

き裂による散乱波の反響環境下での時間反転集束 Time-reversal focusing of elastodynamic scattered waves from a crack in a reverberating environment

木本 和志 (岡山大・学術研究院 環境生命科学学域) 斎藤 隆泰 (群馬大学・理工学府)
Kazushi KIMOTO, Okayama University
Takahiro SAITOH, Gunma University
E-mail: kimoto@okayama-u.ac.jp

In this study, time-reversal focusing fields are reconstructed numerically from measured ultrasonic signals. In the ultrasonic measurement, reverberating field is excited in a T-shape joint specimen with and without a simulated crack. The measured waveforms are time-reversed and back-propagated in numerical finite-difference models of the specimen. It is found as a result that the scattered fields back-focus successfully to the scattering sources, and thus the wave components useful for the flaw detection may be retrieved from the reverberating waveforms.

1. はじめに

超音波探傷法は、部材内部や表面き裂の検出に用いられる非破壊検査法の一つである。超音波探傷試験では、エコー強度の時刻歴波形が計測結果として与えられるため、き裂位置や大きさを推定する際、しばしば、画像合成が行われる。代表的な方法にはフェーズアレイ法や開口合成法が挙げられる。これらの方法は、いずれも超音波の伝播経路を仮定してエコー波形を画像化領域に投影する。しかしながら、固体内部では反射や回折、モード変換が生じ超音波伝播経路の特定は必ずしも容易ではない。特に、板材や部材継手部周辺では、入射波や散乱波の反響により想定する伝播経路が多数存在し、きずからのエコーを分離して観測することや、その経路特定は難しく、従来の方法ではきず画像の合成も困難になる。これに対して、時間反転集束の原理に基づく画像化法¹⁾では、計算負荷は高いものの入射波や散乱波の伝播経路を特定する必要がないという利点がある。時間反転集束実験はこれまで行われているが、固体の超音波探傷を想定した検討はほとんど行われていない。特に、多重反射の効果が顕著で散乱波の伝播経路特定が困難となる反響環境下で、き裂からの微弱なエコーを散乱源に正しく時間反転集束させることができるか否かは明らかでない。本研究では、この点を明らかにすることを目的として、超音波計測と数値解析によって散乱波の時間反転集束挙動を調べる。以下では、模擬き裂からの超音波エコー計測に関する実験概要を示し、次に、時間反転場の計算方法を述べる。その後、時間反転場の計算結果を示し、き裂位置に集束する散乱波が良好に再構成できることを示す。

2. 超音波エコー計測

Fig.1 に超音波エコー計測の概要を示す。計測には T 溶接継手の形状を模擬した試験体を用いた。Fig.1 はその断面図を示したもので紙面奥行き方向には一様な形状をもつ。試験体を構成する水平材(フランジ)の厚さは 12mm、鉛直材(ウェブ)の厚さは 7.8mm で、継手部分には隅肉溶接での接合を想定し、余盛りとルートギャップを表現した箇所を設けてある。なお、ここでは、継手の形状だけを模擬することを意図し、試験体はアルミニウムブロックを切削加工して作成している。Fig.2 は継手近傍の詳細を示したもので、余盛り表面は半径 20mm の円弧とし、脚長 7mm となっている。き裂はルートギャップから発生し、フランジ側に進展するケースを考え、長さ 4mm、幅 0.2mm のスリットを、鉛直方向から傾き 15 度の方向に放電加工で作成した。なお、き裂の起点はルートギャップを模擬した 1mm 角のスリット角部とした。超音波の送受信はウェブ右側、フランジの上面からのみ可能と仮定し、Fig.1 のように送受信センサーを配置した。これは、TOFD 法を適用することのできない、制約の厳しい探傷条件を想定したものである。ここで、送信には屈折角 70 度、公称中心周波数 5MHz の圧電探触子を、受信にはレーザードップラー振動計 (LDV) を用いた。送信探触子は、溶接始端部から 40mm の位置に、探触子前縁部が来るように設置した。一方、LDV による受信は、止端部から 0.2mm の間隔で 201 点、40mm の範囲で行った。その際、サンプリング周波数は 80MHz、平均化回数は 4,096 回とし、送信探触子は振幅 300V、幅 0.1 μ s の矩形パルスで駆動した。

