref}}(\omega)|^2 + \varepsilon^2 \max\{|V^{\text{ref}}(\omega)|^2\}} \quad (15)$$

と表すことができる。上式で * は複素共役、 $\max\{\}$ は ω を変化させた場合の最も大きな値、 ε はフィルタパラメータである。本論文では種々の試行の結果から $\varepsilon=0.01$ を採用している。また、式 (14) の屈折率 $T_i(\omega)$ と $T_j(\omega)$ は理論上 0 となる場合があるが、その場合は受信波 V_{ij} の振幅を計算上 0 とし、 $T_i(\omega) = T_j(\omega) = 0$ で割ることを避けている。最終的に、式 (14) を逆フーリエ変換して、これと波形記憶マトリクスの中身を入れ替える。

$$V_{ij}(t) \leftarrow \mathcal{F}^{-1}\{P_i(\omega)P_j(\omega)S_{ij}(\omega)\} \quad (16)$$

上式は散乱振幅と伝搬距離の畳み込みに相当し、入れ替え後は式 (8) を用いて画像化を行う。

3. 画像化結果

3.1 斜角探傷用アレイ探触子

計測実験で用いたくさびとアレイ探触子について図 6 に示す。くさびの材質はポリスチレンで、 $c_L^{[w]}$ は 2323m/s、密度は $1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ である。くさびの傾きは 22° である。アレイ探触子はこのくさびの上に設置するが、アレイ探触子の中心からくさび - 金属の界面に向かう線分が界面と交わる位置はくさびの右から 42mm の位置である。以後、これを“くさびの中心”と呼ぶ。また、本研究では公称中心周波数 3MHz、総素子数 64 のアレイ探触子を使用した。アレイ探触子の素子幅は 0.7mm、素子中心間距離は 0.8mm である。この探触子の 1 素子を駆動して、固体片の底面からのエコーの時間域波形とそのフーリエスペクトルを図 7 に示す。図 7 より、ピーク周波数はおよそ 2.73MHz であることがわかる。ここでは、日立エンジニアリングアンドサービス製の超音波電子スキャン装置 (ES3100) を用いて欠陥エコーを計測する。ここでは、冒頭で述べたように、1 素子ずつ L 波の送受信を行っており、同時励振機能は用いていない。また、欠陥エコーのホワイトノイズを軽減するために、10 回連続でデータ収録を行い、その平均を計測データとして記録している。

次の節では、斜角探傷用アレイ探触子を用いた FSAP 方式による人工欠陥の画像化結果を示す。人工欠陥はアルミニウム被検体 ($c_L^{[s]}=6368\text{m/s}$, $c_T^{[s]}=3131\text{m/s}$, 密度 $2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$) の中に作成している。また、画像化結果は、各々の図の画像化範囲内の F^k の最大値で割ることによってすべて基準化している。

Fig. 6 Specifications of array transducer and wedge

Fig. 7 A reflected wave from the bottom surface of an aluminum (pulse-echo signal) and its Fourier spectrum

3.2 横穴の画像化

図 8 の上部に示すような厚さ 70mm のアルミニウム被検体の内部に 5 つの横穴を作成した。横穴の直径は 2mm で、深さ方向に互いにずれて 5 つ存在するモデルである。3 番目に深い横穴の中心は被検体上面から深さ 40mm にある。この横穴の中心とくさびの中心が 20mm になるように斜角探傷用アレイ探触子を設置した。これは、くさびの中心から 3 番目の横穴の中心に線分を引いた場合、その線分と垂直軸の角度が 26.6° となる位置関係である。画像化領域は $40\text{mm} \times 40\text{mm}$ の範囲であり、画素サイズは 0.1mm である。散乱振幅データを用いて画像化した結果を図 8 の下に示す。参照波として、くさびと同じ材質の固体片 ($D=40\text{mm}$) を作成し、その底面からの L 波反射波を用いた。画像化結果から、超音波が到達している部分の横穴境界部が鮮明に再現できていることがわかる。空洞欠陥からの散乱振幅は負方向の矩形波に近い波形となるため⁽⁹⁾、画像化結果も横穴表面部で負の値 (赤色) が現れているのがわかる。なお、式 (16) を数値計算によって求める際に、実数部だけでなく虚数部も求めるが、本実験ではこの虚数部は実数部に比べて非常に小さいことが確認されている。

3.3 底面スリット

ここでは、裏面き裂を模擬した幅 0.2mm のスリットをアルミニウム被検体の底面に作成した。アルミニウム被検体の厚さは 40mm であり、くさびの中心とスリットの距離は約 20mm 程度である。ここでは、スリットを中心として $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ の範囲を、画素サイズは 0.05mm で画像化した。

