

非破壊検査向け超音波伝搬シミュレーション技術

Ultrasonic Simulation Technology for Nondestructive Testing

西野 友子

■ NISHINO Tomoko

構造物や接合物などの探傷に広く使われている超音波を用いた検査・計測手法は、被試験体内部の検査・計測対象部位からの反射波と他の部位からの反射波の判別が難しく、使用に際しては熟練を要するという問題があった。

東芝は、この問題を解決するために、超音波伝搬シミュレーション技術を開発し、超音波伝搬の挙動を可視化し、データ分析に役だてる仕組みを構築した。構造物中の欠陥検査やレーザ溶接での溶着面積の計測に適用し、シミュレーションによる可視化の有効性を確認した。

Inspection and measurement methods using ultrasonic waves including ultrasonic testing are widely used for the nondestructive testing of structures and metal welds. Due to the difficulty of discriminating whether the echoes are reflected from the target or other portions of a test object, however, experienced engineers are required in order to satisfactorily utilize these methods.

To solve this issue, Toshiba has developed an ultrasonic simulation technology that makes it possible to visualize the propagation behavior of ultrasonic waves, and constructed a mechanism for improved analysis of the resultant data. We have applied this technology to defect inspection in structures and the measurement of laser-welded joints, and confirmed the effectiveness of visualization by means of such simulation.

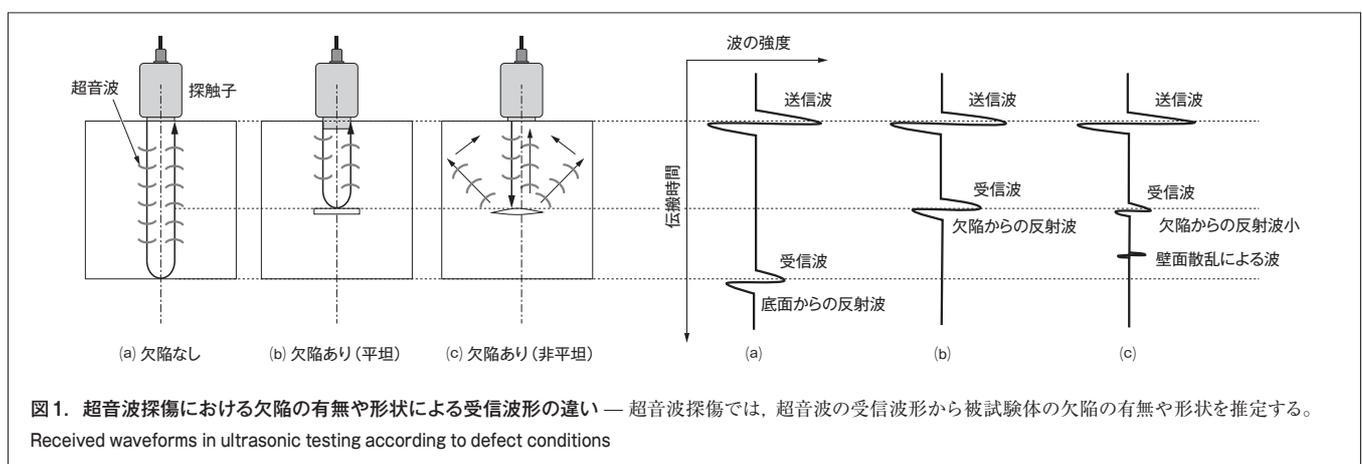
1 まえがき

超音波を用いた検査・計測技術は、構造物や接合物などの亀裂探傷、厚さ計測や、腹部疾患の診断など、被試験体の内部構造を非破壊で測定する手法として幅広く利用されている。超音波検査の普及に伴って、被試験体が多様化し、内部構造が複雑になってきている。一方で、超音波検査は測定データの分析が難しく、対象部位からの反射波か、他の部位からの反射波かの判別がつかず、検査者の熟練度によってデータの解釈が異なってしまう場合がある。

東芝は、これを解決するため、被試験体内部における超音波の挙動を可視化するシミュレーション手法を開発し、構造物の

欠陥検査や金属溶接部での溶着面積の計測に適用している。

超音波検査は、超音波の送受信を行う探触子と呼ばれるプローブを用い、圧電素子などの音源から超音波を送信して、物質内部からの反射波を受信することで欠陥の情報を得る手法である。超音波の伝搬のしやすさは材料によって異なり、組織や結晶粒などによる散乱及び内部摩擦のために所定の方向に進む超音波が減衰する。また、超音波は異なる物質の境界前後の音響インピーダンスと呼ばれる物性値の差が大きいほど反射率が高くなる。物質が気体の場合には、固体や液体に比べて音響インピーダンスが桁違いに小さく、物質の境界に空気層があると、ほとんどの超音波が反射する。そのため、超音波探傷は物質内部のボイドや亀裂の検出に適用されるこ



