

ガイド波を使った表面き裂の画像化に関する数値解析的研究

岡山大学 環境学研究科 学生会員 ○仁科 直也
岡山大学 環境学研究科 正会員 木本 和志

1. はじめに

ガイド波は、長距離を少ない減衰量で伝播させることができるという非破壊検査上の利点を持つ一方、分散性のある複数のモードが混在するために複雑な伝播形態とり波形解釈が難しいことが問題となる。そのため、観測波形を処理してきず画像を合成し、分かり易く表示する技術があれば大変有用である。本研究は、そのための基礎技術として、時間反転収束のアイデアに基づく、ガイド波を使った表面き裂の画像化手法の提案を行うものである。具体的には、数値シミュレーションにより作成したガイド波の波形データを、時間反転法によって画像化することでき裂位置を同定する方法を示す。なお、簡単のためここでは2次元問題を考え、弾性波のモードとしては面外波(スカラー波)を対象とした議論を行う。

2. 問題設定

図1に、本研究で考えるガイド波を使った探傷試験のイメージを示す。検査対象の薄板は、均質かつ等方な線形弾性体とし、きずとして、大きさ、形状、位置が未知の鉛直な表面き裂が含まれるものとする。弾性波の送信は板表面に設置された超音波トランスデューサ(探触子)によって行われ、送受する波動は紙面奥行方向に振動する面外波(SH波)であるものとする。なお、送受信点はいずれも板の上面で、欠陥に対して左側に限定され、計測量としては、波動場の速度振幅が時間と計測点位置の関数として得られるものとする。ただし、板の長さは、波長や板厚に比べて大きく、ガイド波を発生させるために十分な長さをもつものとする。ここでは、以上のような状況設定において、観測された板表面の速度応答波形からき裂位置を同定する問題を考える。

3. 数値シミュレーション

ここでは逆解析のため2次元数値シミュレーションにより作成した波形を用いる。数値シミュレーションには有限差分法により、図2に示したモデルを用いて行った。入射波の励起は、板表面に加えられた面外方向表面力によるものとし、その分布幅は図に示したように6mmとし、時間変化は周期 $2\mu\text{sec}$ の余弦波一波によって与えている。横波実体波の伝播速度 c_T は $c_T = 3,000\text{m/sec}$ としているためこのことは波長が約6mmで、板厚5mmと同程度となっていることを意味する。なお、入射波を励起すべく設定された表面力が作用する部分を除き、境界部ではき裂面を含め表面力ゼロの自由境界として扱う。また、初期条件は変位、速度とも全領域でゼロとした。なお、無限板に

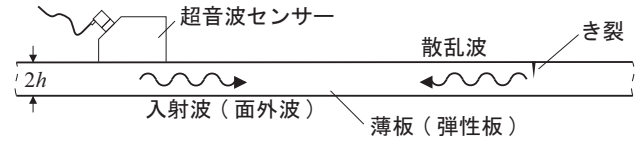


図-1 ガイド波を使った表面き裂探傷のイメージ。

おける波動場を計算するために、計算領域の左右端部にはPML(perfectly matched layer)領域を設けているが、モデル寸法等を示した図2には、図が煩雑になることを避けるためにその大きさ等は示していない。

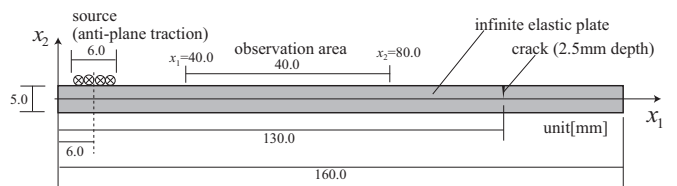


図-2 数値シミュレーションモデル。

以上の条件で行った数値シミュレーションの結果を図??および図4に示す。前者の図は、板内部の速度場の絶対値を示したスナップショットであり、時間の経過と入射波の伝播に伴いガイド波が形成される様子が上の二つのスナップショットに、き裂で発生した散乱波が入射点側に戻っていく様子が下の二つに現れている様子がわかる。なお、この図では白の実線でき裂位置を示している。一方、図4は板上側表面の $x_1 = 40 \sim 80\text{mm}$ における観測波形の時間変化を示したものであり、横軸が時間、縦軸が観測点座標を表している。このような図は、超音波探傷試験の用語ではBスキャン、地震学でいえば走時曲線に相当する。この図より、板上下面での多重反射により、パルス的な波を入射した場合にも長時間の応答が続く結果になり、波形データを直接解釈することで、き裂がき裂位置を判定することは困難であることがわかる。

4. 画像化手法

波形データの可視化には、時間反転収束(time reversal focusing)の方法を用いた。この方法は、入射波変位



図-3 板内部に発生する速度場のスナップショット。

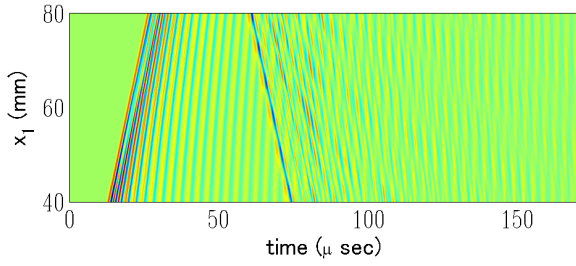


図-4 板の上表面 $40 \leq x_1 \leq 80\text{mm}$ の範囲で観測される速度波形.

