

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) アイ・エス・エル

〒631-0063 奈良市帝塚山中町12-7

+81-742-40-2345 FAX:+81-742-40-2346

Email: isl@kcn.ne.jp or yoshio@i-sl.co.jp

誰でもできる

オシロスコープ (OSC) & ファンクションジェネレータ (FG) のみでの 超音波試験実験

何故 OSC と FG か

市販探傷器やパルサー・レーザ（以降探傷器等）の対象の検査周波数は 0.5~30MHz で、特に鋼を中心に使用頻度、即ち販売の多い 2~5MHz を中心で試験者にとって便利な性能を出す様に設計されています。従って、鋼の試験目的以外では必ずしも良い結果が得られません。既定の試験をする為の装置と考えるのが良いでしょう。特に基礎研究に使うと、単に探傷器等を使ってどこまで出来るかを実験する事になります。従来から探傷器等は超音波の研究に用いられて来ましたが、観測結果の歪みを考慮せず観測した為、間違った現象の説明に成っています。探傷器等、OSC と FG による実験試験の概略の利点欠点は以下です。○×△印は弊社の経験に依ります。

	探傷器等	OSC と FG	解決策、備考
価格	○鋼材等のみを考えると安価	○探傷器等より性能高く、鋼材等以外に対象にすると極安価	
操作性	○探傷肉厚測定目的に特化	△なれないと大変	
現場使用	○主目的	△FG 付 OSC は現場で使えるが、一般的には不向き	
鋼材等の検査	○主目的（金属類全般 OK）	×非常に悪い	
情報	△エコーの高さとビーム路程のみ	△非常に多い。多く過ぎる。	
物質の音速測定	×物理的意味の音速は測定出来ない。前面音速の測定のみ（例えば細い棒の音速など測れない）	○容易、分散も測れる	
物質の減衰特性	×殆ど不可能。特定の狭い範囲の特性は測定できる	○インパルス応答で容易	
対象材試験の最適探触子選定	×多数の周波数の異なる探触子で試験しないと判らない。	○1 組の探触子で対象材の減衰特性を測れば判る	
汎用圧電センサの使用	×制限が多いせ	○AE、速度&加速度計、スピーカ、マイクなどを使える	
送信電圧波形	×探傷器等任せ	○FG の内臓関数：バースト、スイープ、変調など自由	
波形歪	×多い。探傷器等任せ。	○少ない。	
送信電圧	○高い。300V 付近が多い。数ステップ切り替えが多い。1kV 超えの製品もある	○50Ω で 0~10V。一般試験には十分な電圧。	RF リニア・アンプを使うと数 kV まで可
送信周波数	△多くは 1MHz 以下と 30MHz 以上は困難	○FG 次第。立上時間を使って 0~200MHz が可能。	
インパルス音の発生	△ほぼ出来ない。通常は正負一波音圧まで	○半波の音圧波の発生可能	インパルス応答の測定可能
ダンピング抵抗	×可変範囲が狭い。特に低周波の探触子に不利。20~2kΩ 程度	○外部接続。自由度は高い。実用 10Ω ~1MΩ 程度。	
一探触子法	○機能が内蔵	△可能だが、ダンピング抵抗が 50Ω になる。	弊社 CM12 で、1MΩ
一探触子法受信波形	×受信音圧波形と観測波形（エコー）に関係ほぼない	△ほぼ受信音圧波形を積分した波形に近い	
二探触子法受	×受信音圧波形と観測波形（エコー）	○探触子を選択すれば、受信音圧	

信波形	一) に関係ほぼない	波形に近い情報が得られる	
受信帯域	△多くは 0.1MHz~30MHz 高周波専用は 1MHz~200MHz 等	○OSC の周波数帯域 ほぼゼロ~OSC 上限	
受信感度	○等価入力雑音程度	△等価入力雑音の 1/10 程度	連続交流の場合
パルス受信感度	×低域が伸びていない為、実質高周波成分のみ受信	○周波数下限がほぼゼロの為、高い	
探触子選択幅	×インピーダンス範囲が狭いので制限多い	○OSC の入力インピーダンスまでの各種センサが使える	
二探触子法での実効感度	×送受に多様なインピーダンスの探触子しか使えないので悪い	○送信能力の高いセンサと受信能力の高いセンサが使い非常に感度が高い	
探触子と組合時の帯域	△多くの標準的使い方では探触子公称周波数の±50%	○ほぼゼロ Hz~探触子の公称周波数 (約 200%)	
探触子と組合時のパルス感度	××帯域が±50%の為極悪い	○○感度高い	
追込現象	○保護回路や帯域を狭める事で小さい	△大きい。数十 mV レンジで 10V 印加すると追い込まれる	弊社 CM12 とダンピング抵抗で解決
移動平均処理	×機能なし	○散乱の大きな材料の底面エコーの SN が上げられる	
サーマル・ノイズ除去	×機能なし	○平均化処理でサーマル・ノイズに埋もれた有用波形検出	

OSC と FG 検査や試験が出きる理由

超音波試験用の探触子の送・受信感度が半世紀前の 10 倍以上に上がっています。水浸や遅延付き探触子の場合 1-3 コンポジット振動子、直接接触の場合は保護膜を適切にした広帯域探触子の感度は大きな反射源に対して、送信実効電圧の 10%程度が観測されます。例えば大きな平面底面を狙い 10V のパルス振動子に印加すると、1V 程度の底面反射エコーが観測できます。

FG は 50Ω 負荷で 10Vpp の出力が一般的です。負荷が軽いと 20Vpp です。探傷器等は 100~500V 程度ですので、FG は 20~30dB 探傷器等に比べて悪いと言う事になります。

OSC は 1~5mV/スケールが一般的で、周波数帯域が狭い機種では 500μV/スケールの機種もあります。

通常の探傷器等の入力換算ノイズは機種に依りますが、10~100μV あります。OSC の前に 10 倍のアンプを入れれば、探傷器と同じ感度と言う事が出来ます。

感度の高い OSC は探傷器に比べ概略 20dB 感度が悪いと言えます。

FG と OSC 込みでの探傷器等に比べ概略 40~50dB 感度が悪いと言えます。

一般的に探傷器等は感度余裕が 40dB (最大感度から 40dB 下げた状態) 以上で使われます。

と言う事は、大半の試験は FG と OSC の組み合わせで実現できると言う事です。

探傷器等はパルス超音波を扱っていますが、パルス波はそこに含まれる低周波成分が多く、電気計測では最低でも中心周波数の 1/100~10 倍、可能なら 1/1000~20 倍の帯域が必要とされています。5MHz 中心の場合、0.05MHz~50MHz 又は 0.005MHz~100MHz になります。探触子で受信の場合、振動子の特性で探触子の中心周波数の 1.5 倍までしか受信できませんので、0.05MHz~7.5MHz 又は 0.005MHz~7.5MHz が必要になります。探傷器等はこの範囲の上の方を含むのみです。OSC を使う全範囲カバーする事になります。

