

音波のよもやま話 (その11)

各種パルサーと探触子からの音 (4)

Sound form transducer excited by various pulsers(4)

(南)アイ・エス・エル 宇田川義夫

◆はじめに

1990年代に主に東北大学等で撮られた超音波可視化画像を最初に示す。主にパルサーは独逸クラウトクレマー社製 USIP11 である。

より詳細を知るために 50Ω系測定器であるファンクションジェネレータ (FG) に直接探触子/振動子を繋いで励振し、高周波の広帯域探触子で探触子から出てくる音をオシロスコープで観測した結果を後に示す。

◆スパイク・パルサーのダンピングと可視化像

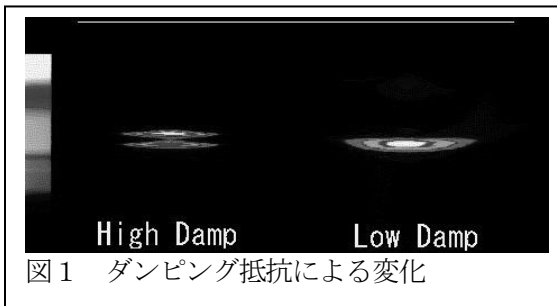


図1 ダンピング抵抗による変化

スパイク・パルサーには探触子に並列に抵抗を入れるダンピング機能がある。スパイク・パルサーで高電圧が振動子に印加され、振動子は充電される。電圧駆動が終わると、振動子に溜まった電荷はダンピング抵抗に吸収される。抵抗を小さくすると、抵抗が駆動源となるスクエア・パルサーに似た、立下りと立ち上がりが発生する。図1に抵抗を小さくした場合と大きくした場合の 5MHz 10φ の広帯域探触子の波形を示す。左のダンピングを小さくした場合の周期は 6MHz 相当と計測された。元画像は当時最新の疑似カラー化装置で撮影されている為、白黒画像にするとその輝度と可視化像強輝度が単純比例しないと、左の輝度スケールを参照してほしい。何れにしるスパイク・パルサーではダンピングを

効かさない、半波の音が発生し、ダンピングを効かすと正負の音圧の一波の波が発生する事が確認できる。ダンピングの効かせ方でこれだけ、送信音圧波形が変化する。これらの、底面反射の探傷器画面上のエコー波形は何れもほぼ 1.5 波である。当然ダンピングを掛けない方が 1 波に近い。エコーと呼ばれる探傷器画面上の波形は音波波形との相関は高く無い。観測エコー波形=音圧波形と考えると、間違った判断をくだす事に成る。

◆腐食肉厚計用二振動子探触子の可視化像

図2は腐食肉厚計用の探触子 4MHz 10 mm 円

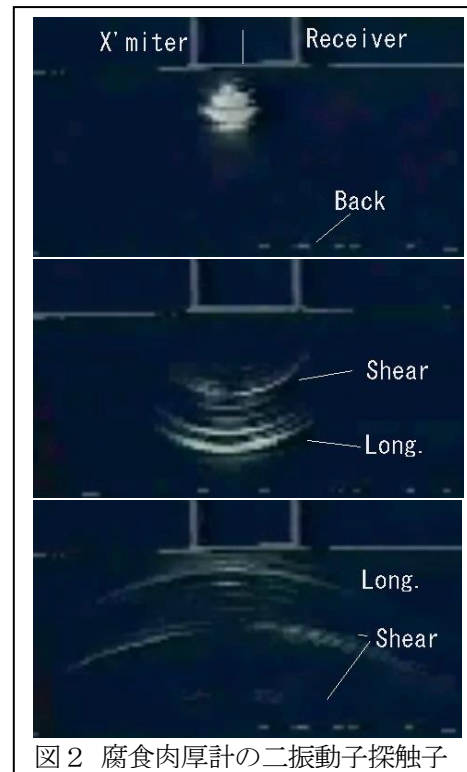


図2 腐食肉厚計の二振動子探触子

の画像で振動子は送信と受信別の2枚が内部に配置されている。図上画で送信側から音が

間である。少し経つと中央の画像の様に縦波

(Long.)と横波(Shear)が観測される。この横波は主に探触子とガラス試験片の境界面で発生したものである。図下段画像はガラス試験片底面で反射した縦波が、探触子に戻ってきたい時で、縦波は右の受信振動子には明らかに傾いて

