

受信音圧波形とエコー波形の違い,エコーのピークは音圧の最大傾斜部？,

音波のよもやま話 (その22)

エコー波形と受信音圧波形 (3)

(有)アイ・エス・エル 宇田川義夫

◆はじめに

今回は音波と同じ基本周波数の受信音圧波形とエコー波形の関係を述べた。今回はより受信音の音圧波形を正確に計測する方法について述べる。

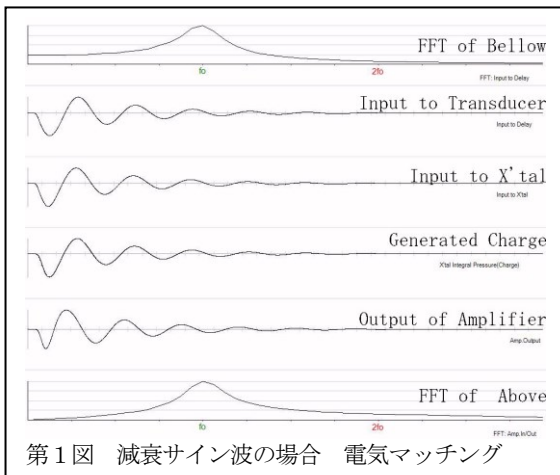
◆観測波形の基本波より高い周波数の探触子で受信の場合

音圧波形を観測したい場合、その基本波より十分高い周波数の広帯域探触子で観測すると良い結果となる経験している。第1図に単純減衰サインカーブの音圧波形が入射した場合の例を示す。実際の多くの狭帯域探触子からの送信減衰振動は、正負の一波の振幅がほぼ同じ振幅で減衰していき、実際は単純な減衰ではない。第1図では先端半波を除けばアンプ出力まで似た波形になる。アンプ出力の先端半波の波形変化は入力での電氣的 CR 微分特性による。アンプの入

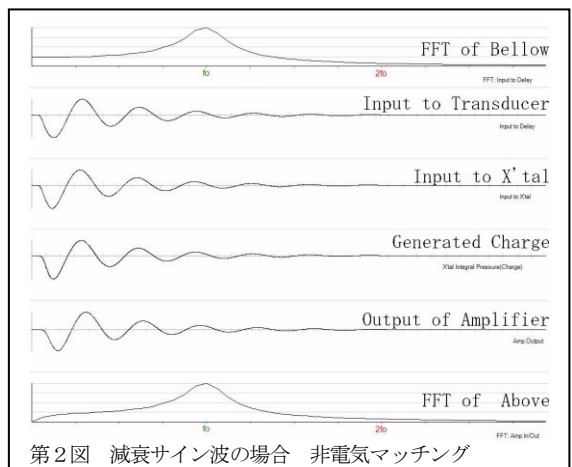
力と受信探触子の観測したい基本周波数での電氣的インピーダンスを同じにした、所謂等価マッチングの状態の状態である。

市販探触子ケーブルは特性インピーダンスが 50Ω で、探傷器やパルサー・レーザの入力と探触子の使用周波数での等価インピーダンスが大体 50Ω に近づく様に設計している。この条件下では観測エコーの波形が歪む事になる。

アンプの入力インピーダンスを 100 倍にした場合が第2図で、ほぼ入力音圧波形に近づく。探触子の共振点での等価インピーダンスが 50Ω の場合 $5k\Omega$ の入力インピーダンスにしたということである。市販パルサーでは入力インピーダンスの最大値は $200\Omega \sim 1k\Omega$ の物が多い。一部の機種で $2k\Omega$ までとなっている。探触子は公称周波数で $10\Omega \sim 1k\Omega$ が多い。受信時の共振周波数は公称周波数より高いのが一般的で

