オーステナイト系鋼材中の欠陥に対する 2次元順解析および逆散乱解析

群馬大学大学院理工学府 学生会員 ○稲垣祐生
群馬大学大学院理工学府 正会員 斎藤隆泰

1. はじめに

オーステナイト系鋼材は原子力発電所の構造材や配管として, 特に耐食性を要する部位に広く利用されている. そのオーステナイト系鋼材は高温, 高圧の腐食環境下に置かれると応力腐食割れを生じるため, そのような欠陥を早期に発見する非破壊検査手法の開発が望まれている. しかしながら, オーステナイト系鋼材は音響異方性を示すため, 超音波非破壊検査による欠陥の探傷を行った場合, 誤った欠陥像を検出する等, 探傷精度の著しい低下が懸念される. そこで, 本研究では, 前論文[1]を拡張し, オーステナイト系鋼材中の欠陥に対する2次元順解析および逆散乱解析手法を開発する. 以下では, まず解くべき問題について簡単に説明した後, 数値解析例として, オーステナイト系鋼材中の空洞欠陥に対する順解析, およびその結果を利用した逆散乱解析を行うことで本手法の妥当性, 有効性を示す.

2. 解くべき問題

解くべき問題は図1に示すような, オーステナイト系鋼材 D 中の円筒空洞欠陥 D_c に対する順解析, および欠陥 D_c の形状および位置を特定する逆散乱解析とする. ただし, 領域 D は2次元無限領域と仮定する. また, 本研究では, 円筒空洞欠陥の全周方向で超音波を送受信するパルス・エコー法を想定する.

3. 順解析の定式化

順解析によって, オーステナイト系鋼材中の空洞欠陥による散乱波を求める. 本研究では演算子積分時間領域境界要素法 (CQBEM)[2] により, 円筒空洞欠陥に対する順解析を行う. 以下では特に断りのない限り, 右下添え字は 1, 2 の値を取る. 空洞欠陥が存在するオーステナイト系鋼材中を伝搬する2次元異方性弾性波動問題に対する境界積分方程式は次式で表される.

$$\bar{C}(\boldsymbol{x})u_i(\boldsymbol{x},t) = u_i^{\rm in}(\boldsymbol{x},t) - \int_S T_{ij}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y},t) * u_j(\boldsymbol{y},t)dS \quad (1)$$

ここで, $\boldsymbol{x}$ は領域 D 内の観測点, $u_i(\boldsymbol{y},t)$ は時刻 t における源点 $\boldsymbol{y}$ での変位成分である. また, $\bar{C}(\boldsymbol{x})$ は位置 $\boldsymbol{x}$ における自由項であり, $u_i^{\rm in}(\boldsymbol{x},t)$ は入射波を表す. $U_{ij}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y},t)$, $T_{ij}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y},t)$ はそれぞれ2次元異方性弾性波動問題に対する時間領域基本解, および対応する二重層核である. 式 (1) を解くために, 空間方向に関しては空洞境界 S を区分一定要素で離散化し, 時間方向に関しては Lubich の演算子積分法を用いて離散化する. これらの離散化の後, 全時間ステップにおける境界未知量およびオーステナイト系鋼材内部の全変位場 $u_i(\boldsymbol{x},t)$ を逐次的に求めることができる.

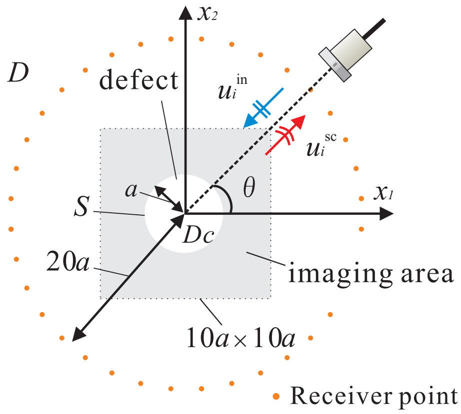

図 1 順解析および逆散乱解析モデル.

