

金属材料の非破壊検査のための弾性波逆散乱イメージング法

中畑和之¹⁾ 廣瀬壮一²⁾

¹⁾ 愛媛大学大学院理工学研究科 ²⁾ 東京工業大学大学院情報理工学研究科

〒790-8577 愛媛県松山市文京町3

e-mail: nakahata@dpc.ehime-u.ac.jp

あらまし

発電プラントや橋梁等を構成する金属部材を検査するにあたって、アレイ探触子を用いた超音波探傷が導入されつつある。本研究では、リニア・マトリクスアレイ探触子で得られる欠陥エコーを基に金属内部の欠陥形状を再構成する逆散乱イメージング法 (ISIM) について述べる。本手法は、計測された欠陥エコーをフーリエ変換して周波数領域で画像を合成するものであり、解析ルーチンには多次元 FFT を用いているため高速イメージングが可能である。ここでは、電子スキャン装置を用いて超音波計測を行い（金属中の弾性縦波を利用する）、ISIM の実験的検証を行った結果を示す。実験では、ボイドを模擬した欠陥として横穴を、き裂を模擬した欠陥としてスリットをそれぞれアルミニウム被検体に作成し、これらの2次元あるいは3次元形状の再構成を行った。キーワード：非破壊検査、逆散乱イメージング法 (ISIM)、アレイ探触子、金属材料、3次元欠陥映像化

Inverse Scattering Imaging Method for Ultrasonic NDT of Metal Component

Kazuyuki Nakahata¹⁾ and Sohichi Hirose²⁾

Dept. of civil and environmental engineering, Ehime University

²⁾Dept. of mechanical and environmental informatics, Tokyo Institute of Technology

3 Bunkyo, Matsuyama, Ehime 790-8577, Japan

e-mail: nakahata@dpc.ehime-u.ac.jp

Abstract:

Ultrasonic phased array transducers are widely used in the nondestructive testing of metal components in engineering structures. We developed the inverse scattering imaging method (ISIM) to reconstruct flaw shapes in the metal components from waveforms measured with matrix and linear array transducers. The ISIMs are based on the linearized inverse scattering method in the frequency domain and can perform high-speed flaw reconstruction due to a flaw synthesizing algorithm by the multidimensional FFT. Since flaw reconstructions with the ISIMs have already checked by numerical simulations using the boundary element method, in this study we verify performances of the ISIMs by using measured longitudinal wave components with an electronic ultrasonic scan device. Here 2-D and 3-D shapes of side drilled holes and an EDM slit in aluminum specimens are reconstructed by means of the ISIMs.

Keywords: Nondestructive testing, Inverse scattering imaging method, Ultrasonic array transducer, Metal components, 3-D flaw imaging

1. はじめに

超音波アレイ探触子とは、独立に駆動できる複数の小さな振動素子を直線状（リニア）あるいは平面状（マトリクス）に配置したセンサーである。電子的に駆動素子を切り替えることによって瞬時に多点で欠陥エコーを得ることが可能である。アレイ探触子を制御する超音波計測装置は一般に電子スキャン装置と呼ばれており、近年では医療分野だけでなく工業分野においても電子スキャン装置を用いた超音波非破壊検査が行われるようになってきた¹⁾。現在、電子スキャン装置を用いて金属内部の欠陥形状を画像化する一般的な手法は、B、Cスキャン²⁾である。これらは駆動素子を切り替えながら欠陥エコーを計測し、エコーの伝播時間と振幅値の関係を深さ方向に（Bスキャン）、またはある深さ位置における振幅値を平面上に（Cスキャン）プロットしていく手法であり、欠陥像の合成原理が簡単であるため、多くの電子スキャン装置に実装されている。

