

(別紙2)

建設技術研究開発費補助金総合研究報告書

1. 研究課題名 鋼床版のデッキプレートとUリブとの溶接部に発生する疲労クラックの高精度検査システムの開発

2. 研究期間 平成25年度～平成26年度

3. 代表者及び研究代表者、共同研究者

代表者	白旗弘実	東京都市大学・准教授
研究代表者	白旗弘実	東京都市大学・准教授
共同研究者	三木千壽	東京都市大学・教授

4. 補助金交付総額 44,200,000 円

5. 研究・技術開発の目的

鋼橋の鋼床版はコンクリート床版と比較して軽量であり、長大橋梁および空間の制約のある都市内などの高架橋に多く適用されてきた。鋼床版はデッキプレート、縦リブおよび横リブより構成される。デッキプレートとは、道路舗装の下にある鋼板であり、輪荷重がほぼ直接載荷される。縦リブと横リブはデッキプレートを補剛するための部材であるが、縦リブはU型形状をした閉断面のものが多く用いられている。鋼床版は比較的薄い板を溶接して製作されるが、疲労損傷の問題が指摘されている。本研究は疲労き裂の中でもデッキプレートとUリブに生じるき裂を対象として、高精度に検出することのできる非破壊評価システムを構築するものである。対象とする疲労き裂はUリブの溶接ルート部に発生し、デッキプレートを進展するもの、溶接ビードに進展するものの2種類に分けられる。図-1は本研究で対象とする疲労き裂である。

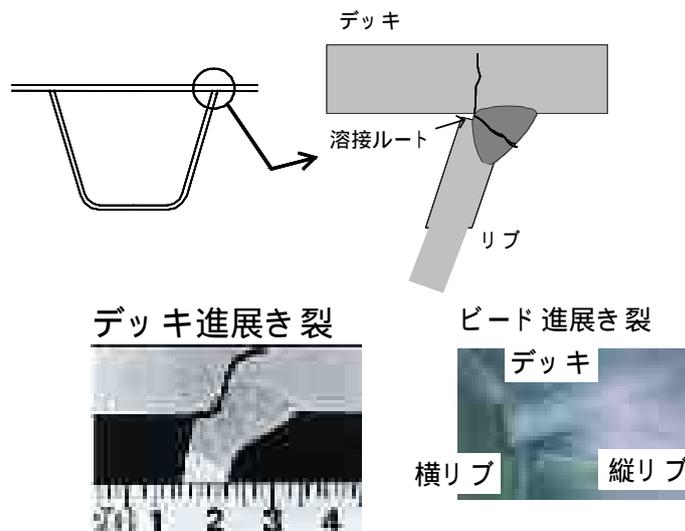


図1 対象とする疲労き裂

6. 研究・技術開発の内容と成果

(1) 研究概要

非破壊検査手法の中でも超音波探傷は試験体の内部を検査することのできる手法である。超音波探傷試験法において、最近ではフェーズドアレイと呼ばれる手法が実用化されてきている。超音波センサは圧電素子が用いられているが、従来型の探触子は圧電素子の寸法が10mm四方程度であったが、フェーズドアレイ探触子では、多数の微小なサイズの圧電素子が密に並んだものとなっている。圧電素子を励振するパルスを発生させたり、受信波形を増幅して表示する機器を探傷器と呼ぶが、フェーズドアレイ探触子を扱うことのできる探傷器では、個々の素子の励振に任意の時間差をかけることができ、入射波を制御する。フェーズドアレイ探触子では入射波の屈折角を変えたり、入射波を集束させることができる。デッキの厚さは12mm、リブの厚さは6mmであるものが多く、既製のシステムをUリブ溶接部の探傷に適用するだけでは不十分で、対象部位に適した仕様に改善する必要がある。ここでは探触子の設計、探傷方法、データ収録法などの検討を通じて疲労き裂を検出し、寸法を精度よく評価するシステムを開発する。

本研究では、下記の5項目に分けて鋼床版探傷システムの構築を行った。

- 1) フェーズドアレイ超音波探触子の条件の選定
- 2) フェーズドアレイ探触子の制御方法の検討
- 3) 高速データ収集装置の開発
- 4) き裂の画像化手法の開発
- 5) 疲労き裂の高さおよび溶接線方向の寸法の判定

研究は平成25年度に1)探触子の選定、2)制御方法の検討、3)データ収集装置の開発から始めた。平成26年度には、前年度の結果について1)から3)を見直し、改良を加えていくこととした。4)画像化手法の開発、5)き裂寸法判定のためのプログラムは、1)から3)と関連したデータ収集の仕様を決めたのち開始した。

(2) フェーズドアレイ超音波探触子の条件の選定

フェーズドアレイ超音波探触子の性能に影響を与える要因として、公称周波数、素子数、素子の配置があげられる。超音波探傷において、異なる二点を二点と識別することのできる最小距離を分解能と呼ぶ。時間分解能は入射波の波長に依存する。周波数が高いほど波長は短くなるので、分解能は高くなる。周波数が高くなると距離による減衰が大きくなるなどのデメリットもある。

超音波を受信することのできる範囲を開口というが、開口が広いほうが散乱波を受信しやすくなるので、検出性能は高くなる。フェーズドアレイ超音波探触子では、開口の幅は素子数と関連があることになる。アレイ探触子では入射波の波面を滑らかにするには素子のサイズは波長の半分が好ましいとされている。半波長よりも素子のサイズが大きいと、サイドローブと呼ばれる副軸が発生するといった問題がある。

検討では始めに図-2(a)に示すように、5MHzで64素子のフェーズドアレイ探触子で行った。素子の多さ、つまり開口の広さを考慮しての選定であった。しかし、5MHz64素子の探触子では、溶接部から遠い素子ではき裂からのエコーが思ったほど得られないという問題があった。さらに、サイズも大きくなり、試験体溶接部の平滑度の影響を受けやすく音響結合が安定しにくいという問題も発生した。そこで、次の検討として図-2(b)に示す10MHzで32素子のフェーズドアレイ探触子を使用した。10MHzの探触子はサイズが小さく、探触子を溶接部にできるだけ近づけられるように、との配慮で選定した。その結果、10MHz32素子のほうが扱いやすいことがわかった。

