

円柱側面からの計測波形による三次元欠陥像の再構成

Three-Dimensional Flaw Reconstruction from Waveforms Measured on the Side of a Cylinder

山田真幸*・村上賢治**・中畑和之***・北原道弘****

Masaki YAMADA, Kenji MURAKAMI, Kazuyuki NAKAHATA and Michihiro KITAHARA

*正会員 工博 東北大学大学院助手 工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 06)

**工修 西松建設株式会社 (〒073-1322 北海道樺戸郡新十津川町吉野 5646)

***正会員 工博 東京工業大学大学院 情報理工学研究科情報環境学専攻 (〒152-8552 目黒区大岡山 2-12-1)

****正会員 工博 東北大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 06)

A modified three-dimensional inverse scattering method is applied to reconstruct the shape of three-dimensional flaw in a cylindrical specimen. In the modified method, a measurement plane is restricted to the plane perpendicular to the axis of the cylindrical specimen. Thus the cross-sectional image of the flaw can be obtained in this modified method. Moving the measurement plane along the axis of the cylindrical specimen, the cross-sectional image is obtained for each measurement plane. The three-dimensional flaw image is reconstructed by piling up the obtained cross-sectional images. Cylindrical specimens with a cylindrical cavity model and with a hemispheroidal cavity model are prepared. The performance of the modified method to reconstruct the three-dimensional flaw is confirmed by using the experimentally measured waveforms.

Key Words : shape reconstruction, cross-sectional imaging, three-dimensional flaw, pulse-echo method

1. はじめに

高度経済成長期から約 30 年が経過した今日, 当時建設された土木構造物が全国に存在しているが, 今後これら多くの土木構造物が一斉に寿命を迎える時期となる。これらの多くの土木構造物について安全な機能を供用しつつ, 必要な補修・改修を行い既設構造物の延命化を図ることは土木技術者の課題であり, 資源の有効活用という観点からも重要である。このような状況下, 土木構造物の維持管理においては対象となる構造物の健全度あるいは耐久性を評価できる技術の確立が急務となる。このとき, 構造物内に存在する損傷の形態を如何に精度良く推定することができるかがまず重要となる。

土木構造物を対象として超音波非破壊検査の高精度化を意図した研究として, 回折トモグラフィ¹⁾や開口合成法^{2,3)}を利用した損傷形態の定量化の試みが挙げられる。散乱波が有する周波数域の情報から散乱体形状を再構成する手法として, フーリエ変換 SAFT⁴⁾と呼ばれる周波数域(波速を介して波数域)開口合成^{5,6)}による散乱体形状のイメージングも試みられている。

ここでは円柱状の構造物内部に存在する三次元欠陥の形状を再構成することを意図して, 円柱側面からの散乱波が計測可能である場合を想定し, 円柱側面上の円周に沿って計測された後方散乱波形データから三次元欠陥形状を再構成する手法について検討する。一般的

三次元逆散乱解析に基づいた散乱体形状の再構成法は既に報告⁷⁾されている。また, 三次元欠陥の一断面に沿って超音波の送受信が可能な場合, 欠陥断面の再構成能に関する検討は数値解析的に行われている⁸⁾。そこで本論文では, まず, 三次元欠陥を囲む全方向からの後方散乱波形が得られる場合には三次元欠陥像がほぼ正確に再構成出来ることを数値解析的に確認する。次に, 文献⁸⁾に基づいて欠陥断面を再構成し, この欠陥断面を円柱軸に沿って積み重ねることにより, 三次元欠陥像を再構成することを試みる。内部に模擬欠陥を有する円柱状供試体側面からの計測実験を行い, 受信後方散乱波形を用いた欠陥断面の再構成像を示す。この断面像を基に三次元欠陥を再構成することにより, 計測的にも手法の有効性について検討した結果を報告する。

2. 円柱側面からのデータによる三次元欠陥の再構成

ここでは三次元線形化逆散乱解析法⁷⁾について要約した後, 欠陥断面像を積み重ねることにより三次元欠陥を再構成する手法について考える。

2.1 三次元線形化逆散乱解析

欠陥を有する材料を図-1に示すような均質等方な三次元弾性体 D と仮定する。この弾性体中の原点 O 近傍に検出すべき欠陥 D^c が存在し, 欠陥は空洞であるとする。計測点 y は遠方に位置するとし, 計測点 y か

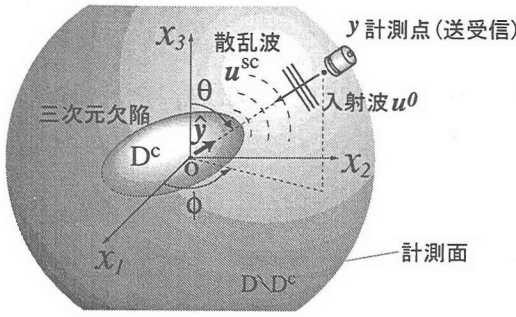


図-1 三次元欠陥と散乱波動場

ら原点 O に向けて平面縦波 u^0 を送信する。ここでは同一の探触子で超音波の送受信を行うパルスエコー法を採用し、欠陥 D^c による後方散乱波 u^{sc} を同一の計測点 y にて受信することとする。

(1) ボルン逆解析

散乱波の領域型の積分表現にボルン近似を用いて線形化したボルン逆解析⁷⁾によれば、欠陥の内部で値を有する特性関数 $\Gamma(x)$ は遠方の計測点 y における縦波散乱振幅 $A_m^L(k_L, \hat{y})\hat{y}_m$ を用いて次式のように表される。

$$\Gamma(x) = \frac{1}{(2\pi)^3} \oint \int_0^\infty \frac{A_m^L(k_L, \hat{y})\hat{y}_m}{2u^0 k_L^2} \times e^{2ik_L \hat{y} \cdot x} 8k_L^2 dk_L d\Omega(\hat{y}) \quad (1)$$