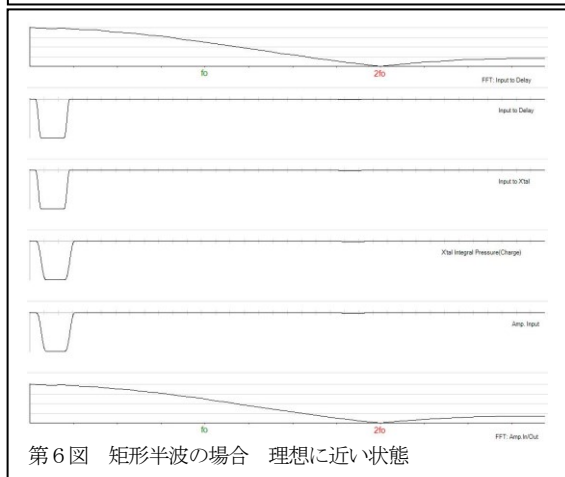
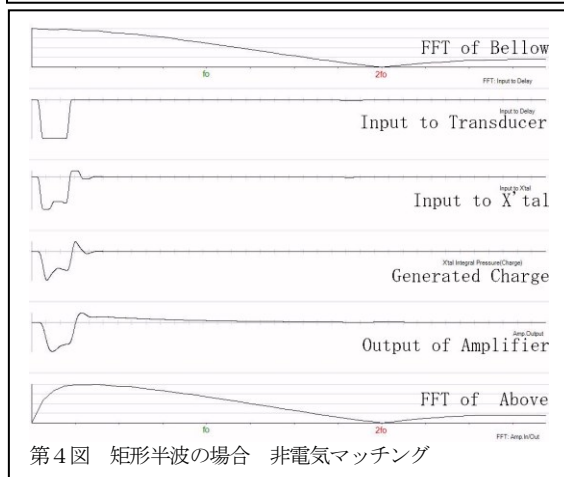
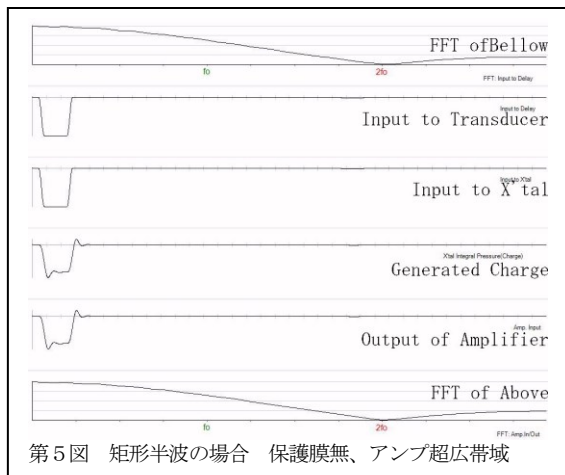
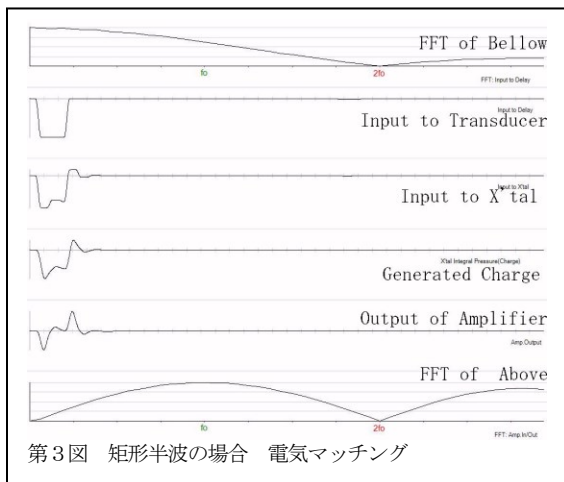


第1図 減衰サイン波の場合 電気マッチング



第2図 減衰サイン波の場合 非電気マッチング

受信音圧波形とエコー波形の違い,エコーのピークは音圧の最大傾斜部？,



感度の良い振動子ほど差が大きい傾向にあって、最大2倍と思った方がよい。

また、この可変抵抗はダンピング抵抗ともいわれる。機種によっては送信側に設けてあり、二探触子法にすると受信アンプの入力インピーダンスが $5\text{ k}\Omega$ と大きく成る機種もある。しかし、一探触子法の場合には下がってしまう。また、一探触子法送信時にはアンプの保護回路が働いで、カタログ値と異なるダンピング抵抗になる機種もある。

第3、4図は矩形半波音波の入力の場合で、アンプの入力インピーダンス条件を第1、2図と同じくした場合である。第3図では矩形音波波形の両端が微分されて観測される。第4図では入力波形に近づくが、保護膜内の多重反射とアンプの低域が伸びていない為の所謂ザグにより歪んでいる。