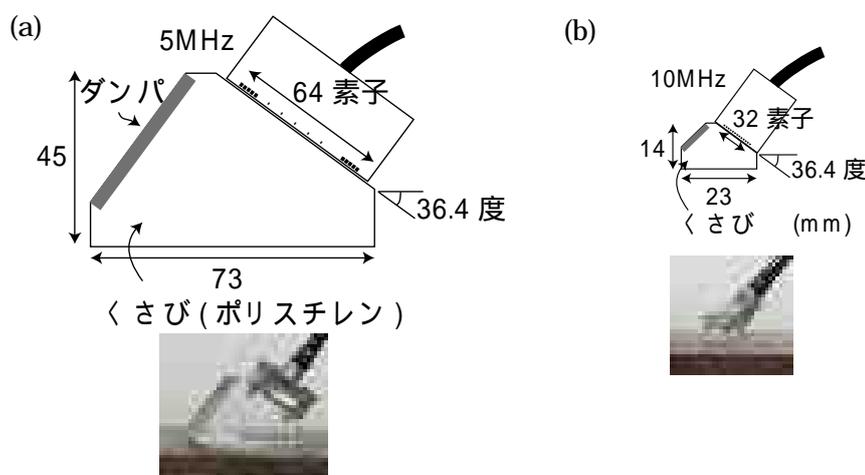


図-2 使用したフェーズドアレイ超音波探触子

(3) フェーズドアレイ探触子の制御方法の検討

探触子の制御方法では、使用する探触子の個数および配置の検討、入射波の条件設定の検討である。本研究ではデッキ進展き裂だけではなく、従来型の超音波探傷では検出することが難しかったビード進展き裂の検出も検討対象としている。

デッキ進展き裂およびビード進展き裂に対してはそれぞれデッキとリップにフェーズドアレイ探触子を配置することが考えられる。探傷にかかる時間を短縮するためには、これらデッキおよびリップに配置した探触子から一度に波形を収集する必要がある。つまり、複数個のフェーズドアレイ探触子を使うマルチフェーズドアレイ探傷ができることが望ましい。当初は64素子の探触子2個を使うことを念頭に入れていたので、合計で128素子の送受信が可能なフェーズドアレイ超音波探傷器が必要であると判断された。

波形データの収集法としては、探傷器内で励振の時間を設定し、図-3(a)および(b)に示すように、入射波をフォーカスあるいは可変角で探傷する方法が考えられた。これを従来型フェーズドアレイ探傷と呼ぶこととする。一方で、図-3(c)に示すように、 n 個ある素子に対して、素子1で送信および受信したときの波形を考える。さらに、素子1で送信、素子2で受信というように送信で n 通り、受信で n 通りの合計 $n \times n$ パターンの波形を取得するこ

とができる。 n^2 パターンの波形をあとから、時間差をつけて重ね合わせる。図-3(c)に示すように、反射源があり、そこに着目して時間差をつけるのであれば、反射源位置で散乱波が重ねあわされ、図-3(b)でフォーカシングしたときと同様の波形が得られる。これをフルマトリクスキャプチャと呼ぶ。フルマトリクスキャプチャは、超音波探傷は弾性波動であり、あとから線形的に重ねあわせても従来型探傷波形が再現できるという考えに基づいている。

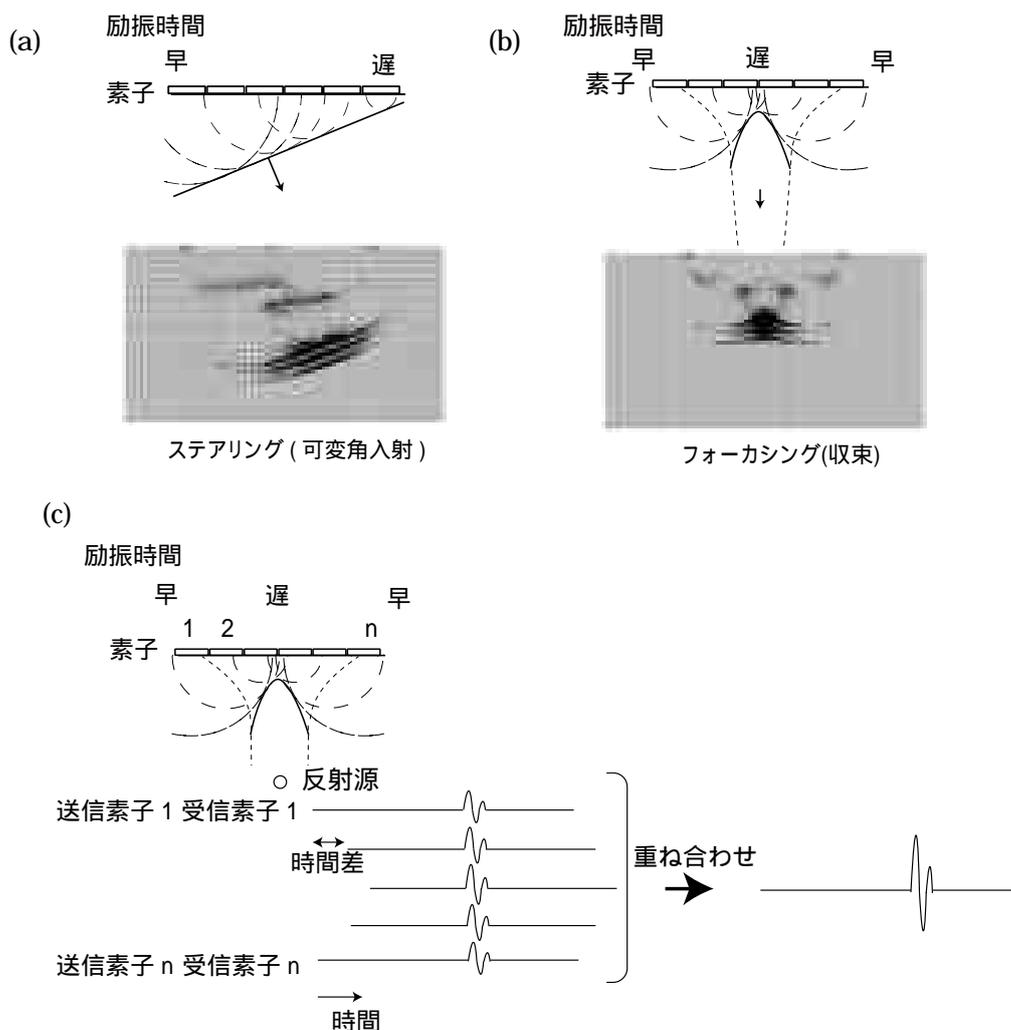


図-3 従来型フェーズドアレイ探傷((a)ステアリング, (b)フォーカシング), および(c)フルマトリクスキャプチャ

(4) 高速データ収集装置の開発

対象としているデッキプレートとリブとの溶接部は鋼床版システムにおいてももっとも溶接長の長い溶接部である。効率的な維持管理を行うには、迅速であることが重要であることは明らかである。現行のシステムでは2名1組のグループで、1日に100mの溶接線を検査することができるようである。現行の作業効率を保つために2.3cm/秒の走査速度を目標とした。

