

鋼構造物の損傷度診断のための高精度超音波技術の開発

研究代表者 廣瀬 壮一*

*東京工業大学大学院教授 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-W8-22)

1. 緒言

都市内の高速道路高架橋に多く用いられている鋼製橋脚の隅角部において、近年、多数の疲労き裂が発見され火急の対策が求められている。その原因調査によれば、支配的な発生要因として、複雑な板組みによる固有の溶接欠陥の存在が指摘され、板組みの違いによって、溶接欠陥や未溶着部の存在位置・方向・大きさなどが異なり、それに起因して疲労き裂の発生位置や方向などの特徴に影響を与えていると考えられている。このような疲労き裂は放置しておく、脆性破壊に移行し、高架橋システムの崩壊など壊滅的な被害につながる恐れがあるため、迅速で効果的な補修・補強対策を講じる必要がある。その際に、疲労き裂の原因となっている溶接欠陥の位置、大きさなど部材内部の情報を非破壊的に取得することが最重要課題となる。

従来から、鋼溶接部の内部欠陥を検出して評価する主要な非破壊検査法として、放射線透過試験や超音波探傷試験が用いられてきた。しかしながら、放射線透過試験は試験実施者に対する安全性や検査結果の表示に時間がかかるなどの問題点がある。一方、超音波探傷試験は、試験実施者の健康上、安全であるほか、即時に結果を表示することが可能で、欠陥が検知された際に即座に対処するなど効率がよいという利点がある。そのため、溶接欠陥や疲労き裂の検知を対象とした非破壊検査には、超音波探傷試験が多く用いられるようになってきた。しかしながら、現状では、超音波探傷試験の精度は十分とはいえない。例えば、通常用いられている一探触子法や二探触子法では欠陥の有無を明らかにすることはできても、欠陥の寸法評価を行おうとすると多大な労力と経験を必要とする。ましてや欠陥の3次元的位置や形状を画像化することは実用上困難である。

昨今、欠陥の3次元形状の画像化技術として注目を集めているのがアレイ超音波探傷である。アレイ超音波探傷は、数多くの小さな圧電素子を1次元あるいは2次元状に並べた探触子を用い、各素子の送受信チャンネルを電氣的に切り替えることによって高速に多点計測を実施して、得られた数多くのデータから欠陥形状の再構成を行うものである。アレイ超音波技術は医療分野ではすでに日常の診断手法として用いられているが、土木構造物の検査への適用はまだ緒についたばかりである。土木と医療におけるアレイ超音波技術は、その原理は同じであるが、いくつかの相違点がある。一つは超音波の種類の違いである。医療における検査対象である人体は液体(水)と見なせることができ、それを伝播する超音波は音響波と見なせるのに対して、土木における検査対象は固体で、その中を伝播する超音波は弾性波として扱わなければならない。弾性波には縦波と横波が存在し、モード変換を

起こすことから音響波に比べて複雑な挙動を示す。もう一つの相違点は、検査対象のアクセスの問題である。土木構造物では、検査領域に対してセンサーの設置できる範囲は非常に限られる。例えば、板組み部材からなる橋脚一つを取り上げても、超音波試験が可能なのは各板部材の特定の面からのみとなることは想像に難くない。この点は任意方向からの計測が可能で医療での超音波診断とは異なっており、土木構造物における超音波探傷を難しくしている理由の一つである。

本研究は上記の土木構造物に固有の特性を考慮しつつ、数値シミュレーションならびに計測を行い、鋼構造物に対する超音波技術の高精度化を図ろうとするものである。その内容は、超音波要素技術の高精度化、高精度超音波探傷システムの構築、高精度超音波技術の鋼構造物への応用の三項目に大別される。

2. 超音波要素技術の高精度化

まず、アレイ探傷システムを構成する要素技術について理論的な検討を行い、高精度化を行う。具体的には、アレイ探触子によるビームの数値シミュレーションを行い、アレイ探触子の最適設計パラメータの決定方法を提案するとともに、代表的な欠陥形状再構成手法である開口合成法と線形化逆解析法を取り上げ、精度の比較検討をする。

