

鋼床版 U リブ継手部のき裂検出を目的とした透過超音波探傷法

岡山大学 正会員 ○木本 和志
 岡山大学 正会員 森本 逸紀

1. はじめに

閉断面 U リブを有する鋼床版の溶接部で疲労き裂の発生が報告され、その適切な検出と評価が必要とされている¹⁾。この疲労き裂は、図-1 のように、閉断面の内側にある溶接ルート部を起点として生じる。そのため、目視で検出できず、超音波探傷の適用が検討されている。超音波探傷は、単眼プローブを使った従来のパルス-エコー法やピッチ-キャッチ法にとどまらず、最近ではアレイ探傷器を使った多点計測により、フェーズドアレイ法²⁾やTFM(Total focusing method)³⁾などの方法できずの超音波イメージを合成することも一般的になりつつある。

鋼床版 U リブの継手で発生する疲労き裂には、(i) デッキプレートの板厚方向に進展するもの(図-2(a))だけでなく、(ii)溶接ビード方向へ進展するもの(図-2(b))もあり、進展方向は当該部位に生じる応力場によって異なる。後方散乱波を用いる反射法で超音波探傷を行う場合、(i)のタイプのき裂はデッキプレート側から、(ii)のタイプはリブ側から超音波の送受信を行うことが有利と考えられる。一方、デッキプレート表面方向のものを含め、(i)と(ii)の中間的な方向に伸びるき裂は、いずれの側から測定すべきか判断しがたく、反射法での探傷が適切か否かにも議論の余地がある。従って、き裂角度が未知の場合、反射法だけでなく透過法も併用することができれば、き裂の見落としを避ける上で有用と考えられる。

U リブ隅肉溶接部の検査に透過法を適用する場合、プレートからリブ側、あるいは、リブからプレート側へ超音波を送信する。本研究では、後者を採用し、リブ側から斜角探触子で入射波を送信し、プレート側で、き裂エコーを含む透過波を計測することを試みる。ただし、送信位置は固定し、受信は多点で行う。計測したエコー波形は開口合成法で画像化してき裂

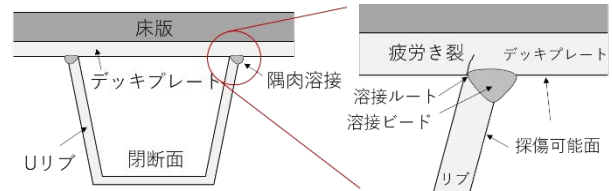


図-1: 鋼床版閉断面 U リブの隅肉溶接継手

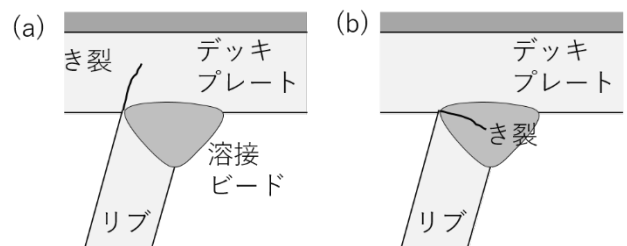


図-2 (a)デッキプレート貫通型, (b)ビード進展型き裂

の評価を行う。以上により、イメージベースの新しい透過超音波探傷法の提案を行う。以下、そのために行った実験方法について述べ、計測結果の一例を示す。続いて、き裂の超音波画像を合成し、画像中でき裂端部を特定する。その結果、2/3 波長程度の精度でき裂端部の検出が可能であることを示す。

2. 実験方法

(1) 試験体

図-3 に、超音波計測に用いた試験体断面の写真を示す。この試験体は、アルミニウムブロックを放電加工で所定の形状と寸法に切断して作成した、U リブ継手周辺の形状を模擬したものである。図中 A で示した箇所が隅肉溶接部に相当する箇所で、デッキプレートの板厚方向から 45 度の方向に、長さ 2.3 および 4mm のスリットを、模擬き裂としてそれぞれ設けた 3 体の試験体を用意した。これらの試験体は、板