対象とする溶接部は現場では上向きでの探傷となる。探触子を安定した上向きで抑えるために強力な磁石で吸着させる方法とした。図-4に開発したスキャナ(フェーズドアレイ探触子治具)を示す。図-4(a)および(b)に示すように、5MHz64素子用のものと10MHz32素子用のものを作製した。10MHz32素子用のものはフェーズドアレイ探触子をできるだけ溶接部に近づけるために、できるだけシンプルな構造となるように改造された。いずれのタイプのスキャナにも磁石が埋め込まれており上向きでも探触子を支えられるような仕様となっている。デッキとリブプレートの角度に合わせてられるように、ヒンジ構造となっている。エンコーダはスキャナに取り付けられるようになっており、スキャナの動いた距離に応じて波形データを取るようになっている。

従来型フェーズドアレイ探傷においては、上記より若干遅い1cm/秒のデータ収集は可能であった。しかし、フルマトリクスキャプチャでは、1パターンで得られる波形を100MHzサンプリングで50マイクロ秒の長さだけ収録すれば、5000データとなる。64×64パターンの送受信の組み合わせで収録するならば、1箇所でも約20メガバイトのデータが送受信されることになる。データはコンピュータと探傷器の間を、LANケーブルを介して通信しているが、このスピードがボトルネックとなってしまい、1箇所のデータ収集に6秒がかかることとなった。

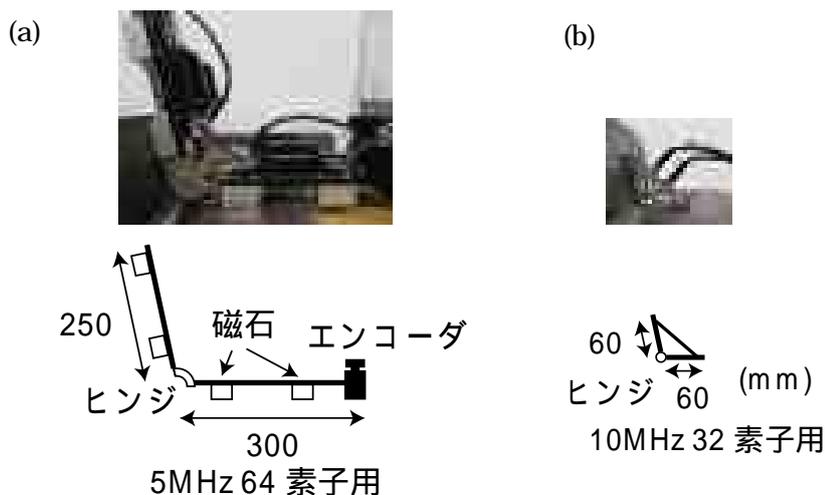


図-4 フェーズドアレイ探触子スキャナ

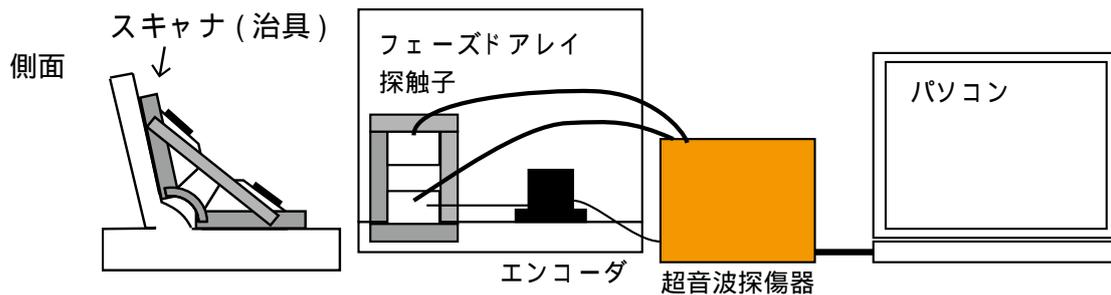


図-5 フェーズドアレイ超音波探傷システム

図-5 に開発したフェーズドアレイ超音波探傷システムを示す。また、表-1 にシステムの仕様、特徴を示す。システムはパソコン、超音波探傷器、フェーズドアレイ超音波探触子、探触子を固定するための治具およびエンコーダより構成される。パソコンは探傷器にフォーカシングや入射角の設定をするためのソフトウェア、フルマトリックスキャプチャの設定をするためのソフトウェアが実装されている。また、パソコンは探傷器で得られたデジタル波形データを取り込むようになっている。本探傷装置はフルマトリックスキャプチャ設定時、1 素子からの送信波を 128 素子で 1 度に送受信できる仕様となっている。超音波探傷器は幅 180mm、奥行き 240mm、高さ 160mm であり、非常にコンパクトなものである。パソコンと探傷器は LAN ケーブルで情報を通信するようになっている。

表-1 開発したシステムの概要

機器	仕様	特徴
探傷器	128 素子を同時に送受信可能。 外形 16 × 18 × 24cm で小型	従来システムのフェーズドアレイでは 32 素子程度まで。新システムでは、2 個のフェーズドアレイ探触子を同時に使うことができ、デッキ、ビード進展き裂のいずれも探傷が可能
フェーズドアレイ探触子(1)	10MHz32 素子 素子間隔 0.31mm	2 個使用

フェーズドアレイ探触子(2)	5MHz64 素子 素子間隔 0.6mm	2 個使用
スキャナ(大型)	強力な磁石で上向き探傷が可能・エンコーダ内臓	1mm 間隔で波形収集
スキャナ(小型)	強力な磁石で上向き探傷が可能・エンコーダを外付け	1mm 間隔で波形収集
パソコン	Core i7 ,メモリ 16GB ,LAN は 1GB/sec に対応	

(5) き裂の画像化手法の開発

得られた波形データをもとに疲労き裂画像の再構成を行う。き裂の画像化に際しては、開口合成法を適用する。超音波探触子からの入射波は幅を持っているため、たとえば図-6(a)に示すように、底面近傍にある反射源があるものとする。探触子でエコーが得られたとしても図-6(b)に示すような、直接反射の経路もあれば、図-6(c)に示すような底面反射の経路も考えられる。開口合成法では、入射波は幅を持っているものにとらえており、反射経路もいくつかのパターンにあてはめて考えることができる点で従来の画像表示法と比べてもすぐれている。き裂先端やき裂面からのエコーも像が重ね合わさる形になり強調されるようになる。

