

計測波形による欠陥形状の再生と使用周波数帯域に関する考察

Shape Reconstruction of Defects and Effect of Frequency Range in Measurement

中畑和之*・北原道弘**

Kazuyuki NAKAHATA and Michihiro KITAHARA

*学生員 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉06)

**正会員 工博 東北大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉06)

The linearized inverse scattering methods are applied to the shape reconstruction of defects in elastic body. The linearized methods are based on Born and Kirchhoff approximations for unknown displacement fields in the integral representation. To show the versatility of the methods, the experimental measurement is performed to collect the scattered waveforms from defects. The results show that the shape of defects can be reconstructed by the linearized methods with processed waveforms from ultrasonic measurement. It is shown that the scattered wave component in the low frequency range is important for the shape reconstruction.

Key Words : *ultrasonics, Born inversion, Kirchhoff inversion, measurement, backscattered waveform*

1. はじめに

構造部材の健全度を評価し余寿命を推定しようとする場合、部材内部に存在する欠陥の幾何学的諸量を精度よく推定する手法の開発が求められている。構造部材内部に存在する欠陥の形状を、超音波を利用して非破壊かつ定量的に推定する手法の一つとして、弾性波動場に対する線形化逆散乱解析法¹⁻⁴⁾の適用が試みられている。この手法は、欠陥種類の識別をも考慮しながらボルン近似とキルヒホフ近似に基づいて弾性逆散乱問題を定式化したものであり、限られた計測点情報からの形状再構成の検討⁵⁾等がなされている。

超音波を用いて内部状態を可視化しようとする試みはスカラー波動場の問題においても行われており、横山等⁶⁾による超音波回折トモグラフィーや加川等⁷⁾による超音波CTに関する研究等がある。また、構造部材内に存在する欠陥の検出を目的として超音波法を適用した研究として、超音波エコーに波形解析を施した菅原等⁸⁾の研究、開口合成法を基にした岩館等⁹⁾の研究がある。

本研究は、欠陥の詳細位置の確定と欠陥形状の再構成能に関する数値解析的検討⁴⁾を計測散乱波形データを用いた場合に拡張したものであり、参照波形を利用して計測波形から欠陥による散乱波形を抽出し、散乱波形を形状再構成式に適用することにより、欠陥位置と欠陥形状の再生を試みる。また、欠陥形状の再生に及ぼす計測波形の周波数帯域の効果についても検討を行う。なお、本研究における超音波計測は計測散乱波形に対する形状再構成手法の再生能を確認するためのものであり、作成した模擬欠陥の形状と大きさは必ずしも現実の欠陥と一致していない。

2. 問題の設定と線形化逆散乱解析法

欠陥再構成のための線形化逆散乱解析法の理論はすでに発表¹⁻⁴⁾されているが、後に計測波形を適用する際に形状再構成式が必要となるため、ここでは簡単に手法を要約しておく。本論文で考える欠陥配置と弾性超音波の送受信概要を図-1に示す。ここでは均質等方な2次元無限弾性体 D 内に空洞状の欠陥 D^c が存在しているものとする。欠陥の大凡の位置が推定できているものと仮定し、遠方の測定境界面 S^∞ 上の y 点に設置した探触子によって縦波入射波 u^0 を欠陥近傍の点 O に向けて送信する。欠陥 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。欠陥を取り囲むように多点で散乱波形を計測することにより、受信散乱波形から逆に欠陥の形状を推定したい。

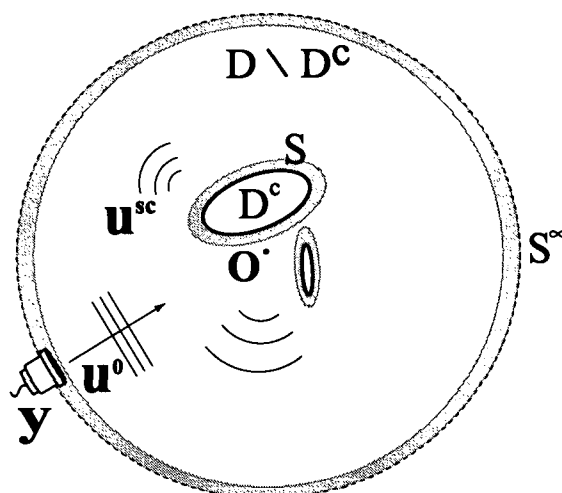


図-1 超音波の送受信

実際の超音波計測において、波形は欠陥の寸法に比べて遠方で計測されることが多い。計測点 y は欠陥から十分離れた位置とすれば、欠陥への入射波 u^0 は近似的に次のような平面縦波と仮定できる。

$$u^0(x) = u^0 \hat{p}^0 e^{i k_L^0 \hat{p}^0 \cdot x} \quad (1)$$

ここで、 u^0 は振幅、 k_L^0 は入射縦波の波数、 $\hat{p}^0$ は入射波の進行方向を表す単位ベクトルである。図-1に示す状況において、原点 O から計測点 y に向く単位ベクトルを $\hat{y}$ とすると、入射波動の送信方向は $-\hat{y}$ であり、 $\hat{p}^0 = -\hat{y}$ となる。

