

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

岩立次郎¹・田中雅人²・館石和雄³・三木千壽⁴

¹正会員 工修 日本道路公団試験研究所 (〒194 東京都町田市忠生 1-4-1)

²正会員 東京鐵骨橋梁製作所 (〒302 茨城県取手市下高井 1020)

³正会員 工博 東京工業大学助手 工学部土木工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

⁴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)

鋼材表面に対して超音波の入射角度を変化させることのできる実験システムを用い、疑似的に広がりを持った超音波ビームを表現して開口合成を行うことにより、超音波探傷の分解能向上を試みた。その結果、従来のB-Scopeに比べ横方向分解能が改善された欠陥の再構成結果を得ることができた。

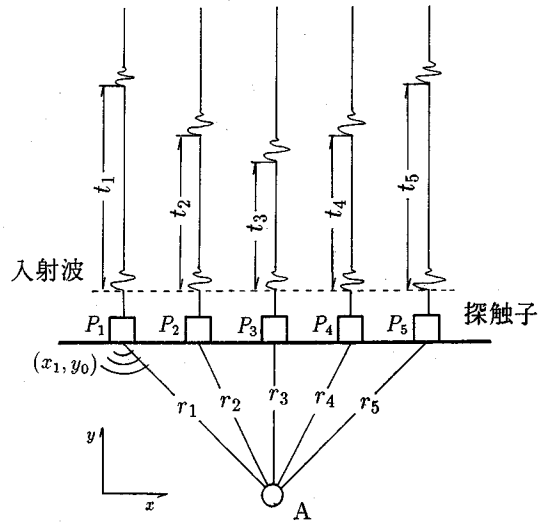
Key Words : ultrasonic inspection, aperture synthesis, B-Scope, imaging, resolution

1. はじめに

現在、一般的に用いられている超音波探傷試験の表示方法はA-Scope, B-ScopeおよびC-Scopeである。A-Scopeとは最も基本的な表示方法であり、探傷器のディスプレイに欠陥からのエコー振幅とエコー路程が表示されるものである。A-Scopeの問題点として、技術者の判断基準のあいまいさからくる客観性の欠如、記録性のなさが指摘されている。B-Scopeは探触子をラインスキャンすることにより、探触子の位置データをA-Scopeに加味したものである。C-Scopeは探触子を2次元で走査することによって平面的な欠陥位置、寸法、形状を示す表示方法である¹⁾。B-ScopeおよびC-Scopeは自動超音波探傷システムとして本州四国連絡橋のトラス弦材角溶接部の検査に適用され、品質向上に大きな役割をはたした²⁾。

B-ScopeおよびC-Scopeの導入によって記録性および客観性は改善されたが、破壊力学を用いて鋼構造物の疲労寿命や破壊強度を評価することを考えると、精度に関しては未だ十分ではない。これら非破壊検査の映像系の精度は距離 r 離れた2点を2点であると認識できる最小の距離 r_{res} (分解能)で表される。水平方向(横方向)の分解能は探触子から放射される超音波ビームの幅に依存し、垂直方向(距離方向)は波の継続時間に依存する。一般に横方向の分解能を向上させるためにビームを音響レンズで集束させた集束型探触子を用いることが多いが、ビーム幅を小さくすることには限界がある^{3),4)}。

開口合成は横方向分解能を改善させるために多点で得



図一 時間領域での開口合成

られたデータを総合的に処理する方法である。この方法はリモートセンシングにおけるマイクロ波を用いたレーダシステムにより開発されたものであり⁵⁾、広がりを持つビームを放射する送信系を有する場合に適用できる。ここでは、その中でも時間領域での重ね合わせを用いた開口合成^{6),7)}を超音波探傷試験に適用することを試みる。