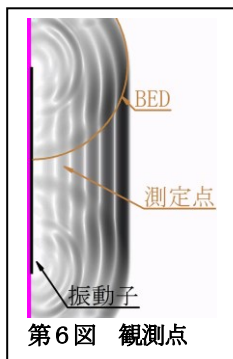
第5図では更に保護膜無、アンプ帯域を超広帯域として計算させたもので、矩形の前後の高い周波数の凸凹を除いて、ほぼ入力音圧波形となっている。この高周波数の凸凹は受信振動子のリングングである。高い周波数の探触子で受信するとリングングの周波数は高くなり、低い周波数の探触子で受信するとリングングの周波数は低くなる。電気的なLとC成分でも同様な事が起きるので、原因がどちらかを知りたい場合は複数の周波数の違う受信探触子を交換してみると良い。第6図に理想に近い状態を示す。保護膜が $\lambda/100$ 、アンプ入力が $50\text{ k}\Omega$ の場合である。

◆実測例

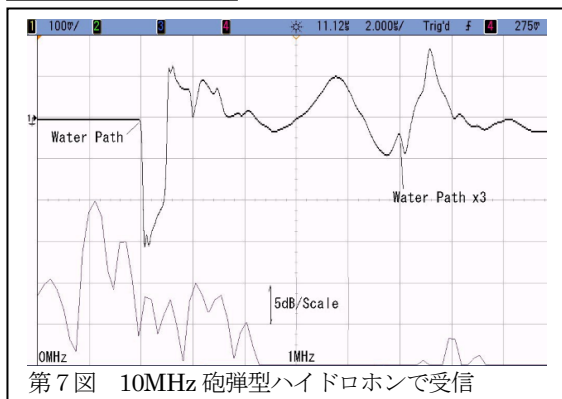
受信音圧波形とエコー波形の違い,エコーのピークは音圧の最大傾斜部？,

実測例を示す。送信に使う波は平面波が良いが、BEDが影響するので、振動子径を非常に大きくして、中央で振動子のごく近くで測定するしかない。それでも時間が経るとBEDがどの点にも到達するので、振動子半径の時間の間だけはBEDに邪魔されない波形を観測できる

(第6図)。送信には保護膜無の0.5MHzΦ40広帯域探触子を用い、スパイク励振で矩形音波を発生させた。受信はアンプを使わず振動子を直接オシロスコープに繋いで、入力インピーダンスは1MΩとした。多少1MΩによる波形変化はあるが計算



第6図 観測点



第7図 10MHz 砲弾型ハイドロホンで受信

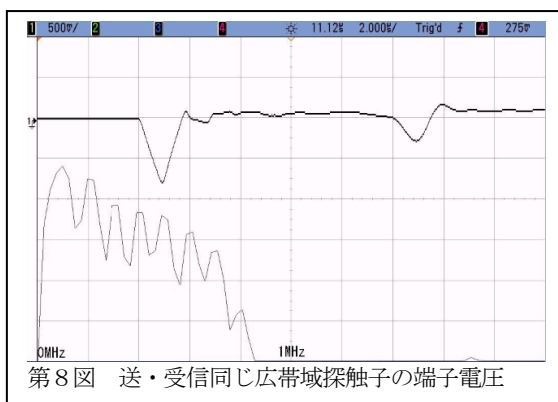
上非常に小さい。また、市販パルサー・レーザのアンプも使って、オシロスコープ直接との差も観測した。受信に10MHzの砲弾型ハイドロホン(広帯域探触子)で測定した波形を第8図に示す。パルス波観測の原則は、計測系の帯域を観測したい基本波の最低1/100~20倍にする事である。受信振動子の共振周波数10MHzは送信0.5MHzの20倍のギリギリ許せる周波数である。もっと高い周波数にすると感度が落ちるなど他の弊害も出てくるので、経験上あまり高い周波数は好ましくない。振動子励振から水距離分時間経て負の大きな矩形に近い電圧波形が観測される。正音圧である。その後振動子径相当の低い周期の音が観測されるが、水距離の3倍相当に、探触子間を往復した音が観測さ