さらに、欠陥 D^c によって散乱された波動は、後方散乱縦波と横波が分離できる程度に遠方で計測されるとすれば、遠方散乱波の表現は2次元問題の場合、次のようになる。

$$u_m^{sc:far}(y) = D(k_L|y)|A_m(\hat{y}) + D(k_T|y)|B_m(\hat{y}) \quad (2)$$

ここで $D(z) = \sqrt{2/(\pi z)} e^{i(z-\pi/4)}$ は円筒波の遠方表現であり、また A_m と B_m はそれぞれ縦波と横波の散乱振幅を表している。本解析法では受信波動成分のうち縦波散乱振幅 A_m を利用する。即ち、ここでは式(2)の右辺第一項 $D(k_L|y)|A_m(\hat{y})$ を計測波形から抽出する。欠陥の大凡の位置は既知としているので、図-1における超音波の送信中心 O は欠陥近傍の一点に前もって決めることができる。このことから、計測点 y と超音波の送信中心 O の距離 $|y|$ は確定でき、関数 $D(k_L|y)$ の補正は可能である。以上より、本論文における逆解析は式(2)の縦波散乱振幅 $A_m(\hat{y})$ から逆に、材料内部の欠陥形状を推定する逆解析として以下のように定式化される。

2.1 ボルン逆解析

固体内への超音波の入射波は平面縦波であると仮定し、領域型の積分表現⁴⁾にボルン近似を導入すれば、計測点における縦波成分の散乱振幅は次のように定式化できる。

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

ここで、 $\Gamma(x)$ は特性関数¹⁰⁾と呼ばれ、次式で定義されるように欠陥 D^c 内においてのみ値を有する関数である。

$$\Gamma(x) = \begin{cases} 1 & \text{for } x \in D^c \\ 0 & \text{for } x \in D \setminus D^c \end{cases} \quad (4)$$

式(3)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求められる。

$$\Gamma(x) = -i \frac{2}{\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{1}{u^0 k_L^2} \hat{y}_m A_m(k_L, \hat{y}) \times e^{2i k_L \hat{y} \cdot x} k_L dk_L d\hat{y} \quad (5)$$

2.2 キルヒホフ逆解析

境界型の積分表現⁴⁾に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。

$$A_m(k_L, \hat{y}) = -\frac{u^0 \hat{y}_m k_L}{2} \int_D \gamma(x) e^{-2i k_L \hat{y} \cdot x} dV \quad (6)$$

ここで $\gamma(x)$ は次式で定義される特異関数¹⁰⁾である。

$$\gamma(x) = -n \cdot \nabla \Gamma(x) \quad (7)$$

$\gamma(x)$ は、式(4)の特性関数 Γ の領域のうち境界部分における法線微係数を表しており、実質は欠陥境界で値を有する関数である。同様にして特異関数 $\gamma(x)$ は K -空間の逆フーリエ変換により次のように表すことができる。

$$\gamma(x) = -\frac{2}{\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{1}{u^0 k_L} \hat{y}_m A_m(k_L, \hat{y}) \times e^{2i k_L \hat{y} \cdot x} k_L dk_L d\hat{y} \quad (8)$$

以下、本論文では式(5)と式(8)を基に、計測された波動の縦波散乱振幅 $\hat{y}_m A_m(k_L, \hat{y})$ を用いて欠陥形状を再構成することを試みる。

3. 超音波計測実験

3.1 計測装置

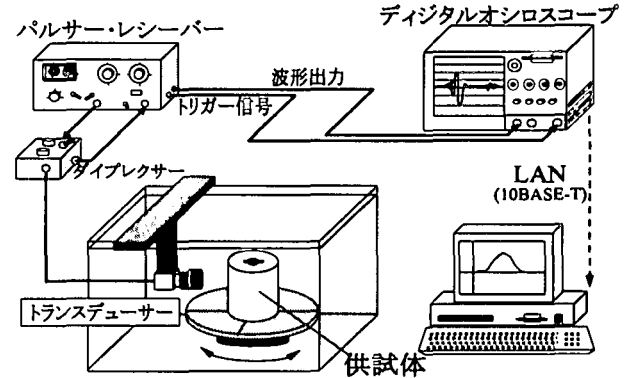


図-2 水浸超音波パルスエコー実験

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。パルサー・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、水中に超音波を送信する。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。供試体内に存在する空洞状の欠陥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信され、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サー・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を介してデータをパソコンへ送信して波形処理を行う。超音波パルサー・レシーバーは、RITEC社製SP801とBR640を用い、デジタルオシロスコープはHewlett Packard社製HP-infinum、ダイプレクサーはRITEC社製RDX-2を用いた。供試体は後で示すように、円筒型のアルミニウムの中心に、欠陥を想定した空洞を空けたものを

使用した。探触子は円筒側面に設置し、円筒の中心軸に超音波ビームの中心を合わせて超音波を送信する。この場合、波動場は正確には3次元波動場となるが、円筒アルミニウムの大きさや超音波ビーム幅を選定し、超音波ビームの中心に位置する円筒断面内の波動場は2次元波動場に近くなるように配慮した。また、逆解析において欠陥の再構成のためには、欠陥を取り囲むあらゆる方向から散乱波動を受信する必要がある。本論文では、円筒供試体をセンサー走査治具 (SONIX 社製 S-586) の回転台に乗せ、10°間隔で一定面内を一回転させて超音波を送受信した。