以上の議論は電氣的インピーダンスに関して考慮してなく、精度は悪いのですが、大まかには実際に合致します。

探傷器等は売れ筋の鋼対象に特化して性能競争しています。それ以外を検査する場合不利になります。特に減衰材など周波数が低域にシフトする材料が対象の場合、一見減衰して観測されます。OSC を使うと、ほぼ直流まで観測できますので、通常の探傷器等で観測されない現象が簡単に観測されるのです。

一般探傷器等では送・受信同じ周波数の探触子を使うと、受信時の受信感度特性がその振動子の共振/反共振周波数付近で高い為、例えば探触子公称周波数の 1/10 の周波数の音が戻ってきて入っても、一見探触子の公称周波数の波形が戻ってきた様に観測されます。一般探傷器等はその周波数帯域が狭い為で

す。OSC と FG を使うとより受信音に近い波形が観測できます。

探傷器等では対象材に適切な探触子の周波数を調べるのが大変です。周波数の異なる何個かの探触子を用意して、が判らない場合があります。この場合 OSC と FG を使って対象材の減衰周波数特性を測定すると最適な探触子を容易に選定できます。減衰が少なくなる付近の周波数（遮断周波数又はカットオフ周波数）の探触子が一番 SN 良い試験ができます。

二探触子や二振動子法では受信振動子の周波数を高くすることにより

感度が足りない場合の対応

FG と OSC の組み合わせでは概略探傷器等に比べ 40dB 感度が低いです。探傷器等と同等にするには送信感度を上げる方法と受信感度を上げる方法があります。前者の一つの方法は出力インピーダンスを下げる事です。弊社では FG からの 50Ω 系信号を、5Ω 又は 2Ω の低インピーダンスに変換して、重い負荷の振動子を駆動する BUF シリーズを販売しています。波形は FG の波形そのまま又は 2 倍に増幅するリニア・アンプです。低インピーダンスは 2Ω 以下も可能ですが、ケーブル・インダクタンスなどの影響でこれ以下は扱いが難しいです。前者の別の方法は FG の波形は使わず、単に高圧のスパイク・パルスを発生するアダプター HPPS で 1kV40A が標準です。市販パルサーの数倍～数十倍の送信能力があります。同じくバースト・パルサーなども販売しています。後者の目的の一つは受信信号を 10 倍に増幅する BUFR シリーズです。20MHz 程度までを対象にしています。1MHz 或いは 100kHz までと言う場合、サーマルノイズが減るので、かなり高い増幅度の回路が使える、その他各種目的にあった、アダプターを販売していますので、感度不足の場合はご相談ください。状況に従って適切な方法を推奨します。

使用できるセンサ

探傷器等では、使用できるセンサの耐圧やインピーダンスに制限がある為、非破壊用超音波探触子など限られたセンサしか使えません。一方 OSC と FG の組み合わせでは、AE や加速度計用センサなどはそのまま使えます。車などに使われている空中超音波用のセンサや更には、スピーカやマイクまで使えます。スピーカは音の送信用ですが、可逆素子で音の受信にも使えます。マイクも音の送信にも使えます。これら多様な特性を持ったセンサが使えるのは OSC と FG の組み合わせの最大のメリットでもあります。また、FG に合った送信能率の高いセンサと OSC に合った受信能率の高いセンサを組み合わせることに依り、従来の非破壊超音波センサに比べ格段に高い総合感度を得る事も出来ます。

接触媒質

水浸法以外では、接触媒質を使って、探触子と材料の音響結合を良くします。多くの接触媒質は水に近い音響インピーダンスですが、プラスチックに近い音響インピーダンスの接触媒質（以降 HZ）があります。これを使うと固体など音響インピーダンスの高い材料に対して透過損失が少なくなり、送・受信往復での損失に数倍の差が出る事もあります。直接接触法で実験する際は必ず最初に HZ を使うと良いでしょう。これが最良の条件で一般接触媒質ではこれより悪くなります。一般接触媒質で試験して出来ないものが、HZ を使うと出来たという経験が何度もあります。

一探触子法と二探触子法、一振動子法と二振動子法

一探触子法は一つの探触子で音を出し、受信もするものです。励振電圧回路と受信アンプを接続することになり、相互干渉の為に良い特性の試験は出来ません。超音波肉厚計で腐食用の肉厚計がありますが、これは一つの探触子の中に送信振動子と受信振動子を組み込み、送信回路と受信回路の干渉を避けています。

送信専用、受信専用の探触子を使うと、電気的干渉を避けられるので、帯域や感度を高くできます。

一般検査では送信と受信は同じ探触子を使いますが、良いとかがりません。

探傷器等の電気的特性の為、送信探触子から出る音の中心周波数は大まか振動子の共振周波数 F_r 相当です。一方同じ探触子が受信する場合一番感度が高い周波数は反共振周波数 F_a 付近です。感度の高い振動子ほど F_r と F_a の周波数の差が大きく、例えば F_r が 5MHz で F_a が 8MHz という振動子があります。探触子の感度が限界まで必要な空中超音波用の探触子は送信と受信の振動子の共振周波

$$Q \text{ 値} : F_r \text{ と } F_a \text{ の差は } Q \text{ 値 (品質係数) \text{ として比較評価する事が多い。} Q = \frac{F_a - F_r}{2 * (F_a + F_r)}$$

数を変えて、感度を得ています。

材料中では減衰があって、パルス波の場合、周波数の低域へのシフトとして観測されます。5MHz 基本波のパルス、即ち 100ns のパルス幅が、材料を通過すると 200ns などと広がります。

