

欠陥再構成のための3次元逆散乱イメージング法に関する基礎的研究

愛媛大学大学院 学生員 渡邊 怜, 愛媛大学大学院 正会員 中畑和之
 東京工業大学大学院 正会員 齋藤隆泰, 東京工業大学大学院 正会員 廣瀬壮一

1. はじめに

超音波探傷において、欠陥エコーの波形情報(位相, スペクトル振幅等)を有効に活用し、これを計測位置の情報と組み合わせることによって欠陥形状を高精度に再構成する逆散乱イメージング法¹⁾(Inverse Scattering Imaging Method:ISIM)が提案されている。これまで、ISIMは2次元波動場においてその有用性が検証されており、リニアアレイ探触子を用いてアルミニウム供試体中の人工欠陥が良好に再構成できることが報告されている。しかし、実際の欠陥は3次的に分布しているため、ISIMを3次元波動場へ拡張することは重要な課題であった。本研究では、数値実験および計測実験の両側面から3次元逆散乱イメージング法(以下、3D-ISIM)の性能検証を行う。

2. 3次元逆散乱イメージング法

3D-ISIMの詳細については筆者らの前論文²⁾を参照して頂くこととし、以下に簡単な概要を述べる。図-1に示すように、マトリクスアレイ探触子の1素子 $y = (y_1, y_2, y_3)$ から超音波を発振し、欠陥 D^c で散乱された縦波エコーを同じ点で受信する。ここでは、複数の異なる点で送受信された超音波から逆に欠陥の形状関数 $\gamma(x)$ を再構成する問題を考える。縦波の波数を k_L とし、受信エコーの x_3 方向の成分を $u^{sc}(y, k_L)$ と書く。これを次のようにフーリエ変換する。

$$\begin{aligned} \bar{u}^{sc}(k_1, k_2, y_3, k_L) &= \iint_{-\infty}^{\infty} u^{sc}(y_1, y_2, y_3, k_L) \\ &\quad \times \exp\{-i(k_1 y_1 + k_2 y_2)\} dy_1 dy_2 \end{aligned} \quad (1)$$

キルヒホフ近似を導入して線形化すれば、欠陥の形状関数のフーリエ変換像 $\tilde{\gamma}$ と \bar{u}^{sc} の間には次式の関

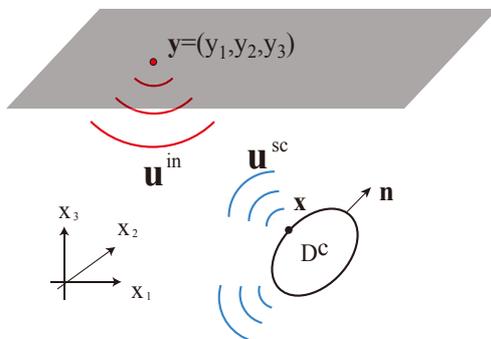


図-1 3D-ISIMにおける超音波の送受信。

係が成り立つ。

$$\tilde{\gamma}(k_1, k_2, k_3) = \frac{-2k_3|y_3|\bar{u}^{sc}(k_1, k_2, y_3, k_L)}{u^0\sqrt{k_1^2 + k_2^2 + k_3^2}\exp(ik_3 y_3)} \quad (2)$$

ここで、 $k_3 = \sqrt{4k_L^2 - k_1^2 - k_2^2}$ である。波数空間 $k = (k_1, k_2, k_3)$ に集められたデータ $\tilde{\gamma}(k)$ を、実空間 $x = (x_1, x_2, x_3)$ に変換するためには、次の3次元逆フーリエ変換を用いればよい。

$$\gamma(x) = \frac{1}{(2\pi)^3} \iiint_{-\infty}^{\infty} \tilde{\gamma}(k) \exp\{i(k \cdot x)\} dk \quad (3)$$

