

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

ハイドロホンの使い方

2016/6、2019/1Y.U.

ハイドロホンとは

ハイドロホン (ハイドロフォン) のハイドロ HYDRO は水です。ホン PHONE はテレホンのホンと同じで、音を意味します。ホンは音のレベルを示す単位にも使われています。ハイドロホン自体は水中の音波を意味し、それを解析する為のセンサーをハイドロホンと呼びます。水中調音器と訳される場合もあります。音波の圧力波形 (音圧波形) を正確に測定するのが目的です。水でなくても液体であれば、或いは気体であれば、各位置での音圧波形の測定はできますが、個体では表面でしか音圧波形測定できません。超音波可視化装置などで、赤外～紫外線透明体であればある程度内部の任意位置での音圧波形を観測できますが、光の透過で観測する為その線上の積算音圧です。個体では表面での音圧波形測定が基本ですが、これもハイドロホンと呼ぶ事があります。

ハイドロホンに要求される性能

測定しようとする点に伝わってくる音が、ハイドロホンが無い場合と有る場合で異なると困ります。ハイドロホンは場を荒らさない事が第一で、多くのハイドロホンは小さいです。が、後述する様に小さいと電氣的に性能が落ちる等の為、余り小さいのも問題です。またハイドロホンのケースにより場は歪みます。電氣的測定は振動子面積大きい方が良く、歪量は振動子又はケースの周長に比例します。目的によっては振動子のケースが無いメムブレム型や短冊型、ケースによる歪を少なくした砲弾型や反射型のハイドロホンを使う方が良い場合もあります。

次に音圧波形を正確に測定する必要があります。その為周波数特性が良い事が求められます。連続波の計測では基本波の最低 1/2~2 倍の帯域が必要です。パルス波では基本波の 1/100~20 倍の帯域が必要です。パルス波細部の研究には基本波の 1/10000 倍~100 倍の帯域が必要です。

振動子に使われる材質

振動子には場を荒らさないと言う意味で音響インピーダンスが水の 2 倍程度のポリマー系振動子が使われる事が多いです。ただし、音から電気への変換効率が悪い事、電氣的インピーダンスが高い事など使いにくいので、高い周波数に限定され使用されます。十 MHz 以下の周波数では大半セラミック圧電素子が使われます。特にパルス波の場合、基本波の 1/100 程度の周波数まで必要になりますので、低域には注意が必要です。ポリマー系振動子は音響インピーダンスが液体に近いが、液体と異なり、横弾性が高く、液体の粘性が大きな状態ですので、平面波を受ける場合は問題ありませんが、波面が凸凹の場合、かなり影響します。

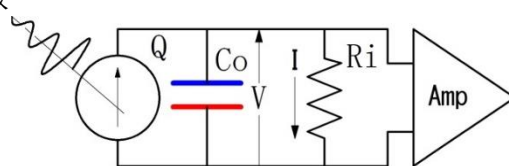
振動子の大きさと電氣的インピーダンス

ハイドロホンに使われる振動子の誘電率を ϵ とすると振動子の面積 S と厚さ t から、振動子の容量 C

は $C = \epsilon S/t$ となります。物質の誘電率は通常真空 ($80854 \times 10^{-12} \text{F/m}$) を基準にした比誘電率 ϵ_r で示します。センサーによく使われるポリマー系振動子の比誘電率は 4~13、セラミック系は 30~10000 です。この中間はセラミック圧電体とポリマーのコンポジットで実現されます。コンポジットの構造は 1-3、2-2、0-3 の 3 種が実用化されています。コンポジット名称の数値の意味は連続性で、0 は連続性無し、1 は一軸方向に連続、2 は二軸方向に連続、3 は三軸方向に連続の意味です。振動子屋は、- の左側はセラミック、右側はバインダーの連続性を示します。プラスチック屋は 1-3 を 3-1 と逆に呼びます。1-3 は一方向に連続したファイバー状で、その周囲にバインダーが埋まっている事を示します。0-3 はバインダーの中にセラミックが分散している事を示します。1000 を超える比誘電率がが必要な場合は単結晶のセラミックを使う事もあります。振動子は固有振動周波数以下ではほぼコンデンサーと見做して良いです。

