

音波のよもやま話 (その21)

エコー波形と受信音圧波形 (2)

(有)アイ・エス・エル 宇田川義夫

◆はじめに

今回は音の受信を理解するために必要な基礎理論を述べた。今回は実際の受信音圧波形とエコー波形の関係を述べる。

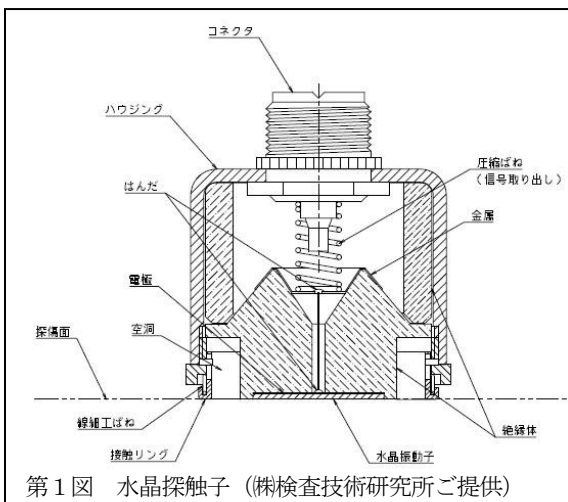
◆狭帯域探触子

1960年ころまでの探触子はほぼ全てが狭帯域型であった。それ以前は振動子と言えば水晶振動子の事を指したし、セラミック振動子は販売し始めたばかりであった。第1図に水晶振動子を使った探触子の断面図を示す。探触子前面の接触リングが導電体である被検査材に接触し、GND側電極は被検査材の導電性に頼った。当時の被検査材は鋼のみであった。保護膜無の振動子直接接触構造である。水晶振動子単体の機械的Q値は非常に高く、現在でも時計や通信機器の発振器に使われている。その音響インピーダ

ンス 15MRayls が鉄 45MRayls、アルミ 17MRayls など金属と比較的近い事から十分音響結合させるとQ値が下がり、現在で言う中帯域に近い波形も得られた。セラミック振動子も20~40MRaylsと音響インピーダンスが金属に近いが探傷走査で摩擦しやすい。元々の水晶の感度が低い事もあって、感度を上げる為に電気的中和回路を水晶振動子に付加している為、狭帯域で使うのが原則であった。ジルナマ系セラミック振動子が主流になっても、高感度探傷が必要な場合、感度の高いセラミック振動子や1-3構造化振動子が使用されるまでは感度を上げる為電気的中和回路が使われ、狭帯域のままであった。電極、保護膜が無く、被検査材の表面が平坦だと、極薄い接触媒質、事実上直接接触に近く、現在の探触子の様に保護膜により発生する波形歪を無視できた。水晶は薄くすると強度がなくなり高周波は無理だが、半世紀以上前の論文によると1MHzの水晶振動子で高調波を用いて100MHz相当の肉厚測定もされていた様である。

受信音の話だが、結論から言うと、狭帯域の場合、探触子にどんな波が入ってこようが、受信探触子特有のほぼ似た波形がエコーとして観測される。以降のシミュレーションではウェブでフリーライセンスのP2R(送信 to 受信)ソフトウェアのオプション機能を使って、受信のみの解析として使った。狭帯域探触子での受信の一次元シミュレーションの条件は以下とした。

- 1) 受信音波波形はサイン、ガウスサイン、減衰サイン、矩形パルス等とした。

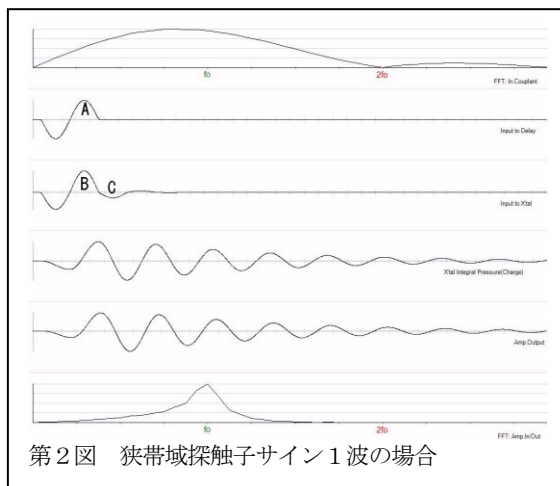


第1図 水晶探触子 (株検査技術研究所ご提供)

