

低周波を利用した構造部材内の欠陥再構成手法の提案 —逆散乱解析法と開口合成法の適用—

A Flaw Reconstruction Method in Infrastructures with Low Frequency Ultrasonic Waves
—Application of Linearized Inverse Scattering Methods and SAFT—

中畑和之*・北原道弘**

Kazuyuki NAKAHATA and Michihiro KITAHARA

*正会員 工博 東京工業大学大学院 情報理工学研究科情報環境学専攻 (〒158-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

**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 methods based on the Born and Kirchhoff approximations have been investigated to reconstruct the shape of flaws with scattered waveforms in the relatively low frequency range. On the other hand, the SAFT is known as a flaw imaging technique based on the time of flight strategy with reflected echoes. Here the combined method of the SAFT and linearized inverse methods is proposed for a flaw imaging technique in infrastructures. The rough location of flaws is detected first by the SAFT, and then the exact flaw shape is reconstructed by the linearized inverse methods. To show the practical use of this method, the shape reconstructions of flaws in an elastic material with flat surfaces are demonstrated by the measured ultrasonic wave.

Key Words : *ultrasonics, flaw reconstruction, linearized inverse scattering methods, SAFT, low-frequency range*

1. はじめに

社会基盤構造物の維持管理、補修対策を経済的に行うために、構造物内部の不具合(欠陥)の形態や程度を、高精度かつ効率的に定量化する非破壊評価技術の開発が求められている。社会基盤構造物の非破壊評価に超音波を適用する際には、構造部材が大断面を有し、非均質である場合が多いことに注意する必要がある。部材の大規模性と非均質性に起因して高周波数域超音波の減衰は大きくなるため、欠陥部からの診断情報を得るためには、低周波数域の超音波を活用することが重要となる。

構造部材内部に存在する欠陥像を再構成するために、ボルン近似¹⁾とキルヒホフ近似²⁾に基づく逆散乱解析法³⁻⁵⁾(ボルン・キルヒホフ逆解析)が報告されている。逆散乱解析法は散乱波の積分表現を基に散乱振幅⁶⁾から逆に散乱体(欠陥)の形状を再構成するための解析手法であり、これまでに逆解析の高速化、高精度化、欠陥種の識別の観点から研究が行われている。逆散乱解析法において、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は既に検討³⁾しており、散乱波の低周波成分が欠陥像の再構成に大きく寄与することが明らかになっている。一方で、鋼材等の超音波探傷で広く用いられている欠陥の可視化手法に、Time of Flight 原理に基づく開口合成法^{7,8)}(Synthetic Aperture Focusing Technique: SAFT)がある。SAFTは探触子を走査し、各点で得られた時間域の反射信号を深さ位置で集束するように合成して欠陥像をイメージングする技術であり、一般的に高周波数域の超音波が用いられる。再生解像度の向上のために開口幅の検討⁹⁾やビーム経路補

正¹⁰⁾に関する報告がなされており、解析時間の短縮を意図して高速フーリエ変換を利用したSAFT¹¹⁾や、SAFTによる欠陥像の3次元イメージング^{12,13)}も提案されている。

本論文では欠陥形状再生のアルゴリズムに注目して、逆散乱解析法をSAFTの観点から表現する。逆散乱解析法とSAFTの特徴を比較し、これを踏まえて低周波超音波を活用した構造部材内部の欠陥再構成手法を提案する。低周波超音波による欠陥再構成手法を実験的に検証するために、現行の超音波探傷分野で鋼材用に使われている圧電型超音波探触子の中から低周波数域に属する探触子を選び、この低周波数域探触子を利用して模擬供試体中に存在する人工欠陥の形状再構成を試みる。また、構造材料に対して超音波を送受信する場合、部材の表面形状に依存して探触子のアクセス空間が限定されることが多い。そこで、本論文では材料の片側表面からの超音波送受信による欠陥像再構成を試みる。ここでは逆散乱解析に必要な散乱振幅データを散乱波から抽出するデータ処理法についても詳述する。評価対象とする欠陥の大きさと探傷に使用する超音波の波長との相対的な大小関係によって、低周波・高周波の呼称が状況に応じて異なるため、以下、本論文では欠陥の代表寸法に比べて波長の短い波を高周波超音波、波長の長い波を低周波超音波と呼ぶこととする。

2. 逆散乱解析法とSAFTによる欠陥再構成の比較

図-1に示す円柱供試体(縦波波速 $c_L=6400\text{m/s}$, 横波波速 $c_T=3040\text{m/s}$, 密度 $\rho=2700\text{kg/m}^3$)内の人工空

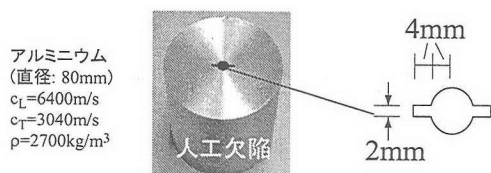


図-1 アルミニウム円柱供試体内の人工空洞 (欠陥)

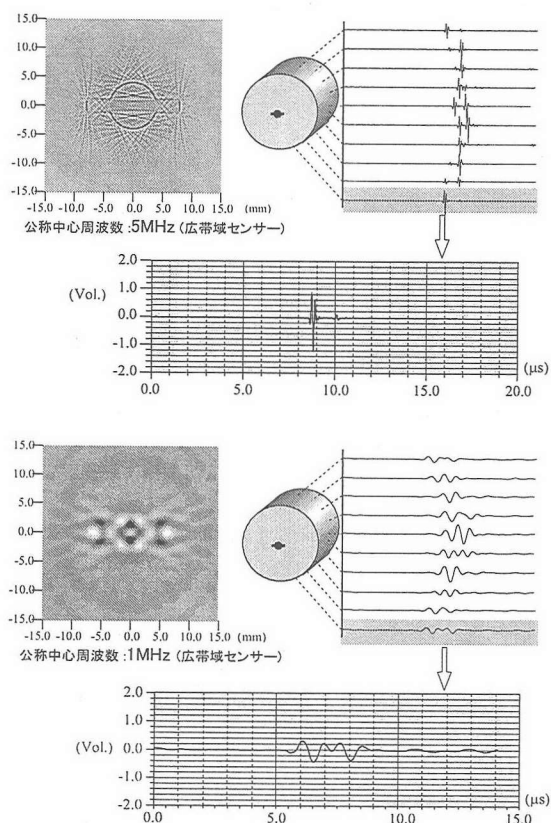


図-2 開口合成法による欠陥形状の再構成

洞 (欠陥) に対して, SAFT 及び逆散乱解析法によって内部欠陥をイメージングした例を示す. 本節で用いた SAFT と逆散乱解析法の欠陥像のイメージング原理については次節で詳述するが, ここでは先ず両手法による欠陥再構成像の特徴を述べる.