れる。この付近にはBEDの影響も含まれている。

大きな正(電圧では負)の音圧半波の次に小さな負の半波(電圧では正)が観測されるが、これは一般的にバックリングの為である。バックリングの音響インピーダンスは温度変化が激しく、寒冷地での探触子の使用を考えると、常温でバックリングを理想に近づける事に無理がある。少し音響インピーダンスを下げて、振動子とバックリングとの境界反射を多少許容して、バックリング内の減衰優先の設計を考える方が良い。

第7図の波形全体にハミング・ゲートを掛けFFTするとDCから1MHz付近まで成分があり、波形正負電圧部分の面積が異なる事が判る。3倍高調波のエネルギーもある事が判る。また、スパイク励振の為、発信音幅は反共振周波数相当の半波長1μ秒弱が観測される。波長が2μ秒なので、波長の逆数=周波数の計算では0.5MHzとなる。が、FFTの結果では、その周波数成分は少なく、その半分の周波数成分が優位である。FFTなど周波数分析の結果と送信波の周波数とは一致しない。その為多くの探触子メーカーは公称周波数より高い周波数の振動子を使っている。

音波受信に送信と同じ周波数の探触子で、透過法の波形を調べたのが第8図である。一探触子法では距離が近く、送信電気信号と受信波電圧波形が分離できないので、同じ探触子を2個



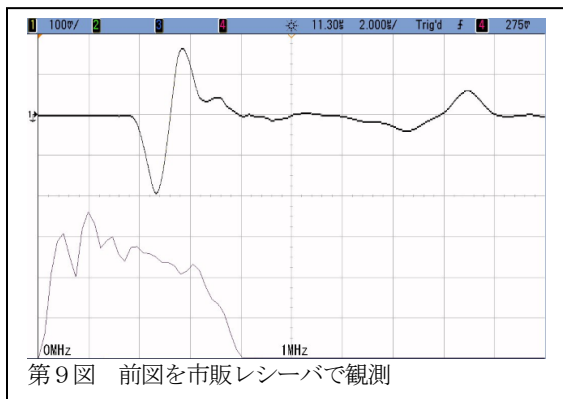
第8図 送・受信同じ広帯域探触子の端子電圧

使う事で一探触子法と同じ状態とした。負の電圧部分は三角波で幅は2μ秒弱と前図の2倍にパルス幅に成っている。高い周波数成分は消えている。連⑨の第1図に示した原理によると振

受信音圧波形とエコー波形の違い,エコーのピークは音圧の最大傾斜部？,

動子厚さ相当と同じ波長の矩形半波が入ると三角波の電荷（解放端子電圧）が発生する。振動子の(反)共振周波数付近が前8図より増えている。これはオシロスコープで振動子端子電圧を観測した波形である。単なる負の三角形の為、周期が何処から何処までと判断に戸惑う。

市販パルサー・レーザのレーザを通すと第9図の様に一波の超広帯域の波形で観測される。オシロスコープの入力インピーダンスは1M Ω だが、レーザのそれは100 Ω に設定して



第9図 前図を市販レーザで観測

ある。波形の違いは、この抵抗の違いが主で、入力インピーダンスにより波形がRC微分されている。ここでRは100 Ω 、Cは振動子の容量である。負のピークから正のピークまでで半周期の時間は誰でも読み取れる。一方高周波成分は消えている。

入射音波は第8図の様な矩形であっても、一探触子法にしたり、アンプの電気的特性が異なると、第8、9図の様に波形が変化するのである。

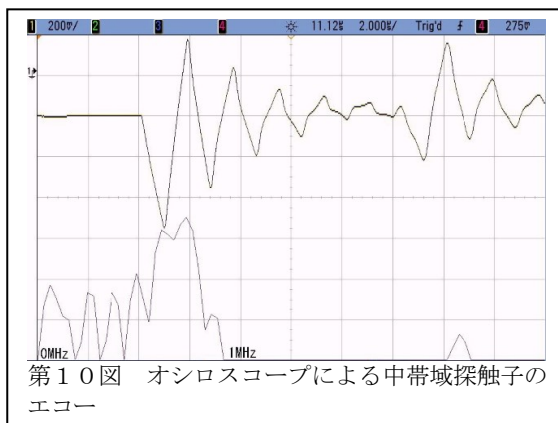
レーザの入力インピーダンスが低いと、受信した音による電荷がレーザ側に流れ、結果その電流で振動子を駆動する事になる。この電流が振動子に溜まり、電荷で振動子全体に音が発生する。それにより波形が訛る。一方オシロスコープの場合、入力インピーダンスを1M Ω に設定されていて、電流は小さくなく、このような現象は僅かしか発生しない。この辺の話は次の回で説明する。