受信音圧波形とエコー波形

- 2) 接触媒質は無しとし、水浸で、保護膜に波が入ってくるところからのシミュレーションである。水の音響インピーダンスは 1.48Mrayls
- 3) 保護膜はエポキシとして $\lambda/4$ 厚さとした。音響インピーダンスは 30Mrayls 。斜角の場合殆どのメーカは楔に振動子を直接貼り付けるが、感度を上げる為一部のメーカは楔振動子間に $\lambda/4$ 厚さグリーンレジストなどを用いているので注意が必要である。振動子は国内で一般に使われるセラミックとした。
- 4) 一部の探触子メーカは低周波の径振動が現れない様にインダクタンス等電子部品を挿入している。その場合のシミュレーションはしないが、この場合低周波成分が減っていると考えてほしい。
- 5) バッキングはコルクとした。音響インピーダンスは 0.1Mrayls 。メーカによってはゴム引布などを使っている。ゴム引布では多少中帯域になる。狭帯域探触子のバッキングは振動子から裏面に伝わる音がケース内部に伝わるのを音響遮断する為に使われる。
- 6) 探触子ケーブルは無い。2m 程度の探触子ケーブル内の多重反射は 5MHz 程度までは無視できるので、除いた。矩形パルス音波など、基本波より高い周波数成分含む場合やケーブルが長い場合は無視できないので、注意が必要である。
- 7) アンプの入力ダンピング抵抗は共振周波数で探触子インピーダンスと同じとした。
- 8) アンプは振動子の共振周波数の 0.1 から 1.5 倍で -6dB の帯域があるものとした。
- 9) 波形の変化を観察したいため、縦軸振幅はピークを一定とした。

第2図にサイン波形一波分の音が保護膜に入ってきた場合の計算結果を示す。この入力音波は同図2段目である。最上段の波形は入力音波をFFTした結果である。ゲートは掛けずに波形の前後を延長した波形をFFTしているので、ほぼFTと同じ結果と思ってよい。



同図3段目は保護膜から振動子に入射する音である。保護膜の厚さが $\lambda/4$ の為、保護膜内で多重反射が発生し、Aの部分に重なってBは相対的に高く成っている。先端半波より、Bの方が振幅の絶対値は大きい。それ以降がCである。水とエポキシは音響インピーダンスが比較的近いので、保護膜中の多重反射波は水中に抜けて速やかに減衰する。

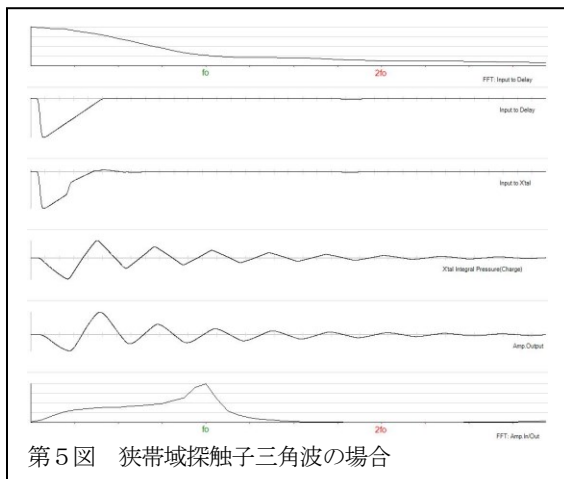
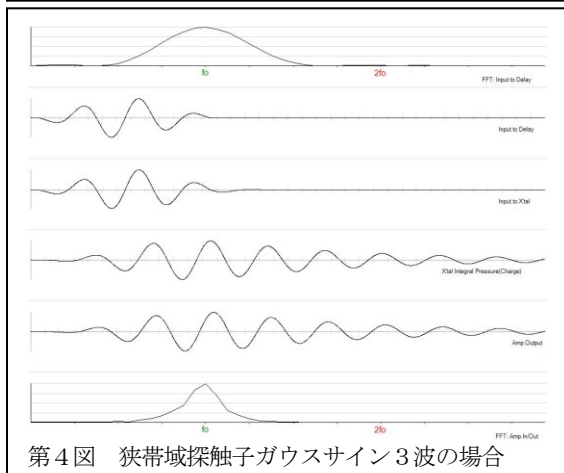
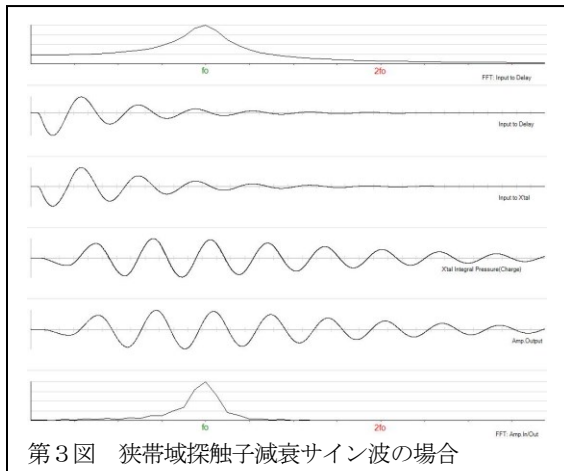
同図4段目は振動子の中の音の多重反射によって発生した電荷である。アンプの入力インピーダンスが大きい場合は電圧と考えても良い。振動子とその裏表の媒質との音響インピーダンスが大きく異なる事から、振動子内の多重反射が尾引している事が判る。また、先端半波は次の半波より明らかに小さくなっている。

