

全波形サンプリング処理 (FSAP) 方式を用いた 逆散乱イメージング法による欠陥の超音波画像化

Ultrasonic Imaging of Flaws by the Inverse Scattering Imaging Method
with the Full-waveform Sampling and Processing (FSAP)

中畑和之*・上甲智史**・廣瀬壯一***

Kazuyuki NAKAHATA, Satoshi JYOKOU and Sohichi HIROSE

*正会員 博士(工) 愛媛大学准教授 大学院理工学研究科生産環境工学専攻 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)

** (研究当時) 修士(工) 愛媛大学 大学院理工学研究科生産環境工学専攻 (同上)

***正会員 工博 東京工業大学教授 大学院情報理工学研究科情報環境学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

The inverse scattering imaging method (ISIM) using beam steering and focusing techniques of an ultrasonic array transducer has already been proposed to reconstruct the geometry of flaws in structural metal components. The performance of the ISIM was checked by numerical simulations with the BEM in our previous studies. In this paper, shape reconstructions of artificial flaws are demonstrated with measured ultrasonic waves. Here we utilize the full-waveform sampling and processing (FSAP) for transmitting and receiving processes of ultrasonic wave. It is easy to adopt some signal processing techniques after measurement because flaw signals measured by every two-element combination as a pulser and a receiver are recorded in a signal matrix of the FSAP. Here two signal processing techniques are introduced. One is a deconvolution method to extract scattered wave components from measured flaw signals. The other is an apodization method to transmit ultrasonic waves in phase from the array transducer. From imaging results with the ISIM, it is confirmed that the flaw reconstructions are successful for a thin slit as well as drilled holes in aluminum specimens.

Key Words : *flaw imaging, inverse scattering imaging method (ISIM), full-waveform sampling and processing (FSAP), ultrasonic array transducer, signal processing, experimental measurement*

1. はじめに

現在、超音波アレイ探触子を用いて材料内部の欠陥形状を映像化する一般的な手法はB、Cスキャン¹⁾やセクタスキャン²⁾であり、実際の電子スキャン装置にも標準機能として搭載されている³⁾。また、映像化したい位置(画素)とアレイ探触子の送・受信素子までの路程に相当する時刻のエコー振幅を重ね合わせて欠陥像を作成する開口合成法^{4,5)}も提案されている。これらは、基本的にはエコーの伝搬時間と振幅値に基づく欠陥の映像化手法である。一方、エコーの伝搬時間と振幅値だけでなくエコーの波形情報(位相、スペクトル振幅等)を有効に活用し、これを計測位置の情報と組み合わせることにより欠陥形状を高精度に再構成する手法として、逆散乱イメージング法⁶⁾(Inverse Scattering Imaging Method: ISIM)が開発されている。このISIMはアレイ探触子の設置面から垂直な方向にある欠陥を対象としているために、ビームステアリングやフォーカシング⁷⁾を用いることなく、アレイ探触子の1つの素子で超音波を送受信し、各素子で得られた受信エコーを周波数領域で合成して欠陥像をイメージングするのである。しかし、実際の超音波探傷において、必ず

しも探触子面から垂直方向に欠陥が存在するとは限らず、探触子の設置場所が制約される場合には、超音波ビームを斜め方向に送信する必要がある。そこで、著者らはビームステアリングやフォーカシングに対応した新しいISIM⁸⁾を提案しているが、これはBEMを用いた数値シミュレーションによって有用性が示されているに過ぎない。そこで、本研究では、ビームステアリングやフォーカシングに対応したISIM(以下、単にISIMと記述)について、超音波計測実験によって検証を行うことを目的とする。

通常、ビームステアリングやフォーカシングを行う場合、電子スキャン装置の電気回路のスイッチング処理によってディレイを調節して、各素子からの超音波ビームを重ね合わせる。しかし、本研究では電子スキャン装置のディレイ操作を用いずに、コンピュータメモリ上でディレイ操作を行う全波形サンプリング処理⁹⁾(Full-waveforms Sampling and Processing: FSAP)方式を採用して、超音波の送受信を行う。FSAP方式は、Sampling Phased Array¹⁰⁾の原理を応用したものであり、各々の素子で超音波を送受信し、全ての波形パターンを波形記憶マトリクスに保存し、必要に応じてマトリクス成分を選択・処理することで欠陥エコーを

コンピュータ上で合成するものである。電子スキャン装置の価格は同時励振素子数に比例して高くなるため、ISIMのように多くの素子で励振してビームステアリングやフォーカシングを行う場合には、非常にコスト高となる。しかし、FSAP方式を用いれば、電子スキャン装置の同時励振機能を用いることなく、任意の方向に超音波ビームが生成できる。また、全波形パターンを波形記憶マトリクスに保存しているので、計測後であっても波形処理が可能である。

ここでは、波形記憶マトリクスに保存されている欠陥エコーの原波形に、次の2種類の波形処理を導入する。1つ目はデコンボリューション処理¹¹⁾である。原波形は、欠陥からの散乱波以外に、探触子の共振帯域や計測器の電気回路の特性等によって変調された波形となっている。従って、ここでは、これらの影響を取り除き、欠陥からの散乱波成分の抽出を行う。2つ目はアポダイゼーション処理¹²⁾である。ISIMは平面波を欠陥に入射することを前提として、理論が整備されている。実際のアレイ探触子から発振される超音波は円筒波を重ね合わせたものであり、厳密な平面波ではないことが欠陥の再構成精度を低下させる要因となる。そこで、本研究では、できるだけ位相の揃った超音波を欠陥に入射できるようにアポダイゼーション処理を導入する。以上の波形処理は、FSAP方式では波形記憶マトリクスを操作するだけであり、電子スキャン装置自体のハードウェアの改造は必要ない。

2. 逆散乱イメージング法 (ISIM)

筆者らの前論文⁸⁾では、2次元面外 (SH) 波を送受信する場合の ISIM の理論、および数値シミュレーションによる理論の検証が示されている。しかし、本研究で用いる電子スキャン装置は縦 (L) 波超音波を送受信するアレイ探触子を用いるため、ここでは、ISIM の L 波モードの定式化を述べる。ISIM には、欠陥領域を再構成するボルン型 ISIM と、欠陥境界部を再構成するキルヒホフ型 ISIM があるが、後に示す実験では、主としてき裂 (スリット) を映像化対象としているため、本論文ではキルヒホフ型 ISIM についてのみ記述する。