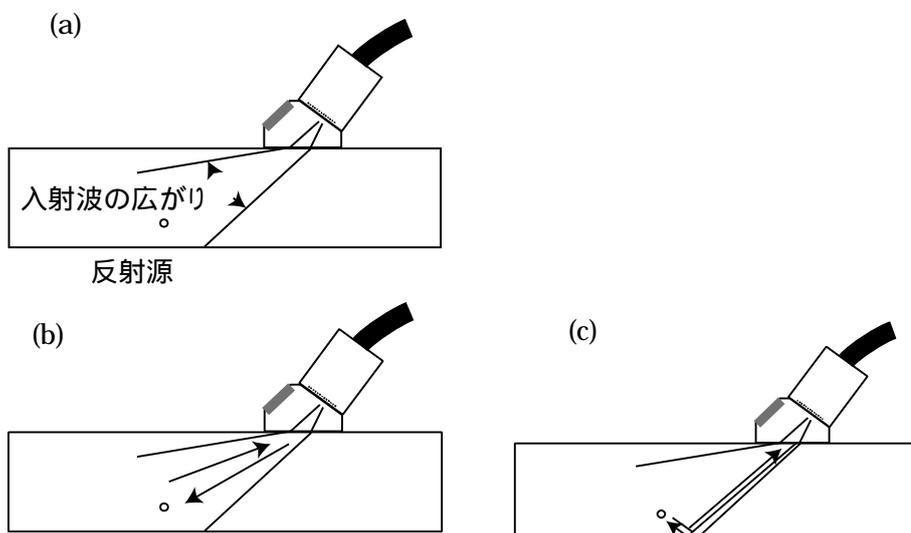


図-6 ビームの広がりによる複数のきずエコー経路

図-7(a)に示すように、開口合成法では、画像再構成領域を設定し、領域内を格子分割する。図-7(b)に示すように、格子点の一つ k を選ぶ。次に図-7(c)に示すように、フェーズドアレイ探触子の送信素子 i 、受信素子 j を選び、波動伝播時間 t_{ij} を計算する。送信素子 i 、受信素子 j の組み合わせで得られた波形が図-3(d)に示されるものとする。横軸は時間であり、縦軸はエコー高さである。伝播時間 t_{ij} に相当するエコー高さ $w(t_{ij})$ をその格子点 k の反射源の強さと考える。このサイクルを送信素子および受信素子すべてのパターンに行えば、格子点 k の像の高さが得られる。すべての格子点に対して同様の計算を行えば、再構成領域の画像化が行えることになる。

図-8 に示すように、再構成領域は溶接部を中心として 20mm 四方とし、格子の寸法は 0.2mm とした。図-9 は開口合成で考慮した波動伝播経路である。デッキ側の探触子を探触子 1、リブ側を探触子 2 としているが、図-9(a)および(b)に示すように、探触子 1、2 のいずれにおいても、格子点に直射で到達し、直射経路で送信探触子にもどっていく経路である。図-9(c)および(d)は、送信探触子からの入射波は底面で 1 回反射し、格子点に到達し、もう一度底面で反射して、送信探触子へもどっていく経路である。図-9(c)(d)の経路を考えると、底面で折り返して探触子の位置を仮想的に設定して、伝播時間を計算している。ここで用いているフェーズドアレイ探触子は、超音波を探傷に有効な角度で入射させるために、ポリスチレン製のくさびを用いている。ポリスチレンと鋼材界面において屈折が生じるため若干計算が複雑になる。屈折はスネルの法則に従うものとしている。くさびでの波動伝播速度は 2330m/秒、鋼中の波動伝播速度は 3230m/秒としている。

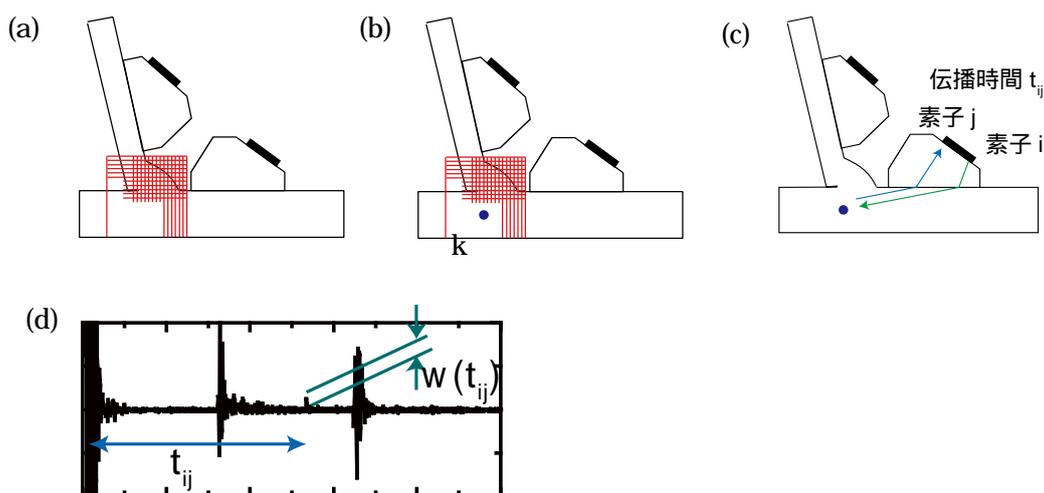


図-7 開口合成法

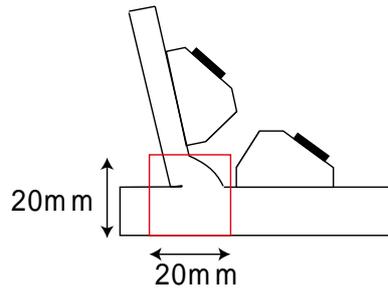
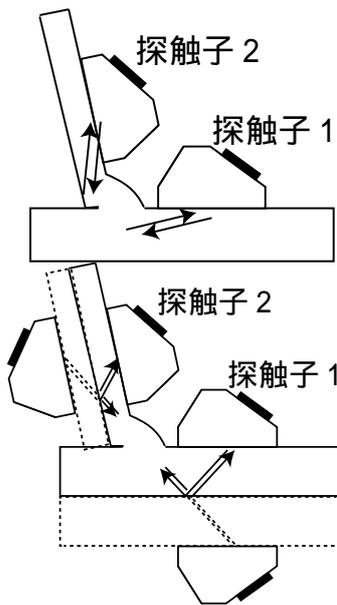


