

愛媛大学工学部 学生員 ○松田圭史  
愛媛大学工学部 正員 中畑和之

## 1. はじめに

構造部材の内部に存在する欠陥を非破壊検査する方法として超音波水浸探傷法がある。このときの欠陥エコーを高精度にシミュレーションするために、本研究では水浸探傷試験における超音波の全伝播経路をLTIシステム<sup>1)</sup>の概念を用いてモデリングする。LTIシステムに基づくシミュレーションでは、超音波伝搬過程における種々の影響関数はマルチガウシアンビーム<sup>2)</sup>(MGB)を用いて解析的に評価し、欠陥からの散乱波は境界要素法(BEM)によって数値計算する。ここでは、このビームモデルと数値解析を組み合わせたハイブリッド解析法について要約し、部材中に欠陥が複数存在する場合の欠陥エコーの計算例を示す。

## 2. ビームモデルとBEMのハイブリッド解析法

ここでは、水浸探触子から固体内に縦(L)波を送信し、欠陥によって散乱されたL波を受信するL-Lパルスエコー法をモデリングする。計測系の線形性を仮定すれば、オシロスコープ等の計測器で記録される出力電圧 $V(\omega)$ は、次の6つの影響関数を用いて記述できる(図-1)。

$$V(\omega) = B(\omega)M(\omega)P_{in}(\omega)C_{in}(\omega)T_{in}(\omega)A(\omega) \times T_{sc}(\omega)C_{sc}(\omega)P_{sc}(\omega) \quad (1)$$

ここで $B(\omega)$ は計測装置、 $M(\omega)$ は流体・固体内を伝播するときの超音波減衰、 $P(\omega)$ は伝播距離、 $C(\omega)$ は探触子による超音波ビームプロファイル、 $T(\omega)$ は流体-固体界面における超音波の屈折率、 $A(\omega)$ は固体内の散乱の各影響関数を表している。また、下付きの指標は超音波の送信過程:in, 受信過程:scを表している。

L-Lパルスエコー法の場合は送信と受信が同じ経

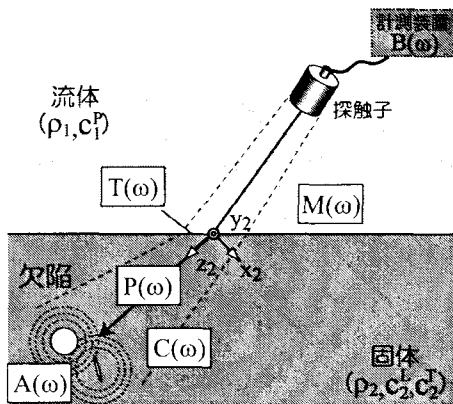


図-1 超音波計測系における影響関数

路を辿ることから、路程の対称性を考慮すれば、伝播距離 $P$ と超音波ビームプロファイルの影響関数 $C$ は次式で表される。

$$P_{in}(\omega) = P_{sc}(\omega) = \exp(ik_1^P D_f) \exp(ik_2^L D_s) \quad (2)$$

$$C_{in}(\omega) = C_{sc}(\omega) = \sum_{n=1}^{10} \frac{A_n}{n+1 + \left(\frac{2iB_n D_f}{k_1^P a^2}\right)} \frac{\sqrt{\det \mathbf{G}_2^L(0)}}{\sqrt{\det \mathbf{G}_2^L(D_s)}} \times \exp \left[ \frac{ik_1^P \mathbf{x}_2^T [\mathbf{G}_2^L(D_s)]^{-1} \mathbf{x}_2}{2} \right] \quad (3)$$