2.1 2次元面内波動場における超音波の送受信

ISIM で対象とする超音波の送受信概要を図-1 に示す。均質等方弾性体 D 内に欠陥 D^c が存在しているものとする。ここで扱う逆散乱問題とは、アレイ探触子から θ 方向に平面入射波 \mathbf{u}^{in} を送信し、欠陥 D^c によって散乱された波動 \mathbf{u}^{sc} を全ての素子で各々受信し、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。基底ベクトルを $(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2)$ とする2次元直交座標系 (x_1, x_2) を考える。以下では、物理量 \mathbf{w} の x_i 方

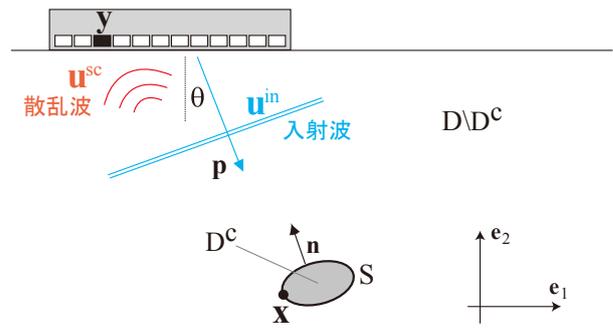


図-1 ISIM における超音波の送受信概要

向成分を w_i 等と指標表記 (総和規約を含む) で表す。角振動数を ω とする定常場において、素子点 \mathbf{y} で計測される欠陥からの散乱波は次のように表される¹³⁾。

$$u_n^{\text{sc}}(\mathbf{y}, \omega) = \int_D U_{in}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega) q_i(\mathbf{x}, \omega) dV(\mathbf{x}) \quad (1)$$

ここで、 $U(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega)$ は2次元面内波動問題の基本解であり、以下のように書ける。

$$U_{in}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega) = \frac{i}{4\mu} \left[H_0^{(1)}(k_{Tr}) \delta_{in} + \frac{1}{k_T^2} \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_n} \times \{ H_0^{(1)}(k_{Tr}) - H_0^{(1)}(k_{Lr}) \} \right] \quad (2)$$

ここで、 $r = |\mathbf{x} - \mathbf{y}|$, k_L と k_T はそれぞれ縦 (L) 波と横 (T) 波の波数、 μ はせん断弾性係数、 $H_0^{(1)}$ は第1種0次のハンケル関数である。ISIM では、欠陥とアレイ探触子の位置関係は、散乱 L 波と T 波が分離できる程度に遠方であると仮定する。従って、後の定式化で必要となる式 (2) の遠方表現を記しておく。 z が大きい場合、ハンケル関数は次式のように近似できる。

$$H_0^{(1)}(z) \approx \sqrt{\frac{2}{i\pi z}} \exp(iz) \quad (3)$$

上式を式 (2) に代入すると次式を得る。

$$U_{in}^{\text{far}}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega) = \frac{i}{4\mu} \left[(\delta_{in} - d_i d_n) \sqrt{\frac{2}{i\pi k_{Tr}}} \exp(ik_{Tr}r) + \left(\frac{k_L}{k_T} \right)^2 d_i d_n \sqrt{\frac{2}{i\pi k_{Lr}}} \exp(ik_{Lr}r) \right] \quad (4)$$

ここで $\mathbf{d} = (\mathbf{x} - \mathbf{y})/r$ である。

式 (1) における \mathbf{q} は等価散乱源¹³⁾ と呼ばれており、欠陥形状を表す特異関数 $\gamma(\mathbf{x})$ を含んでいる。2次元面内問題における等価散乱源は次のようになる。

$$q_i(\mathbf{x}, \omega) = -\gamma(\mathbf{x}) C_{ijkl} \{ n_j(\mathbf{x}) u_{k,l}(\mathbf{x}, \omega) - n_l(\mathbf{x}) u_k(\mathbf{x}, \omega) \delta / \partial x_j \} \quad (5)$$

ここで、 \mathbf{n} は図-1 に示すように材料内部を向く欠陥境界上の法線ベクトルである。また、 C_{ijkl} は母材 D の弾性スティフネスであり、本論文では等方性弾性体を

仮定しているので、ラメ定数 λ と μ を用いて、

$$C_{jklm} = \lambda \delta_{jk} \delta_{lm} + \mu (\delta_{jm} \delta_{kl} + \delta_{jl} \delta_{km}) \quad (6)$$

と表すことができる。上式で δ_{ij} はクロネッカーのデルタである。式 (5) の等価散乱源 \mathbf{q} を式 (1) に代入すると次式を得る。

$$\begin{aligned} u_n^{\text{sc}}(\mathbf{y}, \omega) &= - \int_D \gamma(\mathbf{x}) C_{ijkl} [n_j(\mathbf{x}) u_{k,l}(\mathbf{x}, \omega) U_{in}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega) \\ &\quad - n_l(\mathbf{x}) u_k(\mathbf{x}, \omega) U_{in,j}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega)] dV(\mathbf{x}) \quad (7) \end{aligned}$$

ここで、 $U_{in,j} = \frac{\partial U_{in}}{\partial x_j}$ である。

2.2 線形化

高周波域で有効とされるキルヒホフ近似を用いて、式 (7) を線形化する。キルヒホフ近似では、式 (7) において、入射波が欠陥境界上に到達したときの変位場 \mathbf{u} を、入射波 \mathbf{u}^{in} と反射波の和 \mathbf{u}^{ref} で置き換える。ISIM では、欠陥に入射する波動は平面 L 波と仮定し、その進行方向を $\mathbf{p} = (p_1, p_2)$ とする。このとき、入射波と反射波は次のように表される。

$$\begin{aligned} u_i^{\text{in}}(\mathbf{x}, \omega) &= u^0 p_i \exp(ik_L \mathbf{p} \cdot \mathbf{x}) \\ u_i^{\text{ref}}(\mathbf{x}, \omega) &= \sum_{\alpha} u^0 R_L^{\alpha}(\mathbf{x}) d_i^{\alpha} \exp(ik_{\alpha} \mathbf{p}^{\alpha} \cdot \mathbf{x}) \quad (8) \end{aligned}$$