Fig.3 は、このようにして計測した 201 点での超音波波形を示した走時プロットである。横軸は経過時間(μ s)を、縦軸

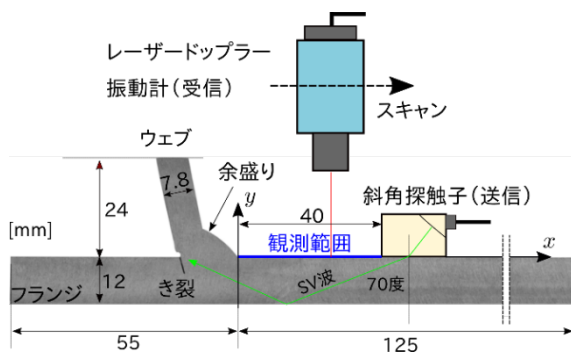


Fig.1 Experimental setup for the ultrasonic echo measurement.

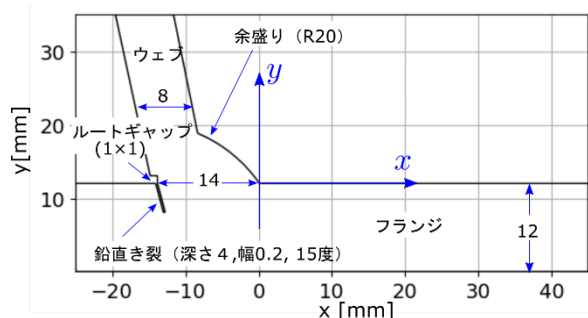


Fig.2 The shape and dimensions of the specimen. A close-up around the joint with an angled crack.

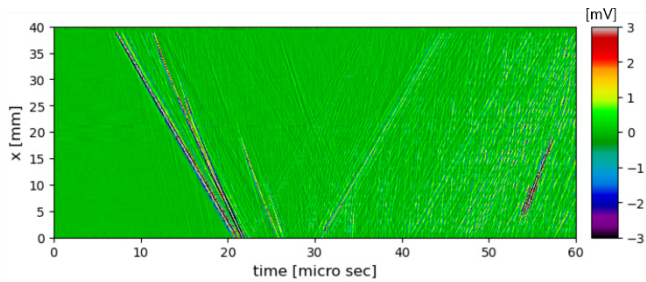


Fig.3 A travel-time plot showing the ultrasonic signals measured over the line of 40mm length.

は位置 x (mm)を表し、対応する時空間点でのエコー強度 (mV)をカラーマップで示している. Fig.3 において右下がり ($dx/dt < 0$)の軌跡は $x < 0$ 方向への、右上がり ($dx/dt > 0$)のものは $x > 0$ 方向への進行波を表す. き裂からの後方散乱波は右方向への進行波として観測される. しかしながら、右方向への進行波にはルートギャップや溶接止端部等からの形状エコーが含まれるため、進行方向や到達時間だけから、き裂エコーを識別することは困難である.

3. 時間反転場の集束挙動

線形弾性波の支配方程式は時間反転操作に関して普遍である. そのため、観測で得られた試験体表面の振動波形を境界値として初期値-境界値問題を時間に関して逆方向に解くことで、媒体内部の散乱波伝播挙動を調べることができ. き裂からの散乱波が観測波形に含まれる場合、時間反転波形で励起された波動場 (時間反転場) の一部は、散乱波の発生源であるき裂に向かって集束すると期待される. その様子を観察できれば、き裂位置や向き等の推定につながる有用な情報を観測波形から抽出できる. ただし、観測波形は試験体表面の一部でしか得られず、時間反転問題における初期条件も正確には知りえない. さらに、観測ノイズも存在することから、時間反転場の再構成は完全ではありえない. 従って、再構成された時間反転場において、散乱源に集束する波動場が必ずしも得られるとは限らない.

