

# 音波のよもやま話 (その44) 探触子からの音の送・受信 (その1) 実際の送信音波

(補)アイ・エス・エル 宇田川義夫

## ◆はじめに

垂直直接接触探触子と言うと、縦波を送受する探触子とされている方が多いが、実際には横波成分をより多く発生する場合が多い。多くの書物でレイ法に依る送信の説明がされているが、実際は送信では色々な波が色々な方向に発生している。特定の方向の特定の波が強く観測されるのは受信特性が理由で、送信特性だと間違った解釈を書物は与えている。フェーズド・アレイの説明で送信音波がフォーカスしている様な図が書かれているが、これも間違いで、受信の開口合成の結果特定の位置からの反射する球面波が強い画面上のエコーとなるのが理由である。探傷器等のエコー波形測定の結果を送信特性の結果と仮定して説明している。この仮定自体が間違いである。探傷器等のエコー特性は、主に受信特性である。書物には正しい送信音波の説明をしてない為、探傷器等の鋼の材料で1~10MHz以外の帯域での応用が進まない。探傷器等も鋼の一般的帯域のみで良い結果を出そうと改善が進むが、他の材料や周波数領域にとっては改悪に成っている。

今回は振動子からどういった音が発生し、媒質にどの様に伝わるとどうなるか、また受信エコー波形との関係の話である。

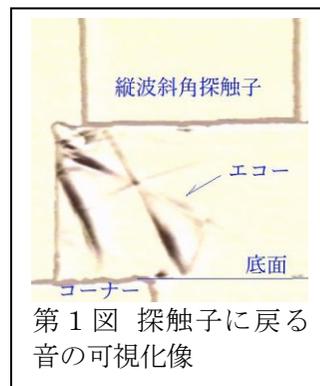
## ◆探触子に入ってくる波とエコー

1990年代に光弾性超音波可視化装置の改良していた時、東北大学故伊達教授と探傷器等の画面上に現れるエコーが、可視化装置で観測される探触子に向かう音波画像との関係が判断できない場合が多く悩んだと同時に、可視化画像の中の色々な音波の多さにびっくりした。垂直直接接触や水浸法の探触子の場合、探触子に戻っ

てきた可視化像上の波がエコーになり比較的判別しやすい。斜角特に縦波斜角では探傷器画面上のエコー波形と比較しながら超音波可視化画像上の波を観測しないと、どれが探傷器上のエコーに成るのか判断できない。

探傷器にピーク・エコーが観測される探触子位置の設定は超音波可視化画像を観測しながら決める事は出来ず、探傷器の画面でしかできない。

その代表例として、縦波斜角探触子を使い、探傷器画面のコーナー・エコーが最大になる位置に探触子を配置した時の、光弾性超音波可視化像である(第1図)。探傷器の画面上にはコーナー・エコーが他のエコーより明らかに大きく表示され、容易にコーナー・エコーが最大になる様に探触子を走査固定できる。その音波は、可視化像上では第1図ではエコーと記した弱い波である。似た角度の強い波が観測されるが、それが探触子に入ると、この探触子位置ではエコーは極低くエコーとして表示される。探触子から出る強い波が、画像上単にコーナーの中心に入射するような位置に探触子を設置しても、



第1図 探触子に戻る音の可視化像

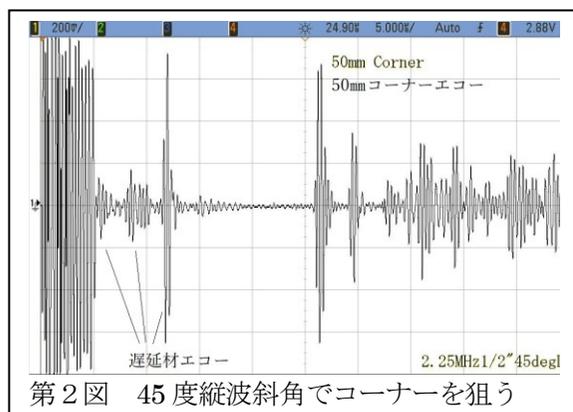
縦波斜角,低周波地震動,RIAA,スパイクパルサー,脱分極

探傷器の画面にはコーナー・エコーは現れない。第1図では他にも探触子入ってくる色々な角度の強い波が有るが、探傷器画面には表示されない。縦波斜角のコーナー・エコーのピークは探傷器の画面上でしか、観測出来ない。エコーは探傷器と探触子と言う強い「フィルター」が掛かった状態で観測をした結果である。

