

超音波斜角 SH 波探傷試験データを用いた 等方性材料中の欠陥に対する線形化逆散乱解析

○群馬大学大学院
群馬大学
群馬大学大学院

学生会員 小野寺 貴
非会員 高田 真弥
正会員 斎藤 隆泰

1. はじめに

構造物内部の欠陥を検出するために、超音波非破壊評価法が利用されている。超音波非破壊評価法の原理は、欠陥が存在すると思われる箇所に超音波を送信し、得られた散乱波形から欠陥の有無等を判定する方法である。近年では、単に欠陥の有無等を判定するだけでなく、得られた散乱波を用いて欠陥の大きさや形状等を推定（以下、欠陥形状再構成と呼ぶ）することが求められている。欠陥形状再構成手法として、開口合成法等が提案されているが、開口合成法は、散乱波形を重ね合わせるだけの単純なアルゴリズムのため、推定精度にやや問題がある。そこで、本研究では、実際の計測波形を線形化逆散乱解析法¹⁾に用いることで、欠陥形状再構成を行うことを検討する。以下では、鋼材中の欠陥に対して SH 波を対象とした超音波斜角探傷試験を実施し、得られた計測波形から、欠陥形状再構成を実施することで、線形化逆散乱解析法^{1,2)}の有用性等について検討する。

2. 超音波斜角 SH 波探傷試験の概要

本研究で実施した実験概要を図 1 に示す。試験体は鋼材とし、欠陥は直径 2mm の貫通空洞とした。鋼材側面 (x_1-x_2 面内)において、欠陥中心を原点とすれば、欠陥中心から鋼材表面までの長さは 25mm である。用いた斜角探触子は 2MHz の SH 波探触子で、公称入射角は 45 度と 60 度の 2 種類用意した。入射超音波の指向性を考慮し、各探触子の位置を、それぞれ図 1 の A-H の 8 通りで計測実験を実施した。この時、探触子の設置位置 A-D は 45 度、E-H は 60 度の探触子を用いたことに他ならない。なお、超音波の送受信は同一の探触子で行い、一回の測定で一つの散乱波を受信することとする。すなわち、最大 8 つの散乱波形を用いて、欠陥形状を特定することを考える。

3. SH 波を対象とした逆散乱解析

図 1 の鋼材の奥行き長さは、波長に対して十分長いいため、解析モデルを二次元面外波動問題として考える。この時、SH 波の変位 u は、周波数領域において、次の方程式を満足する。

$$\mu \nabla^2 u + \rho \omega^2 u = 0 \quad (1)$$

ここで、 μ はせん断弾性定数、 ρ は密度であり、SH 波の波速 c_T と $c_T = \sqrt{\mu/\rho}$ の関係が成り立つ。散乱波 $u^{sc}(\mathbf{x})$ に対す

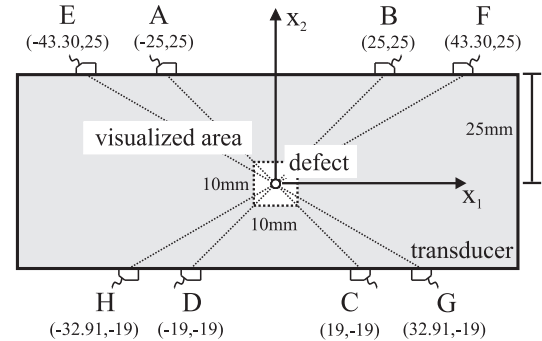


図 1 計測実験の概要。

る積分方程式は、空洞の境界 ∂D での表面力がゼロとなることを考慮すれば、次のように表すことができる。

$$u^{sc}(\mathbf{x}, k_T) = \int_{\partial D} n_\alpha(\mathbf{y}) \frac{\partial U}{\partial y_\alpha}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, k_T) u(\mathbf{y}, k_T) dS_y \quad (2)$$

ここで、 $U(\mathbf{x}, \mathbf{y}, k_T)$ は二次元面外波動問題に対する基本解であり、 $n_\alpha(\mathbf{y})$ ($\alpha = 1, 2$) は境界 ∂D 上の点 $\mathbf{y}$ における外向き単位法線ベクトルである。また、 k_T は波数であり、 $k_T = \omega/c_T$ を満足する。式 (2) 中の基本解 $U(\mathbf{x}, \mathbf{y}, k_T)$ に対し、遠方場近似を行えば、式 (2) は次のように表すことができる。

$$u^{sc}(\mathbf{x}, k_T) = \frac{k_T \hat{x}_\alpha}{4} \sqrt{\frac{2}{\pi k_T |\mathbf{x}|}} e^{i(k_T |\mathbf{x}| - \frac{\pi}{4})} \times \int_{\partial D} n_\alpha(\mathbf{y}) e^{-ik_T \hat{\mathbf{x}} \cdot \mathbf{y}} u(\mathbf{y}, k_T) dS_y \quad (3)$$