ここで $\hat{y}$ は探触子の方向を向く単位ベクトルである。また k_L は縦波波数、 $d\Omega(\hat{y})$ は $\hat{y}$ 方向の微小立体角である。

(2) キルヒホフ逆解析

境界型の積分表現にキルヒホフ近似を用いて線形化したキルヒホフ逆解析⁷⁾によれば、欠陥の境界上で値を有する特異関数 $\gamma(x)$ は縦波散乱振幅 $A_m^L(k_L, \hat{y})\hat{y}_m$ を用いて次のように表される。

$$\gamma(x) = \frac{1}{(2\pi)^3} \oint \int_0^\infty \frac{-iA_m^L(k_L, \hat{y})\hat{y}_m}{2u^0 k_L} \times e^{2ik_L \hat{y} \cdot x} 8k_L^2 dk_L d\Omega(\hat{y}) \quad (2)$$

(3) 特性関数 Γ および特異関数 γ による形状再構成

欠陥を取り囲む全ての方向の計測点 y で縦波散乱振幅 $A_m^L(k_L, \hat{y})\hat{y}_m$ が得られれば、式(1)および式(2)を用いて $\Gamma(x)$ および $\gamma(x)$ が得られ、 $\Gamma(x)$ および $\gamma(x)$ を空間上にプロットすることにより三次元欠陥形状を再構成することができる。特性関数 $\Gamma(x)$ および特異関数 $\gamma(x)$ のイメージを図-2に示す。

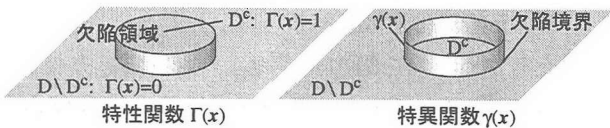


図-2 特性関数 Γ と特異関数 γ のイメージ

2.2 円柱状構造物側面からの超音波の送受信

実際の計測を考えると構造物内の一点を取り囲む全方向から三次元的に散乱振幅を得ることは困難なことが多い。しかし図-3の左に示すような橋脚等の円柱状の構造物では円柱の中心軸に垂直な断面内において、側面から一点を取り囲む全方向で計測が可能な場合が考えられる。また実際の計測で超音波を送信する探触子

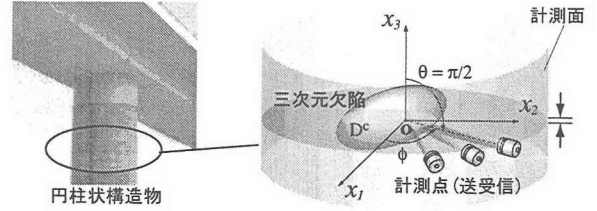


図-3 円柱状構造物と超音波ビームによる一断面情報の取得

から放射される超音波は、有限の幅を有する超音波ビームである。そのため図-3の右に示すように超音波ビームの入射により生じる後方散乱波にもビーム幅に関連した散乱体の情報が含まれていると考えられる。

以下では式(1)および式(2)を円柱状構造物の側面からのデータを利用した形状再構成に適した形に変形する。

2.3 側面から得られる散乱波形データによる再構成式

いま計測面が原点 O を含む x_1 - x_2 断面内に限定されている(図-4左図参照)場合を考える。

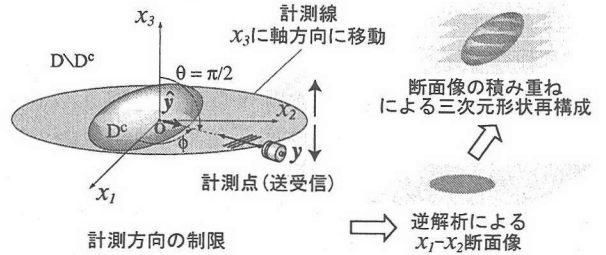


図-4 計測方向の制限と三次元欠陥形状再構成

このとき計測される散乱振幅は $A_m^L(k_L, \hat{y}(\theta, \phi))$ において $\theta = \pi/2$ となることから、ボルン逆解析式(1)は以下ようになる。

$$\bar{\Gamma}(x) = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{A_m^L(k_L, \pi/2, \phi)\hat{y}_m}{2u^0 k_L^2} \times e^{2ik_L(x_1 \cos \phi + x_2 \sin \phi)} 8k_L^2 dk_L d\phi \quad (3)$$

上式の特性関数は計測面が $\theta = \pi/2$ と制限された散乱振幅を用いていることから $\bar{\Gamma}(x)$ と表現した。同様にキルヒホフ逆解析式(2)も以下ようになる。

$$\bar{\gamma}(x) = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{-iA_m^L(k_L, \pi/2, \phi)\hat{y}_m}{2u^0 k_L} \times e^{2ik_L(x_1 \cos \phi + x_2 \sin \phi)} 8k_L^2 dk_L d\phi \quad (4)$$

式 (3) および式 (4) から得られる $\bar{\Gamma}(x)$ および $\bar{\gamma}(x)$ は図-4の右図に示すように $\theta = \pi/2$ の面内、すなわち x_1 - x_2 面内における欠陥断面を再構成する。計測線の中心点を計測対象とする円柱状構造物の x_3 軸方向に移動することにより複数の断面像が得られる。これらの x_1 - x_2 断面像を積み重ねることにより三次元欠陥形状の再構成を後の 3.1(2) と 3.2 で数値解析的に、さらに 4. で計測的に試みる。