2.1 アレイ探触子によるビームの数値シミュレーション

アレイ探触子は多数の小さい圧電素子を配置したものであるから、各圧電素子に対して遅延時間を設定し、電子制御によって駆動時刻をずらすことにより様々なビームを形成することができる。例えば、図1に示すように1次元アレイ探触子において一定の遅延時間 $\Delta\tau = d \sin \theta_s / c$ (d :素子間隔, θ_s :ビーム入射角, c :波速) を設けて各素子を駆動すれば、傾斜した波面が得られて斜角入射を行うことができる。フェイズドアレイ法はアレイ探触子のこのような特性を生かして広い範囲を短時間に精度よく計測できる方法であり、医療診断においてよく用いられている。しかし、鋼構造物への適用実績はほとんどなく、そのためにも弾性波動理論に基づく超音波ビームの数値シミュレーションなど理論的な研究が必要である。

図2は、20個の圧電素子が波長の0.263倍のピッチで並んだアレイ探触子を半無限弾性体の表面に当てたときに、入射角 θ_s を 0° , 20° , 40° , 60° と変化させたときの弾性体中の変位振幅を数値シミュレーションにより求めた結果である。図3の左図は探触子位置から等距離の同一円周上にある点での縦波弾性波の振幅を鉛直下方からの角度 θ を横軸にとって図示したもの(放射パターン)である。比較のために、超音波が音響波であるときの放射パ

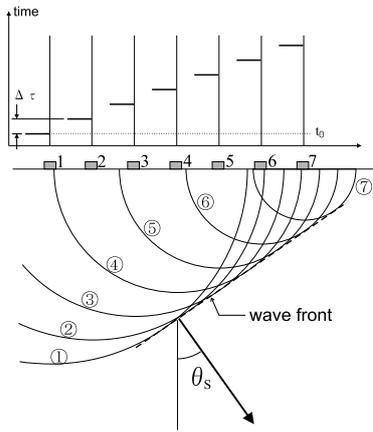


図-1 アレイ探触子による斜角入射の原理 .

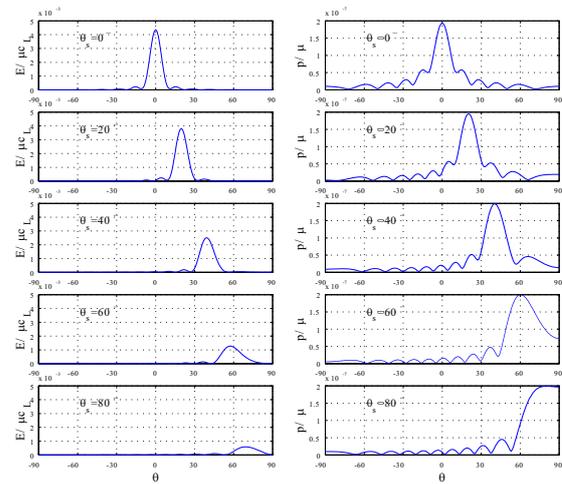


図-3 入射角 θ_s を変化させたときの放射パターン . 素子数 $N = 20$ の場合 . 左図 : 縦波弾性波 , 右図 : 音響波 .

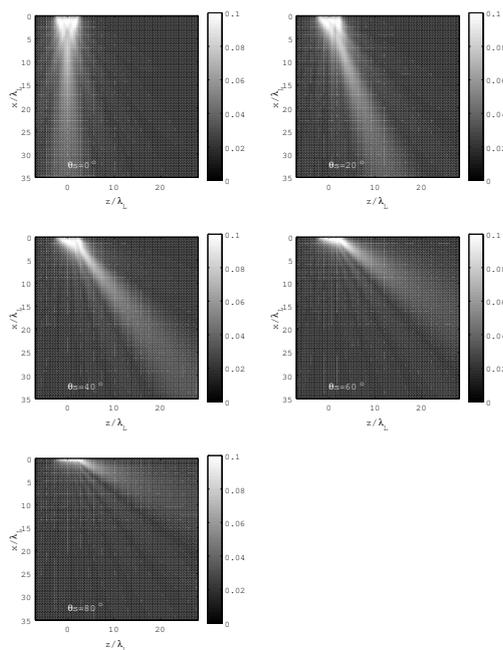


図-2 入射角 θ_s を変化させたときの固体中の変位振幅 .

