計測シリーズ

材料評価のための
超音波の測定

材料中の音速の測定*

戸 田 裕 己**

Measurement of Ultrasonic Velocity in Solids*

by Hiroki Toda**

キーワード：超音波，音速測定，シングアラウンド，パルス・エコーオーバーラップ，反射，散乱，放射特性，振動子

1. はじめに

超音波は大抵の固体，液体，気体などの物質内を伝わるので，広く工業分野で利用されている。特に，不透明な固体でも容易に透過し，あたかも物質内部を透かして見るかのように内部のようすがよく分かるので，超音波は物質内部の傷や介在物の有無を調べる非破壊検査の分野で重要な働きをしている。また，材料中の超音波の伝播挙動はその物質の密度や弾性率などの材料特性に左右されるため，超音波の伝播特性を調べるにより材料評価を行う研究が古くから行われている。なかでも音速は，超音波が伝播する材料固有の値であり，音速測定は材料特性を評価するための有効な方法の一つである。最近，電子技術の進歩に伴い高精度の音速測定が可能になり，音弾性応力測定の分野にも利用されている¹⁾。その他に，冷延圧延鋼板の超音波探傷試験において，圧延集合組織による音速の異方性のため，欠陥位置評定が悪くなることが問題になっており，正しい欠陥位置評定のためにも音速測定が必要になってきている²⁾。

百分の一程度の精度で音速を測定する場合には，通常の超音波厚さ計や超音波探傷器を用いることができる。(財)日本非破壊検査協会で作成された「超音波パルス反射法による固体音速の測定及び表示方法」(NDIS 2414-87)³⁾は音速測定に関する規格であり，板厚測定や異方性測定の実施時における指針を与えている。しかし，材料評価を目的とする場合は

さらに精度のよい方法が必要となる。高精度の音速測定に関する解説書は多くあり，例えば Papadakis はパルスエコーオーバーラップ法について，原理から校正法，適用例まで詳しく説明している⁴⁾。

本稿では材料評価を目的とした音速測定方法について，特に十万分の一程度の高精度で音速を測定する方法を紹介するとともに，その原理や基本的な超音波の伝播挙動について解説を加える。

2. 音速測定による材料評価の例

音速測定を利用した材料評価方法の例を表 1 に示す。

音速は，伝搬する材料の密度及び弾性係数によって定まるので，材料中の音速を測定することによって，材料の判別や機械的性質などの評価に用いられる。以前，金と比重がほぼ等しいタングステン（タングステン）を埋め込んだ偽の金塊が出回ったことがあり，これを見分けるために超音波を用いて音速測定が行われたことがある。(金の比重：19.3 g/cm³，タングステンの比重：19.1 g/cm³，金の中の縦波音速：3,240 m/s，タングステン中の縦波音速：5,460 m/s)

材料が劣化損傷を受けると密度や弾性係数などが変化し音速変化が生じる。これを利用して，水素脆化^{5,6)}やクリープ損傷^{7,8)}などの検出が検討されているが，縦波や横波などの音速変化から直接これらの劣化損傷を評価することは困難であるため，縦波と

表 1 音速測定を利用した材料評価方法

項 目	内 容
材料の特性の評価	種類の判別、弾性率の測定、硬さ、異方性など
材料劣化の評価	水素脆化、クリープ損傷、疲労損傷、中性子照射脆化など
応力測定	残留応力、ボルト軸力など
表面層の評価	高周波焼入れ、浸炭や窒化による表面硬化層の推定

*原稿受付 平成 5 年 6 月 7 日

** 大阪大学基礎工学部 Osaka University

横波の音速比の変化を利用する方法が検討されている。

応力測定には音弾性法が用いられる⁹⁾。これは、二軸状態にある弾性体において、材料の直交異方性の軸（一般に鋼材の圧延方向とそれに直角方向）と主応力方向が一致する場合に、主応力方向に偏向した2つのせん断波の音速差と主応力差が比例するという関係が成り立つ複屈折音弾性の原理を利用したものである。この方法を利用する場合には、特に高精度の音速測定が要求される。

