

超音波回折トモグラフィの鋼部材の超音波探傷試験への適用の試み

高橋政則*・三木千壽**・劉 銘崇***・
岩立次郎****

超音波探傷の画像化手法の一つとして超音波回折トモグラフィを取り上げ、金属中の欠陥の検出精度について検討を加えた。本手法は従来の医学分野で利用されていたトモグラフィの鋼部材の非破壊探傷試験への適用を試みたものであり、測定システムが簡単であることや、用いる参照波が広帯域パルス波であるなどの特徴を持っている。

Key Words : ultrasonic inspection, imaging, diffraction, tomography, B-scope

1. はじめに

最近、構造部材の強度評価や損傷度評価を目的として、高精度かつ定量的な非破壊評価が求められさまざまな試みがなされている¹⁾。溶接欠陥や疲労亀裂を対象とした各種の非破壊検査方法のうち、その目的に最も適しているのが超音波探傷といえる。図-1に超音波探傷結果の表示方法として用いられているA、B及びC-Scopeの概略を示す。これらのうち最も一般に用いられているのはA-Scope表示である。しかし、A-Scope表示は客観性や記録性に欠けるといったしばしば指摘される問題の他、探触子から放射される音ビームの近距離音場限界距離内におけるビーム幅によって横方向分解能が決定されてしまうという本質的な欠点を有している。そのため、超音波探傷は特に遠距離での横方向分解能は他の非破壊検査手法に比べ劣っているといえる。また、自動超音波探傷にしばしば適用されるB-ScopeおよびC-ScopeはA-Scopeを平面あるいは直線上に並べただけであり、客観性の問題は解決されているものの分解能などの性能の改善には至っていない。

従来の超音波探傷の欠点を改良するために、超音波の持つ様々な情報を波動理論を用いて解析し定量的評価を行う試みがなされている^{2)~5)}。画像化に関してはIshiiら⁶⁾がDelay & Sum法により、欠陥からの反射波の重ね合わせを用いて開口合成を行っている。種々の大きさの欠陥の映像再構成を行った超音波ホログラフィも開口合成の原理を応用して解像度を上げる手法の一つと言える。El-Sum⁷⁾は従来のレーザー光線を用いたホログラフィの原理を用いて、超音波によるホログラフィを開発

した。この方法で用いられる波動は干渉性が高く、重ね合わせが容易なものでなければならない。

本研究では鋼構造物の非破壊検査について適用の可能性のあるものとして超音波回折トモグラフィに着目し、その原理に基づいた非破壊検査システムを構築しようとするものである。本研究で用いた超音波回折トモグラフィはNagai⁹⁾によって提案された超音波波動の回折現象を考慮したフーリエ領域再構成法である。

2. 回折超音波トモグラフィの原理

図-2に示すように、ある信号を物体の中に進行させ、その信号をスクリーンに投影したとき、スクリーン上に得られるその振幅等の情報は、物体を伝播している間にその経路上の物性値によって影響を受けているため、信号の伝播経路上の物体の物性の積分値を示していると考えられる。断層映像を得たい物体に対して (x, y) 座標を図-2のようにとる。この (x, y) 座標に対して θ 回転した座標 $X-Y$ を考え、その座標の Y 軸に平行に信号を照射する。この信号が、 (x, y) 座標の原点から図-2に示すように D 離れ、 Y 軸に平行な直線 L に沿って物体を透過した後、投影される。この場合、投影データと物体を表す関数の関係を数式で表すと、次式のようになる。

$$p(X, \theta) = \int_L f(x, y) dY \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $p(X, \theta)$ が投影データ、 $f(x, y)$ が物体を表す関数である。この関数 $f(x, y)$ の変換をRadon変換¹⁰⁾という。

Radon変換におけるプロジェクションデータ $p(X, \theta)$ を記述する空間パラメータである X, θ を変化させて、 $p(X, \theta)$ を測定することによって、 $f(x, y)$ についての連立方程式を構成することができる。この連立方程式を解いて (x, y) 上に分布する物理定数を求めることがで

* 正会員 東京工業大学大学院修士課程 (現 建設省)