まず、スリット高さが 4mm の場合の画像化結果を図 9 に示す。図 9 の左側が原波形を用いた場合、右側が散乱

Fig. 8 Reconstruction result of 5 side-drilled holes

Fig. 9 Reconstruction results of a slit of 4mm height with raw signal data (A) and the scattering amplitude(B)

振幅を用いた場合の画像化である．図中の点線が被検体の底面部およびスリット部である．左図では波形が尾引いているためにスリット先端の正確な位置が識別しにくい，散乱振幅を用いるとスリット端部の識別が可能であり，スリット高さも 4mm と読み取れる．スリットのような裂先端部の場合，散乱振幅は負方向のパルスの次に正方向のパルスが微小時刻だけ遅れた波形となるため⁽⁹⁾，先端部は負の値（赤色）と正の値（青色）が強く現れているのが特徴である．

Fig. 10 Reconstruction results of a slit of 2mm height with raw signal data (A) and the scattering amplitude(B)

次にスリット高さが 2mm の場合の結果を図 10 に示す．図 10 の左側が原波形を用いた場合，右側が散乱振幅を用いた場合の画像化である．散乱振幅を用いる場合，スリット高さが小さくてもスリット端部とコーナ部を分離することができ，高精度なサイジングが可能であることがわかる．

4. 結 語

アレイ探触子で得られる全波形パターンを利用して，PC 上で波形の処理・合成を行う FSAP 方式による超音波画像化を試みた．ここでは，斜角探傷用アレイ探触子の使用を前提とした画像化手法の定式化を行った．斜角探傷用アレイ探触子を用いる場合には，くさびと被検体の 2 媒質を超音波は伝搬することから，くさび - 被検体の界面で超音波の屈折やモード変換の影響を考慮する必要がある．ここでは波線理論に基づいて，超音波の路程を推定した．また，欠陥エコー（原波形）では画像化時に良好な分解能が得られない場合を想定して，散乱振幅による画像化を示した．この結果，スリットのようなき裂のサイジングにおいて特に効果があることがわかった．

今後は，マトリクスアレイ⁽¹⁾に本手法を適用して，欠陥の 3 次元画像化にも応用したいと考えている．

付録： 屈折率の取り扱い

本論文では，くさびと被検体は完全接合していると仮定する．このとき，くさび中の L 波が界面で屈折して被検体中に T 波を発生する場合の屈折率は次のように書ける⁽¹¹⁾．

$$T_i = \frac{-4 \sin \theta_T^{[s]} \cos \theta_L^{[w]} \cos \theta_L^{[s]} (1 - 2 \sin^2 \theta_T^{[w]})}{\Delta_1 + \Delta_2}$$

$$\Delta_1 = \cos \theta_L^{[s]} \left[1 - 4 \sin^2 \theta_T^{[w]} \cos^2 \theta_T^{[w]} + 4 \left(\frac{c_T^{[w]}}{c_L^{[w]}} \right)^2 \sin \theta_T^{[w]} \cos \theta_T^{[w]} \sin \theta_L^{[w]} \cos \theta_L^{[w]} \right]$$

$$\Delta_2 = \frac{\rho^{[s]} c_L^{[s]}}{\rho^{[w]} c_L^{[w]}} \cos \theta_L^{[w]} \left[1 - 4 \sin^2 \theta_T^{[s]} \cos^2 \theta_T^{[s]} + 4 \left(\frac{c_T^{[s]}}{c_L^{[s]}} \right)^2 \sin \theta_T^{[s]} \cos \theta_T^{[s]} \sin \theta_L^{[s]} \cos \theta_L^{[s]} \right] \quad (A1)$$

ここで， $\rho^{[w]}$ と $\rho^{[s]}$ は，それぞれくさびと被検体の密度である．図 11 に入射角 $\theta_L^{[w]}$ を変化させたときの屈折率 T_i を示す．図 11 から分かるように，第 1 臨界角（屈折 L 波が全反射する状態）を超えると T_i は複素数となる．斜角

Fig. 11 Transmission coefficient for oblique incidence from a wedge(polystyrene) to specimen(aluminum)

探傷では，入射角が第 1 臨界角を超えて第 2 臨界角までの間を使用することが多い．従って，屈折率の複素数の取り扱いを明確にする必要がある．

屈折 L 波が全反射のとき，この角度は次のように書ける．

$$\sin \theta_L^{[s]} = i \operatorname{sgn}(\omega) \sqrt{\left(\frac{c_L^{[s]}}{c_L^{[w]}} \sin \theta_L^{[w]} \right)^2 - 1} \quad (\text{A2})$$

ここで，

$$\operatorname{sgn}(\omega) = \begin{cases} 1 & (\omega > 0) \\ -1 & (\omega < 0) \end{cases} \quad (\text{A3})$$