同図5段目はアンプ入力のだんピングの影響とアンプ帯域の影響を受けたアンプ出力の波形である。これを一般にエコーと呼んでいる。上下対象に近いので1960年頃から検波して絶対値を表示するようになった。エコーは最上段の入力波とまるっきり異なる事が判る。

同図6段目は同図5段目のエコー波形相当のFFT結果で、最上段の入力波の帯域に比べ帯域が狭くなって主に振動子の自由共振周波数のみが残っている。

次に共振周波数を中心にDC成分まである減衰サイン波を入力した場合を第3図に示す。前図に比べ多少緩やかにエコーの振幅が増え、ピークは2波目程度と思われる。

受信音圧波形とエコー波形

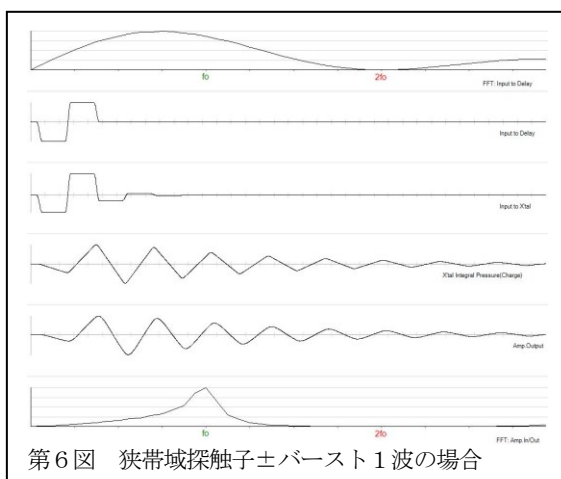


次に波数が 3 と短いガウスサインの場合を第4図に示す。元々入射波の帯域は更に狭く、DC

成分は無い。エコー波形は前図と大きな差はない。

次の第5図は立下りが速く立ち上がりの穏やかなノコギリ波の場合である。入力波の共振周波数成分は少ないが、低周波成分が多い。エコーは振動子の共振周波数の成分が顕著になる。エコーの波形は三角関数曲線からずれて直線的な部分が増える。日頃実際の探傷器のRF波形を観察していると同様な現象はよく観察される。

次の第6図は負正バースト1波の場合である。最近の出カインピーダンスの低い探傷器やアレイ装置はスクエア・パルサーが主流で、広帯域探触子をスクエア・パルサーで励振すると似



た音圧波形が発生する。エコー波形は前図と似たような波形である。

第2～6各図のエコーのFFT結果を見ると、入力の帯域が広くても、どれも共振周波数付近が主成分である。受信探触子の強いフィルター特性の影響である。入力の波形により、多少のエコー波形に差が出るが、強いフィルター効果により大きな差は認められない。狭帯域探触子では波形の形を解析に用いる事は困難と考えられる。水晶振動子はそのQ値が高い為、鋭い狭帯域フィルターに使われる。探触子も内部機械的Q値が高く成っていると、その周波数の狭帯域フィルターを通した結果としてしかエコーを観測できない。今回の概略のQ値は $30/2.5 \approx 10$ (振動子前面裏面の強度通過率加算の逆数程度)である。

