

板波法の定量化に関する一考察

岡山大学工学部 正員 ○廣瀬壮一
 石川島播磨重工業 上田和哉
 住友金属工業 山野正樹

1. まえがき

板波は縦波や横波の実体波と異なり、さまざまな伝播モードを持つ表面波の一種であり、位相速度が周波数によって変化する(分散性)などの特異な性質を持っている。そのような板波を用いた超音波板波探傷は薄鋼の圧延工程に導入され、品質管理の一方法として鉄鋼各社で利用されているが、板波法の最適な探傷条件(用いるべき伝播モードや周波数)や欠陥検出精度などについては必ずしも理論的に明らかになっていないのが現状である。本研究は、このような超音波板波探傷の定量化のための板波の散乱解析を行い、今後の問題点を整理するものである。

2. 板波法とは

板波法の模式図を図1に示す。可変角変換子から送信された波は、結合媒体(水など)を経て薄板に入射され、板波として伝播する。板内に欠陥があると入射板波のエネルギーの一部が反射され、反射板波として送信変換子と同じ変換子で受信される。図2に受信パルス波形の一例を示す。この例では欠陥からの反射エコーと共に板端部からの反射エコーが検出されている。板波にはさまざまな伝播モードがあるが、どの板波モードが励起されるかは変換子の角度 θ と送信周波数 f によって決まる。また、板波の伝播モードや送信周波数と欠陥の深さ、長さ、種別などの欠陥パラメータの組み合わせによって板波探傷における受信感度(欠陥からの反射エコーの振幅)が変化することが実験的に明らかになっている。そこで、入力板波や欠陥の持つパラメータと板波法の受信感度の関係を理論的に明らかにし、用いる板波モードや送信周波数などに関して最適な探傷条件を確立する必要がある。以下においてはそのような板波法の定量化のための第1ステップとしての板波の散乱解析を述べる。

3. 板波の散乱解析

本来、板波法の定量化には図1に示すような変換子-結合媒体-鋼板-欠陥の複雑な波動伝播系を考慮しなければならないが、ここでは、入射板波が既知であるとして板波と欠陥の相互作用による散乱現象に着目した波動解析を行う。入射波は角周波数 ω を持つ時間調和な板波とし、欠陥の形状は紙面奥行き方向には一様であるとして2次元定常面内波動問題を解析する。用いた解法は境界要素法である。例えば、欠陥が空洞であるとすると、欠陥の境界 S および鋼板の上下面 B では表面力が0であるから次の境界積分方程式を得る。

$$\frac{1}{2}u(x) + \int_{S+B} T(\partial_y)^n U(x, y) u(y) ds_y = \frac{1}{2}u^{in}(x) + \int_{S+B} T(\partial_y)^n U(x, y) u^{in}(y) ds_y, \quad x \in S+B \quad (1)$$

ここに U は2次元定常面内動弾性問題の基本解、 $T(\partial_y)^n$ は表面力作用素、 u は全変位場を表す。また、 u^{in} は入射板波の変位場を表し、次式で与えられる。