接続するアンプの入力インピーダンスと低域カットオフ周波数

振動子はケーブルを使ってアンプに接続されます。ケーブルは波長より十分短ければ容量と見做せます。アンプには入力容量があります。これら全部の外部容量と振動子容量を加えたものを C_0 として、アンプ入力インピーダンス R_i との間



で CR 微分回路を構成します。音波が振動子に入ると、歪を振動子内部に発しします。その歪に比例した電荷 Q が電極に現れます。歪は音波の波長が振動子厚さより十分長ければ音圧 P に比例します。従って

$$V = \frac{Q - \int I}{C_0} \quad I = \frac{V}{R_i} \quad \text{依って} \quad V = \frac{Q}{C_0} - \frac{\int V}{C_0 R_i} \quad \text{又は} \quad V + C_0 R_i \frac{dV}{dt} = R_i \frac{dQ}{dt}$$

$C_0 R_i$ の時定数で分けると

$$V = R_i \frac{dQ}{dt} \propto \frac{dP}{dt} \quad : C_0 R_i \text{ が小さな場合}$$

$$V = \frac{R_i}{C_0} Q \propto P \quad : C_0 R_i \text{ が大きな場合}$$

となります。時定数 $C_0 R_i$ が大きな場合にのみ音圧 P に比例します。 $C_0 R_i$ が小さな場合は微分され、例えば AD 変換すると低い周波数成分はビットノイズ以下になり、計測後積分してもノイズに埋もれ再生できない事になります。従って $C_0 R_i$ を十分大きくする必要があります。 $C_0 R_i$ の振幅低域カットオフ周波数は以下です。

$$F_c = \frac{1}{2\pi R_i C_0}$$

振動子の厚さと基本固有振動周波数

電子素子の電気的特性を調べる機器にインピーダンス・アナライザーがあります。この測定方法には何種類かありますが、原理的にはテスト素子に連続波を印加して、その反応を観測します。振動子もこの方法により、共振周波数 F_r (電氣的直列共振) と反共振周波数 F_a (電氣的並列共振) が測定できます。 F_a は F_r より必ず高いです。これらはいくまで電氣的に観測した「振動子全体の電気的特性」です。電子素子として、例えば水晶発振器などの目的で振動子を使う場合は、これらには意味があります。一方音

波観測するセンサーとしての共振周波数は異なります。機械的共振周波数は一般に固有振動数と呼ばれます。外部から音が入った時の共振です。振動子の材料音速を V 、振動子の厚さを t とすると、基本共振周波数 $F_0=2t/V$ となります。これが径の大きな振動子厚さ方向の固有振動数です。径が厚さに近づくと厚さ方向の振動が段々径方向の振動に変換する為振動子をインパルスで叩いた直後は F_0 が観測されますが、段々周波数が変化します。

なお、振動子メーカーのカタログの音速、波長定数や音響インピーダンスは電氣的共振 F_r から逆算する事が多く、そのまま使うと実際に合いません。例えば多くの振動子で音響インピーダンスはカタログと実際の誤差は 5~40%に成ります。

振動子電極に電氣的な接続が無い場合、 F_0 は多くの場合 F_a より少し上に観測されますが、殆ど同じなので、 $F_0 \approx F_a$ と考えて実用上問題ありません。物体としての共振周波数相当は F_a です。受信回路が繋がって、振動子の負荷のインピーダンスが振動子より小さいと、共振周波数は F_r となります。また、負荷が小さな場合、負荷に電流が流れ、当然振動子にも電流が流れます。この電流により音が発生しますが、負荷が小さいとその音により歪が発生します。

