

線形化逆散乱法と開口合成法の関連性と土木構造部材への応用について

東北大学大学院 学生員 中畑和之
東北大学大学院 正 員 北原道弘

1. はじめに

構造部材内部に存在する欠陥像を再構成するために、ボルン近似とキルヒホフ近似に基づく線形化逆散乱解析法^{1,2)}が報告されている。逆散乱解析法は散乱波の積分表現を基に計測散乱波形から逆に散乱体（欠陥）の形状を再生するための解析手法であり、これまでに逆解析の高速化、高精度化、欠陥種の識別の観点から研究が行われている。一方で、現行の超音波探傷で広く用いられている欠陥の可視化手法に開口合成法^{3,4)}(SAFT)がある。SAFTは探触子を走査し、各点で得られた反射信号を深さ位置で集束するように合成して、欠陥像をイメージングする技術である。本報告では、逆散乱解析法とSAFTの特徴を踏まえて、非均質かつ大断面を有する土木構造部材を意図した場合に効果的な欠陥再構成手法を提案する。

2. 開口合成法 (SAFT)

送信点 $y^k(y_1^k, y_2^k)$ から超音波が固体内に入射され、反射源（欠陥）によるエコーが再び同じ点で受信される。反射エコーが出力電圧 V_k^{out} の時刻歴データとして記録されるとき、時刻 t における散乱波は反射源 $x(x_1, x_2)$ からの波動成分と見なすことができ、時刻 t と伝播距離 r の関係は

$$t(x) = \frac{2r(x)}{c_L} = \frac{2\sqrt{(x_1 - y_1^k)^2 + (x_2 - y_2^k)^2}}{c_L} \quad (1)$$

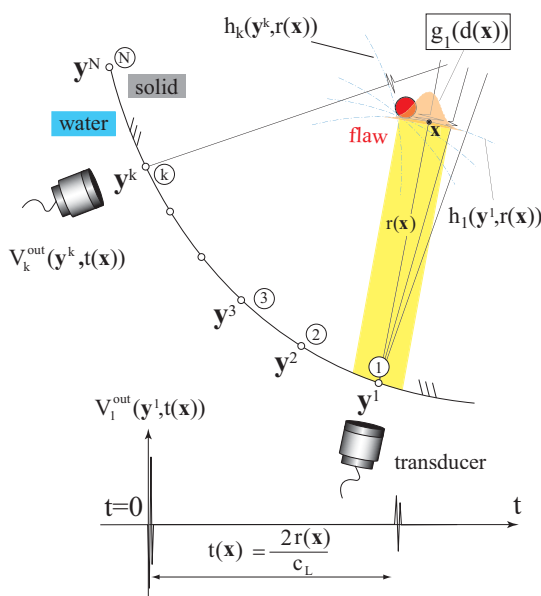


図-1 時間域における開口合成の原理

となる。反射源の反射レベルを計測点 y^k で得られた時刻 $t(x)$ における振幅の値とすれば、出力電圧 V_k^{out} は再構成図面上に振幅値 $h_k(y^k, r(x))$ としてプロットできる（図-1）。

$$V_k^{out}(y^k, t(x)) \mapsto h_k(y^k, r(x)). \quad (2)$$

各計測点毎に $h_k(y^k, r(x))$ を重ね合わせるにより再構成画像を得る。一般的に探触子はビーム幅（開口）を有するので、記録された反射波は開口の範囲内で反射されたものであるとすれば開口合成 $H(x)$ は次のように表される。

$$H(x) = \sum_{k=1}^N h_k(y^k, r(x)) g_k(d(x)). \quad (3)$$

ここで $g_k(d(x))$ は開口幅である。アルミニウム中の人工欠陥に対して、中心周波数 1MHz と 5MHz の 2 種類の広帯域探触子を用いて開口合成を行った結果を図-2に示す。固体内における 1MHz と 5MHz の超音波の波長はそれぞれ約 6.4mm, 1.3mm である。人工欠陥の最大径は 8mm であるので 1MHz の探触子は欠陥サイズと同オーダーの波長を送信していることになる。図-2の結果より高周波を用いた SAFT は高い分解能で像が再現されている。低周波を用いる場合は再構成像は不鮮明になるが、大凡の欠陥位置は把握できる。

