

センサー特性を考慮した散乱波動場の可視化と欠陥評価への応用

東北大学工学研究科 正員 北原道弘 学生員 中畑和之
三重県 市野太介

1. はじめに

固体中に円形空洞が存在しており、その位置と大きさは既知である場合を想定する。この円形空洞の背面からクラックがある長さまで進展したとき、このクラックの位置と長さを推定する問題を考える。背面クラックを有する円形空洞に向けて横波を入射すると、空洞表面からの反射波に続いて第2、第3の波が観測される。本研究では、これら後続の波の性質を可視化により明らかにすることにより、背面クラックの位置と長さの推定問題への適用性について検討した結果を報告する。

2. 後方散乱波の特性

背面クラックを有する円形空洞に横波を入射した場合、後方散乱波形は図-1のようになる。第1波目は円形空洞表面からの反射波である。後続の第2波、第3波はクラック面からの反射波とクラック端からの回折波が受信されたものと予想される。ここでは、散乱波の可視化を行うことにより、図-1中の後続の波の伝播経路を明確にした上で、背面クラックの幾何学量の推定を試みる。

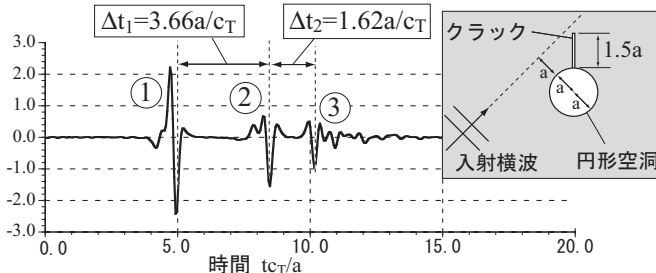


図-1 欠陥による後方散乱波形

3. 散乱波の積分表現

まず、固体内に存在する欠陥による散乱波動場の計算法を要約する。解析対象とする外部領域 D 内の入射波を u^{in} 、欠陥による散乱波を u^{sc} とすると、全変位場 u は次式のように定義される。

$$u_n(\mathbf{y}, \omega) = u_n^{in}(\mathbf{y}, \omega) + u_n^{sc}(\mathbf{y}, \omega) \quad (1)$$

ここで、 ω は角振動数である。以下、周波数領域で解を求めるにあたって、簡単のため $u(\mathbf{x}, \omega)$ を $u(\mathbf{x})$ と書くことにする。入射波 u^{in} が与えられたとき、円形空洞 S およびクラック S_c 上の境界積分方程式はそれぞれ次式のよう

に表される。

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}u_n(\mathbf{y}) &= u_n^{in}(\mathbf{y}) + \int_S T_{in}(\mathbf{x}_s, \mathbf{y})u_i(\mathbf{x}_s)dS_x \\ &+ \int_{S_c} T_{in}(\mathbf{x}_{s_c}, \mathbf{y})\Delta u_i(\mathbf{x}_{s_c})dS_x, \quad \mathbf{y} \in S \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} t_n^{in}(\mathbf{y}) &= n_m(\mathbf{y})C_{nmlk} \int_S T_{il,k}(\mathbf{x}_s, \mathbf{y})u_i(\mathbf{x}_s)dS_x \\ &+ n_m(\mathbf{y})C_{nmlk} \int_{S_c} T_{il,k}(\mathbf{x}_{s_c}, \mathbf{y})\Delta u_i(\mathbf{x}_{s_c})dS_x, \quad \mathbf{y} \in S_c \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 Δu はクラックの開口変位、 T は基本解に対する表面力で $T_{in} = C_{ijkl}U_{kn,l}(\mathbf{x}, \mathbf{y})n_j(\mathbf{x})$ と定義される。また、 t^{in} は入射波に対する表面力である。式 (2) と式 (3) を解けば、境界上の u と Δu が求まり、積分表現から欠陥近傍の全波動場 u が計算できる。