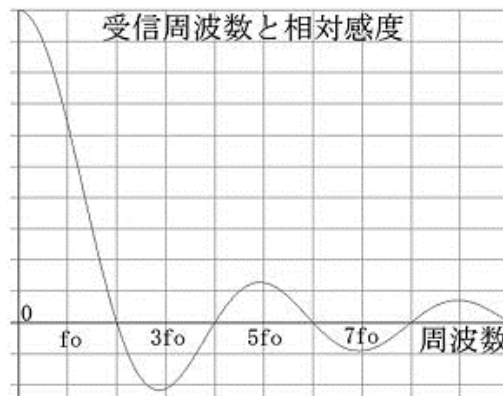
F_r と F_a 比は振動子種類により差があります。セラミック系の多くは $F_a/F_r=1.02\sim 1.1$ です。一般的に単結晶に近いと 1 に近く、広帯域探触子などに使うニオブ系の粒界の大きなものが集まった振動子の場合大きくなります。その為、コンポジット系はこの比が 2 に近づく事もあり、共振周波数 10MHz の探触子は 20MHz の固有振動の音を送信している事もあります。

実際の音の周波数は接続されるアンプやパルサーのインピーダンスによります。パルサーは通常は音を出した後切断されます。ダンピング抵抗のみが探触子に繋がった形に成ります。アンプはつながりっぱなしですが、一般に大きな入力インピーダンスです。が大きな振幅では保護回路働いて小さな入力インピーダンスになります。探触子等の条件次第で探触子に接続しているインピーダンスが動的に変わります。単純に一定のインピーダンスが探触子に繋がっている場合、探触子のインピーダンスより大きいと F_a に近づき、探触子のインピーダンスより小さいと F_r に近づいた音を出します。受信時も感度の高い周波数は同様になります。探傷器やパルサーレーザでは送信時の電氣的出力インピーダンスと受信時の電氣的入力インピーダンスが異なります。従って、送信時と受信時では探触子は違う実効共振周波数で動作している事に成ります。使う探傷器やパルサーレーザでエコーの周波数が違う要因であります。

市販振動子は F_r で規定して販売されており、その主目的の電氣的信号発振器では F_r を使った発振回路を構成します。時計などのクロックは使う回路を考慮し振動子を設計製作されます。

共振は、基本固有振動より高い周波数でも共振が起きます。固有振動は基本固有振動とその奇数倍で起きます。水晶発振器を作ると、基本波で発振させる積りが 3 倍や 5 倍の周波数で発振する事があります。基本固有振動とその奇数倍ではセンサーとしての受信感度が高くなります。逆に基本固有振動の偶数倍の周波数では感度が悪くなります。

昔水晶時代はこの現象を使って 1MHz の水晶振動子で実質 100MHz の原子力パイプの肉厚測定をして



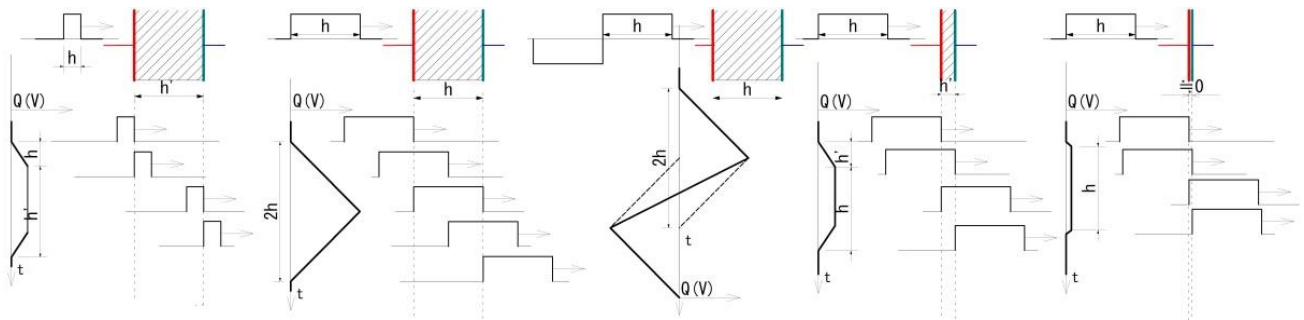
いまいた。

受信振動子の厚さと観測波形

矩形音圧波が垂直入射した場合の発生電荷を考えます。次図の斜線が振動子です。振動子厚さより狭い幅の音が垂直入射すると、図左の様に振動子の厚さ相当の波形が観測される事になります。振動子の厚さ以上の波形は観測出来ないと言う事です。

