3次元逆散乱イメージング法による欠陥形状の再構成

愛媛大学大学院	学生員	○渡邉 怜
愛媛大学大学院	正 員	中畑和之

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次元的に 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(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.

$$\overline{u}^{sc}(k_1, k_2, y_3, k_L) = \iint_{-\infty}^{\infty} u^{sc}(y_1, y_2, y_3, k_L) \\ \times \exp\{-i(k_1y_1 + k_2y_2)\} dy_1 dy_2$$
(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 γ と \overline{u}^{sc} の間には次式の関係



図-1 3D-ISIM における超音波の送受信.

が成り立つ.

$$\tilde{\gamma}(k_1, k_2, k_3) = \frac{-2k_3|y_3|\overline{u}^{sc}(k_1, k_2, y_3, k_L)}{u^0\sqrt{k_1^2 + k_2^2 + k_3^2}\exp(ik_3y_3)} \quad (2)$$

ここで、 $k_3 = \sqrt{4k_L^2 - k_1^2 - k_2^2}$ である. 波数空間 $\mathbf{k} = (k_1, k_2, k_3)$ に集められたデータ $\tilde{\gamma}(\mathbf{k})$ を、実空間 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3)$ 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.

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

境界要素法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,32×32 個並べたマトリクスアレイ探触子を考える.ステンレ ス鋼の内部に存在する4つの欠陥(球形空洞)を,3D-ISIMによって再構成したものである.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カル スキャン装置で代用することで 3D-ISIM の検証を行



図-2 数値解析で得られた波形を用いた 3D-ISIM の検証.

う.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.この球面波を模擬するた めに、本研究では、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エコー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 から 0.1~13MHz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



図-3 供試体表面からの反射エコーとそのフーリエ変換.



図-4 計測実験による 3D-ISIM の検証.

の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 を行った.この結果、人工欠陥の分布形態および形状 が良好に再現できることがわかった.

参考文献

- 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.