

# タンデムアレイ探触子による突き合わせ 溶接継手の超音波非破壊検査特性

三木 千壽<sup>1</sup>・白旗 弘実<sup>2</sup>・西田 朱里<sup>3</sup>・柳沼 安俊<sup>4</sup>

<sup>1</sup>フェロー 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (〒 152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

<sup>2</sup>正会員 博 (工) 武蔵工業大学助手 工学部土木工学科 (〒 158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1)

<sup>3</sup>修 (工) NTT 東日本 (株) (〒 331-0582 大宮市桜木町 2-1-1) (研究時 東京工業大学 大学院)

<sup>4</sup>正会員 (株) 東京鐵骨橋梁 生産技術課 (〒 302-0038 取手市下高井 1020)

鋼溶接部における非破壊検査手法が放射線透過試験から超音波探傷試験に移行しつつある。しかしながら、限られた探傷結果からの評価にとどまっている。超音波探傷試験における欠陥検出能高精度化を目的として、新形式の10連探触子を用いた実験を行い、探触子を前後走査することなく、タンデム探傷を行った。しばしば問題となる溶接形状エコーに対し、探傷エコーから欠陥エコーの分離を試みた。さらに、この探傷結果を用いた欠陥表示システムの開発につながる基礎的検討を行った。

**Key Words :** nondestructive evaluation, ultrasonic testing, weld defect, array probe, detectability, image reconstruction

## 1. はじめに

鋼構造物の溶接部における溶接欠陥の発生は、現在の技術でも完全に抑えることができない。しかし、その発生頻度は低く、最近の調査によると、突き合わせ溶接部では95%以上が合格する品質が得られている。したがって、溶接部のほとんどの領域が無欠陥であり、その中に割れや溶け込み不足などの重大な欠陥がまれに存在する状態であるといえる<sup>1)</sup>。そのようなまれにしか発生しない欠陥をいかに確実に検出するかが、溶接部品質評価を目的とした非破壊試験のおかれている状況である。

鋼溶接部の非破壊試験方法としては、従来より放射線透過試験が用いられていたが、現場溶接部の検査や、50mmをこえるような厚板の溶接部<sup>2),3)</sup>の検査については超音波自動探傷に移行しつつある。超音波自動探傷装置の橋梁への本格的な適用は瀬戸大橋のトラス弦材の角溶接継手に発生するブローホールの検出がはじまりである<sup>4),5),6),7)</sup>。装置では垂直、斜角探触子が用いられ、従来のAスコープ表示の他にそれぞれ断面表示、平面表示と呼ばれるBスコープ、Cスコープ<sup>8),9)</sup>による画像表示を行い、結果を直感的にわかりやすいものとしている。超音波自動探傷は、従来の超音波手動探傷に比べ、記録性が向上し、一定の成果を残しているといえよう<sup>10),11),12),13)</sup>。

しかし超音波自動探傷装置の欠陥評価に関して、い

ゆる見落としや空振りといった欠陥検出の精度や欠陥寸法の測定精度について信頼性に欠ける面が残されていることも事実である<sup>1)</sup>。超音波自動探傷装置の欠陥検出能で特に問題となるのは、面状欠陥<sup>1)</sup>および溶接ビード近傍にある欠陥<sup>5)</sup>の検出である。入射超音波が面状欠陥で反射されると、反射波は強い指向性をもつことになり、一探触子法では欠陥エコーを必ずしも受信できない。また、欠陥が溶接ビード近傍にある場合、欠陥エコーがビード形状エコーに埋もれてしまい欠陥エコーと形状エコーの区別がつかなくなることがある。形状エコーの影響を取り除くために探傷波形取得範囲を限定し、ビードにかからないようにゲートをかけることもあるが、ゲートのかけ方次第では欠陥エコーもゲート外部に現れる可能性がある。

面状欠陥からの強い指向性をもった反射波を受信するには送信探触子とは別の複数の探触子を用いるほうが有利である<sup>14),15),16)</sup>。図-1に示すように、2個の斜角探触子を前後に配置し、一方を送信用、他方を受信用にして行う探傷をタンデム探傷という。タンデム探傷は主にドイツで原子力圧力容器の溶接継手の探傷試験で用いられてきた<sup>17),18)</sup>。Bowkerら<sup>14)</sup>はタンデム探傷では面状欠陥、特に探傷面に垂直な面状欠陥の検出に有効であると述べている。

複数の探触子を密に並べた探触子をアレイ探触子というが、アレイ探触子は医療で主に用いられてきた<sup>19),20),21)</sup>。アレイの中の1つの探触子から入射波を

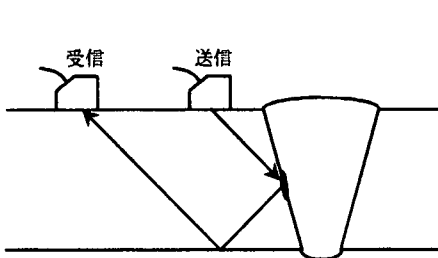


図-1 タンデム探傷

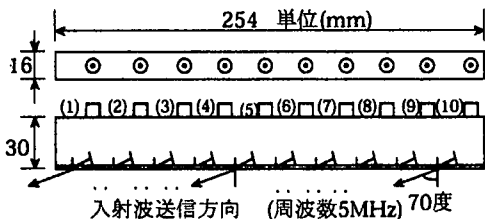


図-2 試作 10 連タンデムアレイ探触子

送信し、受信を他の探触子に順々に切り替えられるなど、効率的な探傷が行える。タンデム探傷においては 2 つ以上の探触子を同時に使用するため一探触子のみを用いる場合と比較して、高い操作精度が要求される。これをアレイとし、次々と送受信探触子をかえることにより、複雑な操作を簡略化することができる<sup>14)</sup>。

本研究の目的は簡便ではあるが欠陥を見落とさない溶接継手の品質管理システムを構築することである。溶接欠陥の形状、寸法はわからなくても欠陥の確実な検出性を保証するという目的を達成するためにここではタンデムアレイ探触子を新たに開発した。試験結果のわかりやすい表示を行い、確実な検出性を確保するために、余盛形状エコーと欠陥エコーとを分離するための基礎的検討も試みた。すなわち探傷して得られた波形の平均をとり、これを形状エコーと判断して欠陥エコーとの分離を試みるものである。形状エコーを取り除いた欠陥エコー情報をもとにした画像化手法を示し、欠陥検出、位置推定の基礎的検討を行った。本研究で示す画像化手法は時間域での開口合成法<sup>22)</sup>をベースとしており、それをタンデム探傷に拡張したものである。

## 2. 溶接部材による実験

### (1) 実験システム

本実験で用いた新開発の 10 連タンデムアレイ探触子を図-2 に示す。この探触子は周波数 5MHz、入射角 70 度の超音波を送信することのできる探触子を縦方向に 10 個並べたものである。各探触子内部にある圧電素子の大きさは 10×10mm である。各探触子間の距離は 25.4mm である。この 10 連探触子を図-2 に示すように前から順番に番号を (1),(2),... のように割り当てることにする。

