

やさしい超音波の基礎 Back to the Basic of Ultrasonic

その3 受信音圧と受信電圧波形

非破壊で使われるデータは探触子で送信され、探触子で受信された結果である。非破壊超音波理論で音場のみに関す議論が多く、受信特性に関する議論が少ない。受信に於いてより大きな干渉現象が起き、これが実際の非破壊機器の結果に近い。

市販の超音波電子機器は超音波の原理を考え設計される場合が殆どない。従来製品との兼ね合いやコンペチターとの競合関係を重視して、売れる製品を作る方向で設計される。一見客受けする表示性能、使い勝手、携帯性などが主要な設計仕様である。

感度、周波数帯域、分解能、画面のリフレッシュレートなど電氣的仕様が中心である。取扱説明書を見ても、超音波に直結する機能性能に関する記述は極まれである。

非破壊検査の規格は全体の系としての規格であり、音圧波形など超音波に踏み込んだ規格は世界を見ても見当たらない。超音波の音圧波形という言葉を使わず、観測波形と言う事で規格化されたものなら正しい。系としてそう思い込んでいるので、実用上の問題は殆ど発生しない。

しかし、何かを開発、研究する場合は、音圧波形が電子機器によって、どの様に料理=変形され、表示されているかの知識が必要となる。特に研究者には必修事項である。

音波の伝搬途中で、低周波が拡散し、高周波が直進する事から、帯域が伝搬に従って狭くなる。探傷器は 50 Ω系で設計され事実上(不完全)微分回路的動作をする。また、市販機器は見かけの時間軸分解能を上げる為に、アンプ格段で低周波をカットしてある。これらが半波や1波を観測するチャンスが少ない理由である。半波や1波を容易に観測できる様に設計すると、不要な低周波成分が観測されて、通常の検査ではSNが悪くなって欠陥を見失ったりする恐れがある。非破壊検査機器は検査が目的なので、検査者が間違いを犯し難くする設計は妥当性がある。一方で基礎的実験研究には適していないと言える。一例を言えば、振動子は厚さ振動すると同時に径振動する。大抵厚さに比べて径は数十倍と大きい。10Φ5MHzの探触子で100kHz程度の径振動し、低い周波数は減衰しにくいので可なり長い間続く。これが探傷器の画面に表れたら、検査など出来ない。探触子内部でこれを抑える工夫もしているが、通常探傷器がこの信号を消している。

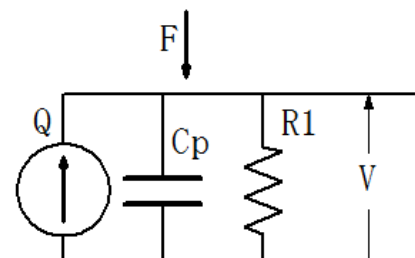
振動子の等価回路は右図である。

波長に比べ薄い振動子に音が振動子面法線方向に入ってくると音圧に比例した電荷が振動子両端に発生し、これが C_p に溜まって電圧として観測される。発生した電荷を Q 振動子両端電圧を V 振動子に加わる圧力を F

$$V = Q / C_p \quad Q = d_{33} \times F$$

とあらわせる。 d_{33} は圧電素子を厚さ方向に F で押した時に発生する電荷の比例係数

通常媒質内で高周波成分が減衰し、振動子へ垂直に平面波が入る事は稀なので、共振特性は表れ難く、特に広帯域探触子の場合、音圧に比例した電圧が発生すると考えて良い。更に最近の振動子の電気機械変換効率が高く、音のエネルギーが電気エネルギーに変換され、それがダンピング抵抗などで効率的に消費され、また探触子を媒質に接すると超音波外部に出るので、実質の Q が下がる。即ち共振特性が抑えられている。中帯域でも受信時は