3. 数値解析データによる欠陥形状の再構成

ここでは境界要素法を利用した数値解析により欠陥モデルからの縦波散乱振幅を計算し、式 (3) および式 (4) による欠陥形状の再構成能を検証する。

解析において、入射縦波 u^0 の振幅に分布を持たせることにより、探触子から放射される超音波ビームを以下の式のように近似的に表現する。

$$u^0(x) = -F(r)\hat{y}e^{-ik_L\hat{y}\cdot x} \quad (5)$$

ここで $F(r)$ は入射波の進行方向 $-\hat{y}$ に直交する断面内における振幅の分布であり、 r はビーム中心からの距離を表す。本論文では $F(r)$ を次式に示すガウス分布⁹⁾ とした。

$$F(r) = e^{-\frac{r^2}{(d/2)^2}} \quad (6)$$

この $F(r)$ を図-5に示す。

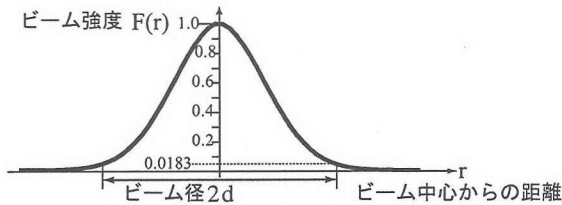


図-5 数値解析で用いる超音波ビームの振幅強度分布

式 (6) において $r=d$ とすると振幅は $F(d) = e^{-4} \cong 0.0183$ に減少する。ここでは $2d$ を入射ビーム径と呼ぶことにする。

3.1 円柱状欠陥モデルの形状再構成

欠陥モデルを図-6に示す。直径 $0.8a$ 高さ a の円柱および直径 $2a$ 高さ a の円柱二つが組み合わされた空洞である。境界は 228 個の 8 節点 2 次要素でモデル化した。母材のポアソン比は 0.25 とし、無次元化縦波波数 $ak_L = 0.1 \sim 7.0$ の範囲で縦波散乱振幅を計算した。

(1) 欠陥を取り囲む全ての方向の散乱振幅データによる形状再構成

まず、欠陥を取り囲む全ての方向で ($0 \leq \theta \leq \pi$, $0 \leq \phi \leq 2\pi$) 計算された縦波散乱振幅を用いた場合の形状再構成結果を確認する。ここではビーム径を $2d = 4a$ として散乱振幅を計算し、式 (1) および式 (2) を用いて $\Gamma(x)$ および $\gamma(x)$ を求めた。結果を図-7に示す。図

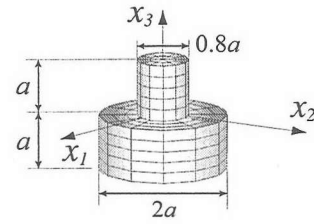


図-6 円柱状欠陥モデルと境界要素

-7左が式 (1) によるボルン逆解析の結果、右が式 (2) によるキルヒホフ逆解析の結果であり、 $\Gamma(x)$ と $\gamma(x)$ は最大値で正規化して 0.5 以上の値をプロットしたものである。

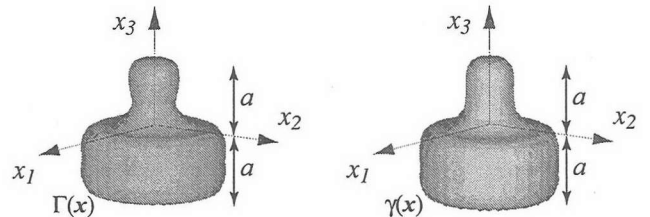


図-7 全方向の散乱振幅による欠陥形状再構成結果

断面の状況を調べるために、 $\Gamma(x)$ および $\gamma(x)$ の原点 O を通る x_1 - x_3 面の分布を示したものが図-8である。

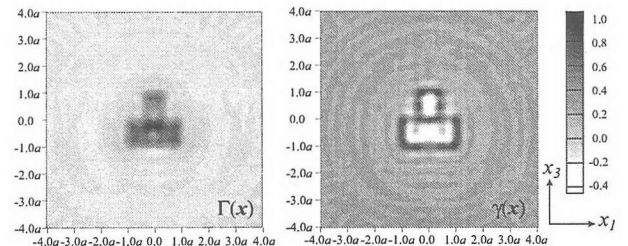


図-8 全方向の散乱振幅を用いた再構成断面

$\Gamma(x)$ は欠陥の内部を、 $\gamma(x)$ は欠陥境界部を再構成しており、また円柱の角部も含めて三次元の欠陥形状をほぼ正確に再構成していることがわかる。

(2) 計測方向が制限された数値解析データによる形状再構成

次に式 (3) および式 (4) を用いて x_3 軸を取り囲む計測線からのデータによる形状再構成を試みる。ここでは文献⁸⁾を参考に、入射ビーム径を欠陥モデルの高さ $2a$ より小さい $2d = 0.8a$ とした。計測線の中心点を図-6に示した座標で $-1.2a \leq x_3 \leq 1.2a$ の範囲において $0.1a$ 間隔で選び、25 断面について解析を実行した。

得られた縦波散乱振幅を式 (3) によるボルン逆解析に用いた結果を図-9に、式 (4) によるキルヒホフ逆解析に用いた結果を図-10に示す。図-9,10(a) に $x_3 = 0.5a$, 図-9,10(b) に $x_3 = 0$, 図-9,10(c) に $x_3 = -0.5a$ の断面像を示した。各断面の再構成は $\phi = 10^\circ$ 間隔で 36 個の縦波散乱振幅を用いた。図中の $\bar{\Gamma}(x), \bar{\gamma}(x)$ は 25 断面中の最大値で除して正規化しているが、以降全ての $\bar{\Gamma}(x), \bar{\gamma}(x)$ で同様に正規化して表す。