一探触子法か二探触子法か？

一探触子法の場合、単に OSC と FG を BNC チース・アダプターで接続し、その接続端から探触子に繋がればよいのです。受信信号が強い場合には測定が可能です。感度の高い探触子を使う、探触子と非試験検査材との間の音の透過率を上げる事が肝要です。一つの問題は FG の 50Ω が探触子の負荷になりますので、等価インピーダンスの低いセンサでないと受信感度が得られません。また余りに等価インピーダンスが低い度、50Ω の FG で十分駆動できません。探触子の等価インピーダンスにより感度がかかり変化します。受信強度が弱い場合、OSC の垂直感度を上げることになり、大きな信号が入ると OSC 入力段アンプの追い込み現象で、ベースラインが何処かに飛んでしまい、測定できません。この場合は弊社 CM12 などリミッターと送受間分離回路を使えばある程度解決できますが、その部品の分歪が増えます。波形のどの部分が回路部品による歪か判断するのは電子技術の専門家でも大変です。歪を小さくするには二探触子法がベストです。一探触子法は一個のセンサで済むので、センサの配置など気にせずに気楽にできます。まずは一探触子法の受信信号が高い場合の例です。

ダンピング抵抗： 大昔の水晶時代は、水晶探触子＝狭帯域しかなかった。減衰振動が長く続き、パルス長は長かった。時間分解能は頗る悪い。振動子の共振電流をダンピング抵抗に流して、速やかに振動を減衰し、パルス長を短くするのがダンピング抵抗の役目であった。1980年代からは広帯域探触子が一般的になって、ダンピング抵抗の元々の役目が無くなった。一方広帯域探触子に対してダンピング抵抗は低域カット・フィルターの役目(微分)を果たし、半波の受信電圧波形を1波波形に、1波を1.5波にと波数を増やす。最近では、送信パルスの直後の所謂追い込み現象をダンピング抵抗で短くできる事から、この目的が主目的に成ってきた。

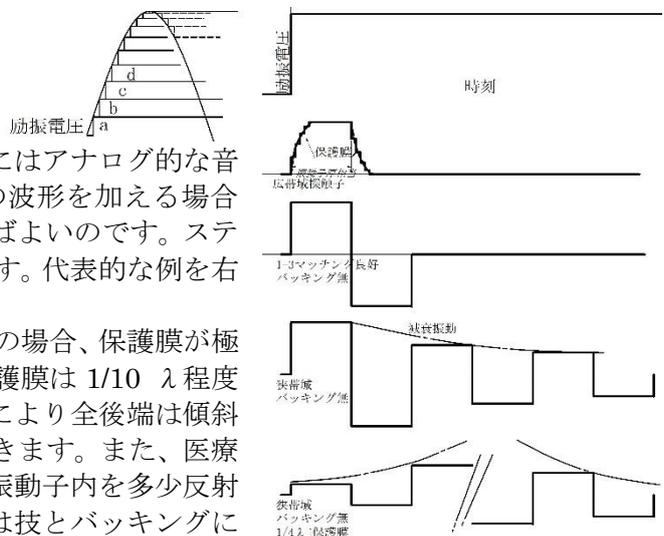
追い込み現象の改善

一探触子法では追い込み現象が起きます。送信電圧や大きな反射源からの強い信号を OSC が増幅する為です。探傷器等ではアンプの帯域、特に低域を切って、高周波成分のみ伝搬する様にして、追い込み現象を改善しています。また探触子の公称周波数での等価インピーダンスを 50Ω 前後にして、ダンピング抵抗を用いて振動子端の電荷を吸収し、受信アンプ入力に大きな信号が長時間加わらない様にします。OSC を使って試験する際に追い込み現象で目的のエコー波形が観測できない場合は、ダンピング抵抗を付けると良いでしょう。振動子は内部音圧の積分値に比例した電荷を発生します。これをダンピング抵抗に流すと、その電流変化に比例した音が発生します。また振動子の容量とダンピング抵抗間で電氣的に微分作用となり、結果波形は歪みますので、なるべく大きな値のダンピング抵抗にする事が正しい波形を観測する要点です。目的のエコーがある場合と無い場合の差を計算するのも良い方法です(追い込み現象でエコー波形自体の歪みが少ない場合)。

探触子からの音の出方

ステップ電圧を加えた場合の音の出方がわかれば、如何なる波形の音の出方も判かります。オーディオでは DA コンバーターから複数のステップ状の電圧を出してスピーカを鳴らし、人の耳にはアナログ的な音と聞こえる様にしている。同様に探触子に任意の波形を加える場合の、出力音はステップの組み合わせとして考えればよいのです。ステップ信号による応答をインデシアル応答と呼びます。代表的な例を右に示します。

後面のバックリングで音を吸収する広帯域探触子の場合、保護膜が極薄いか無い場合は矩形音が出るが、一般的には保護膜は 1/10 λ 程度はあり、ケーブル長などの影響による電氣的歪等により全後端は傾斜が付きます。以降の図では傾斜部分は無視して描きます。また、医療用の広帯域センサは 1/4 λ 法を使っていて、音が振動子内を多少反射する場合があります。非破壊用でも目的によっては技とバックリングに



全部吸収させない設計をする事もあるので注意が必要です。

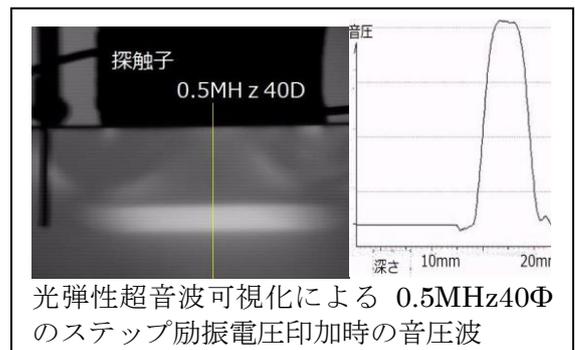
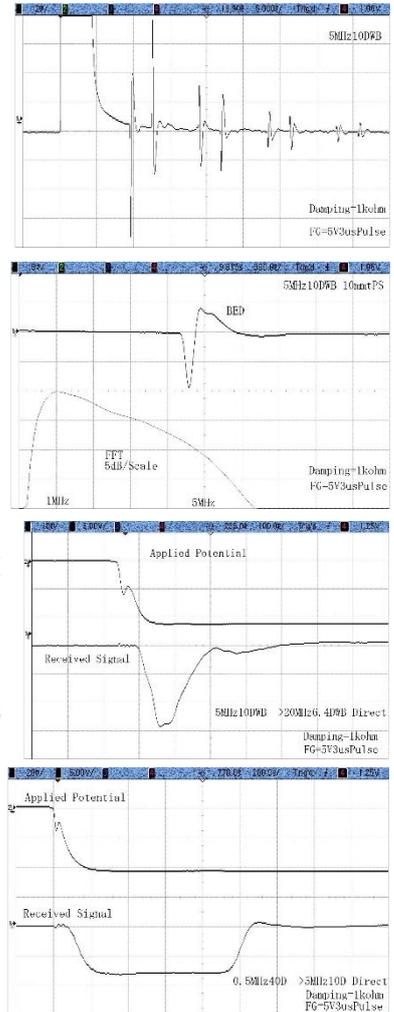
高感度で分解能が高い 1-3 コンポジットの音響結合設計がほぼ完全な場合で、バックিং無の場合は正負 2 つの矩形音が出ます。これも医療用は 1/4 波法を使う場合が多いが、比較的 正負 1 波で収まっています。