3.2 探触子の波形特性

探触子はPanametrics 社製水浸用トランスデューサーを使用した。探触子の直径はφ25mm、公称中心周波数1.0MHzである。この探触子の波形特性を以下に示す。水中に沈めたアルミニウムプレートからの反射波を時間域で記録した波形を図-3に、その波形のフーリエ・スペクトルを図-4に示した。図-3において横軸はデジタルオシロスコープで得られた波形の時刻、縦軸は得られた電気信号の電圧である。また、図-4の周波数スペクトルは最大値で正規化してある。使用した探触子の実際の周波数スペクトルは公称中心周波数の1.0MHzから若干低周波側にシフトしていることがわかる。

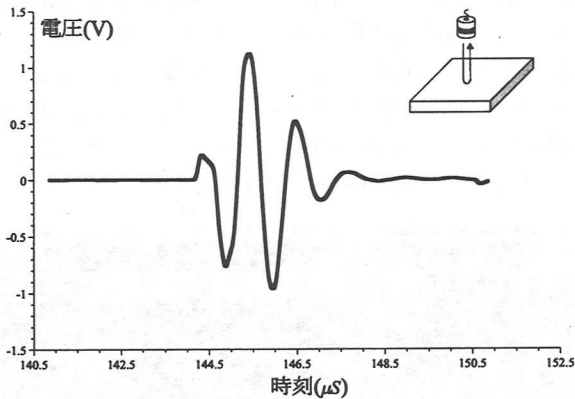


図-3 探触子の時間域波形

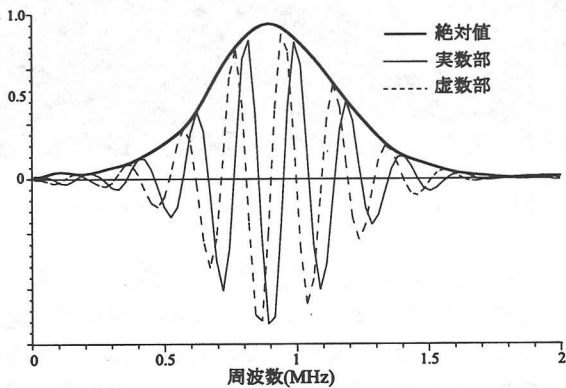


図-4 送信波形のフーリエ・スペクトル

3.3 アルミニウム供試体

先に示した欠陥形状の再構成式(5)と(8)の計測散乱波形に対する形状再生能について調べるために、ここでは試験供試体として図-5に示すような直径80mm、長さ100mmの円筒形のアルミニウムの中心に、欠陥を想定した人工空洞として長さ方向に放電加工によって貫通して空けたものを用意した。散乱波計測のための欠陥形状としては、鋭角を有する単一欠陥モデル、複数欠陥モデル、超音波の送信中心からずれた位置に存在する単一欠陥モデル、ボイドとノッチの複合欠陥モデルの計4種類を以下のように準備した。

- ・ 三角形の単一欠陥モデル (モデル A)
- ・ 円形ボイドとノッチが存在する複数欠陥モデル (モデル B)
- ・ 円形ボイドが中心から離れて位置する欠陥モデル (モデル C)
- ・ ボイドとノッチの複合欠陥モデル (モデル D)

モデル A の欠陥形状は一辺 10mm の正三角形であり、正三角形の中心と供試体の断面中心は一致している。モデル B は、円形空洞とノッチが独立して存在する欠陥モデルである。円形空洞の半径は 4mm、ノッチは長さ 8mm で幅 2mm である。モデル C は半径 4mm の円形空洞の中心が供試体の断面中心から 8mm 離れて存在する欠陥モデルであり、モデル D は半径 4mm の円形空洞に 2 つのノッチ (長さ 4mm × 幅 2mm) が両側に付属した欠陥モデルである。また、ここで使用したアルミニウムの材料定数は、縦波波速 $c_L = 6300\text{m/s}$ 、横波波速 $c_T = 3040\text{m/s}$ 、密度 $\rho = 2690\text{kg/m}^3$ である。

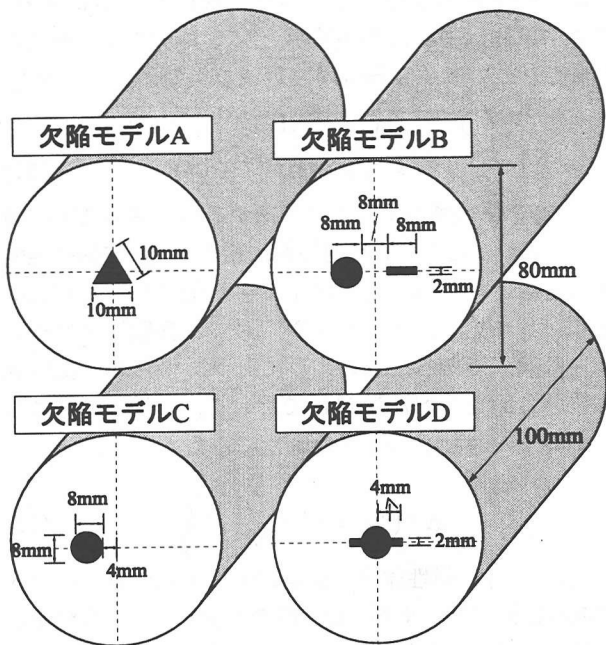


図-5 アルミニウム供試体中の欠陥モデル

4. 計測波形のデータ処理

4.1 データ処理法

2. で述べた線形化逆散乱解析法は無限弾性体中に存在する空洞状の欠陥に平面縦波が入射する場合に対して誘導されたものである。しかし、モデル実験で用いた空洞状欠陥は有限な弾性体中にあり、入射超音波は水中の探触子から送信される。このように、逆散乱解析理論における理想的な条件とは異なった条件下で計測が行われているため、得られた波形をそのまま逆解析に利用するのは適切でない。受信散乱波を基に式(5)と式(8)を用いて散乱体形状を再生するためには、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。ここでは、以下に示すようなデータ処理を行った。