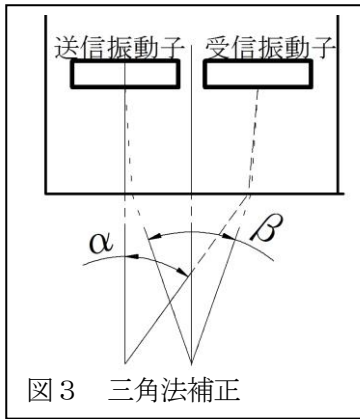
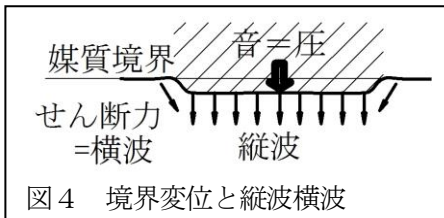


図3 αの送信振動子中心垂線からの三角法での補正と

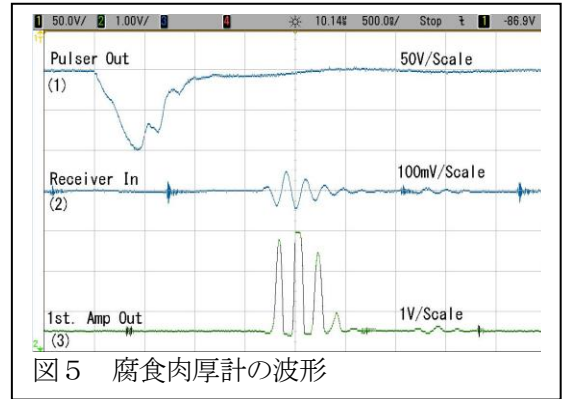


影響で両振動子中央垂線からの三角法補正の方が実際と合う事が多い。送・受信同じ特性とも限らないので、実測して補完した方無難だ。

縦波の後に観測される中央に穴の開いた横波は、縦波が底面反射した時に主に縦波の周囲で発生した横波である。中央の画像で観測された横波は音速が横波の概略半分の為、また底面近くにあり、薄く映っている。

縦波が境界面を通過又は反射する毎に、あたかも振動子で音が発生したのと似た状況が観測される。「振動子と媒質の境界」は「媒質と媒質」の境界と何も変わらない。同じ現象となるのが自然である。音は物理的に変位の伝搬と考えられ、図4の様に境界面に正音圧の縦波が上から下に伝わっている状況を考える。図は大げさに書いてあるが、斜線の境界面中央は下に変位するが、音の伝わっていない斜線外左右では変位が無い。その中間ではせん断力が働く。変異の方向を矢印で示した。ビーム両端のせん断力は横波を発生する。ビーム端付近のみの為、ドーナツ状に広がり直ぐに拡散減衰する。図4のビーム左右で発生した横波は振動の方向が逆であ

る。発生するのは周囲のみであり、かつ伝搬して広がっても、互いに重なると消え穴が開いた

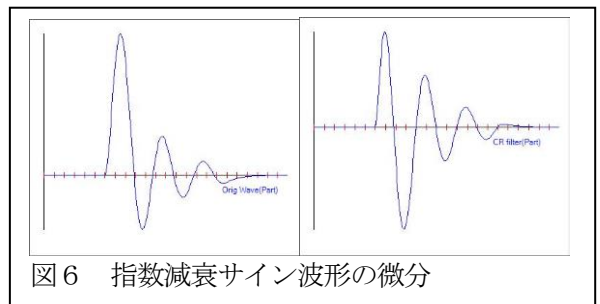


状態になる。

また画像では音の最初の半波の強度が一番高い。受信電圧波形は前回示した波形図5の中段の様に先端の振幅が一番高くはない。これは幾つかの理由があり、まずアンプ入力で微分され、観測されるエコー波形は音圧波形に必ずしも比例しないからである。2番目に媒質中伝搬による波形変化や接着増、保護膜の影響である。

バックিংの無い感度の高い径の大きな振動子の場合には特別で、送信直後は音の一波目の正負振幅は等しく、伝搬していくとBEDの影響で最初の半波より次の半波の方が音圧は高くなる。