広帯域探触子をスパイク励振すると多くの場合振動子厚さ相当の矩形の半波音が発生します。一探触子法で直近に置いた同じ探触子で受信すると下図 2 番目の様に、振動子厚さと音波幅が同じため、三角波が観測されます。狭帯域の振動子の場合に正負一波又はそれに共振が加わった波形が出て、それが入ってくると、中央の様に三角の連続が観測されます。現実には媒質、電子回路など帯域がある為に高周波成分が消えてサイン波に近い形で観測されるのです。

振動子の厚さが入射波波長より薄くなると、段々入力音波に近い波形が観測できる事になります。が、感度が下がります。音波波形の観測精度と感度はトレードオフです。



バッキング

振動子にはバッキングを付加します。薄い振動子の機械的強度を上げる意味合いと裏面に伝わった音を出来るだけ吸収して再び振動子に音が伝播して、計測結果に悪影響与えるのを避ける為です。バッキングが無いと、音が振動子内で往復するので、基本固有振動とその奇数倍付近の感度が高いのです。バッキングを付けると基本固有振動の感度が下がると同時に、DC から基本固有振動周波数までが均一感度に近づきます。バッキングの素材の音響インピーダンスを振動子と同じとして、バッキングに一度入った音が戻って来ないか、戻って来ても観測出来ない様な波形にする工夫をすると DC から基本固有振動周波数までが均一なセンサーとなります。広帯域探触子と呼ばれる探触子は殆どが音響インピーダンスを考慮したバッキング材が使われています。音響インピーダンスの高い材料粒子を集合した構造で多くは多孔質で水を吸いやすい。また、温度で音響インピーダンスが激しく変化するので、注意が必要です。なお、メムレン型や短冊型は、音響インピーダンスが液体に近い軽いフィルムを使って歪の発生を押しウエル概念ですので、基本バッキングを付けません。共振周波数を避け、より低い周波数で使う事を前提にします。

市販探触子、ハイドロホンで測定可能な周波数帯域

観測される周波数下限は CoRi カットオフ周波数又はバッキングできまり、周波数上限は基本固有振動数で決まります。市販探触子ではバッキングによる周波数下限は公称周波数の 1/20~1/100 前後が多い

です。バックリングが大きいと下限周波数は下がりますが、標準ケースに入らなくなるので、ケース寸法で制限されます。バックリングからの波形は計測時間差で判断できるので、実験上の制限にはなりません。基本固有振動数はほぼ公称周波数なので、従って計測帯域は

「CoRi カットオフ周波数」～「公称振動数」

となります。なお、公称周波数の定義はメーカーにより異なり、振動子の共振周波数を公称周波数にしているメーカーもあれば、一探触子法で特定のパルサーレーザで観測される受信波形のスペクトラムの半値中心としているメーカーもあります。定義で倍半分近い違いが発生します。

一般的計測帯域の例

以下に一般的例を示します。Ri は一般的探傷器やパルサーレーザは可変式が多く、20Ω～200Ωなどと変えられます。50Ω系の計測器の概念で電気回路の設計している為です。市販機器は入力インピーダンスが高くて2kΩ程度です。以下では50Ω、2kΩとオシロスコープの入力に接続した時を仮定して計算しました。

	5MHz10φ 広帯域	20MHz6φ 広帯域	20MHz3φ 広帯域	25MHz6φ ポリマー
振動子電極容量	1000…3000pF	1000…3000pF	250…750pF	16…36pF
50Ω の時のカットオフ周波数	3.2M…1.1MHz	3.2M…1.1MHz	12.8M…4.4MHz	200M…90MHz
2kΩ の時のカットオフ周波数	80k…27kHz	80k…27kHz	320k…100kHz	5M…2.2MHz
1MΩ の時のカットオフ周波数	160…53Hz	160…53Hz	640…220Hz	10k…4.4kHz