計測系の線形性を仮定すれば、図-6の左図に示した受信散乱波形 $O^{sc}(f)$ と入力電圧 $I(t)$ には以下の関係が成立すると仮定できる。

$$O^{sc}(t) = I(t) * T(t) * W(t) * H_{ws}(t) * E^{sc}(t) * H_{sw}(t) * W(t) * R(t) \quad (9)$$

ここで、 $*$ は時間 t に関する合成積を表し、 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 は受信探触子の伝達特性を表している。

式(9)をフーリエ変換すると次式を得る。

$$O^{sc}(f) = I(f)T(f)W(f)H_{ws}(f)E^{sc}(f) \times H_{sw}(f)W(f)R(f) \quad (10)$$

いま、図-6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。この供試体は中心に平面境界となるように空洞を開けてある。この参照波形は周波数域で次のように書ける。

$$O^{ref}(f) = I(f)T(f)W(f)H_{ws}(f)E^{ref} \times H_{sw}(f)W(f)R(f) \quad (11)$$

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。式(10)と式(11)の違いは E^{sc} と E^{ref} だけで、探触子その他の条件は同一である。このように計測で得られた受信散乱波形(10)を参照波形(11)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。

$$E^{sc}(f) = E^{ref} \frac{O^{sc}(f)}{O^{ref}(f)} \quad (12)$$

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する。参照波の実験において探触子と供試体の距離を本実験と同じようにとれば、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、式(12)の演算により距離減衰の影響も相殺すると考えられる。このように未知特性の補正を行った式

(12)は欠陥形状の再構成式(5)と式(8)の $\hat{y}_m A_m(k_L, \hat{y})$ として利用できる。なお、式(12)の実際の演算は周波数域の参照波 $O^{ref}(f)$ が除算として有意な値を有する範囲内で行っている。

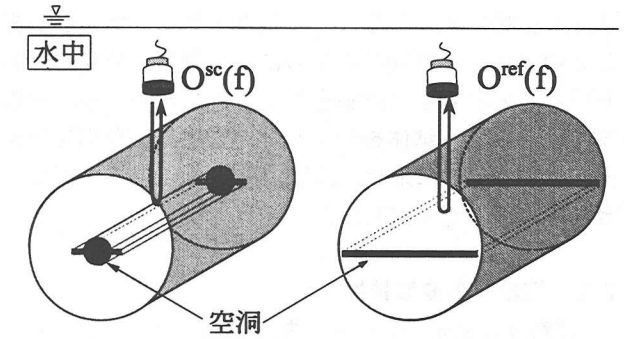


図-6 散乱波形 $O^{sc}(f)$ と参照波形 $O^{ref}(f)$

4.2 欠陥の再構成手順

図-7はモデルDに対して行った計測実験で得られたある計測点での波形を、デジタルオシロスコープに表示したものである。振幅の大きな波は円筒アルミニウムの表面からの反射波を表している。表面からの反射波の次に観測される波形が人工欠陥による散乱波であり、この波形の前後にゲートをかけて波形をサンプリングした。さらに高速フーリエ変換に必要な数だけの後続のゼロを付加してフーリエ変換を行い、参照実験波のフーリエ変換との比をとることにより、式(12)から計測上の $E^{sc}(f)$ が求められる。

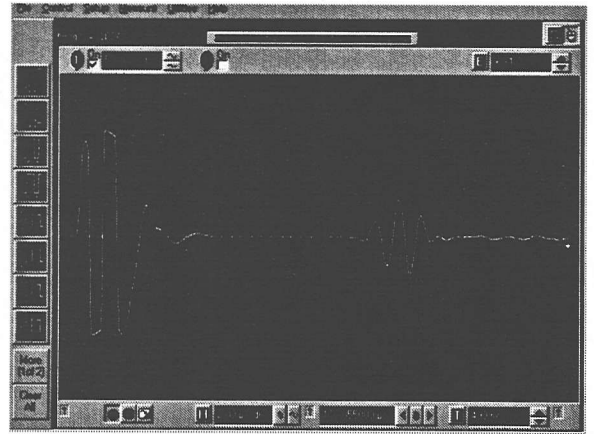


図-7 計測された超音波原波形の一例(モデルD)

ボルン逆解析式(5)による特性関数 $\Gamma(\mathbf{x})$ と、キルヒホフ逆解析式(8)による $\gamma(\mathbf{x})$ の再構成において、遠方散乱波のデータは $0 \sim \infty$ の縦波数 k_L 、即ち、あらゆる周波数に対して必要となる。しかし実験計測で用いる探触子は図-4に示したような帯域内のデータしか計測できないため、ここでは0.1MHzから1.8MHzまでの

