

音波のよもやま話 (その27)

音波の音速と減衰 (3) 音速2

Sound Velocity and Attenuation (3) Sound Velocity (2)

(南)アイ・エス・エル 宇田川義夫

◆はじめに

前回の続きで薄い板や平板の厚さ方向の音速の話をする。従来の音速測定法や電子回路の精度に関しても言及する。

◆ヤング率、ポアソン比からの薄板の縦波音速

細長い棒状の固体の音速は前回の連載でお話したが、非破壊検査では薄い板の板方向や大きな固体の中に垂直に音を伝搬させる事が多い。後者に近い、無限大媒質中の平面波の音速は前回の連載の式(8)相当で求められる。もう一度以下に示すと

$$Cl \approx \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1-\nu-2\nu^2)}} \quad \text{式(1)}$$

である。薄い板に関しては書物に記述がない。紙、鋼板などそう言う形状のものは多いので、まずこれを求めよう。式(1)も含め、等方な均質

たとする。(b)の様にZ軸は δ 歪み、X,Y方向に Δ の歪みが発生する。ポアソン比 ν を使って

$$\Delta = \delta\nu \quad \text{式(2)}$$

である。薄板の厚さ方向をX軸とすると、X軸を元の1に戻す必要がある。(c)の様に1にする為 Δ 戻すと等方材料なので、ZY軸が更にポアソン比相当歪み

$$Z \text{ 軸方向 } \delta \rightarrow \delta - \delta\nu^2 \quad \text{式(3)}$$

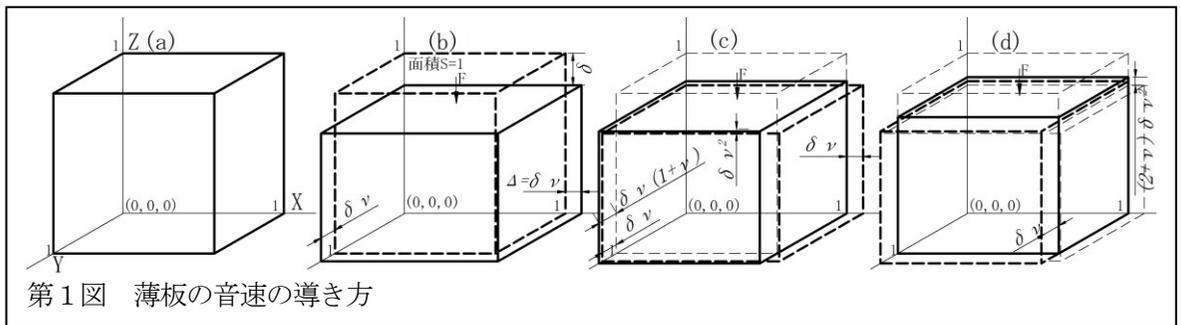
$$Y \text{ 軸方向 } \Delta = \delta\nu + \delta\nu^2 \quad \text{式(4)}$$

に変わる。(c)の状態はX方向に歪が生じられないが、Y方向に膨らむことができる、薄板をZ方向に音が伝わる状態である。

薄板状の実効ヤング率 E_s は δ 歪むはずが $\delta - \delta^2$ しか歪まなかった分大きいと考えられる。

$$E_s \approx \frac{E}{1-\nu^2} \quad \text{式(5)}$$

薄板の音速 V_s は



材で微小変位が前提である。圧力を加えた場合の等価的弾性率 (名称が無いので「実効ヤング率」と呼ぶ) を知れば、細い棒と形式の式で、板の音速が求まるはずである。計算を簡単にするため、第1図の様に単位立方体を考える。ヤング率は E の単位立方体(a)に力 F を Z 方向加え

$$V_s \approx \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}} \quad \text{式(6)}$$

となる。

◆無限大媒質中の縦波音速

序に Y 軸も元の位置 1 まで押し込むと、X 軸と Z 軸の面が移動する。Z 軸の歪みは

細い丸棒の音速,板の音速,減衰と音速の測定装置,音速測定精度,オシロスコープと非破壊探傷器アンプの設計思想,立上り,立下り,平均音速,前面音速

$$\delta \rightarrow \delta - \delta v^2 - v(\delta v + \delta v^2) = \delta - 2\delta v^2 - \delta v^3 \quad \text{式(7)}$$