表面硬化層など表面改質の評価には表面波が利用される。周波数の高い表面波はごく表面近傍を伝播しその速度は表面層の弾性的性質に依存するのに対して、周波数の低い超音波は比較的内部まで伝播し表面改質された材料でも母材によって音速が決まる。このため、表面波の音速は周波数に依存した分散性を示す。ここで、予想される表面構造による分散曲線（マスターカーブ）を予め作成しておき、測定した分散曲線との相関を調べることで表面層の評価を行うことができる¹⁰⁾。

3. 超音波の放射と反射特性

3.1 放射超音波の回析

無限に広がった均質で等方な弾性固体中を伝播する超音波は、体積波（バルク波）と呼ばれる縦波と横波の二種類があり、これらは互いに干渉することなく独立に伝播する。しかし、有限媒質の境界面では、縦波と横波がモード変換を通じて複雑に干渉し合うため、種々の合成波が発生する。固体の自由表面では、表面に沿って伝播する表面波（レーリー波）、表面SH波、クリーピング波などができる。また液体で覆われた固体表面では、漏洩表面波（リーキーレーリー波）と漏洩クリーピング波（リーキークリーピング波）ができる。さらに棒や板のような閉じられた固体空間では、境界で反射とモード変換を繰り返してできる棒波や板波などができる。

固体中を伝播する超音波でも、漏洩レーリー波や漏洩クリーピング波のように、超音波ゴニオや超音波顕微鏡を使って音速が直接測定できる波もあるが、他の体積波や表面波などでは、原理的な音速直接測定法がなく、超音波の伝播時間から間接的に音速を測定する方法が採られる。また、液体や気体では、送・受信子間の距離を任意に変えてそれに伴う伝播時間の変化を測ることができるのに対し、固体内の体積波測定では伝播距離を任意に変更できないので、多重反射波を利用して伝播距離を変える方法が採られる。

超音波の教科書には、超音波は細く絞られた平行ビームになり、あたかもカーテンの隙間から差し込む太陽光線のように広がらずに直進する絵がよく描かれている。これは波面が波長に比べて無限に広がった理想的な平面波の伝播を意味しており、寸法がせいぜい波長の10倍程度である音速測定用の送信子では、放射される超音波は決して平面波ではなく、伝播と共に広がり、波形が複雑に変化する。さらに、音速測定には時間的に長く続く連続波ではなく、波数が1～3波のパルス波か、10波程度のバースト波が用いられるので、波形の変化の様子が連続波に比べてかなり異なっている。

送信子の前方では、送信子の面内の各領域から回析する球面波群が互いに干渉し合うため、複雑に音場分布を変化させながら伝播する。受信子の位置、つまり試料の厚さ、によって波形が音場分布の変化に伴い変化するので、音速測定では受信波形の変化に注意しなければならない。

3.2 平面境界での反射波の散乱

平面境界に超音波が入射すれば、平面波理論の反射則どおりに正反射波やモード変換した波が決まった方向に整然と反射し、散乱は起こらないと考えられがちである。しかし、通常の音速測定に用いられる有限幅の超音波ビームでは、斜め方向に入射した波も散乱してわずかに戻ってくる。高精度音速測定では、この反射時の散乱の影響は無視できない。

面積が小さいポイント送信子では、斜め方向に正反射する反射波の成分が小さくなり、正しい測定ができるように思われそうである（図1参照）。しかし、反射波の散乱を考慮に入れた解析では、小さいポイント送信子ほど散乱の影響を受け易く、音速測定誤差が大きくなる。何故なら、ポイント送信子から放射する超音波が球面波になるように、ポイントの受信子の受信特性は指向性がなく、斜め方向から散乱して来る波も受信し、正面に発射した細かいビームの波の正反射波だけを受信するのではないからであ

図1 送・受信子の大小による斜め方向伝播成分の相異

る。

高精度音速測定のためには、なるべく大きい送信子を使い、近距離音場限界距離が試料厚さの 4 倍以上で、試料底面からの第 2 反射波も近距離音場に入るように音場のパラメータを決めた方がよい。つまり、第 2 反射波も近距離音場に入るように振動子の寸法を選び、試料厚さ d (λ は波長) のとき、円形振動子では、振動子の直径を $4\lambda \sqrt{d}$ より大きくし、正方形振動子では、長さを $8\lambda \sqrt{(d/\pi)}$ より大きくすると、測定誤差が小さくなる¹¹⁾。