一方、エコーの伝播時間と振幅値だけを利用するのではなく、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、これをアレイ探触子の素子の位置情報と組み合わせることにより欠陥形状を高精度に再構成する手法として、逆散乱イメージング法（Inverse scattering imaging method: ISIM^{3,4)}が提案されている。ISIMは、フーリエ変換を基本構造とした周波数領域開口合成法（Fourier domain SAFT^{5,6)}の理論を、線形化逆散乱解析法⁷⁾に取り入れたものであり、検査対象とする材料の一計測平面で得られた欠陥エコーから、欠陥形状の再構成が可能である。ISIMには送受信方法の違いから2種類の方法が提案されており、アレイ探触子が設置された部分の真下に存在する欠陥を再構成対象とした方法³⁾と、真下以外に存在する欠陥をステアリングビームによって再構成する方法⁴⁾がある。これまで、ISIMは境界要素法を用いた数値シミュレーションによって欠陥画像化の可能性が示されていた。そこで、本研究では、電子スキャン装置を用いて欠陥からのエコーを実際に計測し、このエコーを用いてISIMの検証を行った。ここでは、人工欠陥として、アルミニウム中に掘り抜いた横穴（サイドドリルホール：SDH）と、放電加工によって作成したスリット（EDM-S）を用意し

た。なお、金属材料中では一般に縦波（L波）と横波（T波）の超音波が伝搬するが、本研究ではL波を用いて欠陥の再構成を行う。

2. 逆散乱イメージング法（ISIM）

2.1 波動場の設定

ISIMで対象とする波動場と超音波の送受信の概要を図1に示す。均質等方な弾性体 D 内に散乱体（欠陥） D^c が存在しているものとする。縦波入射波として \mathbf{u}^{in} を送信し、欠陥 D^c によって散乱された波動 \mathbf{u}^{sc} を素子 \mathbf{y} で受信する。受信は個々の素子で行い、得られた散乱波形から逆に欠陥の形状を推定する。角振動数を ω とする定常波動場において、点 \mathbf{y} における欠陥からの散乱波 \mathbf{u}^{sc} は次のように表される⁷⁾。

$$u_m^{\text{sc}}(\mathbf{y}, \omega) = \int_D U_{im}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega) q_i(\mathbf{x}, \omega) dV(\mathbf{x}) \quad (1)$$

ここで、 $U(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega)$ は弾性波動問題の基本解であり、2次元波動場では

$$U_{im}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega) = \frac{i}{4\mu} \left[H_0^{(1)}(k_T r) \delta_{im} + \frac{1}{k_T^2} \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_m} \times \{ H_0^{(1)}(k_T r) - H_0^{(1)}(k_L r) \} \right] \quad (2)$$

であり、3次元波動場では

$$U_{im}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega) = \frac{1}{4\pi\mu} \left[\frac{\exp(ik_T r)}{r} \delta_{im} + \frac{1}{k_T^2} \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_m} \left\{ \frac{\exp(ik_T r)}{r} - \frac{\exp(ik_L r)}{r} \right\} \right] \quad (3)$$

となる。上式で、 i は虚数単位、 $r = |\mathbf{x} - \mathbf{y}|$ 、 k_L と k_T はそれぞれL波とT波の波数である。また、式(2)で $H_0^{(1)}$ は第1種0次のハンケル関数である。

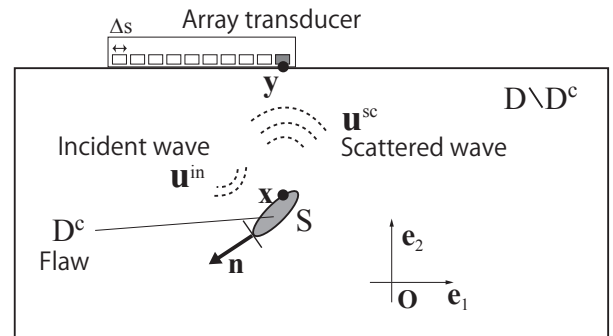


図1 Incident wave generated from array transducer and scattered wave by flaws in a metal component.

