

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

### 前章

探触子の近距離音場については、超音波の専門家の間では以前から連続波で考察した干渉の式と、実際のパルス波の受信挙動は異なるとの漠然とした共通認識があるが、教科書では依然従来からの記述に引っ張られる形で、近距離音場と遠距離音場を分け、従来通りの説明を行った上で、一部パルス波では挙動が異なる場合がある程度の説明にとどまっている。

一方、多くの検査技術者、非破壊電子技術者や、実験的に音場を可視化している研究者は、近距離音場でも明確な干渉現象を実感しておらず、教科書の記述とのギャップを感じている。非破壊の専門家は音響電子技術者と認識が異なっている事が多い。

メーカの個別探触子のデータ・シートにも明らかな干渉現象が記載されていない。

現在近距離音場について、日本の非破壊専門家の平均的理解は、連続波の入力では、シュリーレン法で測定された教科書の干渉音場の通り極端な干渉が存在し、入力波がパルス波になると正確な干渉が崩れるため、連続波で記述される干渉現象は徐々に弱くなっていくものの、程度の差はあっても近距離音場の特異性は残るだろうという程度ではないだろうか。旧来の各種理論は可視化装置などで実際を確認手段がなかった時代に、最後の結果のより合う理論を採用しただけと思われる。

海外の論文などを調べても、送受信回路や探触子と音との関係はブラックボックス化し、その上である場合には仮説と現象が合う、合わない議論している。

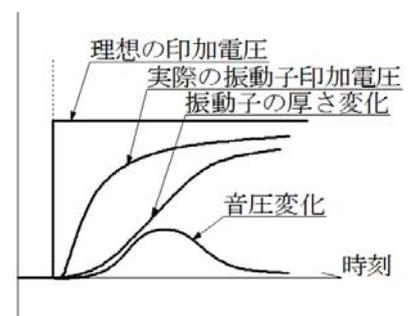
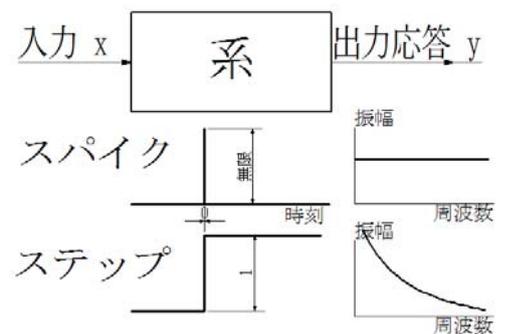
超音波の測定系の全体、即ち送信回路と音場、音場内での伝播、受信音圧と表示波形、探触子の挙動、保護膜や接触媒質の影響など、全体を考察したものが論文なども見当たらない。

この全体の理解を助ける為に励振電子回路から受信回路まで、音響電子工学に基づいての理論と可視化装置やシミュレーションでの結果を示しながら、実際は如何なものかを説明する。

### その2 送信波形と送信音圧波形

制御技術はロボット、飛行機、車、制振装置などあらゆる産業機器の設計の上で重要な位置を占める。その基本原理によると、「ある系にヘビサイドのステップ関数又はディラックのデルタ関数の応答が判ると、あらゆる入力に対する応答が判る」。通常、ステップ関数は高さ1の階段状、デルタ関数は幅0高さ無限で面積1のスパイク状理想波形である(右図)。理想のスパイク型は非破壊ではニードルパルス型呼ばれている。が超音波送信回路で実現が困難で、理想に近いものが容易に実現しやすいステップ関数が用いられる。スパイク関数を周波数変換すると、あらゆる周波数が均一に含まれる。ステップ関数はスパイク関数の積分であり、周波数に反比例した周波数スペクトルとなる。

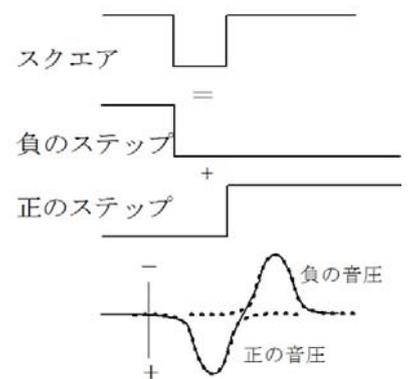
非破壊超音波で言えば、入力は例えば送信電圧で、応答が受信波形の場合、ステップ関数応答が分かれば、どんな送信波形を加えた場合の受信波形も判ると言う事になる。応答出力を送信音圧にすれば、ステップ関数応答が分かれば、どんな送信波形での送信音圧も判ると言う事にな



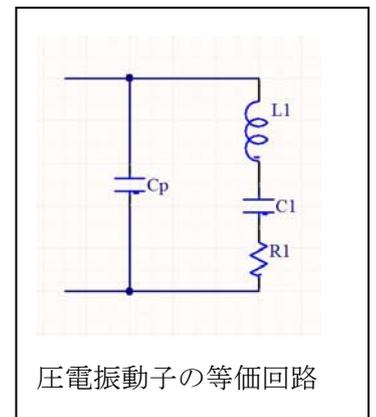
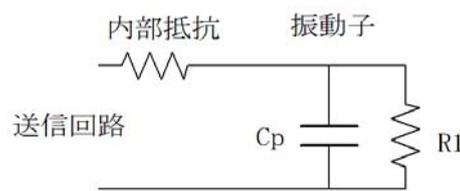
る。数式を使つての論理的な話は専門書にまかせて、送信音圧波形に関して、成るべく平易に説明しよう。(興味ある方はラプラス変換、制御技術関連の本を読まれると良い)

まず超音波の発生に使われている振動子の性質についてである。振動子には平面状の圧電素子が主に使われる。この素材は印加電圧に比例して厚さが変化する材料である。厳密には振動子の周囲は少し違つた変位をするが、今は無視しよう。振動子からは平面波が発生すると考える。

右図の様に、ステップ状の電圧を振動子に加えると、振動子には指数関数的に上がっていく、所謂積分カーブである。圧電振動子は携帯電話などに使われている PZT コンデンサーと同じ又は似た性質の素材が使われていて、一種のコンデンサーと共振回路が並列の等価回路で表現できる。最近の広帯域探触子は、この共振回路が純抵抗  $R_1$  に近く、少しの共振特性があるが、ここでは簡素化して共振特性がないものとする。事実広帯域探触子では、よっぽど気を付けないと共振が観測されない。この振動子の並列コンデンサー成分が送信回路の出力抵抗との間で、積分動作をする。この電圧が振動子実質送信変換器  $R_1$  に印加される事となる。内部抵抗を系に組み入れれば、理想



に近いステップ応答を観測する事になる。振動子内部では印加電圧に比例した電荷(電気力線)が生じ、印加電圧に比例した圧力が発生し、振動子の各質点に厚さ方向に加わる。各質点はその力でニュートン力学の加速度を受け、厚さの変化が起きる。ニュートン力学の加速度に依つて、徐々に加速され、飽和する。その結果として音が発生する。厚さ変化は表面質点の変位であり、定義によってその微分が音圧となる。ステップ関数の電圧を加えると、初期厚さから最終厚さに徐々に変化し、半波の音圧が発生する。通常は逆分極されない様に、圧電振動子を分極した時と同じ方向に電圧を加えるので、厚くなって、媒質を押し形になるので、正の半波の音圧が発生する。ステップ波形も通常は負の電圧のステップを加える。なお、音圧は直感的に理解しやすいように、逆位相で図示する。ここで重要な知見は、振動子への印加電圧が変化した時に、振動子の電力が供給され音が出ると言う事である。変化がなければ、電力供給されず音は出ない。

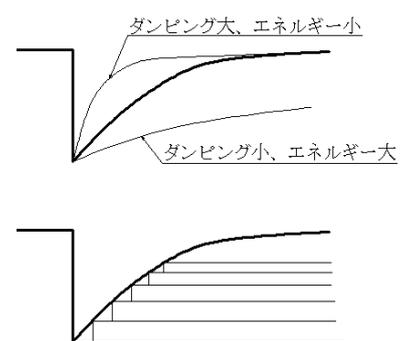


圧電振動子の等価回路

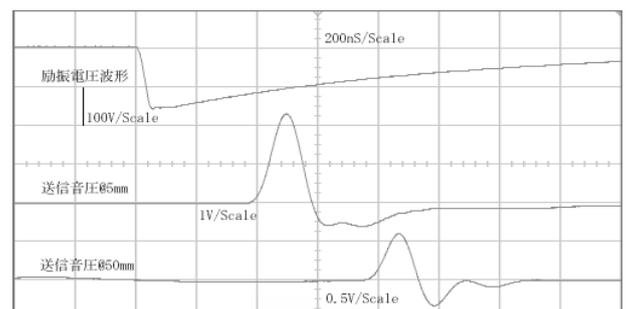
うに、逆位相で図示する。ここで重要な知見は、振動子への印加電圧が変化した時に、振動子の電力が供給され音が出ると言う事である。変化がなければ、電力供給されず音は出ない。