1000pF 電極間容量の 10MHz の極標準的広帯域探触子を 50Ωの入力アンプに繋ぐと、低域カットオフ周波数は 3.2MHz で、公称周波数が 10MHz なので、帯域は 3.2MHz～10MHz となります。必ずしも計測者にとっては広帯域と言えません。25MHz の 16pF のポリマー探触子に至っては、低域のカットオフ周波数は 200MHz なのに、公称周波数は 25MHz で、下限 200MHz、上限 25MHz と全ての周波数で使えない条件になります。受信波形は概略入射音波波形の微分相当と言う事です。

入力インピーダンス 2kΩ のレーザに繋いだ 250pF の 20MHz3φ 広帯域探触子では下限は 320kHz なので、320k～20MHz で数 MHz の音を測るには十分とは言えないが、まあまあの帯域です。

オシロスコープに直接接続し、入力インピーダンスを 1MΩにすると、どの探触子も広帯域観測が出来ます。20MHz6φ の広帯域探触子では 100Hz 前後から 20MHz 程度まで測定できるので、1MHz 付近パルス音波は精度よく観測出来ます。

5MHz のパルス音波を観測したい場合は、出来れば帯域は 50kHz～100MHz 欲しい。この場合 100MHz の広帯域探触子とオシロスコープ直接でしか精度よい厳密な観測ができない。100MHz と高い周波数帯域ではケーブルの数 cm の違いで波形が変化するので、専門家に相談して設計してもらわないと良い測定が出来ません。それほど厳密性が不要でない場合は基本波の 1/100～4 倍、即ち 50kHz～20MHz とすれば 3 倍高調波が観測できます。3 倍高調波が多く観測された場合、5 倍高調波の存在も疑えます。ザグも観測できる低域が確保されています。

ニードル型やメンブレン型でΦ1 mm以下の製品が販売されていますが、一般に帯域下限が制限されま

す。受信径サイズと空間分解能はトレードオフですので、計測目的に合った、無理をしない振動子径と周波数を選ぶと良いでしょう。

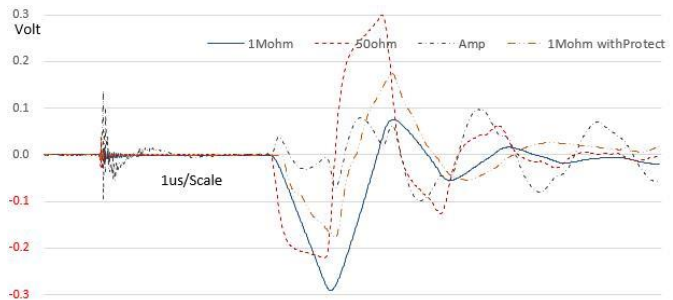
保護膜に関して

保護膜は一定の厚さがあり、音響共振特性を持ちます。要は一種のフィルターです。感度を上げる為に使われる $1/4\lambda$ 保護膜は、基本波 λ とその奇数倍周波数を良く通すフィルターで、これが付いていると折角の音響整合したバッキングの役目を無駄になります。広帯域探触子は多くは $1/10\lambda$ 以下の保護膜を付けます。 hidroホンとしては保護膜が無い方が良いのです。ポリマー系 hidroホンには薄い電極剥き出し型が多い理由です。電極剥き出しだと、電極が水中に溶け出します。特にガルバーニ電気作用が発生するような水槽（アルミ製など）の場合短時間で電極が無くなります。SUS 水槽ではガルバーニ電気作用が殆ど発生しない。電池で水槽と探触子間に逆電圧を掛けても良い。極薄い保護膜を付けた方が無難です。

剥き出し電極が無くなった場合、振動子の種類によりスパッタリングで電極を再生できます。5回程度まで再生した事もあります。(弊社にて有償)

