

全方向からの計測波形を用いた 三次元線形化逆散乱解析による欠陥形状再構成

○東北大学大学院	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

構造物内部の欠陥の形状や大きさを定量的に把握するための手法として、3次元線形化逆散乱解析法¹⁾が提案されている。この手法を用いて3次元欠陥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る、これまでは数値解析から得られるデータを用いた検討がなされてきた²⁾。本研究では実構造物への適用をにらんで、計測波形を用いた3次元欠陥の形状再構成を試みる。

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^{in} を送信し、空洞欠陥 D^c によって散乱された散乱波 u^{sc} 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。

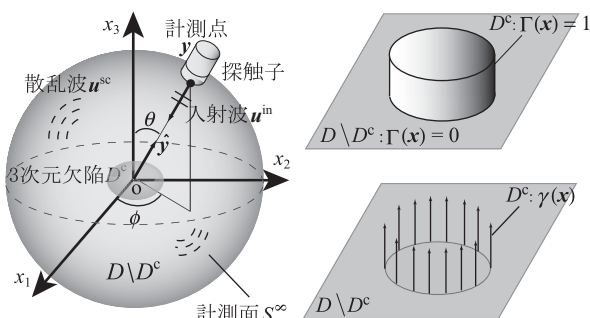


図-1 弾性体モデル

図-2 特性・特異関数

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 $\Gamma(x)$ は計測点 y における縦波散乱振幅 $\mathcal{A}(k_L, \theta, \phi)$ を用いて球座標系で次式のように表される。

$$\Gamma(x) = \frac{1}{2u^{\text{in}}\pi^3} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \int_0^\infty \mathcal{A}(k_L, \theta, \phi) e^{2ik_L \hat{y} \cdot \hat{x}} \sin \theta dk_L d\theta d\phi \quad (1)$$

一方、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 $\mathcal{A}(k_L, \theta, \phi)$ を用いて次式のように表される。

$$\gamma(x) = \frac{-i}{2u^{\text{in}}\pi^3} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \int_0^\infty \mathcal{A}(k_L, \theta, \phi) e^{2ik_L \hat{y} \cdot \hat{x}} k_L \sin \theta dk_L d\theta d\phi \quad (2)$$

ここで、 k_L は縦波波数、 u^{in} は入射波の振幅である。

欠陥を取り囲む全ての方向の計測点 y で縦波散乱振幅 $\mathcal{A}(k_L, \theta, \phi)$ 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、それぞれ欠陥の領域と境界が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)を利用することで、積分計算を高速に行うことができる。

従来の研究では縦波散乱振幅 $\mathcal{A}(k_L, \theta, \phi)$ を境界要素法を用いた数値解析により求めて3次元欠陥の再構成を行ってきたが、本研究では計測により得られた散乱波形にデータ処理を行い、抽出した縦波散乱振幅に相当する成分を用いて欠陥再構成能の検討を行う。

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 $\mathcal{A}(k_L, \theta, \phi)$ は欠陥近傍の座標原点 o と計測点 y との距離 $|y|$ に関係しない。しかし、実験において不可避免地混入してしまう超音波の距離減衰の影響を考慮すると、距離 $|y|$ を一定とし、全計測点における減衰の影響を等しくする必要がある。よって、供試体は図-3に示すような球形セメント(W/C=34.8%)の中心付近に、空洞欠陥を仮定した発泡スチロール模型を埋め込んだものを用いた。

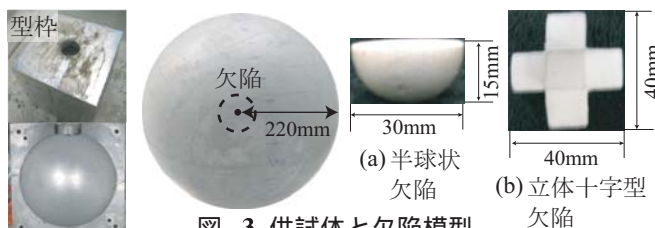


図-3 供試体と欠陥模型

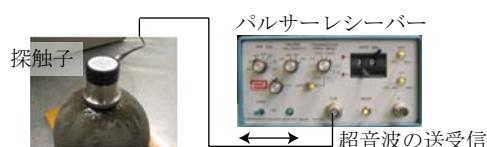


図-4 計測装置

図-4右に示すようなパルサーレシーバー(Panametrics社製)を用いて、 $\theta = 0^\circ \sim 180^\circ$ 、 $\phi = 0^\circ \sim 350^\circ$ をそれぞれ 10° 間隔で計684点において計測を行った。使用した探触子(KARL DEUTSCH社製)は図-5のような波形特性を示

キーワード：非破壊検査，超音波，形状再構成，3次元欠陥，ボルン逆解析，キルヒホフ逆解析

〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 06 TEL 022-217-7126, FAX 022-217-7127 URL: <http://www.nde.civil.tohoku.ac.jp/>

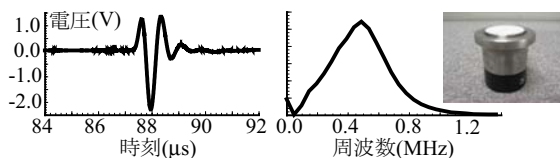


図-5 探触子の波形特性(左:時間域, 右:周波数域)としており, 中心周波数は約 0.49MHz であった。

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, 欠陥の情報を含む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。したがって, 式 (1) と式 (2) を用いて欠陥形状を再構成するためには, 図-6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³⁾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。

