曲面を有する材料に対する超音波斜角探傷試験のシミュレーション

1. はじめに

超音波探傷試験における欠陥検出精度の向上のために, 斜角探触子による超音波の伝播過程をモデル化し,欠陥か らの散乱エコーを高速かつ高精度に推定することを試みる. 実際の探触子から放射された超音波ビームはプロファイル を持つことから,本報告では斜角探触子による固体内入射 場をマルチガウシアンビーム(MGB)でモデル化し¹⁾,欠 陥による散乱波動場を境界要素法(BEM)によって求める. この固体内入射場や散乱場は,線形システム論²⁾に基づ く超音波計測系のモデリングに影響関数の一部として組み 込まれる.MGBを用いた斜角探触子のモデル化はすでに 発表されており³⁾,ここでは曲面を有する材料に本モデル を適用した場合の超音波の伝播・散乱シミュレーションを 報告する.

2. 計測系のモデリング

図-1に示すような固体中の欠陥に対して,斜角探触子を 用いた超音波探傷試験のモデル化を考える.ここでは超音 波ビーム径に比べて小さなサイズの欠陥を対象とし,ビー ムの伝播は近軸理論⁴⁾に従うものと仮定する.このとき, オシロスコープ等の計測器で記録される出力電圧 V(ω)は, 影響関数を用いて以下のように記述できる²⁾.

$$V(\omega) = \beta(\omega)M(\omega)P_1(\omega)C_1(\omega)T_1(\omega)A(\omega)$$
$$\times T_2(\omega)C_2(\omega)P_2(\omega)$$
(1)

ここで,下付きの数字は入射波伝播過程:1,散乱波伝播過 程:2を表している.式(1)中の $\beta(\omega)$ は計測装置の影響関 数, $M(\omega)$ は材料内を伝播するときの超音波減衰の影響, $P(\omega)$ は欠陥までの伝播距離, $C(\omega)$ は探触子による超音波 ビームの回折の影響, $T(\omega)$ は材料界面における平面波の 透過率, $A(\omega)$ は固体内の散乱の影響を表している.次節 において,個々の影響関数を具体的に記述する.



愛媛大学 正会員 中畑和之 東京工業大学 正会員 廣瀬壮一

2.1. 入射波動場

斜角探触子は,振動子 (エレメント径:*a*) からウエッジ (材質:アクリル,長さ \bar{z})を介して固体内に超音波を入射す る.この超音波が固体中のz方向に $\alpha = L$ or T 波として 伝播するとき,入射波動場はアクリル–固体界面の透過率 $T_{12}^{\alpha;P}$ を用いて以下のように表される⁵⁾.

$$u_{j}^{\alpha}(x,y,z) = \sum_{n=1}^{10} \frac{-(P_{0})_{n}}{i\omega\rho_{1}c_{1}^{P}} d_{j}^{\alpha}T_{12}^{\alpha;P} \frac{\sqrt{\det \mathbf{G}_{1}^{P}(0)}}{\sqrt{\det \mathbf{G}_{1}^{P}(\bar{z})}} \frac{\sqrt{\det \mathbf{G}_{2}^{\alpha}(0)}}{\sqrt{\det \mathbf{G}_{2}^{\alpha}(z)}}$$

$$\times \exp\left\{\frac{ik_{1}^{P}(\mathbf{x})^{T} \left[\mathbf{G}_{2}^{\alpha}(z)\right]^{-1}(\mathbf{x})}{2}\right\}$$

$$\times \exp\left\{ik_{1}^{P}\bar{z}\right\} \exp\left\{ik_{2}^{\alpha}z\right\},$$

$$[\mathbf{G}_{1}^{P}(0)]_{n} = \left(-\frac{ik_{1}^{P}a^{2}}{2B_{n}}\right)\mathbf{I}, \quad \mathbf{x}^{T} = \left(\begin{array}{c}x\\y\end{array}\right),$$

$$(P_{0})_{n} = \rho_{1}c_{1}^{P}v_{0}(\omega)A_{n} \qquad (2)$$

ここで, ρ_1, c_1^P はそれぞれ,ウエッジの密度,音速であり, k_1^P はウエッジ内の波数, $v_0(\omega)$ は振動子面上の速度分布を 表している. $G_1^p \geq G_2^{\alpha}$ は,それぞれウエッジ内と固体中 のビームプロファイルを表す関数³⁾である.また,材料の 曲面形状の影響は G_2^{α} のマトリクスにおいて考慮される. 式(2) は複素パラメータ $A_n \geq B_n^{(6)}$ を用いて,10個のガ ウシアンビームの重ね合わせによって探触子の放射場が表 現できることを示しており,高速計算が可能である.