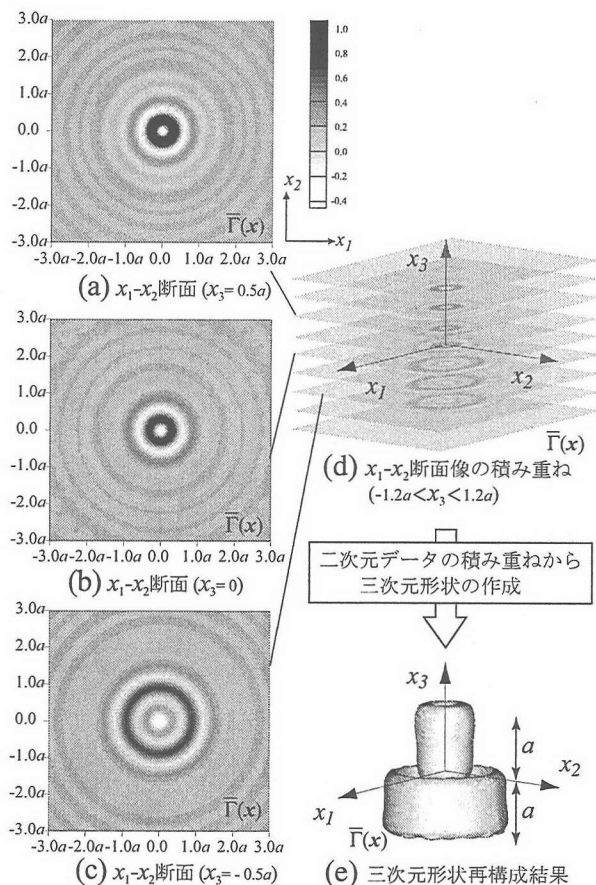


図-9 数値解析データによる円柱状欠陥再構成 (ボルン逆解析法)

断面像を表す図-9,10(a),(b),(c) に注目するとボルン逆解析, キルヒホフ逆解析ともに欠陥モデルの境界部が再構成されていることがわかる。図-9,10(a) では直径 $0.8a$ の境界が, 図-9,10(c) では直径 $2a$ の境界が再構成されている。図-9,10(b) では大小両方の境界が再構成されていることがわかる。

三次元形状再構成は図-9,10(d) に示すように得られた x_1 - x_2 断面像を x_3 軸方向に積み重ねて行う。ここでは AVS/Express Viz5.1 を使用し, 離散データより三次元形状を作成した。ここで用いられているアルゴリズムはマーチンキューブ法である。得られた三次元データのうち 0.5 以上の $\bar{\Gamma}(x)$ および $\bar{\gamma}(x)$ を図-9,10(e) に示した。欠陥モデルの外形がほぼ正しく再構成されていることがわかる。

3.2 球状欠陥モデルの形状再構成

ここでは, 超音波ビームに対して傾いた面に対する形状再構成能を検証するために, 図-11 に示す直径 $2a$ の球形空洞を考える。数値解析上, 球面は 132 個の 8 節点 2 次要素で近似した。ビーム径等, 他の解析条件は前述の 3.1 と同様である。

式 (3) によるボルン逆解析の結果を図-12 に, 式 (4) によるキルヒホフ逆解析の結果を図-13 に示す。図-12,13(a) に $x_3=a$, 図-12,13(b) に $x_3=0.8a$, 図-12,13(c) に $x_3=0$ の各断面像を示した。ここでも図

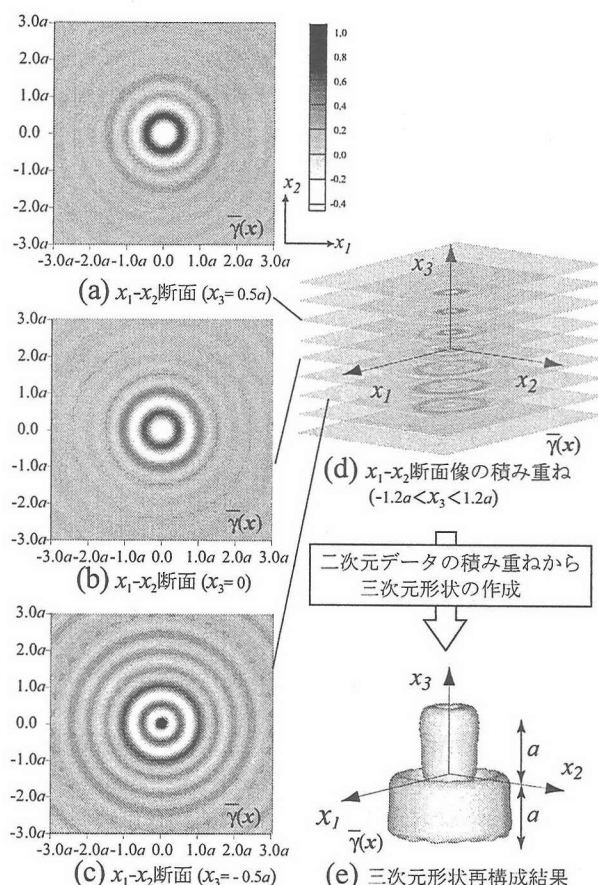


図-10 数値解析データによる円柱状欠陥再構成 (キルヒホフ逆解析法)

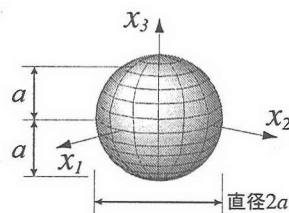


図-11 球状欠陥モデルと境界要素

-12,13(d) に示すように得られた各断面像を x_3 軸方向に積み重ねた後, 三次元的にデータ補間を行い, 欠陥形状を再構成した結果を図-12,13(e) に示した。ここでも欠陥モデルの形状はほぼ再構成されているといえる。

図-12(e) と図-13(e) を比較するとボルン逆解析では実際の欠陥形状より x_3 軸方向に長く形状が再構成されており, キルヒホフ逆解析では実際の欠陥形状より x_3 軸方向に短く形状が再構成されている。球の端に対応する $x_3=a$ における断面図に注目するとボルン逆解析による図-12(a) では $\bar{\Gamma}(x)$ が値を持っており, これらは入射波のビーム径の影響であると考えられる。

キルヒホフ逆解析による図-13(a) では $\bar{\gamma}(x)$ の値は非常に小さく計算誤差の範囲である。このことは, キルヒホフ近似は高周波数域における境界の反射に有効な近似であるが, 球状欠陥の上端及び下端付近の入射