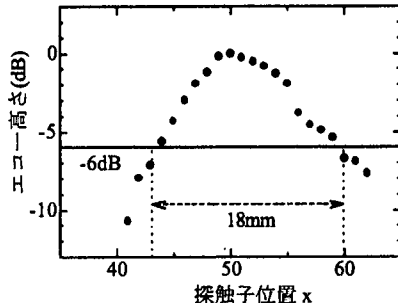
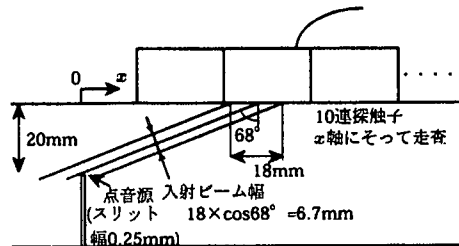


図-3 入射超音波ビーム幅の計測

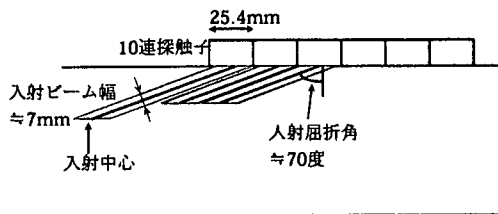


図-4 試験体内部での超音波送信領域

まず、探触子から出される超音波ビームの広がり調べた。図-3 に示すように、探触子を走査し、点音源からのエコー高さの変化を記録した。ここでは点音源として切り欠き先端部を利用した。切り欠きの幅は 0.25mm である。図-3 において、探触子の走査方向に  $x$  軸をとった。切り欠きの  $x$  座標を 0 とした。探触子を走査して、端部エコーがもっとも高くなる位置が入射中心である。最大端部エコーが得られる探触子位置から幾何学的に入射角を求めることができる。最大端部エコー高さより 6dB だけエコーが低くなるまでの範囲をビーム幅と考える。これを 6dB ドロップ法というが、エコー高さが 6dB 以内の走査範囲から超音波の入射ビーム幅が求められる。図-3 に探触子を走査したときのエコー高さのグラフを示す。図-3 より、入射角は 68 度、ビーム幅は 6.7mm である。図-3 は 3 番探触子における結果であるが、他の探触子の入射角、入射超音波ビーム幅もほぼ同じであった。

図-4 は各探触子からの入射ビーム幅が 7mm 程度と考えた場合、試験体内部のどれほどの領域に入射超音波の影響が及ぶかを示したものである。図から、試験体内部のほぼすべての範囲に超音波が入射されていることになる。

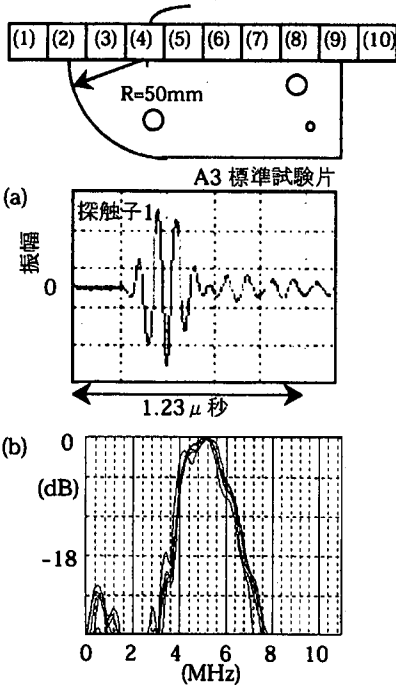


図-5 10連タンデムアレイ探触子の試験体反射波形とスペクトル

10連探触子の個々の探触子から出される波に関して、送信波形やそのスペクトル帯域に大きな差があると探触子の送信、受信の組み合わせによりエコー高さが異なるといった問題が生じる。そこで、各探触子からの波の特性を調べるために図-5に示すように、各探触子から送信される波に関して JIS の A3 標準試験片  $R=50\text{mm}$  の部分からの反射波形とそのスペクトル分布をとった。探触子から出される波の波形を測定するには、試験片底面からの反射波がもっとも近いと考え<sup>23)</sup>、JIS の標準試験片を用いた。

図-5(a)は1番探触子からの送信波波形で、横軸は時間を縦軸は波形振幅である。図-5(b)は1番から10番の探触子から出る波のスペクトル分布であり、横軸は周波数、縦軸は最大値を0dBで規格化したスペクトルである。図-5(b)よりアレイ探触子中の10個の探触子より出される波のスペクトル特性はほぼ同じといえる。1番以外の探触子からの送信波波形も図-5(a)と同様の波形であった。図-5に示した実験結果からタンデムアレイ探触子の個々の探触子から送信あるいは受信される波の波形およびスペクトルはどれもほぼ同じといえる。したがって、探触子の組み合わせによるエコー高さ特性にはそれほど差がないと考えられる。

10連探触子を用いた実験システム概略を図-6に示す。実験ではまず10個の探触子の一つを選びそれを送信探触子とし、残り一つを受信探触子に選ぶ。探傷器ではパ

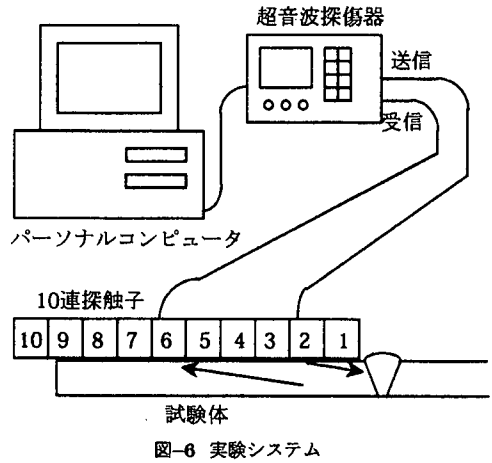


図-6 実験システム

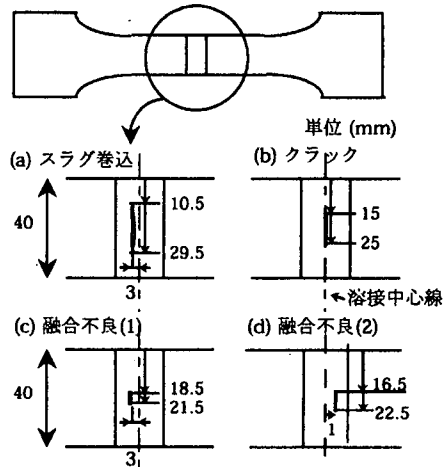
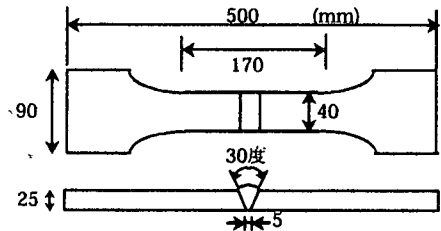


図-7 実験で用いた試験体と放射線透過試験による溶接欠陥位置

ルス信号を発生させ送信探触子にパルスを送る。探傷器から送られたパルス信号は送信探触子内部の圧電素子を振動させる。この振動が鋼中に音波として伝わる。鋼中に送られた超音波は溶接余盛や欠陥などで反射される。反射された音波の一部が受信探触子で受信される。受信された音波は圧電素子で電気信号に変換され探傷器にもどっていく。探傷器では受信された電気信号を増