従って、「縦波斜角探触子」は、探触子に色々な音波が戻ってくるが、探傷器との組み合わせで、特定の角度の縦波のみを検出する様な探触子と言える。

### ◆縦波斜角探触子の探傷器上の波形

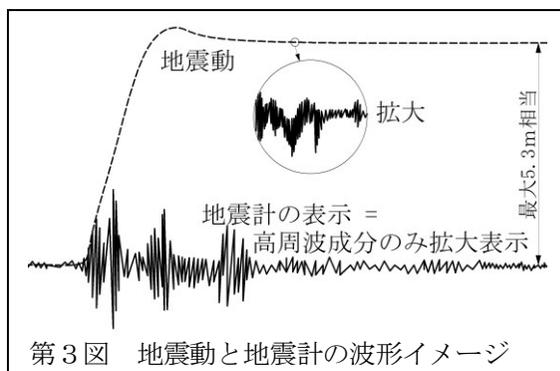
第1図の当時は、アナログ時代で探傷器画面を直接写真で撮る時代だったこともあり、探傷器画面の写真撮影はしなかった。改めて探傷器のエコー波形を、ほぼ同じ状況で観測すると、第2図となる。楔交換式探触子で、PMMA製楔



の角度は17.5度である。50mm高さSUS製のコーナーを狙った。楔の先端付近などからの反射エコーを除くと、コーナーの縦波反射が一番強く観測される。第1図と異なり、誰が見てもすぐにコーナー反射を探ることが出来る。

### ◆低周波地震動

3.11で都心の高層ビルが揺れていたが、20世紀の通常地震計ではその極低周波の振動は捉えられなかった。長周期地震動と呼ばれ2~20秒程度の振動である。これより長い周期だと測定しようとする地震計のサイズが大きくなるなど困難が伴うので、GPSで測定されて、超長周期地震動と呼ばれる。3.11等では大きな断層亀裂が進展し、振幅の大きな超長周期震動が起き、震源に近い地域では最大5.3m地盤が移動

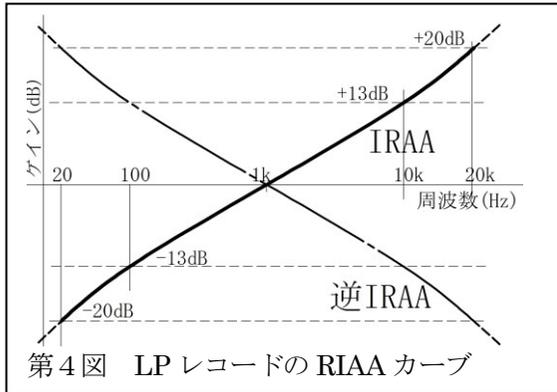


した。第3図にイメージ図を示す。上の点線が実際の地面の運動のイメージで、下の実線が地震計の波形イメージである。運動は大きいのに、地震計ではその高周波成分のみを増幅して表示している。運動を拡大すると細かな低周波成分もあるが、地震計には現れない。地震計に限らず、観測波形が概略上下対称の場合は、低周波成分の少ない事であり、低周波成分が観測できていない事を示す場合が多い。探傷器もRF波形では上下振幅は似ている。低周波成分が少ないので、昔から検波波形を使っていて情報量は変わらない。探傷器に検波回路が付いている理由でもある。上下が比較的対称なので、探傷器画面では、探触子で受信している筈の低周波成分を表示していない事を示唆する。

記録機器は、低周波から高周波までを観測記録するのは大変である。例えば音楽などの記録も音楽の音の低周波成分の振幅が大きく、高周波成分の振幅が小さい。エジソンの蓄音機のように、音圧比例した振幅をそのまま記録すると、再生時に摩擦によるノイズが多い。その為、1960年代からLPレコードでは20Hzの低周波の振幅を約1/10に圧縮し、20kHzの高周波成分を約10倍に拡大するRIAA補正をしていた(第4図)。再生時は逆に低周波を拡大し、高周波を圧縮する逆RIAAカーブのイコライザーと呼ばれる回路で再生していた。音など振動現象は同じエネルギーなら低周波振幅が大きい。

デジタル化した音楽CDでは16bit録音とダイナミックレンジが80dBと広いが、人間の耳の120dBには及ばず、2013年頃から24bitのハイリゾリューション・オーディオが出回り始

縦波斜角,低周波地震動,RIAA,スパイクパルサー,脱分極  
 めた。サンプリング周波数も CD の 44kHz から  
 96k,192k...768kHz (方式が違うが 2.8MHz も



ある)と上がってきている。振幅のダイナミックレンジは 24bit で十分と思われるが、周波数のダイナミックレンジは、衝撃音を再生する為に、もっと上がっていくと思われる。10MHzの広帯域探触子を耳に近づけると PRF が聞こえる。これを録音するには 20MHz のサンプリング周波数が必要となる。なお人の可聴周波数域は 20~20kHz となっているが、これは連続波を耳で聞く場合で、衝撃波(パルス波)ではこの範囲を超える。更に人は耳だけで音を聞いている訳ではない。低い周波数、例えば 100Hz では皮膚で良く感じ、1Hz の音になると、空気移動、即ち風と感じる。スピーカーからの音で、コンサートホールの状況に近づけるのは大変である。