** 正会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科
(〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

*** 学生員 工修 東京工業大学大学院博士課程

**** 学生員 東京工業大学大学院修士課程

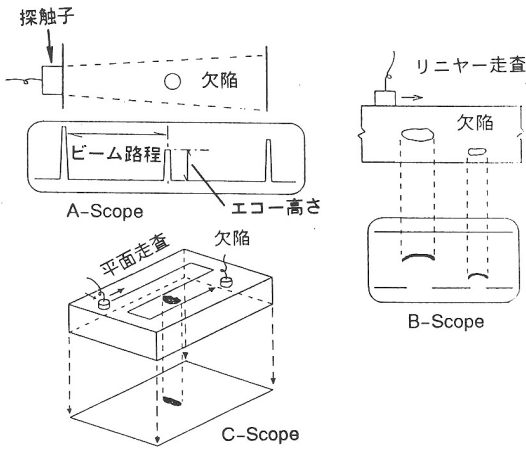


図-1 A, B, C-Scope 表示法

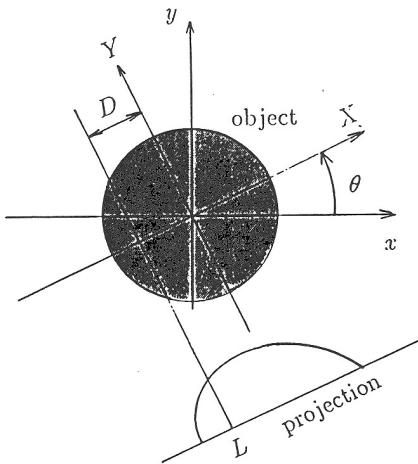


図-2 物体の投影

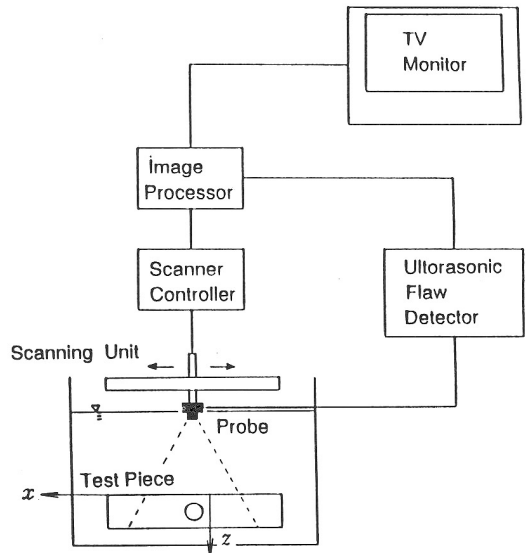


図-3 実験システム

きる。この方法をコンピュータトモグラフィという。

最も基本的なトモグラフィの手法は、医学の分野で用いられているX線を用いて、X線の送信機と受信機を回転させることで2次元の画像の最構成のためのパラメータを変化させる方法である。X線を用いた通常のトモグラフィと超音波回折トモグラフィの相違点は、大きく三つの点があげられる。一つめは画像再構成のための参照波動に超音波を用いる点である。二つめは超音波の性質としての顕著な回折現象を考慮に入れている点である。X線を用いた場合には回折はほとんど無視できる量であるが、超音波の場合には画像再構成において無視できない量となる。三つめはデータ収集の際のパラメータとして超音波の特徴としての伝播速度の遅さを利用して伝播時間を採用することができる点である。

波動方程式を解いた場合の観測点 \vec{r} で受信される散乱波 $p_s(\vec{r})$ と物体の性質を示す関数 γ の関係式は Born 近似を導入することより、以下の式になる。

$$p_s(\vec{r}) = \iint_S (\gamma_c k^2 g_w p_i + \gamma_a \nabla g_w \cdot \nabla p_i) dS \dots \dots \dots (2)$$

g_w はある条件を基にした波動方程式の green 関数であり、単位の発射源があるとき、ある場所での音圧を示す。 p_i は入射波、 k は入射波の持つ波数である。 γ_a は水の密度との差を物体の密度で割った値、 γ_c は物体の圧縮率と水のそれとの差を水の圧縮率で割ったものであり、次のように表される。

$$\left. \begin{aligned} \gamma_c &= \frac{\kappa - \kappa_0}{\kappa_0} \\ \gamma_a &= \frac{\rho - \rho_0}{\rho} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (3)$$