となる。更に X が広がった分押し込むと

$$\delta \rightarrow \delta - 2\delta v^2 - 2\delta v^3 \quad \text{式(8)}$$

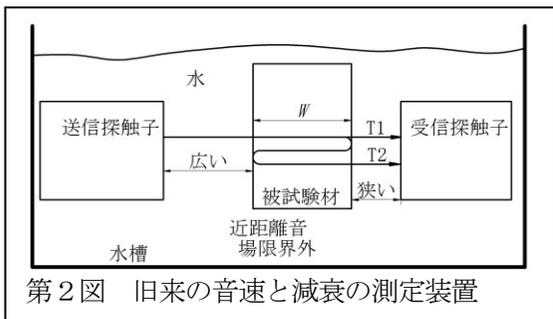
となり、Y 軸が再び膨らむので Y 軸を 1 とする計算、更に X 軸をと繰り返しの無限級数計算となるが、どうせ近似計算なので、この辺で止める。

$$Vl \approx \sqrt{\frac{E}{\rho(1-2\nu^2-2\nu^3)}} \quad \text{式(9)}$$

この式の結果は式(1)より少し小さい値となる。計算を繰り返すと、無限大媒質中の平面波の音速式(1)により近づく。

◆旧来の材料の音速減衰の測定

1970 年ころまでドイツ製の音速と減衰を測定する装置が売られていた。水槽内に両面が平行な被試験材を配置し、送・受信の探触子 2 個を離して配置する大きな水槽であった。探触子はそれぞれ 5 軸の芯だしをする機構が付いてい



第 2 図 旧来の音速と減衰の測定装置

て、被試験材と 2 つの探触子のアライメントを精度良く合わせて測定した。第 2 図の様に送信探触子と被試験材は離し、遠距離音場域に配置し、実質「平面波」の部分で測定する。被試験材を透過して受信されるエコー T1 と被試験材を 1.5 往復するエコー T2 の伝播時間差を Δt 、材料の厚さを W とすると、音速 V は

$$V = \frac{2W}{\Delta t} \quad \text{式(1)}$$

となる。現在も車のナックルアームなどの鋳物部品は音速で材料黒鉛球状化率のよし悪しの判断が行われており、同様な方法が検査に使わ

れている。同時に T1, T2 のエコーの dB 振幅を $H1, H2$ とすると、単位距離当たりの減衰量 A は

$$A = \frac{H2-H1}{2W} \quad \text{式(2)}$$

となる。この装置を販売する立場に居た筆者はドイツ語のマニュアルを読んだが、論理的根拠に乏しく、近距離音場限界より遠距離で測る事により平面波的な状況で測定する旨が書かれていたと記憶する。

この方法の欠点は以下である。

- 1) 近距離音場限界より遠距離では平面波と考えて良い理由が明確でなく、怪しい。送信探触子と被試験材の距離が十分遠く、被試験材の厚さが十分薄ければそう考えても良いが、どの程度十分だったら目的の測定精度が得られるか不明である。(実際に尻食い現象が起きる減衰の小さな材料ではビーム中心では波長が短くなる。)
- 2) 減衰の影響で T1 と T2 の波形変化(伝搬するにしたがっての尻食い現象と高周波成分損失)ので測定誤差になる
- 3) 実際に使うと人により結果が異なる。(アライメントの差と思われるが)
- 4) 異なる探触子で測定すると、結果が異なる
- 5) 水槽内は水が自然対流していて、ビームを揺らすため、測定精度が落ちる(これを解決するには探触子の前に強制的に一定温の層流をながすしかない)