式(1)における \mathbf{q} は等価散乱源と呼ばれており、欠陥形状を表す関数を含んでいる。等価散乱源は領域型と境界型積分表現の2通りに表すことができる⁷⁾が、ここでは境界型積分表現を採用する。

$$q_i(\mathbf{x}, \omega) = -\gamma(\mathbf{x}) C_{ijkl} \{ n_j(\mathbf{x}) u_{k,l}(\mathbf{x}, \omega) - n_l(\mathbf{x}) u_k(\mathbf{x}, \omega) \partial / \partial x_j \} \quad (4)$$

ここで、 \mathbf{n} は図1に示すように欠陥境界から D に向く法線ベクトル、 \mathbf{C} は弾性スティフネスであり4階のテンソルである。式(4)中の γ は欠陥の境界 S 上においてのみ値を有する特異関数であり、次式で定義される。

$$\int_D \gamma(\mathbf{x}) dV(\mathbf{x}) = \int_S dS(\mathbf{x}). \quad (5)$$

ISIM には送受信方法の違いから2種類の方法があり、アレイ探触子が設置された部分の真下に存在する欠陥を再構成対象とした方法（パルスエコー型 ISIM³⁾）と、真下以外に存在する欠陥をステアリングビームによって再構成する方法（ビームステアリング型 ISIM⁴⁾）がある。以下では、2次元波動場について、それぞれの要約を述べる。

2.2 パルスエコー型 ISIM

パルスエコー型の ISIM は、アレイ探触子のうちの1振動素子から入射波 \mathbf{u}^{in} を送信し、欠陥からの散乱波 \mathbf{u}^{sc} を送信素子と同じ素子で受信する方法である。送受信する素子を変えながら、全素子で送受信を実行する。1つの振動素子から入射される波動は、ホイヘンスの原理より次のような波動であるとする。

$$u_m^{\text{in}}(\mathbf{x}, \omega) = \int_{\Delta s} U_{im}^{\text{far}}(\mathbf{y}, \mathbf{x}, \omega) t_i(\mathbf{y}, \omega) dS(\mathbf{y}) \simeq U_{im}^{\text{far}}(\mathbf{y}_0, \mathbf{x}, \omega) t_i(\mathbf{y}_0, \omega) \Delta s \quad (6)$$

ここで \mathbf{U}^{far} は基本解(2)の遠方表現⁸⁾、素子幅を Δs 、送信素子の代表位置を \mathbf{y}_0 とした。

フーリエ変換構造に帰着する逆解析のプロセスは著者らの前論文⁴⁾に詳細が記載されているので、ここでは定式化を省略する。ISIM の最終フォームは

$$\bar{A}(k_1, y_2, \omega) = \frac{-2iu^0 k_L}{\sqrt{i\pi k_L |y_2|}} \exp(i\sqrt{4k_L^2 - k_1^2} y_2) \times \frac{\exp(i\sqrt{4k_L^2 - k_1^2} y_2)}{\sqrt{4k_L^2 - k_1^2}} \tilde{\gamma} \left(k_1, \sqrt{4k_L^2 - k_1^2} \right) \quad (7)$$

となる。ここで、 $u^0 = \frac{1}{4} \left(\frac{k_L}{k_T} \right)^2 \Delta s$ であり、 $\tilde{\gamma}$ は γ の2次元フーリエ変換

$$\gamma(x_1, x_2) = \frac{1}{(2\pi)^2} \times \iint_{-\infty}^{\infty} \tilde{\gamma}(k_1, k_2) \exp[i(k_1 x_1 + k_2 x_2)] dk_1 dk_2 \quad (8)$$

である。式(7)中において、 $\bar{A} = \bar{\mathbf{u}}^{\text{sc}}(k_1, y_2, \omega) \cdot \mathbf{e}_2$ であり、散乱波の \mathbf{e}_2 方向成分を表す。なお、関数の上付きの $\bar{\cdot}$ は、以下のような1次元フーリエ変換後の関数を表している。

$$\bar{\Psi}(k_1, y_2, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \Psi(y_1, y_2, \omega) \exp(-ik_1 y_1) dy_1 \quad (9)$$