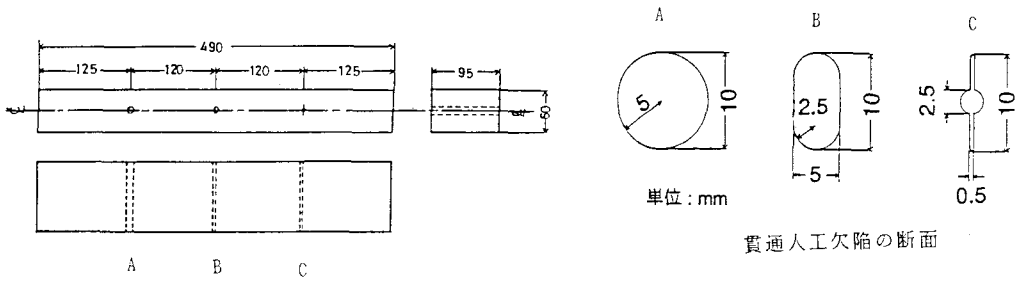


図-4 鋼ブロック試験体

- κ_0 : 水の圧縮率
- κ : 対象の物体の圧縮率
- ρ_0 : 水の密度
- ρ : 対象の物体の密度

この式(2)は入射波 p_i が γ_a, γ_c などの物性値を持つ媒質中を伝播し、その物質の γ_a, γ_c の変化によって散乱するが、その位置 \vec{r} での散乱波 $p_s(\vec{r})$ を記述している。つまり、式(1)の物体を表す関数 $f(x, y)$ のかわりに γ_a, γ_c が導入されたということである。

欠陥の判定は物性値 $f(x, y)$ の分布として再構成された画像により行うことになる。通常の A-Scope に代表されるような欠陥判定の形式と対比して非常に直観的であり、特別なエコー波形判読技術は不必要となる。

データ取得の際にはラインスキヤニングを行ってデータを収集することで開口を大きく取ることができ、開口合成の理論を適用できるので分解能も従来の A, B, C-Scope に比べ改善される可能性がある。

3. 回折トモグラフィの処理過程

(1) 実験システムおよびデータの取得

図-3に実験システムの概略を示す。図-3に示すように水槽中に試験体を置き、その上をスキヤニング面に対し垂直に音軸を設置した探触子をスキヤニングする。探傷の対象としてはまず、精度の検証のために針金と鋼板を用い、次に図-4に示すような人工欠陥を含む鋼板試験体を用いた。この試験体は直方体の鋼材に3つの貫通人工欠陥を含んでおり、それぞれ異なる先端半径を有している。データの取得は一探触子法により、同一の探触子で送信し欠陥からの反射エコーを受信する。本研究では2次元画像の再構成を行うのでデータ収集の際の空間パラメータは1次元で十分であるため、スキヤニングは1本の直線のみラインスキヤニングとした。最終的なデータは、探触子の位置データとそれに対応した超音波波形データ $p(t, x_r, z_r)$ となる。ここで、 t は時間、 x_r はトランスデューサの位置、 z_r はスキヤニングラインの z 軸上の位置である(図-3)。回折トモグラフィのデータ収集のための探触子として最も適しているものは、なるべくフラットな指向性を持つものである。また、

得られたデータ $p(t, x_r, z_r)$ は時間軸に沿ってフーリエ変換し周波数領域で処理するため、なるべく広い周波数成分を持つものが要求される。

$$p(\omega, x_r, z_r) = \int_{-\infty}^{\infty} p(t, x_r, z_r) \exp(i\omega t) dt \dots \dots (4)$$

今回用いた探触子は中心周波数5MHzの広帯域、無焦点の円形振動子を持つ水浸型のものである。振動子の直径は10mmで水浸用の探触子としてはかなり小さいものである。

(2) 正規化のための参照波について

探触子の周波数は図-5のような分布をしているため、周波数をパラメータに用いるにあたり正規化する必要がある、そのための参照波が必要となる。正規化は時間軸上でフーリエ変換した取得データ $p(\omega, x_r, z_r)$ と同じく参照波データ $p_i(t)$ を時間軸上でフーリエ変換を行った $p_i(\omega)$ に対して次のように行われる。

$$p_n(\omega, x_r, z_r) = \frac{p(\omega, x_r, z_r)}{p_i(\omega)} \dots \dots (5)$$