対象とする人工欠陥は, 図-1 の写真に示すように, 半径 4mm の円形空洞の両側に長さ 4mm で幅 2mm の長方形空洞を有している. ここでは, 中心周波数 1MHz と 5MHz の 2 種類の広帯域圧電型探触子を使用して, 水浸パルスエコー法によって超音波の送受信を行う. アルミニウム内における周波数 1MHz の縦波波長が約 6.4mm であることから, 1MHz 探触子が発振する超音波のアルミニウム内における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. 従って, 本実験において 1MHz の探触子を低周波数域の探触子, 5MHz の探触子を高周波数域の探触子と呼ぶことにする.

図-2 の上側の図が中心周波数 5MHz, 下側の図が中心周波数 1MHz の探触子を用いて得られた散乱波形と, これらの波形を基に SAFT を実行して再構成された欠陥像である. 高周波数域の探触子を用いた SAFT は高い分解能で像が再現されている. 一方で, 低周波を用いる場合は再構成像は円形部と長方形部共に不鮮明に

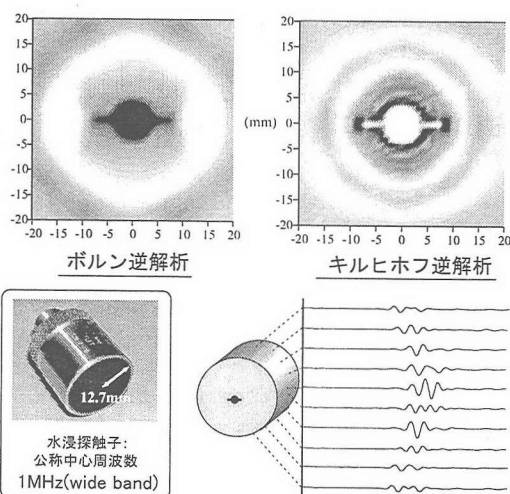


図-3 ボルン逆散乱解析 (左) とキルヒホフ逆散乱解析 (右) による欠陥形状の再構成

なるが, 欠陥の有無および大凡の位置は把握できる. 一方, 図-3 は図-2 の下部に示した 1MHz 探触子で計測したものと同一散乱波形を用いて, 逆散乱解析法を実行して欠陥像を再生した結果を示している. 図-3 の左側ではボルン逆散乱解析によって欠陥の内部領域が, 右側ではキルヒホフ逆散乱解析によって欠陥の境界部分が再生できていることがわかる. 欠陥の内部と境界を再生する 2 つの逆解析法を利用して, 空洞のような領域型欠陥とき裂のような面状欠陥を分離識別することが可能である⁵⁾. 逆散乱解析において高周波数域の情報があれば, より空間分解能の向上に寄与するが, 図-3 の結果から 1MHz を中心とした, 比較的低周波域の散乱波形情報からでも欠陥像が鮮明に得られていることがわかる.

3. 欠陥再構成手法

前節では, 同じ低周波探触子を用いたとしても欠陥の再構成結果に明確な違いが生ずることがわかった. SAFT^{7,8)} と逆散乱解析法⁵⁾ の理論については既に発表されているが, SAFT と逆散乱解析法の形状再構成アルゴリズムについて比較するために, 散乱波データを合成する過程を中心に, 各々の手法の要点を述べる.

3.1 SAFT

図-4 に超音波送受信点と欠陥の位置関係を示す. 送信点 y_1^k, y_2^k から超音波が固体内に入射され, 反射源 (欠陥) からの縦波エコーが再び同じ点で受信される (L-L パルスエコーモード). 反射エコーが出力電圧の時刻歴データ $V_k^{out}(y^k, t(x))$ として記録されるとき, 時刻 t における振幅は送受信点 $y^k(y_1^k, y_2^k)$ から距離 r にある反射源 $x(x_1, x_2)$ からの波動成分と見なすことにする. このとき時刻 $t(x)$ と伝播距離 $r(x)$ の関係は

$$r(x) = \frac{c_L t(x)}{2} \quad (1)$$

ここで, 距離 $r(x)$ は

$$r(x) = \sqrt{(x_1 - y_1^k)^2 + (x_2 - y_2^k)^2} \quad (2)$$

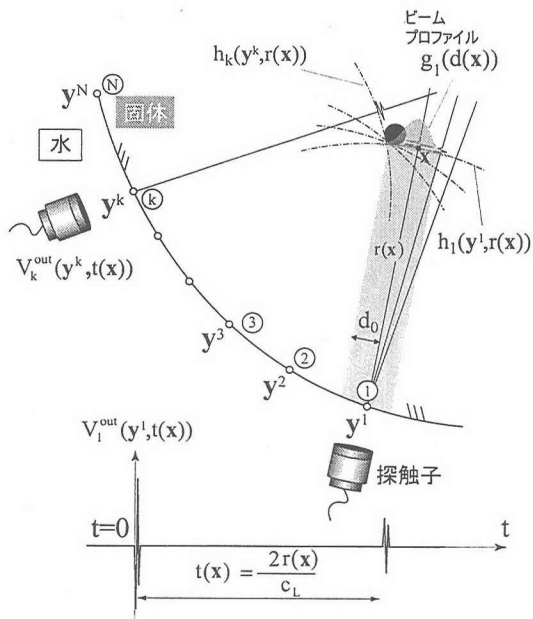


図-4 時間域における開口合成法の原理

となる。反射源の反射レベルを計測点 y^k で得られた時刻 $t(x)$ の振幅値とすれば、出力電圧 V_k^{out} は再構成図面上に振幅値 $h_k(y^k, r(x))$ の弧がプロットできる。