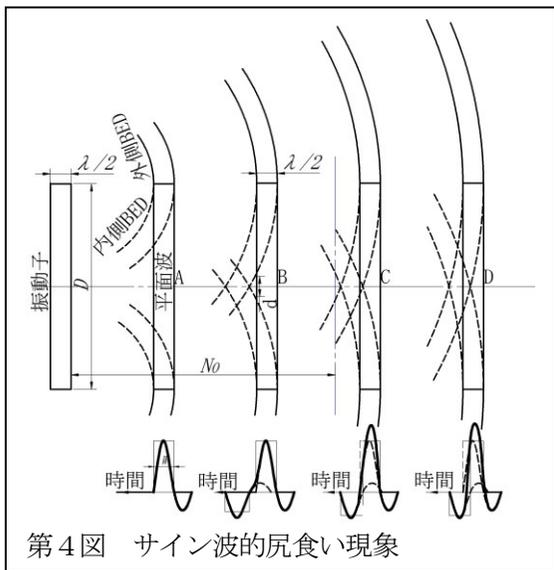
現在も一般に同様の方法で音速や減衰の測定が行われている。時間計測の電気回路にはスレッシュホールド法、ゼロクロス法、シングア라운드法などあるが、何れも電気的には十分な精度がある。例えば 1970 年代のゼロクロス法で 10^{-6} の精度で大型発電機の数 m のボルトの初期応力測定されていた。現在販売されている精密肉厚計はスレッシュホールド法、ゼロクロス法が多いが、 10^{-5} 程度の電氣的精度である。オシロスコープがデジタル式になってからは上手く遅延機能を使えば誰でもオシロスコープを用いて 10^{-5} 程度の電氣的精度で測れるようになった

細い丸棒の音速,板の音速,減衰と音速の測定装置,音速測定精度,オシロスコープと非破壊探傷器アンプの設計思想,立上り,立下り,平均音速,前面音速

ている。それでも測定条件次第で音速測定結果が異なる。

◆平面波で測りたいが 尻食い現象、減衰

探触子から半波が出た状況を第3図に示す。以降はポアソン比が負の材料はほぼ無いので、ポアソン比正の材料のみの話をする。探触子からは有限幅の平面波メイン・ビームが出る。その為、以前の回で説明したようにビームの端が広がろうとして、外側のBED (図中実践) を発生し、それに引きずられ符号が反対の音圧の内側BED (図中破線) を発生する。BEDはメイン・ビームから離れるほど弱い。メイン・ビームの端は伝搬と共に、BEDにエネルギーを与えた分弱くなる。この辺の細かな事は連載の初期

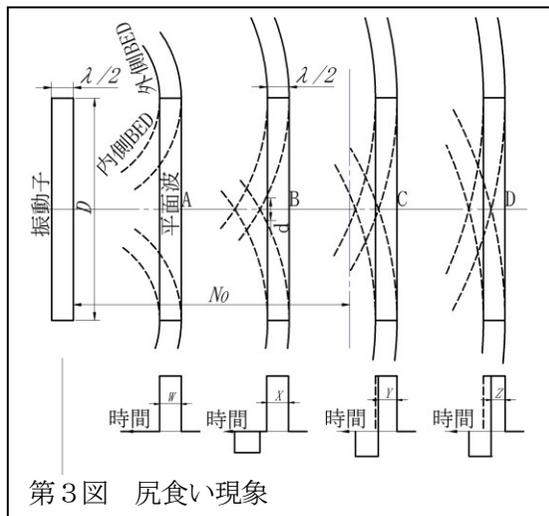


第4図 サイン波的尻食い現象

の回を参照願いたい。この内側BEDが伝搬するに従いメイン・ビームの平面波部分と重なる。位置Aに平面波部分が到達したとき、ビーム中央は平面波を保った状態である。図の下に送信探触子中心軸上に置いた小さな仮想探触子で音圧を観測した場合の受信音圧形を示す。メインの平面波のみ観測され、内側BEDは観測されても時間的に可なり遅れ強度も弱い。位置Bに平面波部分が来ると、すぐ後ろに内側BEDが観測される。これより遠くに平面波部分が伝搬すると、内側BEDが平面波の後ろを削り、所謂

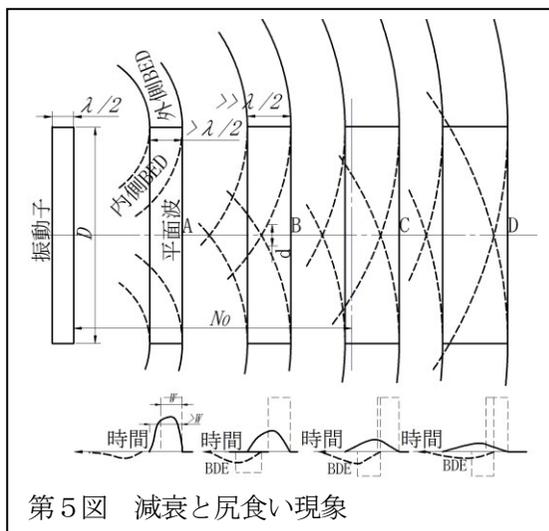
「尻食い現象」となる。矩形音波の場合は矩形波の幅がW、Xまでは同じでY、Zでは狭くなる。

