

I-28

計測波形を用いた複数欠陥の形状再生

○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

超音波パルスエコー実験による欠陥からの散乱波を用いて、この散乱波が有する情報をもとに構造部材内部に存在する欠陥像の再構成を行った。本報告は小泉ら¹⁾による研究を継続して、複数の欠陥が存在する材料への応用を検討したものである。欠陥の大凡の位置は探知しているものとし、欠陥近傍の任意な一点に向けて超音波を送受信したときの欠陥像の再生結果を報告する。

2. 線形化逆散乱法

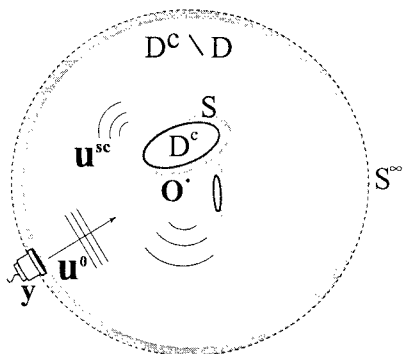


図 1 超音波の送受信

図-1に示すように均質等方な2次元無限弾性体D内に空洞 D^c が存在しているものとする。ここで扱う逆散乱問題は、遠方の測定境界面 S^∞ 上に設置した探触子によって縦波入射波 u^0 を送信し、欠陥空洞 D^c によって散乱された縦波散乱波 u^{sc} を同じ位置の探触子で受信するL-Lパルスエコー法を採用し、この散乱波から欠陥の形状を推定しようとするものである。

2.1 ボルン逆解析

固体内への超音波の入射波は、近似的に平面縦波であると仮定する。ボルン近似を導入すれば散乱波の計測点における縦波成分の散乱振幅は次のようになる。

$$A_m(k_L, \hat{y}) = i \frac{u^0 \hat{y}_m k_L^2}{2} \int_D \Gamma(x) e^{-2ik_L \hat{y} \cdot x} dV \quad (1)$$

ここで $\Gamma(x)$ は特性関数と呼ばれ、欠陥内部でのみ値を有する関数である。また、 u^0 は入射波の振幅、 k_L は縦波の波数、 $\hat{y}$ は探触子の方向を表す単位ベクトルである。上式右辺の積分は $K = 2k_L \hat{y}$ と置いたとき、特性関数 Γ の K -空間におけるフーリエ変換像であることから、欠陥の位置と形状を表す特性関数 $\Gamma(x)$ は散乱振幅 $A_m \hat{y}_m$ の逆フーリエ変換として次のように決めることができる。

$$\Gamma(x) = -i \frac{2}{\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{1}{u^0 k_L^2} \hat{y}_m A_m(k_L, \hat{y}) \times e^{2ik_L \hat{y} \cdot x} k_L dk_L d\hat{y} \quad (2)$$

2.2 キルヒホフ逆解析

キルヒホフ近似を導入して線形化した縦波の散乱振幅は次式で表される。

$$A_m(k_L, \hat{y}) = -\frac{u^0 \hat{y}_m k_L}{2} \int_D \gamma_H(x) e^{-2ik_L \hat{y} \cdot x} dV \quad (3)$$

ここで $\gamma_H(x)$ は特異関数と呼ばれ、入射波が直接到達する境界部分のみで値をとる関数である。特異関数 $\gamma_H(x)$ も同様に K -空間の逆フーリエ変換により再構成することができる。

$$\gamma_H(x) = -\frac{2}{\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{1}{u^0 k_L} \hat{y}_m A_m(k_L, \hat{y}) \times e^{2ik_L \hat{y} \cdot x} k_L dk_L d\hat{y} \quad (4)$$

以下、式(2)と式(4)を基に、計測された縦波散乱振幅 $\hat{y}_m A_m(k_L, \hat{y})$ を用いて欠陥形状を再構成する。

3. 超音波モデル実験

3.1 実験装置と欠陥モデル

本研究では図-2に示すような実験装置を用いて水浸超音波パルスエコー実験を行った。パルスレシーバーから発せられたパルス状の電気信号は水浸探触子を駆動して、水中に超音波を発振する。この超音波は水を介して供試体内に透過し固体内を伝播する。供試体内の空洞によって散乱された波動は、再び水を介して同じ探触子で受振され、電気信号に変換される。その後、ダイプレクサーによって分波された信号はパルスレシーバーによって増幅されて、デジタルオシロスコープで時間波形として記録される。さらに、LANを介して波形データをパソコンへ送信し処理する。

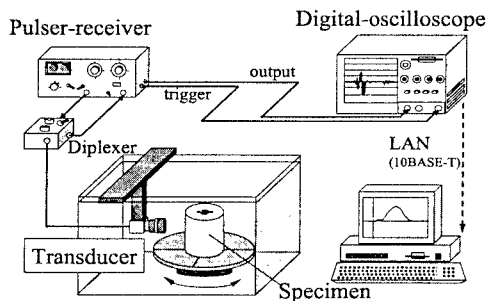


図 2 水浸超音波パルスエコー実験

供試体は図-3に示すように円筒形のアルミニウムの中心に、欠陥と仮定した空洞を空けたものを用いた。欠陥モデルとしてA,Bの2種類を用意した。モデルAは単一の空洞、モデルBは円形とノッチ状の2つの空洞からなるものである。