2. 開口合成の原理

観測点 P_k から入射波(円筒波)が放射され、それが

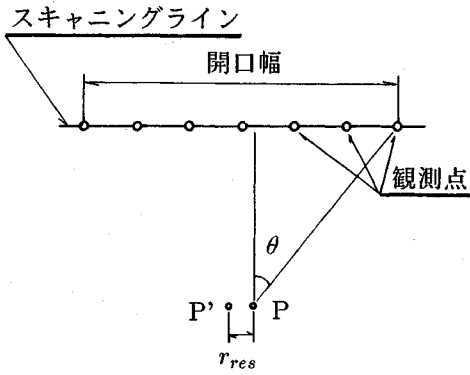


図-2 分解能

反射源 A によって反射されたエコーが再び観測点 P_k で観測データとして記録される。两点間を波 (波速 = c) が伝播する時間は観測点および反射源 A の座標を (x_k, y_0) , (x, y) とすると次式で表され、

$$t_k = \frac{2\sqrt{(x_k - x)^2 + (y_0 - y)^2}}{c} \quad (1)$$

反射源 A の反射レベルは観測点 P_k で得られた時間 t_k における振幅の値であるとしてとることができる (図-1)。

このような処理を各観測点ごとに行い重ね合わせることで再構成画像が得られる。画像化する断面を x, y 平面とし各点の反射レベルを $f(x, y)$ とすると開口合成の処理は次のような式で表せる。

$$f(x, y) = \sum_{k=1}^n p(x_k, y_0, t_r) \quad (2)$$

$f(x, y)$: (x, y) での反射源レベル

$p(x_k, y_0, t)$: 観測点 (x_k, y_0) でのデータ

c : 使用した波の速さ

開口合成の分解能は図-2に示すような隣接した2点 P, P' を考え、この2点を分離できる最小の距離によって表される。P をスキャニングラインの最も遠い観測点から見込む角度を θ とし、入射波の波長を λ とすると横方向分解能は次のように表せる⁷⁾。

$$r_{res-h} = \frac{\lambda}{2\sin\theta} \quad (3)$$

同様に縦方向分解能は次のようになる。

$$r_{res-d} = \frac{\lambda}{2\sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (4)$$

式 (3), (4) より、開口幅を広くとって θ を 90° に近づけることにより縦横両分解能は向上することになる。実際の超音波探触子の超音波ビームは探触子の径と波長に依存し、探触子の直径を D 、波長を λ とすると近距離音場は次の式で表される。