である．このとき，屈折率は実数 a_1 と a_2 を用いて

$$T_i = \Re(T_i) + i\Im(T_i) = a_1 + ia_2 \operatorname{sgn}(\omega) \quad (\text{A4})$$

と表現できる．

さて，屈折率が複素数となった場合の式 (16) の計算方法について述べる．いま，

$$H(\omega) = \frac{V_{ij}(\omega)}{V_{\text{ref}}(\omega)} \exp(2ik_L D) C_i'^2(\omega) R(\omega), \quad b_1 + ib_2 \operatorname{sgn}(\omega) = \frac{1}{T_i(\omega) T_j(\omega)}$$

とおけば，式 (16) は次のように書ける．

$$V_{ij}(t) = \mathcal{F}^{-1} \{ b_1 H(\omega) + ib_2 \operatorname{sgn}(\omega) H(\omega) \} \quad (\text{A5})$$

上式の右辺を具体的に計算してみる．

$$h(t) = \mathcal{F}^{-1} \{ H(\omega) \} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H(\omega) \exp(-i\omega t) d\omega \quad (\text{A6})$$

$$\widehat{\operatorname{sgn}}(t) = \mathcal{F}^{-1} \{ \operatorname{sgn}(\omega) \} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \operatorname{sgn}(\omega) \exp(-i\omega t) d\omega \quad (\text{A7})$$

と書くことにして，式 (A5) を変形する．積関数のフーリエ変換は畳み込みになることに注意すれば，式 (A5) は

$$V_{ij}(t) = b_1 h(t) + ib_2 \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) \widehat{\operatorname{sgn}}(t - \tau) d\tau \quad (\text{A8})$$

となる． $\widehat{\operatorname{sgn}}(t) = \frac{1}{i\pi t}$ であるので，上式は

$$V_{ij}(t) = b_1 h(t) + \frac{b_2}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{h(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (\text{A9})$$

となる．上式の右边第 2 項はヒルベルト変換 $H[h(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{h(\tau)}{t - \tau} d\tau$ を表しているため、式 (A9) は

$$V_{ij}(t) = b_1 h(t) + b_2 H[h(t)] \quad (\text{A10})$$

となる．以上より、屈折率が複素数になった場合、屈折率の逆数の虚部に相当する項に $h(t)$ のヒルベルト変換値をかけたものを加えればよい．なお、本研究では離散ヒルベルト変換を用いて上式を高速に計算している．

謝 辞

本研究は、科学研究費補助金 (若手研究 A : 課題番号 18686038 , 代表 中畑和之) の補助を受けて行われました．

文 献

- (1) 三原 毅, “特集フェイズドアレイ超音波技術の最近の展開”, 非破壊検査, Vol.56, No.10 (2007), pp.503–529.
- (2) Wooh, S-C. and Shi, Y., “Optimum beam steering of linear phased arrays”, *Wave Motion*, Vol.29 (1999), pp.245–265.
- (3) 山田裕久, 矢野嘉孝, 宇田川建志, “フェイズドアレイ方式超音波探傷システムの開発”, 新日鉄技報, Vol.379 (2003), pp.25–28.
- (4) Krautkrämer, J. and Krautkrämer, H., *Ultrasonic Testing of Materials* (1990), Springer-Verlag.
- (5) 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 (2010), pp.277–283.
- (6) Bulavinov, A., Pinchuk, R., Pudovikov, S., Reddy, K.M. and Walte, F. “Industrial application of real-time 3D imaging by sampling phased array”, *Proceedings of 10th European Conference on Non-Destructive Testing* (2010), Report No.1.3.22.
- (7) 高堂谷正樹, 野竹正義, 北原道弘, “定量的非破壊評価へのニューラルネットワークの適用”, 非破壊検査, Vol.42, No.5 (1993), pp.230–236.
- (8) Kim, H.-J., Song, S.-J. and Kim, Y.H., “Quantitative approaches to flaw sizing based-on ultrasonic testing models”, *Review of progress in quantitative nondestructive evaluation*, Vol.22 (2003), pp.703–710.
- (9) Schmerr, L.W., *Fundamentals of Ultrasonic Nondestructive Evaluation* (1998), Plenum Press.
- (10) Achenbach, J.D., Gautesen, A.K. and McMaken, H., *Ray Methods for Waves in Elastic Solids* (1982), Pitman Advanced Publishing Program.
- (11) Schmerr, L.W. and Song, S.-J., *Ultrasonic Nondestructive Evaluation Systems – Models and Measurements* (2007), Springer-Verlag.
- (12) Grover, B.R. and Hwang, P.Y.C., *Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering* (1996), John Wiley & Sons.