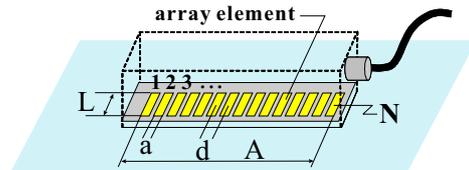


図-4 1次元アレイ探触子の設計パラメータ .

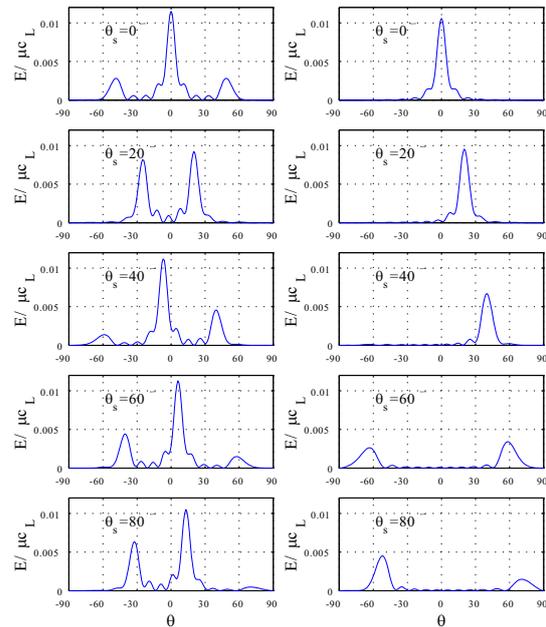


図-5 入射角 θ_s を変化させたときの放射パターン . 左図 : 素子数 $N = 5$ の場合 , 右図 : 素子数 $N = 11$ の場合 .

ターンを図 3 の右図に示す . これらの図より音響波の場合には入射角が大きくなっててもその方向に十分大きな振幅を持つ波動が入射するのに対して , 弾性波の場合には , 入射角 θ_s が 60° 以上になると振幅が小さくなり , かつ , 最大振幅を示す角度も期待した入射角より小さくなることからわかる . このように弾性波は指向性を持つ波動であり , 無指向性の音響波とは異なる特性を示す .

2.2 アレイ探触子の設計

図 4 に示すように , アレイ探触子には圧電素子のサイズ (幅 a , 奥行き長さ L) , 素子数 N , 素子配置間隔 d , あるいは , 開口幅 A など , 多くの設計パラメータがあり , 波動特性に大きな影響を及ぼす . 例えば , 図 5 は図 3 の左図と同じように入射角 θ_s を 0° , 20° , 40° , 60° , 80° と変化させたときの半無限弾性体中での放射パターンを表した図であるが , 左図は素子数 N を 5 個とした場合で , 右図は素子数を 11 個とした場合である . いずれの場合も設

定した入射角 θ_s 以外の方向にグレーティングローブと呼ばれる波動が発生していることがわかる . このように , アレイ探触子の場合 , 設計パラメータの条件によっては意図しない波動場が発生することがあるので , アレイ探傷の精度を保证するためには常に望ましい放射パターンが得られるように最適な設計パラメータを決めなければならない . 以下においては前節における数値シミュレ

ションを参考にしつつ、圧電素子の幅 a 、素子数 N 、素子配置間隔 d 、開口幅 A の4つのパラメータを決定する簡易手法を提案する。ただし、これらの4つのパラメータには

$$A = (N - 1)d + a \quad (1)$$

なる関係があるので、独立なパラメータは3つである。

1. $R < R_N \equiv A^2/(4\lambda)$ (R :探触子からの距離, R_N :レーリー距離, λ :波長)における探触子の近距離場での波動は複雑であり、それを制御することは極めて難しい。よって、アレイ探傷が有効なのは $R \geq R_N$ にある遠方場であり、これより探触子から欠陥までの凡その距離 R がわかれば探触子の開口幅 A が定まる。
2. 図5に示したようなグレーティングローブを発生させないために、格子を回折する音や光に対して得られている条件 $d/\lambda \leq 1/2$ を用いる。この条件を式(1)を用いて変形すれば次式を得る。