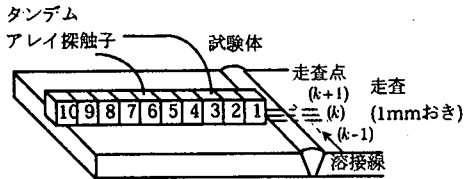


図-8 実験概略 (1)

幅し、波形を表示する。図-6 に示すように、探傷器はパソコンとつながれている。探傷器で得られた波形をパソコンに送りデータとして保存することができる。図-6 は送信探触子を 2 番に、受信探触子を 6 番にした場合を示している。この 10 連探触子を用いれば、送信位置 10 通り、受信位置 10 通りの最大 100 パターンの波形を取得することができる。

## (2) 試験体

実験で用いた試験体を図-7 に示す。この試験体は厚さ 25mm の板を突き合わせ溶接したものであり、開先形状は V 形である。試験体の幅は 40mm、開先角は 30 度、ルートギャップは 5mm である。

試験体は溶接欠陥を含んでいる。ここで用いた試験体はすべてで 5 体ある。これらの試験体はスラグ巻き込み、クラック、溶け込み不足および融合不良の 4 種類の溶接欠陥を含んでいる。スラグ巻き込み、クラック、溶け込み不足はそれぞれ 1 体ずつあり、融合不良は 2 体ある。これらのうちの 4 つの試験体は、あらかじめ放射線透過試験が行われており、幅方向の欠陥位置の情報は既知である。放射線透過試験により推定した欠陥位置を図-7 に示す。

## (3) 実験方法

実験概略を図-8 に示す。図-8 に示すように、10 連探触子を溶接線に平行に走査していく。図-8 では各走査点を  $k$  であらわしている。各走査点  $k$  において、10 連探触子の中の一つを送信探触子に選ぶ。図-9 では 3 番を送信探触子とした場合を示している。3 番の探触子から送信され、鋼内部で反射された波を 1 番の探触子で受信する。ここで得られた波形を  $E_{k31}$  とあらわすことにする。 $E_{k31}$  の  $k$  は走査点を、"3" は送信探触子番号を、"1" は受信探触子番号を意味している。エコーは直径 4.8mm の横穴からのエコー高さが探傷器画面の 80% の高さとなるように探傷器のゲイン値を調整して、高さを換算している。

次に 2 番を受信探触子としたときの波形も同様に取得する。そのときの波形を  $E_{k32}$  とする。その次には 3 番の探触子で受信した波形を取得する。そのときの波形を  $E_{k33}$  とする。この場合は一探触子法で得られた波形ということになる。さらに 4 番の探触子、5 番の探触子という

各探傷位置  $k$  において  
8×8 通りの波形を取得

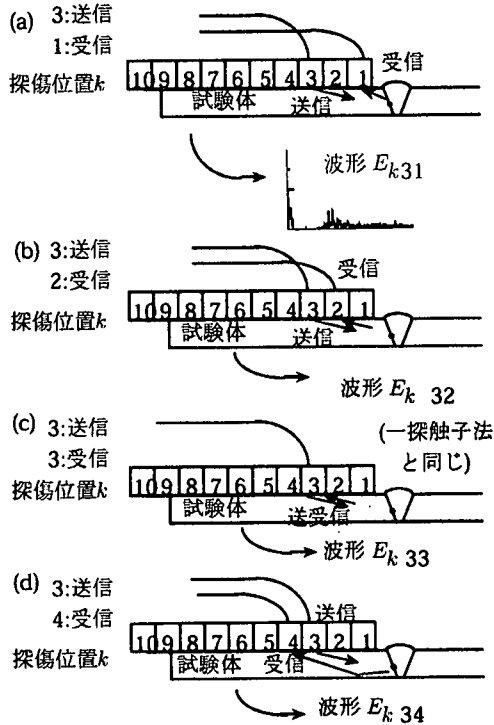


図-9 実験概略 (2)

ように順番に受信探触子をかえて波形を取得する。試験体は 250mm の板を突き合わせたもので 254mm の長さをもつタンデムアレイ探触子の一部は試験体から出てしまう。よって 8 番の探触子までを探傷に使用した。たとえば 3 番を送信探触子とした場合、受信箇所が 8 か所の合計 8 種類の波形データが得られることになる。図-9 では送信探触子を 3 番とした場合のみを示したが、送信探触子を 1 番から 8 番まで同様にして波形を取得、保存する。送信 8 か所、受信 8 か所で合計 64 種類の探傷波形データをとった。

## 3. 欠陥の B スコープ, C スコープ表示

タンデムアレイ探触子による欠陥検出性を調べるため、欠陥の B スコープ表示を行った。前節の図-9 で述べた方法により波形を取得した。欠陥検出のためのエコーレベルを設定し、そのレベルをこえた高さのエコーに関して送信と受信の探触子位置、入射角、エコー伝播距離をもとに欠陥位置を推定する<sup>17)</sup>。ここでは欠陥の検出レベルを直径 4.8mm の横穴からのエコー高さに対して 18dB 低い L/2 線レベルとしている。