第5図までのシミュレーションに使ったP2Rソフトウェアでは、この取り出した電流から音

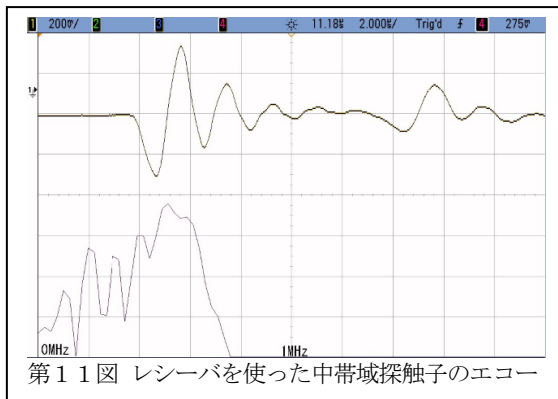
が発生する、フィードバックは計算されていない。

次に受信探触子として中帯域振動子を用いたオシロスコープ直結の結果を第10図に示す。反共振周波数より高い部分が優位になっている。3倍、5倍など奇数高調波も多く、その為、波形は三角波的になっている。これも市販レーザを通すと第11図の様により滑らかな波形となる。第10図では先頭半波（負側）が最大振幅だったのが、第11図では次（正側）が最大振幅となる。この最大振幅の変化は使ったレーザの特性による。

多くのパルサー・レーザや探傷器では入力



第10図 オシロスコープによる中帯域探触子のエコー



第11図 レーザを使った中帯域探触子のエコー

でCR微分されるので、概略エコー振幅のピークは実は音圧変化の傾斜最大部分を示している。エコーのピークをエコー高さとして観測するが、音波波形では音圧のピークではなく、音の波形の一番傾斜がある部分、多くは音圧ゼロの部分

受信音圧波形とエコー波形の違い,エコーのピークは音圧の最大傾斜部？,

である。エコー波形で音波を議論すると、とんでもない間違を犯す危険が含まれている。

第7～11図を見ると受信探触子や計測電子機器によりエコー波形が著しく変化する事が判る。音圧波形の議論をする場合は、注意深く計測システムを構築する必要がある。

探傷器やパルサー・レーザはより売れる様にと設計している。出力波形が第7、8、10図の様だと客が嫌がる。エコーのピーク振幅は読み取りにくい。第9、11図の様なら誰でも見慣れた、ある意味歪んだ波形にすると売れるので、結果探傷器やパルサー・レーザは音圧波形を歪ませて出力する回路となってしまう。設計者が意図している場合は少なく、市販ICの使用、追い込み現象を少なくしたり、入力保護回路を調整したり、SN比を良くしたりしていると段々そうになってしまう。探傷器等のアンプは、オシロスコープの様に波形を成るべく忠実に再生する事が主目的ではない。見やすい波形にする事が売れる事に直結する。レーザの周波数帯域が0.1～100MHzと書かれていても、これは50Ω系の計測機で計測された振幅特性で、振動子の様に容量性の電荷駆動素子の場合はどうなるか分からない。なお、カタログなどではアンプの帯域は小振幅時の帯域を示している。第10図の波形を使用したパルサー・レーザの帯域特性をシミュレーションしても第11図の様に滑らかにならない。主にアンプの大振幅周波数特性が影響している。簡単に言うとアンプに使っている半導体は急な大きな変化に追いつかない。その為、鋭い変化点は滑らかになる。これは一種の非線形現象で、電子回路シミュレーションでも計算は難しい。