アンプの入力インピーダンスの違い、保護膜の有無による波形の違いの実例

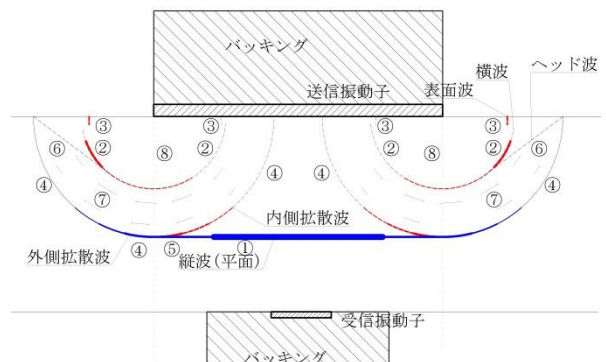
実例を示す。オシロスコープ直接でオシロスコープの入力インピーダンスを $1M\Omega$ に設定した場合、 50Ω に設定した場合、市販パルサーレーザのアンプに繋いだ場合、シロスコープの入力インピーダンスを $1M\Omega$ で保護膜有の場合の例です。



hidroホンの振動子径

小さな振動子の方が測定場を荒さないと言う事で良い様に思えるが、前述の様に振動子電極間の容量が減って、下限カットオフ周波数が上がるので、大幅には小さくできない。

他の問題は振動子径が小さくなると、斜から入った音の感度が相対的に上がる事です。振動子面に垂直成分を測定したい目的ならなるべく大きな方が無難です。hidroホンを音波送信用に使う場合も注意が必要です。音は力学的運動なので、慣性の法則で直進し、音が広がるのは、平面音の左右が音の無い空間であるので、そこに音圧が拡散する為で、これを **BED(Beam Edge Diffusion)**と呼んでいます。(一般に回折波とも共呼ばれますが、角があるから音が広がるのではなく、ビームの端に音圧傾斜があるから広がるのです。) この影響で、振動子から出た平面波の周囲からドーナツ面状波が発生します。個体液体気体でその拡散プロセスは多少違います。右図は個体の場合で、液体気体もある程度想像できるので、これで説明します。①の平面波に両側から④の外側 **BED** が発生し、これは平面波と同位相で、この外への変位により内側に平面波と逆音圧の赤色④内側 **BED** が発生する。①



が正の音圧の場合、図の右の④は反時計回りの回転変位で、図の左の④は時計回りの回転変位となる。波の進行に直角の変位の為、横波が発生するが、音速が異なるので置いてきぼりとなる。段々縦波と離れ、振動子周囲で発生した逆位相の横波②で解消される。これらの横波は水中では粘性で僅か発生する。気体中は計測されていない（多分計測レベル以下）。

平面波①と内側④の三角形的な領域でしか平面波が観測できない。従って透過法などで材料物性を測定する場合、送信振動子は大きくして、④が邪魔にならない距離で測定する必要があります。受信振動子は④の影響を排除できるサイズにする必要があります。水中に探触子を配置し、その間に試験材が無い場合と有る場合の比較、或いは異なる厚さの試験材での比較試験では、平面波が材料表面に伝わった時に、図の振動子の付近と同じ色々な波が発生するので注意が必要です。

また、試験材が細長いと一般に側面効果と呼ばれる側面の影響を受けます。側面の影響を受けない為には概略厚さは径の半分以下、できれば 1/3 が望ましい。送・受信センサーの相対軸位置を移動させても波形が変らなければ良と考えられます。