$$V_k^{out}(y^k, t(x)) \mapsto h_k(y^k, r(x)) \quad (3)$$

各計測点毎に $h_k(y^k, r(x))$ を重ね合わせることで再構成画像を得る。一般的に探触子のビーム幅（開口）は有限であるので、記録された反射波は開口の範囲内で反射されたものであるとすれば開口合成 $H(x)$ は次のように表される。

$$H(x) = \sum_{k=1}^N h_k(y^k, r(x)) g_k(d(x)) \quad (4)$$

ここで $g_k(d(x))$ は振幅プロファイルであり、本論文ではガウシアンビーム^{14,15)}を仮定しているので

$$g_k(d(x)) = \exp \left[-\frac{d^2(x)}{(d_0/2)^2} \right] \quad (5)$$

と書ける。ここで、 $d(x)$ は入射波の進行方向に直交する断面内における超音波ビームの中心軸からの距離を表す。また、図-4に示すように d_0 はビーム半径を便宜的に示す定数であり、 $d(x) = d_0$ における振幅は入射波の進行方向に直交する断面内において次のように減少する。

$$g_k(d_0)/g_k(0) = \exp(-4) \cong 1/55 \quad (6)$$

このように、振幅が中心軸 ($d = 0$) に比べて約 1/55 に減少する径 d_0 のことを本論文ではビーム径と称する。

SAFT は探触子を走査し、各点で得られた時間域の反射エコーを深さ位置で集束するように積み重ねる。従って、反射エコーがない部分は欠陥が存在しないことを表し、反射エコーが密に重なった部分が欠陥を表す。SAFT の利点は欠陥の位置が前もって把握できていない場合でも、計算機のメモリ制限内で比較的広

い範囲のイメージングが可能であることである。また、反射エコーをそのまま画像合成解析の入力値とすることができるため、応用の現場においても広く受け入れられている。

3.2 逆散乱解析法

(1) 散乱振幅

ここでは時間挙動が $\exp(-i\omega t)$ である時間調和な波動場 (ω は角振動数) を考える。図-5に示すように、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。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^{in} を欠陥近傍のある点 O に向けて送信し、欠陥 D^c によって散乱された散乱波 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する。

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。欠陥 D^c によって散乱された波動は散乱縦波と横波が分離できる程度に遠方で計測されるものとする、散乱波の遠方表現は 2 次元平面問題の場合、次のようになる。

$$u_m^{sc, far}(y) = A_m(k_L, \hat{y}) D(k_L | y) + B_m(k_T, \hat{y}) D(k_T | y) \quad (7)$$

ここで k_L と k_T は縦波と横波の波数、 $\hat{y}$ は観測点の方向を表す単位ベクトルであり、 $D(z) = \sqrt{2/(\pi z)} e^{i(z - \pi/4)}$ は円筒波の遠方表現である。式 (7) において、 A と B はそれぞれ縦波と横波の散乱振幅であり、散乱体 (欠陥) 情報を含むものである。散乱振幅は計測された欠陥からの散乱波形から、後に示すデータ処理によって抽出することができる。本解析法では受信波動成分のうち縦波散乱振幅 A から逆に欠陥形状の推定を試みる。

(2) 逆散乱解析法

欠陥形状を縦波散乱振幅から推定する場合、欠陥の幾何形状と共に欠陥内の波動場が未知であるという点において、逆散乱問題は非線形問題となる。逆散乱解析法は、散乱振幅の積分表現にボルン近似またはキルヒホフ近似を導入し非線形の逆散乱問題を線形化して解く手法である。ボルン逆解析は、欠陥の領域を表す特性関数 $\Gamma(x)$ を再構成するものであり、散乱振幅 $A(k_L, \hat{y})$ の逆フーリエ変換として次のように求められる。

$$\Gamma(x) = \frac{-i}{(2\pi)^2} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{8}{u^0 k_L^2} A(k_L, \hat{y}) e^{2ik_L \hat{y} \cdot x} k_L dk_L d\hat{y} \quad (8)$$

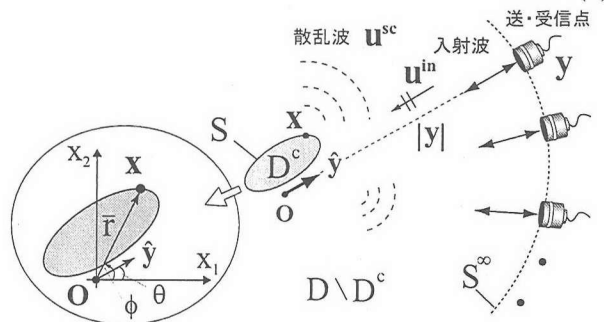


図-5 逆散乱解析法の波動場の設定

ここで、探触子方向 $\hat{y}$ の散乱振幅成分を $A(k_L, \hat{y}) = A(k_L, \hat{y}) \cdot \hat{y}$ とおいた。式 (8) における $\Gamma(x)$ は欠陥 D^c 内において値を有する特性関数であり次式で定義される。

$$\Gamma(x) = \begin{cases} 1 & \text{for } x \in D^c \\ 0 & \text{for } x \in D \setminus D^c \end{cases} \quad (9)$$

また、欠陥の境界を表す特異関数 $\gamma(x)$ はキルヒホフ逆解析によって以下のように再構成される。

$$\gamma(x) = \frac{-1}{(2\pi)^2} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{8}{u^0 k_L} A(k_L, \hat{y}) e^{2ik_L \hat{y} \cdot x} k_L dk_L d\hat{y} \quad (10)$$