が、近距離では一般には最初の半波が一番高くなる。振動子の中の振動が外に出るに従い振幅が減り、減衰振動する事に成る。これは指数関数減衰サイン波形とは異なるが、概略は指数



関数減衰サインと見なしてみよう。図6では左の元波形を計算によりCR単純微分した波形を右に示す。多くの場合アンプに入ると、図6左の音圧波形が、右の波形に変化してしまう。概略音圧波形のピークは電圧波形のゼロ付近である。電圧波形のピークは、音圧の傾斜が大きい部分である。振幅が大きければ、傾斜部分傾き

が大きいので、超音波探傷では、画面のエコーの振幅が大きい＝受信音が大きいと考えてよい。が、音の研究をする場合は注意が必要である。なお、受信振動子の厚さが受信音波長より薄い事を前提の話で、より正確には前にお話した振動子厚さ関数との畳み込み積分を考慮する必要がある。

◆精密肉厚計用一振動子探触子の可視化像

精密肉厚計は 10MHz 又は 20MHz の探触子を使う事が多い。1990 年代では 20MHz の振動子を強く励振することが大変で、良い画像が得られなかった。遅延付きの場合遅延材の透過損失の為、さらに音圧が下がり明瞭な画像がえられなかった。比較的画像の明瞭な 10MHz6.4φ の広帯域肉厚計用探触子の画像を図 7 に示す。

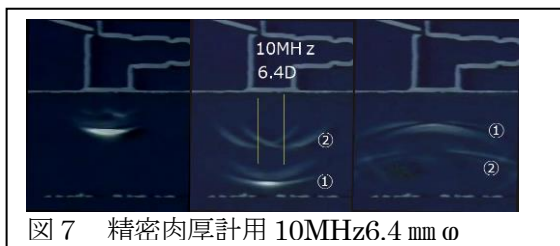


図 7 精密肉厚計用 10MHz6.4 mm φ

第 7 回に示した画像と同じである。パルサーは USIP11 なので、実際の肉厚計のパルサーと異なるが、大した差が無い事を確認している。送信直後の左写真では半波の音であることが判る。探触子とガラス境界で発生した横波が中央の写真で②に観測される。縦波が底面反射すると、写真右の様に縦波と、底面反射した縦波周囲で発生した横波②が観測される。中央の②とは異なる横波である。横波は境界で発生し、ドーナツ状に拡散するので、少し伝搬すると観測されなくなる。なを、画像が尾引しているが、これは可視化装置ストロボのデユレーションが 100ns と長いためである。

送信音波波形を見ると、高価な超広帯域探触子と同じでは無いと言われるが、実際送信音波波形の差異は殆ど無い。受信時にアンプ入力で微分されない様に、振動子の容量を増やした探触子を超広帯域探触子として売っている。余り容量を大きくすると、パルサーが負けて高い周波数成分が無くなり、広帯域で無くなる。その為専用のパルサーで駆動する方が、確実に超広帯域の波形が観測できる。一般にアクティブ探触子と呼ばれ、探触子内部に専用のパルサーやレシーバ・アンプが内臓されている。