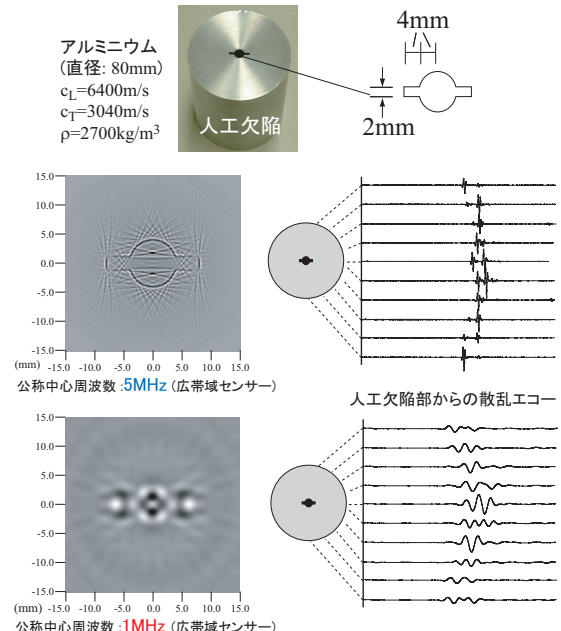


図-2 開口合成による欠陥の再構成像

キーワード：超音波，形状再構成，線形化逆散乱解析法，開口合成法

〒 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/>

3. 線形化逆散乱法

点 y に設置した探触子から欠陥近傍の送信中心 O に向けて入射縦波を送信し、欠陥 D^c による散乱波を同じ探触子で受信する状況を考える（図-3）。ここでは、縦波を送受信する探触子を用いて、散乱波に含まれる縦波散乱振幅から欠陥形状の推定を試みる。線形化逆散乱法は欠陥領域を再現するボルン逆解析と欠陥境界を再現するキルヒホフ逆解析が提案¹⁾されているが、ここではキルヒホフ逆解析について簡単に述べる。キルヒホフ近似を導入すれば、欠陥の境界上においてのみ値を有する特異関数 $\gamma(x)$ は次の積分表現を基に再構成される。

$$\gamma(x) = \frac{-1}{(2\pi)^2} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{8}{u^0 k_L} A(k_L, \hat{y}) e^{2ik_L \hat{y} \cdot x} k_L dk_L d\hat{y} \quad (4)$$

上式は波数域 k_L (周波数域) で表現されているが、SAFT との比較のため以下ではキルヒホフ逆解析の時間域表現を導出する。図-3に示すように、欠陥位置 x と計測方向 $\hat{y}$ を極座標表示すれば

$$\hat{y} \cdot x = \bar{r} \cos(\phi - \theta) \quad (5)$$

となる。散乱波は波速 c_L で距離 $\bar{r}$ を伝播するので、伝播時間 $t(x) = \bar{r}/c_L$ と表すことができる。この関係と式 (5) を再構成式 (4) に代入すると次式を得る。

$$\gamma(x) = \frac{-2}{\pi^2 u^0} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty A(\omega, \hat{y}) \times \exp\{2i\omega t(x) \cos(\phi - \theta)\} \frac{d\omega}{c_L} d\theta(\hat{y}) \quad (6)$$

上式で、角振動数 $\omega = k_L c_L$ の関係を用いた。ここで、 $T(x) = -2 \cos(\phi - \theta) t(x)$ とおけば、式 (6) は

$$\gamma(x) = \frac{-2}{\pi^2 u^0 c_L} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty A(\omega, \hat{y}) \exp\{-i\omega T(x)\} d\omega d\theta(\hat{y}) \quad (7)$$

と変形できる。式 (7) に含まれる ω に関する積分は、縦波散乱振幅 A のフーリエ変換であるから、縦波散乱振幅の時間域表現 a を用いて

$$\gamma(x) = \frac{-4}{\pi u^0 c_L} \int_0^{2\pi} a(T(x), \hat{y}) d\theta(\hat{y}) \quad (8)$$