なお、試料幅も試料厚さより大きくした方が試料の側壁の影響を受けずに安定した測定が行える。

3.3 反射波の位相ひずみ

送・受信子を押した付けた接触面側では、反射波に位相ひずみ (位相遅れ) が生じ、これが測定精度を左右する大きな要因になる。PZT などの圧電素子でできた送・受信子は試料に接触して超音波を伝達させるが、このとき用いられる接触媒質 (カップラントとも呼ばれる) は、超音波の送・受信に影響し、波形や位相をひずませ、音速測定誤差を拡大しやすい。これはカップラントの粘性や音響インピーダンス (材料の密度と音速の積のこと) や膜圧の変化によって超音波の透過、反射特性が変化するためである。特に横波の測定では、粘性の高い粘弾性物質のカップラントが用いられるので、カップラントの影響が大きい。

送・受信子が試料に隙間なく密着していれば、平面波理論から反射波の位相遅れは、試料と送・受信子の音響インピーダンスの大小により、完全にゼロか π だけ遅れるかのいずれかである。しかし、実際の測定では送・受信子と試料はカップラントの厚さ分だけ離れており、接触面側での反射では、試料表面での反射のみならず、送・受信子の前面での反射、およびカップラント層内での多重反射が生じ、これらが重なり合って反射波は入射波に比べ波形や位相が変化し、位相ひずみが生じる¹²⁾。その結果、通常測定に用いられる、第 2 反射波と第 1 反射波の伝播時間差にはこの位相ひずみが加わり、これが測定誤差となる。

この多重反射波の影響を小さくするには、カップラントの膜厚を極めて薄くするよりも、送・受信子の前面に音響インピーダンスの小さい前面板を付ける方が効果が上がる。接触別の音響インピーダンスが小さいと、境界面があたかも接触物がない自由境界面のように振舞い、入射波がほとんど境界面で反射し、カップラント層内での多重反射波の影響が小さくなる。

厚さ $1/2\lambda$ 程度のアクリル前面板を付けた DS センサ¹²⁾では、裸のセンサに比べ、カップラントの膜厚の変化に対する位相遅れの変化は、数百分の 1 程度に小さくなり、極めて安定した高精度測定が可能である。

3.4 超音波の分散

分散性のある、つまり周波数により音速が変化する波の音速測定は難しい。位相速度は単色の搬送波の同じ位相を持つ面の伝わる速さであり、群速度は包絡線で囲まれた塊の波の伝播する速度である。すなわち超音波のエネルギーが伝わる速度に相当する。波が分散性になる要因には、物質分散と幾何学分散の二つがある。金属材料では物質分散は小さくあまり問題にはならないが、試料の形状によっては、幾何学分散が生じることがある。位相速度の測定は、明確な搬送波の位相に注目するので、高い精度が得られやすい。群速度の測定は、包絡線の波頭の伝播時間から直接的に測定する方法と、周波数を変化させて位相速度の周波数依存性を測定し、群速度と位相速度の関係式から導く方法とがある。しかし、いずれの方法も包絡線の波頭が明確ではないので、高精度測定は望めない。

後述のパルス・エコーオーバーラップ法はパースト波の搬送波の中央部あたりの位相に注目しており、反射の際の散乱や位相ひずみが小さい場合には、原理的に理想的な位相速度測定法である。

また次に述べるシングア라운드法では、波数の少ないパルス波を用い、ゼロクロス点の伝播速度を測る。このような波の数が少ないパルス波では、まだ波形の位相が安定したようにも見えず、また包絡線と言え波形も決め難く、ゼロクロス点が位相速度で伝播しているのか、あるいは群速度で伝わっているのか明らかでなかったが、最近の解析から、シングア라운드法でも位相速度を測定していることが明らかにされた¹³⁾。ただし、分散によりパルス波形が伝播と共に大きく変われば、正しいゼロクロス点が隣に移動することも起こるので、注意しなければならない。

4. 高精度音速測定の原理

音速測定には、絶対音速測定と相対音速測定がある。前者が名の通り音速の測定であるのに対し、後者は何らかの比較する参照波との相対的な音速差の測定である。絶対音速測定法には、シングア라운드法¹⁴⁾、パルス・エコーオーバーラップ法¹⁵⁾、パルス重畳法¹⁶⁾、共振法¹⁷⁾、時間間隔平均法¹⁸⁾など、相対音速測定法には、位相干渉法¹⁹⁾、スペクトル解析法²⁰⁾など