$$L = \frac{D^2}{4\lambda} \quad (5)$$

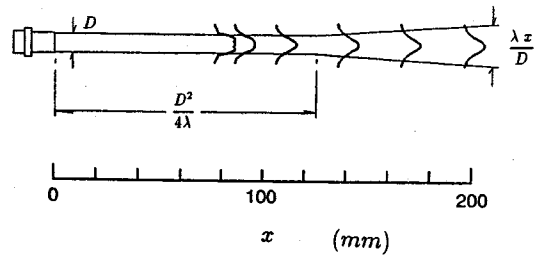


図-3 探触子のつくり出す音場

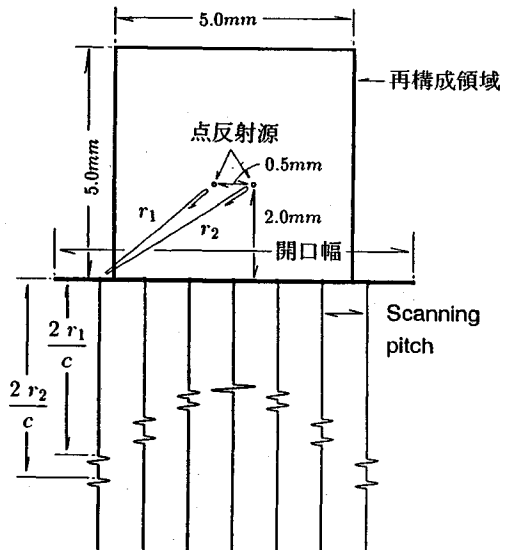


図-4 点音源を仮想したモデル

また、それ以遠のビームの広がり探触子からの距離を x とすると次のようになる。

$$H(x) = \frac{\lambda x}{D} \quad (6)$$

例えば直径 0.5 inch, 5 Mhz の無焦点探触子の音場は図-3のようになっている。この図にみられるように近距離音場以遠でもビームの広がり角度は非常に小さい。従って、垂直入射で探傷を行った場合、ある一点を捉えることのできる開口幅は限られており、図-3のような音圧分布の探触子を用いて開口合成を行っても分解能は向上しない。開口幅を大きくするためにはビームに広がりを持たせることが必要となる。そのためには、図-3から振動子の径を小さくする、もしくは波長を大きくすればよいことがわかる。しかし、振動子の径を小さくすることは感度を下げ、波長を大きくすることは距離方向分解能を悪くする。

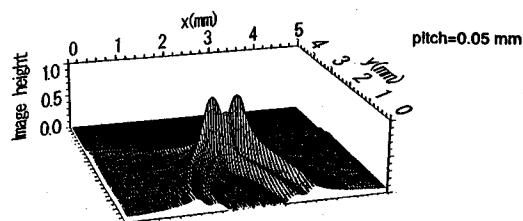
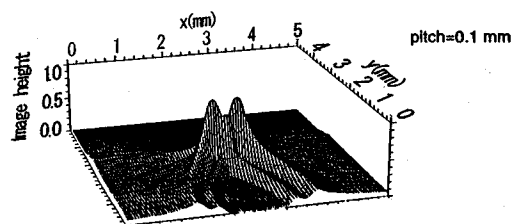
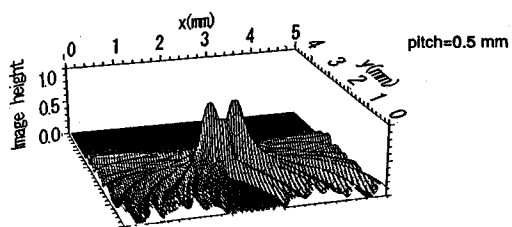
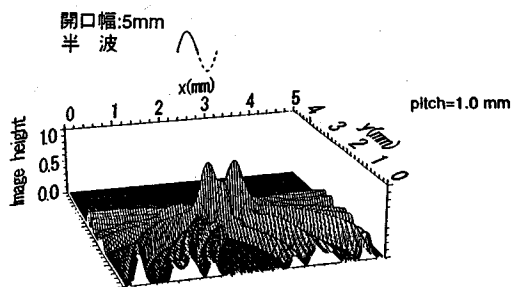


図-5 スキャンニングピッチの影響

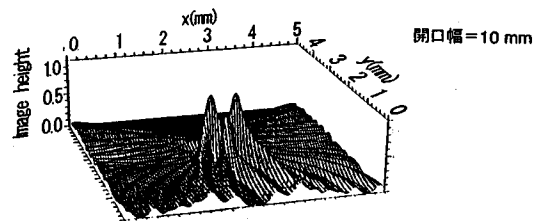
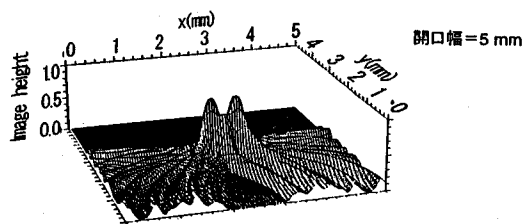
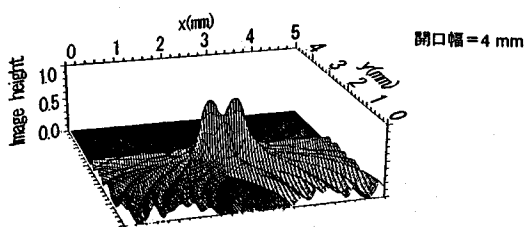
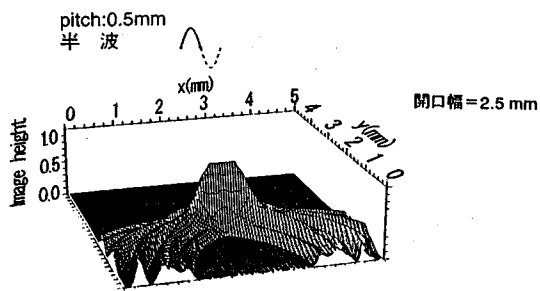