とが多い。

探触子を被試験体に接触させて探傷する例を図1に示す。図1(a)のように欠陥がない場合は被試験体の底面から、また図1(b)のように平坦(へいたん)な欠陥がある場合は欠陥部から、それぞれ反射波が戻ってくる。したがって、超音波を送信してから反射波を受信するまでの時間により、欠陥の有無と欠陥の深さ位置を推定できる。ただし、図1(c)のように平坦でない欠陥では、その形状によって反射波の伝搬方向が変わるため、検出が困難になる。平坦でない欠陥以外にも、被試験体の構造が単純でない場合や、内部に複数の欠陥がある場合には、超音波は複雑な伝搬経路をたどることになる。

そこで、被試験体内部における超音波伝搬の挙動を可視化できれば、複雑な構造に対しても伝搬経路や反射強度を予測でき、検査や計測におけるデータ分析に役だてられる。

ここでは、超音波を含む音響解析手法の概要と適用事例について述べる。

2 音響解析手法

音響問題を解く支配方程式は、一般に連続の式とフックの法則がある。流体中では、流体が圧縮されて体積が変化し、この変化が徐々に伝搬していくことで波動を表現する。圧縮における圧力の変化は質量保存則から導かれる連続の式で表される。固体中では、フックの法則に従って作用する歪み(ひずみ)や応力が微小変位として伝搬していくことで、波動を表現している。

ここでは、音波の支配方程式を有限要素法により解いた超音波解析手法を用いている。この手法は、大規模計算や並列化処理に対応しており、汎用性が高い。また、短波長領域の解析ができ、パルス状の音波も扱えるので、近年、非接触非破壊検査技術として注目されているレーザ超音波探傷の解析にも適している。

3 超音波解析例

3.1 欠陥検査への適用例

構造物中に欠陥が存在する場合、構造物の表面から欠陥までの深さは、衝撃により表面で発生した超音波が欠陥で反射して再び表面を振動させるまでの時間に比例する(図2)。

欠陥を含む構造物の表面中央部における変位の時間変化と、構造物中の超音波伝搬の様子をシミュレーションした結果(図2の構造物の1/4相当)を図3に示す。

送信波の発生時刻から欠陥深さに依存した時間で、欠陥からの反射波が戻ってくる事が確認できる。また、壁面からの反射や欠陥端から球状に拡散する波の影響により、表面変位は単純に送信波と欠陥からの反射波によるものだけではない

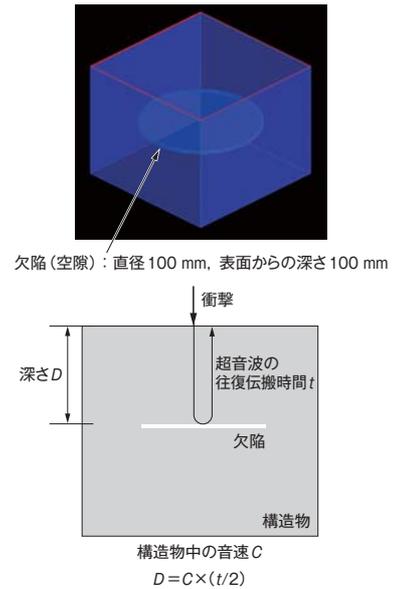
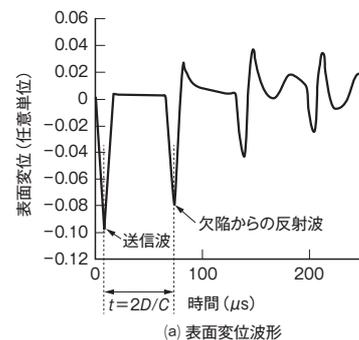
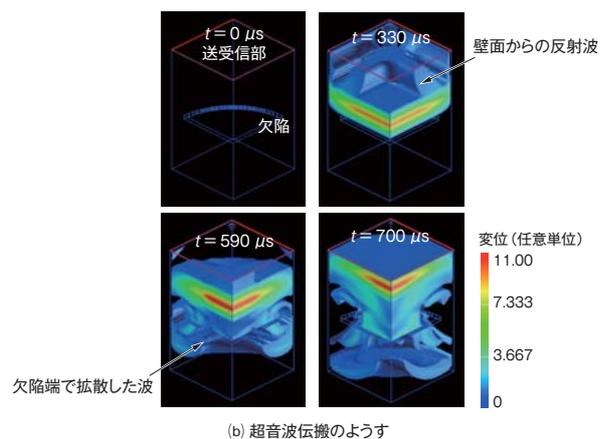


図2. 構造物の形状と超音波伝搬のようす — 構造物中の欠陥を超音波探傷する場合、欠陥の深さは超音波の伝搬時間に依存する。
Structure with defect and schematic diagram of ultrasonic propagation