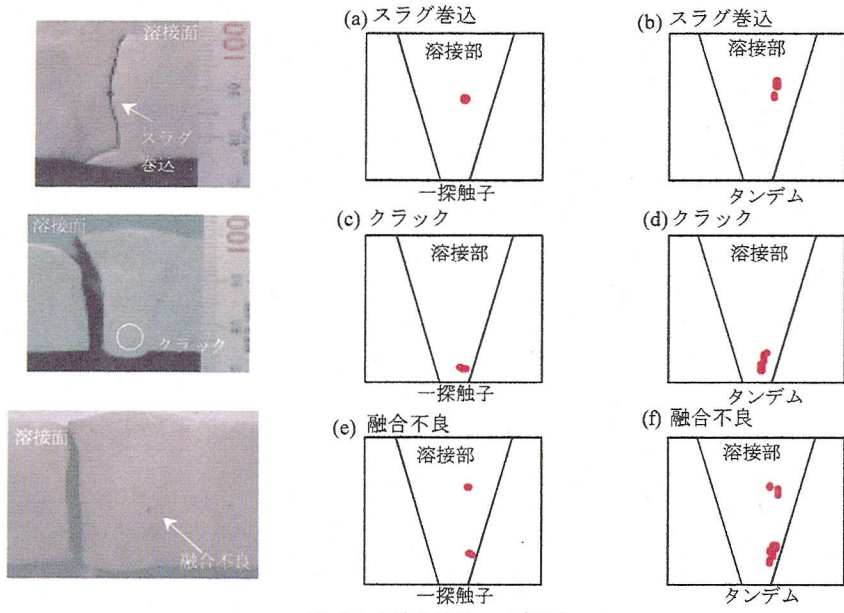


図-10 欠陥の B スコープ表示

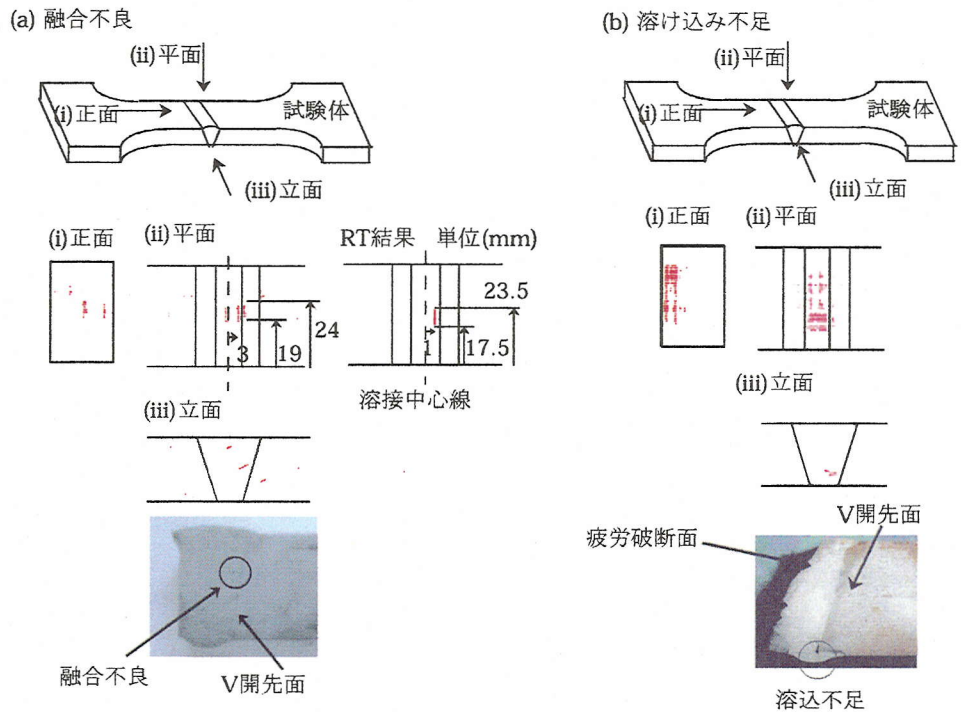


図-11 C スコープ表示融合不良 (a) と溶け込み不足 (b)

図-10 は欠陥の B スコープ表示である。前章での検討からタンデムアレイの個々の探触子の波形特性はほぼ同じことがわかった。波形  $E_{k_{ij}}$  の中で  $i = j$  の場合、 $E_{k_{11}}, E_{k_{22}}, \dots, E_{k_{88}}$  の一連の波形を一探触子を線走査して得られた波形と考える。つまり、タンデムアレイ探

触子で一探触子による走査を模擬している。ここでは模擬一探触子と呼ぶことにする。

図-10(a),(c),(e) は一探触子法を模擬して得られた波形をもとにした B スコープである。これに対し、図-10(b),(d) および (f) は、 $E_{k_{ij}}$  64 種類すべての波形を用

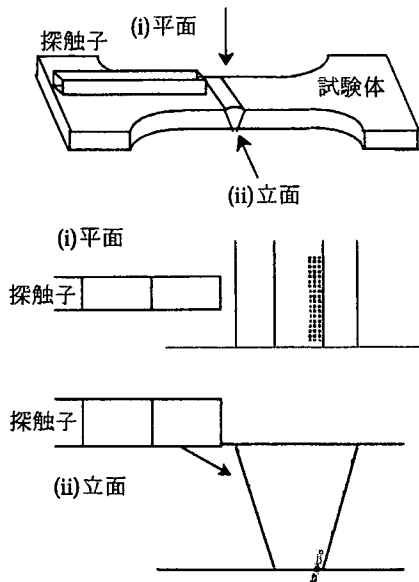


図-12 溶接形状エコーのCスコープおよびBスコープ表示

いたBスコープである。欠陥別に、スラグ巻込は(a)および(b)、クラックは(c)および(d)、融合不良は(e)および(f)である。図-10の融合不良の探傷結果は図-7における融合不良(1)の試験片を用いて得られたものである。探傷試験終了後、疲労試験を行い、試験体を破断した。破断後の試験片に対し、欠陥位置でのマクロ写真を撮影した。写真を図-10に示す。

Bスコープ像とマクロ写真を比較すると、欠陥位置は概ね一致している。スラグ巻込は板厚方向にほぼ中央に位置している。クラックは溶接第一パスに発生している。融合不良のBスコープ像が2か所で現れている。融合不良からのエコーは2番の探触子を用いたときに受信することができた。また、弱いものではあるが1番探触子を用いたときも欠陥エコーを受信した。実際は入射超音波ビームは広がりがあり、探触子位置も考慮すると融合不良は1番、2番探触子からの入射波ビームが照射される位置にあるといえる。Bスコープ表示においては入射超音波の広がりも考慮されておらず、ペンシルビームとして処理されていることが像が2か所に現れた原因である。

図-10において、模擬一探触子法とタンデム法によるBスコープ像を比較する。スラグ巻き込みに関して、図-10(a)の模擬一探触子、(b)のタンデム法を比較すると、(a)では像のプロット点が1つだけである。これはしきい値以上の高さをもったエコーが一か所でしか得られていないことを意味する。それに対し、(b)ではしきい値以上の高さのエコーが数か所で得られたことになる。

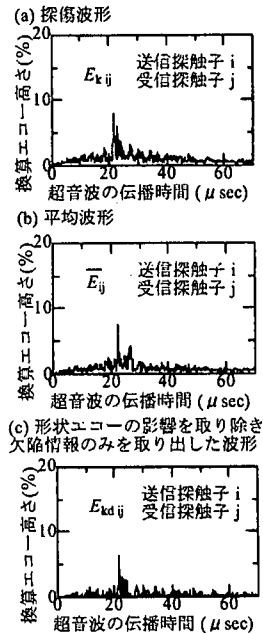
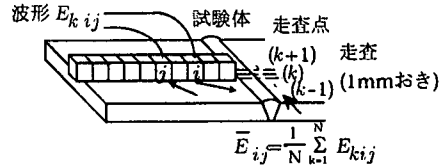


図-13 探傷波形から平均波形を取り除き欠陥情報のみを取り出す

スラグ巻き込みは模擬一探触子の状態では5番探触子で送受信したときのみ欠陥エコーが得られた。これに対し、タンデム探傷では1番探触子を送信としたときに5番、6番探触子で欠陥エコーを受信されている。つまり一探触子では得られなかった欠陥エコーをタンデム法では受信することができたことを示している。タンデム法は一探触子法により得られる像に加えて指向性の強い反射波による像が重ね合わされた形になっている。タンデム法は一探触子法よりもはるかに高い欠陥検出性があるといえる。タンデム法の高い検出性はスラグ巻込のほかにも融合不良のケースに対しても示されている。模擬一探触子法において融合不良からの欠陥エコーはおもに2番、3番探触子のときに得られている。タンデム探傷のときは欠陥エコーは2番探触子を送信とし、6番、7番探触子で受信したときにも得られている。

図-11(a)(b)はそれぞれ融合不良と溶け込み不足のCスコープ像である。図-11における融合不良の結果は図-7における融合不良(2)の試験片を用いて得られたものである。図-11に示すように(i)は試験体を正面から見た図、(ii)は試験体を上から見た図、(iii)は開先形状を見る方向からの図である。この試験体の放射線透過試験結果を同様に図に示した。図-11(ii)の平面図に対応するよ