離散的な周波数域データを用いて逆解析を行った。なお、デジタルオシロスコープに波形を記録する際、ノイズを除去するための加算平均を行っている。

5. 欠陥像の再構成

前節の再構成手順を基に、欠陥像の再構成を行った。以下の図-8～図-11に示したアルミニウム供試体を囲む点線は、円筒の中心に向けて行われた波形の計測範囲を示している。 $\Delta\theta$ はある計測点と次の計測点の間隔を表しており、今回は $\Delta\theta = 10^\circ$ に固定して計測を行った。なお本節中において使用した波形データはどれも0.1MHzから1.8MHzまでの周波数域の離散データである。

5.1 単一欠陥の再構成

欠陥が単体で存在するモデルの再構成として、モデルAを用いた結果を図-8に示す。

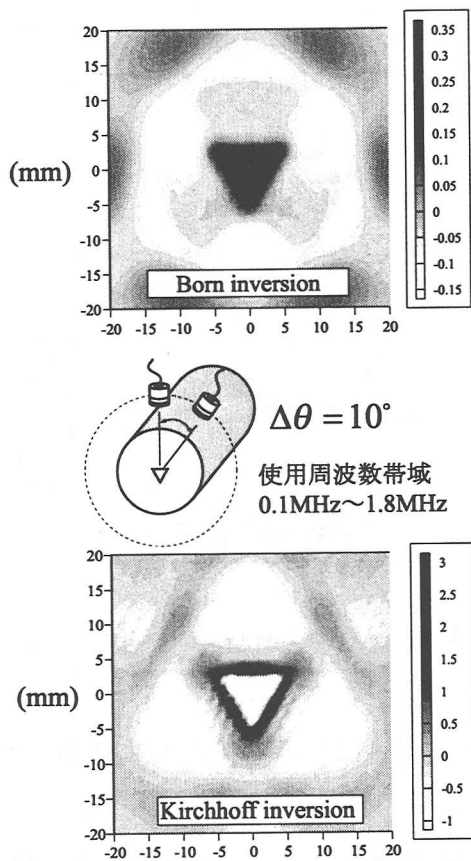


図-8 単体欠陥(モデルA)の再構成(全方向送受信)

ボルンおよびキルヒホフ両解析の比較のため、ボルン逆解析による $\Gamma(x)$ の再生を上図に、キルヒホフ逆解析による $\gamma(x)$ の再生を下図に示す。図-8のボルン逆解析結果は、欠陥の内部領域を鮮明に再生していることがわかる。またキルヒホフ逆解析は欠陥の境界をよく再現している。データの計測間隔が 10° と連続でないにも

関わらず三角形の角部が鮮明に再現できていることもわかる。

5.2 複数欠陥の再構成

前節では欠陥が単体で存在する場合における再構成結果を示した。しかし、現実の構造部材内部では欠陥が単体で存在するとは限らず、2つ以上の欠陥が近接して存在する場合が考えられる。ここでは欠陥が複数存在している場合に対して、本逆解析手法によって欠陥の再構成がどの程度可能であるかについてを検討した。ここで用いたモデルBは円形空洞とノッチの2つの欠陥から成るものであり、2つの欠陥の距離は8mm離れている。図-9はボルン逆解析およびキルヒホフ逆解析による複数欠陥像の再構成結果である。

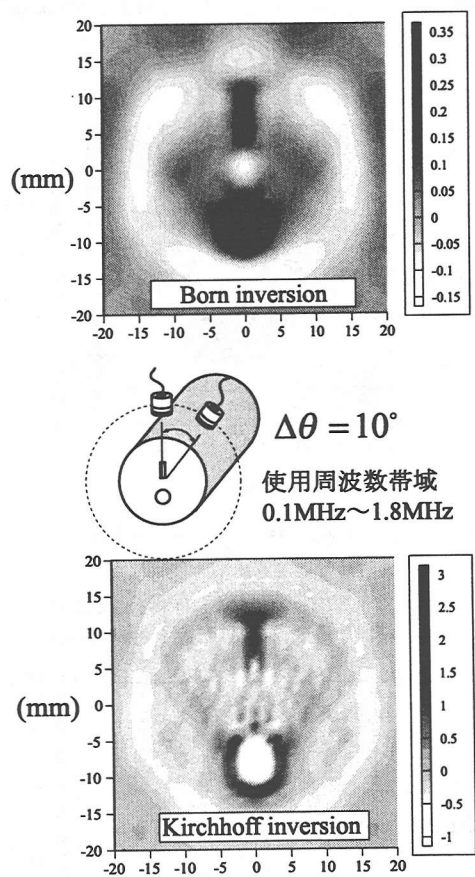


図-9 複数欠陥(モデルB)の再構成(全方向送受信)

ボルン逆解析による再構成結果からは、円形空洞とノッチの双方の位置および形状が識別できる。キルヒホフ逆解析結果においては、欠陥の境界再現性は単一欠陥の場合よりも劣るものの2つの欠陥の位置は確定できている。円形空洞とノッチが近接した側の境界形状の再生が若干不鮮明になっているが、この原因は円形空洞とノッチによる散乱波の相互干渉効果が形状再生に影響しているものと考えられる。現状のボルン逆