参照波とするべき波は試験体中の伝播過程が既知かつその他の条件は欠陥からのエコーと同じであるような波が好ましい。参照波として使うことが考えられる波としては超音波探傷器のブラウン管上に表示される探触子から直接入射されている波や、試験体の底面や表面などから反射されてくる波が考えられる。しかし、最も単純に入射波形であると考えられる波である入射時にブラウン管に表示される波形は正確に媒質中に伝播する波を表しているとは考えにくい、そこで実際にブラウン管で観測される入射波形と十分に滑らかと考えられる鋼板からの反射波を比較検討した。図-6に本研究で用いた超音波探触子の探傷器のブラウン管上に表示される波を示す。本研究では広帯域探触子を用いているためその電気パルス信号が大きくその後が続く入射波の波形がきれいに観察できない。欠陥からの反射波形を図-7に示すが、この波形は安定したきれいな波形となっている。図-8に試験体底面からの反射波を示すが、実際に試験体内部に入射されている波に近いと考えられる。これらのことを考え合わせて、再構成の正規化のための参照波には反対側面からのエコーを使用した。

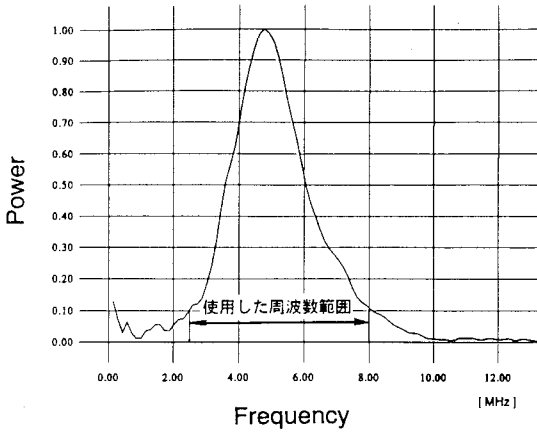


図-5 探触子の周波数分布

(3) 波数領域へのマッピングの際の補間について
入射波として2次元円筒波を仮定して円筒波のグリーン関数

$$g(\vec{r}|\vec{r}_0) = \frac{i}{4} H_0^{(1)}(k \cdot |\vec{r} - \vec{r}_0|) \dots \dots \dots (6)$$

を考える。これは、点音源が \vec{r}_0 の位置にある時、ある点 \vec{r} での音圧を示している。波動方程式から求めた物体 γ と散乱波 $p(\omega, x, z)$ の間の関係式 (2) を $R = |\vec{r} - \vec{r}_0|$ として、

$$p_n(\omega, x_r, z_r) = \frac{k^2}{16} \iint (\gamma_a - \gamma_c) \{H_0^{(1)}(kR)\}^2 dx dz \dots \dots \dots (7)$$

と変更できる。ここで γ_a, γ_c は式 (3) に示したように、物体の性質を表すパラメータであり、このパラメータの分布を求めることが物体の画像の再構成ということになる。最終的な画像のパラメータを $\gamma(x, z) = \gamma_a(x, z) - \gamma_c(x, z)$ とおくことによって式 (7) は

$$p_n(\omega, x_r, z_r) = \frac{k^2}{16} \iint \gamma(x, z) \{H_0^{(1)}(kR)\}^2 dx dz \dots \dots \dots (8)$$

と書き表すことが出来る。この式を探触子の x 軸座標 x_r に関するフーリエ変換

$$P_n(\omega, u, z_r) = \int_{-\infty}^{\infty} p_n(\omega, x_r, z_r) \exp(-iux) dx \dots \dots \dots (9)$$

に代入し、この関係と $\frac{\gamma}{\sqrt{R}}$ の2次元フーリエ変換

$$\Gamma_R(u, w) = \iint_{-\infty}^{\infty} \frac{\gamma(x, z)}{\sqrt{R}} \exp\{-i(ux+wz)\} dx dz \dots \dots \dots (10)$$