ここで,式(1)で記述した影響関数と式(2)の対応関係を みると,伝播距離の関数 $P(\omega) = \exp\left\{ik_1^P \bar{z}\right\} \exp\left\{ik_2^\alpha z\right\}$, 界面における透過率 $T(\omega) = T_{12}^{\alpha;P}$ となることがわかる.また,ビームの回折による影響関数は以下のようになる.

$$C(\omega) = \sum_{n=1}^{10} \frac{(P_0)_n}{\rho_1 c_1^P v_0(\omega)} \frac{\sqrt{\det \mathbf{G}_1^P(0)}}{\sqrt{\det \mathbf{G}_1^P(\bar{z})}} \frac{\sqrt{\det \mathbf{G}_2^\alpha(0)}}{\sqrt{\det \mathbf{G}_2^\alpha(z)}}$$
$$\times \exp\left\{\frac{ik_1^P(\mathbf{x})^T \left[\mathbf{G}_2^\alpha(z)\right]^{-1}(\mathbf{x})}{2}\right\}$$
(3)

内径 50mm で厚肉 30mm の円管 $(c_2^L = 5900 \text{m/s}, c_2^T = 3200 \text{m/s}, \rho_2 = 7690 \text{kg/m}^3)$ に接地された斜角探触子 (ウ エッジ: $c_1^P = 2730 \text{m/s}, \rho_1 = 1120 \text{kg/m}^3)$ から放射された 波動場を図-2に示す.このとき,ウエッジ径 \overline{z} は 20mm に 設定し,入射角 $\theta_1^P = 30^\circ$ で固体内に放射された周波数 5MHz の入射 T 波と底面反射波のビームプロファイルを 示している.曲率を有する材料は,入射ビームが界面を透 過・反射するにつれてビームが広がっているのがわかる.



図-2 円管内の入射ビームプロファイル

2.2. 散乱波動場

ここでは、欠陥としてクラックを考える.固体内において入射波が与えられたとき、クラック S_C 上で表面力が0の境界条件を満たすように境界積分方程式を解くことによって、クラックの開口変位 Δu を求めることができる.次に、領域D内のクラックによる散乱波 $u^{sc}(y,\omega)$ は以下のような積分表現によって求められる.

$$u_n^{sc}(\boldsymbol{y},\omega) = \int_{S_C} C_{ijkl} U_{kn,l}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y},\omega) n_j(\boldsymbol{x},\omega) \Delta u_i(\boldsymbol{x},\omega) dS_x(4)$$

ここで, $U_{kn}(x, y, \omega)$ は等方弾性体の基本解, C_{ijkl} は弾性 定数テンソルである.また,式(4)において, n はクラッ ク表面上の単位法線ベクトル, $(\bullet)_{,l} = \partial(\bullet)/\partial x_l$ は点 x の l方向微分を表している.

探触子は欠陥代表寸法に比べて遠方に設置しているので, 基本解 U_{kn} に遠方近似が適用できる.ŷを探触子に向く単 位ベクトルとすると,遠方近似を導入した基本解は

$$U_{kn}^{far}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}, \omega) \approx \sum_{\alpha = L, T} A_{kn}^{\alpha}(\boldsymbol{x}, \hat{\boldsymbol{y}}, \omega) D(k_2^{\alpha} |\boldsymbol{y}|) \quad (5)$$

となる.ここで, A_{kn}^L , A_{kn}^T とDは次式で表される.

$$A_{kn}^{\alpha}(\boldsymbol{x}, \hat{\boldsymbol{y}}, \omega) = \begin{cases} \frac{\hat{y}_k \hat{y}_n}{4\pi\rho_2 (c_2^L)^2} \exp\{-ik_2^L \hat{\boldsymbol{y}} \cdot \boldsymbol{x}\} & \text{for } \alpha = L\\ \frac{\delta_{kn} - \hat{y}_k \hat{y}_n}{4\pi\rho_2 (c_2^T)^2} \exp\{-ik_2^T \hat{\boldsymbol{y}} \cdot \boldsymbol{x}\} & \text{for } \alpha = T \end{cases},\\ D(k_2^{\alpha} |\boldsymbol{y}|) = \frac{\exp(ik_2^{\alpha} |\boldsymbol{y}|)}{|\boldsymbol{y}|} \tag{6}$$

式(5)を式(4)に代入すると,遠方散乱波が求まる.