では、スクエアと呼ばれる波形の場合はどんな音圧が発生するのであろうか? スクエア波形は時間のずれた正負2つのステップ波形の足し算で表現できる。結果1波となる。通常印加電圧範囲では印加電圧と歪(音圧)は線形と考えて問題無い。線形の場合、「重ね合わせの原理」によって結果を求める事ができる。右図の様にスクエアでは、その幅が適切に設定されていれば、正負一対の一波の音圧が発生する。

### スパイクパルス



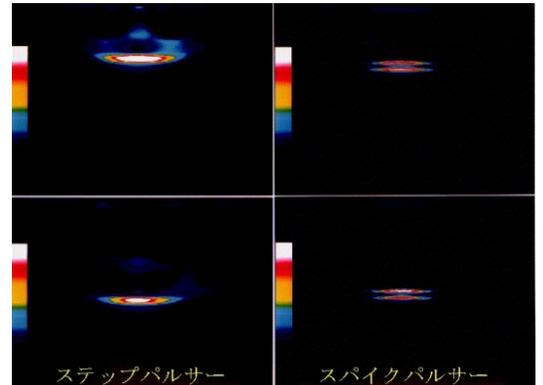
非破壊超音波のスパイク・パルサーは理論上の幅ゼロのスパイクとは少し違っている(上右図)。探傷器等にダンピングとエネルギーの機能が付いていれば、その値によって図の様に変化する。このスパイク・パルサーの波形は1個の負のステップと多数の時間遅れの正のステップで表現できる。ダンピングが小さく、エネルギーが大きい場合には、事実上1個の負のステップ関数とみなせ、半波が発生する。これらが逆の場合は幅の狭い高さ有限のスパイク状とみなせ、正負1波が発生する。発生する音波波形は半波~正負1波



となる。実測した、振動子端波形と音圧測定専用センサー（ hidroホン）で計測した音圧波形を示す。鋼の中5mmの所では半波に近い音圧となっている。50mmの位置では少し帯域が狭まって正負1波に近づいている。負の部分はエッジ信号の影響がある。

ダンピングが大と言うのは前等価回路で R1 に並列に小さな抵抗を入れること。ダンピングが小は大きな抵抗を入れる事である。前回の放電抵抗そのものである。エネルギーは前回の放電コンデンサーの事で、この値を変える様にしている。

通常の広帯域探触子をステップと狭いスパイク・パルサーで励振した結果を可視化装置で観測した結果を示す。振動子は各写真の上側にある。上の左右の波形は探触子から出た直後、下の波形は探触子から出て少し時間が経った所。何れも近距離音場内。前述の説明と同じ結果である事が判るであろう。

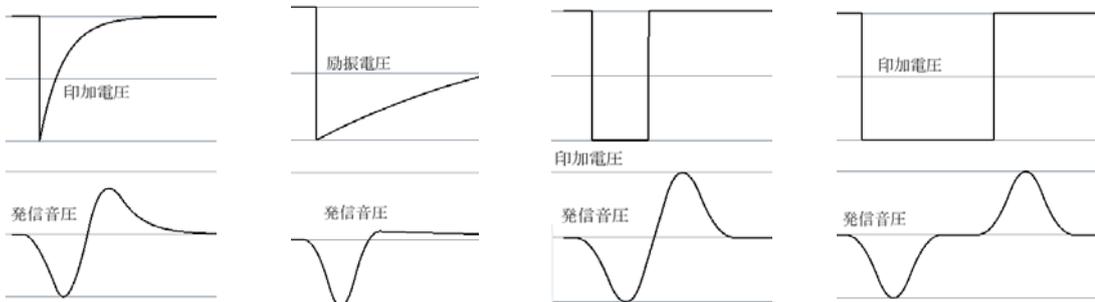


バースト波に関しては、スクエアが連続したものと考えれば良い。サイン及びコサイン・バースト装置が販売されているが、探触子の共振特性と送信回路の高周波特性によって、通常は方形波のバーストと大して変わらない音圧波形になる。受信特性まで考えると殆ど変わらなくする事ができる。

市販探触子は負電圧を加える決まりになっている。振動子によるが、逆に電圧を加えると、分極が無くなって振動子としての機能を失っていく。正負の電圧を印加させるサイン・バーストは適切では無く、常に負電圧が振動子に加わるコサイン・バーストを使用した方が良い。この方が音圧波形も最初の波から十分な振幅となる。

各種印加電圧と発生する音圧の関係をシミュレーションした結果を以下に示す。実測値も振動子周囲からの逆位相信号を除けば、同じ様な波形となる。「印加電圧が変化の部分で音が発生し、その大きさは変化量に比例する」と考えると容易に理解できるであろう。振動子は広帯域としている。

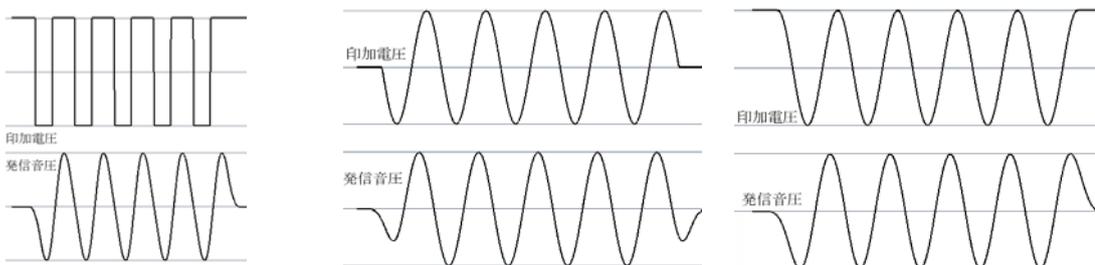
鋭いスパイク励振      鈍いスパイク励振      適切なスクエア励振      広いスクエア励振



方形波バースト励振

サイン・バースト励振

コサイン・バースト励振

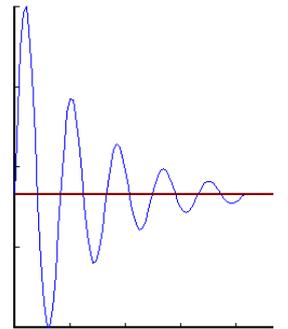


宣伝でスクエア方式は感度が高いなどとされているが、送信音圧は送信波形の形式では殆ど変わらない。正負のピークからピーク間はスパイクの倍ある。寧ろ回路素子の進歩で同じ回路でも部品を変えただけで性能が上がる事が多い。次回の受信波形の話で分かる様に、入力インピーダンスを低くすると、微分されて一見高く表示される。また、バーストの方がエネルギーは高いなどと言われる。確かに全体のエネルギーは波数が多い分大きいですが、波長相当のエネルギーは同じであり、波数が長いので分解能を犠牲にしている。音圧に関しては前図の様に

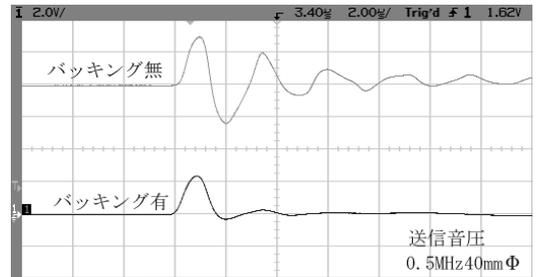
差はない。振動子が狭帯域の場合は、確かに音圧に関しても 2 倍程度になる場合があるが、数波目にならないと高く成らない。分解能が悪くなる。大昔は P Z T などセラミックの高性能振動子が無く、水晶振動子を使っていた。水晶振動子は非常に狭帯域で、その頃はバースト波励振では送信音圧は明らかに高かった。現在は殆ど差が無い。更に最初の波を検出する様な目的では、サイン・バーストを使うと不利になる。技術は機能性能のトレードオフで、良くなる部分と悪くなる部分が必ず発生するので、利点欠点を熟知してから送信回路の選択をする必要がある。