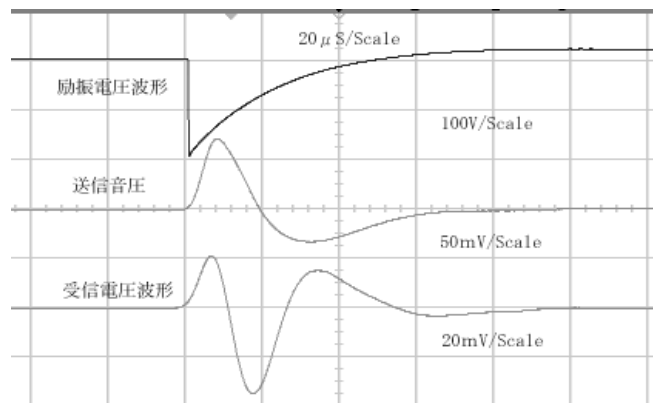
振動子の等価回路

多くの場合、音圧に比例した電荷が発生している。狭帯域の場合は共振特性が現れる事が多い。特に探触子の軸を受信波の方向に厳密に合わせると発生する。

非破壊超音波では余り使われていないが、チャージアンプを使うと音圧を通常広帯域探触子で観測できる。加速度計センサーはチャージアンプの使用を前提に設計される。マイクロホンなども高インピーダンスアンプを使っていて、事実上のチャージアンプで、音圧を計測して波形に変換している。また、超音波で音圧測定に使うハイドロホンは原則チャージアンプと組み合わせる。衝撃弾性波の応用では加速度計センサーの方が良いなどと言う人もいるが、これは単に加速度センサーがチャージアンプと組みで使われ、低周波成分がカットされない為で、加速度計センサーが通常の超音波探触子より性能が良いわけでは無い。通常の超音波探触子とチャージアンプの組み合わせは遥かに周波数特性性能が良い。

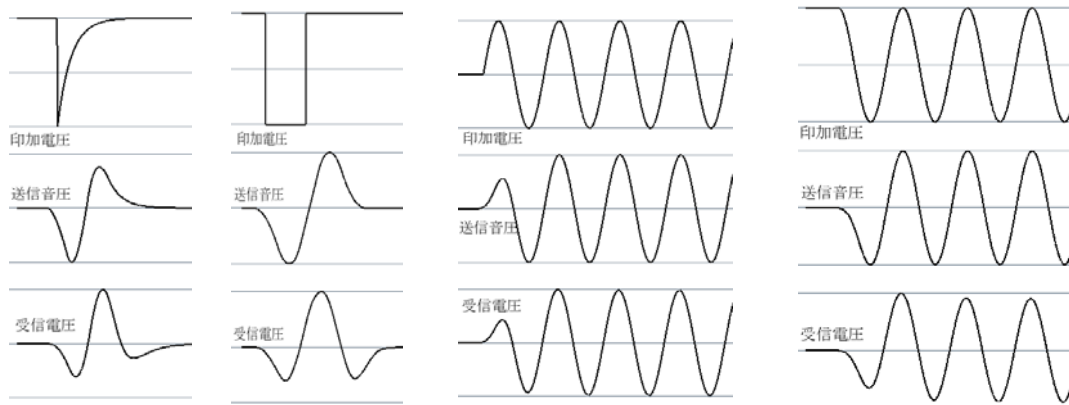
既に所有している探傷器等の入力インピーダンスが低い場合、音圧に近い波形得る方法は前式の C_p を大きくする事である。 C_p の大きな振動子素材を使って探触子を作るとより音圧に近い波形が得れる。また、 C_p にコンデンサーを並列に接続した探触子が売られている。超広帯域と詠っているが、意味は広帯域音圧表示であろう。通常の広帯域探触子に高耐圧コンデンサーを組み込んだものである。広帯域表示アダプター類も販売されている。

送信印加電圧、送信音圧と受信電圧を測定した例である。送信探触子のすぐ前に同じ特性の受信探触子を対向して置き、その面での音圧（中段）と 50Ω 入力にしたパルサーレーザ初段出力を実測した。励振電圧波形はスパイクであり、その先端の急峻な立下りで、探触子の共振周波数に近い高い成分の音圧が発生している。印加電圧の立ち上がりは緩やかな為、音圧もゆっくりとした負の音圧が発生している。レーザ増幅結果は、これをほぼ微分した形となっている。初段で観測したのは、レーザの各段にフィルターが設けられていて、低域がカットされている為その影響を除外する為である。