があり、いずれも高精度測定が可能である。これらの測定法は最近の電子技術の発展に伴ってデジタル化や自動化による高精度化が図られ、どの測定法も区別する必要がないほど似通ってきた。この節では、よく使われる代表的な測定法であるシングア라운드法とパルス・エコーオーバーラップ法の音速測定の原理について述べる。

4.1 シングア라운드法

固体の体積波の測定では、多重反射波の内の任意の二つの反射波の伝播時間差から音速が求められる。

伝播時間を高精度に測定するための原則として次の二つがある。

- a：正確で安定な時間刻みの小さいクロックによる高分解能化
- b：繰り返し計測機能による信号の安定化

超音波の送信・受信に使われるセンサは電気―機械変換の変換特性が厳密には一定でなく、変動しやすい。センサと試料の接触圧や接触状態、カップラント（接触媒質）の粘性や音響インピーダンス、カップラントの膜厚、および環境温度などの影響で、変換特性が微妙に変化する。またセンサの変換効率が悪い場合、受信々号を大きく増幅するが、増幅の際にノイズが大きくなり、受信波形がひずみ、不安定になり易く、これらを改善して高精度化が図られる。

シングア라운드法の測定原理は物差しで長さを図る場合にたとえると分かりやすい。今仮に、長さが2.1234 cmの金塊が無数にあるとする。この金塊の1個の寸法を目盛り1 cmの長い物差しで測ると、有効な測定値は2 cmでしかない。しかしこの金塊を1万個隙間なく真直に並べて測ると、全長は21,234 cmになり、1個の平均寸法は2.1234 cmとなる。このように1万個並べると、測定精度が4桁増し、あたかも目盛り0.0001 cmの物差しで測定したかのような精度が得られる。また1万個の金塊は製作誤差（センサの変換特性の変動に相当）や傷（受信々号のノイズに相当）などで各々の寸法は微妙に異なっているが、多数個を積算すれば個々の誤差は打ち消され、測定精度が上がる。

シングア라운드法では、図2に示すように、送信パルスで送信子を励振して試料に超音波を発生させ、試料中を伝播した超音波を受信子で受信する。その受信々号をトリガにして、試料内の超音波の残響が消滅するまで一定の遅延時間待った後、再び送信パルスを出す。この操作を繰り返してシングア라운드させ、このシングア라운드周期をカウンタで読む。同図(a)では第1反射波で、(b)では第2

反射波でそれぞれシングア라운드している様子を示し、両者のシングア라운드周期の差から正確な伝播時間が測定される。

シングア라운드法の基本的なブロック図を図3に示す。パルス発生器で半波（センサの固有振動の周期の半分の時間幅）の電気パルスを送信し、センサを励振して立ち上がりの鋭い波数の少ないパルス波を送信する。試料底面から反射する多重反射波信号を受信アンプで受信し、その内の一つをゲートアンプで選び、オートゲインアンプで一定の振幅に増幅する。トリガアンプでゲート内の受信々号にトリガをかけ、その直後のゼロクロス点を求める。このゼロクロス点でトリガ信号を出し、このトリガ信号を遅延線を経由して一定の時間経過後にパルス発生器に送り再び電気パルスを送信する。この操作を繰り返してシングア라운드させ、その周期をカウンタで測る。なお遅延線は超音波の音速の遅さを利用して時間を遅らせる遅延器であり、残響エコーが完全に消えるまで次の送信波の打ち出しを遅らせる。

シングア라운드法は手動による微調整をあまり必要とせず、測定データもデジタルでできるので、自

図2 選択反射波によるシングア라운드周期

図3 シングア라운드法のブロック図

動測定に向けた簡便な測定法である。しかし、音速の変化の測定はできるものの、絶対音速の測定には向かないとされていた。しかし、最近のデジタル技術の進歩に伴い、デジタルゲートで受信々号を任意に選択できるようになり、シングアラウンド法は絶対音速測定が可能な高精度測定法になった。

受信波形の反転機能を使えば、センサの音響インピーダンスによって生じる波形の反転を修正して、正しい音速測定ができる。さらに波の到達時間をゼロクロス法で求めるので、測定値は受信々号の振幅に左右されない。