狭帯域探触子の波形

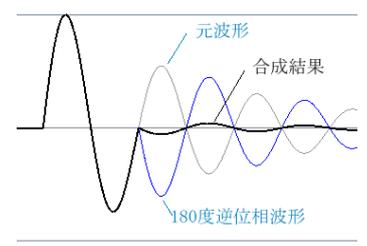
今までは広帯域探触子を励振する場合を説明したが、自己共振特性のある狭帯域探触子の場合にはどのような音ができるのであろうか？ 励振動作で重要な知見は送信印加電圧が変化した場合に、振動子にエネルギーが供給され、音ができるという事である。スパイクやステップの場合は送信電圧の変化が一ヶ所であるので、右の様なエクスポネンシャル型の減衰カーブとなる。ステップ又はスパイクの励振ではエネルギー供給される最初の半波の音圧が最大となる。励振電圧の変化している半波 (0~180 度) は送信回路からの強制励振の影響を多く受けるのでサインカーブから歪んでいる。また、励振回路の探触子からの切断タイミングの前と後で、減衰曲線が違う場合もある。



実際に同じ Q 値が 10 の振動子にのバック材を付けた場合と無い場合の音圧測定結果が右図である。バック材無の場合 (上)、振動子自身の内部損失と前面などへの超音波の伝搬損失で、減衰振動する。径振動と保護膜の共振特性の影響で綺麗な減衰振動からは少しずれるが、最初の半波の振幅が高く、徐々に半波毎に 20% 程度ずつ音圧が下がっていく。Q=5 程度と言う事である。音響インピーダンスが振動子の半分程度のバック材を振動子裏面に付けると、バック材に音が吸収され、最初の半波の音圧が少し下がると同時に後波の音圧が大幅に下がる。エクスポネンシャル・カーブの時定数が短くなった為である。



スクエアの場合は、その幅が、探触子の自由共振周波数の一波長分の幅に設定されると、右図の時刻をずらして、位相反転した波形と足し算した状態と成る。従って右図の二つ目の半波即ち負の最初の半波 (180~360 度) が一番高くなる事が多い。送信回路インピーダンスが立ち下がり立ち上がりで同じとは限らず、最初の半波が最大になる場合もある。立ち下がり立ち上りのインピーダンスが異なる場合、運が良ければ (独立したインピーダンス調整できる場合なら調整すれば) 一波長分のパルス幅にすると一波長以降が正負打ち消し合って、狭帯域の探触子でも一波の音圧に近い音圧も送信できる。



次号以降で説明される探触子の受信の説明で分かる様に、受信時この波形が微分された形で波形観測される事もある。この場合 スパイクでは 2 つ目の半波が、スクエアでは 3 つ目の半波が一番高く表示される。

バーストの場合は、振動子の実効 Q 値との関連で最大振幅がどの半波になるかが変わる。ブランクは一度には大きく振れないが、何度もタイミングを合わせて力を加えると振幅が大きくなる。Q 値の高い振動子とバースト励振の関係はブランクと人の手の関係と同じと考えて良い。タイミングが合わないと不味いし、実効 Q が低いと意味無くなる。例えば、狭帯域探触子でも振動子の音響インピーダンスと媒質など接する音響インピーダンスが低い

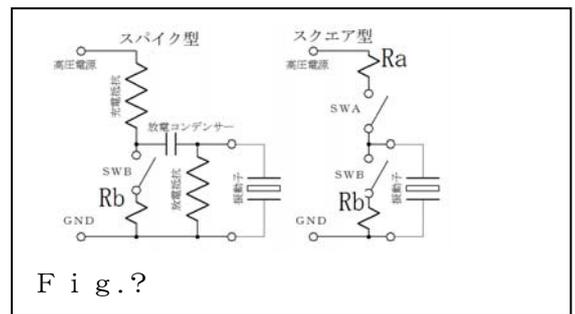


Fig.?

と実質低 Q と成って、広帯域探触子と同じものとかんがえられる。感度を高く設計すると通常低 Q となる。

なお、最近は無いはと思うが、大昔の探傷器等で感度を上げる為に電氣的共振回路を用いた場合、電氣的共振回路からのエネルギーが探触子の複数回供給され、先端の半波が一番音圧が高く成らない場合もある。

また、やはり保護膜（又は接触媒質）を  $\lambda/2$  厚さにして感度を上げる手法の場合も同様である。

### 送信回路インピーダンスと音圧

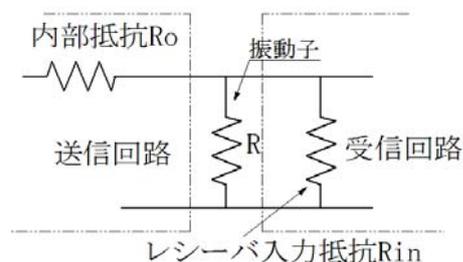
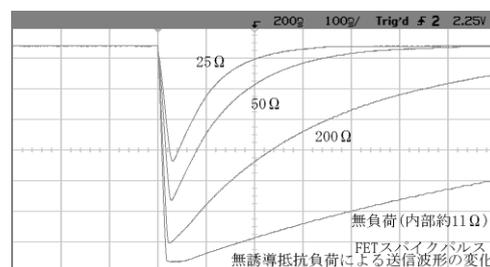
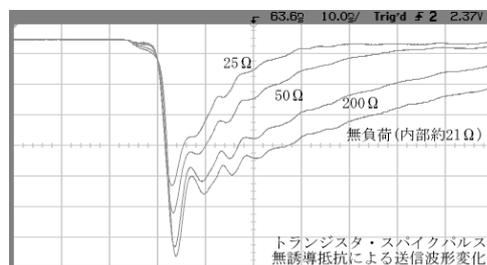
送信音圧の大きさに付いて議論する事にしよう。計測機器は一般に  $50\ \Omega$  に最適化している。機器の入出力がそれぞれ異なると繋ぎ合わせる時にインピーダンスが不整合になって、信号の伝達係数が変わるし、歪も発生しやすい。ビデオ関連は  $75\ \Omega$  が一般的になっているが、これはアンテナが  $300\ \Omega$  で  $2:1$  のトランスでインピーダンス変換すると、 $1/4$  の  $75\ \Omega$  となるのが理由である。良好な絶縁体が無かった時代、空気を絶縁体にするるとロスが少ない同軸は約  $77\ \Omega$  になり、これも理由になっている。計測系は  $50\ \Omega$  となっているのは古い構造の空気絶縁体  $75\ \Omega$  同軸にポリエチレン絶縁体を充填して約  $51\ \Omega$  になった事が起因している。なお、同軸の特性インピーダンスは大体  $\log(D/d)$  に反比例します。（D：シールドの内径、d：芯線の外径）

兎も各計測装置は  $50\ \Omega$  が標準で、非破壊用の探傷器などは、昔は  $93\ \Omega$  とかのインピーダンスが使われていたが、現在は  $50\ \Omega$  が標準である。スパイクなどの送信回路の出力インピーダンスは実は  $50\ \Omega$  にしていない。出来るだけ低くする設計になっている。サイン/コサイン・バーストなどは  $50\ \Omega$  で設計する事が多い。サイン/コサイン・バーストなどを除いた、スイッチング方式パルサー（スパイク、スクエア等角ばった波形）の話をしよう。前回の「送信回路の歴史」での等価回路をもう少し正確に書くと右図の様に  $R_a$ 、 $R_b$  のスイッチング抵抗を追加される。これらが前述の送信回路の内部抵抗である。あまりこの値を小さくすると、スイッチで反射が起きるので、通常  $10\sim 20\ \Omega$  程度になっている。それも同じ回路でも周波数によって異なり、周波数が高いと高い抵抗となる。スパイク型は周波数が高くて低くても低めとなる。

また波形を発生後の時間とともに値が変化する。これは一探触子機能を実現する為で、最初は大きく少し時間が経つと低く、ある程度経つと大きくなる。十分経過すると送信回路ダンピング抵抗になる。非常に動的なので、仕様で定義する事は難しい。送信に使う素子でもインピーダンスが異なり、昔の真空管サイラトロンなどは非常に高い。半導体ではサイリスタが高く、FET は比較的小さい、アバランシェ・トランジスタは非常に低い。

