

I - A233

超音波による欠陥形状の再構成

東海大学 大学院 学生員 横井 浩司
 東北大学 工学部 正 員 北原 道弘
 岡山大学 環境理工学部 正 員 廣瀬 壮一

1. はじめに

超音波を用いて、構造物内部に存在する欠陥形状の再構成を行うことを目的とする。手法の要点は、欠陥による散乱波の積分表現に2種類の近似を導入し、この積分表現を散乱波の形状を表す特性関数のフーリエ変換像と相似な形に変換することにより、散乱波の計測から散乱体の形状を再構成することにある。ここではモデル実験を行って、計測散乱波形から円形空洞と楕円形空洞の形状の再構成を行い、手法の妥当性を検証する。

2. 弾性散乱場の積分表現

領域 D 内に欠陥 D^c が存在する場合を考えると、領域 D 内の点 y における散乱波 $u_m^{sc}(=u_m-u_m^0)$ は次のように積分形で表現できる。

$$u_m^{sc}(y) = \int_D G_{im}(x, y) q_i(x) dV \quad (1)$$

ここで、 $G_{im}(x, y)$ は無限弾性体内のグリーン関数である。 $q_i(x)$ は等価散乱源で、欠陥形状に関する情報を含んでいる。この等価散乱源は、領域型と境界型のどちらでも定式化が可能であり、それぞれの具体的な形は次のようになる。

$$q_i(x) = \Gamma(x) \{ \delta \rho \omega^2 u_i(x) - \delta C_{ijkl} u_{k,l}(x) \partial / \partial x_j \} \quad (2)$$

$$q_i(x) = -\gamma(x) C_{ijkl} \{ n_j(x) u_{k,l}(x) - n_l(x) u_{k,j}(x) \} \partial / \partial x_j \quad (3)$$

Γ は散乱体の内部でのみ値を有する特性関数、 γ は散乱体の境界 S 上でのみ値を有する特異関数である [1]。

3. 散乱場の遠方表現

波動の観測点 y が遠方に位置するとき、式 (1) の表現は縦波成分と横波成分に分離することができる。波動計測上、縦波を計測することにして、式 (1) の遠方表現のうち縦波成分は次のようになる。

$$u_m^{sc:far}(y) = \sqrt{\frac{2}{\pi k_L |y|}} e^{i(k_L |y| - \pi/4)} A_m(\hat{y}) \quad (4)$$

ここで A_m は次のような縦波の散乱振幅である。

$$A_m(\hat{y}) = \frac{i}{4\mu} \kappa^2 \hat{y}_i \hat{y}_m \int_D q_i(x) e^{-ik_L \hat{y} \cdot x} dV \quad (5)$$

ここで、 $\kappa = k_L/k_T$ とした。

4. 欠陥像の再構成手法

欠陥への入射波を次のような平面縦波と仮定する。

$$u^0(x) = u^0 \hat{d}^0 e^{ik^0 \hat{p}^0 \cdot x} \quad (6)$$

ここで、 u^0 は振幅、 $\hat{d}^0$ は変位の偏向方向を表す単位ベクトル、 k^0 は入射波の波数、 $\hat{p}^0$ は入射波の進行方向を表す単位ベクトルである。パルスエコー法に対応した縦波入射の場合、 $k^0 = k_L$ 、 $\hat{d}^0 = \hat{p}^0 = -\hat{y}$ となる。

4.1 ボルン再構成

式 (5) の等価散乱源 $q_i(x)$ の表現に領域型の式 (2) を採用し、変位にはボルン近似を導入する。即ち、変位場 u_i を入射波 u_i^0 で置き換える。このとき、式 (5) は次のようになる。

$$A_m(k_L, \hat{y}) = \frac{i u^0 \hat{y}_m k_L^2}{2} \int_D \Gamma(x) e^{-2ik_L \hat{y} \cdot x} dV \quad (7)$$

