

原点から考え、NDMに貢献する。

Non-Destructive Measurement

Imaging Supersonic Laboratories Co.,Ltd.

Home-page: <http://www.i-sl.co.jp>

有限会社 アイ・エス・エル

〒631-0063 奈良市帝塚山中町 1 2 - 7

TEL:0742-40-2345 FAX:0742-40-2346

Email: isl@kcn.ne.jp

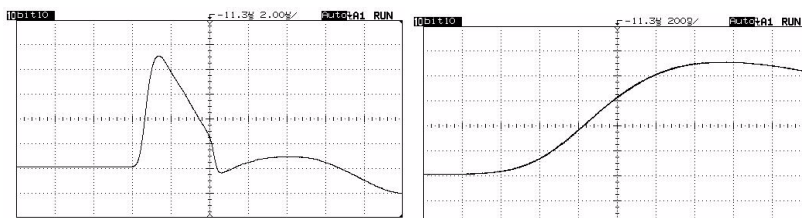
パルス法に於ける超音波音速、伝播時間の測定

絶対音速の測定には連続波の共振法が一般に使われています。パルス法では測定精度を上げるのが困難だからです。高周波の減衰が少ない材料で送受信センサー間の超音波波面が平面波として扱える場合は、比較的精度を上げられます。複合材、多孔質材などでは音速の分散が大きく、通常材では比較的精度良く測定できる信号の立ち上がりが不鮮明になります。また、この場合立ち上がりは共振法での音速値とまったく異なる値を示します。

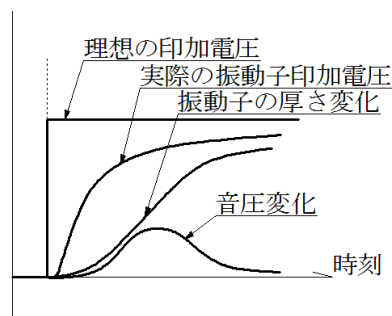
超音波探傷では、多くの場合立ち上がり点を測定して、音速を測る方法を取っています。これは物理的には一番早い音を測定して、この時間から計算される音速を前面音速と呼ばれます。本当の音速ではありませんが、非破壊の対象となる鋼など多くの材料で0.1%以下の精度で実音速とあっているのが、簡易的に立ち上がり測定を用いて音速を測定しています。伝搬する音のエネルギーの平均的伝搬時間が本当の音速で、弾性率と密接に関連します。精度の良い測定には相関法が使われますが、綺麗なガウス包絡線のサイン・パルス波でないと良い計測が出来ないと言われますが、測定機器に費用がかかるだけでなく、測定結果が本当に正しく、意味があるか疑問が残ります。

一般的パルス反射法の探触子から出る超音波音圧波形を特殊な高精度受信専用センサーで直接観測すると以下左図となります。

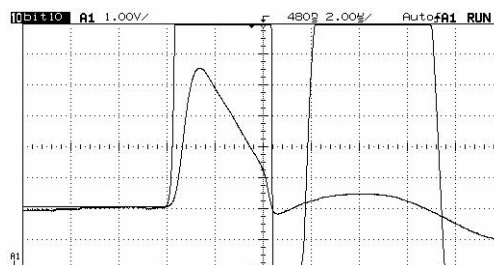
この波形で立ち上がりの部分が超音波の出た瞬間なのですが、はっきりしません。この横軸を10倍すると、右図になります。(0.5MHz40Φ超広帯域)



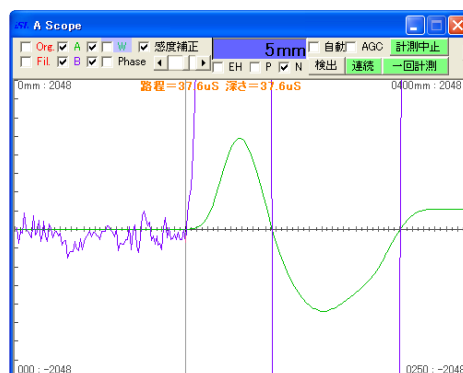
拡大しても何処が立ち上がりか良くわかりません。音は機械の振動です。振動と言う力を与えても、媒質に質量がある為、加速度現象を起こします。センサーから瞬間押す力の音が伝わったとしても媒質は