簡単な計測は送信回路の無誘導抵抗（広い周波数範囲にわたって純抵抗と考えられるもの）を繋いで、送信波形の変化を知ることである。一般的FETスイッチングのスパイク送信回路に3種の無誘導抵抗負荷を繋いだ場合の送信波形の変化を示す。無負荷の波形は実際には内部で  $1\ k\ \Omega$  程度の抵抗が付いていて完全な無負荷では無い。ピークは  $25\ \Omega$  負荷で大体半分の振幅になっているので、 $25\ \Omega$  程度出力インピーダンスとなる。立ち上がり後  $200\ n$  秒では  $200\ \Omega$  負荷で半分程度になっていて、この付近では  $200\ \Omega$  と言える。 $25\ \Omega$  の探触子を繋ぐと、 $200\ \Omega$  の探触子に比べ半分程度の印加電圧になってしまう。その分送信音圧が低くなる。右下はアバランシェ・トランジスタによる送信電圧波形の変化で、 $25\ \Omega$  でも  $35\%$  しか下がらない。

探触子のインピーダンスも比較的簡単な方法で測れる。探傷器を二探触子法にして、適当な別な探触子を送信側に繋ぎ、受信側に測定したい探触子を繋ぐ。送受信探触子を対向して配置し、その間に適当な媒質を設ける。



受信側にダンピング抵抗 R が付いている場合に、それを変化させ、付いていない場合（送信側に付いている機種が多い）は、受信側接点を分枝してそこに適当な並列抵抗 R を繋ぐ。透過信号のレベルを測定し、V1、V2 とする。V1 は R が R1 の場合、V2 は R が R2 の場合の観測電圧である。探触子のインピーダンス Zp は

$$Z_p = \frac{V_1 - V_2}{V_2 R_1 \times V_1 R_2} R_1 R_2$$

となります。

探触子を成るべく 50 Ω にしたいが、振動子の材質、共振周波数、面積が決まると振動子の電氣的インピーダンスは決まってしまう。実際には探触子内部のバックリングなど構造で変わるが、その変化は僅かである。市販標準 2~10MHz 探触子のそれは 20~200 Ω に分散している。特殊探触子に至っては 1 Ω 以下から 1k Ω 以上まである。

探触子で消費されるエネルギーの一部（電気機械変換効率相当）が音に変化する。振動子内で消費されるエネルギーは送信される音のエネルギーに比例すると言って良い。

受信回路の入力インピーダンスを 50 Ω 一定とし、送信回路の出力インピーダンスが 20 Ω（濃い線）及び 50 Ω（薄い線）として、探触子のインピーダンスを変えた場合の探触子での消費エネルギーは右図のように計算される。



縦軸は効率で、横軸は 0~200 Ω の探触子インピーダンスである。送受信回路の入出力インピーダンスの並列値と探触子のインピーダンスが概略一致する場合、探触子での消費エネルギーが高くなる。出力インピーダンスを 20 Ω の場合は 27 Ω 程度で最大消費となる。下の図は受信回路の入力インピーダンスを 1k Ω 一定おした場合である。



成るべくインピーダンス・マッチングを良くする事が最適である。が、使える振動子材質の種類が少ないので、思うような探触子の電氣的設計が出来ない。

送信回路インピーダンスはユーザが変える事は出来ないので、探触子インピーダンスが最適で無い場合はマッチング・トランスを使って補正できる。1 : 4 と 1 : 9 の N<sup>2</sup> のトランスが市販されている。

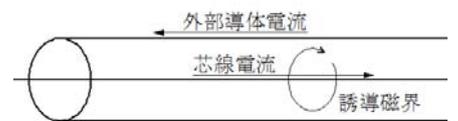
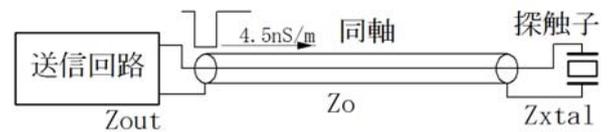
なお、熱雑音限界近くの信号を検出する場合、探触子の実効インピーダンスを入力インピーダンスに整合する事が重要になる。この場合はマッチング・トランスが必修となる。

### 送信（探触子）ケーブルと音圧波形

探触子は探触子（同軸）ケーブルを通じて送信回路に接続している。探触子に加わる電圧波形はケーブルの影響を受ける。

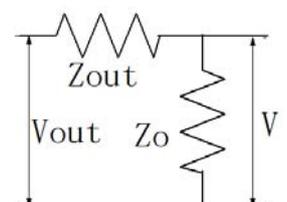
同軸ケーブルに信号を伝えると、電子が同軸の中を流れる。

電子の移動速度は人の歩きより遅いが、同軸の導体（通常銅）の片端の電子を押すと、反対の電子が玉付きの様に押し出される。電子の動きの反対を仮想上、電流と呼んでる。この電流の伝搬速度は 50 Ω 同軸の場合大体 4



~5n 秒/m で光速 3.3n 秒/m の 1.5 分の 1 である。GHz と云った高い周波数では伝搬速度が変わるので、精密測定などでは注意だが、通常の非破壊の周波数では一定とみなして良い。

同軸ケーブルの芯線に電流が流れるとその周囲に磁界が発生し、その磁界がシー



ルドに逆向きに電流を発生させる。外部から見ると電流が流れていないのと同じで、これが同軸ケーブルから電気信号が外に漏れる量が僅かである理由である。

一方外部から電気ノイズが入ろうとして、外部導体に電流が流れても、外部導体に均等に電流が流れるのであれば、各電流による磁界は打ち消し合って導体内部には磁界が発生しないので、芯線（内部導体）に電流が流れない。外来電気ノイズに強い理由である。

探触子は欠陥からの反射音圧を受けても僅かの電圧しか発生しないので、同軸の耐ノイズ特性は重要である。

同軸ケーブル内では電気エネルギーを消費する箇所は無く、エネルギーは入力端から出力端に伝播して行く。

同軸内の信号の伝搬について考える。これは探触子の保護膜内、遅延材内、或るいは接触媒質の薄い膜を伝播する音と類似性があるので、十分理解してほしい。送信回路の出力インピーダンスを  $Z_{out}$ 、同軸の特性インピーダンスを  $Z_o$  とすると同軸の入力端には

$$V = \frac{Z_o}{(Z_{out} + Z_o)} \times V_{out} \text{ の電圧が発生する。考えやすい様に、}$$

$Z_o = Z_{out} = 50 \Omega$  の場合で、同軸の長さが  $200\text{nS}$  相当にステップ関数状の波形の送信回路波形が与えた場合  $V_{out}$  の半分の電圧が  $V$  同軸入力端に発生します。通常送信回路のインピーダンスは  $20 \Omega$  前後ですのでもっと  $V_{out}$  に近い電圧になります。同軸に流れる電

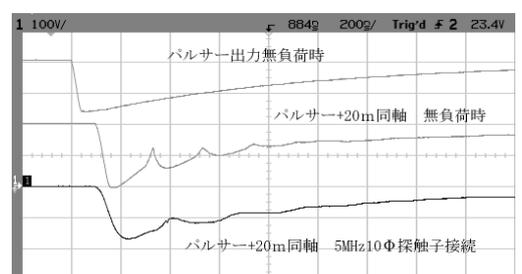
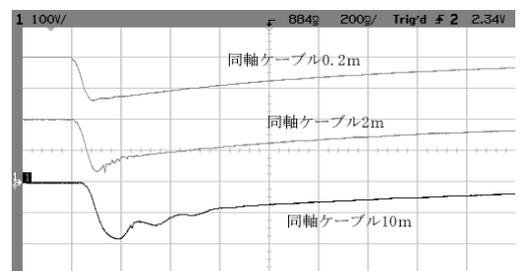
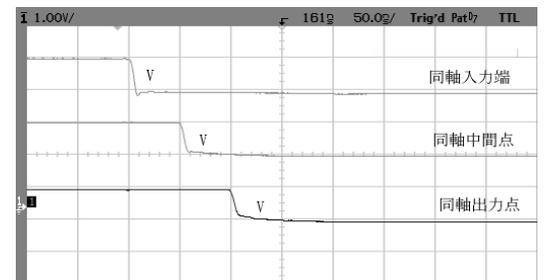
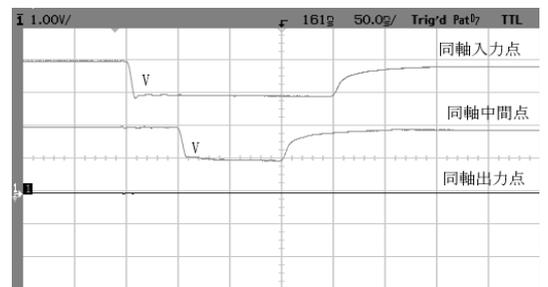
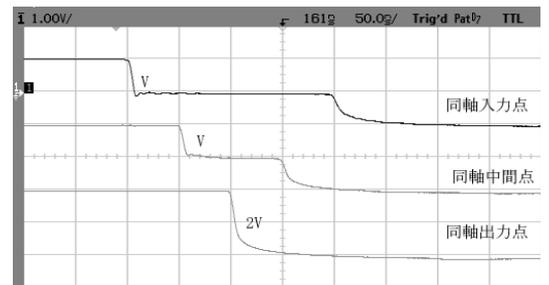
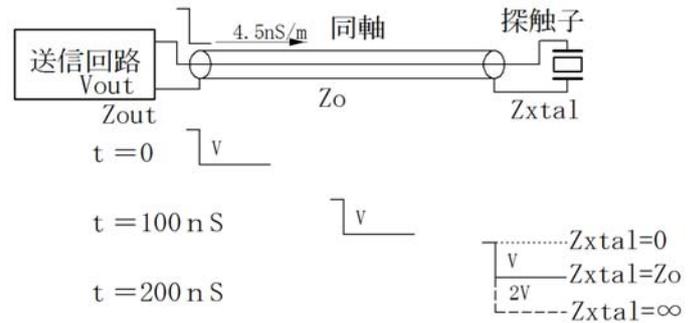
$$\text{流は } i = \frac{V}{Z_o} = \frac{V_{out}}{2 \times Z_o} \text{ です。ケーブル終端の探触子のインピーダンス}$$