保護膜とバックングの無い狭帯域探触子は正負同じ振幅の波形が減衰振動します。一般的に正負の負側は横振動の影響で多少歪みます。感度を上げる為、狭帯域では 1/4 波の保護膜を使うが、この音響インピーダンスが媒質との関係で色々な波形になります。鋼などで良く表れる一例を図示します。保護膜から音がなかなか出ていかない場合、徐々に振幅が上がって、また徐々に振幅が下がる。ガウス分布波形に近い包絡線となります。狭帯域の場合、波の後ろ程高周波成分が無くなり、サイン波形に近くなります。

以降色々な OSC と FG での例を示します。

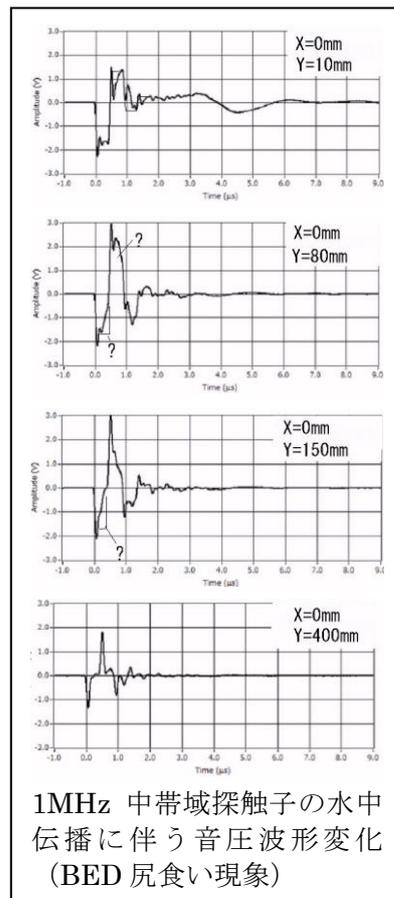
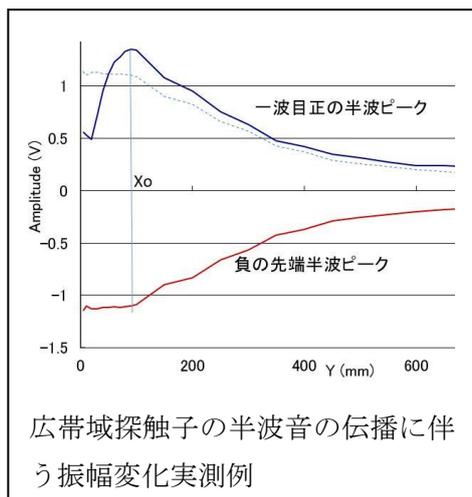
一探触子法 (一部二探触子法)、10 mm t PS 板厚 探触子から出る音波
 探触子:広帯域 5MHz10Φ1nF 保護膜 AL₂O₃ CM12 使用 FG:パルス
 5V500Hz3us、20MHz6.4Φ400pF 保護膜 AL₂O₃、0.5MHz40Φ1.2nF 保護無

振動子は電圧が変化する時に音を発します。3μ秒のパルス幅を印加すると、電圧変化する 3μ秒間隔で正と負から始まる音が振動子から出ます。広帯域探触子は保護膜の厚さは一般に薄く 1/10 波長程度で、余り送信音波波形に影響しません。狭帯域の場合は 1/4 波長で可なり影響します。多くの探傷器等の観測波形 (エコー波形) は最初の半波が小さのが一般的波形ですが、実際にはそうなっていません。拡大すると正音圧 (負電圧) の振動子の厚さ相当の波形に負音圧 (正電圧) の波形が続いた波形になります。後ろに続く波形は多くの場合、メイン・ビーム端から発生した内側 BED が主です。伝搬していくとメイン・ビームが BED の尻食い現象でパルス幅が狭くない、結果振幅が下がります。多くの場合先端半波の振幅が低い理由の一つです。他の理由は保護膜や接触媒質膜の多重反射、探傷器等の入力インピーダンスによる電氣的微分等です。負の電圧パルス幅は 250ns 程度です。FFT した結果のピーク周波数は 1MHz となっていますが、通常の探傷器に繋いで少し離れた反射源からのエコーでは公称周波数の 5MHz 中心のエコーが観測されます。探傷器等との組み合わせで周波数は変わるので。なお、この 5MHz の探触子には Fr7MHz (Fa は 8MHz 程度) の振動子が使われています。探傷器との組み合わせで、画面上に 5MHz の波形が観測できる周波数を探触子メーカーが材質と周波数を選んで使っています。探触子の「公称周波数」≦「振動子の共振周波数」です。この 5MHz の探触子の保護膜面に別の高い周波数 20MHz の探触子を接触して測定すると、当然 20MHz の探触子の特性も加わりますが、次図となります。大まか台形です。印加電圧の立下り時間は概略 50ns 弱です。FG の立ち上がり時間はカタログでは 2ns と高速です。FG の出力インピーダンスと振動子容量 1nF で RC 積分回路が構成され、63% 立下り時間が 1nF × 50Ω = 50ns となります。市販探傷器等の立下 (上) 時間は 50Ω 負荷の時に規定していますが、実際の立下り時間は探触子次第と言う事になります。出力能力が関連しているので、「カタログの立下り時間が短い」≡「探触子を繋いだ場合の立下り時間が短い」です。印加電圧波形立下りの中央の凸凹は、探触子のケーブルによる電氣的反射です。ケーブル長さ変えると変化します。これを無くしたい場合、ケーブル全長を 30 cm すれば、多くの 5MHz 以下の探触子では消えます。探触子内の振動子に実際に加わっている電気波形は、計測できませんが、探触子端子で分岐して測定した方がより正し