$$\frac{N}{A} > \frac{2}{\lambda} + \frac{1 - a/d}{A} \quad (2)$$

3. 数値シミュレーションによれば、圧電素子の幅 a と素子配置間隔 d の比 a/d は放射パターンにほとんど影響を及ぼさないことが分かった。ただし、圧電素子の断面積をできるだけ大きくして入射エネルギーを大きくするには $a/d \approx 1$ とすることが望ましい。よって、式(2)は $N/A \geq 2/\lambda$ となり、アレイ要素数の最小値が得られる。以上により必要なパラメータをすべて決定することができる。

2.3 欠陥形状再構成手法の比較

開口合成法 超音波探傷において最終的に得たいものは欠陥形状の画像である。欠陥形状の再構成手法として最も一般的な手法は開口合成法であろう。例えば、ある点 x_i から超音波を送信し、 x_j において欠陥からの散乱波を受信したとする。このとき時刻 t において明瞭な散乱波が計測されたとすると、欠陥は $|x_i - x| + |x_j - x| = ct$ (c :波速)なる式を満足する点 x に存在するはずである。この式を満足する点 x は点 x_i と x_j を焦点とする楕円体上にあるが、単一の波形から欠陥位置を特定することはできない。しかし、複数の送受信点で散乱波を計測すれば、得られた各波形ごとに散乱波源の存在し得る楕円体を求めてその楕円体上に散乱波の振幅値を重ね合わせることにより、実際の欠陥位置での散乱振幅が強調されて欠陥の表面形状を再構成することができる。これが開口合成法の原理である。

線形化逆散乱解析法 簡単のために、2次元領域における空洞によるSH波の散乱を考える。ある点 x_j の散乱波の変位 u^{sc} は厳密に次式で表される。

$$u^{sc}(x_j) = - \int_{R^2} \gamma(x) \mu \frac{\partial U}{\partial n_x}(x, x_j) u(x) dV_x \quad (3)$$

ここに、 μ, U, u はそれぞれせん断剛性、基本解、変位を表し、 γ は空洞の境界上のみで値を持つ特異関数とよばれる関数である。今、点 x_j が空洞から十分に離れた遠方

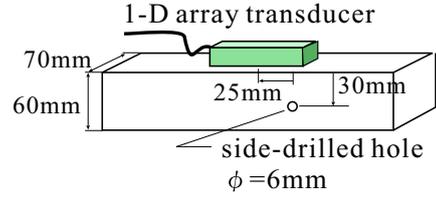


図-6 横穴に対するアレイ探傷試験。

場にあり、高周波近似である Kirchhoff 近似が成り立つとすると、式(3)は次式のようになる。

$$u^{sc}(x_j) \approx -F(k_T) \frac{k_T}{8\mu} \sqrt{\frac{1 + \hat{x}_i \cdot \hat{x}_j}{2|x_i||x_j|}} e^{ik_T(|x_i|+|x_j|)} \times \int_{R^2} \gamma(x) e^{-ik_T \mathbf{x} \cdot (\hat{x}_i + \hat{x}_j)} dV_x \quad (4)$$

ここに $F(k_T)$ は入射波の周波数スペクトル、 k_T は波数、 \hat{x} は $x/|x|$ なる単位ベクトルである。上式の積分は空洞の境界を表す関数 $\gamma(x)$ のフーリエ変換そのものであるから、次式のように逆フーリエ変換を施せば、散乱波 u^{sc} から関数 $\gamma(x)$ 、すなわち、空洞の境界を再構成することができる。

$$\gamma(x) = \frac{2\mu}{\pi} \int_{K^2} \sqrt{\frac{2|x_i||x_j|}{1 + \hat{x}_i \cdot \hat{x}_j}} \frac{u^{sc}(x_j)}{F(k_T)} \times e^{ik_T \mathbf{x} \cdot (\hat{x}_i + \hat{x}_j) - (|x_i|+|x_j|)k} \frac{dk}{k_T} \quad (5)$$