2.3 ビームステアリング型 ISIM

アレイ探触子から任意の方向に超音波を送信する場合を考える。この場合、アレイ探触子の複数素子に適切なディレイを設定して駆動することで、任意の方向に入射波 \mathbf{u}^{in} を送信する。入射波の送信方向を $\mathbf{p} = (p_1, p_2)$ とすると、 \mathbf{u}^{in} は次のように表される。

$$u_m^{\text{in}}(\mathbf{x}, \omega) = u^0 p_m \exp(ik_L \mathbf{p} \cdot \mathbf{x}) \quad (10)$$

ここでは \mathbf{L} 波を送信するので、入射波の偏向方向は伝搬方向 \mathbf{p} と同じである。

逆解析のプロセスは著者らの前論文⁴⁾を参照して頂くこととし、ISIM の最終フォームのみを以下に示す。

$$\bar{A}(k_1, y_2, \omega) = \frac{-u^0 k_L \exp(i\sqrt{k_L^2 - k_1^2} y_2)}{\sqrt{k_L^2 - k_1^2}} \times \tilde{\gamma} \left(k_1 - k_L p_1, \sqrt{k_L^2 - k_1^2} - k_L p_2 \right) \quad (11)$$

である。このとき、 \mathbf{p} 方向に超音波を1回送信し、欠陥からの散乱波をすべての素子で個々に受信する。式(11)中において、 $\bar{A} = \bar{\mathbf{u}}^{\text{sc}}(k_1, y_2, \omega) \cdot (-\mathbf{p})$ であり、欠陥の再構成には散乱 \mathbf{L} 波の進行方向の成分が必要であることを表している。しかし、アレイ素子を \mathbf{e}_1 方向に1列に並べる構成上、実際に計測される散乱波は \mathbf{e}_2 方向の成分のみであるので、ここでは $\bar{A} = -\bar{u}_2^{\text{sc}}(k_1, y_2, \omega) p_2$ としている。

2.4 解像度

式(7)に示すパルスエコー型 ISIM の場合、 \mathbf{u}^{sc} の \mathbf{e}_2 方向成分を計測し、これより得られた計測デー

タ $\bar{A}(k_1, y_2, \omega)$ から、特性関数 $\gamma(x_1, x_2)$ のフーリエ変換 $\tilde{\gamma}$ が求まる。このとき、 $\tilde{\gamma}$ が得られる点の集合は $(k_1, \sqrt{4k_L^2 - k_1^2})$ となる。すなわち、図2の上側に示すように \mathbf{K} -空間において、半径 $2k_L$ の円周上で $\tilde{\gamma}$ の値が求められることになる。送信する超音波の波数（周波数）を変えることによって、波数に応じた半径 $2k_L$ の円周上に $\tilde{\gamma}$ がプロットされていく（図2下側）。被検体の上側に置かれたアレイ探触子で計測されたエコーからは \mathbf{K} -空間の上半面の $\tilde{\gamma}$ （実線）が構成される。被検体の下側にもアレイ探触子が配置されれば、 \mathbf{K} -空間の下半面の $\tilde{\gamma}$ （破線）も得られる。最終的に、 \mathbf{K} -空間上において最大周波数 $2k_L^{\max}$ までの範囲で $\tilde{\gamma}$ が得られるので、これを式(8)によってフーリエ変換すれば欠陥の領域形状 $\gamma(\mathbf{x})$ が再構成されることになる。