ここで欠陥の境界 S 上においてのみ値を有する特異関数 γ は次のように定義される。

$$\int_D \gamma dV = \int_S dS \quad (11)$$

式 (8) と (10) は、計測された縦波散乱振幅 $A(k_L, \hat{y})$ を用いて $K(= 2k_L \hat{y})$ -空間内の積分を実行することによって欠陥形状が再構成できることを示している。この逆散乱アルゴリズムはフーリエ変換に基づくものであるから、この積分部分に高速フーリエ変換を適用することで逆解析の高速化⁴⁾が可能である。

(3) 逆散乱解析の時間域表現

上述した逆散乱解析法は、周波数域で定式化されたものである。ここでは、逆散乱解析法の散乱振幅データを合成するアルゴリズムを SAFT の観点から比較するために、逆散乱解析の時間域表現を示す。以下、キルヒホフ逆解析について時間域表現を導出する。まず、図-5 に示すように、欠陥位置 x と計測方向 $\hat{y}$ を極座標表示すれば

$$\hat{y} \cdot x = \bar{r} \cos(\phi - \theta) \quad (12)$$

となる。ここで ϕ と θ は、欠陥位置 x と計測方向 $\hat{y}$ がそれぞれ x_1 軸となす角である。散乱波は波速 c_L で距離 $\bar{r}$ を伝播するので、伝播時間 $t(x) = \bar{r}/c_L$ と表すことができる。この関係と式 (12) を再構成式 (10) に代入すると次式を得る。

$$\gamma(x) = \frac{-2}{\pi^2 u^0} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty A(\omega, \hat{y}) e^{2i\omega t(x) \cos(\phi - \theta)} \frac{d\omega}{c_L} d\theta(\hat{y}) \quad (13)$$

上式で、角振動数 $\omega = k_L c_L$ の関係を用いた。さらに、 $T(x) = -2 \cos(\phi - \theta) t(x)$ とおけば、式 (13) は

$$\gamma(x) = \frac{-2}{\pi^2 u^0 c_L} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty A(\omega, \hat{y}) e^{-i\omega T(x)} d\omega d\theta(\hat{y}) \quad (14)$$

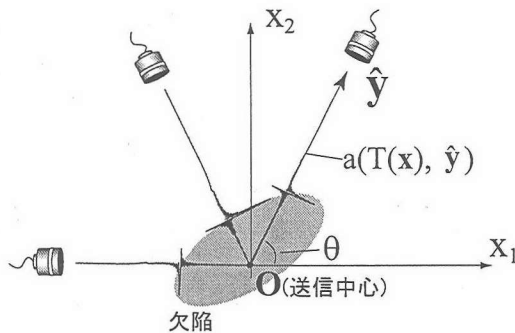


図-6 逆散乱解析法の原理

と変形できる。式 (14) に含まれる ω に関する積分は、縦波散乱振幅 A の逆フーリエ変換：

$$a(t, \hat{y}) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} A(\omega, \hat{y}) e^{-i\omega t} d\omega \quad (15)$$

であるから、縦波散乱振幅の時間域表現 a を用いて

$$\gamma(x) = \frac{-4}{\pi u^0 c_L} \int_0^{2\pi} a(T(x), \hat{y}) d\theta(\hat{y}) \quad (16)$$

と書くことができる。

式 (16) が表す散乱振幅の計測方向の積分（重ね合わせ）の模式図を図-6 に示す。ここで、散乱波の位相の整合をとる点は送信中心点 O であり、この点を中心にして θ 方向の散乱振幅データを重ね合わせることで欠陥境界 $\gamma(x)$ が再構成される。

4. 低周波超音波を用いた欠陥再構成

3.1 において述べた SAFT による欠陥像のイメージング原理によれば、SAFT は計測点ごとに反射エコーの振幅を積み重ねてイメージを合成するため、欠陥再生の解像度は使用した探触子の周波数帯域に依存することになる。すなわち、図-2 の再構成結果に示されるように高分解能の欠陥像を再現するためには高周波を使用する必要があるため、低周波エコーによる SAFT を直接に構造部材へ適用することは難しい。しかし、広範囲の走査による SAFT は欠陥の有無や欠陥の大凡の位置を検出する機能を有しており、これは低周波探触子を用いても有効である。一方、逆散乱解析法は弾性波動論に基づき散乱振幅データを散乱波の位相を保持したまま計測方向 $\hat{y}$ で積分することで、欠陥領域 $\Gamma(x)$ や境界 $\gamma(x)$ が再構成される。図-3 の逆散乱解析結果にも示されるように、逆散乱解析法は欠陥サイズと同オーダーの波長をもつ散乱振幅データ A があれば詳細な欠陥像を構成できる。

データ合成の点で SAFT と逆散乱解析法の大きく異なる点は、SAFT は各計測点を基準に散乱波データを重ね合わせていくのに対して、逆散乱解析法の場合は散乱波データを合成する基準点が欠陥近傍の送信中心点 O であることである。従って、逆散乱解析法を構造部材に適用する場合には、予め欠陥の大凡の位置を把