4. 入射波と時間域波形の計算法

境界積分方程式 (2) と (3) で用いる入射波として、探触子のエレメント径および振動面の曲率を考慮したマルチガウシアンビーム¹⁾を与えると、 u^{in} は次式のように表される。

$$\begin{aligned} u^{in}(\mathbf{y}) &= \frac{1}{-i\omega} \sum_{n=1}^{10} d^\alpha \frac{A_n q_0}{q(D_f)} \frac{\sqrt{G^\alpha(0)}\sqrt{q(D_f)}}{\sqrt{G^\alpha(y_2)}\sqrt{q(D_f) + \frac{k_f}{k_\alpha}y_2}} \\ &\times T^\alpha \exp(ik_f D_f) \exp(ik_\alpha y_2) \exp\left[i\frac{k_f(y_1)^2}{2G^\alpha(y_2)}\right] \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 D_f と T^α はそれぞれ入射波が水中を伝播した距離と液体から固体への伝達係数であり、 A_n と B_n は10個からなる定数²⁾、 G^α は液体-固体の形状に依存した関数である。また、 $q(D_f)$ は探触子の形状に依存した関数であり次式のように表される。

$$q(D_f) = q_0 + D_f, \quad q_0 = \frac{k_f d_0^2 F}{k_f d_0^2 + 2iF B_n} \quad (5)$$

ここで、 d_0 と F はそれぞれ、探触子のエレメント半径と振動面の曲率半径であり、本解析 ($d_0 = 10a$, $F = 150a$) におけるビームプロファイルは図-2のようになる。

また、横波の時間履歴を $f(t)$ としてリッカー波を採用する。このとき $f(t)$ は次式のようにになる。

$$f(t) = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \left(\alpha - \frac{1}{2} \right) e^{-\alpha}, \quad \alpha = \left(\frac{\pi(t - t_s)}{t_p} \right)^2 \quad (6)$$

キーワード：マルチガウシアンビーム、可視化、散乱波動場、欠陥評価

〒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/>

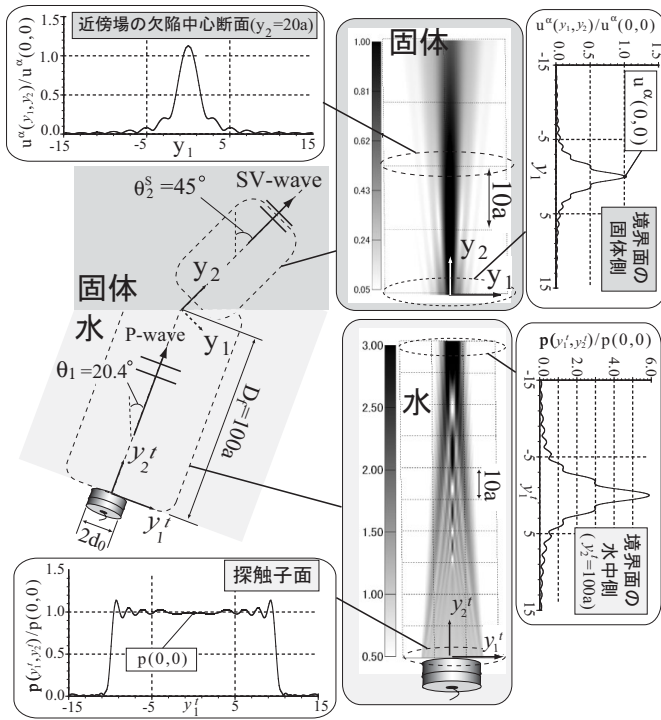


図-2 マルチガウシアンビームプロフィール

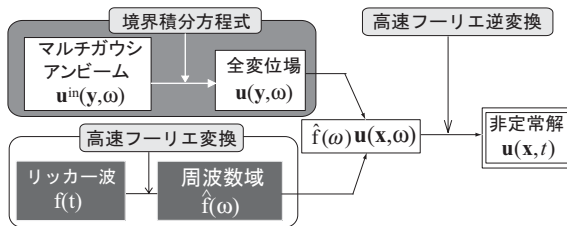


図-3 非定常解の計算過程

ここで、 t_s は時間域波形の最大振幅に対応する時間間隔であり、 t_p はフーリエ変換域で最大振幅を示すときの角振動数 ω_p に対応する時間である。本解析においては、 $t_p = T/50$ 、 $t_s = T/4$ (T は全解析時間) とした。本解析における非定常解 $u(y, t)$ の計算過程をまとめると、図-3 のようになる。

