

I - 4

全方向からの計測波形を用いた3次元逆散乱法による欠陥形状再構成

○東北大学工学部 学生員 宮腰寛之
東北大学大学院 正員 山田真幸
東北大学大学院 正員 寺田賢二郎
東北大学大学院 正員 北原道弘

1. 序論

構造物内部に存在する欠陥を可視化し、定量的な非破壊検査を行う手法として線形化逆散乱解析法¹⁾がある。この手法を用いて任意の3次元欠陥の全体像を再構成するためには、それを取り囲む全方向からの散乱波を計測する必要があり、数値解析ではいくつかの検討がなされている²⁾。本報告では現場への適用をにらんで、計測波形を用いた3次元欠陥の再構成を試みる。

2. 3次元線形化逆散乱解析法

図-1に示すように、等方均質な3次元無限弾性体 D の内部に空洞欠陥 D^c が存在している場合を考える。遠方の計測面 S^∞ 上に設置された探触子によって入射波 u^0 を送信し、空洞欠陥 D^c によって散乱された散乱波 u^s を同じ位置の探触子で受信するパルスエコー法を採用し、得られた散乱波から空洞欠陥の形状を再構成する。

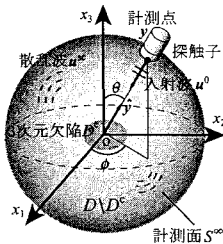


図-1 欠陥を有する構造物の模式図

2.1 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によれば、欠陥の内部で値を有する特性関数 $\Gamma(x)$ 遠方の計測点 y における縦波散乱振幅 $\hat{y}_m A_m(k_L, \hat{y})$ を用いて次式のように表される。

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

ここで、 $\hat{y}$ は探触子の方向を向くベクトル、 k_L は縦波波数、 $d\Omega(\hat{y})$ は微小立体角である。

2.2 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 $\hat{y}_m A_m(k_L, \hat{y})$ を用いて次式のように表される。

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

欠陥を取り囲む全ての方向の計測点 y で縦波散乱振幅 $\hat{y}_m A_m(k_L, \hat{y})$ が得られれば、式(1)と式(2)を用いて、 $\Gamma(x)$ と $\gamma(x)$ が求められ、 $\Gamma(x)$ と $\gamma(x)$ を空間上にプロットすることにより欠陥形状を再構成することができる。また、式(1)と式(2)の積分部分がフーリエ変換の構造を成していることから、高速フーリエ変換(FFT)を適用すること、計算の高速化を行う。

3. 計測実験による欠陥形状再構成

3.1 球状供試体および計測装置

式(1)と式(2)の縦波散乱振幅 $\hat{y}_m A_m(k_L, \hat{y})$ は欠陥近傍の座標原点 o と計測点 y の距離 $|y|$ に関係しないので、超音波の距離減衰の影響を除くために距離 $|y|$ は全ての計測点において等距離である必要がある。よって、供試体は図-2に示すような球形セメント(W/C=40%)の中心に、空洞欠陥を仮定した2種類の発泡スチロール模型を埋め込んだものを用いた。図-2(b)は凹凸を有する形状であり、図-2(a)の滑らかな形状との再構成結果の比較を行う。

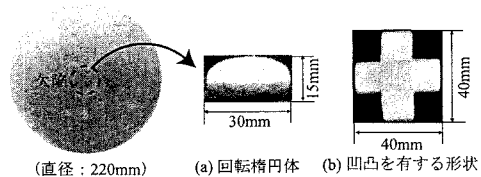


図-2 供試体と欠陥模型

図-3右に示すようなパルサーレーザー(Panametrics社製)を用いて、 $\theta = 0^\circ \sim 180^\circ$ 、 $\phi = 0^\circ \sim 180^\circ$ をそれぞれ 10° 間隔で計684点計測を行った。使用した探触子(KARL DEUTSCH社製)は図-4のような波形特性を示しており、公称周波数帯域0.3~1.0MHzよりも広い周波数帯域を有していることがわかる。

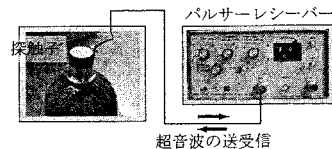


図-3 計測装置

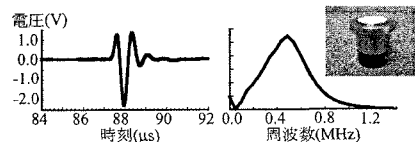


図-4 探触子の波形特性(左:時間域, 右:周波数域)