ここで、 $a$ は探触子の振動面の半径、 $k_1^P$ と $k_2^L$ はそれぞれ流体と固体の縦波の波数、 $D_f$ と $D_s$ はそれぞれ流体と固体の伝播距離を表している。また、式(3)の $A_n$ と $B_n$ はWen & Breazealeによって導出された複素数からなるビームパラメータ<sup>3)</sup>、 $\mathbf{G}_2^L$ は伝達マトリクスと呼ばれる $2 \times 2$ の行列、 $\mathbf{x}_2$ は $(x_2, y_2)$ を成分とするベクトル(図-1参照)である。次に、送信過程と受信過程における流体-固体界面の超音波の屈折率はそれぞれ次式となる。

$$T_{in}(\omega) = T_{12}^{L:P}, \quad T_{sc}(\omega) = T_{21}^{P:L} \quad (4)$$

最後に、欠陥による散乱の影響関数 $A$ は、縦波散乱振幅<sup>1)</sup> $\mathbf{a}^L$ と縦波の偏向ベクトル $\hat{\mathbf{d}}^L$ との内積で表される。

$$A(\omega) = \mathbf{a}^L \cdot \hat{\mathbf{d}}^L \quad (5)$$

本解析では、縦波散乱振幅は境界要素法(BEM)と散乱波の遠方表現を用いて数値計算する。以上の影響関数を式(1)に代入すると、水浸探傷試験における欠陥エコーの受信電圧 $V$ は次のように表すことができる。

$$V(\omega) = B(\omega)M(\omega) \left( \frac{-2}{ik_2^L a^2} \frac{\rho_2 c_2^L}{\rho_1 c_1^P} \right) \exp\{2ik_1^P D_f\} \times \exp\{2ik_2^L D_s\} \left[ T_{12}^{L:P} C_{in}(\omega) \right]^2 \left\{ \mathbf{a}^L \cdot \hat{\mathbf{d}}^L \right\} \quad (6)$$

ここで、 $\rho_1$ と $\rho_2$ はそれぞれ流体と固体の密度である。なお、式(6)において、 $T_{21}^{P:L}$ はスネル則の相反性を用いて $T_{12}^{L:P}$ で表現した。 $P(\omega)$ 、 $T(\omega)$ 、 $C(\omega)$ はMGBを用いて解析的に、 $A(\omega)$ はBEMによる数値計算から決定できるので、計測実験等から計測装置の影響関数 $B(\omega)$ と波動減衰量 $M(\omega)$ がわかれば、超音波計

測系の全プロセスを模擬した散乱エコーのシミュレーションが可能となる。次節では本ハイブリッド法を用いて、複数欠陥からの散乱エコーをシミュレーションする。

### 3. 散乱エコーの数値シミュレーション

図-2に示すように、ステンレス鋼 ( $c_2^L = 5900\text{m/s}$ ,  $\rho_2 = 7690\text{kg/m}^3$ ) の表面から深さ 14mm に高さ 2mm のき裂が 2 つ存在 (き裂間距離 4mm) しているものとし,  $a=5\text{mm}$  の水浸探触子から被検体内部に超音波を送信する。このとき, 入射角  $\theta_1^P = 10^\circ$ , 水中伝播距離  $D_F = 30\text{mm}$  とし, 固体内に L 波が  $\theta_2^L = 45^\circ$  で伝播するように設定した。図-2の結果から, 複数の波が現れており長い時間継続したエコーであることがわかる。一方, 比較のためにき裂が 1 つだけ存在する場合の散乱エコーを図-3の上側にプロットした。それぞれのき裂は, 図-2の2つのき裂のうちの1つと同位置である。このき裂単体からのエコーを単純に足し合わせると図-3の下側の波形となる。ここで, 図-2