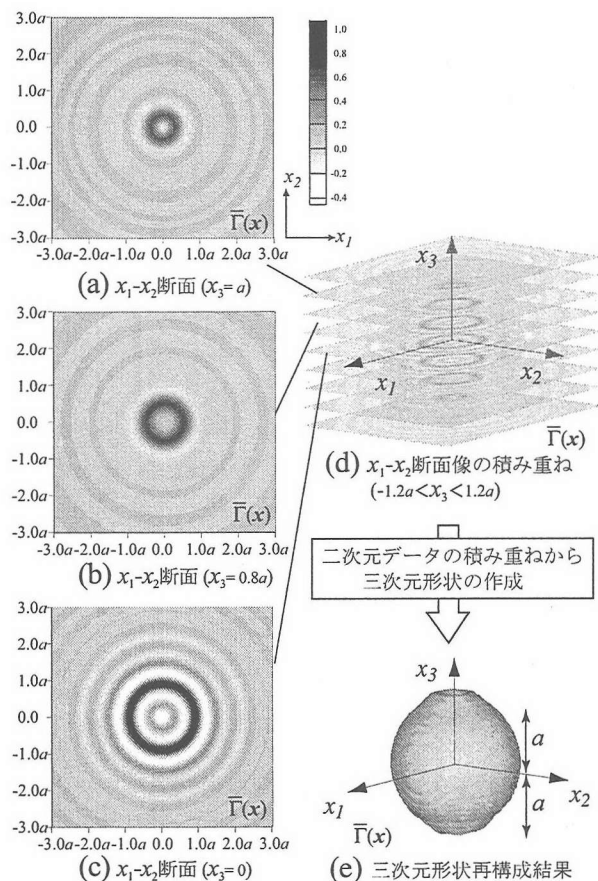


図-12 数値解析データによる円柱状欠陥再構成
(ボルン逆解析法)

波の進行方向に対して大きく傾いた面からの高周波数域の後方散乱振幅の値そのものが小さいためと考えられる。

4. 実験計測による三次元欠陥形状の再構成

ここでは、水浸法による計測実験で得られた散乱波形を用いて式 (3) と (4) に基づいた断面形状の再構成を行い、**3.1(2)** および **3.2** と同様に断面像から三次元欠陥像の再構成を試みる。

4.1 円柱状供試体および計測装置

ここでは図-14に示す欠陥モデルを有するアルミニウム製供試体2体を用いた。外形は直径80mmの円柱である。供試体1は欠陥モデルとして底面より x_3 軸方向に直径15mmから6mmに変化する穴を供試体底面より機械加工にて製作し底面をテープで塞ぎ空洞とした。供試体2は同様に直径15mmの穴の先端を高さ15mmの回転楕円体状としたものを欠陥モデルとした。

計測はパルスエコー法により行い、PANAMETRICS社製の非収束型水浸探触子を用いた。探触子の直径は25.4mm、公称中心周波数は $f_c = 1\text{MHz}$ である。周波数が1MHzのときアルミニウム中の縦波波長は6.42mmであることから、図-14中の x_1 - x_2 断面で欠陥モデル

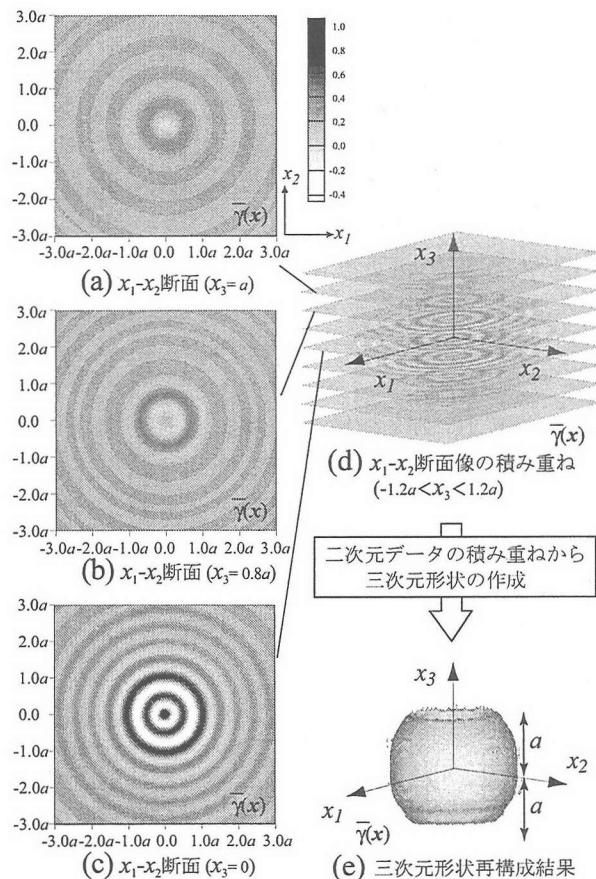


図-13 数値解析データによる円柱状欠陥再構成
(キルヒホフ逆解析法)

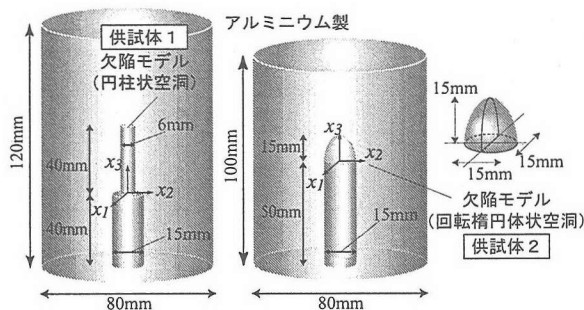


図-14 供試体1 (左:円柱状空洞モデル) および供試体2 (右:回転楕円体状空洞モデル)