送信音波がサイン波形に近いと第4図の様にはっきりと「尻食い」とは判別できず単に振幅



第3図 尻食い現象

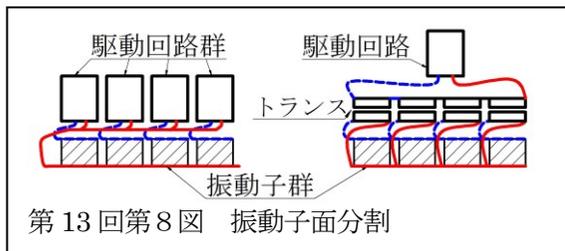
の変化も起きる。近距離音場限界 $N_0 = D^2/4\lambda$ 相当付近では感度が上がったかのように観測される。従来はサイン的波形で実験が主流だったため、「尻食い現象」が認識できなかった。サイン波は微分、積分、加算、引算してもサイン波としてしか認識できないので、正確な物理現象の把



第5図 減衰と尻食い現象

細い丸棒の音速,板の音速,減衰と音速の測定装置,音速測定精度,オシロスコープと非破壊探傷器アンプの設計思想,立上り,立下り,平均音速,前面音速

握は矩形や三角波などのパルス波ですする必要が



ある。

更に減衰がある場合は厄介で、減衰によって高い周波数成分が減る。その為第 5 図の様に波長が長くなると同時に、送信音波を矩形としても伝搬に従って段々サイン波的になる。減衰の具合次第で一度近距離音場限界付近で振幅が上がる事もあろうが、第 5 図の様に段々下がっていく事もある。

音速測定する場合、二つのエコーの時間間隔を測定するのに、それらの波形の相関を取って求める方法があり、よく使われている。が、これは波形が変化しない事が前提で、波形が変化する場合は何を測っているかわからない。

以上の第 3～5 図で平面波的と考えられるのは A の振動子にごく近い部分のみである。より正しい減衰や音速を測定するには

- 1) 送信振動子は出来るだけ大きくする
- 2) 受信振動子は出来るだけ小さくする
- 3) 受信振動子の位置は出来るだけ近くとする。

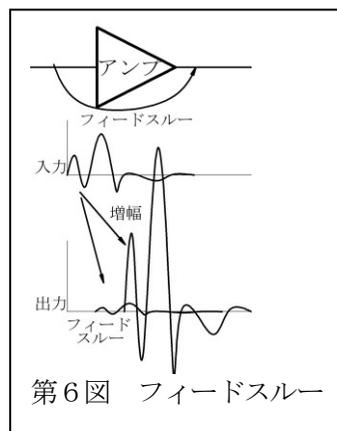
しかし、大きな振動子はパルサーの大きな負荷になり、駆動するのが難しい。例えば 5MHz10Φ の市販広帯域探触子は容量が 1～2nF でこれは 5MHz の電気的等価抵抗が約 15～30Ω である。同じ振動子素材で 20Φ にすると、面積は 4 倍なので容量も 4 倍に、等価抵抗は 1/4 の 4～8Ω となる。同軸ケーブルの特性インピーダンス 50Ω と可なり乖離し、電気的に駆動できないだけでなく端部反射も大きくなり、波形も歪む。筆者の経験では 5MHz10Φ の探触子をほぼインデシアル又はインパルス応答をさせるには、公称周波数の 5 倍の高調波まで観測すると、等価抵抗は更に 1/5 となるので、送信回路に駆動力の高いアバランシェ・トランジスタを使い、

振動子とトランジスタ間の配線全長を 3cm 以下にしないと配線のインダクタンスの影響で駆動が無理だった。連続波や長いバースト波の駆動でない限り、パルス波駆動は多くの困難を含む。