が大きい場合を考えよう。無限とすると、探触子が付いていませんので、電子が出力端面で行き場を失い、反射します。二倍の密度になります。結果的に2倍の電圧が発生します。右写真は実際に  $20\text{m}$  の同軸端を解放してステップ状信号を入力した結果である。

探触子負荷が軽い場合、探傷器の出力の倍の電圧が探触子にかかる事もあるので、探触子の耐圧は送信回路出力電圧の倍必要と言う事に注意してほしい。特定の条件ではこの現象を用いて送信音圧を上げる応用もある。この反射電流は送信回路の方へ伝わり、入力端でも  $200\text{n}$  秒後に  $2V$  になる。

次に探触子のインピーダンスが低い場合を考える。標準探触子は公称周波数で極端に低いものは無いがそれでも  $10 \Omega$  程度のは見受ける。公称周波数以外ではほぼゼロの探触子もある。 $10\text{MHz}100\Phi$  と特殊な探触子では  $0.1 \Omega$  以下である。こう言った探触子を繋いだ場合の極端な例として  $Z_{x\text{tal}}=0$  を考えよう。同軸出力端までは前述と同じ様に伝わるが、出力端で芯線がシールドに繋がっていて、芯線を流れていた電子はシールドを逆方向に流れる。その電流で芯線には逆の電流を生じ、入力端に戻っていく。 $200\text{n}$  秒経つと入力端も  $0V$  となる。

信号の立ち上がりが鈍っているが、 $50 \Omega$  同軸は  $100\text{pF}/\text{m}$  程度の容量でもあり、これは送信回路抵抗  $Z_{out}$  との間で積分動作を為である。



さて、同軸の特性インピーダンスに探触子のインピーダンスが一致した場合、電流  $i = \frac{V}{Z_0}$  は探触子に流れるが、

$V_{x\text{tal}} = i \times Z_{x\text{tal}} = \frac{V}{Z_0} \times Z_{x\text{tal}} = V$  と成って、探触子両端には  $V$  そのものが印加される。探触子の中でエネルギーは消費される。

探触子のインピーダンスが全ての周波数で  $Z_0$  に等しい事はないので、特定の周波数成分は反射する。200n 秒後には同軸入力端に何かしらの信号が戻ってきて、 $Z_{\text{out}} \neq Z_0$ だと、又反射して同軸終端に向かう。 $Z_{\text{out}}$  は殆どのパルサーレーザでは  $50 \Omega$  以下なので反射が起きる。通常は一定時間経つとインピーダンスを大きくする機能が付いていて、経過後はダンピング抵抗値となる。多少インピーダンスが不整合でも早く往復反射が無くなる様にしている。代表的スパイクパルスの例を右に示す。パルサーエネルギーを最大 ( $4000\text{pF}$ ) ダンピングは最少 ( $2\text{k}\Omega$ )、送信電圧設定はオシロスコープの耐圧より低い  $160\text{V}$  に設定している。送信回路の出力インピーダンスは約  $20 \Omega$  である。波形上はパルサーに何も接続しない場合の波形である。 $160\text{V}$  の負のスパイク波形が観測される。20mの RG174 系同軸を接続し、その終端での波形が中段である。20m  $\times$  4.9n 秒  $\div$  100 n 秒から遅れてスパイク波形が観測され、 $200\text{V}$  と大きくなっている。20m 同軸の往復相当の 200 n 秒間隔で反射が観測される。探触子を繋ぐと送信電圧ピークはさがるものの、往復反射の信号が探触子に印加されている。同じ状態で同軸の長さを変えた場合は次の図で、20 cmと短い場合は送信電圧が少し下がるが波形形状は殆ど変わらない。2m では 20cm と大差ないが、30nS 毎の僅かな凸凹が観測される。これは振動子の 7 倍高調波で、受信感度が低いので、受信信号にはほとんど表れ無い。10mではそれ相当の 50n 秒遅れて電圧が発生し、ケーブルの往復反射の間隔 100nS が観測される。探触子から 10MHz 相当の音も強制励振されている。

それではどの程度の探触子ケーブルなら影響を与えるのであろうか？電子技術の現場での一般論として、観測している波形の上限周波数の波長の  $1/20$  以下の同軸長さなら、目視での波形の変化には気がつかないと言われている。これが一応の目安である。例えば上限周波数が 5MHz の場合、波長は 200n 秒、その  $1/20$  は 10n 秒。10n 秒は 2m相当である。10MHz の探触子には 1m のケーブルを繋ぐのが好ましい。

ケーブル長さが丁度使用する探触子の実効周波数の  $1/4$  や  $1/2$  の場合は特に注意が必要となる。

### 共振の説明追加

#### 同軸の特性インピーダンスと探触子のインピーダンス

前述の様に探触子ケーブルが短い場合は無視できる。送信回路の出力インピーダンスが低く、探触子のインピーダンスも低い例を考えよう。例えば両方  $10 \Omega$  と仮定する。短いケーブルでは  $10 \Omega$  の送信インピーダンスで  $10 \Omega$  の探触子を励振するので、振動子端の電圧は無負荷送信電圧の半分の電圧になる。探触子ケーブルが長くなると、探触子ケーブルは  $50 \Omega$  の抵抗と同じと考えられる。送信回路は  $10 \Omega$  なので、同軸の入力では無負荷送信電圧の  $5/6$  と十分な電圧が印加される。探触子の所では  $50 \Omega$  の同軸で  $10 \Omega$  の探触子を励振するので、同軸を伝わってきた電圧の  $1/6$  しか振動子に印加されない事になり、非常に送信感度が低下する。

超音波を受信した時は、 $10 \Omega$  の探触子で  $50 \Omega$  の同軸を駆動するので、同軸には振動子発生電圧に近い電圧が印加され、受信アンプの所では。送信回路が既に OFF になっているので、入力インピーダンスが通常  $50 \Omega$  より大きいので、それほどの受信感度の低下はもたらさない。探触子のインピーダンスが例えば  $200 \Omega$  と大きい場合は、同軸には  $60 / (200+50) = 1/5$  の電圧しか同軸に加わらず受信感度の低下をもたらす。

以上から探触子ケーブルが長い場合で、且探触子の電氣的インピーダンスが探触子ケーブルの特性インピーダンスから大きく離れた場合には、顕著な送信または受信感度低下が発生する事が判る。

### 探触子ケーブル自身での信号の減衰

探触子ケーブルの導体は主に銅でできていて、抵抗はゼロではない。芯線とシールドとの間は誘電体が絶縁しているが、これも電界が加わると少しいエネルギーを損失する（誘電損失）。市販探触子ケーブルの大半は RG174 系（外径 2.5Φ）と RG58A 系（外径 5Φ）でこれらの、単位長さ当たりの減衰量は以下の様になる。通常の長さ（10m以下）や低周波数では減衰の影響を考慮する必要はない。

アレイ探触子には極細い AWG38～48 同軸が使われていて、減衰量が RG174 の 10 倍と大きく、長いケーブルの使用には注意が必要である。

タイプ\周波数	1MHz	10MHz	100MHz	容量
RG174 系	0.054dB/m	0.11dB/m	0.26dB/m	100pF/m
RG58A 系	0.014dB/m	0.048dB/m	0.16dB/m	102pF/m