(a) 表面変位波形



(b) 超音波伝搬のようす

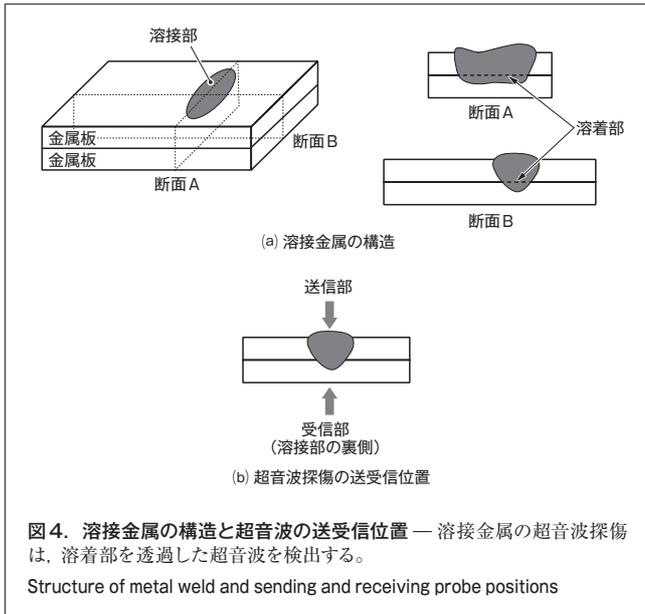
図3. 欠陥がある場合の表面変位波形と構造物中の超音波伝搬のようす — シミュレーションにより、欠陥からの反射波形状が明らかになるとともに、欠陥以外からの反射波の挙動もわかる。

Results of simulation of surface displacement waveform and ultrasonic propagation in defective structure

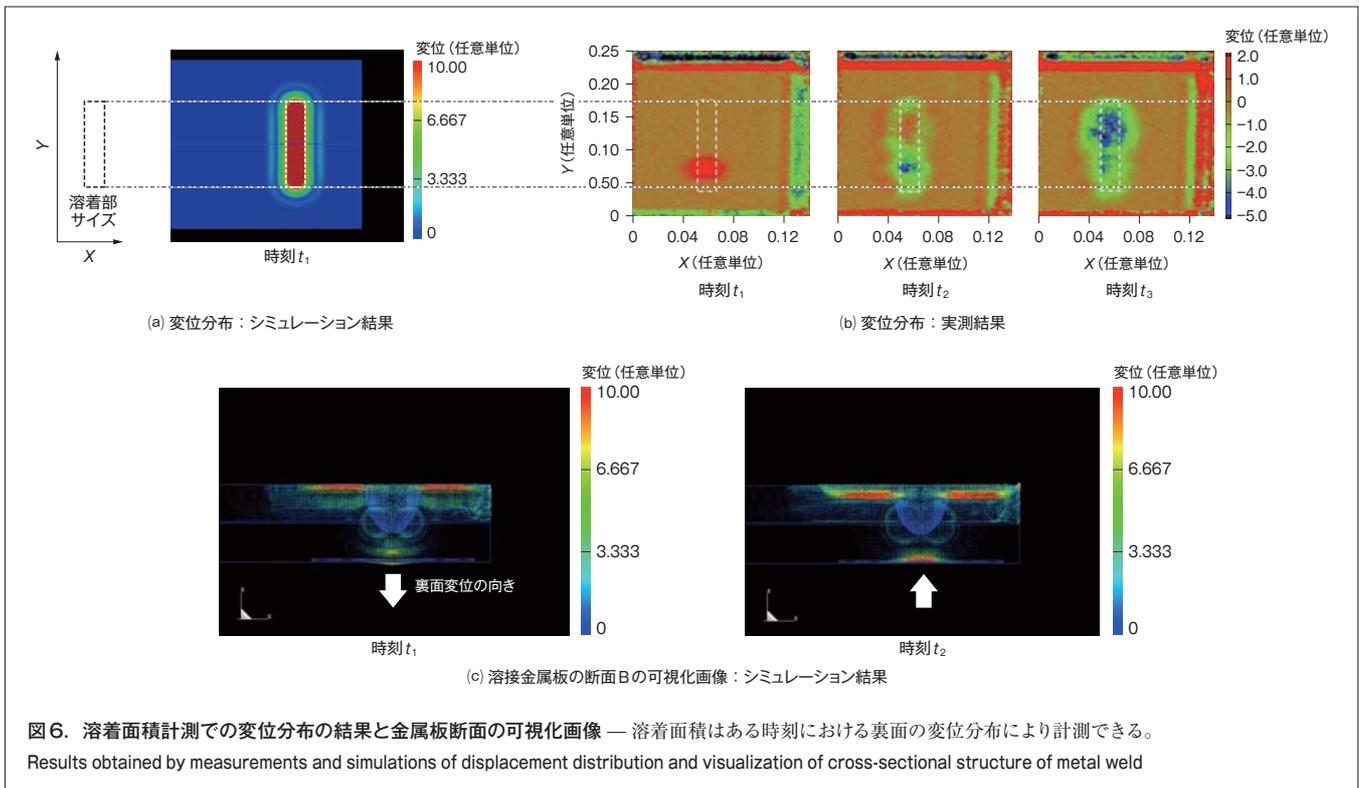
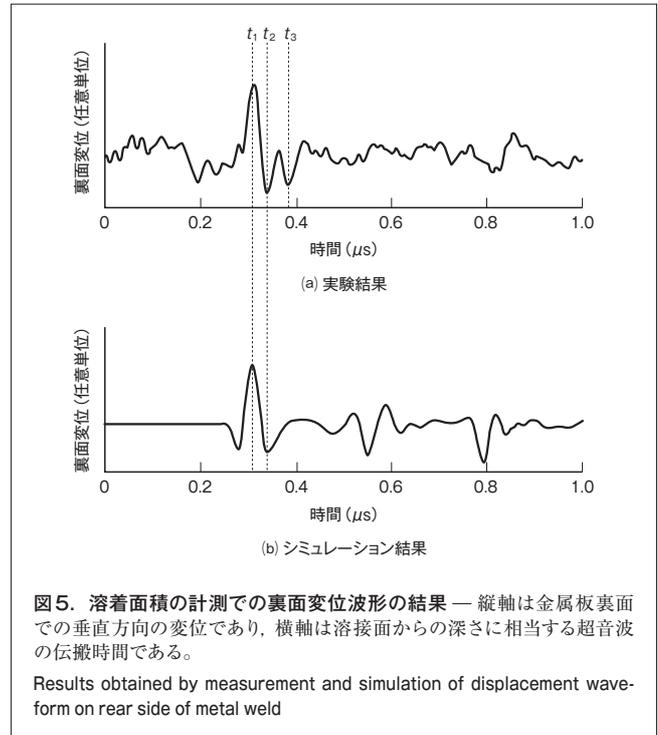
ことがわかる。