解析およびキルヒホフ逆解析手法には相互干渉の影響を組み込んでいないため、欠陥が近接する部分の精度が他の部分と比較して若干劣るものと推定される。

5.3 入射波動の送信中心が欠陥位置から外れた場合の欠陥の再構成

欠陥の詳細位置が明らかでない場合に、欠陥中心から離れた位置を超音波の送信中心として逆解析を行うことで、欠陥の詳細位置と形状がどれだけ明確に把握できるかについて検討する。ここでは欠陥モデルCを用いて、円形空洞が超音波の送信中心から少しずれている場合に対して計測実験を行った。送信は常にアルミニウム円筒の中心になるように計測機器を設定した。図-10にボルン逆解析およびキルヒホフ逆解析による再構成結果を示す。この結果より、送信中心がずれていても両逆解析は比較的良好に円形空洞を再構成していることがわかる。

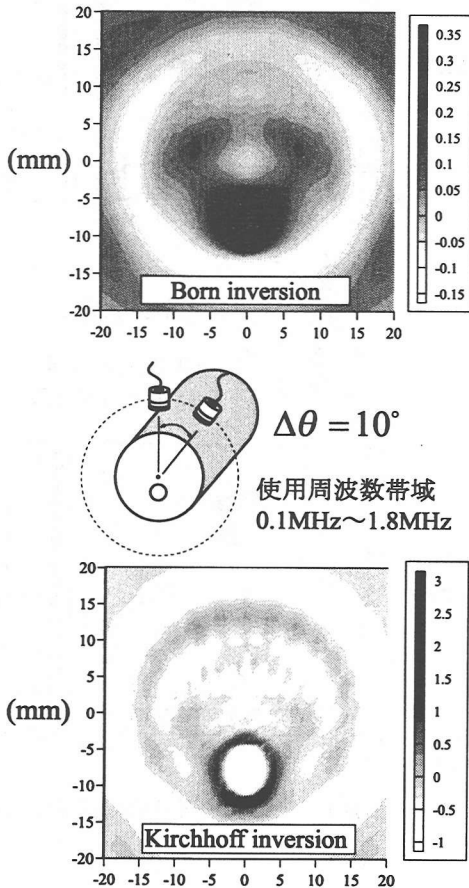


図-10 欠陥が中心から離れた位置にあるモデル(モデルC)の再構成(全方向送受信)

5.4 入射波動の送信中心が欠陥の片側からのみ行われた場合の複合欠陥の再構成

構造部材に対するアクセス空間の制約から、探触子による波動の送受信がある方向からに限られる場合を

想定し、片側から超音波の送受信が行われた場合の再構成について検討する。逆解析の理論上は欠陥を取り囲む全ての方向から送受信を行う必要があるが、ここでは敢えて片側からの送受信の場合に適用した。ここでは複合欠陥モデルとしてモデルDを用いて、波動の送受信は円筒の中心に関して片側から行った。片側からの送受信方向は図中の説明図に点線の半円で記しており、図-11はアルミニウム供試体の上片側から超音波計測を行った場合の逆解析結果である。図-11では、円形空洞の丸みとノッチ部の平らな部分が区別でき、超音波の送受信が行われた側の欠陥像が再生されていることがわかる。

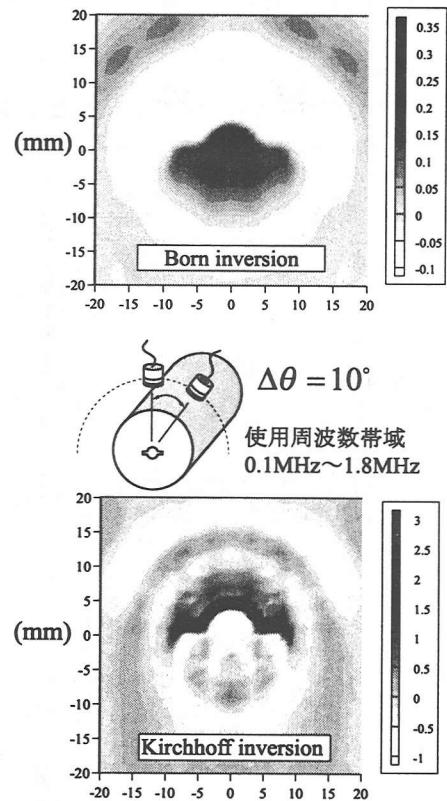


図-11 複合欠陥(モデルD)の再構成(上片側送受信)

6. 形状再生における使用周波数帯域の検討

本逆解析法において、各周波数域の波形データが欠陥形状の再構成にどのような役割を果たしているかについてモデルDを基に検討した。まず本実験で使用した超音波の波長 λ と、ここで使用したモデルDの欠陥寸法の大きさの関係を確認する。今回用いた探触子の公称中心周波数は1MHzであり、振動数 f が1MHzの場合の縦波の波長は $\lambda_L = C_L/f$ より、アルミニウム中における縦波の波長は約6mmとなる。モデルDは円形空洞に2つのノッチ状欠陥が付加されたモデルであり、円形空洞の半径は4mm、ノッチの長さは4mmである。これより、中心周波数1MHzの探触子によって固体内

に発生する縦波の波長と欠陥の代表寸法のオーダーがほぼ同じであることがわかる。ここでは以下、便宜的に1MHzより高い周波数を高周波、1MHzより低い周波数を低周波と呼ぶことにする。