第 13 回の「大きな音を出す」で述べた様な方法で大面積振動子を駆動する事になる。が、コストがかかって余り使われない。また、ポリマーなど誘電率が低い振動子を使うと比較的に簡単に大面積振動子を一個のパルサーで駆動できる。筆者はポリマーで 10MHz100Φ の振動子を市販リモート型アバランシェ・パルサー（出力インピーダンス 3Ω 以下）で駆動した経験がある。ただし、誘電率の低い振動子は送信音圧が低い傾向にある（1-3 コンポジットも同様）。

また、試験体の厚さ寸法が薄くすると、粒界の大きさに近づき、その影響を受ける。結局平面波で測定できるのは条件の良い時だけとなる。

近距離音場限界の数倍とか離れると、殆どの音波のエネルギー成分が BED になるので、確かに 1970 年代の考えの様に平面波(又は球面波)と考えて良からう。が、実際に水中で近距離音場限界距離は例えば市販 30Φ 1MHz 探触子で 1.5m であり、10Φ 5MHz で 83mm、5Φ 50MHz では 83mm である。高い周波数では水の中の減衰を考えると使えない。低い周波数では数 m の水槽が必要になる。現実には遠距離でも理想に近い計測は滅多にできないのである。結局音速や減衰を精度よく測る事、そしてその精度がどの位かを知る事は非常に困難である。計測条件が揃わない限り音速や減衰測定結果はあくまで目安程度に考えた方が良い。なお、相対的音速、例えばボルトの引張力と音速の関係などは容易に 10⁴ 以下の相



方が良い。なお、相対的音速、例えばボルトの引張力と音速の関係などは容易に 10⁴ 以下の相

細い丸棒の音速,板の音速,減衰と音速の測定装置,音速測定精度,オシロスコープと非破壊探傷器アンプの設計思想,立上り,立下り,平均音速,前面音速

対誤差で測定する事ができる。非破壊検査では試験片を用いた比較検査=相対が原則なので、余り音速の「絶対精度」を気にする事は無い。

◆電子回路の性格

測定には電子計測が使われる。この性能や精度に関する知識が無いと、意味のある測定ができないので、パルサーとアンプ電子回路の時間測に絡むトピックスを取り上げる。まずはアンプである。アンプは目的により設計思想が異なる。

- 1) オシロスコープに使われているアンプは使用周波数帯域で歪が少ない事が重要だ。大きな信号の近くの小さな信号を拡大して見る事も出来るが、拡大しすぎるとアンプのバイアスが狂って所謂追い込み現象が発生する。
- 2) 探傷器やパルサーレーザ(以降探傷器等)のアンプは表面エコーなど大きな信号の後ろの小さな欠陥信号を検出したい。多少の歪があっても検出できる事の方が重要だ。従って、追い込み現象が小さく成るように設計する。その結果低域をカットせざるを得ない。

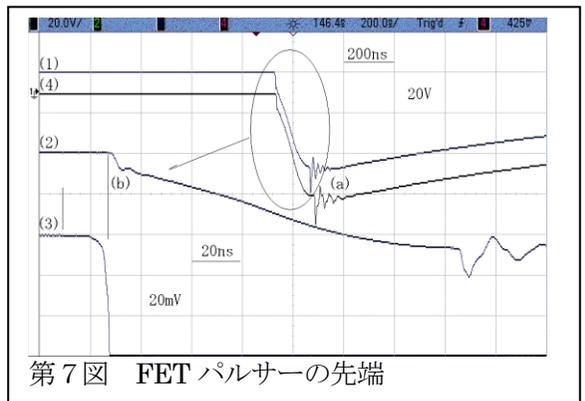
以上のように、オシロスコープと非破壊検査で使われる探傷器等とは設計思想が異なる。

◆電圧立ち下がり、立ち上がり

パルサーの電流の立ち上がりを非破壊ではパルサーの立ち上がりとして定義されている。パルサーの出力電圧をオシロスコープなどで測定すると立下りである。測定の精度に関しては両方もあまり考慮していないが、概してオシロスコープの方がよい。探傷器等では、電氣的SNを良くする為高域はカットしてある。また立ち上がりは、感度を上げた場合、入力信号の立ち上がりとは異なる信号が表れる事が多い。昔は10倍程度の増幅器を数段設けて、各段はシールドケースに入れられていた。最近ではコストが高いため、またIC化が進んだためシールドケースは使わなくなった。その為フィードスルーと言う現象が時折観察される(第6図)。ある増幅段