い印加電圧が観測できます。この 5MHz、即ち振動子厚さ 100ns 相当の探触子では印加電圧の立上時間が十分短いと言えます。0.5MHz と周波数の低い且つ容量が似たような探触子で試験すると、相対的に立下り時間を短くした状態が次図です。立上立下を除けば、ほぼ矩形の信号が観測できます。なお、振動子中央では横（径）振動の影響が最大になるので、矩形波形は観測できない事が有るので注意。いずれにしろ、広帯域の探触子からは、大まか矩形又は台形音波が発生し、それが伝搬と共に歪み、色々な現象として観測されます。近距離音場内での音圧場の凸凹、近距離音場を過ぎると感度が下がるのは BED の尻食い現象によります。水中など減衰の少ない媒質では近距離音場の数倍まで音圧振幅は変わらないが、パルス幅が狭くなります。即ち音波の周波数が上がります。伝搬に伴う一見非線形現象ですが、元々の矩形波の低周波成分が拡散し、高周波成分が真つすぐ伝搬したとも言えますが、正確な物理的説明は、メイン・ビームが自ら発生した BED による尻食い現象の単なる重ね合わせの結果です。高調波探傷などはこの成分を利用しています。一方減衰する材料では伝搬と共に音波の周波数が下がります。

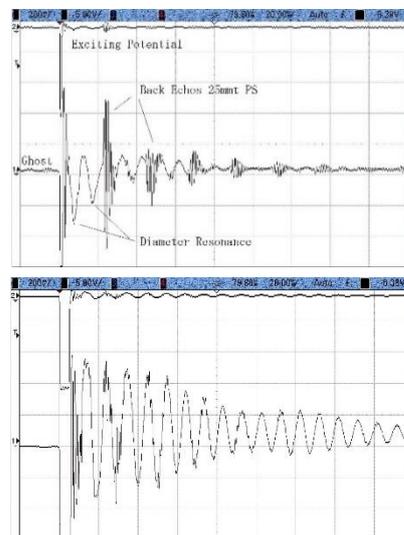
半波の音波を発生させる広帯域探触子の場合、固体中伝搬していくと正負の音圧振幅(正確にはその積分)は等しくなります。振動子が厚さを増し媒質に押す力を与えると、媒質表面は歪みます、が遠距離では媒質の歪みは起きません。従って、押す正音圧と引く負音圧は同じ量になります。探触子近傍でも正の半波の後に観測できない様な周期の長いバックキングからの負の反射音圧があります。後述の W バックキンの項を参照してください。パルス幅の狭い正とパルス幅の広い負の音圧の合計はゼロです。別の言い方では、押したままだと、PRF 毎に少しずつ移動してしまいます。ニュートン力学が成り立つとすれば、外部から力を貰わない限り、押したら引く必要があります。ポイント・フォーカス探触子で、半波音圧の送信をすると、固体中のフォーカス点で正負の一波になります。自然は上手く構成されているものです。

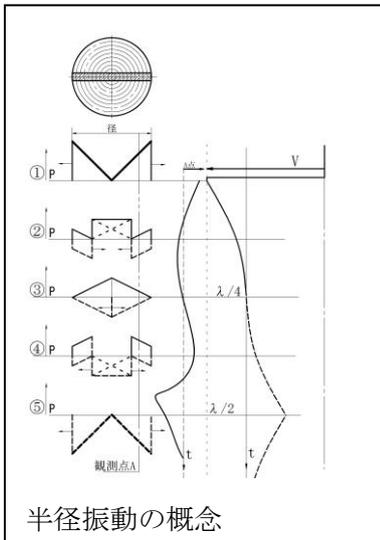


一探触子法、25 mm t PS 板厚 振動子の横共振 探触子:中帯域 1MHz 12.7 Φ 0.8nF 保護膜エポキシ CM12 使用 FG:パルス 5V500Hz300ns

振動子は形を持っています。振動子で発生した音波が外部に直ぐには出ず、内部に残っていると共振現象が起き観測できます。お寺の鐘と同じです。鐘は人が撞木（しゅもく）で打つのですが、振動子では電荷を与えて叩きます。機械的寸法により音色が変わります。探触子内の振動子はその共振又は反共振周波数、即ち厚さを指定して振動子メーカーに手配します。厚さ以外に径も指定しますが、径方向に縦波が伝搬するとポアソン比相当の厚さ変化を招き、結果半径相当の縦波が伝搬する周期の音が出来られます。

1MHz φ 1/2 “の探触子を 25 mm厚さポリスチレン（PS）板に音響インピーダンスが板に近い接触媒質で接触させた波形です。ダンピング抵抗は 1MΩ です。0.1MHz 程度ですので探傷器等では観測感度が悪くなりますし、ダンピング抵抗も低いので小さくなります。励振パル

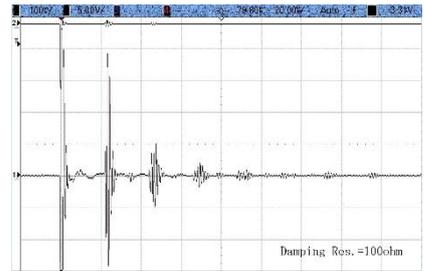




ス幅を半径共振の半周期にすると、半径動が大半になります。ダンピング抵抗を右図の様に 100Ω にすると低周波の振動は観測されません。同時に低周波の重要な音が探触子で受信されてもエコーとして観測されない事になります。

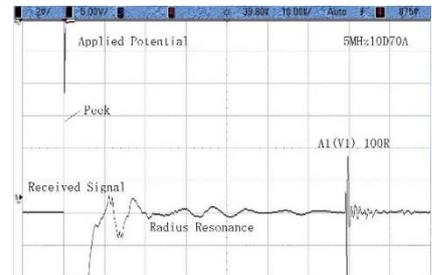
なお曲面振動子を使った探触子の場合、この径共振は抑圧されます。また、音を吸収しやすいバッキングが振動子裏面ある場合、同様に抑圧されます。