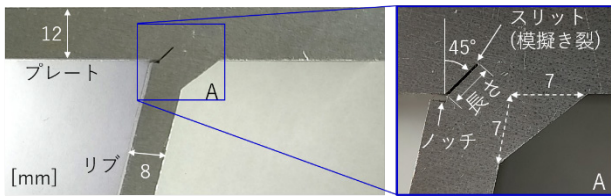


図-3 溶接継手の形状を模擬したアルミニウム試験体

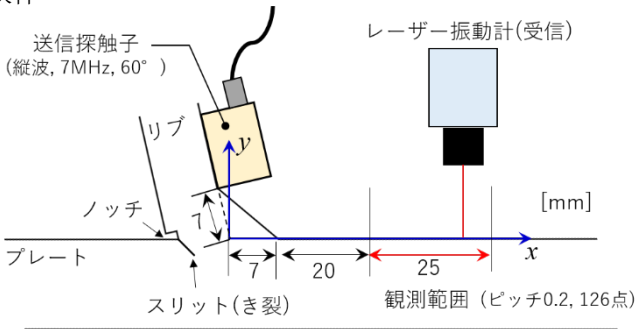


図-4 超音波エコーの測定位置(送受信センサーの配置)

材を溶接したものではないが、以下では、簡単のため、試験体の各部をルートやビードなど対応する溶接部の名称で参照する。なお、試験体は図の奥行方向へ様な断面形状をもつ。

(2) 超音波測定

図-4に、超音波の送受信位置を示す。この図では、実際の床版と上下を反転させた状態で試験体断面と測定位置を示している。

超音波の送信には公称周波数 7MHz、屈折角 60° の縦波斜角探触子を用いた。送信探触子は、図-4のように、探触子の前縁部が溶接ビード上側の止端部にくるようリブ表面に固定した。一方、透過波の受信にはレーザードップラー振動計を用い、試験体と振動計の相対位置を精密ステージで調整することで、レーザー照射位置を所定の間隔で変えながら多点計測を行った。これは、観測点間隔を必要に応じて小さく取るためこと意図したもので、原理的にはアレイ探触子で代替可能である。レーザーによる計測は、止端部から 20mm 離れた位置を始点とし、0.2mm 間隔で 126 点、25mm の範囲で測定した。その際、サンプリング周波数は 100MHz、平均化回数は 4,096 回、送信探触子の駆動電圧振幅は 400V とした。

(3) 計測したエコー波形の例

以上の方法で測定した波形データの一例を図-5に示す。これは、き裂長さ 4mm の試験体で測定した 126 点でのエコー波形を、走時波形(B スキャン波形)とし

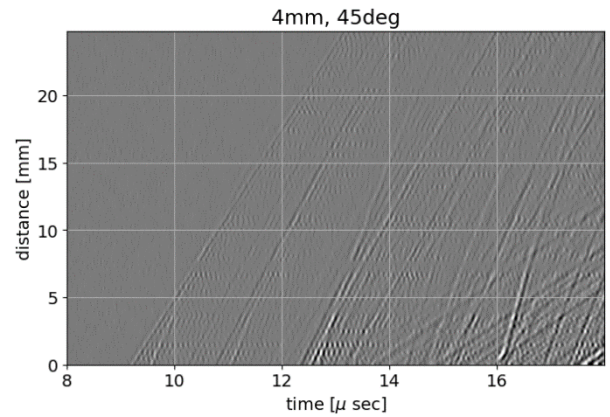


図-5 測定した超音波エコー波形の例(き裂長さ 4mm の場合)