4.2 パルス・エコーオーバーラップ法

パルス・エコーオーバーラップ法の測定原理を図 4 を使って述べる。繰り返して超音波を発生させると、オシロスコープや超音波探傷器の画面に同図 (a) のような受信波形が見られる。この画面では、受信波が画面からはみ出さない範囲で精一杯時間軸を引き延ばしてみても、同図 (b) 程度にしか延ばせず、二つの受信波の時間間隔の測定精度はせいぜい 2 桁止まりである。そこで、同図 (b) の下に示すように二つの受信波の少し手前でそれぞれトリガパルスを出し、そのトリガパルスで時間軸を 1 万倍に拡大したオシロスコープを掃引させると、同図 (c) の拡大画面が得られる。この操作は丁度同図 (b) の画面の時間軸を 1 万倍に引き延ばし、遙かかなたにはみ出した二つの拡大受信波形をそれぞれのトリガ位置に合わせて 2 枚の透けるグラフ用紙に各々書き写した後、2 枚のグラフ用紙を角を揃えて重ね合わせて波形のずれを見る作業に相当する。

次に同図 (d) のようにオシロスコープの画面を見ながら二つの受信波形がぴったり重なるようにトリガ時間を調整する。すなわち揃えて重ねた 2 枚のグラフ用紙の波形の位相が一致するように、写し取る際に配置するグラフ用紙の角の位置 (トリガ位置

に相当) を調整する。この操作により、画面の時間軸は既に 1 万倍に拡大されているので調整精度が上がり、丁度重なったときのトリガ時間間隔、つまり二つの受信波の伝播時間差の読み取り精度は 4 桁上がって 6 桁になる。

パルス・エコーオーバーラップ法の回路構成には色々なバリエーションがある。基本的なブロック図を図 5 に示す。無線周波数発振器から発生する連続波の rf (ラジオ周波数) がパルス・エコーオーバーラップ測定の基準で、システム全体の基本クロックや、バースト波の搬送波 (キャリアウェーブ) になる。分周器は rf の周波数を 1/10, 1/100 などに分周して引き下げ、分周した周波数に合わせてパルス発生器で二通りのトリガパルスを作る。一つはバースト波発生器に作用して長い繰り返し周期のバースト波を発生させる。もう一つは任意に選んだ二組の反射波のおよその受信時間に合わせてオシロスコープの x 軸に作用し、CRT (オシロスコープ画面) の輝度を上げて掃引ビームが見えるようにする。つまり、二組の反射波形だけを同時に CRT に映し出す。バースト波で送・受信用センサをたたき、試料中に超音波を入射し、センサで受信した反射波の受信々号を受信アンプに通して増幅し CRT の Y 軸に入力する。CRT の二組の受信波形の位相のずれをなくすように rf の周期を調整し (トリガ周期が連動)、一致したときの周波数をカウンタで読んで伝播時間差を求める。

パルス・エコーオーバーラップ法で受信々号をオーバーラップさせるとき、分散性のある波では、位相速度と群速度が異なるため、搬送波の合わせる波数を間違いやすいので注意が必要である。

パルス・エコーオーバーラップ法は目視による測定

図 4 パルス・エコーオーバーラップ法の原理

図 5 パルス・エコーオーバーラップ法のブロック図

であり、測定者の熟練が要求される。微妙な波形の重なり具合を眺めながら行う周期の微調作業は難しく、測定精度が落ち易い。そこでこの手作業を自動化することが種々試みられている。自動化したものに、デジタル・パルス・エコーオーバーラップ法²¹⁾がある。これはデジタルオシロスコープに二つの受信々号をそれぞれ繰り返し取り込み、平均化処理、ゼロクロス点の計測、位相差などを自動処理し、音速を算出する事ができる。

5. 測定上の注意事項

シングアラウンド法とパルス・エコーオーバーラップ法の音速測定器は市販されており、これらを用いて簡単に高精度測定を行うことができる。音速測定の際の注意事項を以下に記す。