徐々に動くわけです。従って立ち上がりが何処かといわれても非常にその位置を示すのが困難です。さらに振動子に電圧印加しても、電気信号は振動子の容量成分の為に、立ち上がりはなまります。仮に立ち上がりの鋭いパルスが印加できたとしても、振動子は質量がありますので、ニュートン力学に従って加速されるわけですから、立ち上がりはなだらかになります。



立ち上がりを出来るだけ正しく測定したい場合は縦軸感度を上げて、測定する事です。右図は最初の波形の感度を50倍とした波形を重ねたものです。立ち上がりは少し前である事が判ります。右はコルク25mmの透過信号です。感度を100倍したものを合成しています。波形は平均化処理して、サーマル・ノイズを30分の1にしています。感度を上げてサーマル・ノイズを平均化で減らさないと、立ち上がりは



何処か良く分かりません。コンクリートなどでの音速測定の場合にはアンプの飽和方式と呼んでいます。しかし、この方法でも感度を上げていくと、先端は徐々に前に観測されます。特に劣化したコンクリートでは、幾ら感度を上げてでも先端はどんどん前になっていきます。減衰や散乱の比較的少ない材料では何とか先端が感度を上げれば観測できます。が、場合に依ってはサーマル・ノイズ以下の等価入力感度がある装置でも先端不明の事もあります。

これらの複合材料の場合は、音速の異なる素材が含まれるので、早く伝わる音と遅く伝わる音が発生します。多孔質材料の場合は、直線的に伝わる波と、非直線的に伝わる経路が発生します。

一般に平均音速が、色々な物理的意味を持ちます。ヤング率と平均音速は一定の関数で示されます。平均音速を測定するには意味あります。先端（初動）を測る事は、音波の経路中一番早い経路を測ったもので、あまり意味ありません。鉄鋼などのほぼ均一材と考えられる材料の場合は、音速の分散が少ないので先端を測って、音速計算すると平均音速と比較的良く一致します。鋼でもインゴットのように鑄込み直後では、粒界が30mmの場合もあり、音速は精度良く測れません。均一材以外はその様にはなりません。精度が必要な場合は鋼でも分散の影響がでます。鋼は圧延方向に音速が異なります。粒界が圧延方向に並んでいる為です。

送信波が理想的なディラックの δ 関数（ヘビサイドの γ 関数、インパルス）相当の場合、一番初めの大きな波の最大振幅あたりが妥当な伝搬位置です。が、前述の様に送信波形は幅

があります。その幅の半分程度伝搬時間が短いとし伝搬時間を求める必要があります。共振法での共振周波数と一致します。

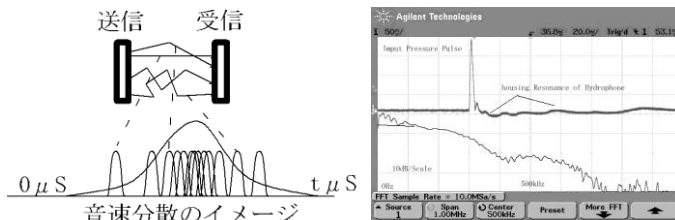
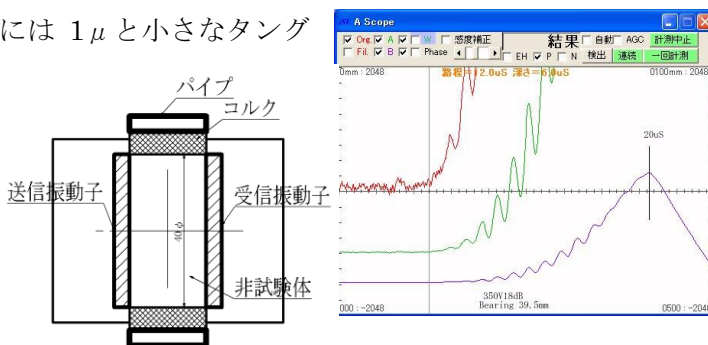
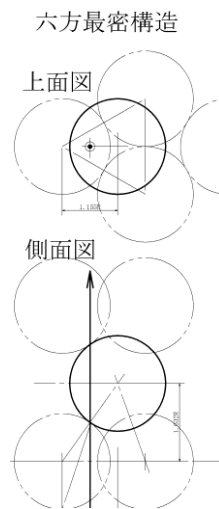
音速の分散の少ない材質の板などで、多重エコーが観測される場合は、多重エコー同士を相互に移動させ、相関を取って、その一番相関値が一番大きくなる、移動量が適切な伝搬時間となります。JISZ2353の「超音波パルス法による固体の音速の測定方法」に規定している方法です。共振法での共振周波数と一致します。が、複合材、多孔質体の多くは多重信号を得にくい。多重信号が得られても、最初の縦波以降はモード変換横波など色々な波が重なっているため相関を上手く取れません。また、一部の複合材では、複合材を構成する2種の材料に近い、2つの音速が測定されることがあります。注意が必要です。