3.2 計測波形のデータ処理

計測実験により得られた波形 $O^{sc}(t)$ には、欠陥の情報
を有する固体内の散乱波以外に接触媒質や探触子などの影
響が含まれていることから、式 (1) と式 (2) を用いて欠陥
形状を再構成するためには、図-5 右に示した参照波形用
供試体より得られる参照波形 $O^{ref}(t)$ を用いてデータ処理
を行い、欠陥情報を有する固体内における散乱波のみを抽
出する必要がある。

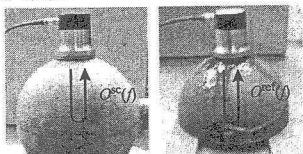


図-5 散乱波形 $O^{sc}(f)$ と参照波形 $O^{ref}(f)$

フーリエ変換によっ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：

$$E^{sc}(f) = E^{ref} \frac{O^{sc}(f)}{O^{ref}(f)} \quad (3)$$

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 $\hat{y}_m A_m(k_L, \hat{y})$ として利用する。 E^{ref} はセメントと空気
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。

3.3 再構成結果

図-6 に回転楕円体欠陥のボルン逆解析結果、図-7 にキ
ルヒホフ逆解析結果を示す。また、図-8 に凹凸を有する
欠陥のボルン逆解析結果、図-9 にキルヒホフ逆解析結果
を示す。回転楕円体は形状が明確に再構成されている。凹
部分の再構成は不明瞭であるが、凹凸を有する欠陥の凸部
分は明確に再構成されている。

4. 結論

任意形状を有する3次元欠陥に対して、これを取り囲む
全方向から得られた計測波形にデータ処理を施し、3次元
線形化逆散乱解析法に適用することで欠陥形状の全体像を
再構成することができた。また、ボルン逆解析では欠陥の
内部領域が、キルヒホフ逆解析では欠陥の表面が再構成さ
れることが示された。

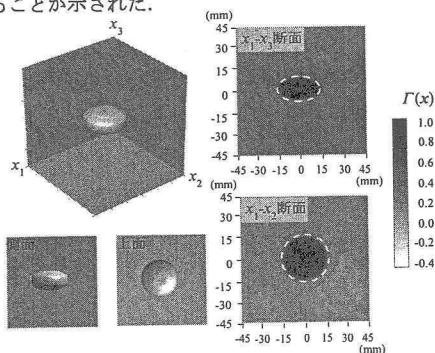


図-6 回転楕円体欠陥のボルン逆解析結果

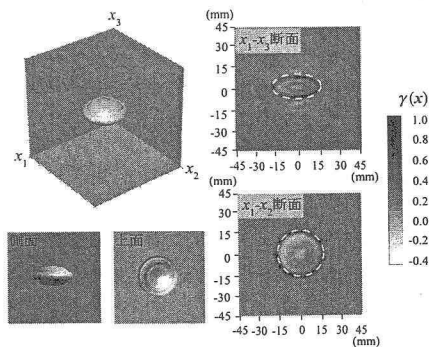


図-7 回転楕円体欠陥のキルヒホフ逆解析結果

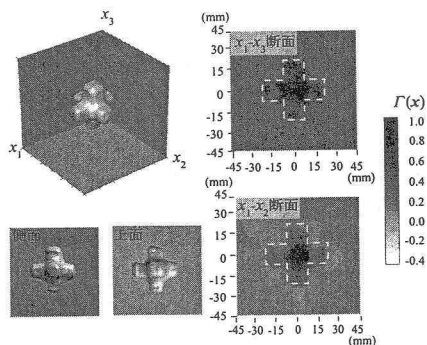


図-8 凹凸を有する欠陥のボルン逆解析結果

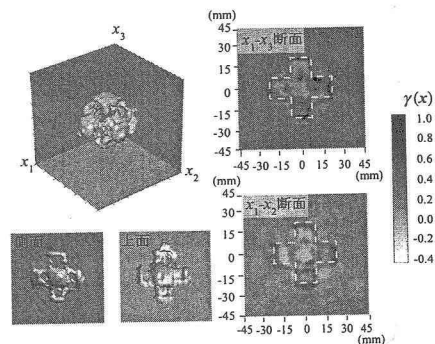


図-9 凹凸を有する欠陥のキルヒホフ逆解析結果

参考文献

- 1) Kitahara, M. and Hirose, S., in *Inverse Problems in Engineering Mechanics*, eds. Tanaka M. and Dulikravich G.S., Elsevier, Amsterdam, 1998, pp.163-170.
- 2) 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