BEMで計算された欠陥エコーを用いて、欠陥の再構成シミュレーションを行った結果を図-2に示す。ここでは、1.4×1.4mmのアレイ素子を x_1-x_2 面上に32×32個並べたマトリクスアレイ探触子の利用を想定し、ステンレス鋼の内部に存在する4つの欠陥(球形空洞)を再構成の対象とする。欠陥の上側から超音波を送受信しているため欠陥の上部しか再構成されていないが、4つの欠陥形状が良好に識別できる。

3. 超音波計測実験による欠陥像の再構成

3D-ISIMは、マトリクスアレイ探触子を使用することを想定している。しかし、マトリクスアレイ探触子を制御する電子スキャン装置は高額であるため、本研究では水槽中で探触子を機械的に動かすメカニ

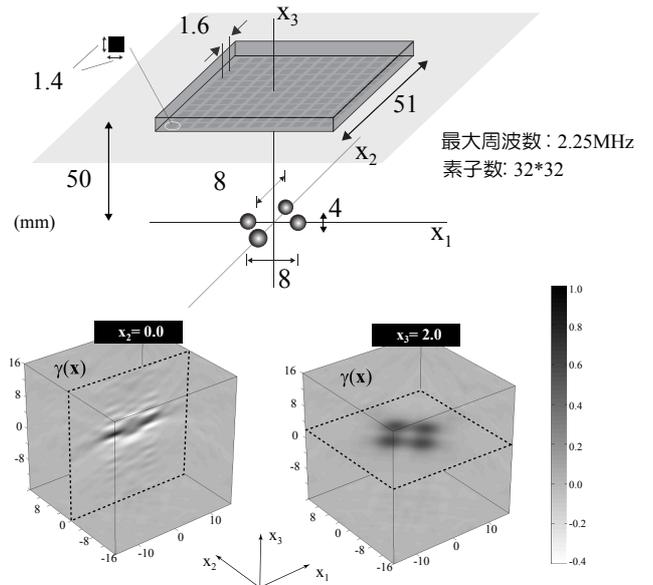


図-2 数値解析で得られた波形を用いた3D-ISIMの検証。

キーワード：逆散乱イメージング法, 欠陥再構成, マトリクスアレイ探触子, 超音波探傷

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

カルスキャン装置で代用することで3D-ISIMの検証を行った。アレイ探触子の1素子から材料内部に超音波を発振する場合、振動素子のサイズが小さいために点波源と見なすことができる。この点波源からの超音波は球面波として内部に伝搬する。この球面波を本実験で模擬するために、集束型水浸探触子から被検体表面にビームが集束するように超音波を発振する。図-3の上側に示すように、被検体表面にビームを集束させることで集束部が点波源となり、材料内部に球面波が送信される。ここでは、ジャパンプローブ社製の公称中心周波数12MHz、水中集束距離12mmの探触子を用いている。被検体表面からの反射波とそのフーリエスペクトルを図-3の下側に示す。水中で一定の間隔(ピッチ)で探触子を動かすことで、マトリクスアレイ探触子の素子配置が模擬できる。

3D-ISIMは欠陥からの散乱波 u^{sc} を用いて、欠陥像を再構成する手法である。通常、計測装置で得られる欠陥エコー(原波形)には、欠陥からの散乱波以外にも探触子の帯域特性や計測装置の影響等を含んでいるので、本研究では波形処理を施すことによって散乱波成分を抽出している。ここで用いた波形処理は参照波形を用いたデコンボリューション処理に基づくものであり、2D-ISIMと同様の処理¹⁾である。

アルミニウム供試体(縦波音速:6360m/s、密度:2700kg/m³)の内部に、直径2mmの横穴を深さを変えながら5つ作成した。この横穴からのエコーを用いて、3D-ISIMによる欠陥の再構成を行った結果を図-4に示す。計測ピッチは0.6mmとし、128×128の点で欠陥エコーを計測した。欠陥エコーのうち0.1~13.0MHzの周波数範囲の散乱波成分を抽出して、欠陥の再構成を行った。再構成された $\gamma(x)$ のうち、閾値を決めて等値面表示したものを図-4の中段に、 x_2 軸方向に垂直な2つの断面を画像化したものを