与えた電荷に比例した音圧が発生し、音が振動子の外に出ると、振動子が電荷にひれいた歪分厚さ変化します。等価電圧定数と言って m/V の単位です。(同じ振動子では電荷は与えた電圧に比例する。) 振動子によりませんが、 $0.05 \sim 0.3 \text{nm}/V$ です。

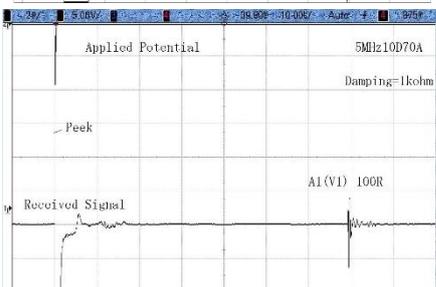


一探触子法、A1 試験片 100R 探触子:中帯域 5MHz10Φ70 度斜角 0.8nF 保護膜エポキシ CM12 使用、ダンピング抵抗 10kΩ、FG:矩形 10V500Hz99.9%Duty

主に斜角探触子の校正に使う試験片の 100R の面を斜角探触子で狙いました。図の様に R 面反射波形の他、その前に径振動が観測されます。径振動が大きく観測されるように円蹴振動子を用いています。JIS 斜角探触子の振動子は $10 \times 10 \text{mm}$ や $20 \times 20 \text{mm}$ が一般的で、同様に共振が観測されます。ヨーロッパでは $8 \times 9 \text{mm}$ や $20 \times 22 \text{mm}$ として帯域の広い探傷器等で横振動が表れにくくしている場合もあります。径振動を小さくするには、波長サイズでの平行な部分を作らない事です。円形板振動子の径振動が一番大きい。円形では振動子厚さを不均一にしたり、振動子の粒界を大きくして弱くできます。波長程度の差のある不等辺(四角)形(Scalene)にすると横振動波殆ど起きません。探触子によっては径振動を抑える為低周波をカットするインダクタンスを探触子内に組込でいる場合もあります。このインダクタンスは振動子の容量を打ち消して感度を上げる働きもさせられます。

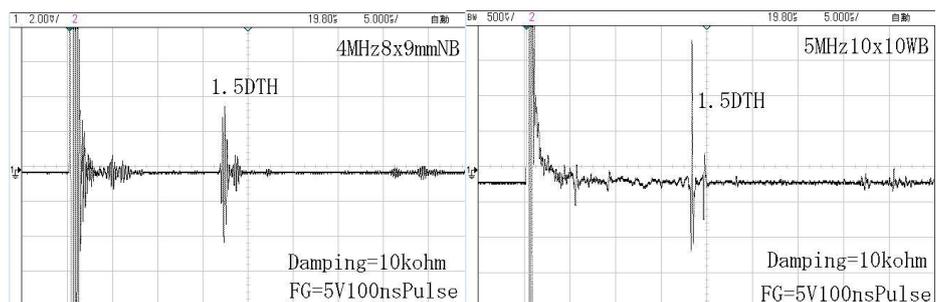


探傷器等では、低周波成分を強く抑制したり、ダンピング抵抗値を小さくしています。前図ではダンピング抵抗は $10 \text{k}\Omega$ ですが、 $1 \text{k}\Omega$ にした波形を右に示します。 $1 \text{k}\Omega$ が探触子の負荷となるので少し振幅が減ります。元々大半の市販探触子は $20 \sim 2 \text{k}\Omega$ 程度のダンピングを使った場合、鋼の探傷に適した邪魔な波形を除くように設計しているので、当然綺麗な波形になり、同時に波数が増えます。一種の探触子の容量 C とダンピング抵抗 R による CR 微分です。一方減衰材など低い周波数が関与する場合に、径振動の様な低い周波数の現象が観測できない事になります。



一探触子法、A1 試験片 1.5Φ貫通 探触子:狭帯域 4MHz8×9mm 45 度斜角、広帯域 5MHz10×10mm 45 度斜角 0.75nF CM12 使用、ダンピング抵抗 10kΩ、FG:矩形 10V500Hz99.9%Duty

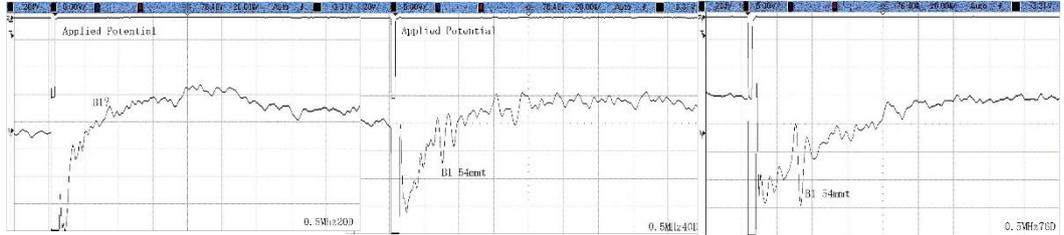
STB-A1 の 15mm 深さの 1.5Φ 貫通横穴をねらった場合の波形を示します。探触子は 1990 年代に生産された狭帯域の $8 \times 9 \text{mm}$ ヨーロッパ型です。振幅が 8mV 程度あり、十分な感度です。狭帯域型は共振を使うので、振動子の感度は非常に高く、最近の 1-3 コンポジットを使っても感度はこれほど上がりません。1-3 コンポジッ



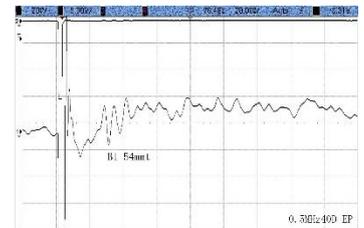
ト振動子は帯域が広く、時間軸分解能が良い探触子を作る場合にメリットが出ます。次図は同じ横穴を広帯域即ち高分解能探触子で観測した例です。感度は前述の 1/4 ほどで、このオシロスコープの最大感度で観測しています。

一探触子法、粒界の粗い材料(コンクリート) 探触子:広帯域 0.5MHz20 Φ 300pF 保護膜 SUS、0.5MHz Φ 40 Φ 1nF 保護膜 SUS とエポキシ、0.5MHz76 Φ 4nF CM12 使用 FG:パルス 5V500Hz300ns