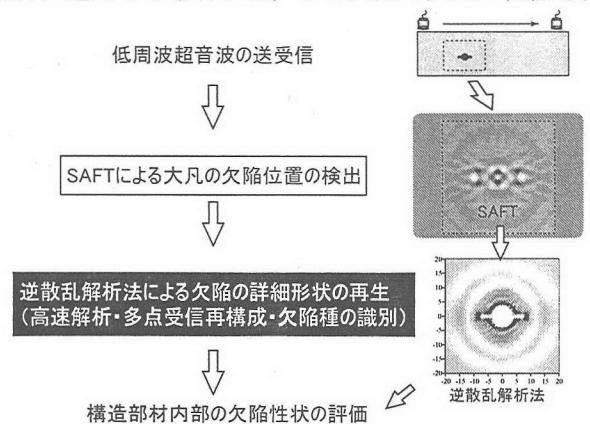


図-7 低周波超音波を用いた欠陥イメージング手法

握し、位相の整合をとる送信中心点 O を欠陥近傍のある一点に設定する必要がある。

構造部材中の欠陥を低周波超音波を用いて評価するために、欠陥の大凡の位置は SAFT による広範囲のイメージングによって検出し、欠陥の詳細な大きさ・形状などの幾何情報は逆散乱解析法によって推定する(図-7)。次節では、SAFT と逆散乱解析を組み合わせた手法によるアルミニウム中の欠陥再構成を示す。

5. 計測波形からの再構成

構造部材に対して超音波を送受信する場合、部材の表面形状に依存して探触子のアクセス空間が限定されることが多いため、ここでは材料の一側面からの超音波送受信を想定した欠陥像再構成を検討する。後に示す直方体アルミニウム供試体の一部に人工欠陥を設けて、その欠陥からの散乱波を計測することによって欠陥形状を推定する。まず、SAFT による広範囲の走査を行って欠陥の大凡の位置を把握し、次にその欠陥近傍に向けて超音波を送受信し欠陥の詳細な形状を逆散乱解析法によって再構成する。

5.1 計測装置と供試体

図-8 に示すような計測装置を用いて超音波パルスエコー実験を行った。超音波は水中を介して固体内に入射され、固体内部の空洞状欠陥によって散乱された波動は再び同じ探触子で受信され、デジタルオシロスコープで時間域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転送し、欠陥像のイメージングを行う。供試体は図-9 に示すような幅 300mm、奥行き 100mm、高さ 60mm の直方体のアルミニウムに、欠陥を想定した円形(モデル A)および矩形(モデル B)の空洞を空けたものを用いた。

水浸探触子として、鋼材探傷用に使われている圧電型超音波探触子の中で低周波域に属するもの(Sonix 社製 IYO125B)を使用した。探触子の直径は 25.4mm、公称中心周波数は 1.0MHz である。この水浸探触子を使用して鋼板からの反射波形を計測した波形のフーリエスペクトルを図-10 に示す。この図の横軸は周波数(MHz)で縦軸の周波数スペクトルは最大値で正規化してある。計測実験では、探触子はアルミニウム一側面をラインスキャンし、各点で超音波を送受信する。

5.2 散乱振幅抽出のためのデータ処理

SAFT はオシロスコープの出力電圧 $V^{out}(y, t)$ をそのまま入力値として利用できるが、逆散乱解析法は式

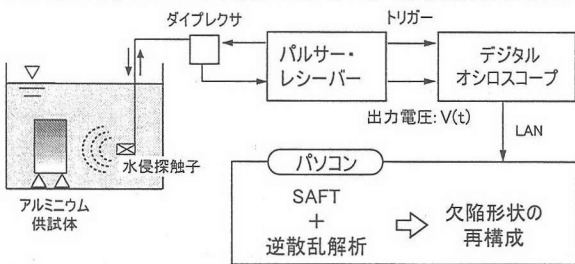


図-8 水浸パルスエコー計測実験概要

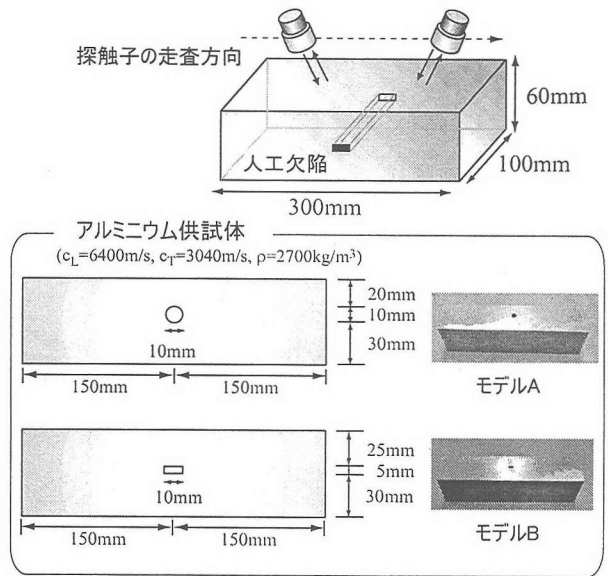


図-9 アルミニウム供試体内の人工欠陥

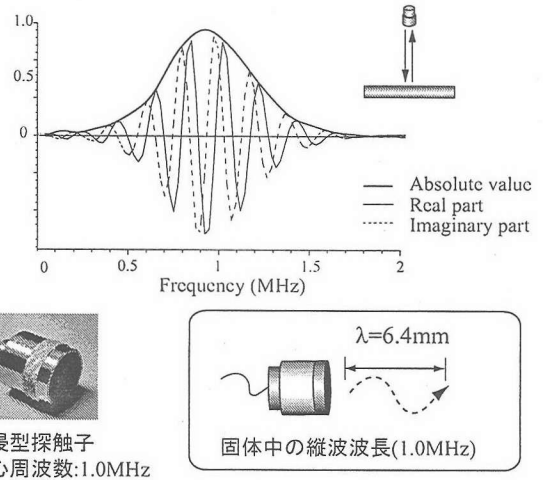


図-10 水浸探触子の周波数特性

(8) と式 (10) によって欠陥像の再構成を実行するために縦波散乱振幅 $A(k_L, \hat{y})$ を入力値として用いる。このため、散乱エコー $V^{out}(y, t)$ から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振幅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う。