ビームステアリング型の場合、式(11)より $\tilde{\gamma}$ が計測データ $\bar{A}(k_1, y_2, \omega)$ から得られる。アレイ探触子が被検体の上側 ($y_2 - x_2 > 0$) に設置されるときに $\tilde{\gamma}$ が得られる点は、 $(k_1 - k_{LP1}, \sqrt{k_L^2 - k_1^2 - k_{LP2}^2})$ となる。すなわち、 \mathbf{K} -空間において、 $(-k_{LP1}, -k_{LP2})$ を中心とする半径 k_L の半円上で欠陥のフーリエ変換 $\tilde{\gamma}$ が求められることになる。送信する超音波の波数に応じて中心位置を変えながら、半径 k_L の半円上に $\tilde{\gamma}$ がプロットされていく。アレイ探触子は被検体の上側に設置した状態で送信方向 \mathbf{p} を変化させると、最終的に \mathbf{K} -空間上において最大波数 $2k_L^{\max}$ までの範囲で $\tilde{\gamma}$ がプロットされる。

以上より、逆解析に必要な波形データは \mathbf{K} -空間 (k_1, k_2) にプロットされている。実際の逆解析は2D-FFT*を用いるため、 k_1 および k_2 に関するそれぞれの最大値 k_1^{\max} と k_2^{\max} からなる四角形領域の \mathbf{K} -空間のデータから実空間 (x_1, x_2) の欠陥像を求める。ナイキスト数の制約から k_1^{\max} は素子の間隔（ピッチ） Δy_1 に依存し、 $k_1^{\max} = \pi/\Delta y_1$ となる。また、 k_2^{\max} は、受信超音波の最大周波数を f^{\max} 、L波の音速を c_L と書けば、 $k_L^{\max} = 2\pi f^{\max}/c_L$ によって決まる。これらの値から、本手法の解像度は $\Delta x_i = \pi/k_i^{\max}$ 、 $(i = 1, 2)$ となる。

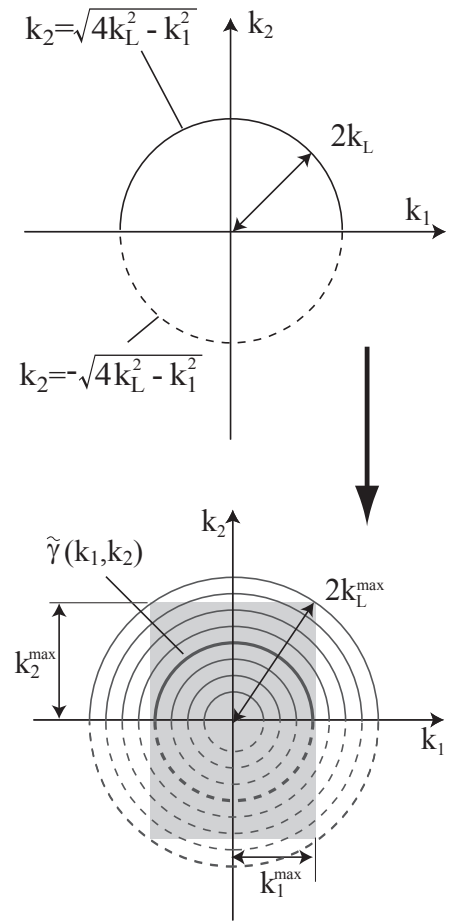


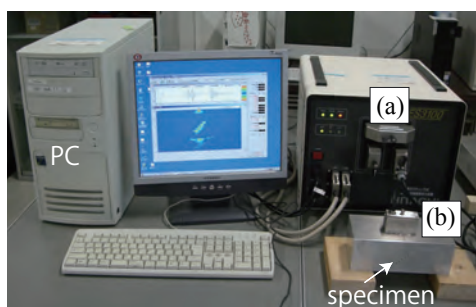
図2 Wave data $\tilde{\gamma}$ in \mathbf{K} -space and data sampling area for 2-D FFT.