とを合わせて、

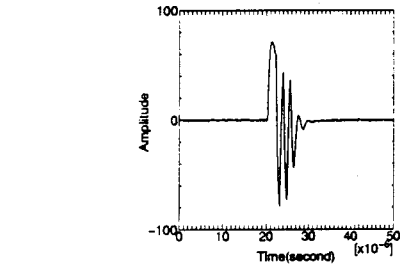


図-6 探触子で測定された波形

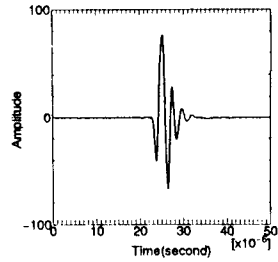


図-7 欠陥からの反射波

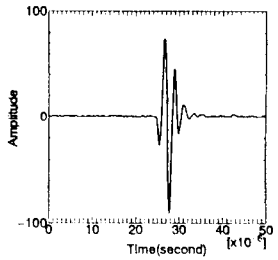


図-8 試験体からの反射波

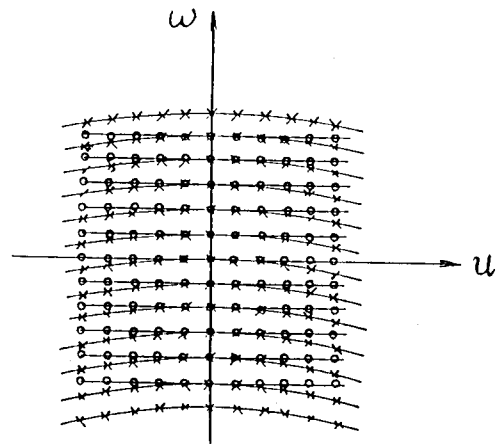


図-9 補間によるデータの分布状態の変換

$$P_n(\omega, u, z_r) = \frac{ik^{3/2} \exp\{i(4k^2 - u^2)^{1/2} z_r\}}{4(\pi i)^{1/2} (4k^2 - u^2)^{1/2}} \Gamma_R(u, (4k^2 - u^2)^{1/2}) \dots \dots \dots (11)$$