上式で u^0 は振幅である。L 波を入射するので、波動の偏向方向は位相の進行方向 \mathbf{p} と同じである。また、 $\alpha = \text{L or T}$, $R_L^{\alpha}(\mathbf{x})$ は L 波が入射したときの反射 α 波の反射率、 \mathbf{d}^{α} は反射 α 波の偏向ベクトルを表している。従って、欠陥における変位は、次のように近似できる。

$$u_i(\mathbf{x}, \omega) \approx u_i^{\text{in}}(\mathbf{x}, \omega) + u_i^{\text{ref}}(\mathbf{x}, \omega) \quad (9)$$

入射波が直達する境界面上の各点で接平面を考えれば、接平面上でスネル則が成立するので、式 (9) と、その空間微分は

$$\begin{aligned} u_i &= u^0 \left[p_i + \sum_{\alpha} R_L^{\alpha}(\mathbf{x}) d_i^{\alpha} \right] \exp(ik_L \mathbf{p} \cdot \mathbf{x}) \\ u_{i,j} &= u^0 \left[ik_L p_i p_j + \sum_{\alpha} ik_{\alpha} p_j^{\alpha} d_i^{\alpha} R_L^{\alpha}(\mathbf{x}) \right] \exp(ik_L \mathbf{p} \cdot \mathbf{x}) \quad (10) \end{aligned}$$

となる。式 (10) を式 (7) に代入する。このとき、積分の主要項は法線が $\mathbf{n} = \mathbf{p}^L (= \mathbf{d}^L)$ なる条件を満足する停留点 (Stationary Phase Point) からの寄与分が卓越するとして評価することができる。面内波動場における逆散乱問題の線形化のための具体的な数式の展開は、筆者らの前論文¹⁵⁾に基づいているので割愛し、こ

では線形化されたフォームを示す。

$$\begin{aligned} \bar{A}^{\text{sc}}(k_1, y_2, \omega) &= -u^0 k_L \int_D \frac{\gamma(x_1, x_2)}{\sqrt{k_L^2 - k_1^2}} \exp[-i(k_1 - k_L p_1)x_1 \\ &\quad + ik_L p_2 x_2 + i\sqrt{k_L^2 - k_1^2}|y_2 - x_2|] dV \quad (11) \end{aligned}$$

上式の左辺は $\bar{A}^{\text{sc}}(k_1, y_2, k_L) = \bar{\mathbf{u}}^{\text{sc}} \cdot \mathbf{p}^L$ である。なお、関数の上付きの $\bar{}$ は、以下のような 1 次元フーリエ変換後の関数を表している。

$$\bar{\Psi}(k_1, y_2, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \Psi(y_1, y_2, \omega) \exp(-ik_1 y_1) dy_1 \quad (12)$$

波数空間 $\mathbf{K} = (k_1, k_2)$ と実空間 $\mathbf{x} = (x_1, x_2)$ との間の 2 次元フーリエ変換の定義は次式で表される¹⁶⁾。

$$\bar{\gamma}(k_1, k_2) = \iint_{-\infty}^{\infty} \gamma(x_1, x_2) \exp[-i(k_1 x_1 + k_2 x_2)] dx_1 dx_2 \quad (13)$$

アレイ探触子は欠陥の上方に設置される ($y_2 > x_2$) ものとして、式 (13) と式 (11) を比較すれば、

$$\begin{aligned} \bar{A}^{\text{sc}}(k_1, y_2, \omega) &= - \frac{u^0 k_L \exp(i\sqrt{k_L^2 - k_1^2} y_2)}{\sqrt{k_L^2 - k_1^2}} \\ &\quad \times \bar{\gamma} \left(k_1 - k_L p_1, \sqrt{k_L^2 - k_1^2} - k_L p_2 \right) \quad (14) \end{aligned}$$

であることがわかる。上式からわかるように、特性関数 γ のフーリエ変換である $\bar{\gamma}$ が、計測データ \bar{A}^{sc} から得られる。周波数を変えながら \bar{A}^{sc} を計測すれば、 \mathbf{K} -空間において、 $(-k_L p_1, -k_L p_2)$ を中心とする半径 k_L の半円上で欠陥のフーリエ変換 $\bar{\gamma}$ が求められることになる⁸⁾。最終的に \mathbf{K} -空間上において最大波数 $2k_L^{\text{max}}$ までの範囲で $\bar{\gamma}$ が得られるので、これを逆フーリエ変換すれば欠陥の境界形状 γ が再構成されることになる。

$$\gamma(x_1, x_2) = \frac{1}{(2\pi)^2} \iint_{-\infty}^{\infty} \bar{\gamma}(k_1, k_2) \exp[i(k_1 x_1 + k_2 x_2)] dk_1 dk_2 \quad (15)$$

上式は、2 次元高速フーリエ変換 (2D-FFT) を用いれば、高速に実行できる。

3. 計測実験概要と波形処理

3.1 計測実験装置

本実験の装置概要を図-2 に示す。ここでは、日立エンジニアリングアンドサービス社製の超音波電子スキュン装置 (ES3100) を用いて欠陥エコーを計測した。ES3100 では、欠陥エコーのホワイトノイズを軽減するために、10 回連続でデータ収録を行い、その平均を計測データとして記録している。サンプリング間隔は 10ns、振幅分解能は 8bit で計測を行う。実験で使用したアレイ探触子を図-3 に示す。この探触子はジャパンプローブ社製の公称中心周波数が 3MHz のものであり、素子幅は 0.7mm、ピッチは 0.8mm、奥行き長さは 9mm で

