

超音波アレイ探傷における種々の欠陥画像化手法の比較について

愛媛大学大学院 学生員 ○上甲智史
愛媛大学大学院 学生員 松岡ちひろ
愛媛大学大学院 正 員 中畑和之

1. はじめに

フェーズドアレイ探触子は、複数の振動素子を電子的に制御することによって超音波ビームを任意の位置に送信したり、フォーカスすることができる。アレイ探触子による欠陥画像化方法としてはB-スキャンが一般的であるが、近年では逆散乱イメージング法やS-SAFT法など、欠陥エコーを計算機上で合成して欠陥像を出力する手法¹⁾が提案されている。しかし、これらの手法に関する画像化性能の比較や、使用性に関する検討はなされていない。そこで、本研究では同一の欠陥モデルに対して、リニアアレイ型逆散乱法、フェーズドアレイ型逆散乱法、S-SAFT法、B-スキャン法の4つの手法を適用して欠陥の再構成シミュレーションを行い、これらの手法の特徴について考察を行う。ここでは、BEMによって数値的に計算した欠陥エコーを用いて、欠陥の再構成を行う。

2. 超音波画像化手法

上記の4つの手法のうち、B-スキャン法は既に広く用いられている方法であるので説明を省略する。以下では、残りの3つの手法について簡単に要約する。

2.1 リニアアレイ型逆散乱法

リニアアレイ型逆散乱法は、アレイ探触子のある点から円筒波 u^{in} を送信し、欠陥によって散乱された散乱波 u^{sc} を同じ点で受信して、この散乱波形から逆に欠陥の形状を推定するものである。いま、欠陥の境界部において値を有する特異関数 $\gamma(\mathbf{x})$ を定義する²⁾。散乱波の表現式をキルヒホフ近似を用いて線形化し、これをフーリエ変換することによって、 $\gamma(\mathbf{x})$ は次式のように求めることができる。

$$\gamma(\mathbf{x}) = \frac{1}{(2\pi)^2} \iint_{-\infty}^{\infty} \frac{4\pi\sqrt{i\pi y_2 k_2} \bar{u}^{sc}}{\left(\frac{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}}{2}\right)^{\frac{1}{2}}} u^0 \exp(ik_2 y_2) \times \exp\{i(k_1 x_1 + k_2 x_2)\} dk_1 dk_2 \quad (1)$$

ここで、 $k_2 = \sqrt{4k_T^2 - k_1^2}$ である。上式の $\bar{u}^{sc}$ は、受信点 $\mathbf{y}$ における散乱波 u^{sc} を y_1 についてフーリエ変換したものである。

$$\bar{u}^{sc}(k_1, y_2, k_T) = \int_{-\infty}^{\infty} u^{sc}(y_1, y_2, k_T) \exp(-ik_1 y_1) dy_1 \quad (2)$$

2.2 フェーズドアレイ型逆散乱法

複数の素子をディレイをつけて励振することで一定方向に平面波を発生する。超音波の送信方向を表すベ

クトルを $\mathbf{p} = (p_1, p_2)$ とし、欠陥によって散乱された散乱波 u^{sc} をすべての素子で受信する。この散乱波形から欠陥の形状を再構成する。アレイ探触子で計測されたデータ $\bar{u}^{sc}$ から特異関数 $\gamma(\mathbf{x})$ は次式のように得られる。

$$\gamma(\mathbf{x}) = \frac{1}{(2\pi)^2} \iint_{-\infty}^{\infty} \frac{2\pi(k_2 + k_T p_2) \bar{u}^{sc}}{k_T u^0 \exp\{i(k_2 + k_T p_2) y_2\}} \times \exp\{i(k_1 x_1 + k_2 x_2)\} dk_1 dk_2 \quad (3)$$

ここで、 $k_2 = \sqrt{k_T^2 p_2^2 - k_1^2 - 2k_T p_1 k_1 - k_T p_2}$ である。

2.3 S-SAFT

ある方向 θ_m に超音波を送信したときに得られる時刻 t の応答を $v_m(\mathbf{y}^n, t)$ とする。このときの振幅は送受信点 $\mathbf{y}^n = (y_1^n, y_2^n)$ から距離 r にある欠陥 $\mathbf{x} = (x_1, x_2)$ からの波動成分と見なすことができる。 t と伝播距離 $r(\mathbf{x}) = \sqrt{(x_1 - y_1^n)^2 + (x_2 - y_2^n)^2}$ の関係は、材料の音速 c_T を用いて、 $r(\mathbf{x}) = tc_T/2$ と表される。送信方向 θ_m の図面上の距離 r の位置に、出力電圧 v_m の振幅値 $h_m(\mathbf{y}^n, r(\mathbf{x}))$ をプロットする。

$$v_m(\mathbf{y}^n, t) \mapsto h_m(\mathbf{y}^n, r(\mathbf{x})) \quad (4)$$

$\mathbf{y}^n$ を一点に固定したまま、 θ_m をM方向に変化させたとき(セクタスキャン)に得られる図を

$$h(\mathbf{y}^n, r(\mathbf{x})) = \sum_{m=1}^M h_m(\mathbf{y}^n, r(\mathbf{x})) \quad (5)$$

とすれば、 h は $\mathbf{y}_n$ を中心とする扇形の領域にプロットされた図となる。さらに、送受信点 $\mathbf{y}_n$ を変えながら同様の走査をすることによって、複数の受信点におけるセクタスキャン図を合成する。

$$H(\mathbf{x}) = \sum_{n=1}^N h(\mathbf{y}^n, r(\mathbf{x})) \quad (6)$$

欠陥が存在する部分は各受信点で計測された h が画面上で密に重なることになる。以上のプロセスにより欠陥像を求める方法をS-SAFTと呼ぶ。

3. 欠陥像の可視化結果

平らな被検体(ステンレス: $c_T = 3000\text{m/s}$, 密度 $\rho = 7800\text{kg/m}^3$)の内部に欠陥が存在する場合について、境界要素法で得られた波形データを用いて欠陥の再構成シミュレーションを行った。欠陥として被検体

