

境界要素法と波線理論の結合解法による SH 超音波探傷試験の数値シミュレーション

東京工業大学 学生会員 木本 和志
東京工業大学 正会員 廣瀬 壮一

はじめに

境界要素法は動弾性問題一般に広く応用されている解析手法の一つであるが、有限要素法や波線理論と異なり超音波探傷試験のシミュレーションコードの作成に用いられる動きは今のところ見られない。これは、超音波の送受信点までを含めた領域全てを境界要素法により解析しようとする、非常に大規模な計算が必要となり計算機の記憶容量や計算時間の制限から解ける問題が限られてしまうためである。しかしながら、境界要素法には任意形状問題や周波数域での解析が可能であるなど超音波探傷試験のシミュレーション手法として魅力的である点も少なくない。そこで、本研究では境界要素法により精度のよい散乱解析を行いながらも、同時に広い領域をカバーする効率的な波動解析手法として境界要素法と波線理論の結合解法の開発を行う。二つの手法の組み合わせ方は波動のモードによらないが[1]、ここでは最も伝播挙動が素直な 2 次元 SH 波に同手法を適用した解析を行った。以下には解析手法の概略と数値計算例を示す。

解析手法

図 2 のような 2 次元無限板における SH 波の散乱問題を考える。上下自由表面の一部は曲率を持つものとし、空洞や介在物などの欠陥は上下いずれかの自由表面近傍にあるものとする。このとき、板厚が入射波の波長に比べてある程度大きくなれば、板上下面間での多重散乱効果は非常に小さくなると考えられる。そこで、板上下面を一度に要素分割して境界要素法を用いるのではなく、以下に述べるように半無限領域における散乱場を境界要素法によって繰り返し求め、それらを重ね合わせるにより多重反射、散乱の影響を評価する方法を考える。

まず、源点 x からの入射波のうち最初に板上面で散乱される $u_{(1)}^{in}$ に着目する。 $u_{(1)}^{in}$ は上側自由表面と散乱体 S^+ によって散乱される $u_{(1)}^{sc}, t_{(1)}^{sc}$ が発生する(図 1(a))。この段階では上側自由表面と S^+ の相

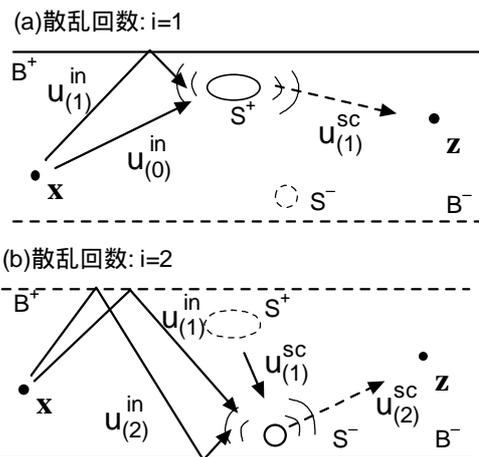


図 1: 板上下面で繰り返される多重散乱

$$\frac{1}{2}u_{(1)}^{sc}(y) = \int_{S^+ + B^+} \{U(x, y)t_{(1)}^{sc}(x) - T(x, y)u_{(1)}^{sc}(x)\}dS_x \quad (1)$$

相互作用だけを考慮するなら、 $u_{(1)}^{sc}, t_{(1)}^{sc}$ は半無限領域の積分方程式(1)を解くことで求められる。

ここに、 $U(x, y), T(x, y)$ はヘルムホルツ方程式の変位および表面力の基本解である。しかしながら、ここで求まる $u_{(1)}^{sc}, t_{(1)}^{sc}$ は板下面側での境界条件を満たさない。これは物理的にはこれらの波動の板下面における反射、散乱は考慮されていないことを意味する。そこで、初めに求めた $u_{(1)}^{sc}, t_{(1)}^{sc}$ を今度は板下面への入射波と考えて S^- による散乱波動場 $u_{(2)}^{sc}, t_{(2)}^{sc}$ をやはり半無限領域の積分方程式(2)を解くことによって求める。(図 2(b))

さらに、 $u_{(i)}^{sc}, t_{(i)}^{sc}$ ($i=2, 3 \dots n$)を入射波として $u_{(i+1)}^{sc}, t_{(i+1)}^{sc}$ を求めるという作業を繰り返せば、板上下面間の多重散

$$\frac{1}{2}u_{(2)}^{sc}(y) = \int_{S^- + B^-} \{U(x, y)t_{(2)}^{sc}(x) - T(x, y)u_{(2)}^{sc}(x)\}dS_x \quad (2)$$

乱を興味の対象となる回数まで評価することができる。初めに板下面で散乱される入射波に対しても全く同様に散乱波動場を順次計算すれば、それらも加え合わせるものがここでの解となる。このようにして得られた解は n 回までの散乱を考慮したならば、 $n+1$ 回目の散乱波が観測点に到達するまでは有効となる。ところで、積分方程式