### 振動子周波数と音圧波形

送信インピーダンスが十分低い送信回路で、周波数の違う同じ振動子材質の振動子を励振した場合、送信音圧にどのような違いがあるのでしょうか？

当然、共振周波数が異なるので、共振特性が出れば、周波数が異なる。十分ダンピングを利かせた Q の低い場合は、厚さ変化は印加電圧に比例する。

厚さの変化は  $\Delta h = V \times d_{33}$  と表示される。V は印加電圧  $d_{33}$  は等価圧電定数（通常のセラミック振動子で 0.1～0.4nm/V）

共振を抑えられた広帯域の振動子は、その厚さ即ち共振周波数に関係なく同じ変位をする。励振波形に対して、高い共振周波数の振動子は何れも同じ波形を発生する事になる。

振動子の厚さと振動の振幅が関係無いと言うのも一見不思議だが、以下の様に考えれば良い。

単位厚さ当たりの歪は印加される単位厚さあたりの電圧に比例する。

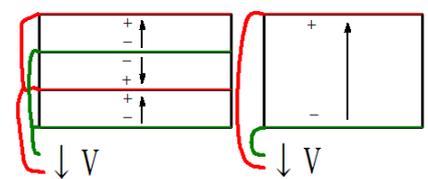
$$\frac{\Delta h}{h} \propto \frac{V}{h} \quad \text{従って} \quad \Delta h \propto V$$

### 積層振動子と音圧

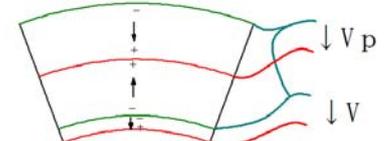
前述の様に同じ振動子材質と同じ送信回路で変位（音圧）大きくする事ができない。そこで使われるのが積層振動子である。動力目的の圧電振動子には良く使われている。超音波溶接機など振幅を必要とする場合、ホーンなどで増幅するが、それと同時に積層して振動子からの振幅を増やす事も行われる。精密位置決め装置には積層圧電素子が使われる。圧電定数が通常  $10^{-11} \text{m/V}$  の程度なので、例えば 100V を加えても 1nm しか変化しない。10 枚積層すれば 10 倍の 10nm となる。送信音圧感度を得たい場合はこの方法がとられる。また、各層の振動子は電気的に並列に接続されるので、探触子のインピーダンスを下げたい場合にも使われる。一方低くなりすぎて駆動出来ない場合は、複数の送信回路で同時励振される。受信の場合も電氣的マッチングの為に使われる事もある。

特殊な例として積層振動子で積層の各厚さを変えると、全体としての周波数と個別の共振周波数が異なるので、複数周波数の送受信探触子ができる。全体の帯域を広く且、高周波でも高感度送受信可能となる。また、低周波のポンピング周波数で大きな変位を起こさせ、重畳高周波で非線形領域動作させ場合に使われる。右図。

積層振動子 単一振動子

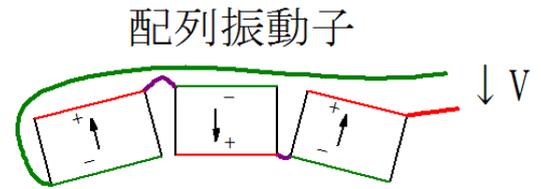


積層振動子



## 配列振動子と音圧波形

単一振動子では音圧が不足の場合、或いは単一振動子では電氣的インピーダンスが低すぎる場合に用いられる。音圧を高くする場合は通常焦点を結ぶ様に配列される。複数振動子を配列した電極を直列に接続される。各振動子からのエッジ・エコーが分割する分単一振動子より多いが、それによる SN の劣化より送信音波圧力を増大させたい場合に使う。一つの例を右図示する。



## 振動子と遅延材、保護膜の音響インピーダンスと音圧波形

探触子の前面には通常保護膜が付いている。また、直接接触法では接触媒質が使われ、この厚さが有限である。これらの層での反射は、前述の探触子ケーブル内での反射と同じ様な考えが出来る。

探触子は振動子で超音波を発生し、保護膜又は遅延材を通して、媒質に超音波を送信するが、保護膜の中で超音波が往復反射する。

一方振動子と遅延材の音響インピーダンスが近いと、発生した超音波が速やかに遅延材側に伝わり、振動エネルギーが振動子から損失するので、その分振動子の中の多重反射即ち共振が速やかに収まる。ポリマー振動子は Kt 値（電気機械変換効率）がセラミック系の半分であるが、水浸法で使う時にはセラミック系と変わらない感度を示す。これは振動子の音響インピーダンスが水により近いことが理由である。

斜角探触子や遅延材付探触子の場合、振動子にコンポジット系の振動子を使うと感度が上がる。音響インピーダンスが遅延材に近くなる。同じ電気機械変換効率が同じ振動子でも、音響インピーダンスが例えば 30 のと 10 のでは、遅延材へは約 3 倍透過損失が異なる。送受信の 2 回透過損失があるので、送受信全体では  $3 \times 3 = 9$  倍の感度差となる。更に、音響インピーダンスが近い方が振動子内部の振動エネルギーが外部に速やかに出るので、リングングの短い、即ち広帯域の波形に近くなる。振動子と各種材料の縦波の音響インピーダンスの例を表に示す。

材質	縦波音響インピーダンス MRayls	備考
タンガステン	105	
金	62	
銅	46	
サファイア AL2O3	45	
アルミナ AL2O3	33	
鉛、錫	25	
水銀	20	
PZT 系振動子	20~40	
Pt 系振動子	18~30	広帯域用
超々ジュラルミン A7075	18	
硬い石	15~17	
水晶振動子	15	
セメント	10	
コンクリート	9~15	
PZT 系 1-3 コポジット振動子	5~10	通常の設計範囲で
音響インピーダンスの高い接触媒質	3.7	
PEEK	3.4	高温用腐食肉厚計に良く使われる
アクリル	3.2	
ポリマー系振動子	3.1~3.5	
超音波用高密度ポリスレン	2.4	
ポリスレン用接触媒質	2.4	
ゲル状接触媒質	1.5~2	
水	1.5	
断熱レンガ	1~5	
シリコンオイル	≒1	
軟質シリコンゴム	≒0.5	
コルクや高発砲プラスチック	<0.1	
空気	0.00043	

ここで透過損失に付いて復習してもう少し正確に計算してみよう。

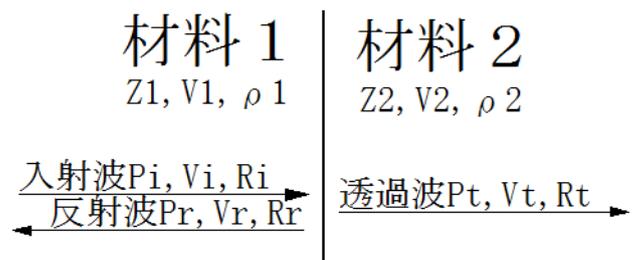
右図のように境界の左側から音圧  $P_i$ 、強さ  $R_i$  の音が入射すると

音圧の反射率は  $R_p = \frac{P_r}{P_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$  速度の反射率

$R_v = \frac{V_r}{V_i} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_2 + Z_1}$  強さの反射率  $R_r = \frac{V_r P_r}{V_i P_i} = \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2$

音圧の透過率は  $T_p = \frac{P_t}{P_i} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}$  速度の透過率  $T_v = \frac{V_t}{V_i} = \frac{2Z_1}{Z_2 + Z_1}$  強さの透過率  $T_r = \frac{T_r T_r}{T_i T_i} = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_2 + Z_1)^2}$

となる。



ここで重要な事は、反射の場合のみ、 $Z_2 < Z_1$  の場合音圧の反射率が負、即ち反射波の位相が反転することに。

振動子の音響インピーダンスを 30、遅延材の音響インピーダンスを 3 として計算してみよう。

$$\text{音圧の反射率は } R_p = \frac{P_r}{P_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{30 - 3}{30 + 3} \approx 0.8 \quad \text{音圧の透過率は } T_p = \frac{P_t}{P_i} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} = \frac{2 \times 3}{30 + 3} \approx 0.18$$