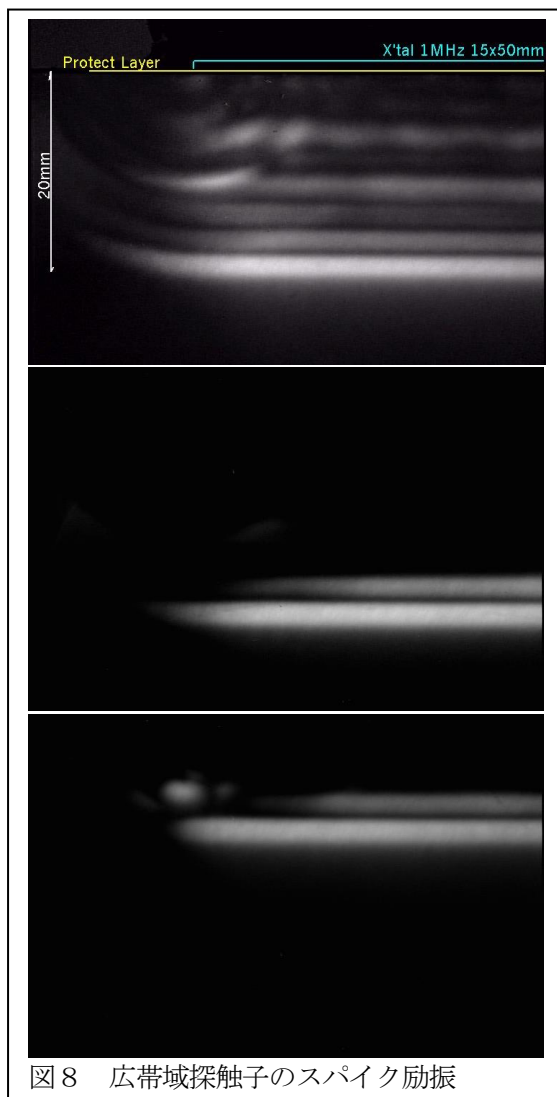


図 8 広帯域探触子のスパイク励振

◆直接接触広帯域探触子のスパイク励振

電氣的ダンピングを弱くして広帯域探触子をスパイク励振した場合を図 8 に示す。1MHz の 50 mm幅と大きな振動子の左半分を観測している。図上段は保護膜がある場合で、振動子保護膜境界や保護膜ガラス境界で色々な波が発生している。図中段は保護膜を外した場合で、綺麗な平面波が観測できる。保護膜が有り無しで、送信音の状況が可なり変わる事が判る。基礎試験では保護が無視できる様な探触子を使う考慮が必要である。

この保護膜無の状態超音波が探触子から出た直後が図下で、強い横波がビーム端付近に点状に観測される。これは時間とともに急激に弱くなり、少し伝搬すると見えなくなる。またメインビームの端まで音圧が均一であることが判

る。時間と共にビームの端から周囲に音が拡散し弱くなって図中段の様になっていく。なお、各画像は画角周囲の輝度が低い、これは主にレンズ系とカメラの一般的性質「周辺減光」である。

なお、超音波可視化では画像の輝度は音圧の二乗に比例するので、連続する波の先端の半波が正の音圧とすると、次の半波は負圧となる。

◆直接接触広帯域探触子のバースト励振

前項と同じ保護膜無探触子を4サイクルのバースト波形で励振させたのが図9である。図下側、先端の縦波2波分は比較的良い平面波が観測される。振動子両端の近くではビーム端付近

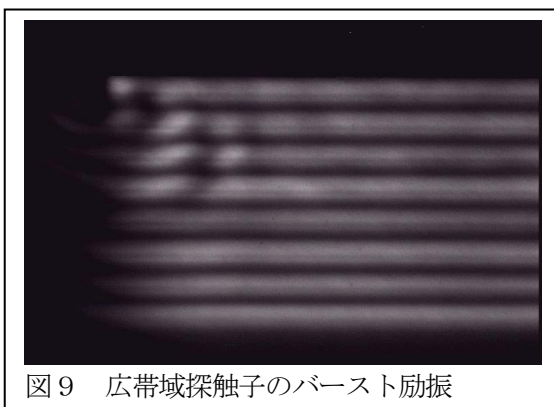


図9 広帯域探触子のバースト励振

の境界で発生した横波が縦波平面波と干渉している様子が判る。なお、超音波可視化では横波は縦波の2倍の輝度で観測される。実際には画像の見た目より横波は弱い。縦波振動の感度が良く、横波に感度が低い振動子で、この干渉帯を観測すると、縦波は左右方向均一である。

図8, 9いずれも広帯域探触子からは均質な平面波が出ており、近距離音場内での音場の凸凹は観測されない。一般に近距離音場内の音場の凸凹があると観測されるのは、音場内で小さな反射源を移動させ、送信と同じ探触子で受信している為、小さな反射源からの球面波を実質大きな振動子で開口合成した結果の荒れである。本来は「受信エコー場」と呼ぶべき処を単に「音場」と表現した間違いである。また、サイドビームも送信音波には観測されない。これも波長より大きな径で発生する、振動子の受信時の電気的開口合成特性である。狭帯域探触子の可視化は示さなかったが、振動子の横振動など色々な振動モードが重なって分離が難しい。それも探触子によって状況がまちまちである。混乱を避ける為に説明しない。ウェブに幾つかの比