3. 計測波形による欠陥の再構成結果

3.1 電子スキャン装置とアレイ探触子

超音波アレイ探傷実験のための計測装置とアレイ探触子を図3に示す。ここでは、日立エンジニアリングアンドサービス製の電子スキャン装置 (ES 3100) を用いて欠陥エコーを計測した。ES3100では、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。実験では、アレイ探触子を直接被検体に接触させて超音波を送受信しており、アレイ探触子と被検体の接触媒質としてグリセリンペースト（ソニコート）を使用した。また、ISIMは欠陥からの散乱波成分（正確には、探触子位置 \mathbf{y} で計測される変位の \mathbf{e}_2 方向成分）を基に欠陥像を再構成するため、ここではデコボリューションに基づくデータ処理⁹⁾を元に、欠陥エコー（原波形）から散乱L波成分を抽出している。

*3次元波動場に対する ISIM の場合は、3D-FFT を使う。



(a) Electronic scan device (b) Array transducer



Number of total elements :72
Pitch size: 0.8mm
Element size :0.7mm

図3 Electronic scan device and linear array transducer.

3.2 空洞欠陥の2次元形状の再構成（パルスエコー型 ISIM）

図4の上側に示すようなアルミニウムの内部に直径2mmの貫通横穴（SDH）を5つ作成した。使用したリニアアレイ探触子はKGK社製の公称中心周波数が2MHzのものであり、素子幅は0.7mm、ピッチは0.8mm、奥行き長さは18mmである。被検体の上側にリニアアレイ探触子を設置し、超音波の送受信を1素子ずつ順次切り替えることによって、計64素子で計測を行った。計測された欠陥エコーにデータ処理を施して散乱波成分を抽出し、これをISIMにインプットすることによって欠陥像の再構成を行った。再構成に使用した超音波の周波数帯域は0.1MHz~5.0MHzとした。なお、最大周波数の5.0MHzに対応するアルミニウム中の超音波の波長は約1.3mmであり、SDHの直径よりも小さい。図4の下側にパルスエコー型ISIMによる再構成結果を示す。電子スキャン装置で計測された欠陥エコーを使って、SDHの位置および形状を精度良く再構成できることがわかる。

3.3 スリットの2次元形状の再構成（ビームステアリング型 ISIM）

図5に示すようなアルミニウム供試体の底面に高さ5mmの放電加工スリット（EDM-S）を作成し、EDM-Sから水平距離で35mmの位置に探触子の中心が来るように設置した。使用したリニアアレイ探触子はジャパンプローブ製の公称中心周波

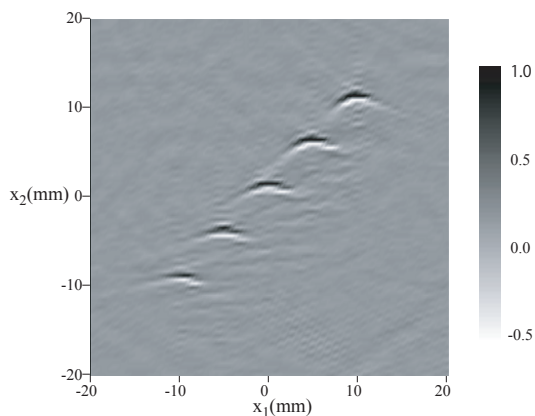
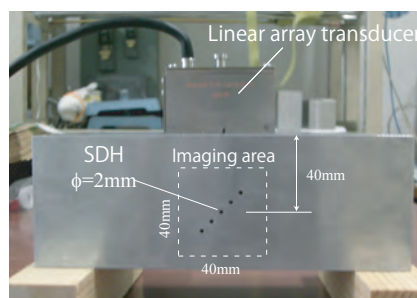


図4 2-D shape reconstruction of five SDHs with the pulse-echo type ISIM.