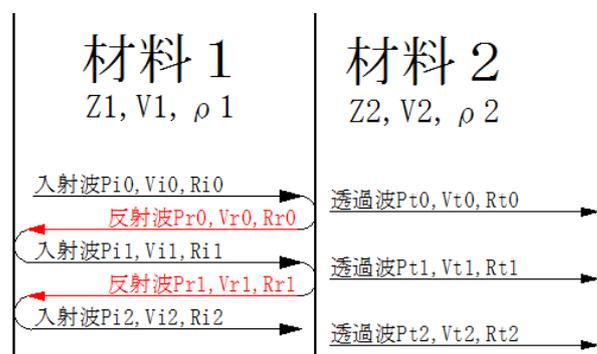
これが振動子が 10 の音響インピーダンスになった場合は

$$\text{音圧の反射率は } R_p = \frac{P_r}{P_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{10 - 3}{10 + 3} \approx 0.5 \quad \text{音圧の透過率は } T_p = \frac{P_t}{P_i} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} = \frac{2 \times 3}{10 + 3} \approx 0.46$$

この場合振動子の音響インピーダンスが 1 / 3 になると音圧は 2.5 倍良く通る事になる。送信と受信に 2 回の透過損失の差は 6.5 倍となる。

右図で材料 1 が振動子、材料 2 を遅延材とする。材料 2 は無限長さとし右に行った波は戻ってこない。材料 1 の振動子の裏面には何も無い。バック材が無く、ダンピングが効いていない状態である。通常振動子より遅延材の音響インピーダンスが低いので、反射時に音圧波形は反転する。

(保護膜の場合は硬いセラミック系の保護膜で反転しない。) 入射波  $i$  に対して位相反転している場合赤色で示した。振動子の裏面も何も無いので、反転する。入射波  $P_{i0}$  は一部透過  $P_{t0}$  し、残り  $P_{r0}$  が反転反射し振動子裏面で再び反射し  $P_{i1} = -P_{r0}$  として  $P_{i0}$  と同じ位相で再び境界に入射する。これを繰り返す。音波が振動子を往復する時間を  $t_0$  とすると



$$T_p = \sum_{n=0}^{\infty} P_{t n} = P(t)T_p + P(t+t_0)R_p T_p + P(t+2t_0)R_p^2 T_p + P(t+3t_0)R_p^3 T_p + \dots$$

なる。音圧関数  $P(t)$  がサインの周期  $t_0$  の連続波では、即ち振動子の厚さが波長の半分の場合  $P(t) = P(t+t_0) = P(t+2t_0) = \dots$  なので

$$T_p = \sum_{n=0}^{\infty} P_{t n} = P(t)T_p(1 + R_p + R_p^2 + R_p^3 + \dots)$$

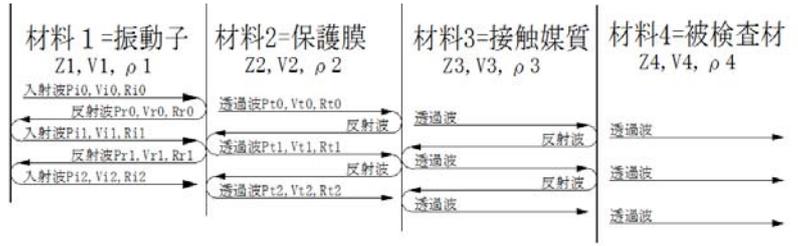
となり、最初の透過波より強い波が観測される。サイン・バースト音圧波の場合、例えば  $T_p$  が 0.18 で  $R_p$  が 0.8 の前例の場合、最初の一波目は  $T_p$  相当であるが、二波目は  $T_p$  の  $(1+0.8)$  倍相当、三波目は  $T_p$  の  $(1+0.8+0.64)$  倍相当と徐々に大きくなっていく。バック材の効きが悪く、振動子と遅延材など振動子の前に付く保護膜などの音響インピーダンスの整合が悪いと、最初が小さく段々大きく成る波が発生する。斜角探触子に多い。この現象が振動子の共振周波数である。

一方前例の  $T_p$  が 0.46 で  $R_p$  が 0.5 の場合は、二波目は  $T_p$  の  $(1+0.5)$  倍相当、三波目は  $T_p$  の  $(1+0.5+0.25)$  倍相当と徐々に大きくなるが、増え方は急に収束する。無限級数は 2 となるので、無限時刻で  $T_p$  の 2 倍即ち 0.92 相当の音圧となる。半波の音圧を発生する様な励振方式では、最初の波は  $T_p$  相当の 0.46、一波目は  $0.45 \times 0.5 = 0.225$ 、二波目は  $0.45 \times 0.5 \times 0.5 = 0.11$  となって、先頭が相変わらず大きい。

感度を上げる為、またパルス幅が広いと時間軸分解能が悪くなるので、 $T_p$  を大きく、 $R_p$  は小さく、またバック材を設けて、裏面からの反射を少なくする設計をしている。これを一般に広帯域探触子と呼んでいる。

保護膜や接触媒質の厚さと音圧波形

垂直探触子や水浸用振動子の前面には保護膜が付いている。垂直探触子ではアルミナ、窒化ケイ素、熔融石英など摩耗に強いもので出来ている。水浸法探触子ではエポキシ系が主で、混ぜものをして音響や強度特性を変えて



いる場合もある。これらの層の厚さは波形に影響する。この影響前項での振動子の厚さの議論に似ている。右図の用に境界で透過した波と反射した波何度も合成されるので、一般論としては簡単な計算では求まらない。シミュレーションで計算した方がよからう。しかし、保護膜や接触媒質に入射するのを一回として、振動子や保護膜に戻る超音波を無視して、即ち全反射するとして簡易化した検討するのも良からう。探触子の保護膜も被検査材も通常は音響インピーダンスが接触媒質



に比べて高いので、接触媒質内反射での位相反転は生じない。一方保護膜は探触子によって設計方法が異なり、振動子より音響インピーダンスが高い場合と低い場合がある。また、接触媒質も音響インピーダンスの高いのがある。3つの組み合わせの例を右に示す。これらは振動子の共振と同じであり、

$$T_p = \sum_{n=0}^{\infty} P t_n$$

$$= P(t)T_p + P(t+t_0)R_p T_p$$

$$+ P(t+2t_0)R_p^2 T_p + P(t+3t_0)R_p^3 T_p + \dots$$

となる。入射波の波長と膜の往復伝播時間が等しければ、即ち膜の厚さが半波長の場合

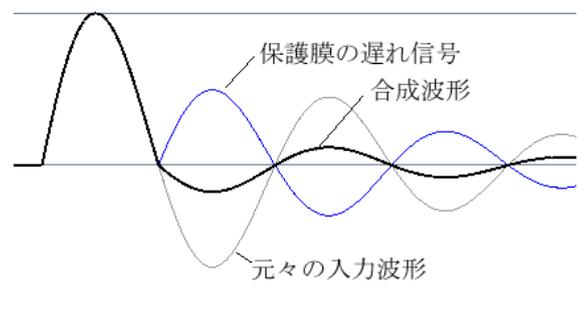
$$T_p = \sum_{n=0}^{\infty} P t_n = P(t)T_p(1 \pm R_p + R_p^2 \pm R_p^3 + \dots)$$

となる。従ってバースト波の波数が多ければ、 $R_p$  を調整すれば数波目が高い振幅になったり、速やかな飽和となる。長い波数の場合接触媒質を半波長程度にすると感度が上がる原因である。当然分解能が高い波数の少ない波形では最初の1の項以外の影響が少ない。

入射波の波長と膜の往復伝播時間の2倍が等しければ、即ち膜の厚さが1/4波長の場合

$$T_p = \sum_{n=0}^{\infty} P t_n = P(t)T_p(1 \mp R_p \pm R_p^2 \mp R_p^3 \pm \dots)$$

となる。水浸用探触子の場合第二項の符号は負であり、最初の波の  $R_p$  倍した波形を引いた事に成るため、ダンピングの利いた波形が得られる。多くの水浸法探触子は保護膜厚さを出荷前にこの様な状態に調整するか、製造方法上この厚さになる様にしている。右図は1/4波長保護膜による波形変化。



波形の参考例

さて元に戻って、制御技術論の話である。通常、系は複数の要素から出来ていて、右図の様に例えば2つに分けられる。

$$y = g * f$$

入力  $x$  と出力  $y$  の単位が同じであれば、

$$y = f * g$$

と入れ替えても、線形領域では同じと考えられる。

入力  $x$  をステップ関数として、それからスパイク、スクアエ、バーストなどに変換する系（一般には応答関数と呼ぶ）を  $f$  とし、電気的送信信号後、超音波を受信して増幅し波形出力  $y$  までを  $g$  とする。  $g$  は単にステップ関数による超音波パルサーレーバそのものである。送信電圧が高くスパイク、スクアエやバースト等に変換する実際の回路は大変である。  $g$  と  $f$  の位置を置き換えても同じなので、ステップ関数で励振し、  $f$  を通さず、  $g$  のみを使って応答  $i$  を得る。  $i$  を  $f$  に通せば同じ結果を得る事になる。