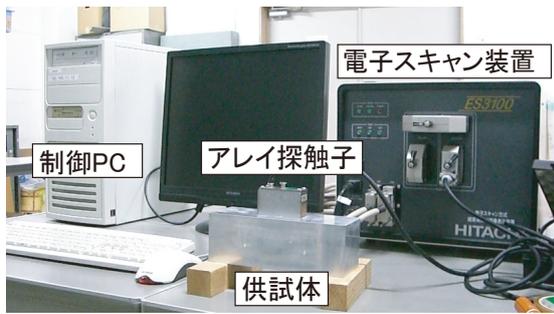


図-2 電子スキャン装置とリニアアレイ探触子

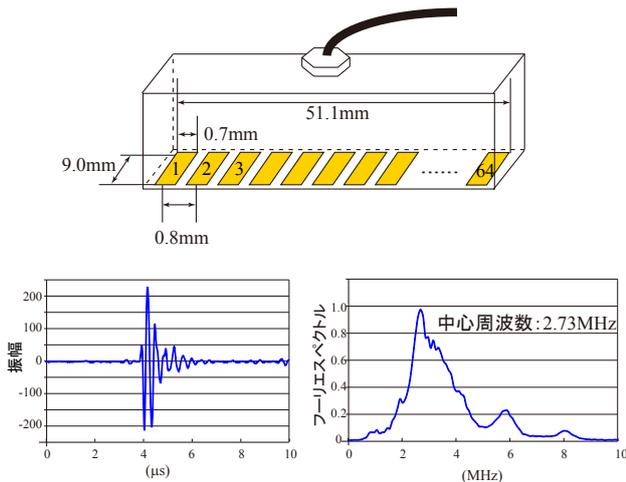


図-3 リニアアレイ探触子の素子配置図と1素子を用いて計測した被検体の裏面からのエコー(左下)とそのフーリエスペクトル(右下)

ある。この探触子の任意の1素子を矩形波信号で駆動して、アルミニウム被検体の底面エコーを計測したときの時間域波形とそのフーリエスペクトル(最大値を1に正規化)を図-3に示す。この探触子のピーク周波数は2.73MHzであることがわかる。実験では、アレイ探触子を直接被検体に接触させて超音波を送受信しており、アレイ探触子と被検体の接触媒質としてグリセリンペースト(ソニコート)を使用した。

3.2 全波形サンプリング処理 (FSAP) 方式

アレイ探触子を駆動するための電子スキャン装置は、振動素子にディレイ(時間遅延)を設けて電気回路でスイッチング処理することで、任意の方向や深さ方向にビームを送信できるものが一般的である³⁾。任意の方向に集束したビームを送信するためには、ホイヘンスの原理に基づいて各素子からの要素波(素元波)の位相を揃えて、1つの包絡線となるようにディレイを設定すればよい。従って、電気回路のスイッチング処理で同時に励振しなくても、1つの振動素子から発生する要素波を計測後に個々に重ね合わせることも集束ビームが生成できるはずである。これに着目して、振

動素子のすべての組み合わせで得られる波形を保存しておいて、この波形を選択・処理することで、計測後であっても任意の位置にビームを送信できるのがFSAP方式⁹⁾である。FSAP方式では、1つの素子によって超音波を送信し、すべての素子でエコーを個別に受信する。送信素子を変えながらこれを繰り返し、全素子の波形パターンを波形記憶マトリクスに保存する。保存された波形にコンピュータメモリ上でそれぞれディレイを作用させることで、一般的な電子スキャン装置と同様の波形が得られる。FSAP方式を用いれば、電子スキャン装置のスペックに寄らず、全ての素子を同時励振したときと同じ超音波ビームが生成できる。なお、ES3100の電子制御では最大24素子が同時励振可能であるが、FSAP方式を用いれば64素子励振が実現できる。

図-4は、被検体のある位置にビームを集束させた場合に使用するマトリクス要素の組み合わせを示している。ここで、波形記憶マトリクスの成分 W_{ij} には、素子No. j で送信して素子No. i で受信した場合の波形が保存されている*。例えば、64素子の全てを励振して欠陥エコーを素子No.1で受信する場合には、図-4の最上部に示すような波形記憶マトリクスの要素群を使う

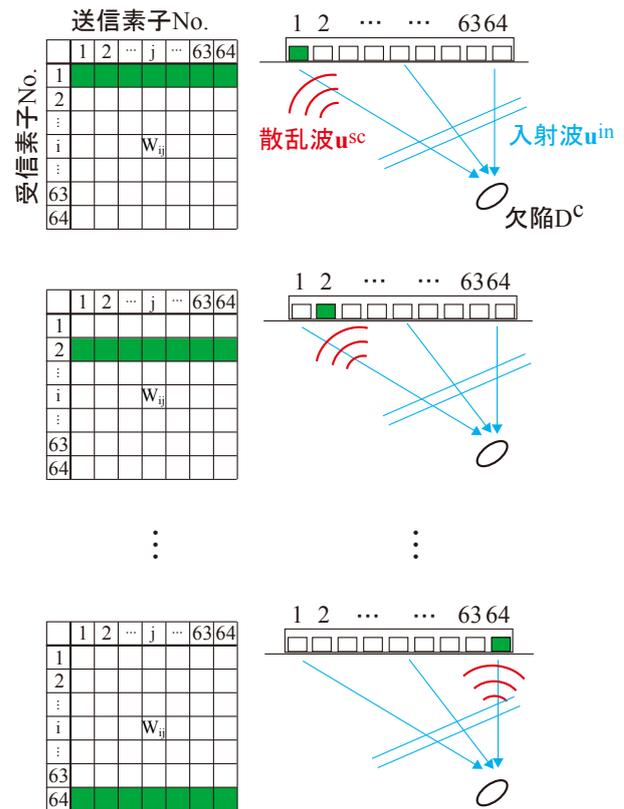


図-4 FSAP方式における波形記憶マトリクスと、ISIMで超音波を1方向に送信するためのマトリクス成分

* 波動の線形性から $W_{ij} = W_{ji}$ であるので、総素子数を N とすれば、実際の計測は $\frac{N^2+N}{2}$ の組み合わせパターンを計測すればよい。

ことになる．合成された波形 O_1 を数式で表現すれば

$$O_1(t) = \sum_{j=1}^{64} W_{1j}(t - \Delta t_{1j}) \quad (16)$$

となる．ここで， Δt_{1j} はディレイであり，ビームの送信方向や集束点に応じて任意に設定できる．ISIM では素子 No.1~64 までの受信点で得られる波形を用いるので，図-4 に示すように，最終的には波形記憶マトリクスすべての要素を用いることになる．ISIM は周波数領域で像を合成するものであるから，式 (16) の周波数領域の表現式を記しておく．式 (16) は素子 No.1 で受信したエコーであったが，一般性を考慮して素子 No. i における受信波形は次式で表現できる．

$$O_i(\omega) = \sum_{j=1}^{64} W_{ij}(\omega) \exp(i\omega\Delta t_{ij}) \quad (17)$$