て表示したものである。横軸は経過時間(μ s)、縦軸は観測範囲左端の始点から測った距離(mm)を表し、各時空間点でのエコー強度を、その最大値で無次元化してグレースケール画像として示している。この走時波形には、形状エコーとリブやプレート表面での多重反射で生じた多数の波群が現れていて、このままの形でき裂エコーを特定することや、き裂の有無や位置を判定することは容易でない。そこで、次節の方法でき裂の超音波画像を合成し、画像中でき裂検出を行う。

3. 超音波イメージング

(1) イメージング法

ここでは、時間反転集束法(time-reversal focusing)のアイデアを援用した開口合成法を用いる。はじめに、画像化点を表す位置ベクトルを \mathbf{x} 、画素値を $I(\mathbf{x})$ 、第 i 番目の観測点で得られた超音波エコーの時系列波形を時間変数を t として $a_i(t)$ と表す。位置 \mathbf{x} で生じた散乱波は、 i 番目の観測点において散乱波の発生時刻から伝播時間 t_i だけ遅れて現れる。超音波の伝播速度を c とすれば、 t_i は

$$ct_i = |\mathbf{x} - \mathbf{x}_i| \quad (1)$$

と表される。もし、散乱波がプレート表面などで反射された後に観測点に到達するならば、式(1)右辺は対応する伝播経路の長さとするばよい。時間反転法の考え方^{3),4)}に基づけば、距離減衰が大きく変化しない \mathbf{x} の範囲において、散乱波動場 $u^{sc}(\mathbf{x}, t)$ は、定数倍を除いて

$$u^{sc}(\mathbf{x}, t) = \sum_i a_i(t + t_i(\mathbf{x})) \quad (2)$$

と推定される．ここで，媒体内部の位置 \mathbf{x} にき裂端部や表面などの散乱源があったとする．その場合，位置 \mathbf{x} には，同じ位相の入射波 $u^{in}(\mathbf{x}, t)$ が到達しているはずである．そこで，入射波と散乱波の時間に関する相関

$$\begin{aligned} & \langle u^{in}, u^{sc} \rangle(\mathbf{x}) \\ &= \int u^{in}(\mathbf{x}, t) u^{sc}(\mathbf{x}, t) dt \end{aligned} \quad (3)$$

をとれば，実際に散乱源となっている位置は正の大きな値を，それ以外の箇所では負または正の小さな値を取ることが期待される．そこで，式(3)の相関を画像化関数

$$I(\mathbf{x}) = \langle u^{in}, u^{sc} \rangle(\mathbf{x}) \quad (4)$$

として用いる．なお，式(3)の右辺を計算する際，入射場 $u^{in}(\mathbf{x}, t)$ は何らかのモデルに基づいて与える必要がある．ここでは，予め測定した送信探触子表面の自由振動波形を，距離減衰を無視し，時間遅れだけを考慮して重ね合わせ，任意の時空間位置における入射場を与える．入射場をさらに単純化して，

$$\begin{aligned} & u^{in}(\mathbf{x}, t) \\ &= \delta(t - t_{in}(\mathbf{x})) \end{aligned} \quad (5)$$

とデルタ関数で与えたとする．ただし， $t_{in}(\mathbf{x})$ は，入射波が位置 \mathbf{x} に到達するまでに要する伝播時間を表す．この場合，式(4)は開口合成法の画像化関数に帰着されるため，この意味で，式(4)は開口合成法の一般化とみなすことができる．そこで以下では，本画像化手法とその結果を，それぞれ，開口合成法，開口合成像と呼ぶ．

(2) 開口合成像

図-6に，き裂長さ4mmの場合の開口合成像を示す．この図にある二つの画像は，異なる伝播経路を想定して画像化を行ったものである．(a)はき裂から直接観測点に到達する経路を，(b)はき裂から，プレート底面での反射を経て観測点に至る経路を想定したものである．各々，図の横軸と縦軸は，図-4に示した座標値を，黒の実線は試験体の外形線を示したもので，継手周辺での画像化関数 $I(\mathbf{x})$ の値を，最大値で無次元化してカラー表示したものである．なお，白の破線は，想定した経路のイメージを表すもので，実際には画像化点毎に経路が決定されている．前述の通り，画素値が正の大きな値を取る箇所が散乱源の存在を