5. 近傍場の散乱波形の可視化

散乱波形を数値解析により可視化することを試みた。図-4 は欠陥の左下から横波を入射したときの散乱波形を時間間隔 $\Delta t = 0.0524(a/c_T)$ おきに解析した結果のうち、欠陥周辺 (近傍場) の波に着目して変位 u の絶対値をプロットしたものである。図-4(b) を見ると、図-1 の第1波目に対応する円形空洞表面からの反射波が確認できる。(c) ではクラックの下端から反射した波 (図-1 の第2波目に対応) が、また (f) ではクラック上端から回折した波 (図-1 の第3波目に対応) が確認できる。

6. 背面クラックの位置と長さの推定式

散乱波の伝播経路をまとめると、図-5 のようになる。図-5 より、第1波目と第2波目の時間差 Δt_1 および第2波目と第3波目の時間差 Δt_2 から次式のようなクラックの位置

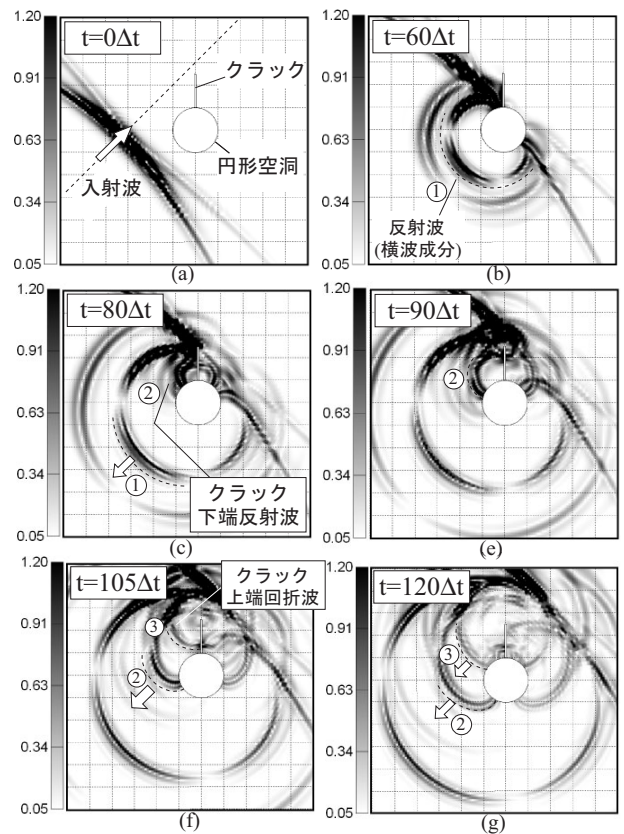


図-4 欠陥による散乱波形の可視化

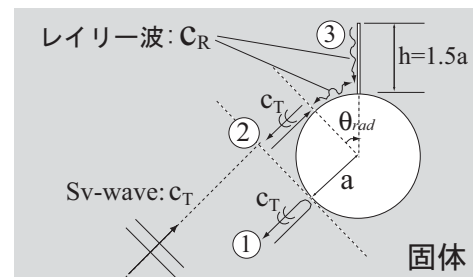


図-5 クラック長 h 、角度 θ_{rad} の欠陥からの散乱波を表す角度 $\bar{\theta}_{rad}$ と長さ $\bar{h}$ についての推定式が得られる。

$$\bar{\theta}_{rad} = \left(\frac{\Delta t_1}{2a} - \frac{1}{c_T} \right) c_R, \quad \bar{h} = c_R \Delta t_2 \quad (7)$$

ここで、 c_R はレイリー波の波速であり、 $c_R = 0.919c_T$ と近似している。実際に、数値解析により $h = 1.5a$ 、 $\theta_{rad} = 45$ 度の欠陥を想定して解析を行い、図-1 のように時間差 Δt_1 と Δt_2 を求めると、 $\Delta t_1 = 3.66a/c_T$ 、 $\Delta t_2 = 1.62a/c_T$ となる。これらの値を式 (7) に代入してクラックの位置を表す角度と長さを推定すると、 $\bar{\theta}_{rad} = 43.79$ 度、 $\bar{h} = 1.49a$ となり、実際の値とよく一致していることが分かる。

参考文献

- 1) L. W. Schmerr : A multigaussian ultrasonic beam model for high performance simulations on a personal computer, Materials Evaluation, pp.882-888, July, 2000.
- 2) J. J. Wen, M.A. Breazeale : A diffraction beam field expressed as the superposition of Gaussian beams, J. Acoust. Soc. Am, Vol.83, pp.1752-1756, 1988.