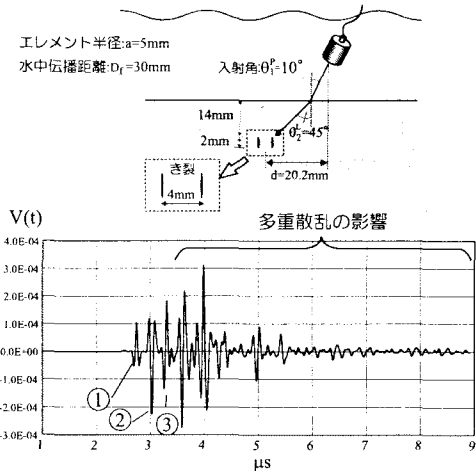


図-2 部材内部の複数き裂からの散乱エコー

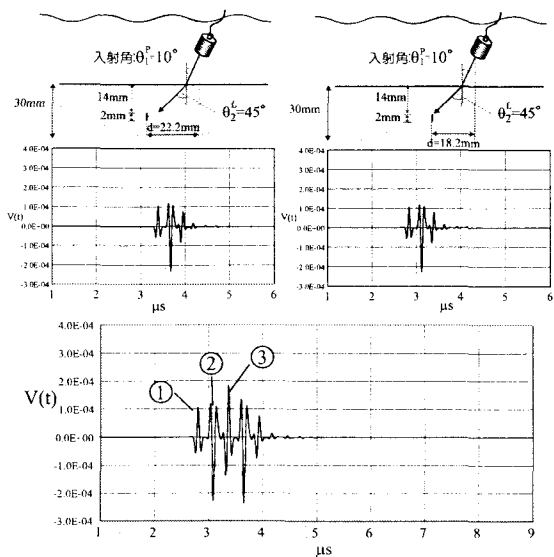


図-3 部材内部の単一き裂からの散乱エコーとその重ね合わせ

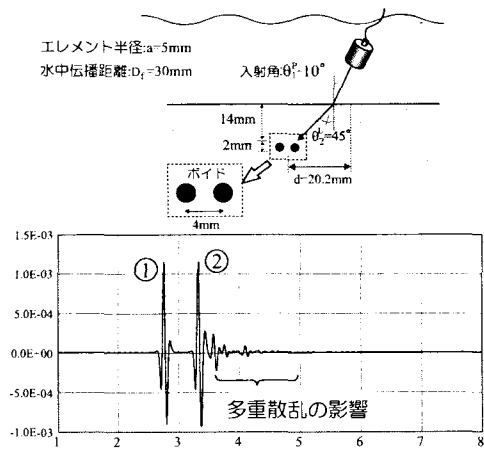


図-4 部材内部の複数ボイドからの散乱エコー

の波形と図-3の下側の波形を比べると, ①~③までの波形は振幅も位相も同じ波形であることがわかる。しかし, これ以後の時間に現れる波形は一致せず, しかも, 複数き裂からの散乱エコーは, き裂単体からのエコーよりも大きな振幅値を示している。以上のことから, き裂が近接して存在する場合には, 多重散乱の影響が顕著であることがわかった。

また, ステンレス鋼の表面から深さ 14mm の位置に直径 2mm の円形ボイドが 2 つ存在している場合の散乱エコーを図-4に示す。超音波送受信設定は図-2の場合と同様である。図-4では, 波形①と②の後に小さな振幅の波形が見られる。この後続の小さな波形の継続時間は図-2に示した2つのき裂の場合よりも短い, これも欠陥同士の多重散乱の影響である。

### 4. 結論

水浸探触子から発せられる超音波の伝播経路をマルチガウシアンビームでモデル化し, 固体内部の欠陥による散乱波についてはBEMを用いて求めることによってビームモデルと数値計算のハイブリッド解析を試みた。シミュレーション結果から欠陥が複数存在する場合の散乱エコーには多重散乱の影響が含まれることがわかった。本解析に示した欠陥配置では複数の円形ボイドより複数のき裂による多重散乱の影響の方が顕著であることが示された。しかしながら, き裂同士的位置を離れた場合や配置パターンによって多重散乱の影響は大きく変化すると予想されるため, これに関しては今後検討する必要がある。

### 参考文献

- 1) 中畑和之, 廣瀬壮一: 超音波水浸探傷試験のモデリングと欠陥による散乱シミュレーション, 応用力学論文集, Vol.7, pp.271-278, 2004.
- 2) Schmerr, L.W.: A multigaussian ultrasonic beam model for high performance simulation on a personal computer, *Materials Evaluation*, pp.882-888, 2000.
- 3) Wen, J.J. and Breazeale, M.A.: A diffraction beam field expressed as the superposition of Gaussian beams, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol.83(5), pp.1752-1756, 1988.