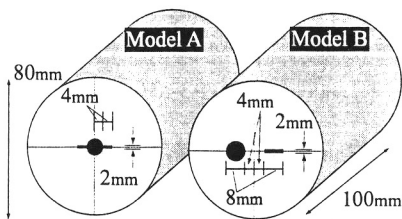


図 3 供試体モデル A とモデル B

探触子は円筒側面に設置し、円筒の中心軸に焦点を固定させて超音波を発振する。円筒供試体をセンサー走査治具の回転台に乗せ、 10° 間隔で一定面内を一回転させて波形を検出した。探触子はPanametrics 製水浸用 ($\phi 25\text{mm}$, 中心周波数 1MHz) を使用した。

3.2 波形データ処理

受信散乱波を基に式 (2) あるいは式 (4) を用いて散乱体形状を再成するためには、探触子の影響や固体内以外の超音波の伝播経路の影響を取り除き、固体内における散乱波を抽出する必要がある。計測系の線形性を仮定すると、図-4の左図に示した受信散乱波形 O^{sc} は周波数域において次のように表現できる。

$$O^{sc}(f) = I(f)T(f)W(f)H_{ws}(f)E^{sc}(f) \times H_{sw}(f)W(f)R(f) \quad (5)$$

ここで、 I は入力電圧、 T は (送信) 探触子、 W は水、 H_{ws} は水から固体、 E^{sc} は固体内の空洞からの散乱、 H_{sw} は固体から水、 R は (受信) 探触子の周波数域における伝達特性を表している。いま、図-4の右図に示したように同じ材質、外半径の円筒形の供試体を用いて、参照波形 O^{ref} を計測する。この参照波形は周波数域で次のように書ける。

$$O^{ref}(f) = I(f)T(f)W(f)H_{ws}(f)E^{ref}(f) \times H_{sw}(f)W(f)R(f) \quad (6)$$

ここで E^{ref} は弾性体と空気が接する平面境界に平面弾性波が入射した場合の反射係数に相当し、周波数に無関係な定数として解析的に決定できる量である。

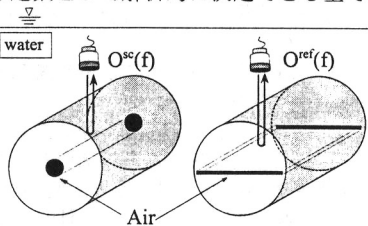


図 4 散乱波形 $O^{sc}(f)$ と参照波形 $O^{ref}(f)$

このように計測で得られた受信散乱波形 (5) を参照波形 (6) で除して、固体内における空洞からの散乱波形を次のように得る。

$$E^{sc}(f) = E^{ref} \frac{O^{sc}(f)}{O^{ref}(f)} \quad (7)$$

上記 $E^{sc}(f)$ は弾性体中の空洞に縦波が入射されたときの散乱振幅に相当し、形状再構成式 (2) 又は (4) 中の $\hat{y}_m A_m(k_L, \hat{y})$ として利用できる。

4. 再構成結果

計測による散乱波形を用いたボルン逆解析とキルヒホフ逆解析による再構成を以下に示す。図-5にモデル A の、図-6にモデル B の再構成結果を示した。複数からなる欠陥が存在する場合でも、比較的良好にその形状を再現できることが明らかになった。

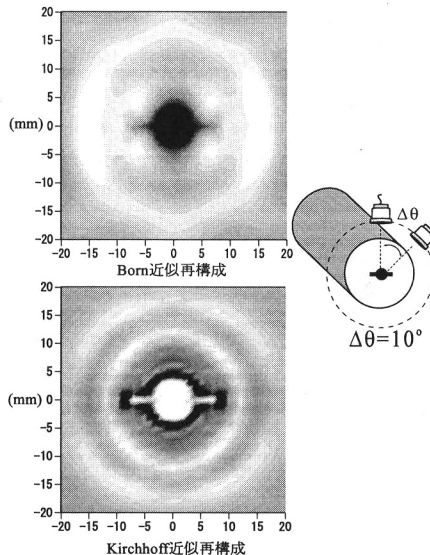


図 5 モデル A の再構成結果

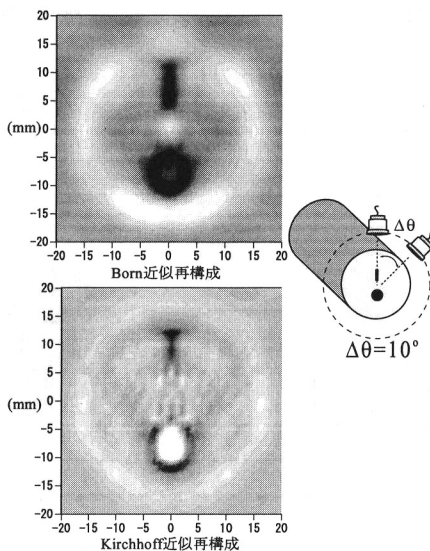


図 6 モデル B の再構成結果

参考文献

- 1) 小泉、中畑、北原：計測による後方散乱波を用いた欠陥形状の再構成、土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集、pp.76-77.1999