音速の分散を理解してもらうため、ベアリングを六方最密構造（右図）に並べ、送・受信探触子で挟んで伝搬時間を測定した例をしめします。

広帯域探触子のバックリングには1μと小さなタングステン粉を同様な構造に固めています。その結果を下に示します。送信波音圧を右下に示します。（注：一般論としてある軸方向の物理量を測定する場合は、その軸方向は成るべく短く、他の2軸は成るべく大きくするのが原則です。）

インパルス関数に近い音圧の送信波を入力すると、ベアリングの中をほぼ垂直に伝わる音もありますが、迂回しながら、またジグザグしながら伝わる波もあります。ベアリング集合体の厚さが30mmですので、受信音圧（波）のピークの20μ秒で割ると、1500m/Sです。六方最密構造の場合、音が真つすぐ伝わるルートがありますが、ベアリング同士が点接触なので、強度は非常に弱いと想定されます。ベアリングの音速は5840m/Sです。5μ付近に先端が観測される筈です。

感度を上げた緑や赤の線で少しは伝搬時間が早い波形がある事は分かりますが、10μ秒程度までその前の信号強度は悪く測定できません。一般論として、音速の違う材料の混合物で、音速の早い材料が高容積で60%程度以上占める場合、感度を上げ先端信号を測定すると、音速の早い材料と同じ音速が測定されます。



音速の分散の大きい個体の音速測定方法

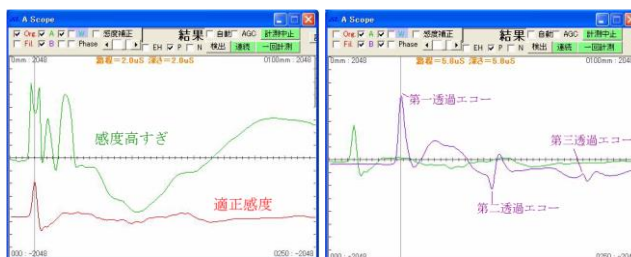
コンクリートや多孔質材など伝搬時間の分散の大きい材料の音速をパルス法で測る場合、以下の方法が最良です。

(A) サンプルが1個の場合

- 1) 送信に成るべく幅の狭い音圧パルスを使う
- 2) 受信は音圧に比例した波形が得られる受信系を用いる。(広帯域圧電素子+チャージアンプ或いは+高インピーダンス・アンプ)
- 3) 振動子径は成るべく大きくし、伝搬距離は成るべく小さくする。(平面波と考えられる状況にする)
- 4) 伝搬時間は、送信音圧のピークから、透過波の第一半波のピークとする。なお、モード変換横波は無視する。(本来は信号強度の一番高い部分であるが、モード変換波が混じっているため、正確性を欠く。)
- 5) 伝搬距離は対向探触子間とする。
- 6) 受信波形の第一半波より次の半波が信号強度高い場合は、探触子間距離(材料の厚さ)を縮めて測定するのが望ましい。(モード変換の影響、低周波が拡散して失われている可能性がある)
- 7) なお、多重エコーが十分S/N良く観測される場合はJISZ 2353に従う。