ここに、 $\mathbf{k} = k_T(\hat{x}_i + \hat{x}_j)$ である。

欠陥画像の比較 図6に示すように $\phi=6\text{mm}$ の横穴を空けた鋼材の上面に1次元アレイ探触子を垂直に置いて超音波の送受信を行い、得られた波形から横穴の表面形状の再構成を行った。用いた探触子は周波数 2MHz、素子数 $N = 32$ 、開口幅 $A \approx 64\text{mm}$ で、圧電素子の配置間隔 d 、幅 a 、奥行き長さ L はそれぞれ 2mm、0.7mm、12mm である。超音波の送受信はすべての素子の組み合わせで行われ、 32×32 個の波形を取得している。図7と8は線形化逆散乱解析法と開口合成法によって得られた横穴の表面形状を表している。両者を比較すると、線形化逆散乱解析法が本来あるべき境界(青い円)において画像の指示があるのに対して、開口合成法は境界以外の部分にもさざ波のような画像が広がっている。これは開口合成法が得られた波形をそのまま重ね合わせているのに対して、線形化逆散乱解析法は波動理論に基づいて波形処理を行っているため、線形化逆散乱解析法を用いれば形状再構成の精度が向上することが確認された。

3. 高精度超音波探傷システムの構築

アレイ超音波技術は医療分野において発達しており、計測に関わるハードウェアについては分野を問わず医療分野の技術をそのまま応用することができる。しかし、超音波の送受信をいかに行うか、そして得られた超音波波形をいかに処理するかなどのソフトウェアに関わる部分は適用分野あるいは適用する構造物ごとに特有なもので

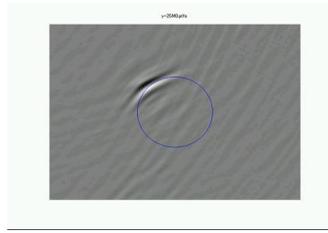


図-7 線形化逆解析法によって再構成された横穴の表面形状 .

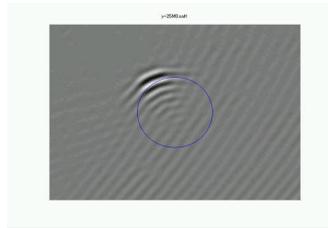


図-8 開口合成法によって再構成された横穴の表面形状 .

あるため、土木構造物に対するアレイ探傷システムの構築において検討すべき項目は多く残されている。ここでは、1次元アレイと2次元アレイの異なる探触子や垂直探傷と斜角探傷といった異なる探傷法を構築して比較することにより、各探傷法の探傷精度を検討する。また、アレイ探傷では膨大な数の波形を短時間で処理しなければならないため、効率的な波形処理アルゴリズムを用いる必要がある。本研究ではデータの冗長性を排除する高速データ処理を提案しその有用性を確認したが、紙面に制約があるためここでは説明を割愛する。

3.1 1次元アレイ探傷と2次元アレイ探傷

アレイ探触子は1次元アレイと2次元アレイに大別される。1次元アレイは図4に示したように細長い圧電素子を横一列に並べた探触子で、これによって得られた波形を用いれば図7や8のような欠陥形状の2次元断面を再構成することができる。一方、2次元アレイは正方形断面をもつ圧電素子をマトリクス状に配置したもので、3次元的な欠陥形状を再構成することができる。ここで用いた1次元アレイは、周波数2MHz、素子数 $N = 64$ 、配置間隔 $d = 0.9\text{mm}$ で、素子寸法は幅 $a = 0.8\text{mm}$ 、奥行き長さ $L = 12\text{mm}$ であり、2次元アレイは、素子断面 $2.4\text{mm} \times 2.4\text{mm}$ を持つ周波数5MHzの256個の圧電素子を縦横3mmピッチで16個 \times 16個の2次元マトリクス状に配置したものである。

図9と10はそれぞれ図6に示した横穴を持つ試験体に対して、1次元および2次元アレイ探触子を用いて得られた再構成画像の一例を示す。各図の左右の図はそれぞれ探触子を横穴に対して直角方向と45度だけ傾けて置いたときに得られた波形を用いて再構成された横穴の表面形状である。2次元アレイの場合には3次元空間内に画像が再構成され、探触子の向きに関係なく常に横穴表面に対応した良好な結果が得られているのに対し、1次元アレイの場合には探触子の向きによって再構成の精度が左右されることがわかる。