◆広帯域探触子で受信の場合

広帯域探触子の基本設計概念は、振動子裏面に貼るバック材の音響インピーダンスを振動子のそれに近づける事である。他に振動子前面の材料と振動子の音響インピーダンスを近づける方法も直接接触法探触子や遅延材付探触子で使われていて、1-3 コンポジットを使う方法が典型例である。今回は前者の方法のシミュレーションをする。後者の場合も似た傾向にある。

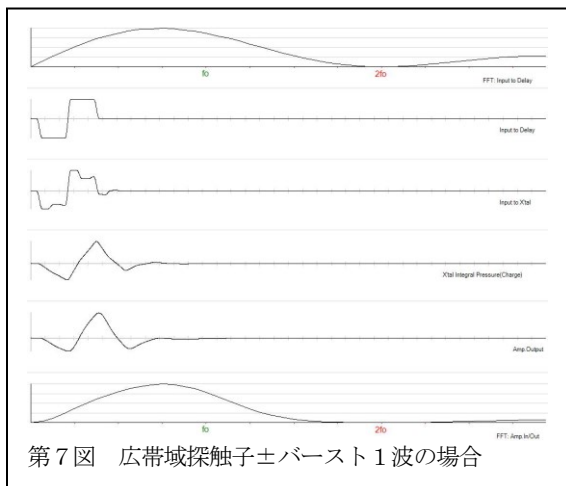
- 1) 受信音波波形はサイン、ガウスサイン、減衰サイン、矩形パルス等とした。
- 2) 接触媒質は無し。媒質は水の音響インピーダンスは 1.48Mrayls
- 3) 保護膜は広帯域探触子では成るべく薄くしたり、散乱粒子を混ぜたり、厚さを一定としない保護膜など色々使われている。或いは多層にする事もある。水浸法用として多く使われているのはエポキシなので、音響インピーダンスは 2.5Mrayls のエポキシとして $\lambda/10$ 厚さとした。
- 4) 振動子は国内外で一般に使われるニオブ系セラミックとした。音響インピーダンスは 24.5Mrayls であるが、広帯域用振動子は粒界が大きく振動子厚さの数分の 1 の場合もある。粒界が大きいと振動子内部での減衰が発生する。これはシミュレーションに含まない。また、振動子の感度は、厚さ方向均一ではない場合が多いが、均一とする。
- 5) 一部の探触子メーカーは低周波の径振動が現れない様にインダクタンス等電子部品を挿

入している。その場合のシミュレーションはしないが、広帯域探触子ではまるっきり異なる結果になる事が多い。基礎研究には使えない事が多い。

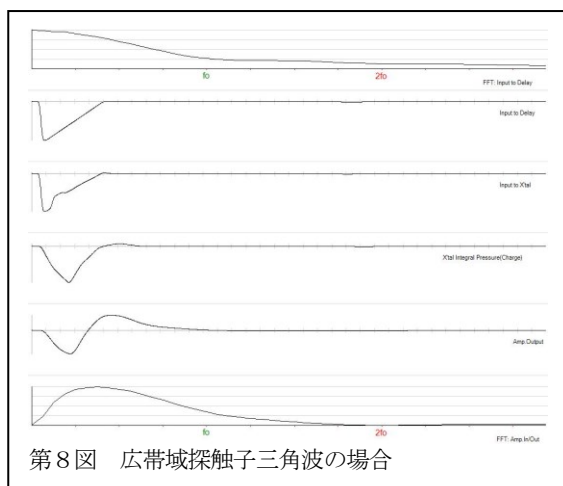
- 6) タングステン粉を使った減衰が大きいバック材である。音響インピーダンスは 19.5Mrayls。振動子に音響インピーダンスをピッタリ合わせる事もできるが、減衰が少なくなるし、温度で減衰量が変わり低温になるとバック材裏面の反射エコーが現れるなど探触子として使えなくなるので、通常は少し低めにしている。
- 7) 広帯域探触子では、ケーブルの影響は狭帯域探触子より大きい、話が複雑になるので、無い状態とした。