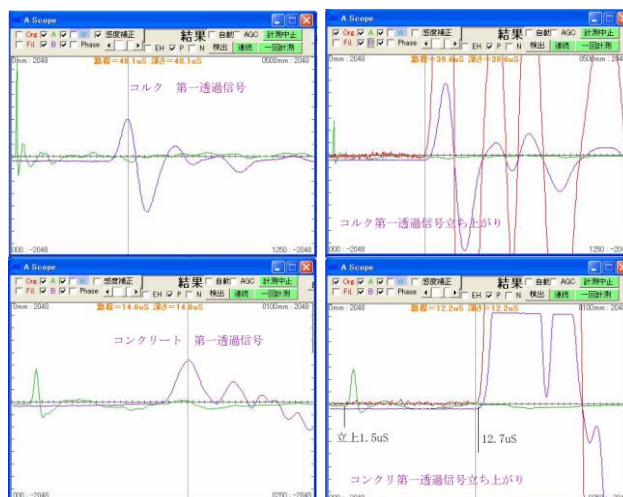
「例」送信受信の探触子を接触させた場合の波形を右に示します。感度が高すぎると波形歪

ますので、適正感度を探す必要があります。感度の設定を最低に下げても飽和する場合は、探触子接触面積を減らと良いでしょう。使用している探触子は超広帯域5MHz 10Φです。送信波のピークは2.0μ秒と計測されます。



次ぎの図は超音波の減衰の非常に少ないHDPSの50mm板です。第一透過エコーは5.8μ秒ですので、送信波位置2.0μ秒を引いて、3.8μ秒が50mmの伝搬時間です。音速は3290m/Sと計算されます。第二、第三透過信号が観測されるので、これらの第一-第二ピーク間隔と第二-第三ピーク間隔を測定

すると何れも7.7μ秒で、音速は3247m/Sとなります。(注意:反射の度に位相が反転しているの)±0.1μ秒の読み取り誤差を考慮すると両方の値は誤差の範囲です。この例では音速の分散が少ないので、第一~第三透過信号



の波形は似た周波数です。立ち上がり間隔を測定しても同じ値になります。なお、低周波のウネリはエッジ・エコーやモード変換信号です。計測が広帯域の為にこのような波形が観測されます。市販探傷器は見やすい様に、邪魔なこの低周波成分は消す様な回路構成にしています。(一般に音圧の微分を表示している)

次は分散の大きな、コルクとコンクリートの例です。コルクもコンクリとの伝搬時間の分散が大きいので、透過受信した波形は周波数が下がっています。コルクは 25mm の厚さですので、542m/S と計算されます。コンクリートは厚さが 54mm で音速 4285m/S と計算されます。これらを立ち上がりで測ってみましょう。まず、送信波の立ち上がりは感度を上げて安定して測定でき、1.5 μ 秒です。コルクの場合、感度で立ち上がりの読みは異なり、39.6 (サーマルノイズレベル) ~40.2 μ 秒 (飽和しない信号レベル) となる。計算音速は 656~646m/S と 2割程度 PeekToPeek 法より大きな値を示す。

コンクリートの場合、感度で立ち上がりの読みは異なり、12.2 (サーマルノイズレベル) ~12.6 μ 秒 (飽和しない信号レベル) となる。計算音速は 5047~4865m/S と 2割程度 PeekToPeek 法より大きな値を示す。

(B) 同じ材質の厚さの異なる 2 個のサンプルがある場合

- 1) 送信に成るべく幅の狭い音圧パルスを使う
- 2) 受信は音圧に比例した波形が得られる受信系を用いる。(広帯域圧電素子+チャージアンプ或いは+高インピーダンス・アンプ)
- 3) 振動子径は成るべく大きくし、伝搬距離は成るべく小さくする。(平面波と考えられる状況にする)
- 4) 伝搬時間は、薄いサンプルの透過第一半波のピークと厚いサンプルの透過第一半波のピーク間隔とする。なお、モード変換横波は無視する。
- 5) 伝搬距離は 2 個のサンプルの厚さ寸法差する。
- 6) 受信波形の第一半波より次の半波が信号強度が高い場合は、より薄い材料で測定するのが望ましい。(低周波が拡散して失われている可能性がある)
- 7) なお、多重エコーが十分 S/N 良く観測される場合は JISZ 2353 に従う。

実際には探触子からの有限幅のビームからは BED が発生し、波形歪を起こします。その影響 (主に尻食い) は上記 3) で解消しようとしているのですが、現実サイズの探触子では影響があります。正しい計測は、専用の探触子と専用のパルサーレーザが必要です。