図-8 再構成領域



(a) 送信：探触子 1，受信：探触子 1 直射

(b) 送信：探触子 2，受信：探触子 2 直射

(c) 送信：探触子 1，受信：探触子 1 底面 1 回反射

(d) 送信：探触子 2，受信：探触子 2 底面 1 回反射

図-9 開口合成で考慮した波動伝播経路

(6) 疲労き裂の高さおよび溶接線方向の寸法を判定する

開口合成法では、多数の波を重ね合わせるため、点音源が重ね合わされ、強調されることになる。再構成像により得られた画像よりき裂の高さを推定することができる。

疲労き裂を模して、あらかじめ人工的に作製したスリットを有する試験体で、実験を行い、開口合成法で画像化を行った。用いた試験体を図-10 に示す。図-10(a)はデッキ進展き裂を模擬した試験体である。デッキプレートに相当する板に放電加工し、あとからリブプレートを溶接したものとなっている。スリットは深さが 6, 4, 2, 1mm, 溶接線方向の長さが 20mm である。図-10(b)はビード進展き裂を模擬した試験体である。デッキプレートにリブプレートを溶接したあと、デッキプレートを溶接ルート近くまで切削した形状になっている。ルートから放電加工をして、スリットを作製している。スリットの深さは 6, 4, 2, 1mm であり、溶接線方向の長さは 20mm である。

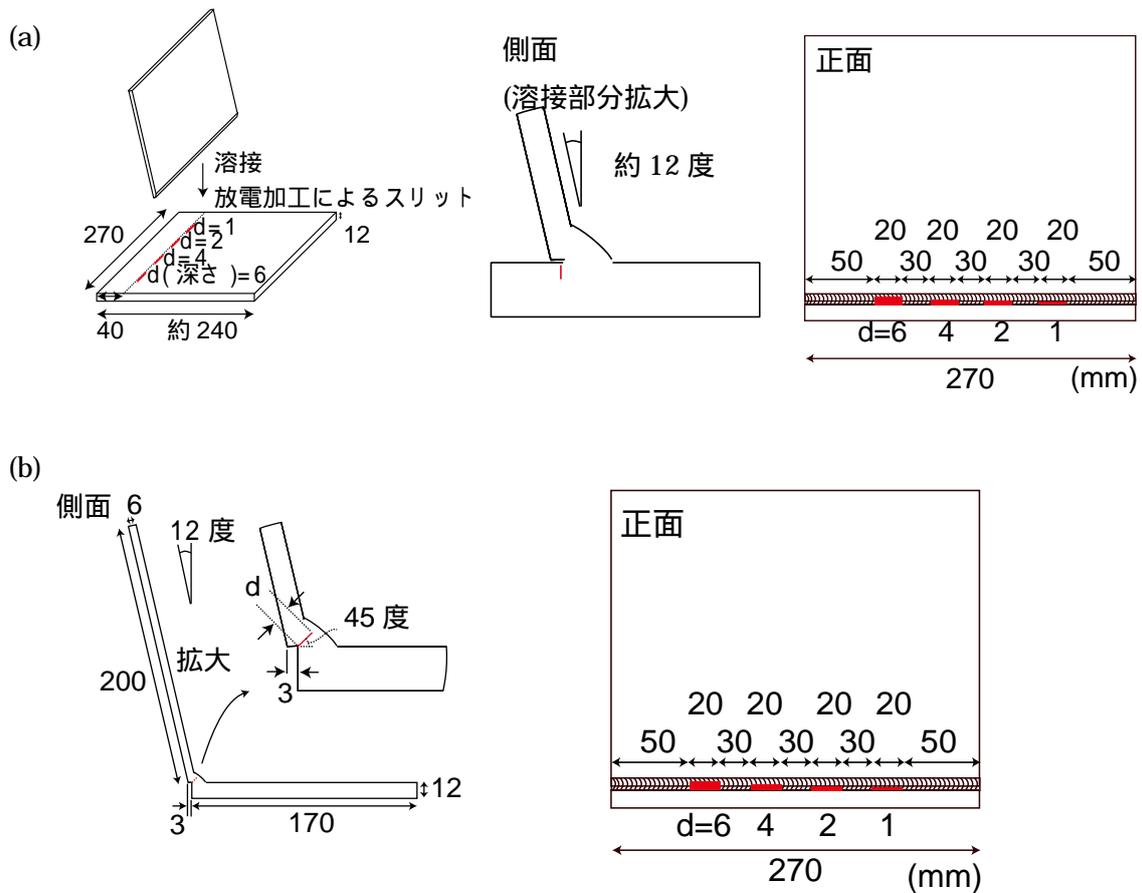


図-10 スリット試験体

実験では、リブとデッキの両方に探触子を置いた。従来型のフェーズドアレイ探傷法では、図-11(a)に示すように、リブ側探触子では、入射角度 45～85 度、図-11(b)に示すように、デッキ側探触子では、35～85 度に設定した。図が煩雑となるので、リブ側デッキ側に分けて示しているが、実際は同時に探傷を行っている。

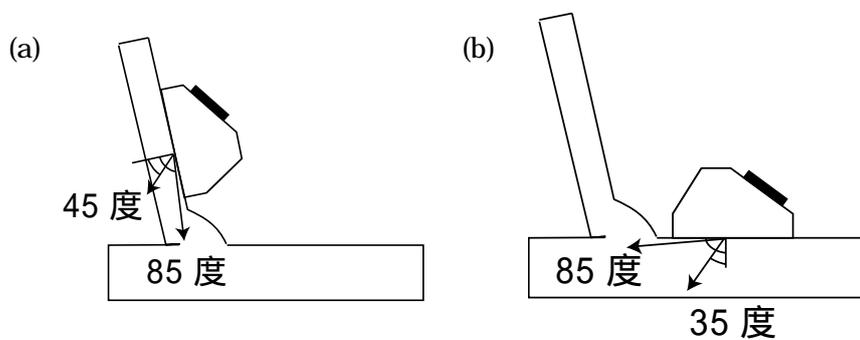
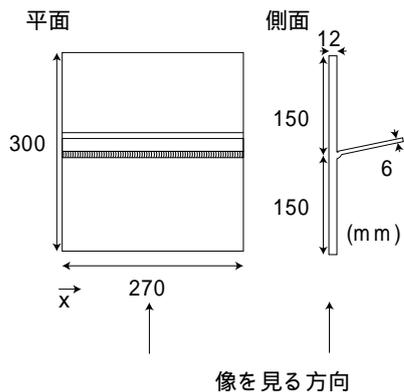