図-6 開口幅の影響

3. 開口合成の精度に対する開口幅・スキャンニングピッチ・波の数の影響

開口合成の分解能は式(3)、(4)によって理論的に表されるが、実際の分解能はスキャンニングピッチと開口幅および波の継続時間により決定される。そこで、図-4の様に2点の点反射源を想定してつくったデータに対してスキャンニングピッチ、開口幅および使用する波の数を変えて開口合成を行い、それらの再構成図に与える影響を調べた。データは鋼材表面のスキャンニングラインに沿った観測点から円筒波が放射され、観測点と点反射源の往復の距離 $2r_{1,2}$ を波速 c で伝播して返ってくるものと仮定して作成した。深さ方向 2.0 mm の所に水平方向に 0.5 mm 離れた2つの点反射源を想定し、開口合成によって再構成する画素の大きさを 0.05 mm とした。伝

播する波は鋼中の縦波、5 MHz の sine 波形とした。スキャンニングピッチの影響を調べるために、開口幅 5 mm で半波長の波を使用し、スキャンニングピッチを変化させて作成したデータに対して開口合成を行った結果を図-5に示す。なお、再構成映像の鉛直方向の軸はその点の反射源レベルを表しており、以下の図はプラス側だけを図化している。スキャンニングピッチが小さくなるに従って反射源以外の部分の波打ちが小さくなり、反射源がはっきりしてくるのがわかる。しかし、再構成される反射源の鋭さ(2点間の谷の深さ)はピッチが小さくなくてもそれほど変化しない。また、ピッチが 0.1 mm と 0.05 mm ではそれほど結果が変わらず、それ以上ピッチを小さくしても解像度が向上しないような値があると考えられる。

開口幅の影響をみるために、使用する波を半波長とし、

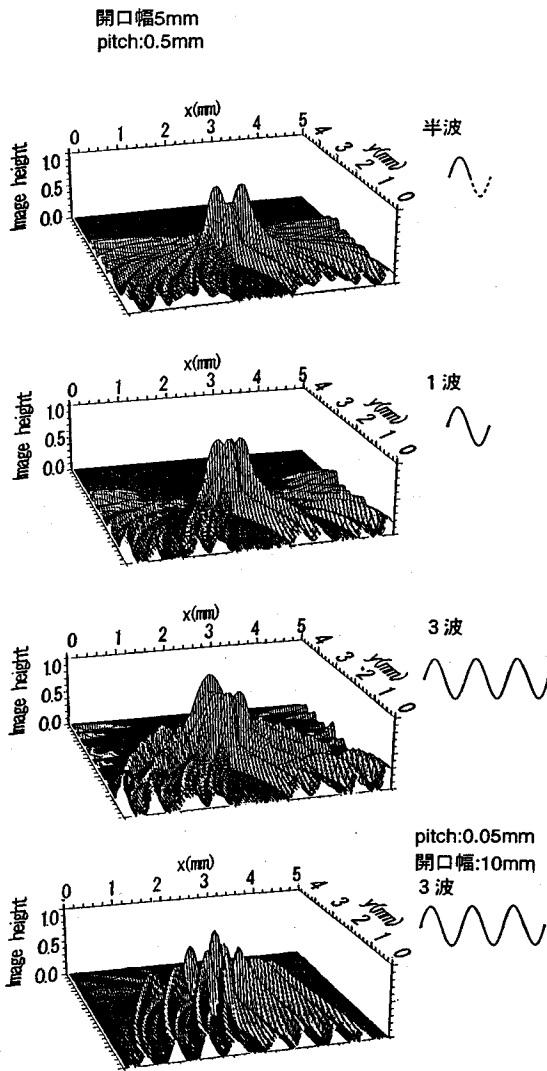


図-7 開口合成に用いる波の数の影響

スキャンニングピッチを 0.5 mm に固定して開口幅を変化させた結果を図-6 に示す。開口幅が大きくなるに従い反射源が鋭く再構成されてくるのがわかる。すなわち、開口幅が小さいときには B-Scope の結果と変わらないが、開口幅が大きくなるに従って反射源に対して斜めに入射する波の情報が合成されることにより、横方向の分解能が向上していることがわかる。