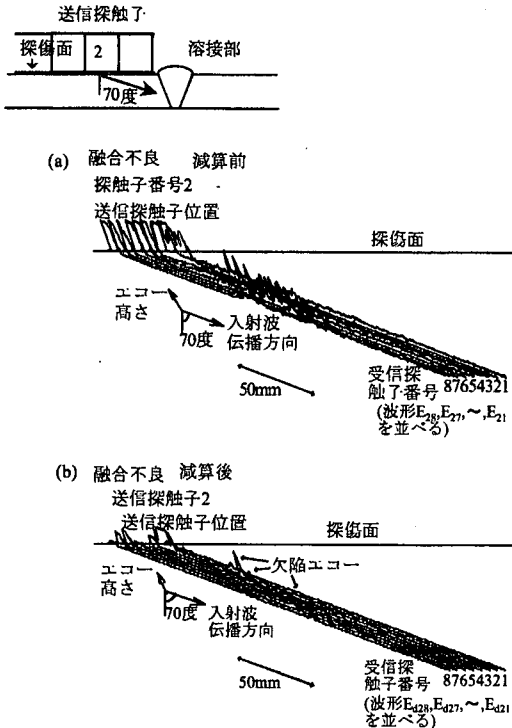


図-14 融合不良を含む試験体での実験結果

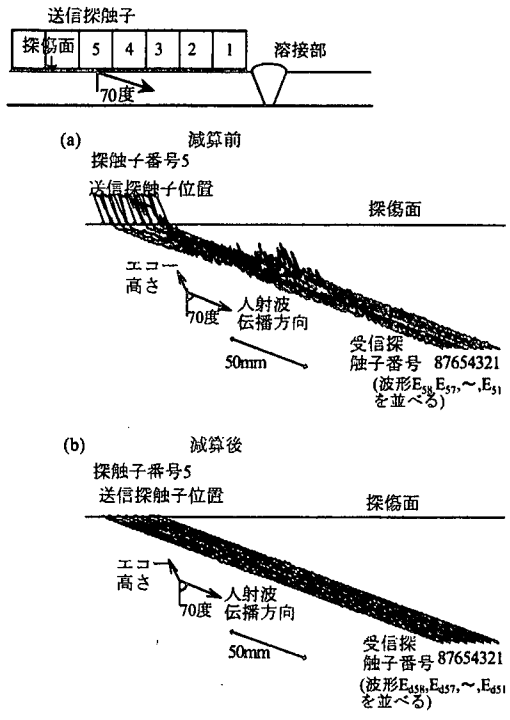


図-15 健全全部での実験結果

うに欠陥の寸法, 位置を記した。図-11のCスコープ像はタンデム探傷したすべての波形データを用いたものである。放射線透過試験結果と比較すると, 欠陥は溶接中心線から1mmだけ離れた場所であり, 欠陥の溶接線方向の寸法は6mmであることがわかる。図-11(a)(ii)を参照して, 超音波探傷による欠陥は溶接中心線から3mmほど離れ, 溶接線方向の欠陥寸法は5mmである。この結果は放射線透過試験とほぼ一致しているといえる。図-11から融合不良の溶接面からの距離は約10mmにあることがわかる。探傷試験終了後, 断面のマクロ写真を撮影した。これを図-11(a)(iii)のそばに示す。超音波探傷試験結果とマクロ写真はおおむね一致している。

図-11(b)は溶け込み不足を含んだ試験体のCスコープ表示である。図-11(b)-(i),(iii)から欠陥は底面近くに位置していることがわかる。溶け込み不足を有する試験片に対しても探傷試験終了後, 断面のマクロ写真を撮影した。写真を図-11(b)(iii)のそばに示す。写真から溶け込み不足は溶接第一パス近傍に位置していることがわかる。探傷欠陥においてもほぼ同じ位置に欠陥像が得られており, 写真と探傷試験結果は一致している。

#### 4. 探傷結果からの欠陥エコー分離

実際の超音波探傷試験結果から欠陥エコーと形状エコーの情報を分離することができれば, 欠陥評価の精度の向上を図ることができる。探傷結果のほとんどが無欠陥部を通って得られたエコーである。図-8に示すように, タンデムアレイ探触子を溶接線に平行に走査する。各走査点 $k$ では図-9で示したような64通りの波形を取得する。図-9における各走査点において $k$ 点と $k+1$ 点での波形でたとえば $i=3$ 番を送信探触子とし,  $j=5$ 番を受信探触子としたときの波形はそれほど差がないと考えられる。自動溶接であるので, 溶接線方向にほぼ同形状をしていると考えられるからである。

図-12(a)および(b)は試験体の健全全部でのエコーをもとにして得られた溶接裏波のCスコープおよびBスコープ表示である。図-12(a)より, 形状エコーは溶接線方向に関してほぼ一様に現れている。つまり, 走査点 $k$ および $k+1$ で得られた波形 $E_{k,i,j}, E_{k+1,i,j}$ は, 互いにほぼ同じであるといえる。

タンデムアレイ探触子を溶接線に平行に走査しているとき, 図-13に示すように, 各走査点 $k$ に関して平均をとり, これを $\bar{E}_{ij}$ とする。

$$\bar{E}_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N E_{k,i,j} \quad (1)$$

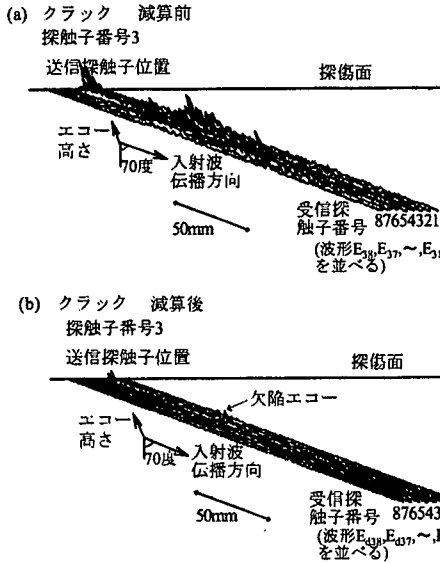
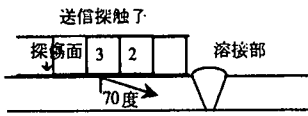


図-16 クラックを含む試験体での実験結果

ここに  $i$  は送信探触子の番号で  $i$  は 1 から 8 までの値をとる。  $j$  は受信探触子の番号で  $j$  も 1 から 8 までの値をとる。  $N$  は全走査点数をあらわしている。ここで用いた試験片の場合は  $N = 25$  である。欠陥からの反射エコーが含まれていたとしても平均することによりその影響は微小となり、 $\bar{E}_{ij}$  を形状エコーと考えることができる。すなわち、この平均値  $\bar{E}_{ij}$  は溶接部形状の情報を含んでいるといえる。ある走査点における探傷波形  $E_{kij}$  より、平均エコーをひいた  $E_{kij}$  を考える。

$$E_{kij} = E_{kij} - \bar{E}_{ij} \quad (2)$$

図-13 に示すように  $E_{kij}$  は  $\bar{E}_{ij}$  の溶接部形状の情報を取り除いたものと考えることができ、欠陥の情報のみを取り出したものといえる。

図-13 に示した方法により、形状エコーを分離した結果をここに示す。図-14(a) は融合不良を含む試験片を探傷したときのものである。2 番探触子を送信探触子とし、他の各探触子で受信したときに得られた A スコープ波形を並べて描いたものである。波形は左側から順に 8 番探触子、7 番探触子で受信したときの波形、つまり  $E_{28}, E_{27}, \dots, E_{21}$  である。入射波は探傷面に対し 70 度で入っていくが、それと対応するように A スコープ波形を探傷面に対し 70 度になるように並べている。図は波形を平行に並べたものであり、受信探触子位置は考慮し