(1),(2)はともに散乱波を未知数として構成されている。そのため、欠陥が存在しない状態での波動場は事前に求めておく必要があり、その際には波線理論による解析を行う。散乱波は欠陥周辺に分布する弱い波動であるため、このように未知数をとることで自由表面の数値計算上の打ち切りに対して安定した解を少ない要素数で得ることができる[2]。

解析例

45 度の斜角探触子によるパルスエコー法を解析例として示す。ここでは溶接部の探傷試験を想定して、図 2 に示すような板上下面に余盛りのある解析モデルを考えた。これらの余盛り部分の形状はともに円弧で近似し、

ビード内部の欠陥として止端部近傍に円筒空洞を設けている。入射波は 45 度の斜角探触子からの波動場を表現するように、フェーズドアレイ方式により 45 度方向に最大振幅が得られるような位相差をつけた面外方向表面力を仮定した。また、入射中心点は最大エコーが得られると予想される、ビーム中心線が円筒空洞の中心を通る $(x,y)=(-28.5a,12.5a)$ とした。

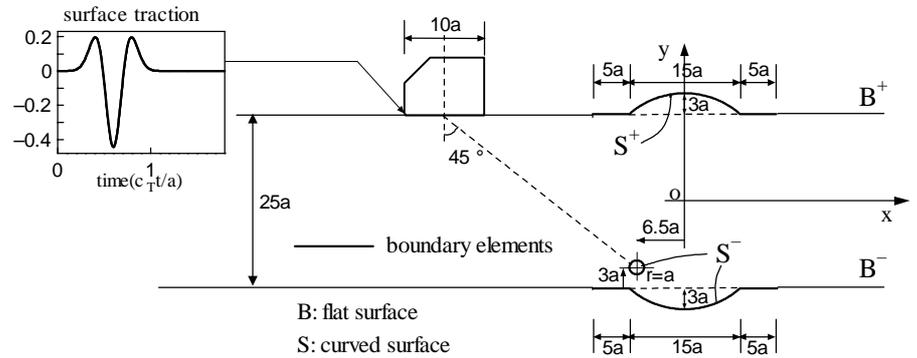


図 2: 解析モデル (突合せ溶接継ぎ手および 45 度斜角探触子)

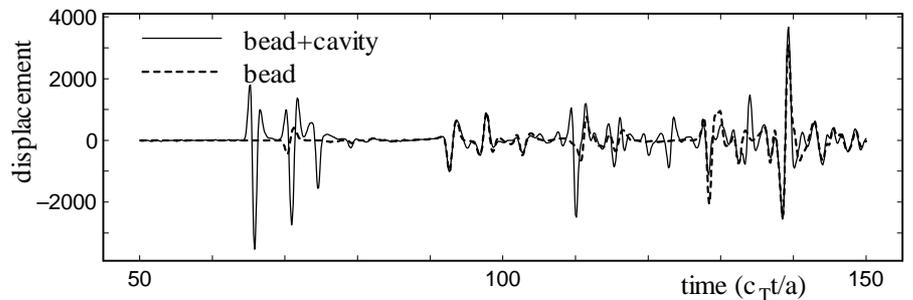


図 3: 解析結果 (入射中心点でえられた変位の時間変化)

パルスエコー法では同一の探触子で送受信を行うため、入射中心点で得られる変位を求め解析結果として図 3 に示した。余盛り形状の影響と欠陥エコーを区別するために、図には余盛り形状はそのまま空洞を含まないモデルで行った解析結果もあわせて示した。最初に観測される時刻 70 付近の波群は直接あるいは、板下面で一度反射されて欠陥に入射した波が、やはり直接あるいは一度だけ板下面を経由して入射点に戻ってくるものである。ここでは、計 5 回までの反射を考慮した解析を行ったが、時刻 90 以後に現れる波形は非常に複雑で、欠陥からのものと判別しうるエコーは時刻 110 近辺のものくらいである。時刻 140 周辺にも大きなエコーが現れているが、空洞のないモデルでもほとんど同じエコーが見られるため、これはビード内部を多重反射した波であることがわかる。

まとめ

SH 波による超音波探傷試験の数値シミュレーションを境界要素法と波線理論の結合解法によって行った。ここで示した結合解法は、解析例に示した程度の問題であれば標準的なワークステーションを用いて 2 時間半程度の計算時間で解析を行うことができ、実験結果の検討や欠陥寸法などを変えたパラメトリックな解析にもある程度対応できると考えられる。今後は、簡単なモデル実験を行いこのようなシミュレーションの実際の探傷データへの適用性を検討していく予定である。

参考文献

[1] S. Hirose, Reflection and Scattering of a Cylindrical Wave in a Half Space, in: Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, vol. 18A, pp.87-93, 1999
 [2] K. Kimoto, S. Hirose, Reflection and Scattering Analysis of SH-wave Using a Combined Method of BEM and Ray Theory, in: Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, vol.19, 2000