探傷器やパルサー・レーザにはダンピング機能が付いていて、入力インピーダンスが変えられる。この調整では送信音の波形はあまり変化しない。大半は受信時電気的な波形成形である。その証拠に一探触子法で送信音を観測すると、ダンピングにより波数はほとんど変化しない。1-3コンポジットやPZTの様な効率の良い振動子が使われている場合は音波波形も多少変化する。

第8、9図を比較すると、振動子の電極間容量とダンピング抵抗によるCR微分作用により第8図が第9図へと、波数は半波増えていることが判る。第10、11図を比較するとCR微分作用のある第11図の方が波数は減っている。後者は振動子に振動子中を往復する音が発生する電荷のエネルギーをダンピング抵抗が徐々に吸収した為である。前者は波数を増やしているわけで、ダンピング抵抗の効果は単純にダンピング=エネルギーを吸収して波数を減らすとは限らない。水晶時代は良かったが、現在では名前を変える必要があるかもしれない。

また、更に振動子は均質ではなく、小さな結晶粒が分散している。その粒径は厚さの1/10に達する事もあり、急激な変化音圧は電荷としては現れない。例えば1MHzの広帯域用振動子を薄く研磨して10MHz相当厚さとしても、まともに振動子として使えない事が多い。1MHzと10MHzで同じ素材で発注した振動子の粒界の大きさが異なるのである。

◆非破壊検査での波形の意味

非破壊超音波探傷では、波形自体は無視して、振幅とビーム露呈のみを観測する手法を取り、それも対比試験片を反射源の大きさ及び位置を変えて感度基準としている。波形形状には留意してない。先述の様にエコー波形が受信音波波形と異なっても何の問題もない。

超音波腐食肉厚計や精密肉厚計において、入力音波波形は重要な意味を持つが、メーカーが専用の探触子と電子回路で寸法測定が可能な状態にしている。腐食肉厚計ではエコー波形の先端のみを検出する様にし、精密肉厚計では多重エコー波形が安定して観測される様にしている。肉厚系の時間測定では電気的にはゼロクロス法、敷居値法、ピーク法などがあるが、元の音圧波形がどの程度CR微分等を受けて時間測定回路に信号がたどり着いたかは不明で、方式による性能差は非常に少ない。試作回路がゼロクロス法でデバック中に、ピーク点を観測した方の結果が良さそうな場合はゼロクロス回路の前でCR微分されるように時定数を変え調整するので、結果回路はゼロクロスであるが、実質ピー

受信音圧波形とエコー波形の違い,エコーのピークは音圧の最大傾斜部？,

ク法となる。各肉厚計のカタログに方式が記載されているが、回路なのか実質なのか不明である。

◆音のシミュレーションの役立て方

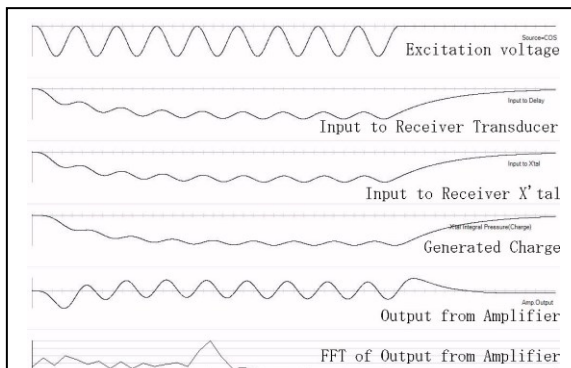
変位FDTD法シミュレーションなどで、良い検査方法を見つけても、市販超音波機器の受信特性は歪が多いため、シミュレーションの様にならない。パルス波の場合は音圧を正しく受信できる受信系を構築しないといけない羽目になる。

では一体どういう場合に従来の探傷器等を用いた計測で、変位FDTD法シミュレーションが役立つかと言うと、サイン関数連続波の場合である。第12図では長いバースト波をP2Rで計算させた。一番上は探触子保護膜に入ってくる音の波形で、コサイン・バーストとした。バースト波の先頭と後端を除けば、一番上段の入力音波と下から二段目の波形出力には違いが無い。どのぐらいの波数を除けばよいかは条件による。一般的市販探触子と探傷器やパルサー・レーザでは前後それぞれ3波程度を無視すればほぼ同じと考えて良い。