3.2 溶接金属での溶着面積の計測への適用例

レーザ溶接技術は様々な製品に用いられている。レーザ溶接では、規定値以上の溶着面積を確保することが重要である。溶着面積を非破壊で直接測定できれば、製品の信頼性の更なる向上につながるため、有効な計測手段が求められている。検査対象としている溶接金属は超音波が比較的伝搬しやすく、超音波を用いた検査に適している(図4)。



例えば、溶接された金属板では、溶接部の表面から発生した超音波は溶着部を透過し、未溶着部では金属板の間が空気層のためほとんどが反射する。そのため、透過した超音波によって発生する溶接部の裏側(以下、裏面と略記)の振動の大きさ、つまり裏面に垂直な方向の変位量を測定することで、溶



着面積を計測できる。

超音波探傷装置により実測した裏面変位の時間変化と、同条件で解析した結果を図5に示す。

超音波発生から最初の超音波が裏面に到達するまでの時間が、実測と解析でよく一致していることが確認できる。

最初に超音波が到達した時刻 t_1 における裏面の変位分布のシミュレーション結果及び実測結果を図6(a)及び(b)に示す。変位が大きい領域が溶着面積と一致しており、裏面の変位計測で溶着面積を見積もれる。

また、実測結果(図6(b))では、ある時刻 t_1 で変位が発生し(赤色の表示)、その後遅れて逆位相の変位が発生している(時刻 t_2 及び時刻 t_3 の青色の表示)。シミュレーションで断面Bを可視化した図6(c)では、裏面が垂直方向に振動していることが確認でき、実際の振動現象を再現できていると考えられる。

4 あとがき

超音波を含む音響解析手法の概要、及び構造物の欠陥検査や金属溶接部の溶着面積検査への適用事例について述べた。開発した超音波解析技術を用いると、被試験体内部の検査・計測対象と他の部位からの反射波の判別が難しい超音波検査において、内部を伝搬する超音波のふるまいを可視化することができる。

ここでは、適用例の一部を述べたが、超音波解析技術は、超音波顕微鏡での計測や可聴域の音波での検査・計測手法などへも幅広く利用できる。

また、この技術を製品設計段階で用いることにより、製造時の検査方法や検査のしやすさを考慮した製品設計を効率的に行うことができる。

今後は、超音波解析技術の更なる機能強化とともに、実用化に向けた取組みを進めていく。



西野 友子 NISHINO Tomoko

生産技術センター 光技術研究センター。
光学設計技術及び超音波シミュレーション技術の開発に従事。
Optical Technology Research Center