ここで、 $\hat{x}_\alpha$ は $\mathbf{x}$ の単位ベクトル成分、 i は虚数単位を表す。式 (3) では、境界 ∂D 上の点 $\mathbf{y}$ での未知の全変位場 $u(\mathbf{y}, k_T)$ を含んでいる。そこで Born 近似を用いることで、 $u(\mathbf{y}, k_T)$ を入射波動場 $u^{in}(\mathbf{y}, \omega)$ で近似する線形化を施す。式 (3) に Gauss の定理を用い、欠陥内部でのみ値を持つ次の特性関数

$$\Gamma(\mathbf{y}) = \begin{cases} 1 & \mathbf{y} \in D_c \\ 0 & \mathbf{y} \in D \end{cases} \quad (4)$$

を用いれば、最終的に次の式を得る。

$$\Gamma(\mathbf{y}) = 4i \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{u^{sc}(\mathbf{x}, k_T) |\mathbf{x}|}{\pi} e^{-2i(k_T |\mathbf{x}| - k_T \hat{\mathbf{x}} \cdot \mathbf{y})} dk_T d\theta \quad (5)$$

ただし、 $\theta = \arctan(\hat{x}_2/\hat{x}_1)$ である。式 (5) の導出の仮定において、探触子からの放射場（入射波）は、点源波として仮定

している. 式 (5) の左辺の特性関数 Γ は空洞内部でのみ値を持つ関数である. そのため, 式 (5) の右边を適切に計算することができれば, 鋼材内部の欠陥形状を再構成することが可能となる. ただし, 式 (5) の右边の積分は, θ に関する積分を含む. 角度 θ は, 計測実験における探触子位置に依存するため, 観測点を数多く設置し, 多数の散乱波形データを利用する程, 欠陥形状を正確に再現できることを示している. しかしながら, 通常, 超音波非破壊評価法では, 限られた観測点での散乱波形データしか利用できない. そのため, 限られた散乱波形データで, どの程度, 欠陥を再構成できるかが興味の対象となる.

4. 逆散乱解析結果

以下, 逆散乱解析結果を示す. 通常, 計測実験では, 測定誤差等が含まれる. ここでは, 逆散乱解析に際し, まず, 図 1 の鋼材中の SH 波速度を計測した. ここでは, 計測で求めた SH 波速度 $c_T \approx 3352\text{m/s}$ を, 全ての探触子位置に対する逆散乱解析で一定と仮定して利用する. なお, 用いた SH 波斜角探触子は K GK 社製の HA2C5 $\times$ 5HA45 および HA2C5 $\times$ 5HA60 であり, 斜角探触子における遅延時間は, それぞれ 4.3, 6.1 μs と規定されていたことに注意する. なお, 逆散乱解析を行う上で, 超音波の直進性を考慮し, 適当な超音波ビーム幅を設定し, 欠陥からの散乱波はビーム幅領域からの欠陥によるエコーであるものとして, 逆散乱解析を実行する. また, 計測実験で得られた散乱波の一周分を取り出した散乱波形に対して, 逆散乱解析を行った.

結果を図 2 に示す. 図 2(a) は, 探触子を A の位置に設置して得られた散乱波形データを用いて, 式 (5) の逆散乱解析を行った結果を示している. 比較のため, A-H 全ての探触子で得られた散乱波形データを用いた場合の結果も図 2(b) に示してある. ただし, 図 2 の可視化領域は, 図 1 中の空洞周辺 10mm $\times$ 10mm の領域に相当し, 実際の空洞は白実線で示していることに注意されたい. 図 1 より, 探触子の設置位置 A は, 空洞より左上方 45 度に位置している. そのため, 逆散乱解析で得られた特性関数の値は, 入射超音波が直接空洞に当たる部分, すなわち空洞の左上方付近で大きな値となっている. 一方, A-H 全ての設置位置での散乱波形を用いて逆散乱解析を行った図 2(b) の結果に着目すると, 空洞中心から見て A-H の方向の空洞付近で, 特性関数が大きな値を示していることがわかる. 図 1 より, 探触子の設置位置は空洞中心に対して左右対称に設けているものの, 計測誤差等の影響で, 空洞としての形状までは再現できていないものの, 8 点での計測で, 空洞のおよその位置や大きさは, 概ね判断できると考えられる.

