

# I-39

## 裏面クラック検出用超音波信号の生成

東海大学海洋学部 学生員 森口哲行  
東海大学海洋学部 正 員 北原道弘

### 1.はじめに

構造部材の裏面に存在するクラックを検出・特徴付けるための基礎実験と解析を行ったので報告する。解析手法に関しては前年度報告<sup>1)</sup>に詳しいので、ここでは参照信号を利用した実験と解析の相補関係について考え、一解析結果を示す。

### 2.問題の設定

厚さ  $h$  の部材の一方の側から、深さ  $a$  の表面クラックが入った場合を想定する。部材は均質、等方、線形な弾性体とし、クラックは表面に対し垂直であるとする (Fig.1 参照)。この部材を水槽に入れ、クラックが存在する面と反対側の水中から超音波を送・受信することにより、裏面クラックの深さ  $a$  を推定することを考える。このとき、部材のクラック側の底面には、クラック面を含め、空気層を作る。水中圧電型トランスデューサーにより超音波 (縦波 ( $L$ )) を発信し、トランスデューサーの角度を部材表面に対する法線から  $\theta=18.9^\circ$  に設定する (Fig.1)。この角度  $18.9^\circ$  は、水中を伝播する縦波が部材内でクラック面に対し  $45^\circ$  で入射する横波 ( $T$ ) にモード変換するように選ばれている。この入射横波がクラックとの相互作用を経て後方に散乱した波動を、発信と同一のトランスデューサーで受信し、受信された後方散乱波形からクラックの深さを推定したい。

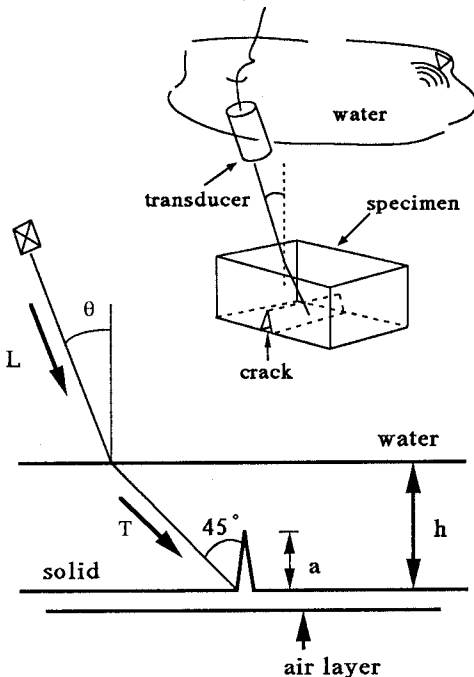


Fig.1 Surface-breaking crack in a plate

### 3.後方散乱波形の処理方法

実験と解析とのマッチングを取るために、まず、トランスデューサーから発信された超音波の伝播経路について考える。実験において、トランスデューサーで受信されたクラックからの後方散乱場は、周波数域で次のように表される。

$$Y_{exp}(\omega) = T_o H_w H_b H_{ws} H_{crack}^{exp} H_{sw} H_w T_r \quad (1)$$

ここに、 $T_o(\omega)$ : 出力側トランスデューサーの影響、 $H_w(\omega)$ : 超音波の水中経路の影響、 $H_b(\omega)$ : 水中における超音波ビーム特性の影響、 $H_{ws}(\omega)$ : 水→固体界面の影響、 $H_{crack}^{exp}(\omega)$ : 固体内における弾性波のクラックとの相互作用、 $H_{sw}(\omega)$ : 固体→水界面の影響、 $T_r(\omega)$ : 受信側トランスデューサーの影響、である。

いま、固体内における弾性波のクラックとの相互作用経路を除いて、実験に完全に対応する解析が出来たとする。このとき、解析的なトランスデューサーでの受信後方散乱場は次のように書ける。

$$Y_{theory}(\omega) = T_o H_w H_b H_{ws} H_{crack}^{BEM} H_{sw} H_w T_r \quad (2)$$

ここに、 $H_{crack}^{BEM}(\omega)$  は固体内での弾性波のクラックとの相互作用を表し、この項は積分方程式法により評価する。

後方散乱場 (1),(2) のデコンボリューションとコンボリューションについて考えるために、いま、部材コーナー部での反射波形を参照信号として選ぶ (Fig.2 参照)。このとき、トランスデューサーの位置、角度などは Fig.1 と全く同一の状態に配置されており、固体内のクラックが  $45^\circ$  のコーナーに置き換えられた点だけが異なる。このコーナーでの反射参照信号は次のように書ける。

$$X_{ref}(\omega) = T_o H_w H_b H_{ws} H_{cor} H_{sw} H_w T_r \quad (3)$$

ここで、 $H_{cor}(\omega)$  は固体内における弾性波のコーナー部での反射を表す。このとき、コーナーは固体-気体境界面である。

いま、コーナー部での反射を表す参照信号を用いて、実験と解析による後方散乱場のデコンボリューションを行うと次のようになる。

$$\frac{Y_{exp}(\omega)}{X_{ref}(\omega)} = \frac{H_{crack}^{exp}(\omega)}{H_{cor}(\omega)} \quad (4a)$$

$$\frac{Y_{theory}(\omega)}{X_{ref}(\omega)} = \frac{H_{crack}^{BEM}(\omega)}{H_{cor}(\omega)} \quad (4b)$$