を通らずその入力から出力に直接信号が漏れ入る。これをフィードスルーと言う。アンプより空間伝播の方が伝搬時間が短いので、増幅された大きな信号の前に現れる。高い周波数成分即ち急な立ち上(下)がりの入力波形の場合にフィードスルーが良く起きる。位相が逆なら気が付くが、同相だと気が付かない事も多い。前面音速を精度よく測ろうとして感度を上げると、このフィードスルーの影響が表れ、測定精度が制限される。

前面音速を測定する場合、最初の波形の立ち上(下)がりを測定する。非破壊検査でもエコーの立ち上がりをビーム路程として測定し、検査に役立っている。振動子を励振して音を出すパルサーの立ち上がりを見てみよう。ごく標準



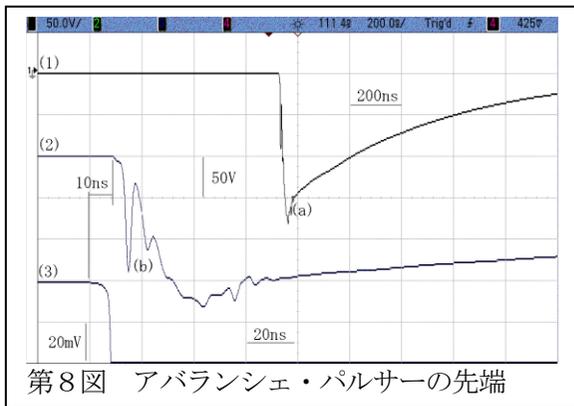
的FETを用いたスパイク・パルサーの例が第7図である。最近のスクエア・パルサーもFETを用いていて、似たような波形である。測定は探触子の部分で測定した。一般パルサーの50Ω抵抗負荷での立ち上がり時間は公称10~30nsである。これに標準的公称5MHzΦ10広帯域探触子を30cmの探触子ケーブルで繋いだ場合が(1)~(3)で(4)は探触子ケーブルを1.2mとした。(1)と(4)の(a)の部分に凸凹があるが、これは主に探触子の静電容量と探触子ケーブル・インダクタンスによる電氣的共振で、FETがON状態からOFF状態になったときによく見かける。振動子の容量が大きいほど、ケーブル長さが長いほど低周波になる。振動子にこの電圧が印加されていて、この周波数の音波も探触子から発生している。受信探触子の受信周波数帯域がこの周波

細い丸棒の音速,板の音速,減衰と音速の測定装置,音速測定精度,オシロスコープと非破壊探傷器アンプの設計思想,立上り,立下り,平均音速,前面音速

数を含むと、その信号も観測される。一探触子法の場合、振動子の厚さ相当の平均化特性ではぼ消え、振動の先端のみ残る事が多い。

(1)では立下り時間が100nsになっている。探傷器等のカタログの立下り時間10ns等はいくまで50Ω純抵抗負荷の場合で、容量成分が多い探触子を繋いだ場合は探触子次第である。振動子の容量を立下り時間が公称周波数の半周期相当(100ns)程度なる様にする、送信感度が一番高くなるため、競争の激しい汎用探触子は大体こう言った振動子容量になっている。(1)の時間軸を10倍に拡大したのが(2)で、(b)は30cmの探触子ケーブルの影響(ケーブル端反射)である。(2)の波形の立下りの先端は何処かと言うと波形(2)では分りにくいが、縦線付近である。縦軸を1000倍にしたのが波形(3)で、この感度だと(b)の7ns前に先端が観測される。オシロスコープの感度が目いっぱいであるが、もっと感度を上げると、実際には更に先の10ns付近に先端がある。FETをONする制御信号がFETのゲートに入ってから、FETは指数関数的に電流が増加する。最初ゆっくりで、加速的に電流を飽和電流まで増やしていく。(1)(4)の傾斜が一部一定の角度なのはFETの飽和電流の為に一定の電流で振動子に電荷をチャージ(充電)している。電気信号は急に変化は出来ず、必ず加速カーブとなる。いずれにしろ、何処を立下りにするかは明確に判断できずパルサーや探触子により10ns~1μsの誤差が生まれる。