の寸法が縦波波長と同程度となり、数値解析の条件とほぼ等しい。水中のアルミニウム平面より得た探触子の波形特性を図-15に示す。実際の中心周波数は1MHzより若干低い。

波形計測は図-16左に示す PC 制御のターンテーブル

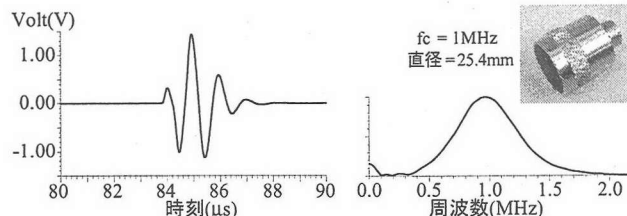


図-15 探触子波形特性 (左:時間域, 右:周波数域)

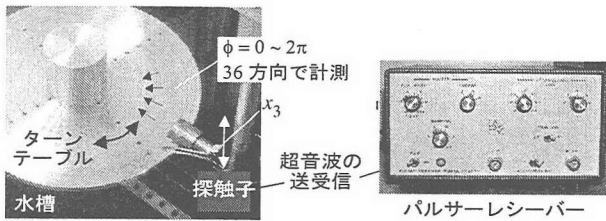


図-16 計測装置

ルつき水槽に供試体を取り付け、10° 間隔で供試体を回転させて図-16右に示す日本マテック社製パルサー・レシーバーで行った。 x_3 軸方向については、供試体 1 では 5mm 間隔で計測線の中心点を移動し、図-14中に示す $-30 \leq x_3 \leq 50\text{mm}$ の範囲で計測を行った。供試体 2 では 3mm 間隔で図-14中に示す $-24 \leq x_3 \leq 24\text{mm}$ の範囲で計測を行った。

供試体 1 について計測された波形 $O^{sc}(t)$ の例を図-17,18,19に示す。

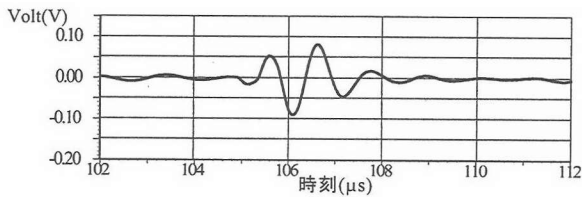


図-17 計測波形例 ($x_3=25\text{mm}$)

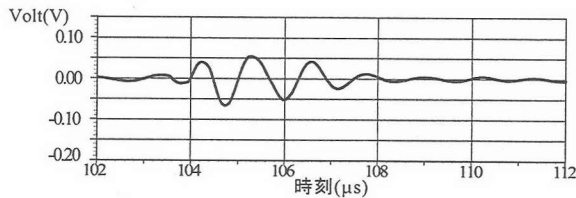


図-18 計測波形例 ($x_3=0\text{mm}$)

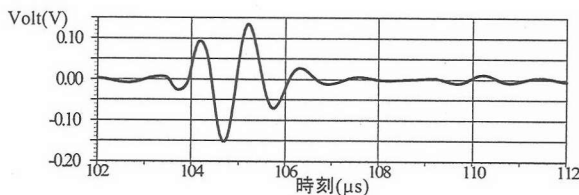


図-19 計測波形例 ($x_3=-25\text{mm}$)

図-17は $x_3=25\text{mm}$ 断面における波形、図-18は $x_3=0\text{mm}$ 断面における波形、図-19は $x_3=-25\text{mm}$ 断面における波形である。図-18の波形は図-17および図-19に比較して長い波形となっており、欠陥モデルの直径 15mm および 6mm の両方の円柱状空洞の境界の影響が混在していると考えられる。

4.2 計測波形のデータ処理

本論文で扱う逆散乱解析では固体中の縦波散乱振幅 $A_m^L \hat{y}_m$ を用いることが必要である。しかし計測実験により得られた計測波形には、欠陥の情報を有する固体

中の散乱波以外に探触子、水、計測装置等の影響が含まれていることから、参照波形計測用供試体より得られる参照波形を用いたデータ処理¹⁰⁾を行い、欠陥の情報を有する固体中の散乱波を取り出して用いる。

参照波形計測用供試体と参照波形 $O^{ref}(t)$ の一例を図-20に示す。

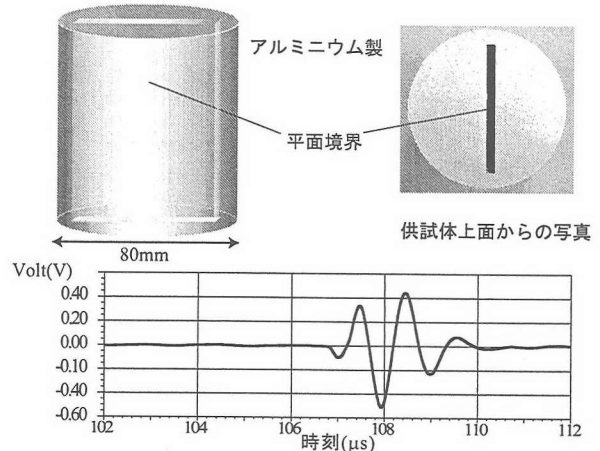


図-20 参照波形計測用供試体と参照波形例

図-20上に示した参照波形計測用供試体は中央線上に平面境界を有する以外は欠陥を有する供試体と同形状、同材料で製作されている。平面境界を作成した際に生じた上下の穴はテープで塞ぎ空洞として用いる。