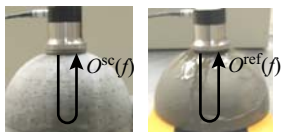


図-6 散乱波形 $O^{sc}(f)$ と参照波形 $O^{ref}(f)$

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 $O^{ref}(f)$ を用いた式:

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

によるデータ処理を経て得られた $E^{sc}(f)$ は縦波散乱振幅 $\mathcal{A}(k_L, \theta, \phi)$ に相当し, これを式 (1), (2) に適用する。 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-7に半球状欠陥のボルン逆解析結果, 図-8にキルヒホフ逆解析結果を示す。また, 図-9に立体十字型欠陥のボルン逆解析結果, 図-10にキルヒホフ逆解析結果を示す。全方向計測の波形を用いることで, 形状の特徴を損なうことなく欠陥を3次元的に再構成できている。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境界が再構成されることが示された。

4. 結論

弾性体内部に存在する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, 線形化逆散乱解析法の入力として用いることで欠陥形状の全体像を再構成することができた。今後はより実構造物に近い条件で欠陥再構成を行うことが課題である。

参考文献

- 1) Kitahara, M. and Hirose, S., Elastodynamic inversion of 3D cavity from backscattering data, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol.116, pp.1812-1827, 1990.
- 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.
- 3) Nakahata, K. and Kitahara, M., Shape reconstruction methods with incomplete data, *Review of Progress in Quantitative Non-destructive Evaluation*, Vol.19, pp.912-926, American Institute of Physics, 2000

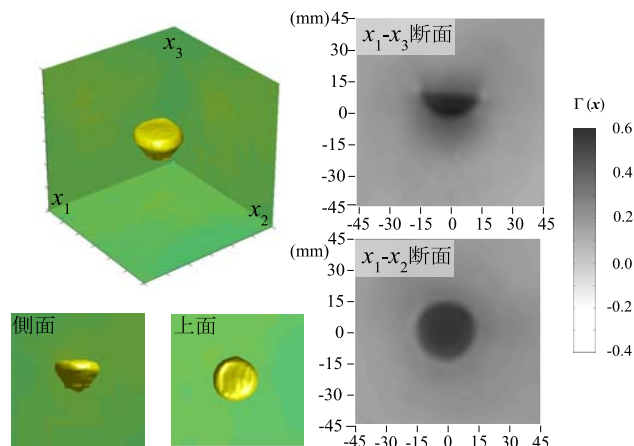


図-7 半球状欠陥のボルン逆解析結果

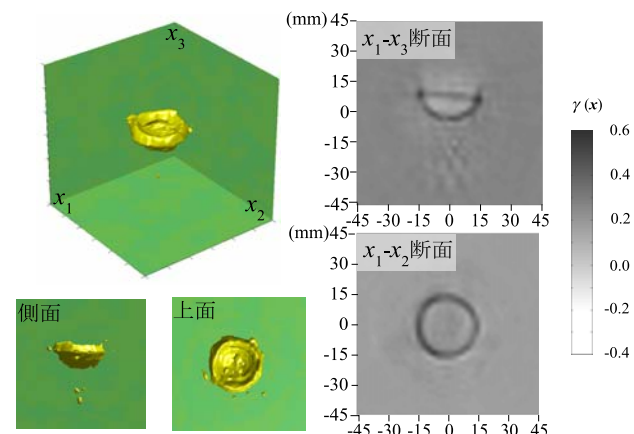


図-8 半球状欠陥のキルヒホフ逆解析結果

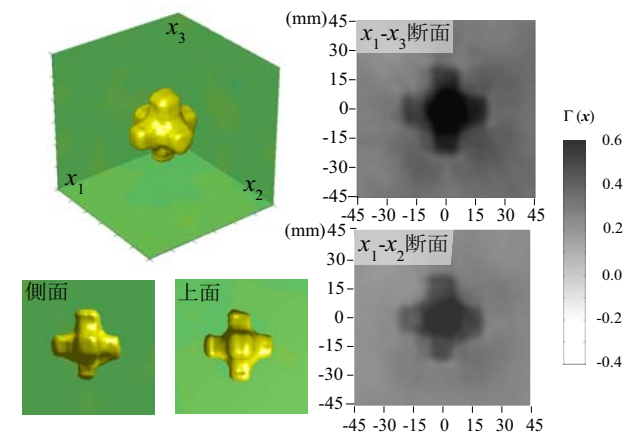


図-9 凹凸を有する欠陥のボルン逆解析結果

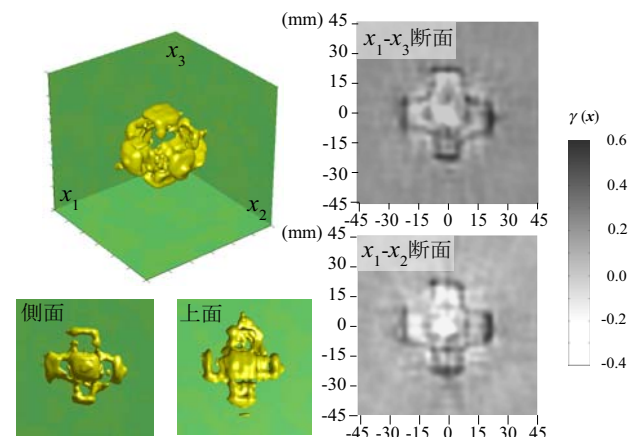


図-10 凹凸を有する欠陥のキルヒホフ逆解析結果