図-11 の上図に示した伝播経路を伝播した散乱波は、オシロスコープで出力電圧 $V^{out}(y, t)$ として記録される。計測系の線形性を仮定すれば、周波数域において入力電圧 $V^{in}(y, \omega)$ と出力電圧 $V^{out}(y, \omega)$ には以下の関係が成立する⁶⁾。

$$V^{out}(y, \omega) = C_0 V^{in}(y, \omega) T^{L;P}(\theta_1) \exp[i(k_P D_1 + k_L D_2)] \times \exp[-(\eta_1 D_1 + \eta_2 D_2)] W^L(\omega, \theta_1, \theta_2, D_1, D_2) \times A(k_L, \hat{y}) W^L(\omega, \theta_2, \theta_1, D_2, D_1) \times \exp[-(\eta_2 D_2 + \eta_1 D_1)] \exp[i(k_L D_2 + k_P D_1)] \times T^{P;L}(\theta_2) \quad (17)$$

ここで、図-11 に示すように D_1 と D_2 はそれぞれ探

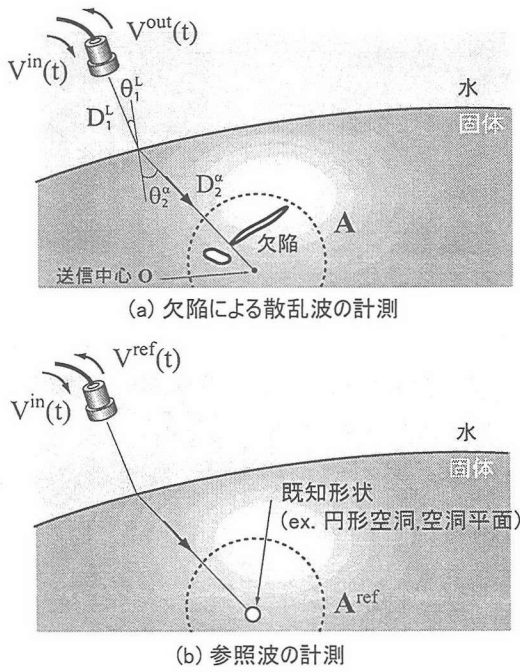


図-11 計測波形と参照波形

触子と水-固体界面の距離，界面から送信中心までの距離， θ_1 と θ_2 は伝播経路と界面がなす角である．また， η_1 と η_2 はそれぞれ水と固体の減衰係数， W^L は縦波のビーム拡散に関する影響， $T^{\alpha;\beta}$ は β 波が界面を透過したときの α 波の透過率， C_0 は計測装置の影響ファクター（定数）である．簡単のため，式 (17) の各項を以下のような影響関数：

$$\begin{aligned}
 T_1(y, \omega) &= T^{L;P}(\theta_1) \\
 P_1(y, \omega) &= \exp[i(k_P D_1 + k_L D_2)] \\
 Z_1(y, \omega) &= \exp[-(\eta_1 D_1 + \eta_2 D_2)] \\
 W_1(y, \omega) &= W^L(\omega, \theta_1, \theta_2, D_1, D_2) \\
 W_2(y, \omega) &= W^L(\omega, \theta_2, \theta_1, D_2, D_1) \\
 Z_2(y, \omega) &= \exp[-(\eta_2 D_2 + \eta_1 D_1)] \\
 P_2(y, \omega) &= \exp[i(k_L D_2 + k_P D_1)] \\
 T_2(y, \omega) &= T^{P;L}(\theta_2)
 \end{aligned} \quad (18)$$

で置き換えると，式 (17) は次のような積の形で記述できる．（以下， $Z(y, \omega)$ を $Z(\omega)$ と書く）

$$\begin{aligned}
 V^{out}(\omega) &= C_0 V^{in}(\omega) T_1(\omega) P_1(\omega) Z_1(\omega) W_1(\omega) \\
 &\quad \times A(k_L, \hat{y}) W_2(\omega) Z_2(\omega) P_2(\omega) T_2(\omega)
 \end{aligned} \quad (19)$$

上式は散乱振幅 $A(k_L, \hat{y})$ を含んでおり，これを抽出するために参照実験を考える．同じ計測装置を用いて，既知形状の散乱体（円形空洞，平面空洞など）からの参照波 V^{ref} を計測する場合，上記と同様に影響関数を含んだ積の形で書くことができる．

$$\begin{aligned}
 V^{ref}(\omega) &= C_0 V^{in}(\omega) T_1(\omega) P_1(\omega) Z_1(\omega) W_1(\omega) \\
 &\quad \times A^{ref}(k_L, \hat{y}) W_2(\omega) Z_2(\omega) P_2(\omega) T_2(\omega)
 \end{aligned} \quad (20)$$

ここで， $A^{ref}(k_L, \hat{y})$ は既知散乱体による散乱振幅であり，これは解析的に決定できる．式 (19) と式 (20) の

違いは散乱振幅だけで，影響関数の条件は同一である．計測で得られた散乱波 (19) を参照波 (20) で除して，固体内における散乱振幅を次のように得る．

$$A(k_L, \hat{y}) = A^{ref}(k_L, \hat{y}) \frac{V^{out}(\omega)}{V^{ref}(\omega)} \quad (21)$$

本実験では，アルミニウムに直径 4mm の微小円形空洞を空けて，そこからの参照波 $V^{ref}(t)$ を計測した．微小空洞は既知形状であるので，この微小空洞による散乱振幅 $A^{ref}(k_L, \hat{y})$ は境界要素法と散乱波の積分表現から近似的に求めた．なお，式 (21) の実際の演算は周波数域の参照波 $V^{ref}(\omega)$ が除算として有意な値を有する範囲内で行っている．

5.3 再構成結果

図-9 に示した 2 種類のアルミニウム供試体を用いて，人工欠陥の形状再構成を行う．まず，供試体一側面をラインスキャンし，SAFT によって欠陥の大凡の位置を検出する．このときの走査間隔は 1mm とし，探触子のエレメント径が約 12mm であることから推定して，固体内の超音波ビーム径 d_0 を 12mm と仮定した．次に，欠陥付近のある一点を送信中心として超音波を送受信し，得られた散乱波をデータ処理して逆散乱解析を実行した．

(1) 円形欠陥 (モデル A)