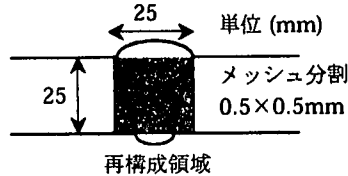


図-17 溶接欠陥再構成領域

ていない。エコー位置は送信探触子からの距離の情報のみを与えている。図-14(a) では送信探触子位置近辺では立ち上がった状態となっているが、この領域は近距離音場に相当する距離で、欠陥とは関係のないものである。送信探触子から 30~80mm にかけてエコーが見られる。これらのエコーは欠陥エコーや形状エコーである。この状態では欠陥エコーと形状エコーを区別することはできない。

図-14(b) は形状エコーを取り除いたエコーを並べたものである。つまり、左側から順に  $E_{d28}, E_{d27}, \dots, E_{d21}$  を並べて描いたものである。図-14(a) で見られた、送信探触子から 30~80mm に位置するエコーの大部分は取り除かれていることがわかる。一方で所々に鋭いピークをもったエコーがいくつか見られる。これらのエコーは欠陥エコーと考えることができる。

図-15 は図-14 とは異なる別の位置での結果である。図-15(a) は 5 番を送信探触子としたときに得られた波形を並べたものである。左側から順に  $E_{58}, E_{57}, \dots, E_{51}$  である。図-15(b) は平均波形をひいた波形で左側から順に  $E_{d58}, E_{d57}, \dots, E_{d51}$  である。図-15(b) の波形はどれも平坦な形をしており、欠陥エコーと思われるようなエコーはまったく見られない。よってこれは無欠陥部であると判断できる。

図-16 はクラックを含む試験片での結果である。図-16(a) は平均波形減算前の波形を並べたものである。図-16(b) は平均波形を減算したあとの波形を並べたものである。クラックの場合、3 番探触子で受信した波形  $E_{d33}$  に欠陥と思われるエコーが見られる。図-14、図-16 に示したようにここで提案した手法により形状エコーの中から欠陥エコーを取り出すことは有効であると思われる。

## 5. 開口合成による欠陥画像化

ここでは、10 連探触子を利用した新しい画像化手法を提案する。この手法は、ビーム幅を考慮し溶接継手領域をカバーしていること、アレイ探触子切り替えによるタンデム走査の開口合成<sup>22)</sup>であることが特徴である。すなわち前節の画像表示を重ね合わせていくことにより、欠陥像が強調されていくものである。画像化に際し、はじめに画像化領域を設定する。画像化領域は図-17 に示



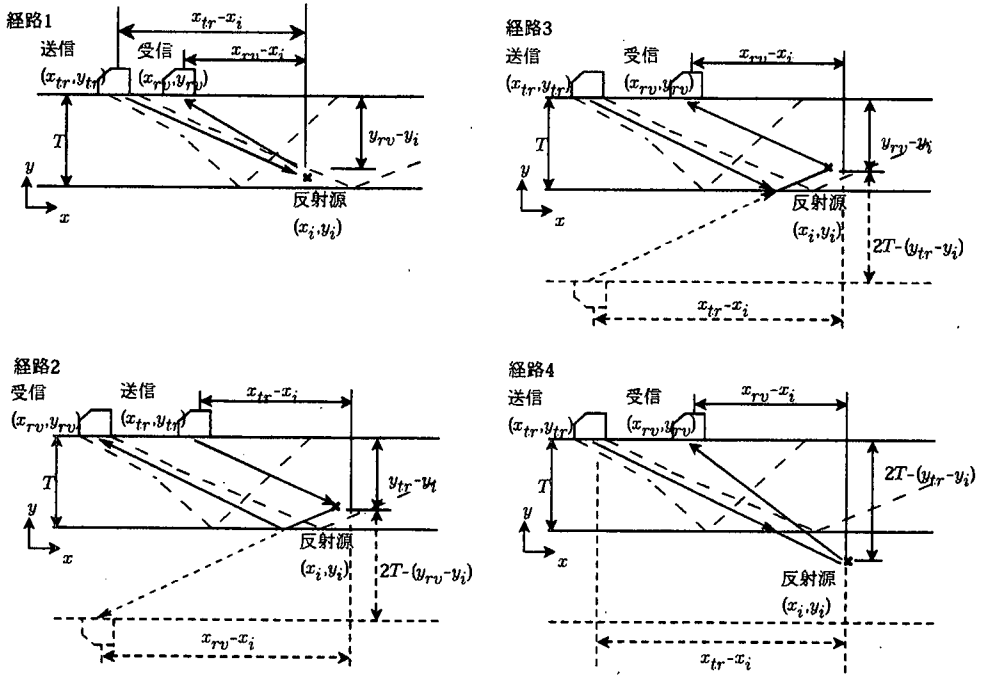


図-19 欠陥像再構成方法

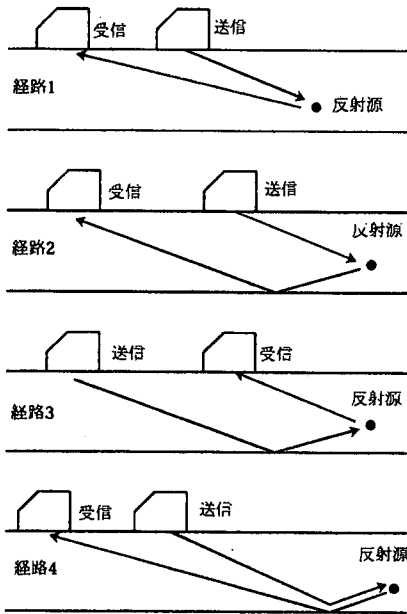


図-18 画像化で考慮した超音波伝播経路

すように、欠陥が発生する可能性のある溶接部付近に限定する。つぎに、画像化領域を分割する。ここでは分割メッシュサイズを0.5mmに選んでいる。

10 連探触子による探傷では、複数さまざまな経路を伝播してきた反射エコーが得られる。前節における欠陥表示の結果もふまえ、超音波の伝播経路として図-18 の 4 種類を考慮する。経路 1 では探触子から送信された超音波が直接反射源に到達し、直接受信探触子へともどる。経路 2 は探触子から送信された超音波が直接反射源に到達し、受信探触子にもどる際に底面反射する経路である。経路 3 は経路 2 と逆の経路をとり、経路 4 は送信探触子から出た超音波が底面反射して反射源に到達し、受信探触子へもどる場合にも底面反射する経路である。