数が3MHzのものであり、素子幅は0.7mm、ピッチは0.8mm、奥行き長さは9mmである。再構成に使用した超音波の周波数帯域は0.1MHz~5.0MHzとした。ここでは、連続する48個の素子群を選んで右斜め方向に超音波を送信し、EDM-Sからの散乱波はすべての素子（計64素子）でそれぞれ受信する。まず、EDM-S付近にビームが集束するようにディレイを設定し、1回の送信で1枚のEDM-S画像を作成する。1回の送信ではスリット先端部のエコー画像が不鮮明であるので、次に、駆動する素子群をずらして送信方向を変えた場合のEDM-S画像を合成する。異なる素子群から計17回の送信を行い、すべての画像を重ね合わせて欠陥像を再構成したものが、図5である。EDM-Sの端部とコーナー部が再構成されており、この距離を計測するとほぼ5mmとなっており、EDM-Sの高さを再現できていることがわかる。

3.4 空洞欠陥の3次元形状の再構成（パルスエコー型 ISIM）

前節では2次元波動場に対するISIMについて再構成式を示したが、これは3次元波動場にも容易に拡張が可能¹⁰⁾である。定式化は省略するが、

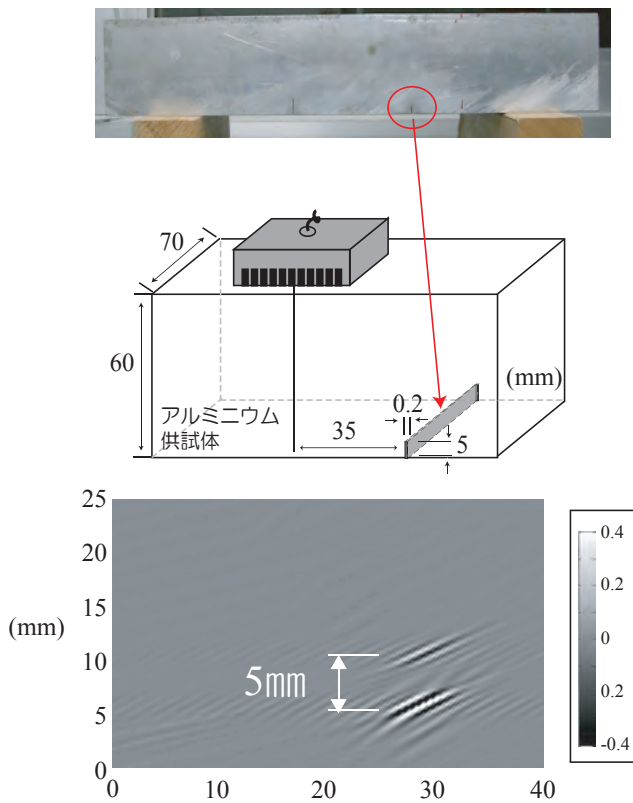


図5 2-D shape reconstruction of an EDM-S with the beam-steering type ISIM.

ここでは3次元 ISIM を用いて欠陥像を3次元的に再構成した結果を示す。図6に示すようなアルミニウム供試体に直径2mmのSDHを2つ作成した。これらは貫通しておらず、アルミニウム内部で穴は止まっている。マトリクスアレイ探触子を所有していないので、ここではアルミニウム供試体を水中に沈めて、集束型水浸探触子(中心周波数20MHz)で機械的にスキャンし、供試体の上部から超音波の送受信を行うことで代替した。送受信点は、ピッチ0.08mmで $128 \times 128 = 16384$ 点で行った。図6では、同一の再構成結果について角度を変えて表示している。SDHがアルミニウム内部のどの程度の深さまで掘られているかが(送受信が行われた範囲内であるが)、明瞭に識別できる。ここで、SDH1の像の一部が欠けているが、これは表面から浅い位置にあるSDH2によって波動が散乱してしまい、SDH1に入射波が到達していないためである。なお、この再構成にかかる時間は約2分であった。計算アーキテクチャの見直しによって、リアルタイム画像化も可能であると思われる。