上式右辺の体積積分は、 $\mathbf{K} = 2k_L \hat{y}$ としたとき、特性関数 Γ の $\mathbf{K}$ -空間におけるフーリエ変換 $\tilde{\Gamma}(\mathbf{K})|_{\mathbf{K}=2k_L \hat{y}}$ と見ることができる。このとき、特性関数 $\Gamma(x)$ は逆フーリエ変換により次のように求められる。

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

4.2 キルヒホフ再構成

等価散乱源 $q_i(x)$ の表現に境界型の式 (3) を採用し、境界上の変位場にはキルヒホフ近似を導入する。即ち、変位場を入射波と反射波 (L, T) の和で置き換える。このとき、式 (5) は次のようになる。

$$A_m(k_L, \hat{y}) \propto \frac{-u^0 \hat{y}_m k_L}{2} \int_D \gamma_H(x) e^{-2ik_L \hat{y} \cdot x} dV \quad (9)$$

ボルン近似の場合と同様に $\mathbf{K} = 2k_L \hat{y}$ とすると、上式の右辺は特異関数のフーリエ変換 $\tilde{\gamma}_H$ と見なすことができる。よって、特異関数 γ_H は次のように逆フーリエ変換により再構成できる。

$$\gamma_H(x) = -\frac{2}{\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{\hat{y}_m}{u^0 k_L} \times A_m(k_L, \hat{y}) e^{2ik_L \hat{y} \cdot x} k_L dk_L d\hat{y} \quad (10)$$

5. 欠陥像の再構成に関するモデル実験

5.1 実験概要

ここでは図1に示すような実験装置を用いてパルスエコー法で実験を行った。トランスデューサーは、公称中心周波数が4MHzの広帯域型を用いた。

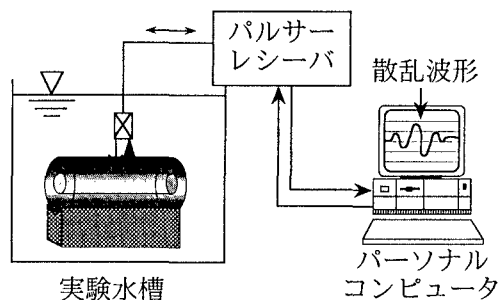


図1 実験装置

キーワード：線形化逆解析 超音波 形状再構成

〒424 静岡県清水市折戸 3-20-1 TEL 0543-34-0411(ext. 2523) FAX 0543-34-9768

供試体として、図2 (a)に示すような円柱形のアルミニウムの中心に直径10mmの円柱形の空洞を空けたものと、図2 (b)に示すような中心に長径10mm、短径5mmの楕円形の空洞を空けたものを用いた。実験の際には供試体を回転させて、波動の入射方向を変化させた。また、供試体の空洞は水が入らないように空洞の両側をビニールテープで塞いである。

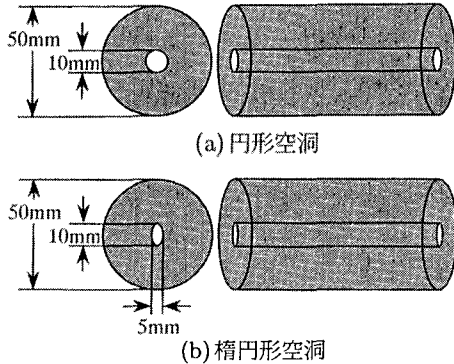
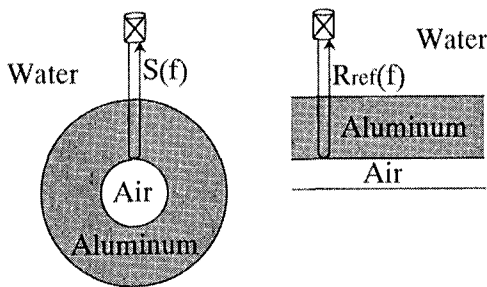