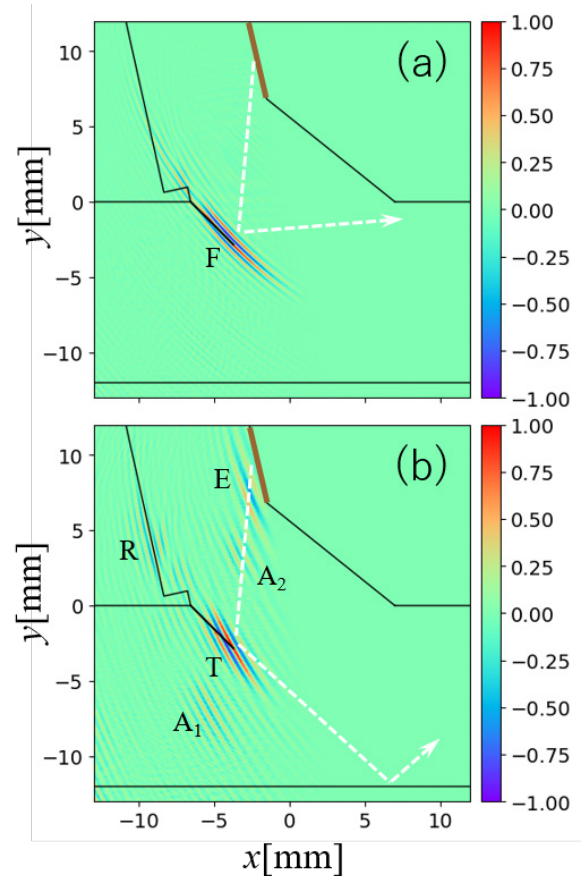


図-6 開口合成法による画像化結果(き裂長さ4mmの場合)

示唆している．図-6(a)の結果では，き裂表面で反射した超音波が画像化に用いられた結果，き裂面に沿う指示(F)がはっきりと現れ，特に大きな値を取る赤

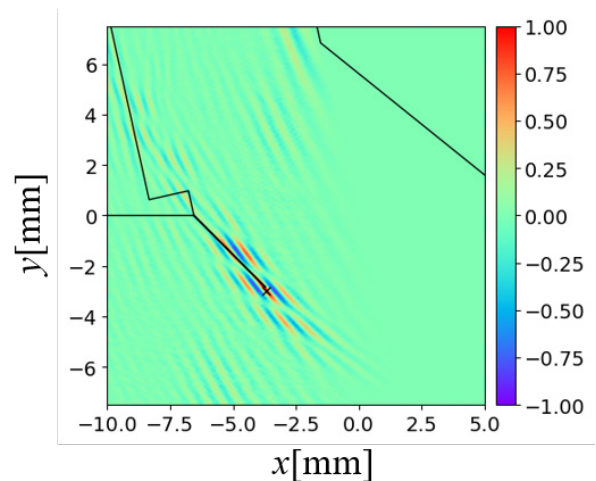


図-7 二つの経路を使った開口合成法による画像化結果(き裂長さ4mmの場合)

で示された箇所は，き裂面とよく一致している．一方(b)の結果では，き裂端部エコーが投影された結果，き裂端部を通るように大きな画素値を持つ範囲(T)が現れている．また，上側止端部で生じた回折波とリブ

内面からの反射波によって、それぞれ、EとRで示した箇所に弱い指示が現れること、 A_1 や A_2 で示したようないくつかの虚像が現れる点で、(a)と異なっている。なお、(a),(b)いずれの結果でも、き裂の指示範囲(F,T)が実際よりも大きく滲んで現れるのは、き裂から見て散乱波を観測できる方向が狭い範囲に限定されていることに起因した画像の劣化である。