表面から深さ 30mm の位置に直径 2mm の円形横穴が 4 つ存在するモデルを考え、アレイ探触子はピッチ 1mm(素子幅 0.8mm) で計 64 素子が直線上に並んでいるものとする。なお、解析では、中心周波数が $f^{\max} = 2.25\text{MHz}$ であるパルス波を送信している。

図-1 に 4 つのイメージング法によって再構成された欠陥像を示す。(a) リニアアレイ型逆散乱法は、複数の素子で円筒波を送信し、駆動素子群の中心でエコーを受信する。受信点を変化させながら得られた複数のエコーを基に欠陥像を再構成したものである。被検体の上からのみ超音波を送信しているため、欠陥像の上側境界が再構成されており、4 つの欠陥が明確に識別できる。図-1(b) は、フェーズドアレイ型逆散乱法による再構成結果である。ここでは、64 素子全てを励振して一定方向に超音波を発信し、全ての素子でエコーを受信する。送信を 7 方向に設定し、それぞれの方向で得られる再構成像を合成したものを欠陥像としている。なお、(a) と (b) の逆散乱法を実際の超音波計測で用いるときには、受信エコーから欠陥による散乱成分を抽出する波形処理が必要である。

図-1(c) は S-SAFT による再構成結果である。ここでは、駆動素子を 24 とし、セクタスキャン時にはフォーカス距離を 50mm としている。S-SAFT は、受信した欠陥エコーを加工することなく、原波形をそのまま入力できるのが利点であり、パルス波を送信した場合は、4 つの欠陥が鮮明に再構成できる。また、駆動素子 24、フォーカス距離を 50mm とし、素子を左から右へリニアスキャンした場合に得られる B-スキャン像を図-1(d) に示す。この場合、4 つの欠陥の有無は判断できるが、形状までは認識できないことがわかる。

4. 結論

本研究では、同一の欠陥モデルに対して、4 つの超音波イメージング手法による画像化の比較を行った。この結果、逆散乱法と S-SAFT 法が高精度に欠陥像を再構成できることがわかった。原波形をそのまま入力できるという点では S-SAFT は便利であるが、送信波形によって欠陥像が大きく変わる可能性がある。一方、逆散乱法は適切なデータ処理を行えば、送信波の形状に依らず欠陥の再構成が可能である。今後は 3 次元に拡張した場合の、これらの手法の精度および使用性について検討を行いたい。

参考文献

- 1) 廣瀬壮一, 河野尚幸, 馬場敦史, 中畑和之, 超音波アレイ探触子による欠陥画像化手法に関する一検討, JSNDI 春季大会予稿集, 2007, 印刷中
- 2) Kitahara, M., Nakahata, K. and Hirose, S.: Elastodynamic inversion for shape reconstruction and type classification of flaws, *Wave Motion*, Vol.36, pp.443-455, 2002.

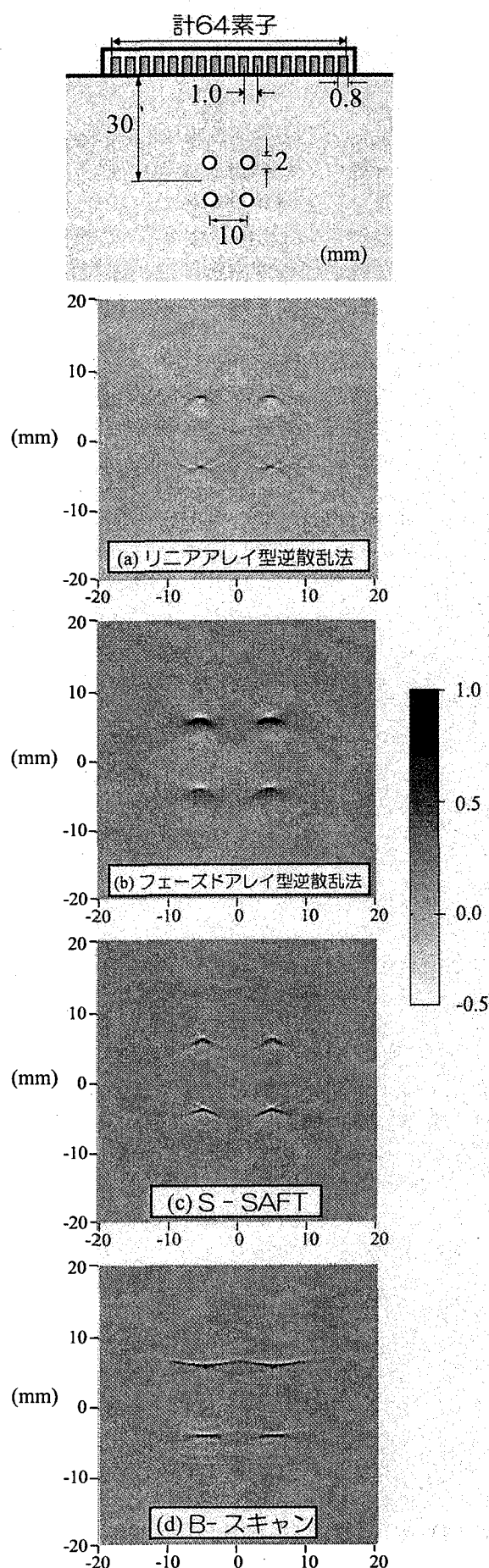


図-1 4つのイメージング手法による欠陥の画像化