図-11 従来型フェーズドアレイ探傷法の角度の設定



従来型フェーズドアレイ探傷

フルマトリクスキャプチャ

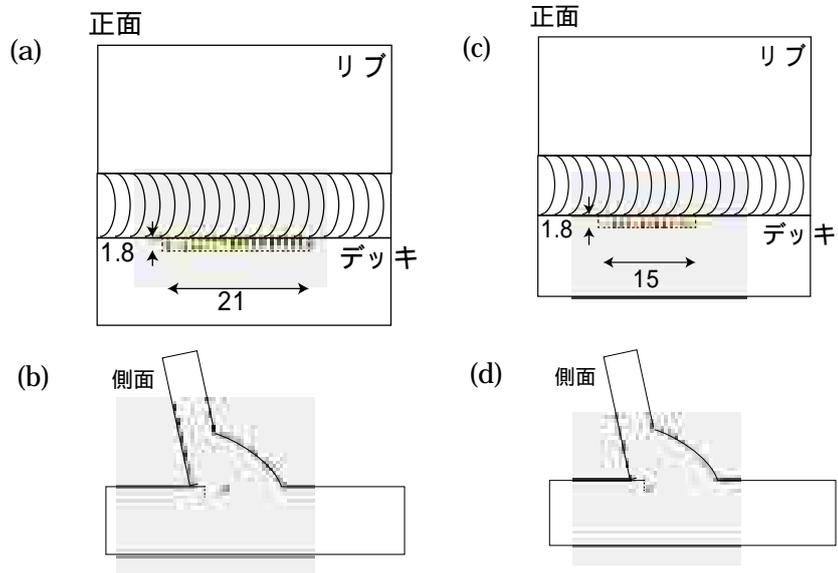


図-12 画像化結果(デッキ進展タイプ, スリット深さ 2mm)

図-12 に画像化した結果の一例を示す。デッキ進展タイプを模擬したスリットでの試験体で、スリット深さは 2mm のものである。図-12(a)および(b)は従来型のフェーズドアレイ探傷法で得られた波形を用いての結果である。図-12(a)は試験体をデッキ板に視線を沿って見た図となる。図-12(b)は溶接部側面から見る方向である。プロットされた点は再構成で設定した格子点である。スリット像でもっとも高い像を基準として、80%、60%、40%の高さでそれぞれ赤、黄、緑の色でプロットしている。図-12(c)および(d)はフルマトリクスキャプチャ法で得られた波形を用いて得られた像である。従来型フェーズドアレイ探傷およびフルマトリクスキャプチャのいずれにおいても溶接ルート部に像が得られている。像の高さは 2mm 程度であることや、像の長さは従来型で 21mm、フルマトリクスキャプチャで 15mm であった。

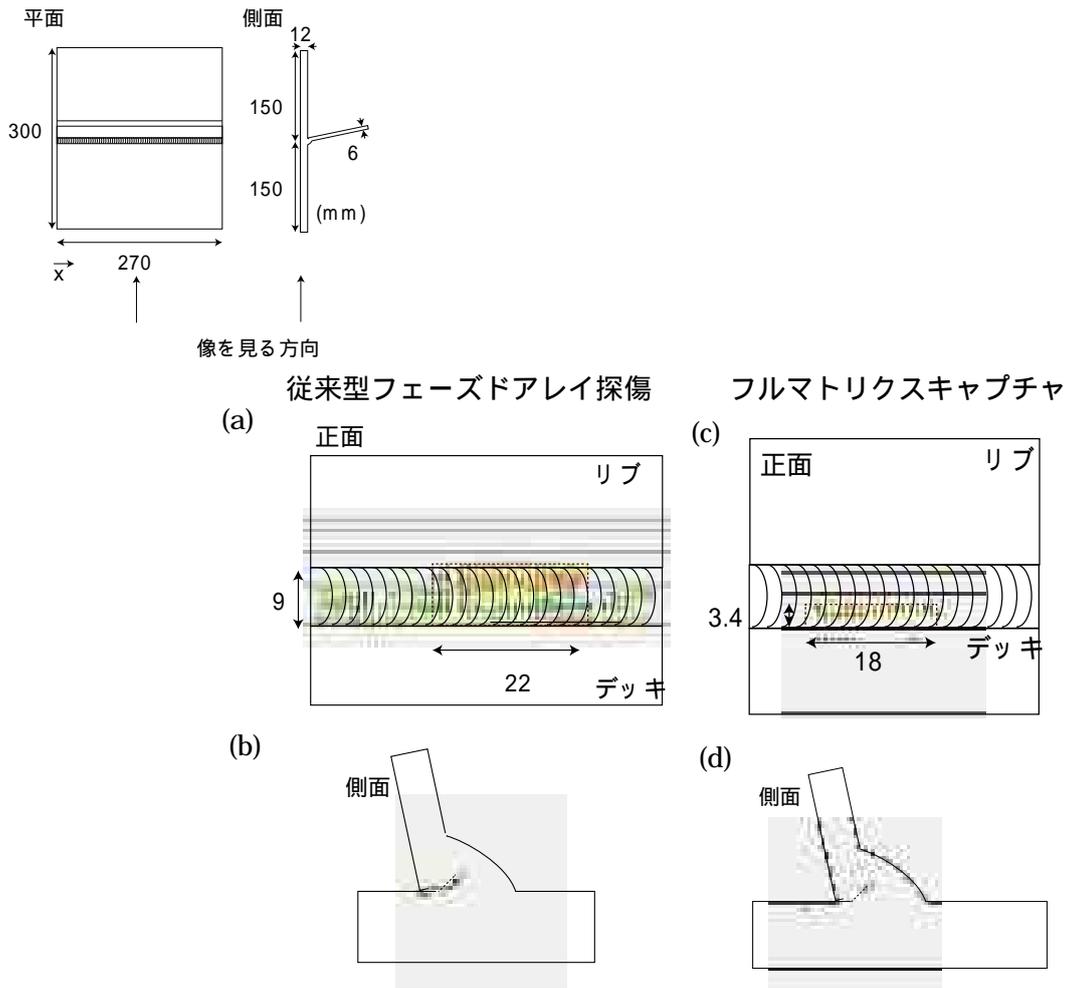


図-13 画像化結果(ビード進展タイプ, スリット深さ 4mm)