3.3 波形処理

(1) デコンボリューション処理

逆散乱イメージング法は，欠陥からの散乱波成分を基に欠陥像を再構成する．実際の欠陥エコーが画面上でデジタル表示されるときには，欠陥からの散乱波以外に，探触子の周波数特性，アンプによる周波数特性，電気回路等によって変調された波形となっている．従って，電子スキャン装置で計測された欠陥エコーをそのまま逆散乱イメージング法のインプットとして用いるのは適切ではない．そこで，本研究では参照波実験によるデコンボリューション処理によって，欠陥から散乱波成分を抽出する．ここでは，著者らの前論文に基づいて⁶⁾，FSAP 方式で得られた波形の全パターンに処理を施している．詳細は省略するが，以下の要領で散乱波成分を抽出する． V_{ij} を素子 No. j で送信して素子 No. i で受信した場合の欠陥エコー（原波形）の周波数応答とすれば，散乱波成分の周波数応答は次式で取り出すことができる．

$$W_{ij}(\omega) = \frac{V_{ij}(\omega)}{V^{\text{ref}}(\omega)} \exp(2ik_L D) C'^2(\omega) R(\omega) \quad (18)$$

参照波実験は，欠陥を含まない被検体（厚さ D ）に同じアレイ探触子を設置し，任意の 1 素子から超音波を送信し，被検体の底面からの反射波 V^{ref} を同じ素子で計測する．式 (18) で， R は被検体底面における超音波の反射係数であり，ここでは被検体底面が平面で空気に接しているので周波数に寄らない定数 $R = -1$ とした．また， C' の回折補正の表現については Schmerr と Song が理論式¹¹⁾ を示している．式 (18) で得られた $W_{ij}(\omega)$ を式 (17) によって適切なディレイを用いて重ね合わせることで， \mathbf{y}_i 点の散乱波データ $A^{\text{sc}}(\mathbf{y}_i, \omega) = O_i(\omega)$ としている．

(2) アポダイゼーション処理

ISIM において入射波は，進行方向に垂直な面では位相の揃った平面波であるとして定式化している．しかし，実際のアレイ探触子から送信される超音波は，各素子からの円筒波をホイヘンスの原理に従って重ね合わせたものであり，厳密には平面波ではない．特に，アレイ探触子は有限の開口幅であるため，探触子の端からのエッジ波の発生は位相を不整合にする要因の一つである．エッジ波の影響を抑えるために，振動素子の励起電圧を個々に変えて超音波を発生することは，医療分野ではアポダイゼーション¹²⁾ と呼ばれている．電子スキャン装置に，アポダイゼーション機能を組み込もうとすれば電気回路の大幅な変更が必要であるが，FSAP 方式の場合は単に波形記憶マトリクスの重み付けを書き換えるだけである．ここで設定する重み関数は，一般的なアポダイゼーションを想定して図-5 に示す Blackman 窓関数¹⁷⁾ を試用してみる．このとき，重み関数 M_{ij} は次のように表される．

$$M_{ij} = 0.42 + 0.5 \cos(\pi r/r_o) + 0.08 \cos(2\pi r/r_o) \quad (19)$$

ここで， $r = \sqrt{[(i-1) - r_o]^2 + [(j-1) - r_o]^2}$ ， r_o は波形記憶マトリクスの中心から端までの距離である．この関数を，波形記憶マトリクスに次のように積算する．

$$W_{ij}(\omega) \leftarrow M_{ij} \times W_{ij}(\omega) \quad (20)$$

アポダイゼーション処理を導入した場合に，超音波の伝搬時の波形がどのように変わるかを調べるために，数値シミュレーションを行った．ここでは，マルチガウシアンビームモデル¹⁴⁾ を用いて，アレイ探触子か

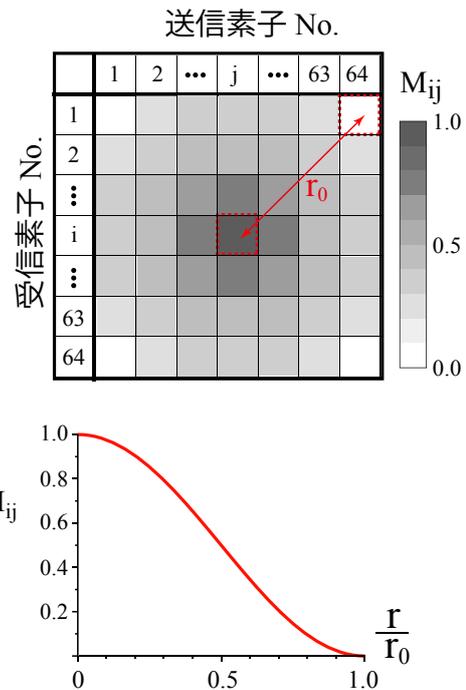


図-5 FSAP 方式へのアポダイゼーションの適用

ら放射される超音波の時間域の伝搬解析を行った。被検体は L 波音速 $c_L=6400\text{m/s}$, T 波音速 $c_T=3040\text{m/s}$, 密度 $\rho=2700\text{kg/m}^3$ のアルミニウムとし, アレイ探触子は図-3 に示した実際の探触子と同じ (素子数 64 個, ピッチ 0.8mm, 素子幅 0.7mm, 中心周波数 3MHz) としている。送信条件を $\theta = +40^\circ$, 焦点距離 60mm とした時の超音波のスナップショット (約 $9\mu\text{s}$ 後) を図-6 に示す。マルチガウシアンビームモデルは波動の偏向方向の成分を高速に計算できる。図-6 の上部はアポダイゼーション無しで波動を励起した場合, 下部は式 (19) のアポダイゼーションを適用した場合の図である。各図では L 波と T 波が現れているが, ISIM では L 波を使用して欠陥の映像化を行っているため, ここでは L 波の伝搬挙動に注目する。図-6 の上側の図を見ると, 超音波の集束部の振幅が大きくなっているものの, 波面が平面でないのがわかる。円弧状の波はエッジ波である。この現象は, ビームを集束させた場合に顕著に表れる。一方, 図-6 の下側に示すようにアポダイゼーションを導入すると, エッジ波の成分は減少し, 集束部では波動の位相が揃っているのがわかる。以上のシミュレーション結果から, アポダイゼーションを用いれば, 局所的ではあるが平面波に近い波動が送信できることがわかる。

