I－3　　散乱波動場の可視化を利用したクラックの定量化

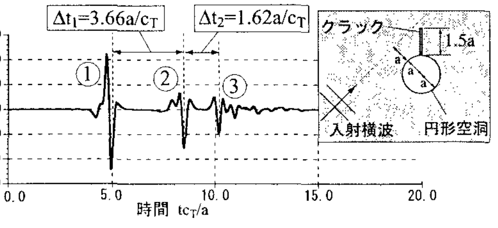
○東北大学大学院　学生員　市野太介
東北大学大学院　学生員　中畑和之
東北大学大学院　正　員　北原道弘

1.　はじめに

背面クラックをもつ円形空洞欠陥に向けて横波を入射させると，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，これらの後続の波の性質を可視化により明らかにし，背面クラックの位置および長さ推定に利用することを試みる．

2.　後方散乱波の特性

背面クラックを持つ円形空洞に横波を入射したときの後方散乱波形は，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波はクラック端から回折した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，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

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 $\boldsymbol{u}^{in}$，欠陥による散乱波を $\boldsymbol{u}^{sc}$ とすると，全変位場 $\boldsymbol{u}$ は次式のように定義される．

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

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 $\boldsymbol{u}(\boldsymbol{x},\omega)$ を $\boldsymbol{u}(\boldsymbol{x})$ と書くことにする．入射波 $\boldsymbol{u}^{in}$ が与えられたとき，円形空洞 S およびクラック S_c 上での境界積分方程式はそれぞれ次式のように表される．

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

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

ここで，$\Delta\boldsymbol{u}$ はクラックの開口変位，$\boldsymbol{T}$ は基本解に対する表面力で $T_{in} = C_{ijkl}U_{kn,l}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})n_j(\boldsymbol{x})$ と定義される．また，$\boldsymbol{t}^{in}$ は入射波に対する表面力である．式(2)と式(3)を解けば，境界上および欠陥近傍での全波動場 $\boldsymbol{u}$ が求まる．

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，$\boldsymbol{u}^{in}$ は次式のように表される．

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

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．

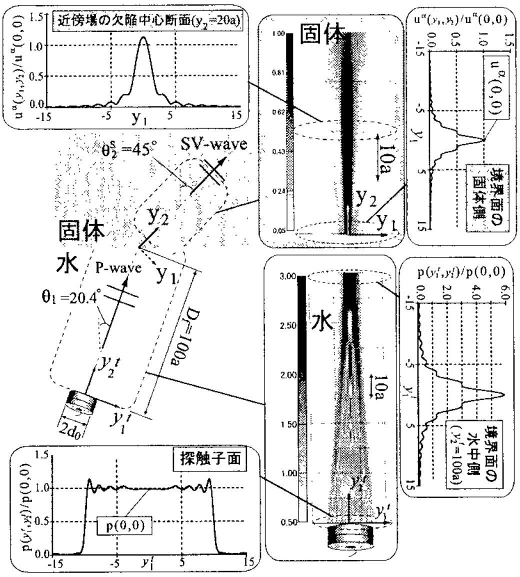
$$q(D_f) = q_0 + D_f, \quad q_0 = \frac{k_f d_0^2 F}{k_f d_0^2 + 2iFB_n} \qquad (5)$$

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．

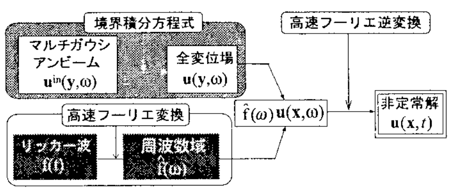
また，横波の時間履歴を $f(t)$ としてリッカー波を採用する．このとき $f(t)$ は次式のようになる．

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

ここで，t_s は時間域波形で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 $\boldsymbol{u}(\boldsymbol{y},t)$ の計算過程をまとめると，図–3のようになる．



図– 2 マルチガウシアンビームプロファイル



図– 3 非定常解の計算過程

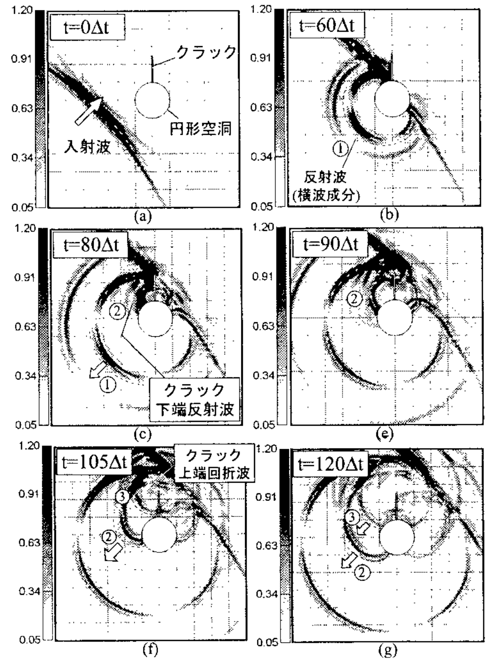
5. 近傍場での散乱波形の可視化

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 $\boldsymbol{u}$ の絶対値をプロットした．図–4(b) をみると，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．

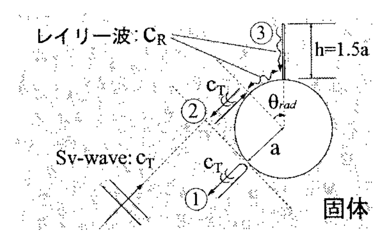
6. 背面クラックの位置と長さの推定式

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．

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



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

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 Evalution, 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.