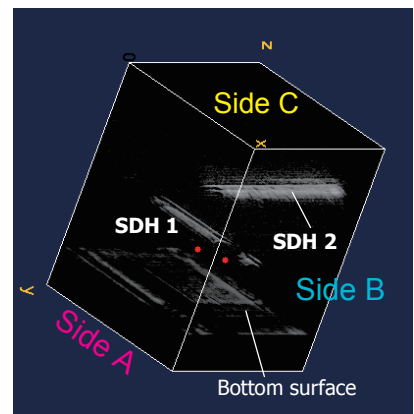
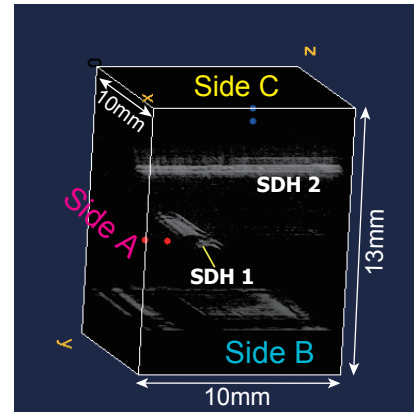
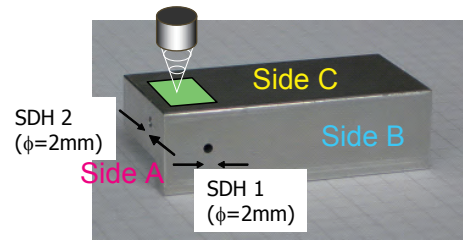


図6 3-D shape reconstruction of two SDHs with the pulse-echo type ISIM.

4. まとめ

本研究では、超音波電子スキャン装置で計測された欠陥エコーを用いて、逆散乱イメージング法(ISIM)によるアルミニウム被検体中の人工欠陥の再構成の検証を行った。パルスエコー型 ISIM はアレイ探触子の真下にある欠陥の境界が、ビームステアリング型 ISIM はアレイ探触子から離れた位置にある欠陥の境界部が再構成できることを示した。本手法は、再構成すべき目的関数(ここでは欠陥の境界上で定義された特異関数 γ)を明確に設定することから一般的な画像化手法であるB,Cスキャンとは原理が異なり、また、弾性波動論に基づいて定式化されているために欠陥形状の細部まで比較的精度良く推定できる。また、周波数領

域で欠陥像を合成するため、特に3次元像を再構成する場合に、わずかな時間で欠陥像が出力できる。今後は、本手法を実際の非破壊検査装置に組み込めるように、インターフェースを構築していく予定である。

参考文献

- [1] 横野泰和: フェイズドアレイ UT の適用事例及び標準化の世界的動向, 非破壊検査, Vol.56(10), pp.510–515, 2007.
- [2] Mostafa, F. and Kak, A.C.: Ultrasonic B-scan imaging: theory of image formation and technique for restoration, *Ultrasonic Imaging*, Vol.2, pp.1–47, 1980.
- [3] 中畑和之, 廣瀬壯一: 超音波リニアアレイ探触子のための逆散乱イメージング法の開発, 応用力学論文集, Vol.9, pp.107–114, 2006.
- [4] 中畑和之, 上甲智史, 廣瀬壯一: 逆散乱解析法の超音波フェーズドアレイ探傷への応用, 応用力学論文集, Vol.10, pp.61–68, 2007.
- [5] Mayer, M., Marklein, R., Langenberg, K.J. and Kreutter, T.: Three-dimensional imaging system based on Fourier transform synthetic aperture focusing technique, *Ultrasonics*, Vol.28, pp.241–255, 1990.
- [6] Nagai, K.: A new synthetic-aperture focusing method for ultrasonic B-scan imaging by Fourier transform, *IEEE Transaction Sonics and Ultrasonics.*, Vol.SU-32, No.4, pp531–536, 1985.
- [7] 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.
- [8] Morse, P.M. and Feshbach, H.: *Method of Theoretical Physics*, McGraw-Hill, New York, 1953.
- [9] 中畑和之, 松岡ちひろ, 廣瀬壯一: 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.
- [10] Nakahata, K., Saito, T. and Hirose, S.: 3-D flaw imaging by inverse scattering analysis using ultrasonic array transducer, Review of Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol.26, pp.717–724, 2007.