まず、図-12に低周波と高周波の両周波数域の波形データを用いて欠陥形状を再構成した結果を示す。ここで使用した具体的な周波数帯域は0.1MHzから1.8MHzである。また計測間隔は 10° であり、供試体を取り囲むすべての方向から超音波を送受信している。図-12から、ボルン逆解析は欠陥の内部像を、キルヒホフ逆解析は欠陥の境界をよく再現していることがわかる。特にキルヒホフ逆解析による再構成結果においては、ノッチの角部が鮮明に再現されている。

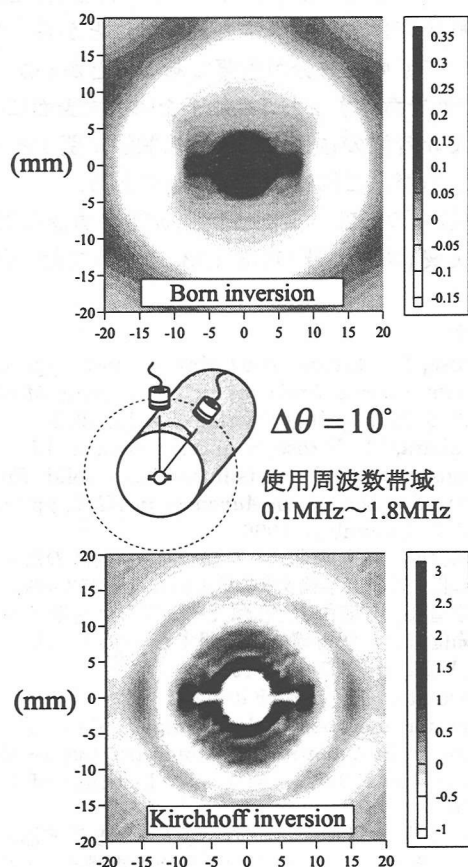


図-12 複合欠陥(モデルD)の再構成(周波数0.1~1.8MHz)

次に波形データから低周波成分を抽出して再構成した結果を示す。ここでは0.1MHz~0.6MHzの特に低周波域のデータを使用した再構成(図-13)と、0.1MHz~1.0MHzまでの低周波域データを使用した再構成(図-14)を行った。図-13の結果において、ボルン逆解析ではモデルDの欠陥の全体像が再現されているが、ノッチ部が不明瞭である。キルヒホフ逆解析では欠陥の位置は確定しようとしているが欠陥像はぼやけて見える。図-14に示した結果において、ボルン逆解析ではノッチ

の角部がより鮮明になり、キルヒホフ逆解析では欠陥形状の細部が再生されつつあることがわかる。

逆に、波形データから高周波成分だけを抽出して再構成した結果を図-15に示す。これは高周波域1.0MHz~1.8MHzだけの受信波形データを用いた再構成結果である。この結果から、高周波成分だけでは欠陥形状の識別が困難であることがわかる。

図-12~図-15の再構成結果から、ボルン逆解析においては低周波成分の波形データだけである程度欠陥の再構成が可能であると言える。この理由として、ボルン逆解析は低周波数域で有効とされる近似を用いているために、低周波の波形情報から形状を再生するのに本来適していることが挙げられる。逆に、高周波数域で有効とされる近似が導入されているキルヒホフ逆解析においては、高周波成分の波形データだけでは欠陥の再構成は困難であることが示された(図-15)。このことはキルヒホフ逆解析においても低周波域の波形データが重要であることを意味しており、図-12から図-15の結果を総合すると、低周波数域の波形成分で欠陥形状の大まかな形態が決められ、高周波成分が加わる毎に形状が確定してくる。言い換えると、低周波成分が欠陥形状の全体像の再生に寄与し、高周波成分が空間分解能の向上に寄与していると言える。

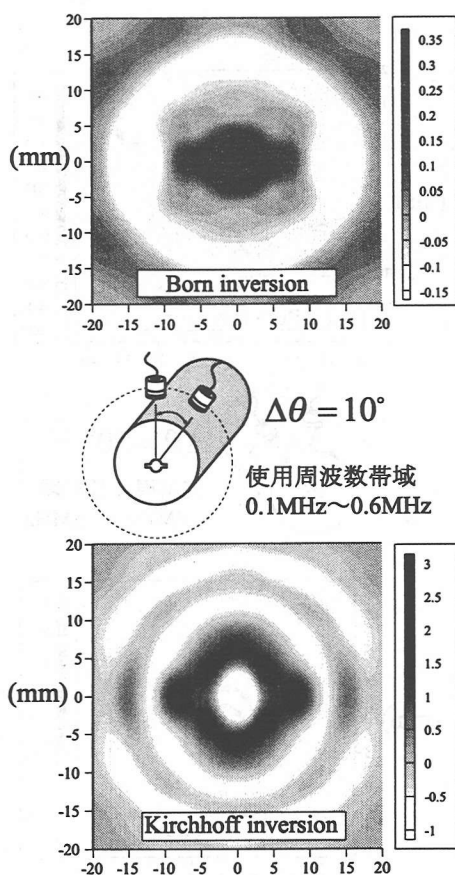


図-13 複合欠陥(モデルD)の再構成(周波数0.1~0.6MHz)