上式 (4) のようにデコンボリューションされた量は、固体内における波動の伝播のみに関係している。上式 (4) の右辺の分母  $H_{cor}(\omega)$  は固体内でのコーナー部の反射を表し、具体的に書き下すと次のようになる (Fig.2 参照)。

$$H_{cor}(\omega) = X_{solid}^{in} R_{cor} X_{solid}^{back} = R_{cor} e^{2ik_T \sqrt{2}h} \quad (5)$$

ここに、 $X_{solid}^{in}$  と  $X_{solid}^{back}$  は弾性波のコーナーへの入射経路と反射経路であり、 $R_{cor}$  はコーナーでの反射率である。また、 $k_T$  は横波の波数、 $h$  は部材厚である。 $R_{cor}$  は、 $45^\circ$  の入射角を持つ固体-気体境界面での横波の反射率を  $R_{sa}^T(45^\circ)$  としたとき、次のように書ける (Fig.2 参照)。

$$R_{cor} = R_{sa}^T(45^\circ) R_{sa}^T(45^\circ) \quad (6)$$

横波の反射率  $R_{sa}^T(45^\circ)$  は半無限境界面での値を用いてよいから、値を書き下すことが可能であり、よって  $R_{cor}$  は解析的に評価できる。

以後、式 (4b) を次のように変形して利用する。

$$Y_{theory}(\omega) = \frac{X_{ref}(\omega)}{H_{cor}(\omega)} H_{crack}^{BEM}(\omega) \quad (7)$$

これは解析値  $H_{crack}^{BEM}$  をコンボリューション型に修正したもので、式 (3) からわかるように係数  $X_{ref}/H_{cor}$  は主に超音波の水中経路に関係した項を表しており、参照信号の水中経路  $X_{ref}/H_{cor}$  と固体内の解析値  $H_{crack}^{BEM}$  とのコンボリューションとなっている。実験値  $Y_{exp}(\omega)$  との対比を考えると、以後、式 (7) の意味における後方散乱場を、便宜上、単に解析値と呼ぶことにする。

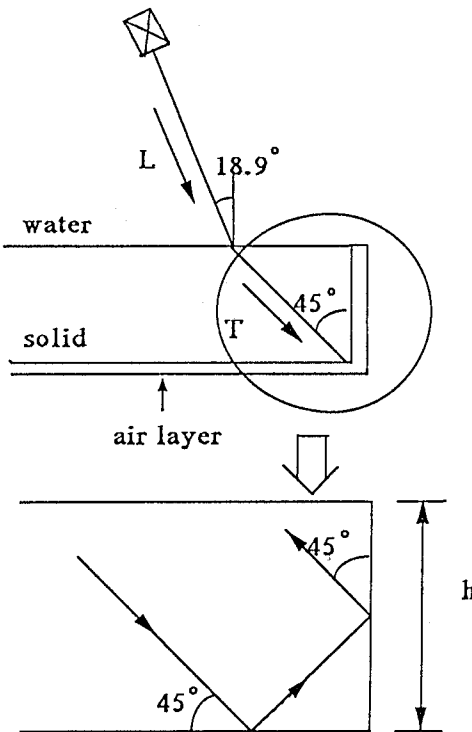


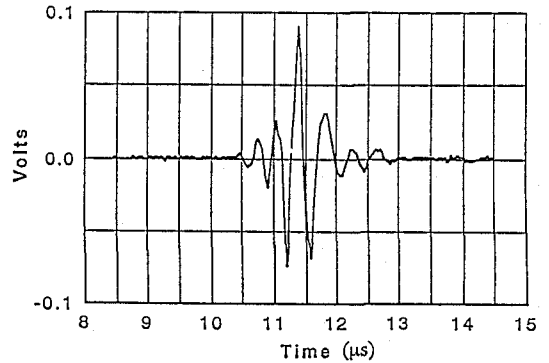
Fig.2 Corner reflection of the reference signal

#### 4. 解析値と実験値の比較

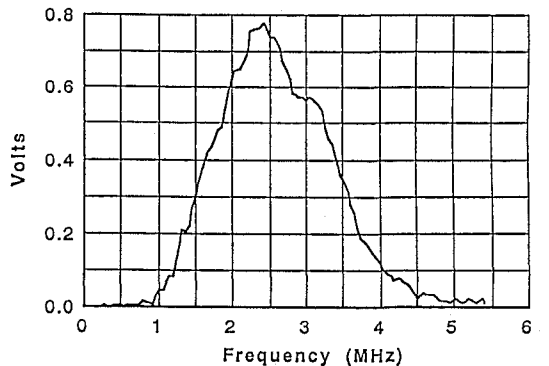
Fig.1 に示した部材裏面に垂直な 4 通りの深さ  $a=0.67\text{mm}$ ,  $1.05\text{mm}$ ,  $1.49\text{mm}$ ,  $2.19\text{mm}$  のクラックとノッチの場合について、解析値と実験値を比較した。実験で使った人工クラックは実際にはノッチに近く、ノッチに対する解析値のほうが実験波形により一致した。

#### 5. 解析値の応用

実験値との照合を経た解析値をもとにして超音波知識ベースを開発することにより、欠陥の検出・特徴付けに貢献することが考えられる。式 (7) に基づく解析値はシンセティックなデータを知識ベースとして供給し得る。Fig.3 に、深さ  $1.2\text{mm}$  のノッチの場合に対する後方散乱波形の一例を示す。



(a) Time domain



(b) Frequency domain

Fig.3 Convolved BEM data for 1.2mm notch

#### 参考文献

- 1) 北原道弘；超音波による部材裏面クラック検出のための解析と実験，第 45 回年講概要集，I-102,1990。