

音波のよもやま話（その20）

エコー波形と受信音圧波形（1）

（有）アイ・エス・エル 宇田川義夫

◆はじめに

レーザー変位計で伝搬してくる音波の表面変位を測定し、変位波形の微分値（単一垂直平面波では音圧相当）と、同一点での超音波センサーで受信した音圧波形をみると、一般に一致しない。変位計での測定は表面の変位であり、複数の波による変位の加算された可能性もある。例えば変位はゼロの場合、同じ強度の正と負の音波が同時に到達した可能性もある。受信振動子ではその指向特性を反映して異なる波形になる。レーザー変位計による計測と、探触子による計測のどちらがより現実に近い波形か、軽率には言えないが、大きな違いがあるのは確かであり、多くの論文で指摘されている。

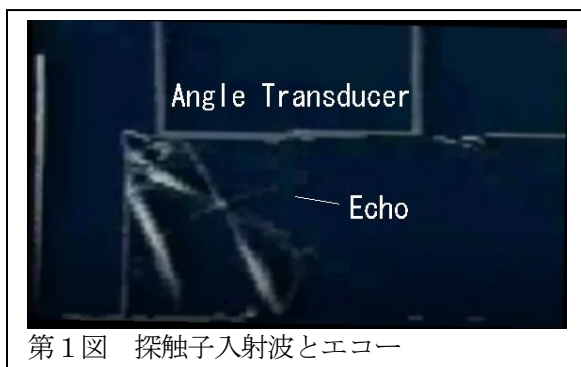
前々回に非破壊検査で観測するエコー波形と振動子が受信する音圧波形とはかなり違う事を述べた。今回はより詳しく述べる。

◆探触子に入ってくる音とエコー

複雑な形状の非検査材を探触子で検査する場合の光弾性可視化装置や音の FDTD シミュレ

ーションの伝搬挙動を見ると、色々な音が探触子に入ってくる。しかし、その一部がエコーとして探傷器画面に表示されるにすぎないことが判る。光弾性可視化や FDTD シミュレーションでは斜角探触子では楔内の音は直ぐには減衰しないのに、探傷器の画面のエコーは直ぐに減衰して観測される。第1図は光弾性可視化装置により単純なコーナーから縦波斜角探触子に戻ってくる音の様子である（ウェブ：http://www.is-sl/video/uvs_ang2.mp4）。探触子に強い多くの音波戻ってくるが、エコーとして表示されず、画像に辛うじて印刷前の元画像で見える弱い Echo の印の音がエコー波形として探傷器画面に表示される。探触子に明らかに入ってくるその他の音は、音圧としては強いにもかかわらず、ごく弱いエコーとしてしか表示されない。光弾性可視化装置の画像やソフトウエア・シミュレーションで伝搬挙動の詳細を把握しても、どれがエコーとして探傷器等の画面に表示されるかわからず、結局実際の試験片と探触子を使った探傷器の画面上のエコーと相互に詳細に確認する必要がある。

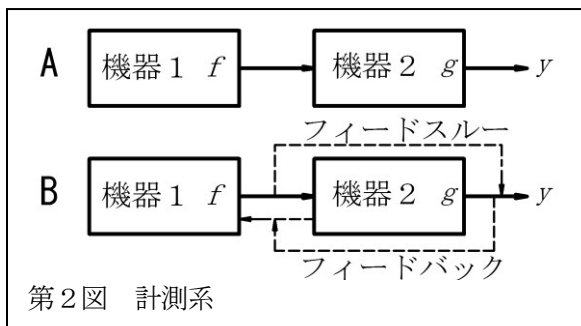
FDTD シミュレーションなどは、特定の反射源で音がどう変化するか、振動子の形状を楕円形にしたら音波はどうなるかなど、探傷全体の一部を切り取ってシミュレーションするには良い。が、画面に観測されるエコー波形のシミュレーションをしたい場合は殆ど役に立たない。その為、探触子メーカーで音波のシミュレーション・ソフトを探触子設計に使っている会社は現在ないと思われる。仮に有用であっても、シミ



ュレーションにかかる膨大な時間と費用より、試作を繰り返した方が安く速く且つ確実である。探触子メーカでないと、コストは寧ろ高いかもしれない。探触子への入射音が判っても、エコーとしてどれが表示されるかは探触子と探傷器又はレシーバの特性次第である。探傷器の機種を変えると状況が変わるのである。一方音のシミュレーションの利用は、超音波に詳しい非破壊経験者が今まで経験のない特定の現象を確認する場合や素人や客向けの資料用途としては便利である。また探触子に入射する波のどれがエコーになるか知っている経験者の元で初心者の教育用に使うのは良い。