次に, 斜角 45 度, 60 度の探触子のみで得られた散乱波形を使って逆散乱解析を行った結果をそれぞれ図 3(a),(b) に

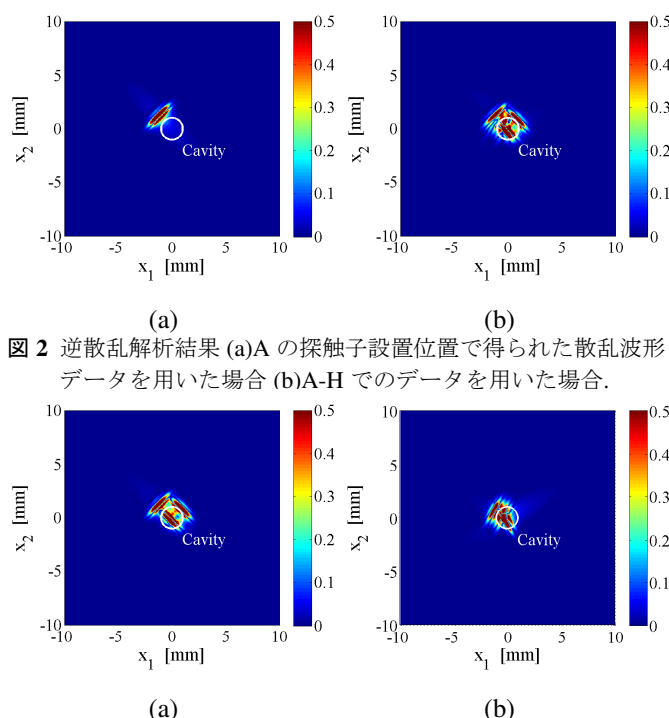


図 2 逆散乱解析結果 (a)A の探触子設置位置で得られた散乱波形データを用いた場合 (b)A-H でのデータを用いた場合.

図 3 逆散乱解析結果 (a)A-D の探触子設置位置で得られた散乱波形データを用いた場合 (斜角 45 度の探触子のみを用いた場合に相当) (b)E-H でのデータを用いた場合 (斜角 60 度に相当).

示す. 図 3 より, いずれの場合においても, 図 2 で示した結果と同様, 欠陥のおよその位置や大きさを再構成できると言える. 計測点はわずか 4 点であるが, 適切な方向から超音波を送受信できれば, 欠陥のおよその位置や大きさは推定できると考えられる.

5. おわりに

SH 波を対象とした鋼材中の欠陥に対する超音波斜角探傷実験を行った. 得られた散乱波形を用いて逆散乱解析を実施することにより, 欠陥のおよその位置や大きさを推定することができた. 逆散乱解析法は, 通常広く利用されている開口合成法に比べ, 再構成の精度が高いと考えられる. 近年では, マトリックスアレイ探触子等, 複数の素子を制御することにより, 一度に効率よく数多くの散乱波形を得ることが可能である. そこで, 今後は, マトリックスアレイ探触子を用いて得られた散乱波形データを使って逆散乱解析を行うこと, CFRP 等の異方性材料に対して示した逆散乱解析法³⁾を, 本稿と同様に, 計測波形を用いて行う予定である. また, 機械学習を用いて欠陥の有無を自動的に判別するシステムの構築に逆散乱解析法を用いることも検討している.

参考文献

- 1) 原陽一, 廣瀬壮一, 板内部の欠陥に対する逆散乱解析, 応用力学論文集, Vol.4, pp.51-59, 2001
- 2) 斎藤隆泰, 稲垣祐生, 下田瑞斗: 異方性弾性体中の欠陥に対する 2 次元逆散乱解析, 非破壊検査, vol. 66, No.2, pp.84-89, 2017
- 3) 斎藤隆泰, 下田瑞斗, 稲垣祐生, 廣瀬壮一: 演算子積分時間領域境界要素法を援用した異方性板内部の欠陥に対する順解析および逆散乱解析, 土木学会論文集 A2(応用力学), vol.72, No.2, pp.237-246, 2016