第8図はより高速なアバランシェ・トランジスタを使ったスパイク・パルサーの場合で、過去50年間、これより高速なパルサーは発明されていない。と言うか雪崩現象を使っていて、一種の破壊現象なので、これ以上は早いスイッチングは存在しないであろう。(a)はFET同様の振動子容量とケーブルの電気的共振である。アバランシェ・トランジスタのスイッチング時間が短い為、ケーブル反射(b)は前図より明瞭に見える。周期は8nsで探触子からは125MHzの音が発生している。縦軸を2500倍に拡大した(3)と(2)では先端は10ns程度の差がある。FETより良いが、経験上最大100nsの差がある。

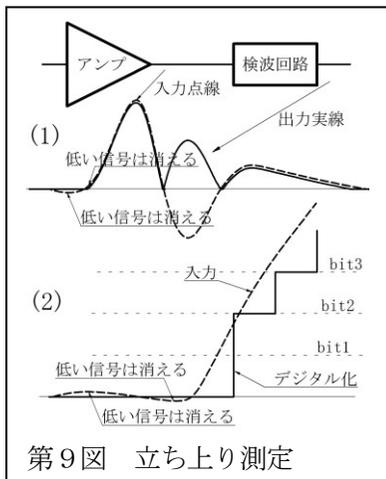


第8図 アバランシェ・パルサーの先端

先端を探すより、それぞれの波形の振幅を一定にして、その1%を切る点を測る方法が経験上安定している。非破壊のデジタル探傷器で画面100%もエコーを合わせ、立ち上がりを読むと、これは最低ビット(多くの機種は1%程度)を切る時刻点なので測定が安定する。偶然かデジタル探傷器は上手くできている。

◆探傷器等での立ち上がり測定

最後に探傷器等での立ち上がり測定は前面音速と記したが、正確には少し違うので説明しておこう。昔のアナログ式探傷器等の出力段に検波回路が付いていた。非線形回路でだまか一定の振幅以下は検波回路後には伝わらない。第9図(1)の様に、ある一定の数値を超えた所を立ち上がりとして表示観測される。その為立ち上がりが容易に観測され、安定して計測されると誤解してしまう。最近のデジタル式の場合はデジタル化したデータを検波処理する為、検波処理には閾値はない。しかし、デジタル化する時に1ビットを超えな



第9図 立ち上り測定

細い丸棒の音速,板の音速,減衰と音速の測定装置,音速測定精度,オシロスコープと非破壊探傷器
アンプの設計思想,立上り,立下り,平均音速,前面音速

い信号は無視されるので一種の閾値が第9図(2)の様に発生する(量子化誤差と言われる)。いずれにしろ、本当の立ち上がりではない。しかし、0.1%程度とそれほど時間軸精度を要求しない非破壊検査の時間軸測定では、前面音速相当の立ち上りを測っていると言っても問題ない。より高精度の測定では注意が必要である。

◆あとかき

今回は音速とその測定に関して述べた。次は減衰に関して述べる。

◆今回知った事

- (1) 棒の様に細く長いものの音速の他、板状のもの別の音速がある。
- (2) 大昔は大きな水槽の遠距離音場に被測定材を配置して、音速や減衰を測定していた。遠距離＝平面波と考えていた。
- (3) 物質によって伝搬するに従い、パルス音波の波形が変化するので、遠距離音場だからと言って正しい音速と減衰の計測をしているとは言えない。
- (4) 極近距離で、BEDの影響の無い範囲で測定するのが、より正確な音速と減衰の測定であろう。
- (5) 送信はなるべく大きな振動子、受信は小さく、送信周波数より高い共振周波数の広帯域探触子が適する。
- (6) 前面音速(初動)を測ろうとして感度を上げると、別の問題も発生するので注意が必要である。
- (7) 波形の立ち上がりは何処かと言うと誰も正解を持っていない。

<参考文献>

超音波技術入門—発信から受信まで(2015/04初版2刷、日刊工業新聞社)

IUS2012 Doersden 423 4I-4 Wave Propagation Simulation in Coarse Grain (attenuative) Materials