

計測による後方散乱波を用いた欠陥形状の再構成

○東北大学工学部 学生員 小泉勝志郎
 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

欠陥によって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行いたい。ここでは、ボルン近似とキルヒホフ近似に基づいた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構成を行った結果を報告する。前半部でこの手法を要約し、後半部で水浸超音波実験による計測波形の処理法と再構成結果について述べる。

2. 線形化逆散乱解析手法

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。空洞の境界S上では応力が零である。ここで扱う逆散乱問題とは、遠方の測定境界面S[∞]上に設置した探触子によって入射波u⁰を送信し、空洞D^cによって散乱された散乱波u^{sc}を同じ探触子で受信して、この散乱波から空洞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パルスエコー法を採用した。

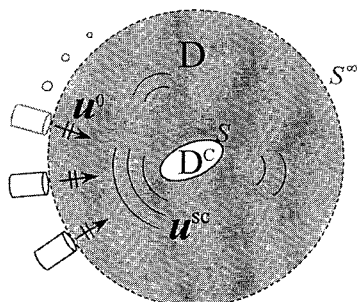


図-1 超音波の送受信

2.1 ボルン逆解析

計測点を十分遠方に設定すれば、欠陥への入射波は近似的に平面縦波と仮定できる。ボルン近似を導入すれば、散乱波計測点における縦波成分の散乱振幅は次のようになる。

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

ここで $\Gamma(\mathbf{x})$ 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、 k_L は縦波の波数であり、 $\hat{y}$ 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 $\Gamma(\mathbf{x})$ 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。

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

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。

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

ここで $\gamma_H(\mathbf{x})$ 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 $\gamma_H(\mathbf{x})$ も次のような逆フーリエ変換により再構成することができる。

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

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 実験概要

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。パルスレーザ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、パルスレーザ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、インターフェースを通じて波形データをコンピュータ処理する。

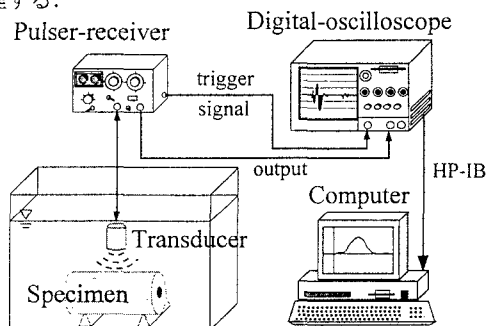


図-2 水浸超音波パルスエコー実験

探触子は水浸型(ϕ 15mm, 公称中心周波数2MHz)を使用した。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直径10mmの円筒空洞を空けたものを用いた。なお、アルミニウムの材料定数は、縦波速度 c_L : 6300m/sec, 横波速度 c_T : 3040m/sec, 密度 ρ : 2690kg/m³である。超音波の送受信は探触子を円筒側面の中央に垂直に向けて行った。円筒供試体を回転台に乗せ、10°間隔で一定面内を一回転させて波形を検出した。この場合、波動場は正確には3次元とな

るが、円筒軸に垂直な面内で計測を行い、また探触子と超音波ビームの直径等を選定し、計測面内では2次元波動場に近くなるよう配慮した。

3.2 波形データ処理

2.で示した逆解析手法は無限弾性体中に存在する空洞に対して誘導されたものである。しかし、本実験における空洞は水中に置かれた有限な供試体内にあり、また、ここで利用する超音波は電圧素子により電圧から力学的な波動へと変換されたものである。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-3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-3の右図に示したように同じ材質、同じ外半径を有する半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。

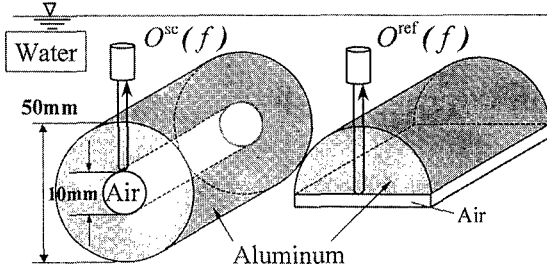


図-3 散乱波形(左)と参照波形(右)

図-4(a)に実験で計測された受信散乱波形 $O^{sc}(f)$ 、図-4(b)に参照波形 $O^{ref}(f)$ を示す。探触子の公称中心周波数は2MHzであるが、高周波側に若干シフトしたピークをもつ波形が受信されていることがわかる。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。

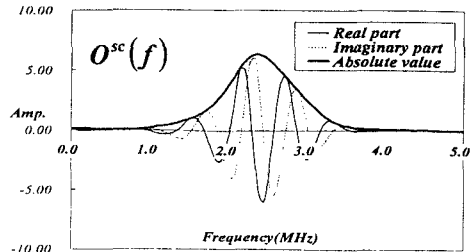


図-4(a) 計測散乱波形 $O^{sc}(f)$

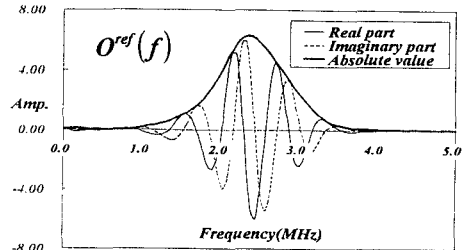


図-4(b) 計測参照波形 $O^{ref}(f)$

4. 後方散乱波による再構成結果

計測による散乱波形を用いたボルン逆解析による再構成結果の一例を図-5に示した。計測波形を用いた形状再構成結果は空洞の形状を比較的よく再現していることが分かる。

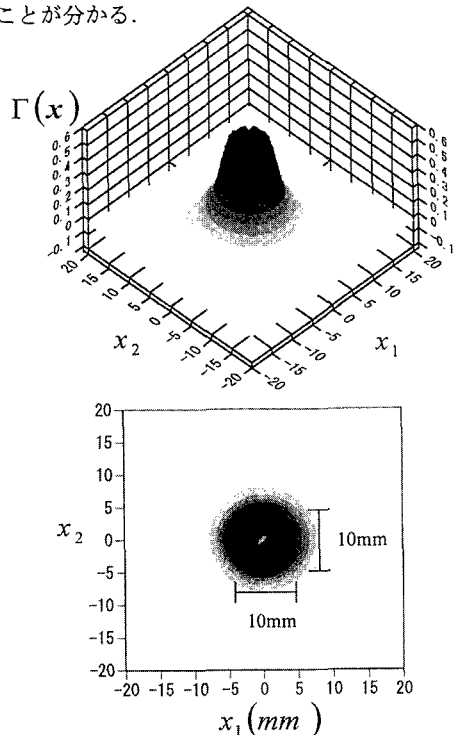


図-5 計測散乱波形によるボルン再構成結果

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