図2 モデル実験に用いた供試体

5.2 データ処理

図3 (a)に示すように、アルミニウム内に存在する空洞からの散乱波を $S(f)$ とする。ここで $S(f)$ は実際に計測された時間域の散乱波形をFFTにより周波数域に変換した波形である。また図3 (b)に示すようなアルミニウム平板の底面からの反射波を参照波 $R_{ref}(f)$ として選定した。このとき、欠陥像の再構成表現式(8)と(10)におけるトランスデューサー方向の散乱振幅 $A(f) = \hat{y}_m A_m$ は次のように書ける。

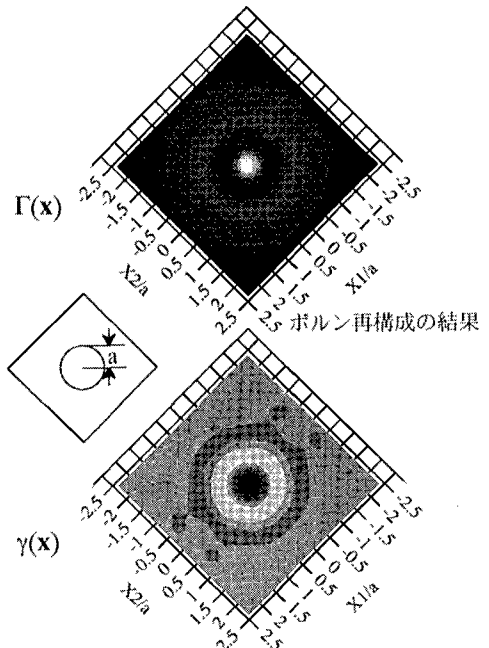
$$A(f) = \frac{S(f)}{R_{ref}(f)} \quad (11)$$



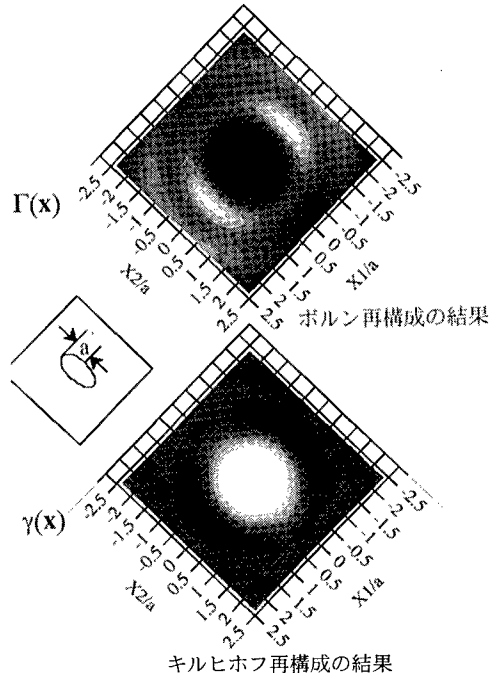
(a) 空洞からの散乱波 (b) 参照波
図3 計測散乱波 $S(f)$ と参照波 $R_{ref}(f)$

6. 計測波形による再構成結果

図4に実験による空洞の再構成結果を示す。式(11)に示した波形処理において、トランスデューサーの帯域を考慮し、ここでは周波数帯域を0~6MHzの範囲で逆変換を行った。図4 (a)が円形空洞の再構成結果、図4 (b)が楕円形空洞の再構成結果である。半径（長径）を a としそれぞれ無次元化してある。両解析とも欠陥の形状がほぼ再現されていることがわかる。



ボルン再構成の結果
図4 (a) 円形空洞の再構成結果



ボルン再構成の結果
図4 (b) 楕円形空洞の再構成結果

参考文献

- [1] 横井，北原，廣瀬，「線形化逆解析手法による欠陥形状の再構成」，土木学会第51回年講概要集，共通 pp.30-31,1996.9