前述では、  $f$  を頭の中で作業したと言う事である。最近はAD変換を使ってデジタル化しているので、頭の中の作業をデジタルで行うのは容易となる。ステップ関数励振結果からいかなる送信回路での結果と同じ結果を得る事ができる。ステップ関数の周波数スペクトラムは既知なので、スパイク関数の広帯域での励振と同じにするには  $i$  を積分すればよい。その結果を適当なデジタル・フィルターや電気フィルター  $f$  を通すと、  $g * f$  即ち  $f * g$  の特性の試験ができる。

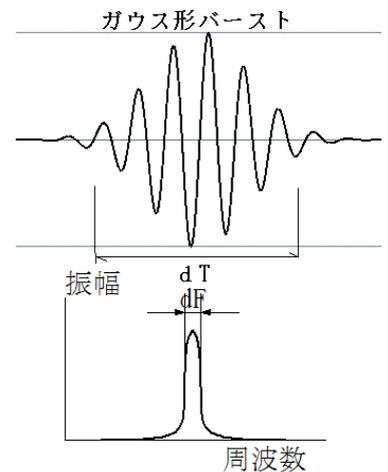
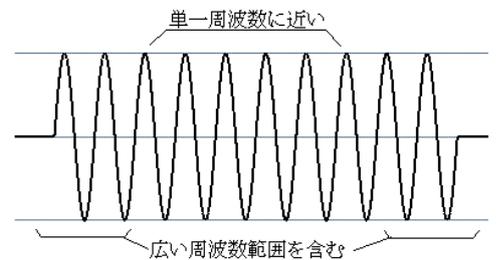
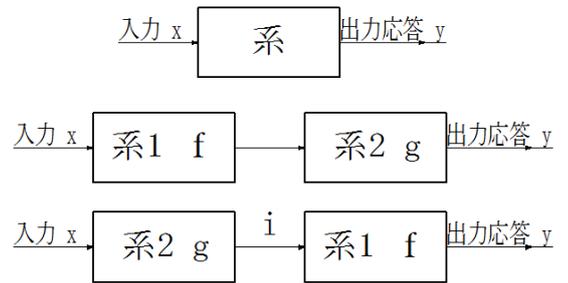
研究では特定の単一周波数で実験したい事が有る。サイン/コサイン・バーストが使うことが多いが、実はあまり好ましくない。バースト波は波の前後端で広い周波数帯域を含んでおり、中央の単一周波数に近い部分にその影響が表れる。

物理学の分野では成るべく単一周波数に近いパルス波（波群）で実験したい場合がある。この場合、ベル型（ガウス型、正規分布）の包絡線を持つ波群を使う。この特徴は周波数帯域とパルス幅（波群幅）の積が最少のものが出来る。位相特性が良く、微分積分しても波形が変わらないので音圧波形も同じとなる。この超音波送信回路は高価な為、通常はスパイクで励振し、安価なガウス型フィルターを通して同じ結果を得ている。ステップ関数励振で、受信波形を微分して、ガウス型フィルターを通して同じ結果である。帯域が狭ければステップ関数励振で、受信波形を直接ガウス型フィルターに通す事もできる。

各種励振方式の利点欠点を以下に纏める。

**ニードル型**（理想スパイク型）：現実の性能が悪く使われていない。

**ステップ型**：ニードル型の積分波形で、右下がりの広い周波数帯域を持つ。低周波の送信音圧が非常に強い。適当なフィルターを通す事で、あらゆる送信方式と同じ結果が得れる。

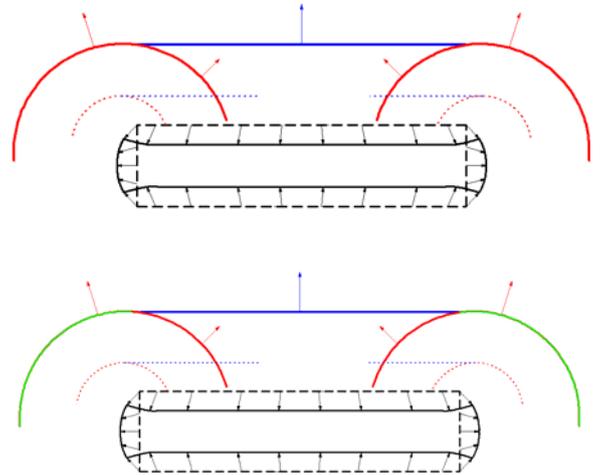


**スパイク型**：昔から使われていて、汎用。条件次第で半波からの音が発生できる。

**スクエア型**：音圧のピーク to ピークはスパイクの倍あり、受信回路を時間分解能が高い様に調整する使用方法では、スパイク型より感度が高い。

**各種バースト型**：実効 Q が高い探触子に対して、感度が高い。が、狭帯域の探触子でも波形の先端のみの波形を使う場合は他の方式と変わらないか、悪い。単一周波数が重要な場合は注意が必要ではあるが、ガウス型がより好ましい。狭帯域アンプを組み合わせると電氣的耐ノイズ性を強められる。現在のデジタル技術でノイズ低減には代替がいろいろあるので、使用には検討を要する。

ここで振動子の周囲から発するエッジ超音波に関して記載する。この現象はビームが面で反射する場合にも発生する。探触子内の圧電素子に通常は負のパルスを与え、振動子厚さが厚くなる。今回は考えにくいので逆電圧をかけて、振動子の厚さを薄くした場合を考えよう。通常の場合は全く逆の現象が起きる。まず四角の蒟蒻を上から抑えるイメージをして貰おう。右図は振動子の断面を示す。点線は電圧印加前の振動子を現す。これにステップ状の電圧を厚さが薄くなる方向に加えて十分時間が経つと、実線のように形状が変化する。厚さ方向に力を加えた場合の厚さ方向と幅方向の歪率の比はポアソン比と言って通常 0.3~0.4 である。電圧を加える圧電



効果の場合、この比は範囲が広く、振動子素材によって異なる。市販探触子に使われている振動子素材では 0.1~1 の範囲であり、一般に PZT 系は大きく、広帯域用振動子に使われている素材は小さい。厚さが変化するので、縦波平面波が図上下方向（振動子軸方向）に発生する。上下面は広がる方向にも表面が移動するので、粘性媒質では横波も発生する。側面即ち周囲は径が大きくなる。振動子面とは逆位相の縦波が発生する。一定時間後の波面先端はメインの縦波を青で、周囲からの逆位相の俗にエッジ波、ドーナツ波と呼ばれる波は赤で示す。幅の短いスクエアやスパイクパルスで励振する場合は、水平方向の歪が伝わる時間が無いため、右の図のように横波は振動子面の周囲のみで発生する。（これは振動子の径方向に伝播し、径相当の多重反射を生じる、帯域が十分広い装置で観測できる）振動子中央付近はポアソン比に応じた逃げる歪が発生出来ないで、ステップ励振より厚さ変化は少なく、その分送信音圧は低い。なお、周囲は製造方法によっては分極が不十分だったり、また電圧を印加した場合電気力線が外に漏れるので、圧電効果は内部より弱い。保護膜や周囲の保持層などの影響で、周囲の歪は上記のような振動子単体より小さくなったり大きくなったりする。より実際的に書くと、右図の様になります。平面波の端部は拡散します。従って、エッジ波と重なります。緑で示した部分です。この部分が正の音圧か負の音圧かはエッジ波とメイン波の重なり具合で変わります。振動子から近いとエッジ波が強く、振動子から離れるとメイン波の方が強い傾向にありますが、それぞれのケースで異なります。メインビーム幅内の赤い色で示すエッジ波は当然メイン波とは逆位相です。また、メインとエッジ波の帯域が異なり、位相がずれている様に見える場合もあります。そう言う事を頭に入れて次の可視化像を見てください。

全体右写真は可視化像で確認したものである。

### 可視化画像（三原氏準備？）

ここまでの話で、半波や一波の音圧の話が出てきて、通常見ている 1.5 波と違うと言われる方が多いと思う。

次回の音波の受信の話で、その理由を知る事になる。画面に表示される波形やその周波数は、実際の音圧とも異なる事を勉強する。