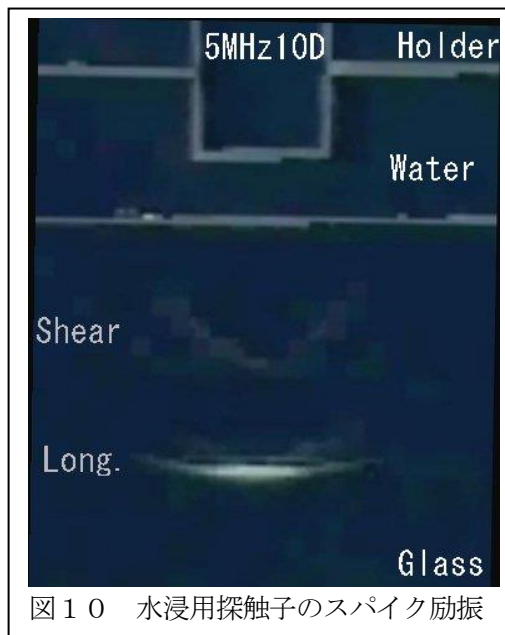


図10 水浸用探触子のスパイク励振

較的素直な狭帯域探触子の画像があるので、それを参考にしてほしい。

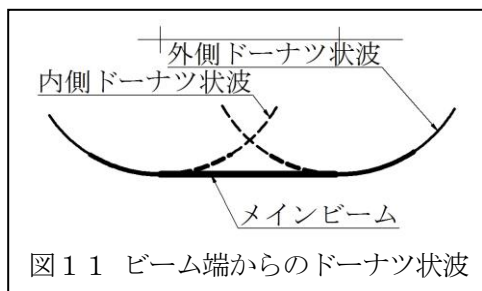


図11 ビーム端からのドーナツ状波

◆水浸探触子

5MHz10φの一般的広帯域探触子の可視化像を図10に示す。少し広がった半波の縦波(Long.)と音速がその半分程度でドーナツ状に広がった横波

(Shear)が弱く観測される。先端縦波を良く観測すると、図11の様子にやはりドーナツ状に広がる波を観測できる。図7や図8で元画像では何とか同様の波が観測される。

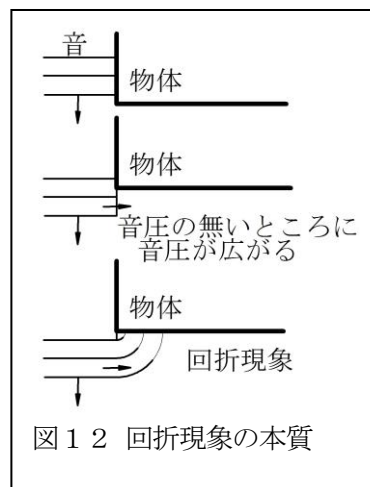


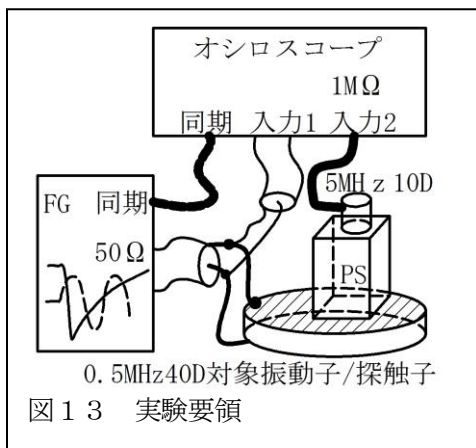
図12 回折現象の本質

図8では振動子が矩形の為、ビーム端からの横波は円柱状波となる。ビームの進行方向に直交な方向に音圧の傾斜があると、傾斜量に比例した強度の、この波が発生する。外側に円柱又はドーナツ状に広がる音(図11では実線)と、内側に同様に広がる音では位相が反転している。ビーム周囲が外に移動していて、それに引きずられ内側が引っ張られている。反転しているかどうかは、ガラス全体に圧力を加え、輝度が上がるか下がるかで確認できる。X線で見つからない極薄い割れを、この現象の為に超音波探傷では発見できるのである。詳細は後の回に譲る。音波が回り込む事を回折現象と言う。図12のように、この本質は音の無いところにビームの端が広がる事である。物体が無くても回折現象は発生する事を明示するために我々はBED(BeamEdgeDiffussion)、即ち「音波ビームの端の拡散」と呼んでいる。