まず、第 6 図と同じバースト 1 波形入力の例を第 7 図に示す。三段目の振動子に入射する波は保護膜の $\lambda/10$ の 2 倍 (往復) 同等の凸凹が観測される。エコー波形は 1.5 波の一般的な広帯域探触子のエコー波形に近い。エコーの中心周波数は振動子の共振周波数 f_0 より少し低くなっている。探触子メーカーが、使う振動子の共振周波数を探触子の公称周波数より 20~50% 高いものにする一つの理由である。

次に第 8 図に示すのが、三角波の場合で、エコー波形は第 5 図とは異なる事は判る。しかし、エコー波形から入力音波の波形を想像する事は難しい。



第 7 図 広帯域探触子バースト 1 波の場合

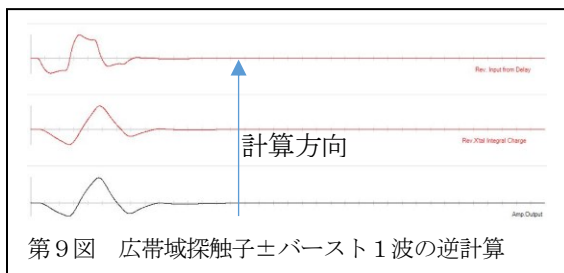


第 8 図 広帯域探触子三角波の場合

受信音圧波形とエコー波形

広帯域探触子であっても、探触子のフィルター効果で、入力波の波形を詳しくは観測できない。

逆コンボリユーション計算でエコー波形から入力波形に近い形に計算はできるが、振動子の正確なパラメータを知る由もないし、知ったとしても電気ノイズは計測誤差の為非常に困難である。狭帯域探触子の場合は、探触子のフィルター効果が強く、エコーに含まれる入力音波波形の情報が殆どないので、逆コンボリユーション結果は似ても似つかない形に成る。参考ま



第9図 広帯域探触子±バースト1波の逆計算

で第7図のエコーから振動子に入る音を逆計算した例を第9図に示す。最下段がエコー波形でこれから、振動子で発生する電荷を計算し(図中段)、更に振動子に入ってくる音圧(図上段)を計算させた。辛うじて入力矩形の様な波形であろうことと、少し保護膜らしき凸凹があるかと想像できる波形であるが、第7図の様に明確な凸凹は観測されないし、波数が多くなっている。元々の音からエコー電圧に変換されている最中に計算最小桁以下の情報が失われている、計算時間軸ピッチが荒い為などで、元に戻らない。計算の縦軸横軸の分解能を上げると、もっと似てくるが、実用上はノイズレベルやジッタが最小分解能を決める。探傷器の画面波形を見ると、波形振幅が1%近く変動していて分解能を上げる意味がない。この変動は主にパルサー安定性、特に高電圧電源の安定性とゴースト・エコーのランダムな重畳である。PRFを下げると少し良くなることもある。

結論からすると、入射波の音圧波形を観測したい場合、その基本波の周波数の狭帯域又は広帯域の探触子で測定しても、ほぼ何もわからないということである。二探触子法として音圧を受信するセンサーに基本波より十分高い周波数

の探触子を使う必要がある。なお、それをして受信用センサーが音(圧)場を荒らすので、正しい波形は得られない。この辺お話は連載の後の回に話す。

なお、シミュレーションの逆計算では計算上の発散を防ぐ為の処理をしていて、その為の誤差も含まれる。

◆あともがき

今回は送信基本波と同じ周波数の狭帯域探触子と広帯域探触子で音波を受信した場合エコー波形がどう変化するかシミュレーションしてみた。受信音波と観測エコー波形が異なる事が判った。次回はより入力音波に近い波形の観測法を述べる。

◆今回知った事

- (1) 昔の水晶探触子は保護膜無の振動子直接接触構造である。
- (2) 狭帯域探触子で受信する場合、探触子のフィルター効果で、どんな波でも振動子の実効共振周波数付近の成分しか観測されない。
- (3) 広帯域探触子であっても、探触子のフィルター効果で、入力音波の波形を正確に知る事はできない。
- (4) 逆コンボリユーション計算は、ノイズは誤差があると上手く収束しない。

<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)