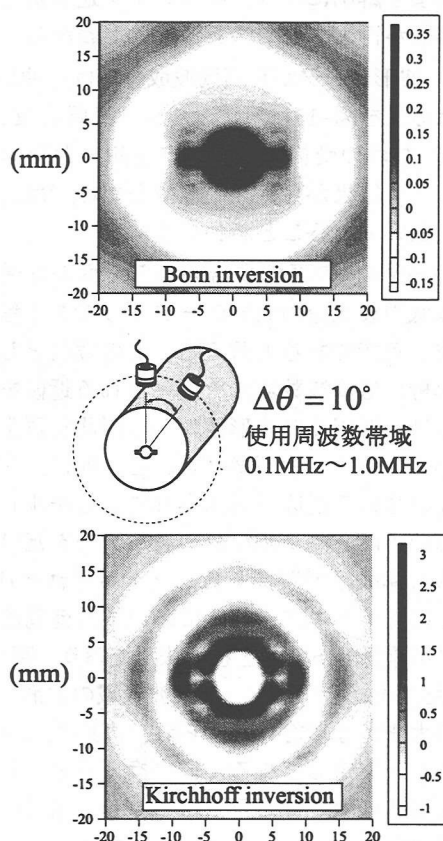


図-14 複合欠陥 (モデルD) の再構成 (周波数0.1~1.0MHz)

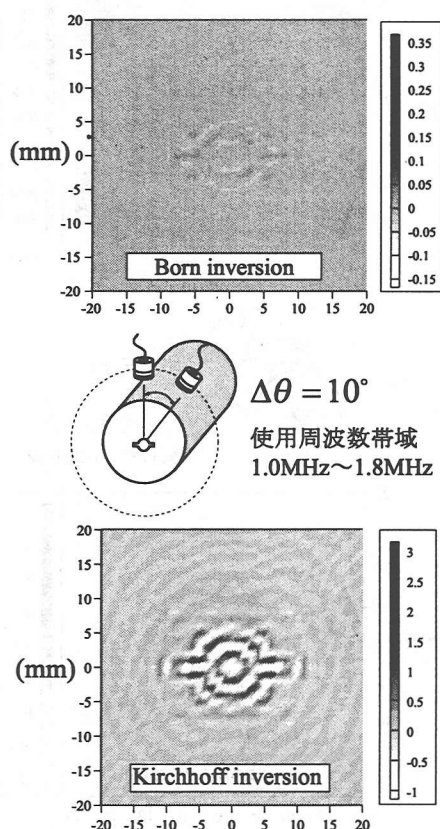


図-15 複合欠陥 (モデルD) の再構成 (周波数1.0~1.8MHz)

7. 結論

超音波計測実験によって得られた後方散乱データの波形処理を行って、ボルンおよびキルヒホフ逆解析に適用することで、アルミニウム内部の空洞状欠陥の再構成を試みた。この結果、ボルン逆解析は欠陥の内部を、キルヒホフ逆解析は欠陥境界を再現できた。本実験で得られた計測点は 10° おきであるが、単一欠陥の再生では欠陥形状を細部にわたって再構成できた。複数欠陥では、欠陥同士が近接する部分の精度が若干低下するものの、再構成は可能であることがわかった。

また、周波数成分の異なる計測波形データを用いた再構成結果から、散乱波動場の低周波成分が欠陥形状の全体像の再生に、また高周波成分が形状細部の再生に寄与していることがわかった。高周波成分だけを用いた逆解析では欠陥は再現されないことから、欠陥再生において低周波成分が重要であることがわかった。

現実性を考慮すると、探触子を構造物表面に直接接触させて超音波の送受信を行う接触法に関する検討が必要であるが、これは今後の課題である。

謝辞:本研究の一部は文部省科学研究補助金 COE 形成基礎研究費 (課題番号 11CE2003) によって行われた。

参考文献

- 1) Hirose, S.: Inverse scattering for flaw type classification, *Inverse Problems in Engineering Mechanics*, pp.359-366, Springer-Verlag, Berlin, 1993.
- 2) Kitahara, M., Hirose, S. and Achenbach, J.D.: Shape reconstruction of defects in an elastic solid, *First US-Japan Symposium on Advances in NDT*, pp.187-192, ASNT, Columbus, 1996.
- 3) 廣瀬壮一, 鍋野博章, 大友譲: 空洞再構成のための逆散乱解析, 構造工学論文集, Vol.43A, pp.453-460, 1997.
- 4) 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.
- 5) Nakahata, K. and Kitahara, M.: Shape reconstruction methods with incomplete data, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol.19, pp.919-926, American Institute of Physics, 2000.
- 6) 横山智樹, 水谷孝一, 永井啓之亮: 超音波送波器・受波器対向走査型回折トモグラフィの映像再構成, 日本音響学会誌, Vol.51, pp.366-374, 1995.
- 7) 加川幸雄, 土屋隆生, 石原禎, 藤岡功生: 超音波 CT に関する二, 三の実験的考察 -逆投影法と散乱アルゴリズム-, 日本音響学会誌, Vol.52, pp.605-615, 1996.
- 8) 菅原登, 三上修一, 山崎智之, 大島俊之: 波形解析を応用した超音波探傷法の微小欠陥検出精度向上に関する研究, 構造工学論文集, Vol.38A, pp.405-412, 1992.
- 9) 岩立次郎, 田中雅人, 館石和雄, 三木千壽: 回転探触子を用いた開口合成システムによる超音波探傷の分解能向上の試み, 土木学会論文集, No.507/I-30, pp.121-127, 1995.
- 10) Langenberg, K. J.: Introduction to the special issue on inverse problems, *Wave Motion*, Vol.11, pp.99-112, 1989.

(2000 年 4 月 21 日 受付)