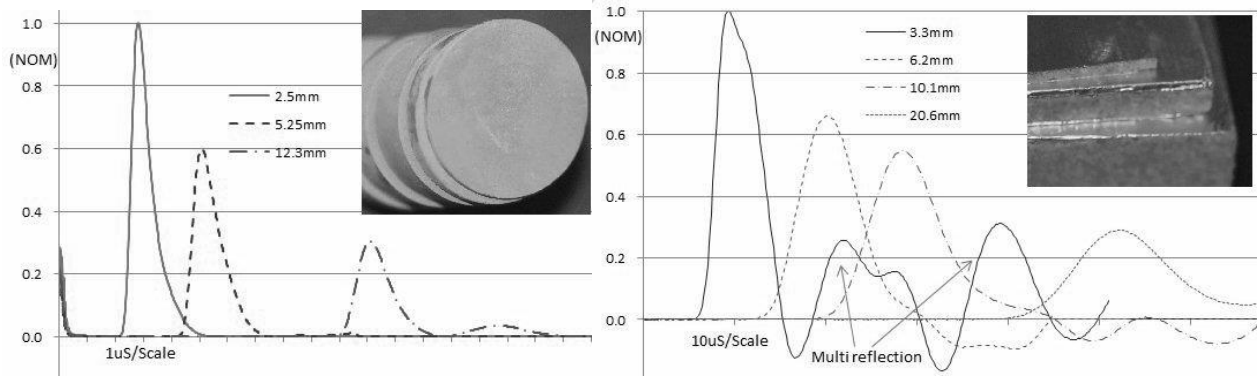
以上送信の場合を説明しました。受信の場合を考えると、垂直平面波が探触子に入ったとすると、BEDの量はエッジの長さ即ち探触子径に比例します。一方入力垂直平面波のみの振動子への入射量は振動子の面積に比例、即ち振動子径の二乗にします。多くの場合探触子径と振動子径は近いし、比は似たようなものです。従って、径が大きいほど、入射音波量が BED 量に対して大きくなり、BED の影響が小さくできると考えられます。探触子が小さいと BED が主となり、径の小さな探触子では歪が多いと言う事になります。局所の音圧をマイクロホンで測定する事は事実上困難です。

なお、ケースに入っていない、メンブレン型や短冊形（媒質が水の場合広いシート状ポリマー系振動子材の中央の一部を振動子にしている）のマイクロホンは比較的共振周波数より低い周波数の局所音圧測定には良い。厚いさが厚いと影響が大きいので、十分高い周波数にする必要があります。ポリマー系の為、誘電率が低く、電気的インピーダンスが大きくなるので、カットオフ周波数が上がるので、帯域下限に注意が必要となります。

実測例

ここで減衰の大きいと言われる探触子のバックング材とコルクの測定を参考に示します。水浸法では水が染み込むし、感度も足りないので直接接触の為保護膜有を選定して、帯域は入力インピーダンスを上げて確保した。送信音波は 100nS 又は 1 μ S の半波矩形パルスです。受信波周波数成分はこれより十分低いので、保護膜の影響も排除されている。低域カットオフが低い為高減衰材でも容易に透過波を観測できます。

対称	送信センサー	受信センサー	受信帯域
バックング材	5MHz 24 ϕ 1/4 λ 保護膜有	50MHz ϕ 5 保護膜無	150Hz~25MHz
コルク	0.5MHz 76 ϕ 1/10 λ 保護膜有	5MHz ϕ 10 1/4 λ 保護膜	15Hz~5MHz



ハイドロホンでの波形測定系の構築

ハイドロホンとそれに繋ぐアンプの選定は意外と厄介です。一般的手順を述べます。

A) 測定帯域の決定

何を測定するかによりますが、一般的には測定する基本波の最高周波数より最低 10 倍を上限 F_u 、基本波の最低周波数の 1/100 の下限周波数 F_l とします。

B) 振動子の周波数

振動子の共振周波数は F_u 以上とします。

C) ハイドロホン振動子径

ハイドロホンの振動子径は一分解能を上げるには小さい方が良いですが、カットオフ周波数が下がるので、必要最低限とします。

D) 振動子材質

F_u の共振周波数の $1/2\lambda$ 厚さが、振動子径の $1/20$ 以下が無難です。最悪でも $1/10$ となる材質にします。比がこれより大きいと、広帯域に成らない、横振動が発生するなど、問題が発生します。

E) アンプの選定

カットオフ周波数が下限周波数 F_l より低くなるようにハイドロホンを繋ぐアンプを選定します。オシロスコープ直接であれば $1M\Omega$ 、オシロスコープのプロープを使えば $10M\Omega$ 又は $100M\Omega$ が可能です (感度は $1/10$ 又は $1/100$ に成ります)。感度が足りない場合、ハイドロホン用のアンプを使います。

$$F_l > \frac{1}{2\pi R_i C_o} \quad R_i : \text{アンプの入力インピーダンス} \quad C_o : \text{探触子と探触子ケーブルの合計容量}$$

F) 無理なら再度緩める項目を決め再検討