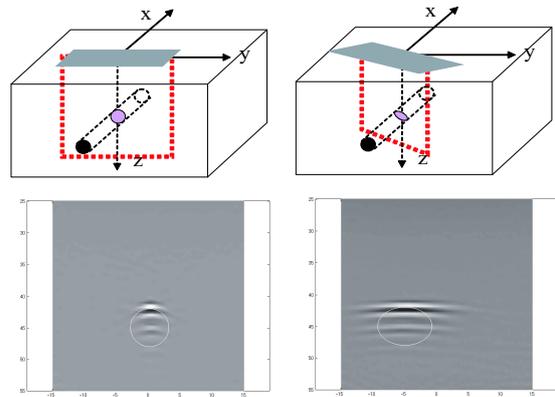


図-9 1次元アレイ探触子によって得られた横穴表面の再構成画像 .

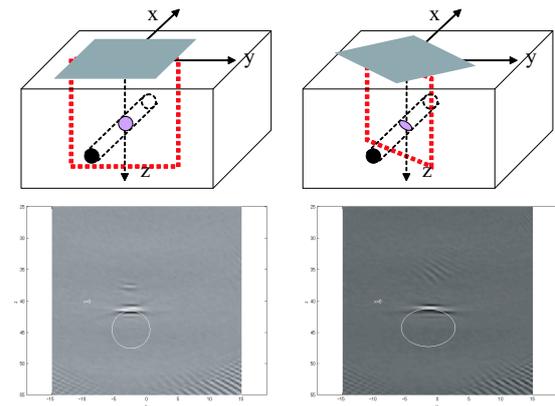


図-10 2次元アレイ探触子によって得られた横穴表面の再構成画像 .

3.2 垂直アレイ探傷と斜角アレイ探傷

いかなる画像解析法あるいはアレイ探触子を用いても欠陥形状を再現することができるのは超音波が直接入射し反射する境界である。直接超音波が入射しない影の境界部分は欠陥画像を得ることはできない。したがって、図7-10に示すようにアレイ探触子を試験体表面に垂直に置いた場合に再現できる境界部分は欠陥の上面近傍に限られ、欠陥の3次元形状を再現することはできない。しかし、鋼構造物の多くが板部材でできていることを考慮すれば、図11に示すようにアレイ探触子を斜めウェッジにのせて斜角探傷を行い、板裏面での反射を用いることによって垂直アレイ探傷では得ることのできなかつた影の部分の境界形状もある程度推定することができると思われる。

図12は図6に示した横穴を有する鋼材に対して、2次元アレイ探触子を用いた垂直探傷によって得た画像(上図)と図11に示す垂直と斜角の3種類の探傷法で得た画像を合成した画像(下図)を表している。垂直のみならず斜角アレイ探傷を行うことにより、横穴の側面の境界も画像することができ、横穴の3次元形状を把握することができる。

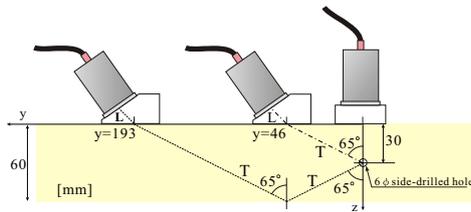


図-11 垂直アレイ探傷と斜角アレイ探傷 .

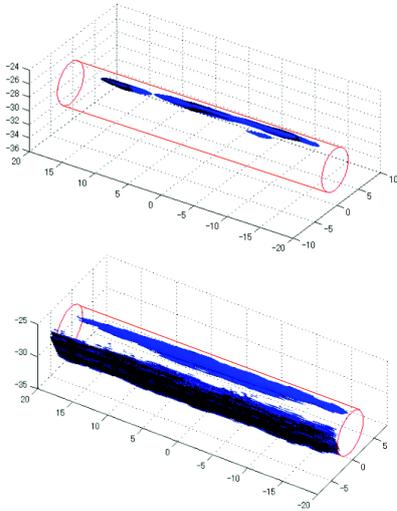


図-12 垂直アレイ探傷ならびに斜角アレイ探傷によって再現された横穴境界 . 上図 : 垂直探傷のみによる画像 , 下図 : 垂直と斜角の両探傷による合成画像 .