◆一般計測系での理論

探触子に來た音を探触子で電圧に変換し、アンプでそれを表示できる振幅に増幅し、画面に表示された波形を我々は観測している。この観



測波形をエコー波形と呼ぶ。この音が平面波で振動子に垂直入射の場合、入力音波形からエコー波形を知るには、一般計測系理論同様に計算できる。まずこの辺の話をする。

入力と出力がある機器（上記の話では入射音、探触子も機器である）が複数直列に繋がっている場合を考える。機器が2つの場合の例を第2図に示す。機器1の入出力関係は f である。 f を特性関数と呼ぶ。図では入力は記されていないので、出力 f のみ使う。機器2の入出力関係は g である。機器1の出力に機器2の入力が第2図Aの様に接続されている場合機器2の出力 y は

$$y = f * g \quad \text{式(1)}$$

の様に*印の掛け算、畳み込み積分 (convolution) で表示される。別名、「合成積」或いは「重ね合わせ積分」と呼ばれる。実際の計算は

$$y(t) = \int f(\tau)g(t - \tau)d\tau \quad \text{式(2)}$$

となる。 t は時刻である。

ギターのアンプに付いているエコー残響を発生させる回路は、この畳み込み積分をアナログ又はデジタルで実現したものである。

非破壊での音波受信では、入力音波音圧波形を f 、探触子特性を g 、アンプ特性を h 、表示器特性を i とすれば観測エコー波形 y は

$$y = f * g * h * i \quad \text{式(3)}$$

となる。

計測系の各機器の特性関数 ghi が分かれば、音圧波形 f に対するエコー波形を計算で求める事ができる。

また逆変換の逆畳み込み (deconvolution) も存在し、エコー波形 y から音圧波形 f を求める事ができる。しかし、計測にはノイズがつきもので、それにより計算が発散しやすく、各要素を正確に記述する事も困難で、逆変換の確度は低く、使用には注意が必要である。

一方畳み込み積分は、実際に近い結果を得ることができる。各機器の特性を正確に知る事は困難なので、誤差はあるが実用に耐え、少なくとも目安にはなる。第2図Bの様に実際に組み合わせた装置ではフィードバックとフィードスルーと呼ばれる信号の経路があり、誤差の一つの原因である。

オーディオアンプなどでは、音楽を増幅してスピーカを鳴らすが、オーディオソースの音を増幅する過程で、例えばその信号電流が配線が振動させ (ピンチ効果)、その振動が部品、例えばコンデンサーに伝わり、振動で容量が変化し、そのコンデンサーを伝わる信号が変調される。高級オーディオが重く作られているが、重ければ振動しにくいと言う理由である。更にスピーカからの音がアンプを揺らし内部回路にフィードバックするのを防ぐにも重くする事は良い事である。

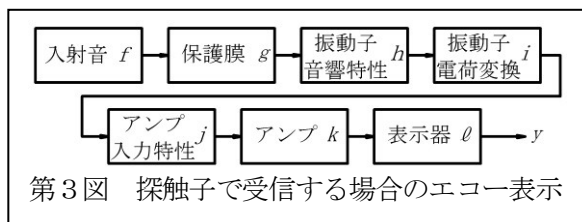
これらの誤差要因が無視できる場合に畳み込み積分の結果は、実際の計測系とほぼ同じ結果をもたらす。以降で使ったシミュレーション・ソフトではフィードバックの影響が大きい部分に関しては計算内で考慮している。

高周波では空間を簡単に信号が伝わる為、フィードバックが大きい。高周波アンプは1段あたりの増幅度が低い理由の一つである。増幅度を高くすると簡単にフィードバックにより発振器になってしまう。

◆探触子の音波受信の場合

一般超音波解析理論は平面波など一次元近似が成り立つ事を前提にしている。が、平面波で実験しようとしても探触子に平面波が入ると、探触子のケース周囲や振動子周囲でBEDが発生し、歪をもたらし。これが理論と実際が合致しない一つの理由である。が、歪の部分を除けば、色々なパラメータの違いが、出力に与える一定の傾向は、理論計算から知る事は出来る。また、振動子と波面が傾いている場合も誤差がでる。振動子に傾いては入った音に対する、電荷感度は今だ知られていない。