粒界の粗い材料は一般に超音波が通り難い。例えば鋼は5MHzで良く通ると思われがちですが、鋼の元になるインゴットや

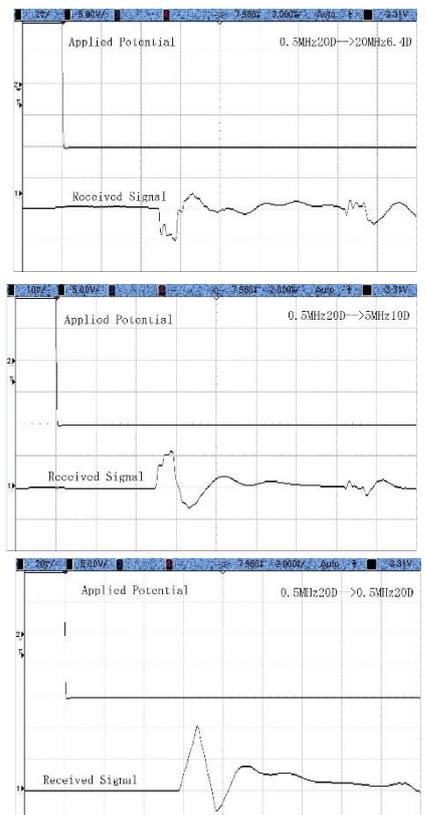


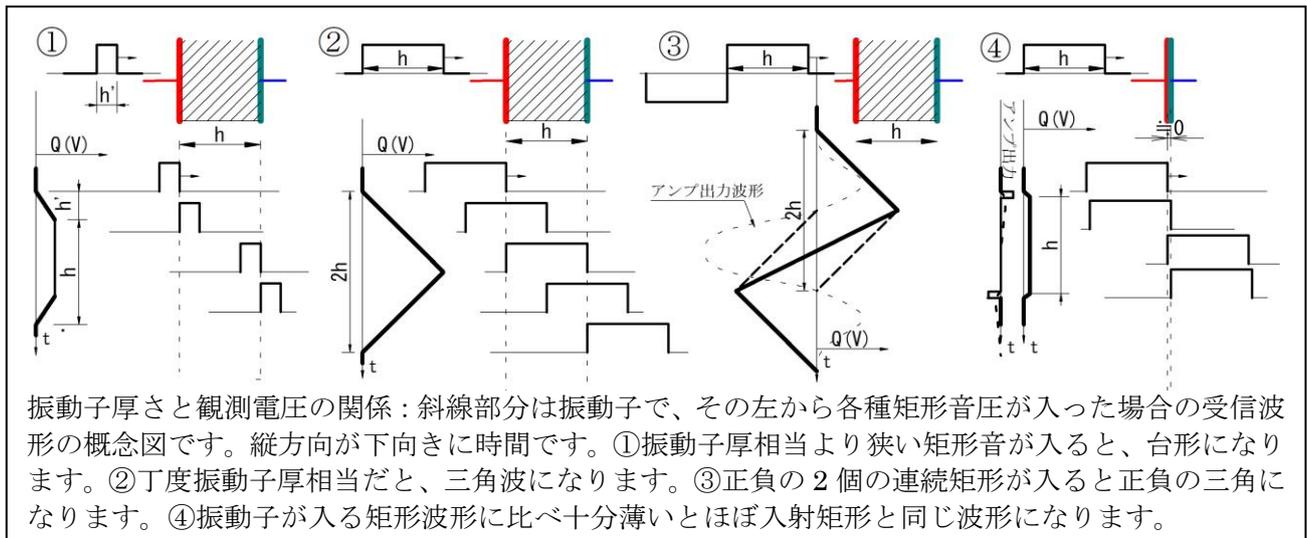
ビレットは粒界がmm或いはcmの単位になり、コンクリートより音の通りが悪く、検査したいが検査できないのが現状です。同じ振動子材質とバックングで、振動子径 20,40,76Φ の 3 種で試験しました。20Φ では 54 mm厚さの普通コンクリートのバックエコーは観測されず、40Φ は観測され、76Φ では明瞭になります。多くの減衰材では粒界の大きさ数倍の振動子径の探触子を使うと音が良く通ります。探触子の周波数は、対象材のカットオフ周波数の下だと減衰しません。それ以上の場合では高くなる程、大きな減衰を示します。広帯域探触子では、受信帯域が DC~振動子の反共振周波数程度と広いので、感度余裕があればどんな周波数でも構いません。コンクリートは音響インピーダンスが瀬戸物に近く、20MRayls 程度です。保護膜に瀬戸物を使うと良くなると思いがちですが、保護膜の厚さは受信波長より十分薄いので、上記例ではあまり変わりません。なお、保護膜が水浸用のエポキシ EP の場合を右に示します。保護膜の厚さが受信音の波長に近い場合は、保護膜材質により大きく変化します。エポキシ保護膜が相対的に薄いので、この例では影響しません。高い周波数の振動子では保護膜は 1/4~1/10λ で設計されています。公称周波数と同じ程度の音を受信する場合には保護膜材料を適切に選ぶ必要があります。



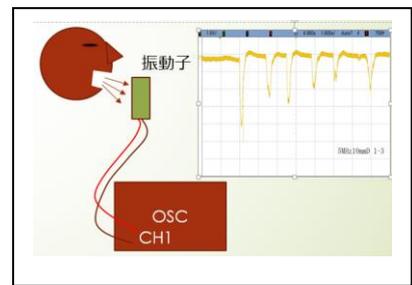
二探触子法、探触子からの送信音、振動子の位相 送信探触子:広帯域 0.5MHz20 Φ 1nF 保護膜 SUS 、受信探触子:広帯域 0.5MHz20 Φ 1nF 保護膜エポキシ (逆位相)、広帯域 5MHz10 Φ 1nF 保護膜エポキシ (逆位相)、広帯域 205MHz6.4 Φ 1nF 保護膜 Al₂O₃ FG:矩形 10V500Hz99.9%Duty