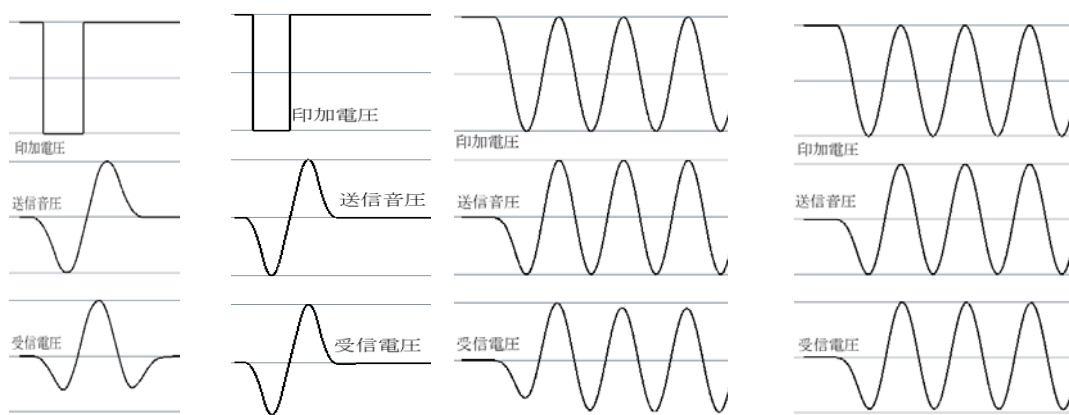
以下に送信探触子の直近に対向して置かれた受信探触子で観測される代表的励振波形、受信波形のシミュレーション結果を示す。励振周波数でダンピング抵抗が振動子の電極間容量より十分低い場合で、一般的市販探触子と 50Ω 程度のダンピング抵抗の条件に近い。実際の機器ではそれぞれ理想のスパイクやスクエアからずれがあるので、以下から多少は変化するが、大体正しい事を確認している。大昔のスパイク型の狭帯域用探傷器でも、送信音圧は半波～1波、受信波はアンプ初段出力で1波～1.5波を確認している。

スパイク スクエア サイン・バースト コサイン・バースト



ダンピング抵抗をその機器の最大値とすると、より音圧波形に近い受信波形が観測される。ダンピング抵抗=受信回路入力インピーダンス R_{in} の違いに依っての違いを以下に示す。

スクエア スクエア コサイン・バースト コサイン・バースト
標準的 R_{in} 大きい R_{in} 標準的 R_{in} 大きい R_{in}

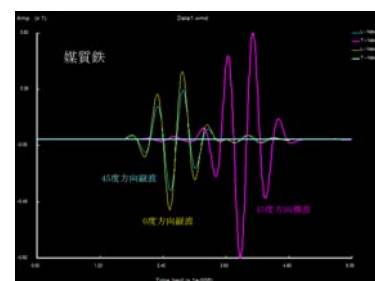
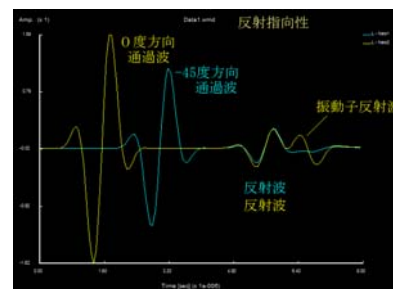
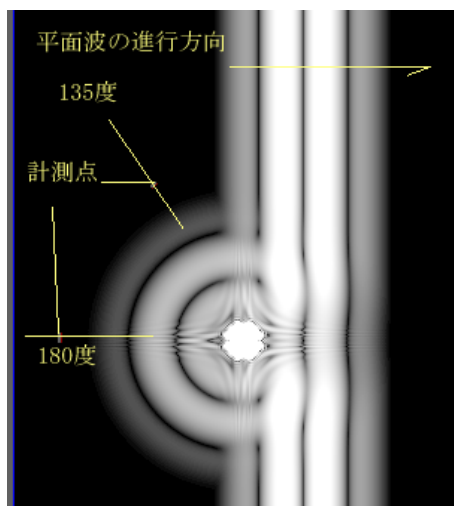


入力インピーダンスに相対的に低いと、受信電圧波形は音圧波形の微分に近い波形になる。その為、音圧が 1MHz 相当波長の一波の場合、観測波形は 1.5MHz 相当の波長になる。観測波形と音圧波形は中心周波数、周波数帯域が違う事に注意が必要である。ダンピングを調整すると周波数は音圧波形の 1~1.5 倍になると言う事が出来る。

逆に言うと探触子の中心周波数は、パルサーレーザの調度によって、1.5 倍変わると言う事である。広帯域探触子を使う場合、探触子と探傷器等の組み合わせで実際に有効な周波数も変わっている。これが、特定の探触子と探傷器等の組み合わせで上手く行ったが、他の組み合わせでは上手く行かない事の理由の一つである。音圧波形が同じであれば、音圧上の結果が同じであるが、電子機器との組み合わせで異なって表示される。機器の特性が理解できれば、他の組み合わせでも同じ結果を出す事が出来る。