以上超音波可視化装置での画像を中心に見てきたが、装置の性能上高い周波数成分まで観測できない。そこで以降は音を送信探触子より高い周波数の広帯域探触子で観測してみる。

◆FGで励振した場合の発生音圧波形

励振周波数がMHzの領域になると、ケーブル長さ、保護膜の性質や、僅かな探触子内の配線



で探触子から出る音が異なる。これらの影響が少ない、

0.5MHzと比較的低い周波数での実験結果を以降に示す。0.5MHzだと、振動子の厚さは3mm程度になり、振動子径はこの10倍以上でないと、径方向の影響が強く観測されるので、40φを用いている。高い周波数の場合、ケーブルが極短く、保護膜も極薄く、パルサーも駆動力が十分の場合ほぼ同じ結果に近づく。が外部のケーブルを短くしても探触子内の配線は短く出来ない。保護膜は加工精度上の薄さに限界があり、

その精度故に予想と異なる波形になる事もある。5MHz以上は理論と整合させるのは現実的に無理がある。比較的容易に手に入る各種素材の最低周波数は0.5MHzである。被測定振動子/探触子に直接5MHz10φの広帯域振動子を貼りつけた。受信探触子はオシロスコープに直接繋いで、波形を観測する。オシロスコープの入力インピーダンスは1MΩにする。市販探触子の容量は1nF程度なので、1MΩだと、低域のカットオフ周波数は160Hzとなり0.5MHzに比べ十分低い。市販5MHzの広帯域探触子の内部振動子の機械的共振周波数Frは6~8MHzで、この基本波とその奇数倍の成分が強く観測され邪魔な場合は、無視する必要がある。余りに邪魔の場合は誘電率の低い大面積のポリスチレン(PS)板を挟んで試験すればよいだろう。或いは薄いアルミ箔などでシールドするなどすると良い。接触媒質は音響インピーダンスの高いHIGHZなどが良い。

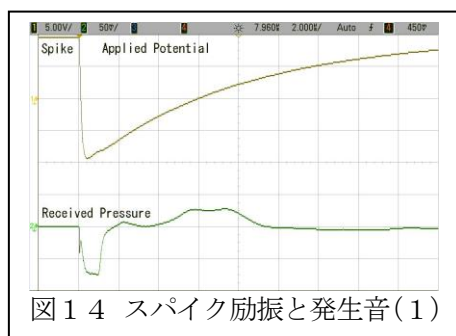
送信探触子の接触面から出てきた音は、受信探触子で吸収されるので、一見ダンピングの効いた波形になる事がある。後に続く波は接触面以外の周囲からの音が漏れてきた成分が多い。実験構成と分析には注意が必要である。PS板等を使うと受信探触子の吸収量が減る。

なお、FGは出力インピーダンスが50Ωなので、振動子を励振すると同時に、振動子にとって50Ωの負荷でもある。振動子で発生した電荷は一部FGに吸収される。その為、インピーダンスの高い探触子ではダンピングが良く観測される場合もある。PS板等を使うと受信探触子の吸収量が減る。