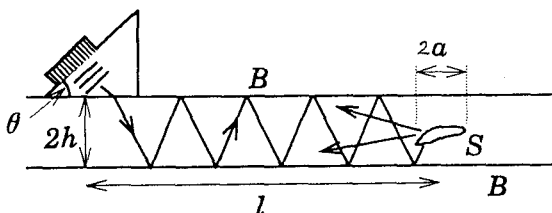


図1 板波探傷法の模式図

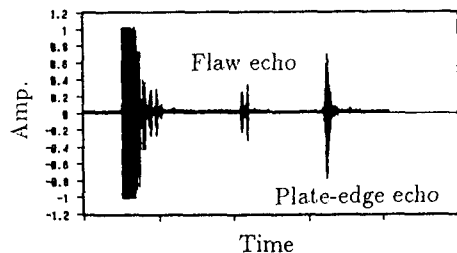


図2 受信パルス波形の一例

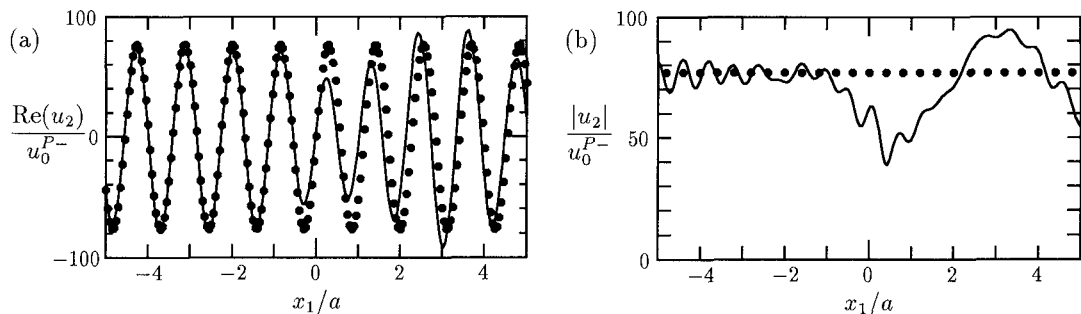


図3 板上面における垂直変位。(a)実数部,(b)絶対値。

$$\begin{Bmatrix} u_1^{in} \\ u_2^{in} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1^{P+} \cos \nu_P x_2 & d_1^{S+} \cos \nu_S x_2 \\ id_2^{P+} \sin \nu_P x_2 & id_2^{S+} \sin \nu_S x_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_0^{P+} \\ u_0^{S+} \end{Bmatrix} e^{ikx_1} + \begin{bmatrix} id_1^{P+} \sin \nu_P x_2 & id_1^{S+} \sin \nu_S x_2 \\ d_2^{P+} \cos \nu_P x_2 & d_2^{S+} \cos \nu_S x_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_0^{P-} \\ u_0^{S-} \end{Bmatrix} e^{ikx_1} \quad (2)$$

ただし、 $\nu_\alpha = \sqrt{k_\alpha^2 - k^2}$, $d^{P\pm} = (k/k_P, \pm \nu_P/k_P)$, $d^{S\pm} = (\mp \nu_S/k_S, k/k_S)$, k_P, k_S は縦波と横波の波数である。式(2)の右辺第1項は対称モードを表し、第2項は反対称モードを表すが、それぞれのモードに応じて波数 k は板波の特性方程式である Rayleigh-Lamb 周波数方程式を満足する。すなわち、波数 k は k_P, k_S (すなわち周波数)に依存し、分散性を示す。

式(1)を離散化すると全変位 u を未知数とする連立一次方程式を構成することができ、近距離波動場である S 上の全変位および板表面 B での全変位が求められる。解析結果の一例を図3に示す。図3の実線は反対称基本モードの板波が、左側より入射したときの板上面における全波動場の垂直変位振幅の(a)実数部と(b)絶対値をプロットしたものである。クラックは長さ $2a = 2.3\text{mm}$ で板厚中央に水平に位置する。比較のため、クラックが存在しない場合の入射波動場の垂直変位振幅を●でプロットした。用いたパラメータは次の通りである。板厚 $2h = 2.3\text{mm}$, 縦波速度 $c_P = 5900\text{m/sec}$, 横波速度 $c_S = 3200\text{m/sec}$, 周波数 $f = 2.25\text{MHz}$ 。クラックの右側に散乱の影響が大きく現れているのがわかる。また、図3(b)からわかるようにクラックの左側には欠陥からの反射板波の影響が見れる。板波法の定量化にはこの反射板波を詳細に検討する必要がある。

4. 今後の課題

前節では、板波の波動散乱解析の一例を示した。本研究の最終的な目的は、最適な板波の伝播モードや周波数を明らかにして板波法の欠陥検出能の向上を図ること、また、欠陥検出精度の理論的な裏付けを行うことである。そのためには以下のような多くの課題が残されている。a) 遠方場の評価 — 一般に鋼板の板厚 $2h$ 並びに欠陥の大きさ a は数 mm のオーダーであるのに対して、変換子と欠陥の距離 l は数十 cm のオーダーである。したがって実験値との対応をとるためには遠方場の評価を行う必要がある。具体的には遠方場の積分表現を導き¹⁾、前節で求められた欠陥境界上の変位を代入して遠方場を求める。b) 入射波動の検討 — 本報告では入射板波は既知であるとして解析を進めたが、実際の板波法では変換子-結合媒体の影響を考慮して入射波動場を決定しなければならない。変換子の特性の解明、結合媒体(水など)と弾性板の相互作用を考慮した波動伝播問題の解析などが必要である。c) 伝播特性の影響 — 散乱波の波形は板波の分散性ならびに減衰など波動伝播特性の影響を受ける。周波数域における定常解析ではこれらの波動伝播特性の影響を比較的容易に考慮できるが、実験での欠陥エコーを再現するためにいかにそれらの定常解を重ね合わせるか検討が必要である。d) データの集積 — 板波法においては入射板波の伝播モード、周波数、欠陥の深さ、長さ、種別など多くのパラメータがあり、これらを変化させてデータを蓄積する必要がある。また、それらのデータの評価にはニューラルネットワークなどのAI技術の応用も考えられる。

参考文献

- 1) 廣瀬壮一, 上田和哉, 板波法の定量化のための波動解析, 第45回平成6年度土木学会中四支部研究発表会講演概要集, 1994.