表-1 き裂長さ と 端部位置の推定誤差

き裂長さ[mm]	2.0	3.0	4.0
端部の推定誤差[mm]	0.54	0.18	0.17

(3) き裂端部位置の推定

図-7は、図-6(a)と(b)の二つの画像を重ね合わせた結果を示したものである。この図では、き裂周辺の様子をより詳しく見るができるように、図-6よりも表示範囲はやや絞られている。また図-7では、黒の×印で画素値が最大となる点を示しており、その位置はほぼき裂先端と一致することが分かる。そこで、これをき裂長さ4mmの試験体におけるき裂端部の推定位置と考え、実際のき裂先端からの距離を求めるとおよそ0.17mmとなる。き裂長さが2mmと3mmの試験体についても、同様にしてき裂端部の検出を行う。すなわち、二つの経路に対応する開口合成像を作成し、各々を最大値で正規化して重ね合わせる。その結果えられた画像で、最大画素値の位置を読み取る。これをき裂端部位置の推定とし、実際の端部位置からのずれ(距離)を求めると、その結果は表-1のようになる。なお、き裂が無い試験体でも画像化を同様な手続きで行い、き裂と混同しうるような指示が現れないことは確認している。以上の結果から、実際のき裂先端と推定位置のずれは、長さ2mmの試験体で最大となり0.54mmとなっている。入射波の波長は7MHzで約0.9mmであることから、このとは、2/3波長程度の精度でき裂端部位置が検出できていることになる。波形の重ね合わせに基づく線形アルゴリズムでは、半波長の精度が目標とする一つの精度基準となるため、概ね良好な精度が達成されていると言える。以上は、波長を基準とした相対評価であるため、絶対的な精度に関しては、より高い周波数の送信探触子を用いることや、同じ周波数でもより波

長の短い横波を用いることで、さらに改善できる可能性がある。

4. まとめ

本研究では、鋼床版Uリブの、隅肉溶接部における疲労き裂の超音波探傷を想定した実験とき裂の画像化を行った。超音波探傷実験は接触型の縦波斜角探触子を送信に用いた透過法で、デッキプレートの板厚方向から45度傾いた模擬き裂からのエコーを多点で計測した。その結果を二つの異なる経路を想定し、開口合成法で超音波画像を合成したところ、いずれの経路に対しても明瞭なき裂の指示が得られた。さらに、二つ画像を重ね合わせた画像をもとにき裂端部位置を推定したところ、概ね2/3波長程度の精度で正しくき裂端部を特定することができた。今後は、本手法と反射法の併用、最適な送受信位置と超音波モードの選択、エコー伝播経路特定の自動化、画像合成計算の効率改善等が、本手法の信頼性と使用性を高める上での課題となる。

謝辞

本研究の一部は、令和4年度中国建設弘済会技術開発支援事業の助成を受けて実施したものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 服部雅史, 館石和雄, 判治剛, 清水優, “鋼床版Uリブ・デッキプレート溶接部のルートき裂に対する疲労評価”, 土木学会論文集 A1, Vol.77, No.2, pp.255-270, 2021.
- 2) 白旗弘実, 上栗拓真, “フェーズドアレイ超音波探傷法による鋼床版デッキプレート進展き裂の非破壊評価”, 土木学会論文集 A1, Vol.72, No.1, pp.206-219, 2016
- 3) C. Holmes, B.W. Drinkwater, and P. D. Wilcox, “Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation”, NDT & E International, Vol.38, pp.701-711, 2005.
- 4) 木本 和志, 斎藤 隆泰, “き裂による散乱波の反響環境下での時間反転集束”, 土木学会論文集, 第79巻, 15号, 論文ID: 22-15007, 2023.
- 5) M. Fink, “Time reversal of ultrasonic fields. I. Basic principles”, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 39, No. 5, pp.555-566, 1992.