4. 計測波形を用いた ISIM の検証

ここでは, 計測波形を用いて ISIM による金属内部欠陥の映像化を行う。アルミニウム被検体 (L

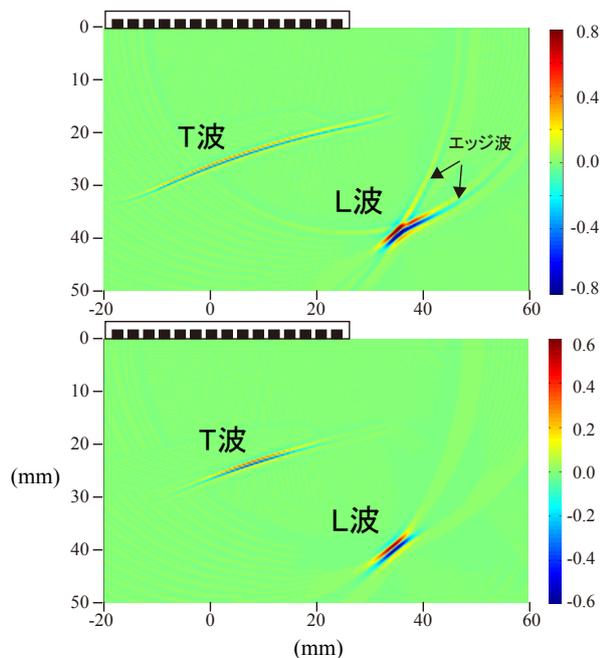


図-6 数値シミュレーションによる, アポダイゼーションを適用しない場合 (上) と適用した場合 (下) の超音波の伝搬挙動の可視化

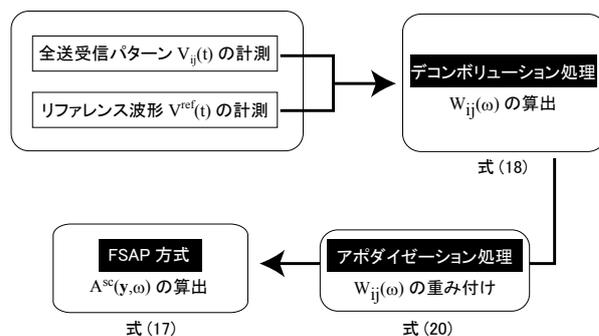


図-7 計測された超音波エコーから ISIM の入力データへの処理の流れ

波音速 $c_L=6400\text{m/s}$, T 波音速 $c_T=3040\text{m/s}$, 密度 $\rho=2700\text{kg/m}^3$) とし, その内部に人工欠陥 (横穴, スリット) を作成した。本研究の ISIM は, 探触子面から垂直な方向以外に欠陥がある場合に有効な方法であるため, 以下の映像化では, 探触子を被検体の上面に設置した場合, 右斜め下方向に欠陥がある場合のみを考える。図-3 で示したアレイ探触子を用いて, 欠陥エコーを計測する。デコンボリューション処理とアポダイゼーション処理を併用し, これを ISIM に入力することで, 欠陥像の再構成を行った (図-7 にデータ処理の流れを示す)。ここでは, 探触子の帯域を考慮して, 再構成に使用した超音波の周波数帯域は $0.1\text{MHz}\sim 7.0\text{MHz}$ とした。

4.1 横穴の映像化

図-8 に示すように, 深さ 40mm の位置に直径 2mm の横穴を作成した。横穴から左に 30mm の位置に探触子の中心が来るように設置し, 64 素子による全ての送受信パターンを計測した。この場合, 横穴の位置にビーム焦点が来るように ($\theta=36.87^\circ$), FSAP 方式のディレイを調節した。欠陥エコーはデコンボリューション処理によって散乱波成分を抽出している。図-8 の上側に示す映像化はアポダイゼーションを適用しない場合, 下側はアポダイゼーションを適用した場合である。図中では, $\gamma(\mathbf{x})$ に色をつけてプロットしている (最大値を 1 に正規化)。これらを比較すると, アポダイゼーションを適用した場合には, 横穴の右下に現れる偽像部分が抑えられることがわかる。また, 数値シミュレーションの結果⁸⁾ に比べて, 両図とも実際の欠陥の大きさよりも若干大きめに再現されている。この原因として, 送信角 θ が大きくなるほど, アレイ探触子から放射される L 波の指向性が小さくなるため SN 比が低下すること, 本研究で用いている探触子が 2.73MHz を中心とした有限の周波数帯域であり, シミュレーションに比べて高周波成分が欠如するため分解能が低下していることの 2 点が考えられる。

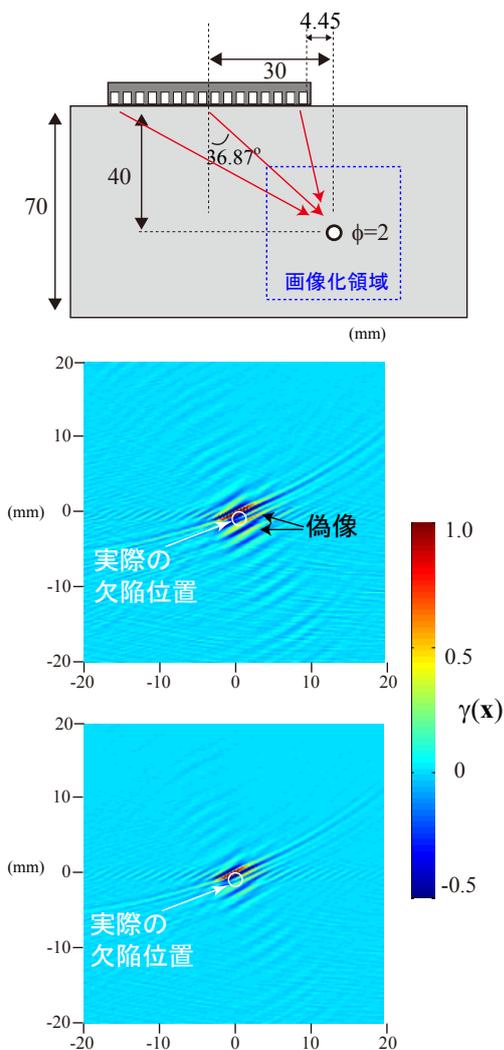


図-8 横穴の映像化(上図：アボダイゼーション無し，下図：アボダイゼーション有り)