開口合成に用いる波の数の影響をみるために、開口幅を 5 mm、スキャンニングピッチを 0.5 mm に固定し、波の数を変えて開口合成を行った結果を図-7 に示す。同じスキャンニングピッチと開口幅で開口合成を行っても、使用する波を半波長から 1 波長に変えると、疑似ポイントの発生により音源を判別することが難しくなる。使用する波を 3 波とすると、更に後方にも疑似ポイントが発

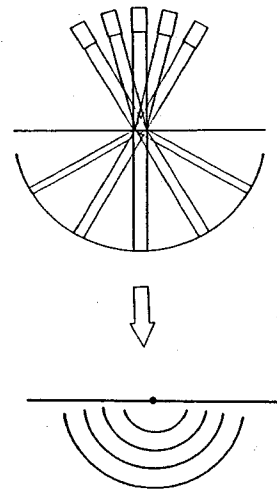


図-8 円筒波の疑似的な実現

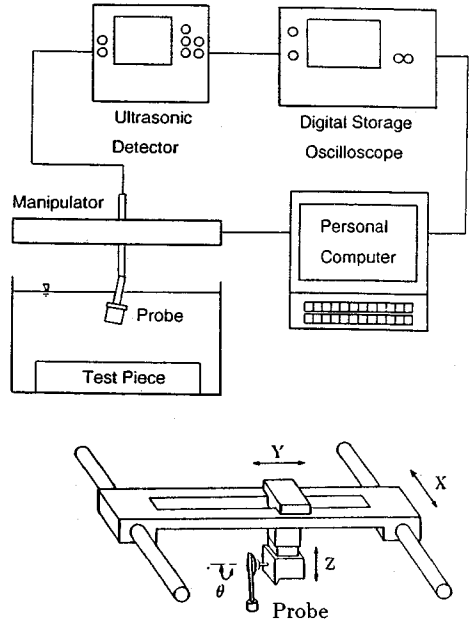


図-9 実験システム

生し、音源周辺の雑音も増加している。一番下の図はスキャンニングピッチおよび開口幅を増加させた結果であるが、これらによっても使用する波の数の増加による疑似ポイントを解消することはできない。これらの疑似ポイントは反射源が離れている場合それほど問題とならないが、反射源間距離がパルス幅より小さくなると影響がでてくる。

4. 入射角度変化による開口合成システム

広がりを持つ超音波ビームを疑似的に表現するために

表-1 実験装置の仕様

Probe	パナメトリック社製 5MHz, 焦点, 広帯域周波数
Ultrasonic Detector	クラウトクレーマー社製 USL 48
Digital Storage Oscilloscope	フィリップス社製 100MHz サンプリング
Personal Computer	NEC PC-9801