式 (7) は,遠方において散乱波は球面波として伝播することを表しており,その伝播項 $(D(k_2^{\alpha}|\mathbf{y}|))$ の振幅に相当するものを遠方散乱振幅 a^{α} と称する.この遠方散乱振幅と偏向ベクトル \hat{d}^{α} の内積をとったものが,式(1)における固体中の散乱項 $A(\omega)(=a^{\alpha}(\hat{\mathbf{y}},\omega)\cdot\hat{d}^{\alpha})$ となる.

2.3. パルスエコー法による斜角探傷試験

ここでは円管の上側曲面に固定した斜角探触子によって, 固体内の欠陥に対して T 波を入射し,散乱 T 波を同じ探 触子で受信する探傷法 (パルスエコー法)を考える.これ を式(1)のモデリングに適用すると,この計測系は

$$V(\omega) = \beta(\omega)M(\omega)\exp\{2ik_1^P \bar{z}\}\exp\{2ik_2^T z\}$$
$$\times \left[T_{12}^{T;P}C(\omega)\right]^2 \left\{\boldsymbol{a}^T \cdot \hat{\boldsymbol{d}}^T\right\} \left(\frac{-2\pi}{ik_2^T a^2} \frac{\rho_2 c_2^T}{\rho_1 c_1^P}\right) \quad (8)$$

となる.ここで, $T_{12}^{T:P}$ はウエッジにおける P 波の固体内 T 波への透過率, $C(\omega)$ は式 (3) で表されるビーム回折の 影響関数である.式 (8) において,用いる探触子に対して 波動の伝播項 $P(\omega)$, ビーム回折項 $C(\omega)$,透過率・反射率 $T(\omega)$,散乱項 $A(\omega)$ が数値解析的に決定できるので,計測 実験等から計測装置の影響関数 $\beta(\omega)$ と材料の波動減衰量 $M(\omega)$ がわかれば,斜角探傷試験において探触子の特性を 考慮した散乱エコーのシミュレーションが可能である.

3. シミュレーション結果

図-2に示す円管内部に長さ 2mm のクラックが存在する 場合に,斜角探傷法による欠陥エコー波形をシミュレーショ ンする.本来は参照実験等により求められる計測装置と材 料の波動減衰量の影響関数 $\beta * M$ はリッカー波³⁾ で代用し た.本解析で用いたリッカー波のピーク周波数は 5.0MHz に設定し,クラックによる散乱波は BEM によって求めた.



図-3 円管内のクラックからの散乱エコー

4. 結論

斜角探触子から放射された超音波がウエッジを介して曲 面を有する材料に伝播し,固体内の欠陥による散乱波が再 び探触子で受信されるまでの超音波計測系をモデル化した. 斜角探触子による入射波を MGB で表現し,欠陥による散 乱波を BEM を用いて求めることによって,斜角探触子の 特性を考慮したシミュレーションが可能となった.今後は 超音波計測実験を行い,本モデルの検証を行いたい.

参考文献

- 1) L.W. Schmerr; Materials Evalution, pp.882–888, 2000.
- R.B. Thompson and T.A. Gray; J. Acoust. Soc. Am., Vol.74, pp.1279–1290, 1983.
- 3) 中畑和之, 廣瀬壮一; 第11回超音波による非破壊評価シンポ ジウム講演論文集, pp.43-48, 2004.
- 4) L.W. Schmerr; Fundamentals of Ultrasonic Nondestructive Evaluation, Plenum Press, 1998.
- S.J. Song, H.J. Kim, H.J. Jung and Y.H. Kim; J. Korea Soc. Nondestruct. Testing, Vol.22, No.6, pp.627–636, 2002.
- J.J Wen and M.A. Breazeale; J. Acoust. Soc. Am., Vol.83, pp.1752–1756, 1988.