時間反転場の計算には2次元 FDTD 法を用いた. その際、Fig.3 に示した速度波形 $v(x, t)$ を、 $\tau = T - t$ によって時間反転し、 τ を新たな時間変数とした $v(x, T - \tau)$ を境界値に用いた. ただし、 $T = 45\mu\text{s}$ で、 $\tau = 0$ における試験体内部の場は未知であるため、時間反転場解析における初期速度と初期応力場はともゼロと仮定した. 媒体は非減衰、等方均質な線形弾性体とし、縦波および横波の位相速度を、それぞれ実測値から 6.35km/s と 3.15km/s とした. FDTD 法による離散化は、これらの位相速度に対し安定条件を満足するよう、空間格子間隔を 0.05mm 、時間ステップ間隔を $0.0125\mu\text{s}$ とした.

Fig.4 は以上の方法で得られた時間反転場の $\tau = 18.54\mu\text{s}$ におけるスナップショットである. (a)がき裂を含む供試体に対する結果を、(b)がき裂の無い供試体に対する結果で、粒子速度の大きさをカラーマップで表示している. ただし、粒子速度の値は、適度なコントラストで波動場が可視化されるようにスケールした相対値である. これらの結果から明らかなように、き裂のある供試体ではき裂面に向けて、き裂の無い供試体ではルートギャップの角部に向けて集束する散乱波が明瞭に現れている. これらの散乱波成分の位置を、時間を追って調べると、概ね Fig.4 に白の破線で示した経路をたどる. (a)のケースでは、フランジ底面で2回の

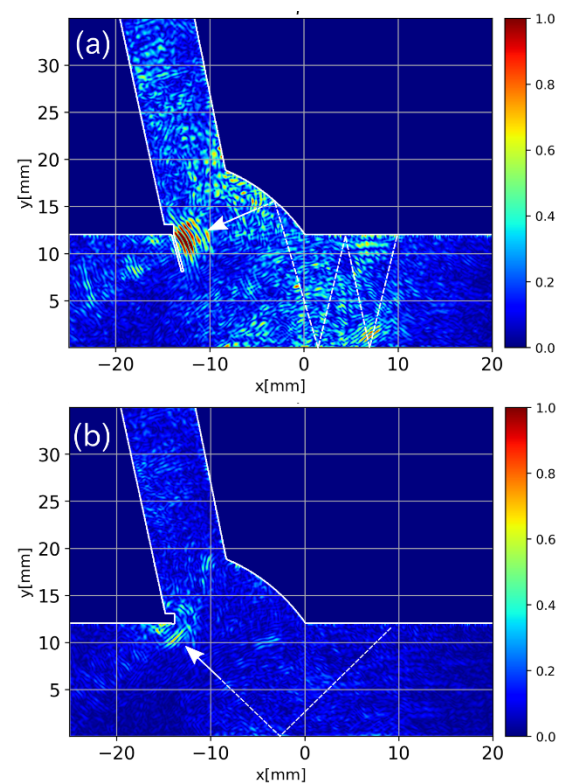


Fig.4 Snapshot of the time-reversed focusing field. Results for the specimen (a) with and (b) without the simulated crack.

反射後、余盛り表面を経由した波がき裂面に集束しており (b)と経路が大きく異なる. このことは、観測波形を適切に処理すれば、反響環境下でもき裂検出と位置推定が可能であることを示唆する. ただし、従来のイメージング法では散乱波の経路を予め把握しておく必要があり、多数の経路が想定される今回のような条件では適用が困難である. 一方、時間反転法では、散乱源に集束する波動場を得るにあたり、伝播経路や伝播モードに関する仮定や事前情報を必要とせず、その点に大きなメリットがある. Fig.4 はこのことを例示する良好な結果と言える.

4. まとめ

実験で計測した超音波波形を用いて時間反転解析を行うことで、散乱源であるき裂に集束する波動場が再構成できることを示した. 特に、多重反射波の発生によって散乱波の分離や経路特定が困難となる反響環境下でき裂に集束する波動場を再構成することに成功した点において、非破壊検査の観点から意義を持つ. 今後は、時間反転場を使ったき裂のイメージング法を開発し、超音波探傷試験に応用することが課題となる.

参考文献

- 1) K. Kimoto, K. Nakahata, and T. Saitoh: An elastodynamic computational time-reversal method for shape reconstruction of traction-free scatterers, Wave Motion, Vol.72, pp.23-40, 2017.

謝辞

本研究の一部は、一般社団法人中国建設弘済会、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.