表-2 マニピュレータの精度

	精度
x,y 軸	0.05mm
z 軸	0.005mm
θ 軸	0.01°

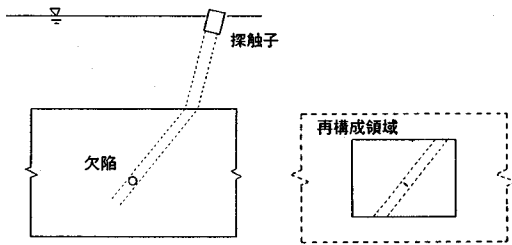


図-10 開口合成の実現

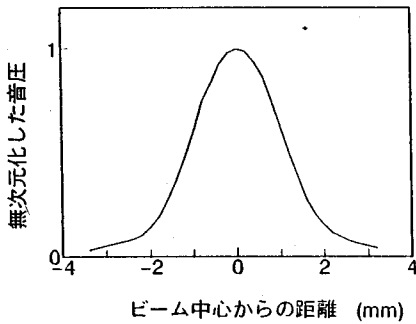


図-11 焦点探触子の音圧分布

は、探触子の角度を変化させればよい。つまり図-8のように探触子の角度を変化させ超音波を放射すれば疑似的に円筒波を表現できる。

本研究で開発した実験システムを図-9に示す。探触子はマニピュレータによって水平方向に2次元 (x , y 軸), 垂直方向に1次元 (z 軸) 移動でき、さらに x - z 平面において θ の角度変化をつけることができる。探触子位置および角度はコンピュータによって制御・記録される。

探傷器において発生させた電気パルスは探触子によって超音波に変換され放射される。探触子によって受信された超音波エコーは探傷器によって増幅され、オシロスコープで A/D 変換された後 GP-IB を介してパーソナ

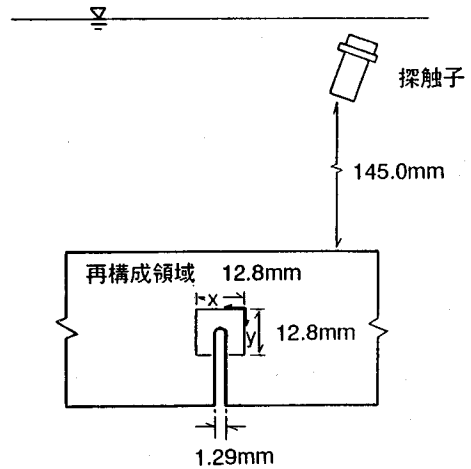
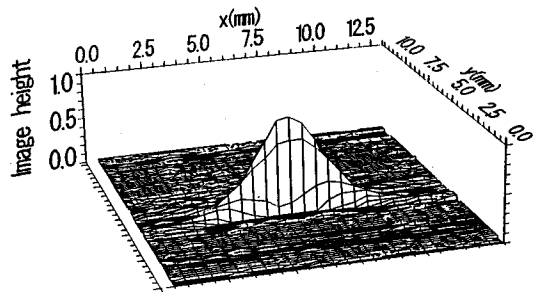
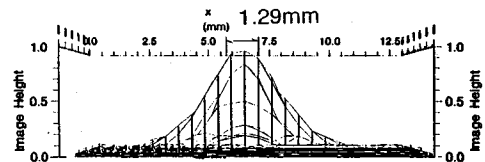


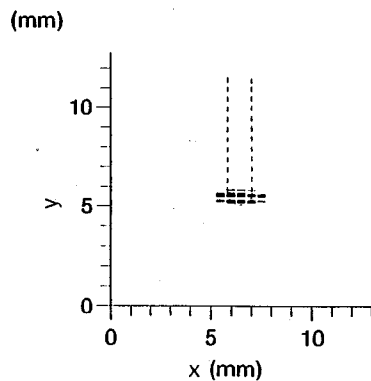
図-12 試験体



(a)