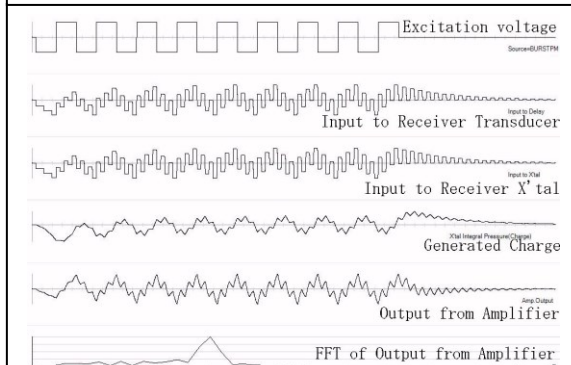
サインの様に滑らかでないと、例えば矩形音では第13図の様に異なってしまう。しかし多くの媒質の中で高周波成分は減衰し、第14図の様に表示波形はサイン形状に近づく。第14図では最上段の波形の音が減衰材を伝搬して、二段目の様に三角的に成ったのを音速分散計算で模擬した。減衰の模擬は変位FDTD法シミュレーションでより正確に計算できるが、スーパーコンピュータでも日単位週単位の時間が必要である。また、遅延材と振動子の中の減衰や表面粗さは無視している。その為保護膜の多重信号の小さな凸凹は通常これほど強くは観測されない。ここでは矩形バーストとしたが、三角バースト、鋸ぎりバーストなど長いバースト波ならどんな波形でも減衰材を通過すると基本波以外の成分が弱くなって、サイン・バースト的になる。

◆あとがき

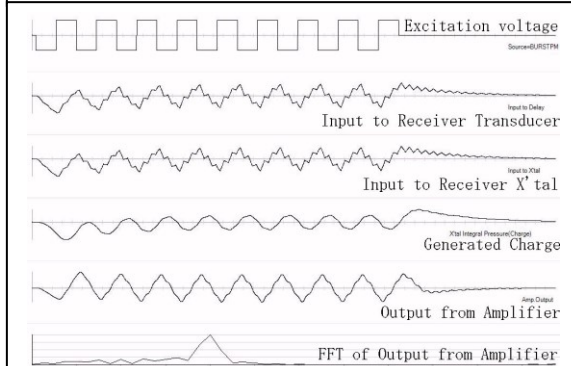
1980年代米国で反射波波形と反射源形状の関係が研究され、探傷器に反射源形状判断ソフ



第12図 長いCOSバースト



第13図 長い矩形バースト



第14図 減衰材を通過した長い矩形バースト

トを組込む試行がされたが信頼性が乏しく実現されなかった。今回探触子で音波を受信した場合の実例、エコー波形がどう変化するかを述べた。その結果市販探傷器では音波の議論は困難であることが判っていたと思う。探傷器はあくまで音圧波形ではなく、エコーを観測する道具である。

受信音圧波形とエコー波形の違い,エコーのピークは音圧の最大傾斜部？,

◆今回知った事

- (1) 観測したい周波数より十分高い周波数の探触子と高入力インピーダンス・アンプで観測すると音圧に近い波形が表れる。
- (2) 音圧波形の議論をする場合は、注意深く計測システムを考える必要がある。
- (3) エコー波形で音波を議論すると、とんでもない間違いを犯す危険が含まれている。
- (4) パルサー・レシーバを通した場合とオシロスコープ直接で観測した波形は異なる。
- (5) 多くの場合、エコー波形は入力音波のCR微分に近い。
- (6) エコーのピークは音圧の激しく変化する部分（音圧ゼロ）である。
- (7) ダンピング抵抗は、CR微分特性を変化させるが、波数を増やす場合と、振動エネルギーを吸収し波数を減らす場合がある。ダンピングの言葉は適切ではない。
- (8) 非破壊超音波探傷や肉厚測定現在の手法では、エコー波形と音圧波形の差異は計測に影響しない。
- (9) 一般の探傷器は受信特性が不明な為、音波のFDTDシミュレーションなどが役立つのは長いサイン・バースト波の中央付近のみ。
- (10) 減衰材では長いバースト波ならどんな波形でもサイン・バースト的になる。
- (11) 探傷器はあくまで音圧波形ではなく、エコーを観測する道具である。

<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)