図-13 はビード進展タイプのスリット試験体での画像化結果である。スリットの深さは 4mm である。図-12(a), (b)が従来型フェーズドアレイ探傷, 図-13(c), (d)がフルマトリクスキャプチャによる像である。いずれの手法においても溶接ビード内のスリット像として得られている。しかしながら, 従来型フェーズドアレイでは, スリット先端部がフルマトリクスキャプチャほど, 鮮明には得られない結果となった。

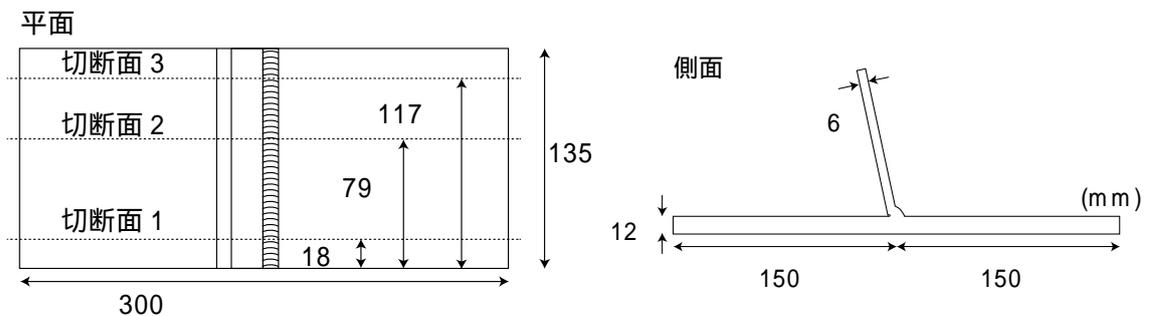


図-14 疲労試験体(デッキ進展タイプ)

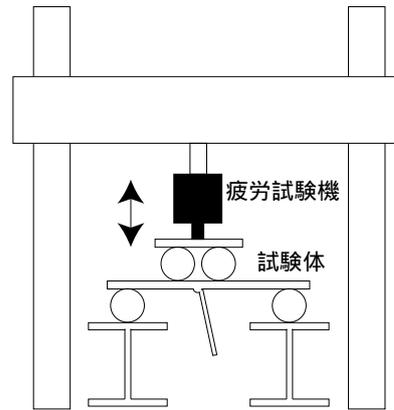


図-15 疲労载荷試験機

スリット試験体で画像化の確認ができた後は、疲労試験を行っている。図-14 に示す試験体を用意した。この試験体を図-15 に示すようにリブをはさんで載荷するとデッキ進展タイプの疲労き裂が発生する。き裂発生したと思われる段階で、試験体を取り出し、探傷実験を行った。探傷は従来型のデータ収集とした。図-14 に示す試験体の3箇所を切断し、マクロ写真を撮った。断面1および3は疲労き裂が始まるとされる箇所であり、断面2はき裂がもっとも進展していると思われる箇所である。画像化結果を図-16 に示す。図-16(a)は探傷結果のCスコープ表示である。図-16(b)および(c)は断面1での結果であり、図-16(b)は探傷結果、図-16(c)はマクロ写真である。切断面ではき裂の深さが3.9mmであったが、超音波探傷の結果では5mmと長く評価してしまった。図-16(d)および(e)は断面2、図-16(f)および(g)は断面3での結果である。超音波探傷試験結果が長めの結果となった。

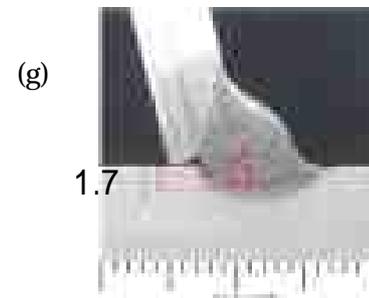
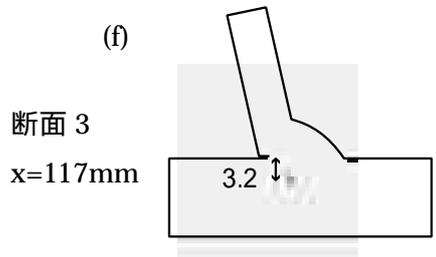
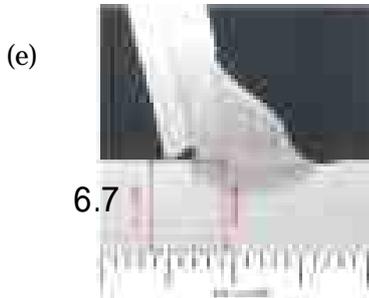
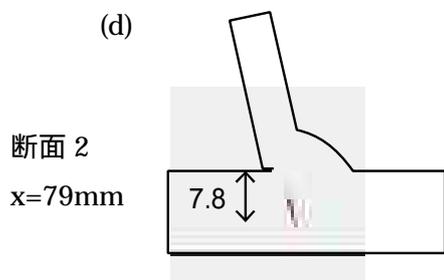
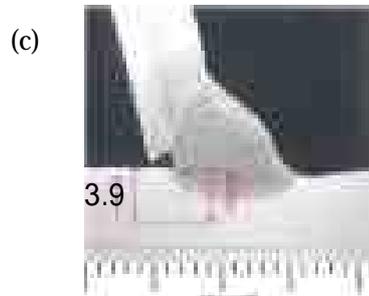
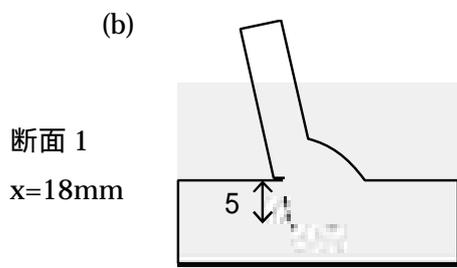
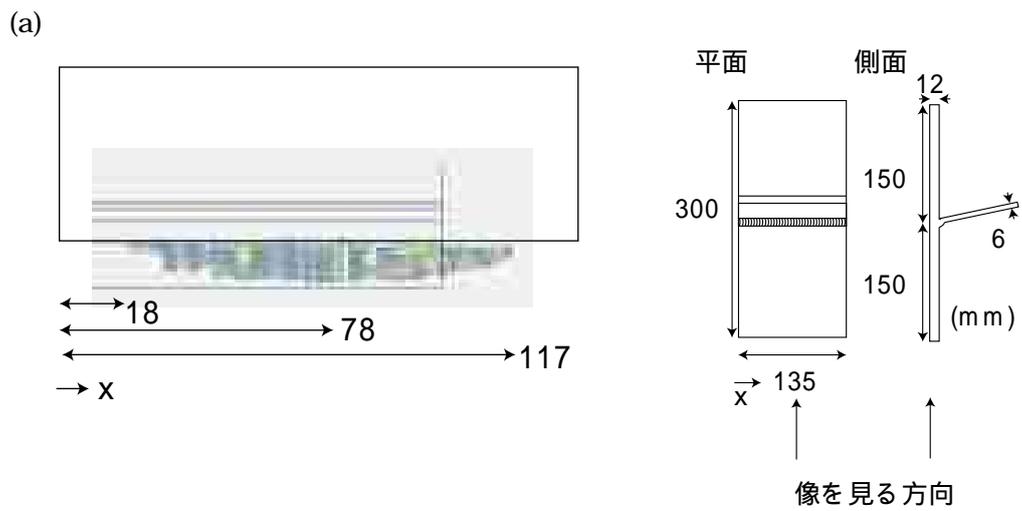