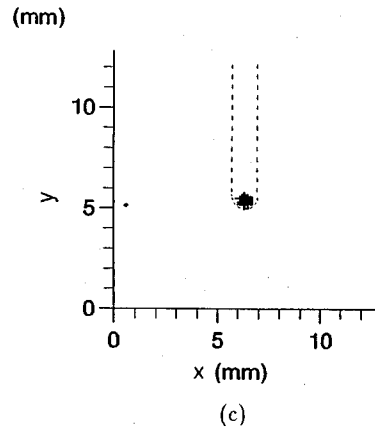
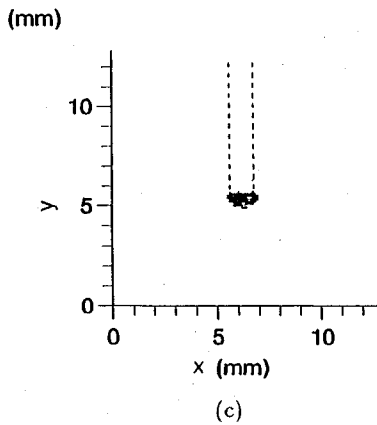
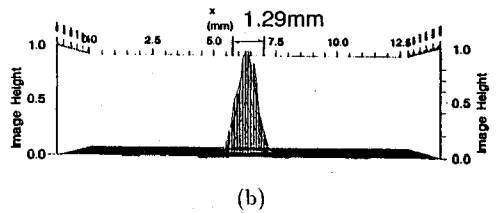
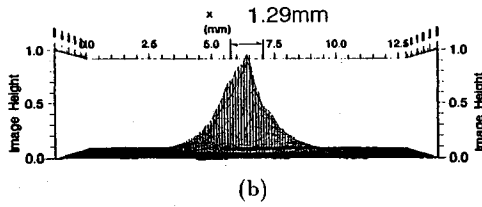
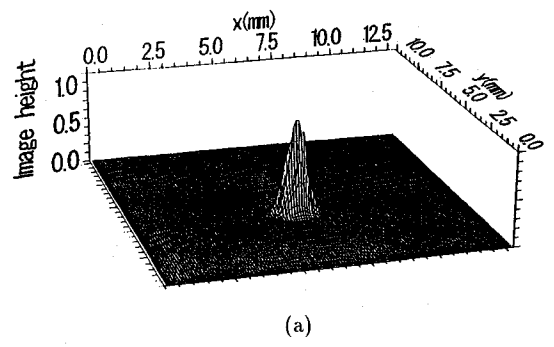
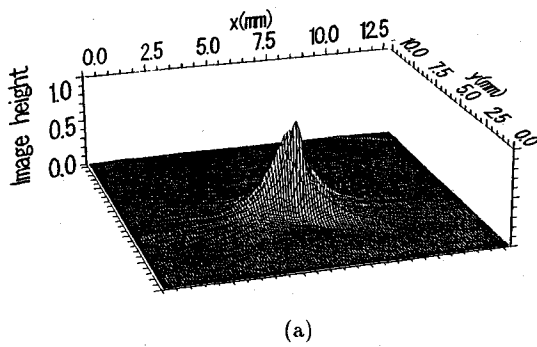


(b)



(c)

図-13 B-Scope 結果



図—14 開口合成結果

図—15 最大値を用いた開口合成結果

ルコンピュータに送られ、探触子位置情報とともに記録される。

実験システムの各装置の仕様を表—1に、マンユビュレータの精度を表—2に示す。この実験システムを用いることにより新たな開口合成システムを構築することができる。図—10に示すようにある角度においてエコーを捉えたとすると、そのエコーはビーム幅の範囲に存在する反射源からのものであると推定することができる。そこで仮定した再構成領域の座標のビーム幅の領域にエコーを加算する。入射角度を変えてスキヤニングしながら得られたエコーを再構成領域に加算していくことにより再構成画像が得られる。

ビーム幅の領域にエコーを加えるにあたり、ビーム幅内の音圧分布を考慮する必要がある。図—11に、本研究で用いた焦点型探触子について、探触子から水中距離

230 mm 位置で観測した音圧分布を示す。この音圧分布は x をビーム中心位置からの距離として次のような式で近似される。

$$p(x) = -0.232x^6 - 0.027x^5 + 5.181x^4 + 19,157x^3 - 37.413x^2 + 0.130x + 94.067 \quad (7)$$

集束範囲内において音圧分布はほとんど同じであるため、エコーの加算にあたりこの式を用いた。

実際には水浸法で実験を行うため水と鋼の音速の変化による屈折の影響を考慮する必要がある。

5. 実験結果と考察

試験体は図—12に示すように、鋼ブロックに裏面から先端形状が円形のノッチが入ったものであり、ノッチ幅は 1.29 mm である。スキヤニングピッチは 0.5 mm

