

線形化逆散乱解析法への計測波形の適用

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

欠陥から散乱された超音波を用いて、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試みた。ここではボルン近似とキルヒホフ近似に基づく線形化逆散乱解析法¹⁾に、実験による散乱波形の計測データを適用して欠陥像の再生を行った。前半で線形化逆散乱解析法の要点を述べ、後半で計測による散乱波形を線形化逆散乱解析法に適用するためのデータ処理法と人工欠陥モデルの形状再構成結果について報告する。

2. 線形化逆散乱解析法

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、遠方の測定点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して、この散乱波から逆に欠陥の形状を推定しようとするものである。ここでは縦波を送信して、欠陥から後方に散乱された縦波を受信する L-L パルスエコー法を採用した。

(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、計測点で得られる縦波成分の散乱振幅 $A_m(k_L, \hat{y})$ を用いて、欠陥の位置と形状を表す特性関数 $\Gamma(\mathbf{x})$ は次のように再生される。

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

ここで、 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。この特性関数 $\Gamma(\mathbf{x})$ は欠陥内部でのみ値を有する関数である。

(2) キルヒホフ逆解析

キルヒホフ近似によって、欠陥を表す特異関数は後方縦波散乱波を基に次のように求められる。

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

ここで特異関数 $\gamma_H(\mathbf{x})$ は入射波が直接到達する欠陥の境界部分のみで値を有する関数である。以下、式(1)と式(2)に、実験によって計測された縦波散乱振幅 $\hat{y}_m A_m(k_L, \hat{y})$ を適用して欠陥形状を再構成する。

3. 超音波モデル実験

(1) 実験概要

図-1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。パルサーレーサ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。供試体内の人工欠陥によって散乱された波動は、再び同じ探触子で受振され電気信号に変換される。ダイプレクサーによって分波された信号はパルサーレーサ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。最終的に LAN を介して波形データをパソコンへ送信し処理する。ここで供試体は円筒形のアルミニウムに、欠陥と仮定した空洞を空けたものを用いた。円筒供試体をセンサー走査治具の回転台に乗せ、探触子を円筒側面に設置し、円筒の中心軸に焦点を固定させて 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。

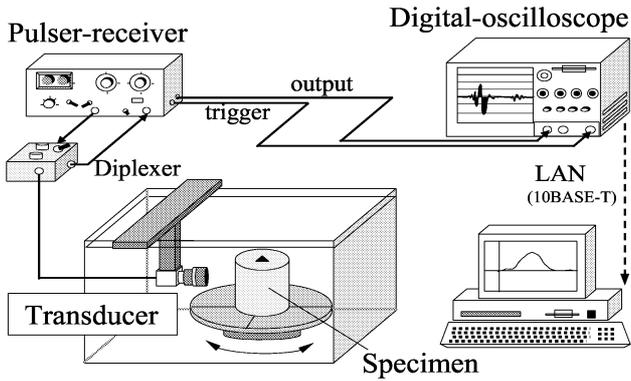


図-1 水浸超音波パルスエコー実験

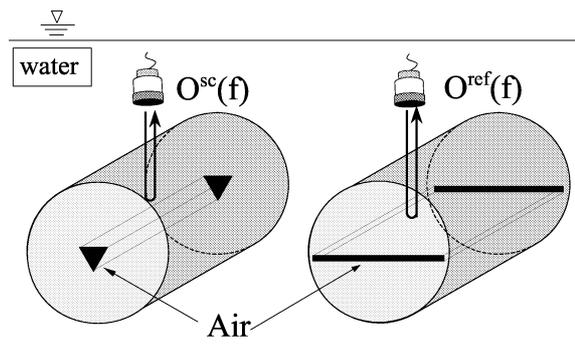


図-2 散乱波形 $O^{sc}(f)$ と参照波形 $O^{ref}(f)$

(2) 波形データ処理

受信散乱波を基に式 (1) あるいは式 (2) を用いて散乱体形状を再構成するためには、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²⁾を仮定すると、図-2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。

$$O^{sc}(f) = I(f)T(f)W(f)H_{ws}(f)E^{sc}(f)H_{sw}(f)W(f)R(f) \quad (3)$$

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-2の右図に示したように同じ材質、外半径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。

$$O^{ref}(f) = I(f)T(f)W(f)H_{ws}(f)E^{ref}H_{sw}(f)W(f)R(f) \quad (4)$$

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。このように計測で得られた受信散乱波形 (3) を参照波形 (4) 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。

$$A_m(k_L, \hat{y}) \simeq E^{sc}(f) = E^{ref} \frac{O^{sc}(f)}{O^{ref}(f)} \quad (5)$$

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。

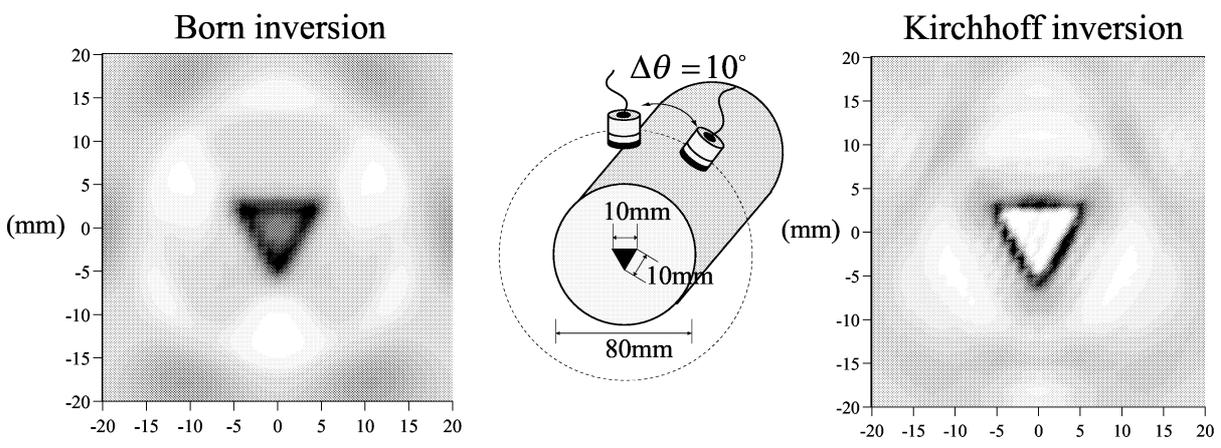


図-3 ボルン逆解析(左)とキルヒホフ逆解析(右)による欠陥形状の再構成

参考文献

1) 北原道弘, 中畑和之, 廣瀬壮一: 線形化逆散乱解析法の欠陥位置と形状再構成能に関する一検討, 応用力学論文集, Vol.1, pp.167-174, 1998.
 2) Schmerr, L.W.: *Fundamentals of Ultrasonic Nondestructive Evaluation*, Plenum Press, New York, 1998.