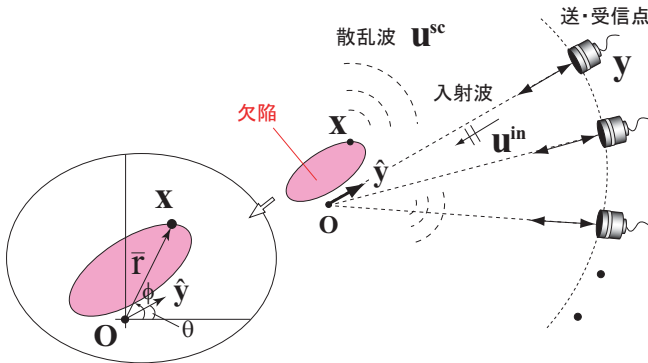
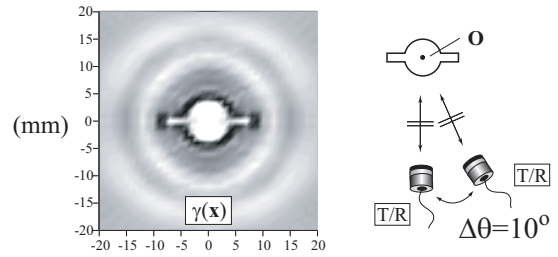


図-3 超音波の送受信



公称中心周波数: 1MHz (広帯域センサー)

図-4 キルヒホフ逆解析による欠陥の再構成像

と書くことができる。図-2で用いた人工欠陥に対して、中心周波数 1MHz の広帯域探触子を用いてキルヒホフ逆解析を行った結果を図-4に示す。1MHz の探触子を用いても欠陥像が詳細に再現されている。

4. SAFT と逆散乱解析の比較

SAFT は反射波形 V^{out} を計測点ごとに積み重ねていくため、高分解能の欠陥像を得るためには高周波を使用する必要がある。低周波エコーによる SAFT を直接に土木構造物材へ適用することは難しい。しかし、欠陥の有無や欠陥の大凡の位置を推定する場合には低周波であっても SAFT は有効である。一方、逆散乱解析は弾性波動論に基づき散乱振幅データを計測方向 $\hat{y}$ で積分する（重ね合わせる）ことで欠陥境界 $\gamma(x)$ が再構成される（図-5）。図-4の逆散乱解析結果によれば、欠陥サイズと同オーダーの波長をもつ散乱振幅データ A があれば詳細な欠陥像を構成できる。しかし、送信中心 O は欠陥近傍に設定するため、欠陥の大凡の位置を予め把握しておく必要がある。

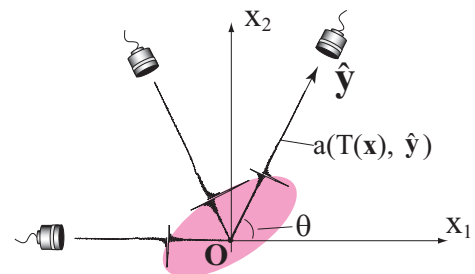


図-5 線形化逆散乱解析の原理

5. 結論

SAFT が有する欠陥の大凡の位置決定能を利用して、逆散乱解析による詳細な欠陥像再生と組み合わせることで、低周波を用いた土木構造物材内部の欠陥イメージング手法の開発が期待できる。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 中畑和之, 大西正浩, 北原道弘: 線形化逆散乱解析の高速化と欠陥形状再生への適用, *応用力学論文集*, Vol.5, pp.67-74, 2002.
- 3) 非破壊検査協会 (編): 新非破壊検査便覧, 日刊工業新聞社, 1992.
- 4) Seydel, J.A.: Ultrasonic synthetic aperture focusing techniques in NDT, *Research Techniques in Nondestructive Testing*, Vol.6, Ed. Sharpe, P.S., Academic Press, New York, 1982.