フーリエ変換にて周波数域に変換した計測波形 $O^{sc}(f)$ および参照波形 $O^{ref}(f)$ を用いて以下の式：

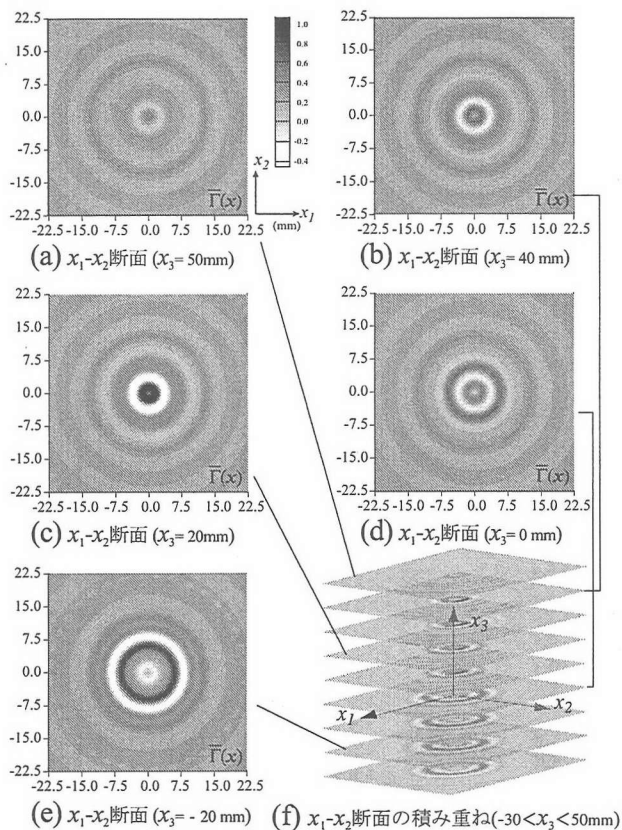
$$E^{sc}(f) = E^{ref} \frac{O^{sc}(f)}{O^{ref}(f)} \quad (7)$$

を用いたデータ処理により得られた $E^{sc}(f)$ を縦波散乱振幅 $A_m^L \hat{y}_m$ として使用する。ここで E^{ref} はアルミニウムと空気が接する平面境界に平面波が入射した場合の反射係数に相当し、周波数に依存せず解析的に決定できる定数である。

4.3 円柱状欠陥モデルによる計測波形を用いた形状再構成

円柱状欠陥モデルを有する供試体 1 より得られた計測波形と参照波形に式 (7) を適用し、式 (3) によるボルン逆解析を行い $\bar{\Gamma}(x)$ を求め形状再構成を行った。結果を図-21に示す。同様に式 (4) によるキルヒホフ逆解析を行った結果を図-22に示す。

図-21, 図-22(a),(b),(c),(d),(e) は各々 $x_3 = 50, 40, 20, 0, -20\text{mm}$ の断面図である。図-21, 図-22(f) に示すように得られた断面像を積み重ねた後に三次元データに補間し、欠陥形状の再構成を行った結果を図-21, 図-22(g) に示した。ここでは 0.7 以上の $\bar{\Gamma}(x), \bar{\gamma}(x)$ をプロットした。ボルン逆解析、キルヒホフ逆解析共に欠陥モデルの形状がほぼ正しく再構成されていることがわかる。



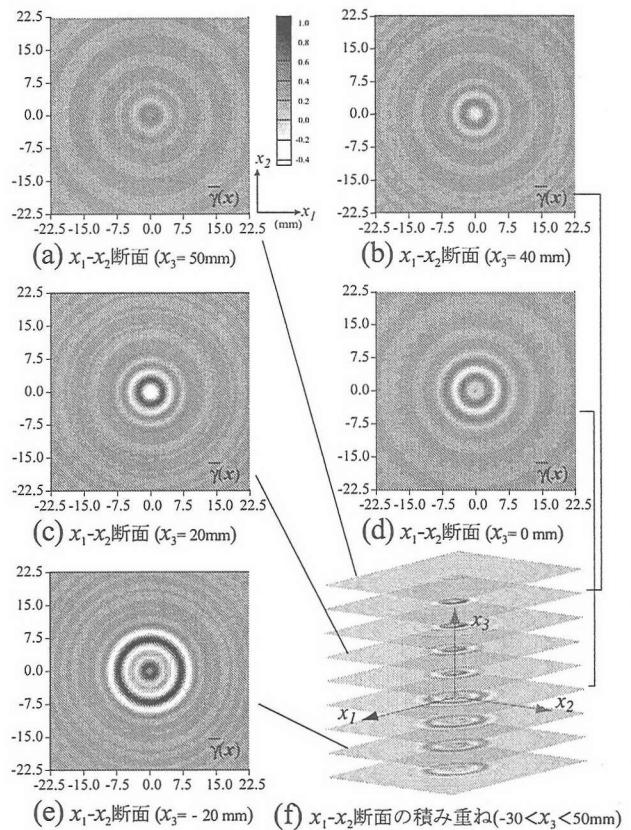
(g) 実験計測波形による三次元形状再構成結果

図-21 計測波形による形状再構成 (ボルン逆解析法)

4.4 回転楕円体状欠陥モデルによる計測波形を用いた形状再構成

回転楕円体状欠陥モデルを有する供試体2を用いて得られた計測波形より得られた結果を図-23および図-24に示す。図-23、図-24(a),(b),(c),(d),(e)は各々 $x_3 = 21, 15, 9, 3, -24$ mmの断面図である。先の4.3と同様に欠陥形状の再構成を行った結果を図-23、図-24(g)に示す。ここでは0.6以上の $\bar{\Gamma}(x), \bar{\gamma}(x)$ をプロットした。ボルン逆解析、キルヒホフ逆解析共に欠陥モデルの大まかな形状が再構成されている。ただし、欠陥モデル先端の部分の再構成結果に注目すると、両逆解析法で像の直径は小さくなっているが先端部の丸みまでは再構成できていないことがわかる。