以上の条件であれば一般研究者も容易に確認実験ができよう。図13に実験要領を示す。なお、以降の図では電気絶縁用のPSの代わりに3μ厚さ銀箔でシールドした。

◆スパイク励振電圧波形と発生音圧波形

図14は一般的スパイク・パルサーを模擬したもので、



半波の負の電圧が観測される。スパイク電圧の立下りで、半周期より短い短時間でコンデンサである振動子が約-20Vに充電され、その結果

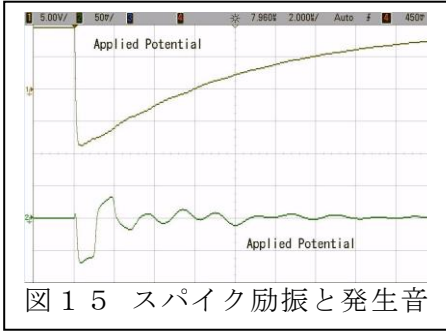


図 1 5 スパイク励振と発生音

振動子内部の音圧が-20V相当の一定となり、その音が振動子から出てきたのである。探触子内では振動子の負電圧で分極した側を表にしているの、音の受信で負電圧が観測されるのは、正の音圧である。後に続く低周波のウネリは振動子径相当振動で、媒質中では低周波の為拡散減衰が大きく、また、同じ振動子（この場合 0.5MHz の探触子）で受信した場合殆ど観測されない。水浸法では振動子中心軸以外ではそれほど大きく観測されない。円形振動子では径振動は中心で最大振幅となるので、中心付近で表面が大きく変位する。探触子メーカーの出荷時に観測される場合もあるが、一般の使用法で観測されない様に直列又は並列にインダクタンスを組み込んで低周波をカットすることが多いため基礎的実験では本当の広帯域ではない場合があるので留意が必要である。このウネリが観測される方が、変な細工なしていない証拠でもある。音波先端の幅の極狭い負のスパイクは FG の特性である。使用した FG の場合、電圧変化する時に急激な電流が流れる。矩形の前後の傾斜部は印加電圧波形の急傾斜と概略一致する。FG の出力インピーダンスが 50 Ω であるが、高い周波数に対しては低い様である。

図 1 5 はバッキングが貼り付けてない同じ



図 1 6 高感度振動子のスパイク励振

振動子内部の音圧が-20V相当の一定となり、その音が振動子から

振動子のみの場合、正の半波矩形の後少し負の

半波音（正電圧）が観測される。振動子からの音の発生は津波同様に前後同じ波形が発生する。振動子内で発生した静圧力が音として表裏面に向かって同じ量伝搬し、裏面に向かった音は裏面の外が空気の為、位相反転して前面に戻る。その為、本来最初の半波と次の半波の位相は逆だが振幅は同じの筈である。その正負一波のペア減衰振動するはずである。この感度の低い広帯域用の振動子自体の Q 値が 10 以上あり、それほど高くないので振動子内部での減衰は僅かである (Q の逆数 $1/Q=0.1$ 程度)。がこれほど大きな変化とは考えられない。これは振動子の内部感度分布の不均一なためである。振動子全体では平均的に等しくても、40φの一部 10φを測定するとこ言った事が起きる。測定場所を変えると上下振幅がほぼ均等な部分もある。広帯域探触子に使われる Q の低い振動子は、ある意味内部の微細な不均一さで内部損失を大きくして Q を下げている。その為、場所により大きな不均一さが出る。振動子全体を使う一探触子法ではこのような部分的不均一さは隠れてしまう。音波受信に径の小さな振動子を使ったため現れた現象である。比較に図 1 6 に広帯域用でない、通常の斜角探触子用の高感度振動子 PZT 系の結果を載せる。振動子の誘電率が高く、電気的インピーダンスが広帯域用より可なり低いので、励振電圧、音波波形共に CR 積分カーブ的になっている。それに続く波形は理解不能だ。が、こう言った波形でも、同じ振動子で受信すると、振動子の特性により綺麗なサイン波形に近づく。厚さ相当の周波数（基本波）の信号以外の感度が低い為である。また、銀箔を使うより PS などを使うと一見よりきれいだ。図 1 6 では最初の正負の波形の振幅がほぼ同じである。振動子の均一性と Q が高いので図 1 5 等とは異なる。この振動子は裏面方向に伝搬した前面方向と同じ強度の音が、単に裏面で位相反転反射したと言う理屈に合っている。

この励振電圧波形のゆっくり上がる部分を見ると、かなり凸凹している。これは振動子内を音が移動するに従い、振動子の歪電現象での発電電荷が、振動子のインピーダンスが低い為、FG に逆流したためである。電気屋はキックバックと呼んでいる。図 1 4、1 5 など他の励振波形も良く見ると小さな凸凹が観測される。完全な強制電圧駆動されていない事がわかる。

◆スクエア励振電圧波形と発生音圧波形

最近の探傷器ではスクエア励振を使用している事が多い。図17はスクエア・パルサーを

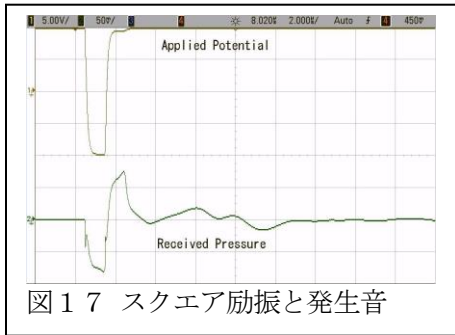


図17 スクエア励振と発生音

◆サイン励振電圧波形と発生音圧波形
 図18はサイン波形1周期の場合である。音は変化する時に発生する。サイン・カーブの下がる時には正の音圧が発生し、上がる部分で負の音圧(図の波形では正)の波形が観測される。励振電圧の上がる振