探触子で音を受信する場合、音波と振動子を無限大の大きさと仮定し、一次元近似すると計



測系は大まかに第3図のようになる。直接接触や水ギャップ法では保護膜の前に接触媒質が入る。振動子も厳密には電極があり、一部の振動子では無視できない厚さの電極を使う事もある。これらの波形への影響は保護膜と同じなので、あえて抜いた。もっと細かくして例えばアンプの中を初段アンプ、中段アンプなど複数に分けても良い。第3図の場合エコー波形出力yは

$$y = f * g * h * i * j * k * l \quad \text{式(3)}$$

となる。式(3)の離散値での計算結果は一次元FDTD法と等価になる。

◆一次元シミュレーションの難点

第3図の一次元シミュレーションでは実際と大きく離れた結果が出る場合がある。例えば有限大きさの保護膜である。一般に水浸探触子では保護膜厚さが波形に大きく影響する。同じ保

護膜厚さで振動子径が大きくなると影響がすくないので、厚さと径の比に由来すると思われる。前の回までに光弾性超音波可視化像で示した様に、振動子に横振動が少なく、厚さ振動中心の素材を選択しても、保護膜の中では横振動が起きる。さらに実際の探触子は保護膜と同じ材質で振動子周囲を覆っている構造が多く、周囲と保護膜が繋がっている構造も関係している。

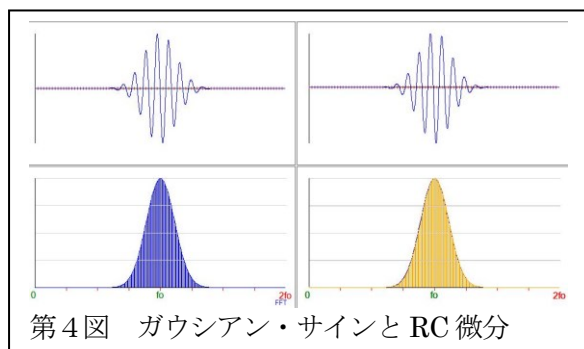
保護膜、接触媒質は薄くなると、振動子表面などの粗さに近づき、計算結果が実際と異なってしまう。これら膜内の多重反射は拡散し、また表面荒さの為、モード変換が増えたり、直接膜の前後が部分接触したりする。接触面の平滑度が良く、大気圧程度の接触面圧で実効接触面積が増え接触媒質が無くても十分探傷可能な感度状態になる(実際は表面に水分などが付いて、それが接触媒質の役目を果たしている様である)。

物理上、無限小は無いが、計算上は無限小がありえる。その為シミュレーション結果が実際と乖離してしまう。これはあらゆる自然現象のシミュレーションに言える。

振動子の厚さが径の数十分の1以下なら良いが、この比が近づくと厚さ振動以外の振動も発生する。今までの経験上保護膜を除くと、概略振動子径が厚さの30倍程度だと、大半の非破壊超音波用振動子では以下のシミュレーションに近い結果となる。代表的5MHzの振動子厚さは0.3mmでφ10の振動子の場合、厚さが振動子径の33.3分の1となる。この程度なら、数波長の間は平面波が往復しているとみても良い。

◆パルス波と連続波

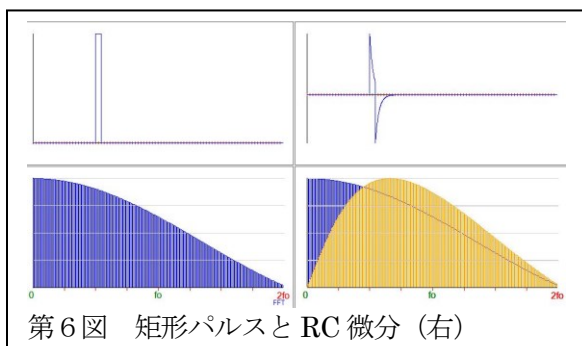
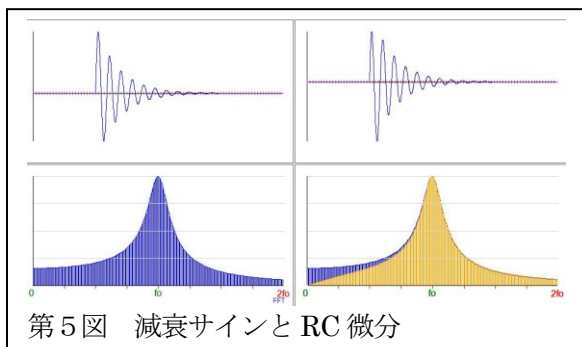
多くの超音波理論は連続波の場合を仮定している。パルス波では連続波理論と合致しないと言う事が多い。これは連続波の理論に欠陥がある為である。連続波は周波数帯域がゼロの特殊な波である。例えば、連続波を微分しても積分しても、同じ周波数の連続波である。変化があっても気が付かない。連続波に近く、実験に良く使われる、ガウシアン・サイン波形の場合を見よう。ガウシアン・サインとは波形全体の包絡線がガウス分布(二項分布)の形をしている