- ・試料表面は平面に仕上げ、表面と底面を可能な限り平行にする。
- ・試料は一定温度に保持して温度を均一にし、その温度を計測し、温度補正をする。音速は試料温度に非常に敏感である。
- ・なるべく反射回数の若い反射波を選ぶ。可能な限り板厚に比べ面積の大きい試料を用意し、大きめの送・受信子を用いて、第2反射波も近距離音場に入るようにする。
- ・音響インピーダンスの小さい前面板を付けた送・受信子を用い、超音波の送受信感度を抑え、反射時の位相ひずみを小さくする。
- ・反射波の位相の反転に気をつける。振動子、あるいは遅延材の音響インピーダンスが測定試料のそれより大きいときは、隣合った反射波の位相は互いに反転しているので、第1と第3反射波というように伝播距離差が2往復分ある反射波の組合せをもちいる。
- ・適切なカップラントを選ぶ。特に横波の測定では、適度の粘性があり、音響伝達率の高い媒質を選ぶ。アラルゲイドの主剤が使いやすい。

参 考 文 献

- 1) 例えば、福岡・戸田・平尾：「音弾性の基礎と応用」，オーム社，(1993)
- 2) 例えば、裏垣博：「超音波による音響異方性材料の溶接欠陥評価に関する研究」(大阪大学博士論文)(1992)
- 3) 木村勝美，他：非破壊検査，37-3,247 (1988)
- 4) E. M. Papadakis: In "Physical Acoustics: Ultrasonic Measurement Methods," Vol. XIX, Edid. Thurston and Pierce, Academic Press, New York, 81 (1990)
- 5) 長谷川：水素浸食事例とその検出技術，溶接学会誌 Vol. 56 No. 7 (1987) p. 393-400
- 6) A. S. Birring, D. G. Alcazar, J. F. Hanley, and S. Gehl: Ultrasonic Detection of Hydrogen Damage, Materials Evaluation, Vol. 47 No. 3 (1989) p. 345-369
- 7) 岸本，新谷，松本，福原：超音波速度測定によるクリープキャビティの評価，材料 Vol. 39 No. 442 p. 1043-1048
- 8) 松原，新田，酒井，藤縄：超音波法によるクリープ損傷検出の理論的検討，材料 Vol. 39 No. 442 p. 1049-1053
- 9) 福岡：音弾性法による残留応力の測定，溶接学会誌 Vol. 58 No. 1 p. 65-72
- 10) 平尾，矢田，谷元，福岡：レーラー波による表面層の非破壊評価，非破壊検査 Vol. 39 No. 2 (1990) p. 99-104
- 11) 戸田・福岡・山崎：縦波音速測定時の超音波散乱に伴う誤差の評価，日本機械学会論文集 55 A-512, 888 (1989)
- 12) 戸田・福岡・横山：高精度音速測定用センサの開発，日本非破壊検査 第2分科会資料，NDI-21276 (1989-11)
- 13) 新沢久弥：「超音波 SH 波の伝播特性」大阪大学基礎工学部修士論文，(1992)
- 14) N. P. Cedrone, and D. R. Curran: Electronic Pulse Method for Measuring the Velocity of Sound in Liquids and Solids, J. Acoust. Soc. Amer., 26, 963 (1954)
- 15) E. P. Papadakis: Ultrasonic Pulse Velocity by the Pulse-Echo-Overlap Method Incorporating Diffraction Phase Correction, J. Acoust. Soc. Am., 42, 1045 (1967)
- 16) H. J. McSkimin: Pulse Superposition Method for Measuring Ultrasonic Wave Velocities in Solids, J. Acoust. Soc. Am., 33, 12 (1961)
- 17) J. S. Heyman: Exp. Mech., 17, 183 (1977)
- 18) L. L. Lacy and A. C. Daniels: Measurements of Ultrasonic Velocities Using a Digital Averaging Technique, J. Acoust. Soc. Amer., 52, 189 (1972)
- 19) R. P. Espinola and P. C. Waterman: An Ultrasonic Interferometer for Measurement of Velocity Changes in Solids, J. Appl. Physics, 29, 718 (1958)
- 20) J. Blinka and W. Sachse: Application of Ultrasonic-pulse-spectroscopy Measurements to Experimental Stress Analysis, Exp. Mech., 16, 448 (1976)
- 21) 戸田・深栖・福岡：非接触電磁超音波法による残留応力解析，日本機械学会公同論文集，関西支部第60期講演会，No. 854-1, 65 (1985)