図18 サイン形状励振と発生音

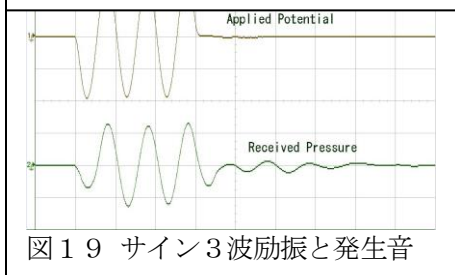


図19 サイン3波励振と発生音

幅は、下がる電圧の倍なので、負の音圧は正の音圧の倍になる。サインの3波バーストとすると、図19となる。前述同様最初と最後の半波は他の半分の振幅になる。振動子励振時は、概略電圧変化分に相当した音圧が発生するので、正負対象のバースト波など色々な波形で実験する場合は注意したい。

先端から正負同じ音圧振幅にしたいなら、サイン波形を90度から始まる励振波形にするとよい。(オフセット) Cos バーストとも呼ぶこともある。FG の機種によってはオフセットの調整も必要かもしれない。図20にその結果を示す。こうすると常に負の電圧が振動子に加わる

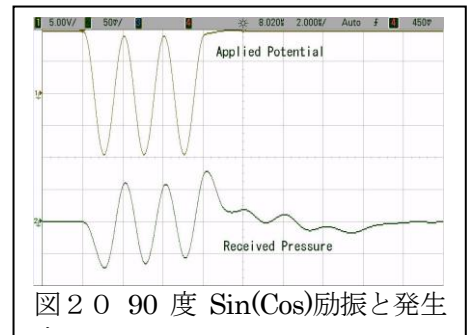


図20 90度 Sin(Cos)励振と発生

ので、振動子が脱分極する危険が減る。横振動の影響を考慮すると正負音圧はほぼ等しい。広帯域探触子の結果だが、狭帯域振動子は実質Qが高く、振動エネルギーが振動子内部に溜まり、段々振幅が増える音圧波形になる。

◆おわりに

探触子から出る音波波形に関して可視化像を示しながら説明した。紙面の関係から手抜きした部分もあるが、全体像を示したつもりだ。同じ市販スパイク、スクエア型のパルサーでもそれぞれの個性がある。それぞれのメリットとデメリットを十分理解した上で使ってもらいたい。

◆今回知った事

- (1) 広帯域探触子と市販探傷器スパイク・パルサーの組み合わせで1990年代から半波の音が発生しているのが観測されていた
- (2) ダンピングを効かすと、1波に近づき、ダンピングを弱くすると半波に近づく
- (3) 「振動子と媒質の境界」は「媒質と媒質」の境界と何も変わらない
- (4) 多くの場合エコー波形のピークは、音圧の傾斜が大きい部分である

- (5) 画面のエコーの振幅が大きい=受信音が大きいと考えてよい
- (6) 縦波境界通過時に発生した横波はドーナツ状波であり拡散減衰が激しい
- (7) 保護膜が有り無しで、送信音の状況が大きく変わる
- (8) バースト励振でも音場は荒れない。横波の干渉で一見荒れている様に観測される。
- (9) 縦波ビームが媒質境界を通過すると、ビーム周囲に横波が発生する
- (10) 円形振動子の場合、ビームの端からドーナツ状の波が発生している
- (11) ドーナツ状の波の内側と外側では位相が逆である
- (12) 回折現象は物の裏に回り込む事を言うが、本質は音の無いところに音が広がる現象。物が無くても音圧傾斜があれば起きる。
- (13) 振動子を励振すると、径振動が必ず発生する
- (14) 探触子から出る音を観測して、径振動が観測されない場合は何かの細工が内部でされているか、受信アンプ側の周波数特性が悪い
- (15) 広帯域探触子をスパイク励振すると半波の音、スパイク励振でダンピングを掛けると正負一波に近い音、スクエア励振では正負一波の音が発生する
- (16) 発生音圧は印加電圧の変化に概略比例する
- (17) 正負の音圧が等しいバースト波を発生するには、Cos バースト波励振が良い

<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)

・
・