振動子にスパイク又はステップ状の印加電圧をくわえると、振動子厚さ伝搬時間に相当矩形音波が発生します。その様子を右に示します。0.5MHzSUS 保護膜付の送信探触子の直接 20MHz の受信探触子を接触させまし測定しました。最初に凸凹の有る負の矩形に近い波形が観測されます。凸凹は保護膜の多重反射で振動子伝搬時間の 1/4 程度ですので、1/8λ 相当で保護膜を設計している事が判ります。矩形電圧波形が負ですので、音圧は正音圧です。矩形の後の正の出っ張り電圧は振動子の横共振と思われる。画面右端の反射波はバックング又はケースの反射と思われます。10 mm厚さの音の減衰の少ないポリスチレン PS 板を挟んで、5MHz10Φ の広帯域探触子で受信すると、位相は異なりますが、似たような波形が観測されます。全体に高い周波数成分が無く成っているのは、受信探触子が公称 5MHz と低い周波数特性為です。保護膜厚さ相当の凸凹は階段状に成っています。国産の非破壊用の振動子は世界標準と異なり、分極した時に-電圧を加えた側にマークがあります。世界標準は逆に+電圧を加えた側にマークをする事に成っています。マークの位置が異なる事を知らないで、探触子を作る職人が多いので、国産探触子で海外製振動子を組み込んで場合良く





ある事です。海外から輸入される振動子は大半がニオブ酸系で耐圧が高い為、脱分極は減速に起きません。一探触子法では送信時と受信時の2回反転するので、逆に貼ってあっても一探触子法の波形からは分かりません。二探触子法にすると、簡単に振動子の電極の方向が判ります。もっと簡単には、受信振動子を探触子に繋いで、息を強く吹きかけると、正の音圧、大体0.1気圧程度が探触子に入力され、通常1秒程度の負の電圧観測できるのが正常です。保護膜がある場合はその音響透過損失分振幅が減ります。



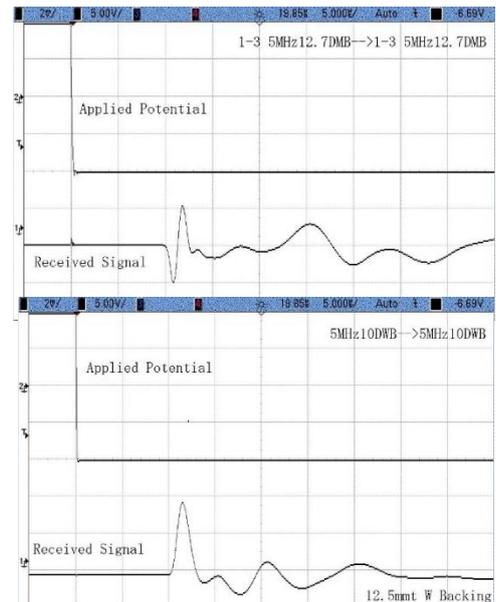
送信と同じ周波数の探触子で透過波を観測すると、三角波になります。前2図に比べ感度が高いです。探傷器等では、更に高周波が失われたエコー波形を見えています。

二探触子法、探触子に使われる減衰材；タングステン (W)・バックング 送受信探触子:1-3 コンポジット中帯域 5MHz12.7Φ1nF 保護膜 EP、広帯域 5MHz10Φ1nF 保護膜 AL₂O₃ (電極逆) FG:矩形 10V500Hz99.9%Duty

振動子からは前後に音が出ます。前後に同じ運動量の音を出さないと、ニュートン力学に反して、振動子は移動する事になります。裏面に行った音は振動子裏面で位相反転して反射します。従って正負一波の音が探触子から送信されます。正音圧は押す力で、負音圧は引く力ですので、差し引きゼロで、元々静止=ゼロでしたの慣性の法則にしたがいます。

広帯域探触子には振動子とほぼ同じ音響インピーダンスのタングステン・バックングが組み込まれ、振動子背面に出た音を分散します。総運動量は変化しませんが、低い周波数に変化させ探傷器等に表示されない様にするのです。

通常の探触子サイズには10mm程度の厚さのバックングしか組み込めません。12.5mm厚のバックングの透過信号を観測しました。1-3コンポジット探触子では綺麗に正負の音圧が観測され、周期は2.5us程度で400kHzです。5MHzの送信音が400kHzに推移したのです。5MHzの広帯域探触子でも2.5MHz以下の感度は頗る悪いので、バックングからの反射は探傷器には現れません。通常バックングから探触子への往復ビーム路程は厚さの2倍で、10mmのバックングで20mmになります。倍になると概略周波数は更に半分になります。振動子続くウネリは振動子の横振動、ケースの振動などです。小さな探触子のケース共振周波数は多くは30~100kHzです。



10MHz10D 広帯域探触子では下のグラフの様に観測されます。送・受信どちらかの探触子の電極は逆

に貼られていますので、観測電圧は正ですが、音圧波正から始まります。約 100ns 幅の半波が送信されていますが、受信波形はパルス幅が $2\mu\text{s}$ と伸びています。周波数に単純換算すると 250kHz で探傷器等と 5MHz 広帯域探触子の組み合わせ時の一般的帯域下限 2.5MHz を大きく下回るので、探傷器等の画面には表示されません。観測信号振幅は 1-3 コンポジットより高いくらいです。1-3 コンポジット探触子は感度が高いと言われますが、水浸法や遅延材付の場合、或いは音響インピーダンスが低い媒質に対して、減衰しない材料に対して、感度が高い探触子を設計できるというのが正しい表現です。また正と負の音圧波がそれぞれ広がって重なるのでその分感度が低くなります。

**二探触子法、探触子に使われる減衰材；コルク音響セパレータ
1MHz12.7Φ1nF 保護膜 EP FG:矩形 10V500Hz99.9%
Duty**

探触子内の振動子からケースに音が伝わらない様に音響セパレータとしてコルクが使われます。探触子の中に使われているのは 1~2 mm 厚さです。6 mm 厚さのコルクの透過試験をした結果が右グラフです。コルクは音響インピーダンスが低いので、1-3 コンポジット振動子とエポキシの保護膜は、鋼用の広帯域探触子等より有利になります。一回通過した音の他、45μ秒間隔の多重エコーが観測されます。22kHz 相当ですので、耳の良い人には聞こえるかもしれません。通常はコルク板が屈曲共振する音が聞こえます。コルクはその減衰を期待して探触子に使っているわけではありません。音響インピーダンスが低いので、金属ケースや振動子との間で透過損失が大きく、結果高い周波数の音が伝わりにくい。探傷器等が音声帯域まで信号を表示したらノイズだらけで使い物になりませんので、当然カットしています。

送受信探触子: 1-3 コンポジット中帯域