が得られる。しかし、ここで得られる波数領域データ

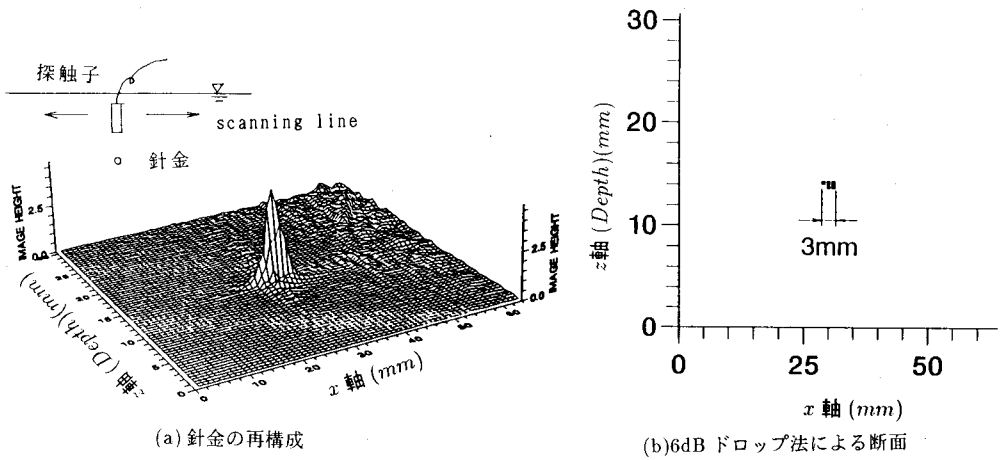


図-10 針金の再構成及び断面

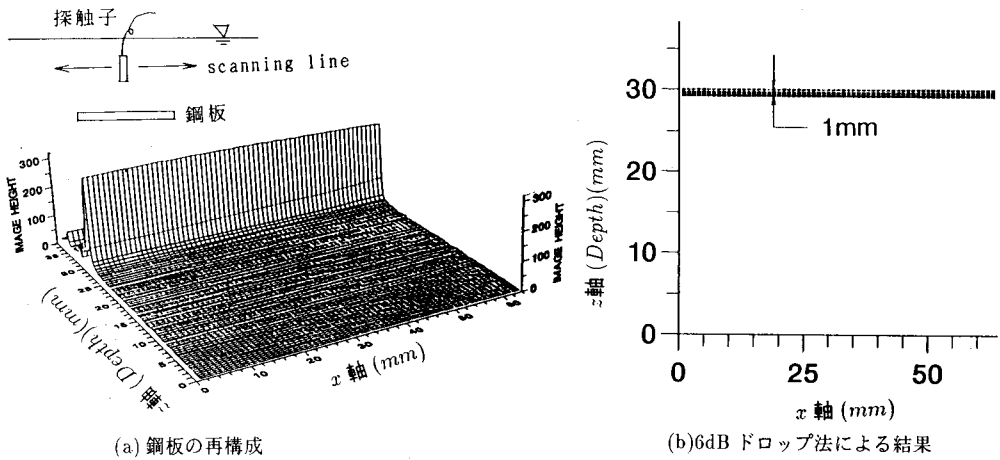


図-11 鋼板の再構成及び6dBドロップ法による結果

$\Gamma_R\{u, (4k^2 - u^2)^{1/2}\}$ の分布は図-9 に示すよう波数領域 (u, w) において円弧上に分布するように求められてしまう。このままでは離散フーリエ変換を行うことは出来ないで、格子状のデータ分布に変換するために補間を行う。この補間法としては様々なものがある。今回は補間法の中で最も基本的な2次元線形補間法を用いてマッピングを行った⁸⁾。この補間によって波数領域内で $\Gamma_R\{u, (4k^2 - u^2)^{1/2}\}$ が格子状の分布をなすように変換できる。

(4) 再構成における波数領域での積分範囲について再構成を行うために波数領域上に分布する画像データ $\Gamma_R\{u, (4k^2 - u^2)^{1/2}\}$ を2次元逆フーリエ変換する。

$$\gamma(x, z) = \frac{\sqrt{R}}{(2\pi)^2} \iint_{-k_{\max}}^{k_{\max}} \Gamma_R(u, w) \exp\{i(ux + wz)\} dudw \dots \dots \dots (12)$$

こうして求められる $\gamma(x, z)$ が対象の物体の画像である。この際、実際の計算では逆変換の積分範囲を有限として

扱うために積分範囲を有限なある値として決定しなければならない。本手法はパルス超音波を用いるためにその周波数成分にはある程度の幅があり、その幅を元に再構成の波数レンジを決定する。今回用いたパルス超音波の周波数成分の分布を図-5 に示す。縦軸は最大振幅で無次元化してある。この図によるとここで用いた公称5MHz探触子による入射波は中心周波数が4.8MHzとなっている。この分布の中でピーク周波数に対して再構成の波数の範囲として採用する周波数が問題となるが、ピーク周波数に対して10%位の振幅を持つ周波数をその再構成の際のレンジとして採用した。この際の周波数は図-5 に示すように、約2.5~8.0MHzとした。

4. 再構成の結果

超音波回折トモグラフィの精度の検証のために、まず、直径1.5mmの針金を用いてその断面図を再構成することを試みた。水槽中に水平に針金の長さ方向に対して、直角に探触子をスキャンして針金からエコーを取得し

た。針金の断面は超音波波長に比べて小さいので再構成対象としては大きさを持たない点と考えられる。このような点の画像を再構成することは、2次元の映像システムでの映像系においては、点反射源と考えられ、この映像系のインパルス応答を調べることができる。

さらに、針金の断面を1次元の画像と考えるならば、もう1つ次元を増加させて2次元の画像と考えられる十分な面積をもつ鋼板の再構成を実施した。これらの試験的な物体の再構成を行った上で、鋼材中の先端半径の異なる内部欠陥の画像の再構成を行った。

図-10 (a) に針金の再構成画像を示す。断面面のほぼ中央付近に針金の画像のピークが現れている。図-10 (a) に対して超音波探傷の寸法決定に通常用いられる6 dB ドロップ法(ピーク値の1/2)による断面像を図-10 (b) に示す。この図からは直径3 mmと判定され、実際の直径より大きく現れている。これが横方向の精度の概略を示しているといえる。これは、探触子の作り出す音場が理論の仮定と違っていることが原因であると考えられる。すなわち、理論上の仮定では再構成の対象に入射される参照波動は円筒波である。これは開口合成の手法を用いる際には大きな開口幅を持って対象物を見込むことができるという点で解像度を上げるために有利となる。しかし、実際の探触子は理想的な円筒波とは異なり、近距離音場限界距離を持った音ビームとして媒質内を伝播していくために、例えば今回用いた針金の位置からある程度遠くなるとエコーがキャッチできなくなり、開口幅を大きくできない。よって、再構成画像の針金のピークの部分の立ち上がりが緩慢なものになり、針金の半径である1.5 mmより大きく再構成されてしまっていると考えられる。図-11 (a) に鋼板を再構成した図を示す。深さ方向30 mm付近に鋼板の画像が、長く見えている。この場合は針金の場合と異なり、開口幅がエコーでキャッチできないために小さくなってしまいうということもなく比較的きれいに再構成できている。図-11 (a) に対して6 dB ドロップ法により断面図を図-11 (b) に示す。再構成の鋼板の像は理想的には幅を持たない線であるが、この図では約1 mmの幅を持っており6 dB ドロップを基準をすると縦方向の精度を示しているといえる。