モデル A に SAFT を適用したイメージング結果を図-12 に示す．人工欠陥が存在する位置に反射源（欠陥反応）が現れているが，この欠陥の詳細な形状は SAFT だけでは判断できないことがわかる．次に，SAFT で反応した反射源のある一点を送信中心として，超音波を送受信し逆散乱解析を行った結果を図-13 に示す．図-13 の上図は，アルミニウム供試体の上側面からの超音波の送受信による結果である．同図の左側はボルン逆解析，右側はキルヒホフ逆解析による再構成結果であり，両解析とも超音波の送受信が行われた上側の欠陥部が再現されているのがわかる．片側送受信による再構成であっても，円形空洞の丸みが再現されている．また，図-13 の下図は上側面と下側面からの超音波の送受信による逆散乱解析結果である．円形空洞の全形状が再構成されており，ボルン逆解析は欠陥内部を，キルヒホフ逆解析は欠陥の境界が鮮明に表れている．

(2) 矩形欠陥 (モデル B)

モデル B に SAFT を適用したイメージング結果を図-14 に示す．モデル A のイメージング結果と同様に，人工欠陥が存在する位置に反応が現れているが，この欠陥の詳細形状の推定は困難である．なお，同図で人工欠陥が存在する位置の下方にも反射源が現れているが，この反射源の示す位置に欠陥は存在しないことから，これは人工欠陥と試験体の上側面を二度往復した多重反射エコーであると思われる．次に，欠陥近傍のある一点を送信中心として，超音波を送受信し逆散乱解析を行った結果を図-15 に示す．図-15 の上図は，アルミニウム供試体の上側面からの超音波の送受信による結果である．図-15 の下図は上側面と下側面からの超音波の送受信による逆散乱解析結果であり，矩形欠陥の角部が鮮明に再現されている．さらに，超音波の

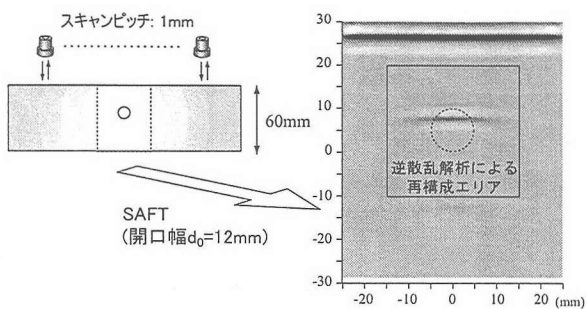


図-12 SAFT によるモデル A の位置決定 (片側ラインスキャン)

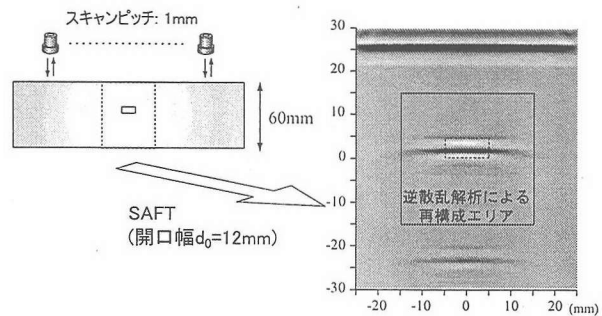


図-14 SAFT によるモデル B の位置決定 (片側ラインスキャン)

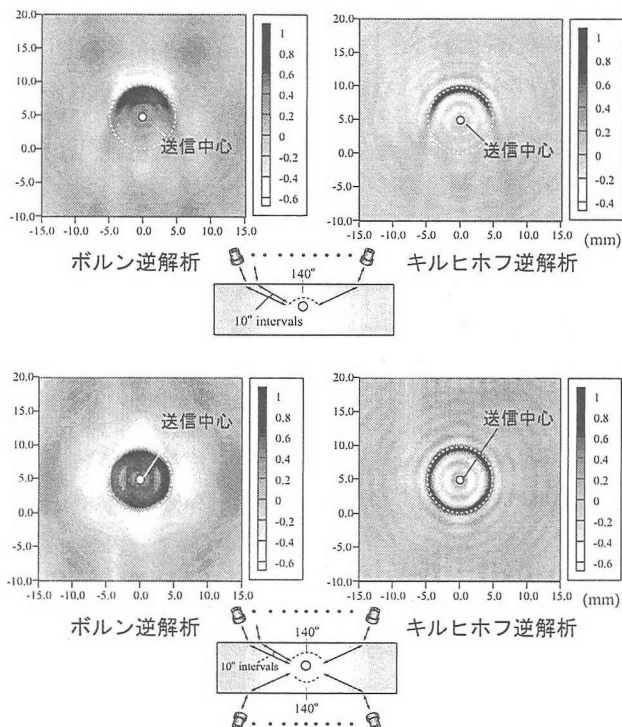


図-13 逆散乱解析法によるモデル A の欠陥再構成 (上図: 片側送受信, 下図: 両側送受信)

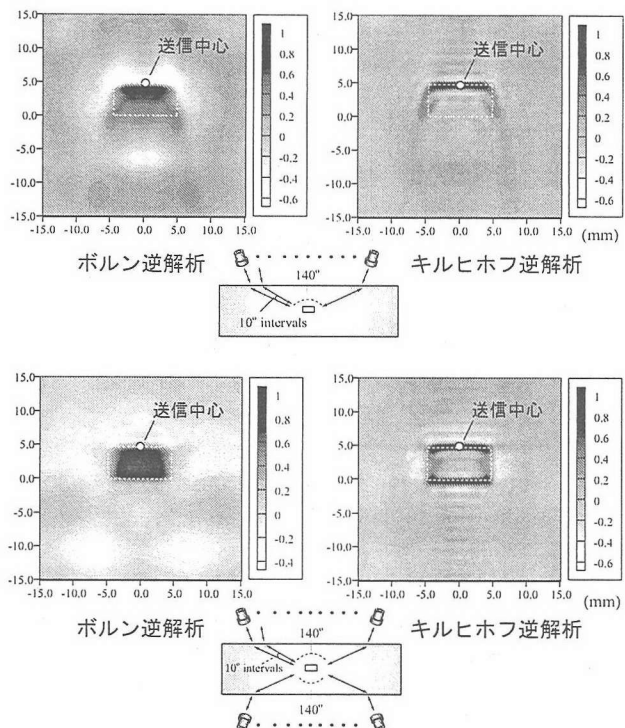


図-15 逆散乱解析法によるモデル B の欠陥再構成 (上図: 片側送受信, 下図: 両側送受信)