図-16 超音波探傷試験結果と断面マクロ写真

7. 研究成果の刊行に関する一覧表

刊行書籍又は雑誌名（雑誌のときは雑誌名、巻号数、論文名）	刊行年月日	刊行書店名	執筆者氏名
第 69 回土木学会年次学術講演会， I,マルチフェーズドアレイ探触子を用いた鋼床版疲労き裂検出システムの構築	平成 26 年 9 月	土木学会	白旗弘実，三木千壽
第 70 回土木学会年次学術講演会， I,フェーズドアレイ探触子を用いた鋼床版ビード進展疲労き裂の検出	平成 27 年 9 月	土木学会	白旗弘実，三木千壽，上田竜輝

8. 研究成果による知的財産権の出願・取得状況

知的財産権の内容	知的財産権の種類、番号	出願年月日	取得年月日	権利者名
なし				

9. 成果の実用化の見通し

研究期間中に数回，大型疲労試験体での探傷実験を行うことができた．図-17 に示すように，試験体は長さ 5m，幅 2m ほどで縦リブ 3 本および横リブ 3 本がある構造となっている．縦リブおよび横リブの大きさや間隔は実物と同じものとなっている．この試験体で，疲労き裂があると思われる箇所を中心に探傷実験を行った．

疲労き裂があると思われる箇所は図-17 に示された载荷点付近の縦リブと横リブの交差部である．図-17 に示すように，実験は上向きで行った．縦リブと横リブの交差部付近で隔てられた 4 箇所探傷を行った．

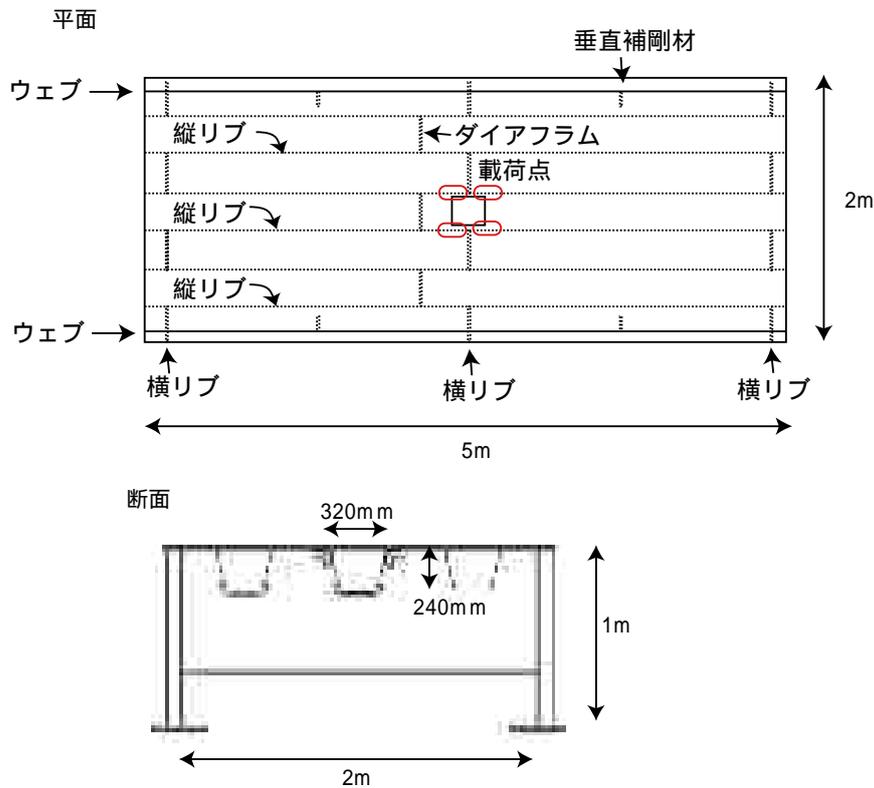


図-17 実物大試験体

交差部にフェーズドアレイ探触子を可能な限り近づけて、き裂のないと思われる箇所までの 50mm 程度を探傷した。スキャナは上向きの使用にも十分に耐えられるものであることが確認された。き裂はデッキを進展しているものと思われたが、指示エコーを受信することができた。図-18 に画像化結果を示す。図-18 において、平面はデッキに沿って見た方向である。

縦リブと横リブの交差部では接近できる箇所が限られ、スキャン装置に改善の余地があることも明らかとなったが、大型試験体での試行は実用化に耐えうることを示している。

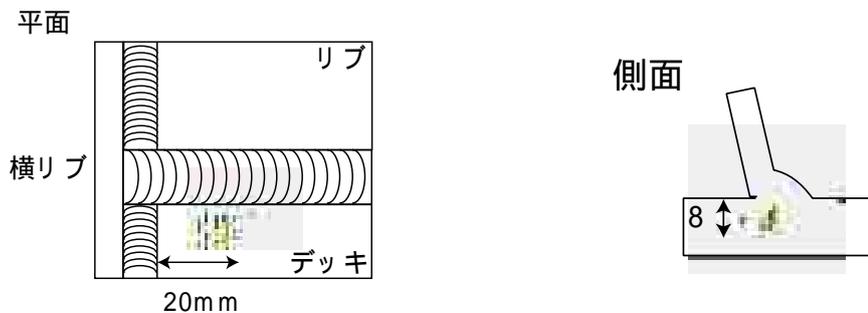


図-18 実物大試験体での探傷画像化結果

溶接線方向の寸法を判定するために圧電素子が平面配置されたフェーズドアレイ探触子(プラナー型フェーズドアレイ探触子)の使用も検討していた。しかしながら、開口合成プログラムの作成および実験が間に合わず、研究期間内での検討はできなかった。プログラムを3次元に拡張し、スリット試験体で確認し、疲労試験体で実験を行っていく予定である。

10. その他

なし