5. 結論



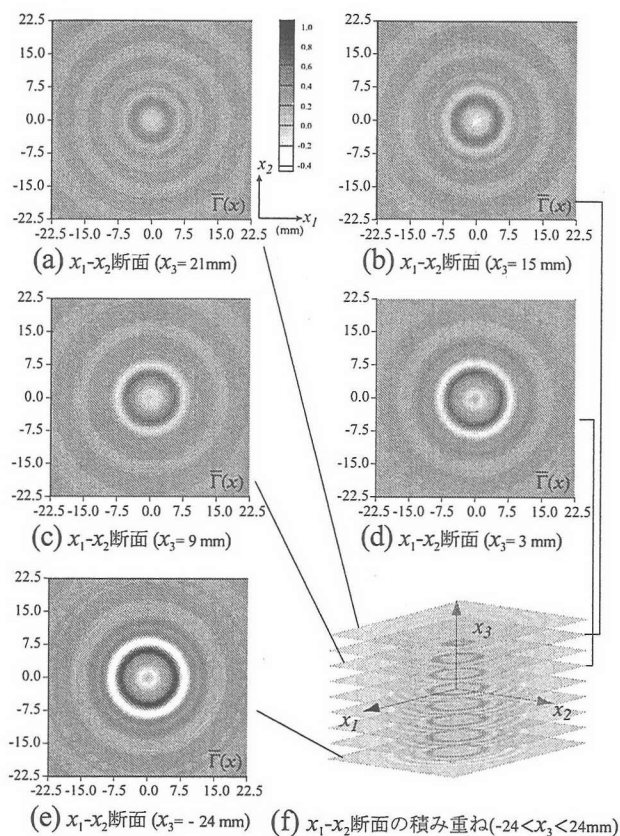
(g) 実験計測波形による三次元形状再構成結果

図-22 計測波形による形状再構成 (キルヒホフ逆解析法)

実験計測による円柱側面からの計測波形を用いて、側面からの計測に適した形に変形したボルン逆解析、キルヒホフ逆解析法により断面像を再構成し、これらを積み重ねて三次元データに補間することで三次元欠陥形状の再構成が可能なが確かめられた。

参考文献

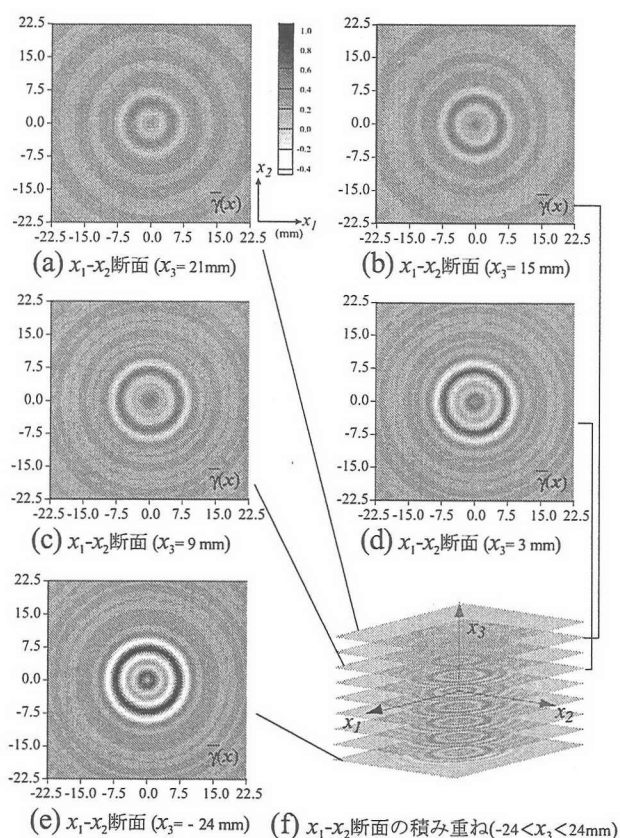
- 1) 高橋政則, 三木千壽, 劉銘崇, 岩立次郎: 超音波回折トモグラフィの鋼部材の超音波探傷試験への適用の試み, 土木学会論文集, No.495/I-28, pp.93-99, 1994.
- 2) 岩立次郎, 田中雅人, 館石和雄, 三木千壽: 回転探触子を用いた開口合成システムによる超音波探傷の分解能向上の試み, 土木学会論文集, No.507/I-30, pp.121-127, 1995.
- 3) 白旗弘実, 三木千壽: 突合溶接部表面近傍に位置する面状欠陥検出のための超音波探傷斜角法, 土木学会論文集,



(g) 実験計測波形による三次元形状再構成結果

図-23 計測波形による形状再構成 (ボルン逆解析法)

- No.619/I-47, pp.279-291, 1999.
- 4) Mayer, K., 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.
 - 5) Busse, L. J.: Three-dimensional imaging using a frequency-domain synthetic aperture focusing technique, *IEEE Trans. UFFC*, Vol.39, pp.174-179, 1992.
 - 6) Langenberg, K. J., Bärmann, R., Marklein, R., Irmer, S., Müller, H., Brandfaß, M. and Potzkai, M.: Electromagnetic and elastic wave scattering and inverse scattering applied to concrete, *NDT & E Int.*, Vol.30, pp.205-210, 1997.
 - 7) Kitahara, M. and Hirose, S.: Elastodynamic inversion of 3D cavity from backscattering data, *Inverse*



(g) 実験計測波形による三次元形状再構成結果

図-24 計測波形による形状再構成 (キルヒホフ逆解析法)

- Problems in Engineering Mechanics*, Elsevier Science, Oxford, pp.163-170, 1998.
- 8) 村上賢治, 中畑和之, 山田真幸, 北原道弘: 三次元逆散乱解析に基づいた欠陥断面の再構成, 境界要素法論文集, Vol.19, pp.43-48, 2002.
 - 9) Karim, M.R. and Kundu, T.: Scattering of acoustic beams by cracked composites, *J. Eng. Mech.*, Vol.116, pp.1812-1827, 1990.
 - 10) 中畑和之, 北原道弘: 計測波形による欠陥形状の再生と使用周波数帯域に関する考察, 応用力学論文集, Vol.3, pp.91-98, 2000.

(2003年4月18日受付)