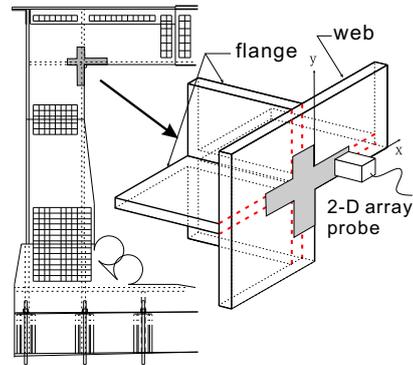


図-13 鋼製橋脚隅角部試験体 .

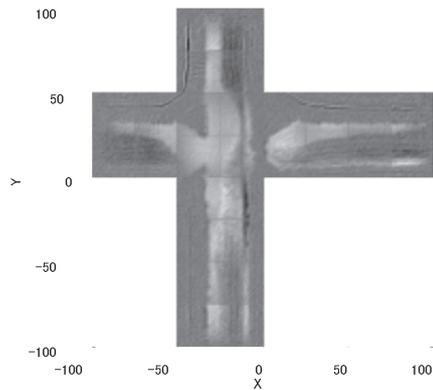


図-14 ウェブ裏面の開口合成画像 .

4. 高精度超音波技術の鋼構造物への応用

高精度超音波技術の鋼構造物への応用として、ここでは鋼製橋脚隅角部を模擬した疲労試験体を用いて行ったアレイ探傷試験の結果を示す。

鋼製橋脚の板組みにはいくつかの種類があるが、ここでは図 13 に示すようにウェブ面に溶接線が現れない WW タイプと呼ばれる板組みの試験体を対象とした。ウェブ、フランジの板厚は共に 32mm であり、図中の赤い点線が溶接線を表し、2 本の溶接線の間未溶着部がある。ウェブ表面に 2 次元アレイ探触子を垂直にあててフランジとウェブの溶接ルート部の未溶着部を検出した。2 次元アレイ探触子は一度の計測で約 50mm 四方の面を検査することができるので、溶接線に沿って 25mm 間隔で探触子を移動させて隅角部ならびにその周辺の未溶着部を画像化した。画像は 3 次元領域に対して行うことができるが、ウェブ裏面に相当する検査面から 32mm だけ奥にある面における開口合成結果をグレイスケールで図 14 に示す。2 本の溶接線の間にある未溶着部が白く表示されている。しかし、未溶着と考えられる部分の画像強度は一定ではなく、白黒の濃淡が混在している。これについてはフランジとウェブが一部接触をしているためとも考えられるが、今のところ原因は明確ではない。また、図の左上あるいは右上の部分には余盛り端部の形状が黒い線で明瞭に示されている。

5. 結言

本研究では鋼構造物に対する高精度な超音波アレイ探傷技術の開発を目的として、1. 超音波要素技術の高精度化、2. 高精度超音波探傷システムの構築、3. 高精度超音波技術の鋼構造物への応用の 3 つの段階的な項目について検討を行ったものである。その結果、第一の項目においては数値シミュレーションをもとにアレイ探触子の設計条件を明らかにするとともに、欠陥形状再構成手法の比較検討を行った。第二の項目においては、いくつかのアレイ探傷法を構築して、それらの比較検討を行うと共に、アレイデータ高速処理手法の提案を行い、有用性を確認した。第三の項目においては、アレイ探傷システムを鋼製橋脚隅角部を模擬した試験体に適用してその適用性を確認した。このように本研究ではほぼ当初の計画通りの成果を挙げる事ができたが、さらなる高精度化に向けて残された課題は多くある。例えば、1 次元アレイと 2 次元アレイなど異なるアレイ探傷システムの組み合わせにより欠陥の形状再構成の高精度化を図る必要がある。また、今回は WW タイプと呼ばれる板組みの角柱隅角部に対してアレイ探傷の適用性を検討したが、損傷を受けている鋼構造物には多くのタイプがあり、今後、様々な実鋼構造物に対する適用性を検討する必要がある。