とし、開口合成を行う場合の探触子の角度は、鋼中の縦波の角度が $-50^{\circ}\sim+50^{\circ}$ まで 5° ピッチで変化するようにした。図-13にB-Scope結果、図-14に開口合成結果を示す。(a)図の鉛直軸は各再構成座標での反射源レベルを表しており、再構成された欠陥をイメージできる。B-Scope結果が深き方向に平面的であるのに対して、開口合成結果は丸みを持っていることがわかる。(b)図は(a)図を欠陥直上方向から見た図である。開口合成結果の方がより正確に欠陥寸法を推定できていることがわかる。(c)図は(a)図を最大値の50%でカットした(6dBドロップ法)断面図である。この図においても開口合成結果が欠陥の丸みおよび寸法をより正確に再構成できている。

開口合成によってB-Scopeより良い結果を得ることができたが、この開口合成結果においても未だビーム幅の影響により再構成像の立ち上がりが緩慢である。そこで、ビーム幅の影響を取り除きさらに精度を向上させるため、各角度において反射波が最大となるような点のデータだけを用いて開口合成を行った。探触子の角度は鋼中の縦波が $-50^{\circ}\sim+50^{\circ}$ まで 5° ピッチで変化するように設定した。最大値を捉えているということはビーム中心に反射源があるということであり、エコーの再構成領域への加算時に音圧分布を考慮する必要はなくなる。従って、ここでは角度変化ピッチ(5°)と再構成の目標とする欠陥の大きさを考慮し図-11の横軸を80%縮めたものをエコーの加算に用いた。図-15にその結果を示す。各角度における最大値だけを用いることにより再構成された欠陥は、立ち上がりが鋭くなり、図-14より正確に欠陥の寸法および形状を推定できている。

6. ま と め

開口合成の精度に対するスキヤニングピッチ、開口幅、使用する波の数の影響を調べるために、点反射源を仮定

したデータを開口合成により再構成した。その結果、ピッチを小さくする、もしくは開口幅を広げることは雑音を低減し反射源をはっきりと再構成させるが、使用する波の数の増加による再構成映像の分解能の低下を是正することはできないことが明らかとなった。

鋼材表面に対して超音波の入射角度を変化させることのできる実験システムを開発することにより超音波による開口合成を実現し、B-Scopeに比べ横方向の分解能が改善された再構成結果を得た。また、各角度における最大値だけを用いることによりさらに正確な再構成結果を得ることができた。

本研究の一部は土木学会鋼構造新技術小委員会の研究費の補助により実施したものである。ここに記して関係各位に深謝いたします。

参考文献

- 1) 構造工学委員会非破壊評価小委員会：土木構造・材料の定量的非破壊評価へのアプローチ，土木学会論文集，No.428/I-15，1991.
- 2) 三木千壽，田中靖資，奥川淳志：瀬戸大橋トラス弦材角溶接部の非破壊検査に対する確率および破壊力学手法を用いた評価，構造工学論文集，Vol.37 a，pp.511-520，1991.3.
- 3) J. Krautkramer, H. Krautkramer : Ultrasonic Testing of Materials, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1983.
- 4) 仙田富男，三芳 滋：溶接部の非破壊試験・検査，現代溶接技術大系，産報出版，1980.
- 5) 古濱洋治，岡田謙一，増子治信：人工衛星によるマイクロ波リモートセンシング，電気通信学会.
- 6) Ishii, J., Sasaki, S. : Basic experiments on synthetic aperture ultrasonic imaging, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.22, Sup.22-3, pp.130-132, 1983.
- 7) 永井啓之亮：超音波ホログラフィ，日刊工業新聞社，pp.11-14，1989.

(1994.3.30受付)

A STUDY ON THE IMPROVEMENT OF RESOLUTION OF ULTRASONIC INSPECTION BY APERTURE SYNTHESIS SYSTEM

Jiro IWATATE, Masato TANAKA, Kazuo TATEISHI and Chitoshi MIKI

An ultrasonic inspection system that can manipulate the angle of probe was applied to perform aperture synthesis by ultrasonic waves. It was demonstrated that aperture synthesis method gave better resolution for imaging the inner flaw than B-Scope method.