常に音圧についての議論をする場合は、観測波形が音圧を正確に表示する測定系を用いる必要がある。

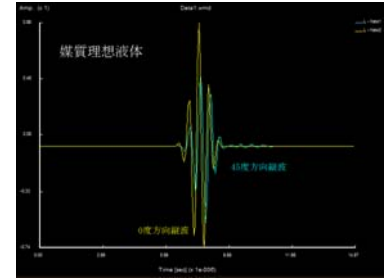
なお、連続波に近い、波数の長い場合は、或いは正規分布バースト波は微分しても、積分しても、その相対振幅や周波数が変わらない。その為、昔の非破壊の書物には波形の振幅と音圧が比例すると書かれている。パルス波ではそうはならないので、厳密に音と観測信号の関係を



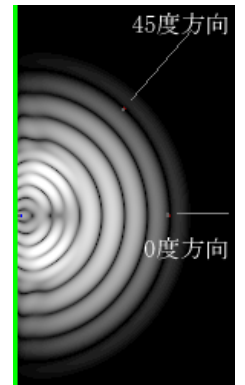
理解した上で応用、議論しないと大きな間違いを犯す可能性がある。

点反射源からの受信電圧波形

振動子に垂直に波面が入ってきた場合を議論したが、検査でそうなる事はまれである。垂直探触子を用いた板厚測定など限られた場合のみであろう。対象の反射体は大きかろうが、小さかろうが、モード変換や波の振動方向と異なる方向への歪を生じ、いろいろな波が発生する。この反射に関する議論は複雑なので、ここでは入射波形状=反射波形状として議論をすすめる。経験上主要な反射波は反射体が小さい場合は入射した波と同じ音圧波形でもどってくる。



点反射源からの音の指向性を知るのは難しい。音圧が低く可視化装置でも余り良く観測できない。入射波はエッジ波など含んでいて、反射波と同時に観測されるので、分離も難しい。探触子の径を小さくして点音源に近い場合の可視化像は点反射体の反射指向性の良い近似とは言えない。伝搬途中の波の中にある反射源と音源とが同じと言う理由は見当たらない。波長の1/10の音源からの指向性を0度と45度でシミュレーションすると右のRF波形となる。RF波形は媒質が鉄と水で粘性を0とした場合を示す。伝搬の様子を示す図は鉄の場合で、波の先頭が計測点に入った直後を示す。45度方向は0度方向の半分以上の音圧である。



エッジ波が分離できる位置に点反射体を置いてシミュレーションした結果を右に示す。180度と135度の音圧差は殆どなく、反射源の後側0度方向までも同等の音圧が伝わっており、指向性は非常に鈍い。ほぼ球面と考えても良い。

可視化の写真??

10Φの低周波の可視化像 とその説明

従って、反射体が点に近い場合は、指向性は非常に広く、探触子から離れた位置に反射体がある場合、球面波が戻って来ると考えてよかろう。

点反射源からの音の反射と受信波形

送信超音波は平面波として伝播し、点反射源で反射した音が振動子で受信される時に、振動子各点に入射する超音波の位相はことなる。これが近距離音場限界内で感度の凸凹の主原因である。送信されたエッジ波はビーム中心では伝搬距離が異なり、波形が分離するので、近距離音場限界付近でしか影響無いと考えてよい。

積分式

DACの計算など

圧電セラミックの内部構造

殆どのイオン性結晶は圧電性を示すが、その量は僅かである。これらは正負のイオン原子が電界で力を受けるが、原子間隔が縮む場合と伸びる場合で、同じ力でも歪量の違いがあるので生じる。大きなひずみを生じるロッシェル塩は第二次世界大戦中は重要な通信に欠かせない軍需物資であった。石英の結晶である水晶は比較的大きなひずみを生じる。セラミック圧電素子が使われる前は主な超音波非破壊用の振動子であった。

特に大きな圧電性を示す材料を強誘電体と呼び、圧電セラミックなどとして使われる。圧電セラミック振動子の場合、電氣的に偏った塊（ダイポール）が構造中に分散している。これが、構造体との結合が弱く電界を加えると回転する。通常安定な方向は2方向で、180度回転する。この方向の違いで大きな歪みを生じる。

分極されていない場合は、電界を加えても全体としては変化はない。一定以上の電圧を加えると（分極）、一定の方向に回転して、大きなひずみを発生して安定する。電界を無くすと、一部は元の状態にもどるが、戻らないものもあって、歪が残ったままである。この状態で弱い電界を加えると、電界に比例した大きなひずみを生じる。

垂直に入った圧力と電圧

垂直に入ったすべり圧力と電圧

側面からの圧力と電圧