波形で無限小から段々大きくなり、又無限小に小さくなる。第4図の左上が入力ガウシアン・サイン波形 f で同図の左下の様に f_0 の中心周波数付近の周波数成分しかない。これを関数 g としてCR微分して畳み込み計算すると第4図の右上の波形、その周波数帯域は右下となる。入力と出力での差異は確認できない

自然界には入出力関係が単なる微積分関係となる場合は存在しない。一次二次等の遅れ要素が含まれることが多いので、ここでは一次遅れのCR微分を使った。

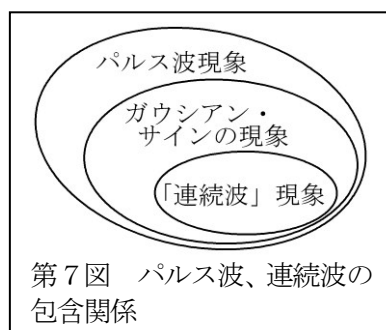
第5図では入力 f を減衰サイン波形とすると、CR微分による波形の変化が少し判るし、周波数分析で低域周波数での変化が明瞭である。



第6図では入力 f を矩形パルスとした。大きな波形の変化と周波数帯域の変化がわかるであろう。

連続波やガウシアン・サイン波形で実験すると、計測結果に含まれる物理現象が現れない可能性が高い。連続波やガウシアン・サイン波形での理論と実験結果が合致しても、その理論はあくまで連続波やガウシアン・サイン波形の場合にだけ成り立つので、含まれる重要な現象を全て表現してはいない。自然界には連続波は存在しない。全てパルス波である。長いバースト波を「連続波」と考えると、包含関係を図で書くと第7図のようになる。

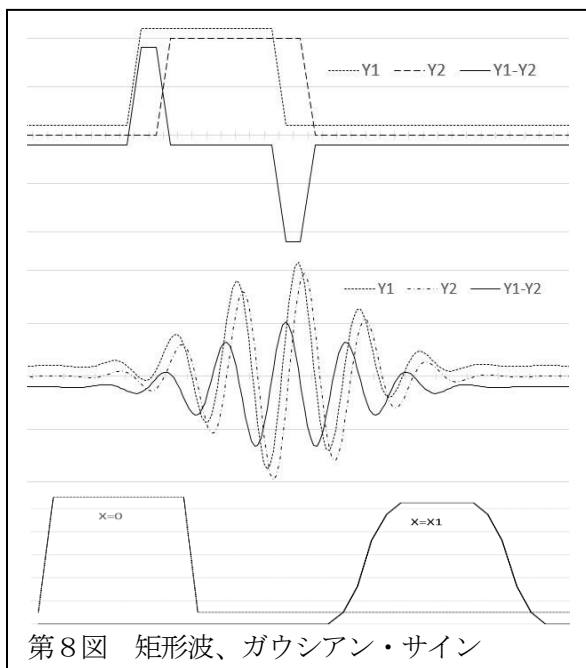
昔スピーカの開発には連続波試験が使われた。低い周波数から高い周波数まで、振幅の周波数特性をなるべく平坦



(フラット) にすることに努めた。しかし、いくら振幅の周波数特性が良くても、良い音になるとは限らない。位相の周波数特性も同時に良くなしないと良い音にならない事に気づいて1970年代頃から、振幅と位相の周波数特性を良くする方向に開発が進んだ。振幅と位相の周波数特性を良くする事は、パルス波に対する応答特性（インパルス応答と呼ばれる）を良くする事と等価で、この方が試験はより簡単である。開発現場ではパルス波に対する応答特性を開発に使われる様になった。最初にこの方法でスピーカを開発したのは米国のティール社(THIEL)と思われる。

前にお話した「尻食い現象」は矩形音圧波すなわち、広帯域探触子に対する電流インパルス応答（電圧インデシアル応答）で観測すると現象に誰でも気が付く（第8図上）。ガウシアン・サイン波形では第8図中の様に単に振幅が変化している様にしか観測されない。矩形波だと、媒質中をX1距離伝搬すると、第8図下の様に前

後エッジが詭る。振幅が変わらない事と前後の



傾斜が変わる事から音速分散がある事が判り、音速分散が減衰として観測される一因である事が判る。一方ガウシアン・サインだと、単に振幅が変化した様にしか観測されず、マクロの減衰定数は求められるが、その原因を逆問題として追及することは難しい。