送受信面は上側面のみで行い、供試体の下側面の一回反射を利用して欠陥の背面の形状再構成を試みた結果を図-16 に示す。大凡ではあるが欠陥の背面形状が再現されているのがわかる。

6. 結論

構造部材の定量的非破壊評価を目的として、低周波域の超音波を使用した内部欠陥形状の再構成手法を提案した。ここでは、逆散乱解析法と開口合成法 (SAFT) の 2 つの欠陥像イメージング手法に着目し、欠陥再構成のための散乱波形のデータ合成に関する両手法のアルゴリズムを比較することによって、これらの構造部材への適用を検討した。SAFT が有する欠陥の大凡の位置決定性能と逆散乱解析法による詳細な欠陥像再生能を利用することで、低周波超音波による構造部材内部の欠陥イメージングの可能性を超音波計測実験によって示した。

逆散乱解析法による欠陥再構成において散乱振幅デー

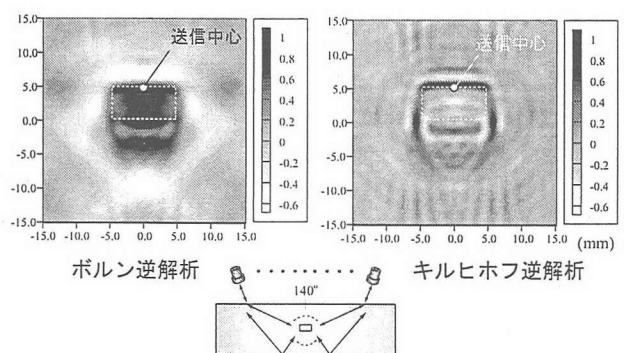


図-16 逆散乱解析法によるモデル B の欠陥再構成 (底面反射を利用した片側送受信)

タの活用がポイントとなるが、今後はこのデータ処理を含めて、実用性・汎用性を考慮した欠陥イメージングシステムの開発を目指したい。また、実際の構造部材等へ本手法の適用を考えると、部材寸法や非均質性を考慮して 1MHz 以下の周波数帯域の探触子 (センサー) が必要になる。固体内に超音波の送受信が可能

で、且つこれらの帯域で安定した広帯域特性を有する探触子の開発が望まれており、実構造物への適用は今後の課題である。

謝辞

三菱電機(株) 情報技術総合研究所の和高修三 博士から SAFT に関する有益なご助言を頂きました。また、本研究は第一著者が日本学術振興会特別研究員(DC)であった期間に行われ、平成14年度特別研究員奨励費の補助を受けました。ここに記して感謝の意を表明します。

参考文献

- 1) Rose, J.H.: Elastic wave inverse scattering in non-destructive evaluation, *Pure Appl. Geophys.*, Vol.131, pp.715-739, 1989.
- 2) Bleistein, N. and Cohen, J. K.: Progress on a mathematical inversion technique for non destructive evaluation, *Wave Motion*, Vol.2, pp.75-81, 1980.
- 3) 中畑和之, 北原道弘: 計測波形による欠陥形状の再生と使用周波数に関する考察, 応用力学論文集, Vol.3, pp.91-98, 2000.
- 4) 中畑和之, 大西正浩, 北原道弘: 線形化逆散乱解析の高速化と欠陥形状再生への適用, 応用力学論文集, Vol.5, pp.67-74, 2002.
- 5) Kitahara, M., Nakahata, K. and Hirose, S.: Elastodynamic inversion for shape reconstruction and type classification of flaws, *Wave Motion*, Vol.36, pp.443-455, 2002.
- 6) Schmerr, L. W.: *Fundamentals of Ultrasonic Nondestructive Evaluation*, Plenum Press, New York, 1998.
- 7) 非破壊検査協会(編): 新非破壊検査便覧, 日刊工業新聞社, 1992.
- 8) Seydel, J. A.: Ultrasonic synthetic aperture focusing techniques in NDT, *Research Techniques in Nondestructive Testing*, Vol.6, Ed. Sharpe, P.S., Academic Press, New York, 1982.
- 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) Kimura, T., Kameyama, S., Wadaka, S., Manome, Y. and Koike, M.: Approximation expression of far field generated by ultrasonic angle probe and its application to synthetic aperture focusing technique, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol.18, pp.1123-1130, Plenum Publishers, 1999.
- 11) Nagai, K.: A new synthetic-aperture focusing method for ultrasonic B-scan imaging by the Fourier transform, *IEEE Trans. Sonics Ultrason.*, Vol.32, pp.531-536, 1985.
- 12) Busse, L. J.: Three-dimensional imaging using a frequency-domain synthetic aperture focusing technique, *IEEE Trans. UFFC*, Vol.39, pp.174-179, 1992.
- 13) Langenberg, K. J., Bärman, R., Marklein, R., Irmer, S., Müller, H., Brandfaß, M. and Potzkai, M.: Electromagnetic and elastic wave scattering and inverse scattering applied to concrete, *NDT & E Int.*, Vol.30, pp.205-210, 1997.
- 14) Karim, M. R. and Kundu, T.: Scattering of acoustic beams by cracked composites, *J. Eng. Mech.*, Vol.116(8), pp.1812-1827, 1990.
- 15) Rudolph, M.: Ultrasonic beam models in anisotropic media, *Ph.D thesis, Iowa State University*, 1999.

(2003年4月18日受付)