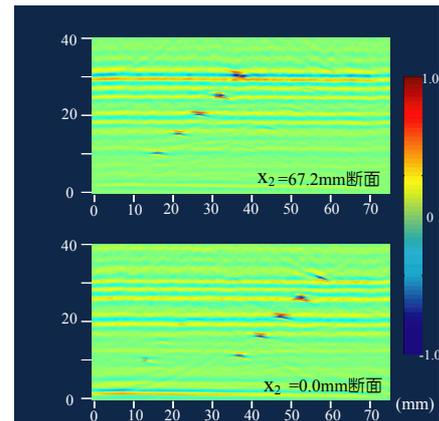
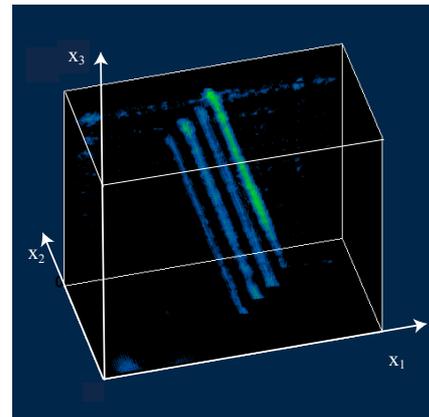
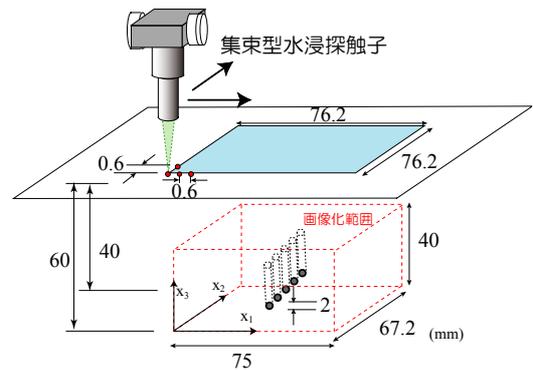


図-4 計測実験による3D-ISIMの検証。

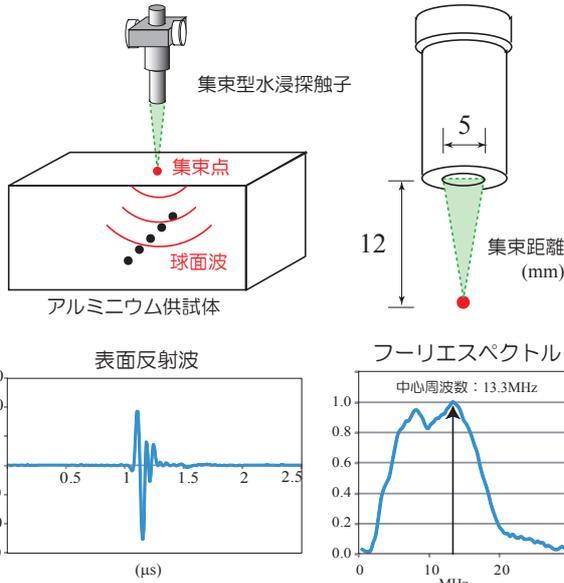


図-3 供試体表面からの反射波とそのフーリエスペクトル。

を同図の下段に示している。これらの結果から、5つの横穴の空間分布、形状および大きさが良好に推定できることがわかる。

4. まとめ

本研究では、メカニカルスキャン装置を用いて超音波計測実験を行い、欠陥エコーから得られた散乱波成分を用いて、3D-ISIMによる欠陥像の3次元再構成の検証を行った。この結果、人工欠陥の分布形態および3次元形状が良好に再現できることがわかった。

参考文献

- 1) 中畑和之, 松岡ちひろ, 廣瀬壮一: 超音波電子スキャン装置を用いた逆散乱イメージング法の検証, 土木学会論文集A, Vol.65, No.2, pp.505-513, 2009.
- 2) Nakahata, K., Saitoh, T. and Hirose, S.: 3-D flaw imaging by inverse scattering analysis using ultrasonic array transducer, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol.26, pp.717-724, 2007.