◆周波数変換

実時間の波形では、何がどう変化しているのか分かりにくい事がある。第5、6図で周波数特性の変化の方が事象をより分かりやすく表示している。これらの図では何れも低周波成分が大きく減り、高い成分の変化は少ない。位相の周波数特性は同図には表示されていないが、位相のずれは周波数に比例する。即ち、遅延時間は一定である。これがCR微分の特性である。入力と出力の関係が、低域程振幅が減衰し、高域では変化が少ない場合（出来れば遅延時間を計測し遅延が一定なら）、CR微分的要素が含まれている可能性があるともいえる。

逆にRC積分的現象は低域減衰が少なく、高域での減衰が顕著になる。超音波探触子の裏面のバッキング材で減衰の多いものは、そのよう

な特性を示す。MHz帯での良いバッキング材がMHz帯域以下の低周波では良くないと言う事である。

時間領域の波形の周波数特性を知るにはフーリエ変換(FT, Fourier Transform)が用いられる。

繰り返し波形の場合は計算速度の速いFFT(Fast Fourier Transform)使われる。超音波探傷などではPRF毎の繰り返し現象なので、FFT計算時間範囲が十分広いなら、FTと同じ結果が得られる。計算時間を早める為、ゲートで波形の一部を切り出す事が多く、最近のデジタル・オシロスコープに付加されているFFT機能は誤差がある事を知った上で使うのが良からう。

FTの逆で、周波数領域の特性から実時間の波形に戻すこともでき、逆フーリエ変換(RFT)と呼ばれる。周波数特性は振幅と位相の両方の周波数特性が必要である(複素周波数特性でも可)。

複数の周波数の異なる連続波形を合成すると、パルス波を作る事ができる。ここで間違っていない事は、波形と言う情報が合成できるだけで、複数の周波数の異なる連続「音波」波形を用いてパルス音波を構築できるが、物理的に同じと言っているわけではない。例えば音により熱が発生されるが、連続波では無限の熱が発生し、パルス波では殆ど発熱しない。

また、永久機関は今のところ実現されていない。物理現象(実体)としてのパルス音波が複数の連続音波の合成で出来ているとすると、連続波をエネルギーに変えれば永久機関ができることになる。

フーリエ変換やその逆変換は情報、波形に関しての理論で、物理上では成り立っていないのである。

オーディオアンプなどの電気回路では、電気波形と言う情報を加工しているので、フーリエ変換やその逆変換が役に立つ。電気のパワーと言うと成り立たなくなる。パワーは情報ではない。スピーカからパルス音を複数の連続波の合成で出そうとすると、膨大なエネルギーが必要になる。

受信音圧波形とエコー波形、パルス波、連続波の包含関係、矩形波、ガウシアンサイン

あるパルス波の**波形**が FT(又は FFT)の結果複数の連続波**成分**で出来ている事が判っても、そのパルス**音**が複数の連続波**音**で出来ているわけではない。

以上一般論を話したが、以降具体的に探触子にどういった波が入ったら、出力がどうなるかを見る。

連続**音**で出来ているわけではない(合成できない)。

＜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)

◆あしがき

今回探触子で音波のベースとなる話をした。今回は実際の入射音波波形とエコー波形の関係を述べる。

◆今回知った事

- (1) 弾性可視化や FDTD シミュレーションでは斜角探触子では楔内の音は直ぐには減衰しないのに、探傷器の画面のエコーは直ぐに減衰して観測される。
- (2) 探触子に入ってくる音の一部がエコーとして表示される。受信探触子によるフィルター効果の影響が大きい。
- (3) 全てが一次元モデルの計測系は、各要素の「畳み込み積分」でその全体での入出力関係を知れる。
- (4) 周波数成分は FFT 又は FT で知る事が出来る。
- (5) バースト波や連続波は、パルス波の一部と考えて良い。
- (6) バースト波や連続波では、前回の「尻食い現象」など色々な現象があってもエコー波形に現れない事が多い。
- (7) 精度の良い実験をするにはパルス波が適する。音響でもパルス応答が重要視される様になった。
- (8) 減衰の現象の理由は、パルス波だと波形から想定が付く。
- (9) 周波数分析はあくまで分析手法であって、複数の連続波温からパルス音を合成できない。
- (10) あるパルス波の**波形**が FT(又は FFT)の結果、複数の連続波**成分**で出来ている事が判っても、そのパルス**音**が複数の連