4. 逆散乱解析の定式化

次に, CQBEM による順解析で得られた散乱波形を利用した2次元逆散乱解析の定式化を行う. 式 (1) の順解析で得られる結果は時間領域の散乱波形 $u_i^{\rm sc}(\boldsymbol{x},t)$ である. 以下では, 時間領域の散乱波 $u_i^{\rm sc}(\boldsymbol{x},t)$ をフーリエ変換して得られる周波数領域の散乱波 $\tilde{u}_i^{\rm sc}(\boldsymbol{x},\omega)$ を利用する. 周波数領域における全変位場 $\tilde{u}_i(\boldsymbol{x},\omega)$ が入射波変位場 $\tilde{u}_i^{\rm in}(\boldsymbol{x},\omega)$ と散乱波変位場 $\tilde{u}_i^{\rm sc}(\boldsymbol{x},\omega)$ の重ね合わせで表せることに注意すると, 散乱波に対する境界積分方程式は, 次のように表される.

$$\tilde{u}_i^{\rm sc}(\boldsymbol{x},\omega) = -\int_S \tilde{T}_{ij}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y},\omega)\tilde{u}_j(\boldsymbol{y},\omega)dS \quad (2)$$

ここで, ω は角周波数, $\tilde{T}_{ij}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y},\omega)$ は2次元異方性弾性波動問題に対する周波数領域二重層核である. さて, 実際の超音波非破壊検査では, 散乱波は欠陥の寸法に比べて十分遠方で観測されることが多い. したがって, 以下では散乱波の観測点は qP 波 (擬似縦波) と qS1 波 (擬似横波) が分離できる程度に十分遠方にあると仮定する. 式 (2) に二重層核の遠方表現[3] を代入し, 空洞内部 D_c でのみ値を持つ特性関数 $\Gamma(\boldsymbol{y})$ を導入することで, 最終的に,

Key Words: 逆散乱解析, *CQBEM*, オーステナイト系鋼材
〒 376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1・TEL/FAX:0277-30-1610

$$\Gamma(\boldsymbol{y}) = \int_0^{2\pi}\int_0^{\infty} \frac{\mathrm{i}C_{66}}{d_j F(\omega)}\sqrt{\frac{|\boldsymbol{x}||f''(\varphi^s)|}{2\pi^3 k_0}} \times \left(\frac{f(\varphi^s)}{c_0} + \frac{1}{c^{\mathrm{in}}(\psi)}\right)\frac{\tilde{u}_i^{\mathrm{sc}}(\boldsymbol{x},\omega)}{\hat{Q}_{ij}(\varphi^s)\mathrm{sgn}(\cos(\varphi^s-\psi))S^3(\varphi^s)} \times \exp\big[-\mathrm{i}k_0|\boldsymbol{x}|f(\varphi^s) + \mathrm{i}(k_0 f(\varphi^s)+k)\hat{\boldsymbol{x}}\cdot\boldsymbol{y} - \mathrm{i}\frac{\pi}{4}\mathrm{sgn}(f''(\varphi^s))\big]d\omega d\psi \tag{3}$$

を得る. ただし,

$$F(\omega) = -u_0\frac{\sqrt{2\pi}\omega^2\exp(\mathrm{i}\omega t_s)}{2\exp(\omega^2/\omega_p^2)\omega_p^3}, \quad S(\varphi) = \frac{c_0}{c(\varphi)},$$
$$f(\varphi) = S(\varphi)|\cos(\varphi-\psi)|, \hat{Q}_{ij}(\varphi) = C_{ikpl}\hat{x}_k n_l P_{pj}(\varphi) \tag{4}$$

である. ここで, i は虚数単位, $(\ )'$ は微分を表し, φ^s は $f'(\varphi)=0$ を満たす解である. また, $C_{\alpha\beta}(\alpha,\beta=1,\dots,6)$ は弾性定数 C_{ikpl} のフォークト表記, ρ は密度, $c_0=\sqrt{C_{66}/\rho}$ であり, $k_0=\omega/c_0$ である. $c^{\mathrm{in}}(\psi)$, d_j はそれぞれ入射波の波速, 振動方向ベクトルの j 方向成分であり, $k=\omega/c^{\mathrm{in}}(\psi)$ である. sgn は符号関数, n_l は単位円周ベクトル $\boldsymbol{n}=(\cos\varphi,\sin\varphi)$ の l 方向成分, $\hat{x}_k$ は単位位置ベクトル $\hat{\boldsymbol{x}}=\boldsymbol{x}/|\boldsymbol{x}|=(\cos\psi,\sin\psi)$ の k 方向成分である. また, $c(\varphi)$ は qP 波の波速を表し, P_{pj} は, 散乱 qP 波の振動方向ベクトルの i 方向成分を E_i とし, $P_{pj}=E_pE_j$ である. u_0 は入射波振幅, ω_p, t_s はそれぞれ中心角周波数, ピーク時刻である. 式 (3) を精度良く計算することで欠陥形状および位置を再構成することができる.