$u^{in}(\mathbf{x}, t)$ と散乱波変位 $u^{sc}(\mathbf{x}, t)$ の空間的な相関をとって、全観測時間でスタックする方法である. そのような計算は、周波数領域では次のような式によって行うことができる.

$$I(\mathbf{x}) = \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{u}^{in}(\mathbf{x}, \omega) (\bar{u}^{sc}(\mathbf{x}, \omega))^* d\omega \quad (1)$$

ここに、 $I(\mathbf{x})$ は位置 $\mathbf{x}$ の画素における画像の輝度を、 $(\cdot)$ は時間に関するフーリエ変換を、 ω は角周波数を、 $(\cdot)^*$ は複素共役を意味する. なお、観測データを使い、式 (1) の計算を行う際には二つの問題がある. 一つには、観測波形は入射波と散乱波が混在した形でしか得られないため、両者をいかに分離するかという点が問題となる. また、観測データが通常、板の表面でしか得られず、内部の場を直接計測することができないことも問題である. これらの点に関して本研究では、板内部の変位場が次のようにガイド波の重ね合わせによって表現されることに着目し、観測波形を進行方向別のモードに分解することで対処した.

$$u(\mathbf{x}, t) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{\alpha=+,-} A_n^{\alpha}(\omega) f_n(x_2) \exp(ik_n(\omega)x_1 - i\omega t) \quad (2)$$

ここに、 n はモード次数を、 $f_n(x_2)$ は n 次モードの正規化された振幅の鉛直方向分布を、 k_n は波数を $+$, $-$ は進行方向を意味し、各モードの周波数スペクトル $A_n^{\pm}(\omega)$ 以外は、面外波の場合波数-周波数の関係を含め全て理論的に決定できるものである. 以上を踏まえれば、観測された板表面の応答波形を波数-周波数領域へフーリエ変換して $A_n^{\pm}(\omega)$ を決定し、理論的に与えられる振幅分布 $f_n(x_2)$ を用いて外挿することで板内部の変位場が得られることがわかる. その結果から、右方向進行波が入射波に、左方向進行波が散乱波に相当するものとして式 (1) に用いることで像 $I(\mathbf{x})$ の計算を行った.

5. 画像化結果

以上の方法で、シミュレーション波形から計算を行った画像データ $I(\mathbf{x})$ を図5に示す. この図は $90 \leq x \leq 170\text{mm}$ の範囲で計算した $I(\mathbf{x})$ を示したもので、赤の部分が必要な画素値をもつ領域、白の実線はシミュレーションモデルに設定したき裂位置を示している. 図に示したように、き裂は板の上面および下面にあるそれぞれの場合について画像化

結果を示しており、共にき裂長さは板厚の半分 ($h=2.5\text{mm}$) としている. これらの結果を見ると、いずれのケースもき裂近傍で大きな画素値を持つ領域が見られ、水平方向位置だけでなく、き裂が上下どちらの側に存在するかについても精度よく同定されていることが分かる. なお、ここに示した結果は、一見互いに上下反転させただけのように見えるが、シミュレーション条件はき裂位置以外は送受信位置も含めて同一である. そのため、き裂が上面にある場合は板の同じ側から、き裂が下面側にある場合にはき裂に対して板の逆面から探傷を行っていることになる. 従って、画像化結果がほぼ上下対象となることは、送受信パターンの対称性に起因する自明な帰結ではなく、ガイド波が形成された結果、板上下のどちら側の面からでも同じように波動場の情報を得ることができる状態が発生しているという重要な結果を示唆していると考えられる. なお、式 (2) に含まれる無限和は、送信波の周波数帯域に含まれる伝播モードのみが含まれる次数で打ち切って評価を行っており、具体的には $n=0 \sim 2$ 次までの3つのモードを考慮している. ただし、より高次のモードまで含まれることを想定して計算を行うことは可能で、想定したモードが含まれない場合には画像化結果は何の変化もなく、像合成のための計算時間が考慮したモード数に応じて増加するだけの影響を与える. このことは、実際には観測されないモードの存在を仮定して画像化を行っても、結果に悪影響が及ばないことを意味し、実際の検査では散乱波を構成するガイド波モードの組成が事前には分からないことを踏まえれば、本手法の実用上の利点であると言える.

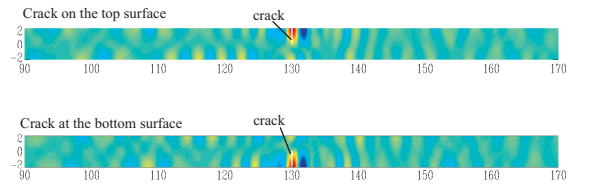


図-5 鉛直表面き裂の画像化結果 (上が、板上面、下が板下面のき裂. 白の実線はき裂位置を示す).

6. まとめ

本研究では、シミュレーション波形を用いて、ガイド波によるき裂の画像化方法について検討を行った. その結果、ここで用いた時間反転収束の方法によれば、表面での計測結果から、き裂位置と大まかな深さに関する情報が得られる可能性があることがわかった. 今後は、送受信条件の最適化について検討するとともに、面内波を使った探傷およびき裂の画像化に本手法を応用することが課題となると考えられる.