図-12 に先端半径の異なる人工欠陥をトモグラフィによって再構成した図を示す。それぞれの再構成画像の振幅は先端半径5.0 mmの最大振幅で割って無次元化している。欠陥の先端半径の違いによって再構成の図に違いがみられる。しかし、鋼材内部欠陥の再構成の場合も針金の場合と同様に欠陥の先端半径をはっきり識別できる程再構成されず、裾野の広がったぼやけた画像になっている。

図-12の再構成画像から6 dB ドロップ法によって

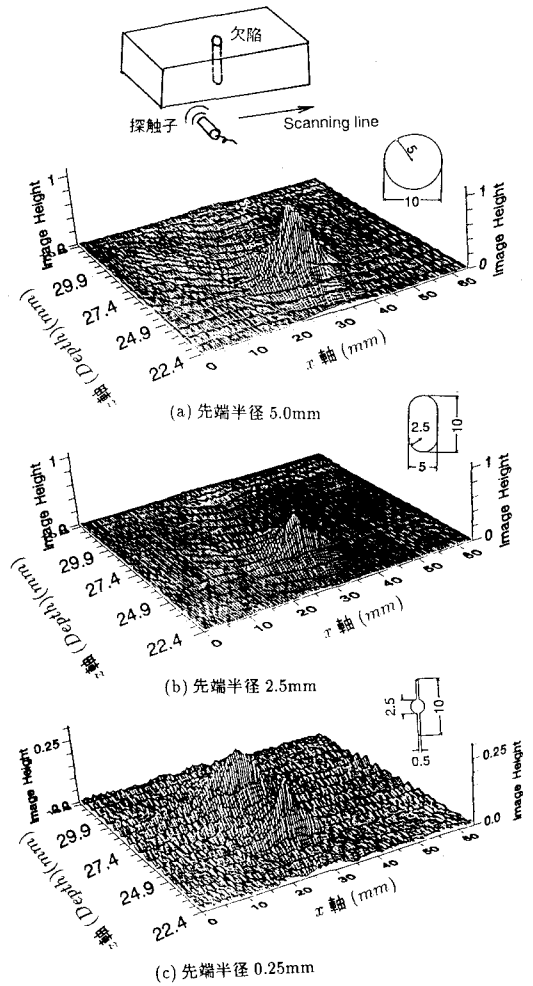
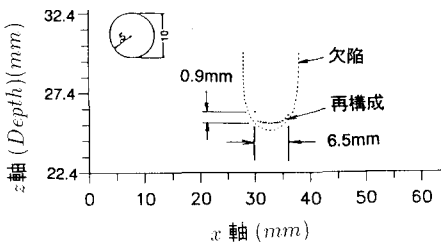
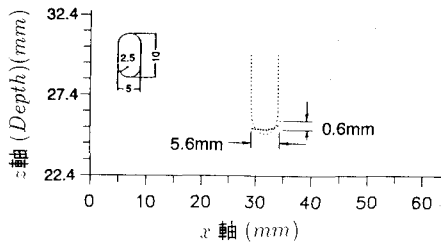