図-19 にそれぞれ経路 1 から 4 を考慮したときの画像化計算方法を示す。図-19 において、送信探触子の位置を  $(x_{tr}, y_{tr})$ 、受信探触子の位置を  $(x_{rv}, y_{rv})$  と仮定する。探触子から出される超音波ビームは実際には広がっている。図-19 の点線は入射超音波ビームの広がっている範囲を示している。画像化はビームの広がりも考慮に入れている。このとき探傷器で得られた波形を  $w(t)$  とする。メッシュ分割された各点の座標  $(x_i, y_i)$  に対して、メッシュ格子点と送信探触子までの距離を計算する。経路 1 の場合を  $d_{1, tr}$ 、経路 2 の場合を  $d_{2, tr}$ 、経路 3 の場合を  $d_{3, tr}$ 、経路 4 の場合を  $d_{4, tr}$  とする。経路 2, 3 および 4 を考える上で便宜上、探触子や反射源の位置を底面に關して折り返している。図-19 の破線は底面に關して折り返した探触子や超音波の伝播経路を示している。

$$d_{1, tr} = d_{2, tr} = \sqrt{(x_{tr} - x_i)^2 + (y_{tr} - y_i)^2} \quad (3)$$

$$d_{3_{rv}} = d_{4_{rv}} = \sqrt{(x_{tr} - x_i)^2 + (2T - y_{tr} + y_i)^2} \quad (4)$$

ここに  $T$  は板の厚さである。メッシュ格子点と受信探触子までの距離を計算する。経路 1 の場合を  $d_{1_{rv}}$ 、経路 2 の場合を  $d_{2_{rv}}$ 、経路 3 の場合を  $d_{3_{rv}}$ 、経路 4 の場合を  $d_{4_{rv}}$  とする。

$$d_{1_{rv}} = d_{3_{rv}} = \sqrt{(x_{rv} - x_i)^2 + (y_{rv} - y_i)^2} \quad (5)$$

$$d_{2_{rv}} = d_{4_{rv}} = \sqrt{(x_{rv} - x_i)^2 + (2T - y_{rv} + y_i)^2} \quad (6)$$

メッシュ格子点での反射レベル  $h(x_i, y_i)$  は次の式で計算される。

$$h(x_i, y_i) = w \left( \frac{d_{j_{tr}} + d_{j_{rv}}}{c} \right) \quad (j = 1 \sim 4) \quad (7)$$

$c$  は鋼中の弾性波の波速である。すべてのメッシュ格子点について反射レベル  $h(x_i, y_i)$  を計算すると欠陥像が得られる。

## 6. 欠陥画像化の結果

探傷波形をもとにして得られた欠陥の再構成像を図-20に示す。図-20(b),(c) はそれぞれ経路 1 と 4、経路 2 と 3 を考慮して得られたスラグ巻き込みの再構成像である。図-20(d),(e) はそれぞれ経路 1 と 4、経路 2 と 3 を考慮して得られたクラックの再構成像である。図-20(f),(g) はそれぞれ経路 1 と 4、経路 2 と 3 を考慮して得られた融合不良の再構成像である。図-20 は疲労試験後に撮られたスラグ巻込、クラックおよび融合不良の断面マクロ写真も示している。再構成像は図-20(a) を参照して、 $z$  軸方向から見た断面を示している。

図-7(a) の放射線透過試験、図-20 の断面写真からスラグ巻き込みは溶接開先中心から 3mm ほど離れ、溶接面から 10mm ほどの距離にあることがわかる。図-20(b),(c) から欠陥は溶接中心から 4mm 離れ、溶接面から 10mm の位置にあり、ほぼ同様であり、画像化の妥当性が示された。スラグ巻込の像は経路 1 と 4 を考慮した場合、1 番と 5 番探触子の直射経路により得られたエコーの寄与が大きかった。1 番と 5 番の探触子を用いて得られた波形をもとにした像が互いに重ねあわせられ、強調された形になっている。また、経路 2 を考慮した場合、1 番の探触子から送信された波が欠陥で反射され 5 番の探触子で受信されたときのエコーの寄与が大きかった。

図-7(b) の放射線透過試験、図-20 の断面写真からクラックは溶接開先中心にあり、裏ビード近傍にあることがわかる。図-20(d),(e) においても同様に、クラックは溶接第一パスに発生し、開先中央にあることがわかる。欠陥像は 3 番の探触子で受信されたエコーにより構成されている。

図-7(c) の放射線透過試験、図-20 の破断面写真から融合不良は溶接開先中心から 3mm ほど離れ、溶接面から

15mm ほどの距離にあることがわかる。図-20(f),(g) から欠陥は溶接開先中心から 3mm 離れ、溶接面から 15mm の位置にあり、同様の結果を示している。図-7(c) と図-20 と溶接開先形状から、融合不良は開先面に沿って発生していることがわかる。図-20(f),(g) の超音波探傷結果から欠陥は開先面に沿って位置していることがわかる。経路を 4 種類考慮し、互いに重ね合わせることで像が強調される。融合不良の例に見られたように、ここでの手法はビーム幅を考慮しているため B スコープ表示の際のペンシルビーム仮定で生じた 2 か所の像が見れることがなくなった。

ここでのタンデムアレイ探触子を用いた探傷実験では簡便な欠陥検出とおおよその位置推定を行うことが目的であり、アレイ探触子を溶接線垂直方向にいわゆる前後走査をしていない。そのため溶接線垂直方向の解像度は超音波ビーム幅に依存し、欠陥検出、位置推定は可能であるが、スラグ巻き込み像のように、欠陥高さは精度よく求まらない。アレイ探触子を数ミリピッチで走査し、各探触子位置でビームの重ね合わせをして横方向の分解能を向上させれば、スラグ巻き込みなどの高さをより正確に推定することは可能であると考えている。

## 7. まとめ

欠陥からの反射エコーの特性の評価、超音波探傷試験における欠陥検出能の高精度化を目的として、10 連探触子を用いた実験を行い、得られた結論を示す。

- (1) 10 連探触子を用いて超音波探傷試験を行うことにより、一探触子法では取り得なかった欠陥からの幅広いエコーを取得できることを確認した。
- (2) 自然欠陥を有する試験体において超音波探傷試験を行った結果、欠陥部分の探傷結果から無欠陥部分の探傷結果を差し引くことにより、欠陥の情報のみを分離することが可能となった。
- (3) 欠陥からの反射波データを利用することにより、反射波特性を理解するための新しい画像化手法を開発し、欠陥種類による反射波のパターン認識が可能となった。

ここではアレイ探触子を用い送信、受信探触子の詳細な走査をせずに簡便な探傷を行った。探触子から出される超音波ビームは広がりをもっているため、試験体内のほぼすべての領域に入射波が伝播しているが、もっと板が厚くなると探触子を前後走査することが必要になる可能性があるが、これは今後の課題であると考えている。

謝辞: 10 連タンデムアレイ探触子のアイデアは (株) 東京鐵骨橋梁の城島保茂氏によるもの、製作は (株) 検査技術研究所の岡賢治氏によるものです。本研究は文部省科学研究費補助金 (基盤研究 (A))(1) 代表:三木千尋) を受けて実施されました。ここに記して関係各位に謝意