5. 数値解析例

以下, 数値解析例を示す. 解析に用いたモデルは図 1 に示すように, 半径 a の空洞とし, 半径 $20a$ の円周を $\theta=5°$ から $10°$ 間隔で 36 分割した位置を散乱波形の観測点とした. まず, 図 2 に逆散乱解析に利用する散乱波形 $u_i^{\mathrm{sc}}(\boldsymbol{x},t)$ の一例を示す. 図 2(a), (b) は, それぞれ $0°\le\theta\le 90°$ 内の観測点で得られた無次元化時刻 c_0t/a に対する水平方向変位成分 u_1^{sc}/u_0, 鉛直方向変位成分 u_2^{sc}/u_0 を示している. また, 図 3 にオーステナイト系鋼材中を伝搬する波動の群速度曲線を示す. 本研究では面内波動問題を扱うため, qP 波, qS1 波を考えれば良いことに注意する. 図 2(a), (b) より, いずれも群速度が速い方向で散乱 qP 波が速く到達しており, オーステナイト系鋼材が持つ音響異方性の影響が表れていることが見て取れる. 次に, 合計 36 点の全周方向 ($0°\le\theta\le360°$), 合計 18 点の半周方向 ($0°\le\theta\le180°$) 内の受信点における散乱 qP 波の波形を用いて, 逆散乱解析を行った結果をそれぞれ図 4(a), (b) に示す. なお, 画像化する領域は図 1 中の $10a\times10a$ の領域とし, 図 4 中の破線は実際の空洞欠陥を表している. 図 4 (a) より, 空洞欠陥の位置および形状が精度良く再構成されている様子が見て取れる. また, 図 4 (b) より, 受信点の位置が半周方向 ($0°\le\theta\le180°$) に限定された場合にも入射波が直接当たる部位を精度良く再構成できていることを確認できる.

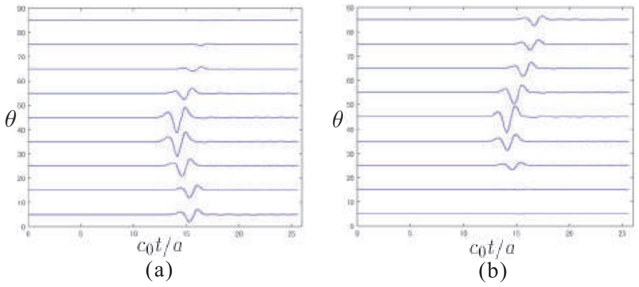

図 2 オーステナイト系鋼材中の空洞欠陥による散乱 qP 波の波形 (a) 水平方向変位成分 u_1^{sc}/u_0 (b) 鉛直方向変位成分 u_2^{sc}/u_0.

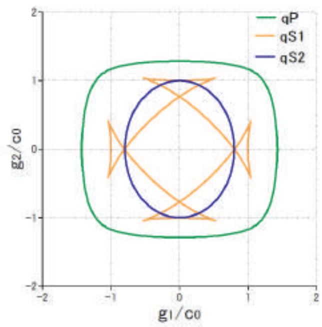

図 3 オーステナイト系鋼材中を伝搬する波動の群速度曲線.

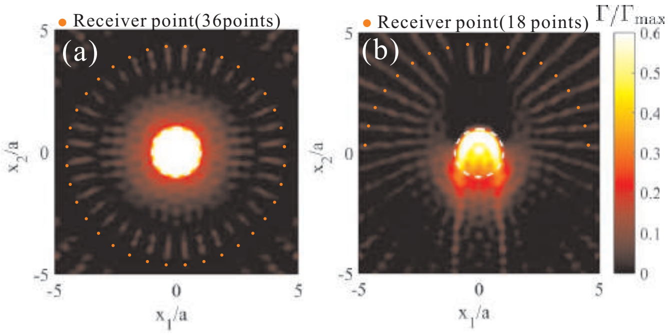

図 4 オーステナイト系鋼材中の空洞欠陥に対する逆散乱解析結果 (a) $0°\le\theta\le360°$ (b) $0°\le\theta\le180°$.

6. まとめと今後の課題

オーステナイト系鋼材中の欠陥に対する 2 次元順解析および逆散乱解析手法を開発した. CQBEM で求めた散乱波形を用いて逆散乱解析を行うことで, 空洞欠陥の位置および形状を精度良く再構成することができた. 今後は, 3 次元解析への拡張や実際の計測波形を用いた場合についても検討を行う予定である.

参考文献

1) 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.
2) A. Furukawa, T. Saitoh and S. Hirose: Convolution quadrature time-domain boundary element method for 2-D and 3-D elastodynamic analyses in general anisotropic elastic solids, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, Vol. 39, pp. 64-74, 2014.
3) 藤原千織, 永田泰昭, 廣瀬壮一:異方性厚板鋼に対する超音波探傷試験の遠方場解析, 応用力学論文集, Vol. 5, pp. 881-886, 2002.