図-12 人工欠陥の再構成

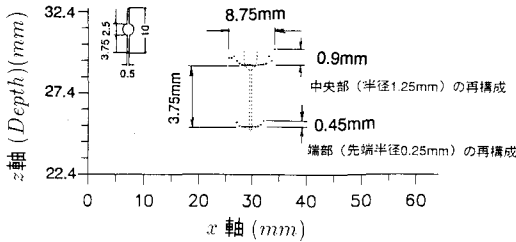
得られた断面図を図-13 に示す。いずれの欠陥に対しても欠陥の先端形状の画像が概略ではあるが再構成されていることがわかる。欠陥の寸法に対する再構成画像の水平方向の精度に関しては先端半径2.5 mmの再構成画像は実際の寸法はほぼ一致しているが、5.0 mmの場合は過小評価されている。それに対して深さ方向の精度は5 mmに対して0.9 mm、2.5 mmに対して0.6 mmと過小に評価する傾向にある。図-13 (c) では中央部円欠陥とスリット端部が再構成されており、特にそれぞれの深さ方向の相対的な位置関係は正確に現れている。しかし、スリット上端部と中央部ではその半径が5倍の差があるがその違いは識別できない。これらの原因としては、先端半径の減少による端部エコーの発生、コーナーの存在によるコーナーエコーの発生などが反射エコーを複雑にしていることが考えられる。また、探触子の作り出す音場が回折超音波トモグラフィの基礎理論における仮定である、球面波(2次元音場で言えば円筒波)となって



(a) 先端半径 5.0mm



(b) 先端半径 2.5mm



(c) 先端半径 0.25mm

図-13 6dB ドロップ法による断面

実際の探触子から照射される超音波波動の違いのため、開口合成による分解能の十分な向上までにはいたらなかったが、今後、波動場の近似法の改善や探触子の改良等により再構成画像の解像度を上げることが可能となると考えられる。

参考文献

- 1) Thompson, R.B. and Thompson, D.O. : Ultrasonics in nondestructive evaluation, *Proceedings of The IEEE*, Vol.73, No.12, December, 1985.
- 2) 北原道弘・野村正義・小木哲朗・J.D. Achenbach : 部材裏面クラックの一検出法, *構造工学論文集*, Vol.37 A, pp.465~477, March 1991.
- 3) 広瀬社一 : 定量的非破壊評価 (QNDE) とフラクチャーメカニクス, *構造工学論文集*, Vol. 35 A, pp.269~278, March 1989.
- 4) 構造工学委員会非破壊評価小委員会 : 土木構造物・材料の定量的非破壊へのアプローチ, *土木学会論文集*, No.428, pp.1~18, 1991.
- 5) T. Oshima, S. Mikami and S.G. Namachi : Analysis of stress wave propagation in composite rectangular beam in the case of ultrasonic pulse method, *Proc. of Japan Society of Civil Engineers*, No.416, I13, 1990.
- 6) Ishii, J. and Sasaki, S. : Basic experiments on synthetic aperture ultrasonic imaging, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.22, Sup.22-3, pp.130~132, 1983.
- 7) El-Sum, H.M.A. : The scope of the symposium, *Acoustical Holography*, Vol.1, pp.2, Plenum Press, New York 1967.
- 8) Pan, S.X. and Kak, Avinash C. : A computational study of reconstruction algorithms for diffraction tomography : Interpolation versus filtered backpropagation, *IEEE Transactions. on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Vol. ASSP-31, No.5, pp.1262~1275, Oct 1983.
- 9) Nagai, K. : A new synthetic-aperture focusing method for ultrasonic B-scan imaging by the Fourier transform, *IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics*, Vol.SU-32, 4 pp.531~536, July 1985.
- 10) Radon, J. : Über die Bestimmung von Funktion durch ihre integralwerte längs gewisser Mannigfaltigkeiten, *Ber. Verh. Sachs. Akad. Wiss*, 67, pp.262~277,1917. (1993. 9. 21 受付)

いないことなどがあげられる。

5. おわりに

画像処理の手法である超音波回折トモグラフィを非破壊検査に応用することに着目し、種々の先端半径を持つ人工欠陥に対して再構成を行った。先端半径の明確な測定には及ばなかったが、欠陥の先端形状画像が再構成されていることができた。理論においては入射波の特性と

A STUDY ON THE APPLYING OF ULTRASONIC DIFFRACTION TOMOGRAPHY TO ULTRASONIC INSPECTION

Masanori TAKAHASHI, Chitoshi MIKI, Ming-Chung LIOU and Jiro IWATATE

The paper presents the application of the imaging method of ultrasonic tomography to characterizing the flaws of a steel member. The applicability and accuracy of flow characterization is investigated by experiments. Three types of a circular hole, an elliptic hole and a slit in a steel block are used for the tests. Experiments are performed by a line scanning with a single broadband pulse probe in immersion testing.