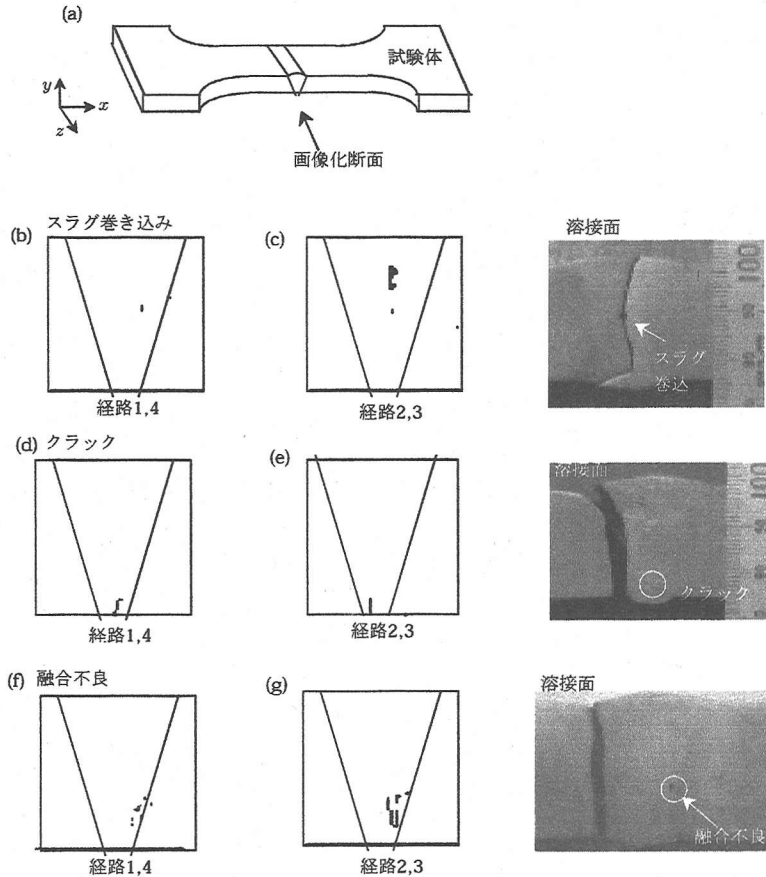


図-20 欠陥画像化結果

を表します。

参考文献

- 1) 三木 千壽, 成宮 隆雄, 森下 統一, 加藤昌彦: 自動超音波探傷システムの板継ぎ溶接部品質保証への適用性の検討, 鋼構造論文集, Vol.1, No.4, pp.105-117, 1994.
- 2) 山縣 敬二: 省力化に対応した橋梁構造, JSSC No.13, pp.2-11, 1994.
- 3) 高橋 昭一, 志村 勉, 橋 吉宏, 小西 哲司: PC床版2主桁「ホロナイ川橋」の設計および解析, 試験検討, 橋梁と基礎, Vol.30, No.2, pp.23-30, 1996.
- 4) Miki, C.: Application of NDI in fracture control of Honshu-Shikoku bridge project, *Review of Progress in QNDE*, Vol.13, pp.2071-2082, 1994.
- 5) 金沢 克義: 鋼床版現場溶接の自動超音波探傷検査, 本四技報, No.43, pp.7-11, 1987.
- 6) Sakamoto, K., Fukazawa, M., Hamano, M. and Tajima, J.: Estimation of fatigue crack growth by ultrasonic imaging method, *Proc. of JSCE Structural Eng./Earthquake Eng.*, Vol.2, No.2, pp.209-219, 1985.
- 7) 三木 千壽, 田中 靖資, 奥川 淳志: 瀬戸大橋トラス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.37A, pp.511-520, 1991.
- 8) Sugawara, N., Oshima, T., Mikami, S. and Sugiura, S.: On the accuracy improvement in ultrasonic inspection by using computer graphics and waveform analysis, *Structural Eng./Earthquake Eng. (Proc. of JSCE No.459/I-22)*, pp.247s-256s, 1993.
- 9) 三上 修一, 大島 俊之, 菅原 登, 山崎 智之: エコー波形の詳細解析による超音波探傷法の欠陥検出の定量的評価, 土木学会論文集 No.509/I-29, pp.103-112, 1994.
- 10) 土屋 憲一郎: 橋梁用超音波自動探傷装置, 高精度でスピーディな現地溶接検査を目指して, 検査技術, Vol.2, No.12, pp.8-14, 1997.
- 11) 神島 敬介, 定保 隆, 八橋 正和: 幹線パイプライン技術開発事業の概要, 非破壊検査, Vol.47, No.1, pp.4-7, 1998.
- 12) 山田 裕久, 宇田川 健志, 小倉 幸夫: ガス導管円周溶接部の超音波自動探傷方法(案)の策定, 非破壊検査, Vol.47, No.1, pp.13-18, 1998.
- 13) 増田 智紀: ガス導管円周溶接部の超音波自動探傷方法(案), 非破壊検査, Vol.47, No.1, pp.19-24, 1998.
- 14) Bowker, K.J., Coffey, J.M., Hanstock, D.J., Owen, R.C. and Wrigley, J.M.: CEGB inspection of plates 1 and 2 in UKAEA defect detection trials, *British Journal of NDT*, Vol.25, No.5, pp.249-255, 1983.
- 15) Barbian, O.A., Engl, G., Grohs, B., Rathgeb, W. and Wüstenberg, H.: A second view of the German results obtained in the defect detection trials, UKAEA,

- British Journal of NDT*, Vol.26, No.2, pp.92-96, 1984.
- 16) Barbian, O.A., Grohs, B. and Kappes, W.: Evaluation of time-of-flight data with the ALOK-method, *British Journal of NDT*, Vol.26, No.4, pp.214-217, 1984.
  - 17) 日本非破壊検査協会 (編), 新非破壊検査便覧, pp.1161-1168, 1992.
  - 18) Schmitz, V., Barbian, O.A., Gebhardt, W. and Salzburger, H.J.: Moderne Verfahren der Ultraschallprüfung, *Materialprüfung*, Vol.27, No.3, pp.49-56, 1985.
  - 19) von Ramm, T.O. and Smith, S.W.: Beam steering with linear arrays, *IEEE transactions on biomedical engineering*, Vol.30, No.8, pp.438-452, 1983.
  - 20) Turnbull, D.H. and Foster, F.S.: Beam steering with pulsed Two-Dimensional transducer arrays, *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics and frequency control*, Vol.38, No.4, pp.320-333, 1991.
  - 21) 佐藤 道雄: 非破壊計測技術の最近の話題, 日本原子力学会誌, Vol.33, No.7, pp.2-8, 1991.
  - 22) Müller, W., Schmitz, V. and Schäfer, G.: Reconstruction by the synthetic aperture focussing technique(SAFT), *Nuclear Engineering and Design*, Vol.94, pp.393-404, 1986.
  - 23) 高橋 政則, 三木 千壽, 劉 銘崇, 岩立 次郎: 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, 土木学会論文集 No.495/1-28, pp.93-99, 1994.

(2000.1.6 受付)

## NONDESTRUCTIVE EVALUATION OF BUTT WELDED JOINTS BY TANDEM ARRAY TRANSDUCER

Chitoshi MIKI, Hiromi SHIRAHATA, Akari NISHIDA and Yasutoshi YAGINUMA

Instead of radiographic test, ultrasonic test has been applied to nondestructive evaluation of butt welded joints. New type of tandem array transducer was developed. By the tandem array transducer, tandem probe test could be carried out without back and forth scanning. Higher detectability could be obtained by tandem probe technique than one probe technique for butt welded joint specimens. Fundamental investigation of development of new imaging system based on synthetic aperture focusing technique was conducted by the tandem array transducer. Separation of defect echo from bead echoes was also examined in the imaging system. Defect image could be obtained clearly by the new system.