4.2 内部スリットの再構成

ここでは、図-9に示すような、水平から60°傾いている貫通スリットをアルミニウム被検体に作成した。スリットの長さは4mm、幅は0.4mmである。図-9では、探触子の設置位置を変化させた場合のスリットの映像化結果を示す。ここでは、いずれもスリットの中心部にビームが集束するように、FSAP方式のディレイを調節した。スリットと探触子の中心が20mm離れている場合は、主としてスリットの上端部が赤色で再現されている。水平距離が30mmになると、スリットの下端部の反応が大きくなり、上端部と下端部の両方が赤色で映像化されているのが分かる。これは、スリット下端部からの散乱波(回折波)の成分を多く受信できるようになったためだと考えられる。上端部と下端部が映像化されれば内部スリットの大きさと傾斜角度が推定可能である。

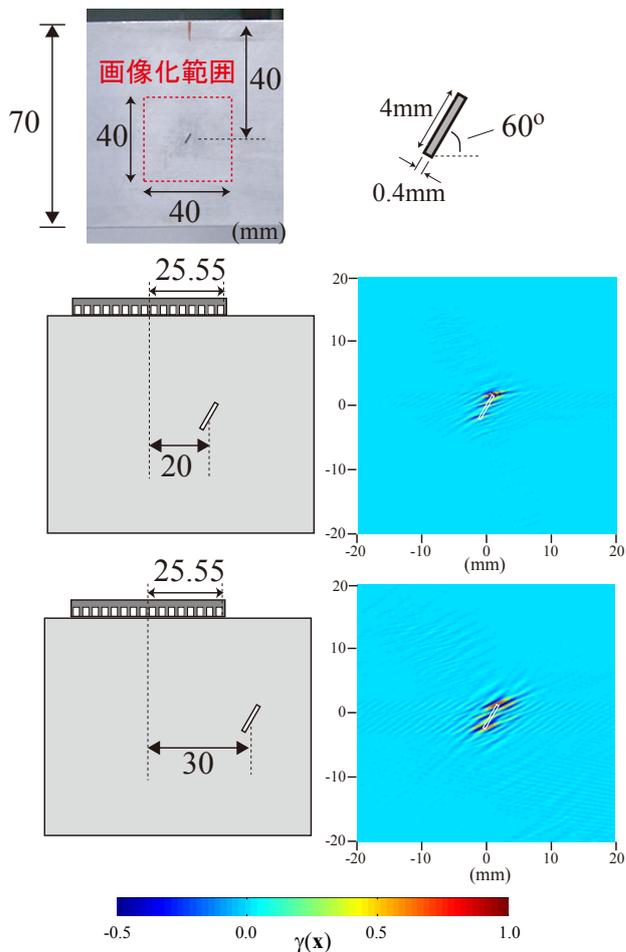


図-9 探触子の設置位置をずらした場合の内部スリットの映像化結果

5. ビーム焦点を多数設定した場合の裏面スリットの再構成

金属部材に発生する欠陥の中で、疲労き裂やSCCなどのき裂は検出が遅れると材料の突然の破断に至る危険性がある、き裂は溶接部などで多く発生し、特に裏面から発生するき裂の早期検出と、その高さを推定することは重要である。ここでは、図-10に示すようなアルミニウム被検体の裏面に作成した高さ10mmと5mmのスリット(幅0.2mm)を考える。き裂の発生部(コーナ部)は大凡のスキャンによって把握できているという前提で、コーナ部からき裂の成長方向を真上と仮定して、ビーム集束位置を変えながら映像化を行った。図-10中の桃色の点がビームの集束点である。最も下の集束点はコーナ部から-2mmの位置、最も上の集束点はコーナ部から+15mmの位置として、1mmおきに計18の集束点を設定した。FSAP方式では、1度波形記憶マトリクスを作れば、何度でも任意に超音波の集束点を変えることができるので、それぞれの集束点に応じて適切にディレイを設定して1枚の画像を作る。これを計18枚重ね合わせたものが図-10の映像化結果で

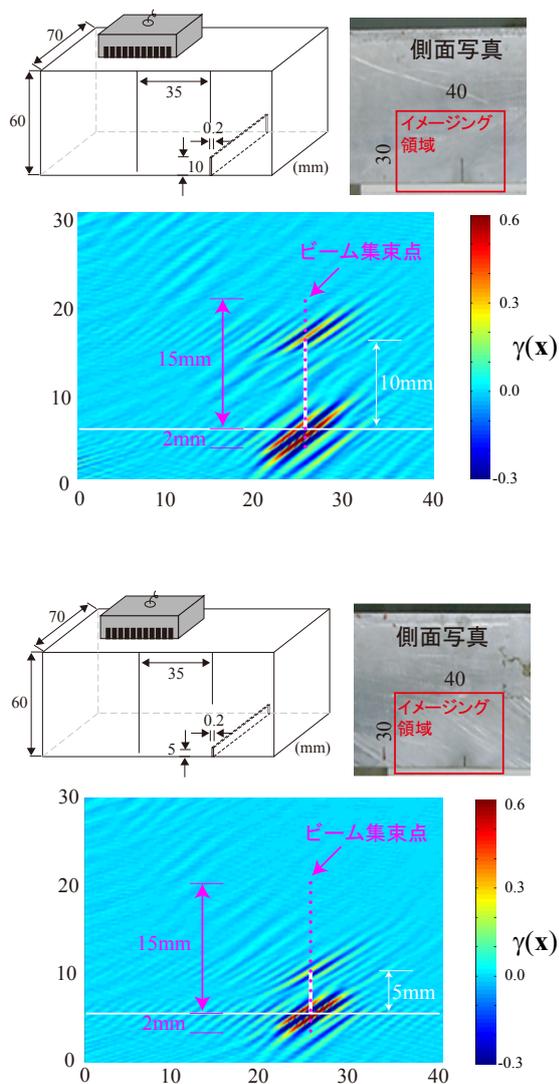


図-10 高さが異なる裏面スリットの映像化結果

ある。図-10の上側は、スリット高さが10mmの被検体を映像化したものであるが、スリット端部とコーナ部が鮮明に現れており、この結果からスリット高さが良好に推定できる。図-10の下側は、スリット高さが5mmの被検体を映像化したもの。スリット端部の感度が若干弱くなっているが、スリット高さは5mmであると推定可能である。

6. 結論

本研究では、超音波アレイ探触子で得られる欠陥エコーを基に、金属内部の欠陥形状を再構成する逆散乱イメージング法 (ISIM) の検証を行った。従来の ISIM⁶⁾ では、探触子面に対して垂直な方向にある欠陥が精度良く再構成することができたが、垂直方向から外れた範囲の再構成精度の向上が課題であった。ここでは、全波形サンプリング処理 (FSAP) 方式によるビームステアリング・フォーカシングを利用して超音波を斜め方

向に送信することによって、垂直な方向以外にある欠陥形状について ISIM による再構成を試みた。FSAP 方式の利点は任意の方向に超音波が送信できるだけでなく、超音波の全送受信パターンをストアしているので何度でも映像化が再現できること、計測後であっても波形処理が適用できるということである。ここでは、デコンボリューション処理とアポダイゼーション処理を併用して、計測波形を用いて人工欠陥の再構成を行った。映像化の結果、ISIM は人工欠陥の形状と大きさが良好に再現可能であることを示した。また、実際の応用を考えて裏面スリットの再構成を行った。その結果、スリットに対して複数の集束点で得られた欠陥像を重ね合わせることで、スリット端部の検出精度が向上し、スリット高さの推定が良好にできることを示した。

探触子面から垂直な方向にある欠陥は従来の ISIM によって映像化を行えばよく、目的とする欠陥の位置によって本手法と使い分ければ良いと考える。また、欠陥形状は直交座標系にプロットされるので、探触子を同位置に設置した場合に、従来の ISIM と本手法による欠陥画像を重ね合わせて映像化することで SN 比の向上も期待できる。ISIM は周波数領域で欠陥像を再構成するものであり、時間領域で欠陥の映像化を行う手法に比べて、高速に映像化できることである。特に 3次元イメージングにおいて ISIM は効果的であると思われる。従って、3次元欠陥映像化システムの構築も早急に取り組むべき課題である。

謝辞： 本研究は、科学研究費補助金 (若手研究 A: 課題番号 18686038, 代表 中畑和之) の補助を受けて行われました。ここに、記して謝辞を表します。

参考文献

- 1) Mostafa, F. and Kak, A.C.: Ultrasonic B-scan imaging: theory of image formation and technique for restoration, *Ultrasonic Imaging*, Vol.2, pp.1-47, 1980.
- 2) 小島正: アレイ探触子, 非破壊検査, Vol.51, No.11, pp.705-709, 2002.
- 3) 特集 フェイズドアレイ超音波技術の最近の展開, 非破壊検査, Vol.56, No.10, pp.503-529, 2007.
- 4) Karasawa, H., Izumi, M., Suzuki, T., Nagai, S., Tamura, M. and Fujimori, S.: Development of under-sodium three-dimensional visual inspection technique using matrix-arrayed ultrasonic transducer, *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol.37, No.9, pp.769-779, 2000.
- 5) Rattanasuwannachart, N., Takahashi, K., Miki, C. and Hirose, S.: Development of 3D flaw detection system with multi-channel planar array probes and 3D SAFT algorithms, *Structural Eng. / Earthquake Eng.*, Vol.22, No.1, pp.27s-39s, 2005.
- 6) 中畑和之, 松岡ちひろ, 廣瀬壮一, 超音波電子スキャン装置を用いた逆散乱イメージング法の検証, 土木学会論文集 A, Vol.65, No.2, pp.505-513, 2009.
- 7) Wooh, S-C. and Shi, Y.: Optimum beam steering of linear phased arrays, *Wave Motion*, Vol.29, pp.245-265, 1999.

- 8) 中畑和之, 上甲智史, 廣瀬壮一: 逆散乱解析法の超音波フェーズドアレイ探傷への応用, 応用力学論文集, Vol.10, pp.61–68, 2007.
- 9) 中畑和之, 平田正憲, 廣瀬壮一: 全波形サンプリング処理方式を利用した散乱振幅からの欠陥再構成, 非破壊検査, Vol.59, No.6, pp.277–283, 2010.
- 10) Bernus, L., Bulavinov, A., Dalichow, M., Joneit, D., Kröning, M. and Reddy, K.M.: Sampling phased array – a new technique for signal processing and ultrasonic imaging, *Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, Vol.48, No.9, pp.545–549, 2006.
- 11) Schmerr, L.W. and Song, S.-J.: *Ultrasonic Nondestructive Evaluation Systems – Models and Measurements*, Springer–Verlag, New York, 2007.
- 12) Olbrish, K.D. and Shung, K.K.: Physical apodization of ultrasonic arrays, *Proceedings of SPIE*, Vol.3037, pp.196–205, 1997.
- 13) 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.
- 14) Zhao, X. and Gang, T.: Nonparaxial multi-Gaussian beam models and measurement models for phased array transducer, *Ultrasonics*, Vol.49, pp.126–130, 2009.
- 15) 中畑和之, 北原道弘: 多点受信波形を用いた逆散乱解析の高精度化, 土木学会論文集, No.745/I-65, pp.143–153, 2003.
- 16) Langenberg, K.J.: Introduction to the special issue on inverse problems, *Wave Motion*, Vol.11, pp.99–112, 1989.
- 17) Weisstein, E.W.: *CRC Concise Encyclopedia of Mathematics*, Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, 2003.

(2010年3月9日 受付)