一台の地震計で、低周波から高周波まで記録するには大きなダイナミックレンジが必要で、ダイナミックレンジが広い地震計を作ろうとして、低周波成分を記録すると高周波が低周波に埋もれ、高周波を記録する低周波成分で飽和する。周波数により別の地震計を使う必要がある。

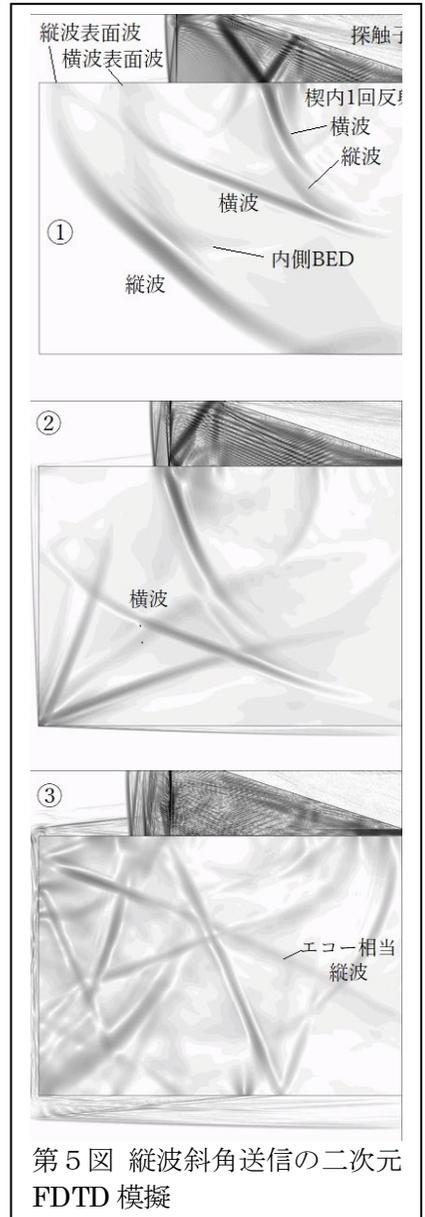
地震計に現れるより大きな振動が、新しい地震計や GPS で観測されている。書物に良く出てくる地震計の上下に振る波形は、地震計と言う「フィルター」を通した結果で、本当の地震動を表していない。地震計と呼ぶより「フィルター付き地震計」と言わないと誤解を招く。測定器の性能向上と共に、新たな物理現象が見つかったり、理解が変わったりする。探傷器も同様に、「フィルター付き探傷器」である。メーカーによりそのフィルターの特性は異なる。特に昔の探傷器は機種差が多かった。IC化が進み、最近

はどのメーカーも同じICを使う様に成り、特性が似てきた。計測器を使う場合は、計測器の測定範囲を十分理解した上で、使用しないと、測定結果から正しい結論が有られない事がある。

#### ◆ FDTD シミュレーション

第1図相当の縦波斜角のビーム中心が、コーナー中心に入る様に設定した場合の二次元 FDTD シ

ミュレーションを第5図に示す。①は探触子から縦波と横波が出た状態で、それぞれの広がり(外側 BED)が鋼表面で表面波を発生している。内側 BED も観測される。薄い楔を音波が往復して屈折した縦波、横波、表面波も観測される。何れも強度的には数倍の範囲である。特に縦波と横波の強度は殆ど差が無い。②はコーナーに縦波が入射してところで、縦波が横波にモード変換したところである。ビーム波面の厚さが入射縦波より薄くなっているため、横波と判る。コーナーでもう一度反射して縦波に戻る。③は



縦波斜角,低周波地震動,RIAA,スパイクパルサー,脱分極

縦波のエコー相当が探触子に向かっているところが判る状態で、第1図とほぼ同じ状態である。第1図では光弾性を使っているので、光弾性の原理上横波感度が2倍ほど高い。材質が違う等全く同じ条件では無いが、似たような色々な波が観測されている。エコー相当と書かれた波の波幅は見た目狭いが、観察感度を上げると広がり、縦波である。クサビの中では、3回ほど往復した波が観測されるが、エコーとしては最初の2つの波以外は通常観測されない。波面傾きが振動子面と異なる傾きの為受信感度がすこぶる悪いのが理由である。

第2図の波形の探触子同様の多くの楔交換式では、楔の先端が振動子と平行である。楔の厚さ方向の反射以外に、大きな楔の先端反射が観測される。

端面が凸凹にしてあるが、振動子面と平行に近い音波が戻ってくるので楔エコーが比較的大きく表示される第6図①。楔交換式でない一体化した市販探触子では上面から見ると先端を傾けて反射音波が振動子面に対し傾くようにしてある第6図②。この場合、振動子面と楔内からの音波波面が傾くので、楔・エコーが表示されないか、極小さくなる。振動子入射波面と振動子面とを一致させない事が邪魔なエコーを除く探触子の設計法で、探触子メーカーは良く利用している。

第6図 シュー先端反射の除去細工

◆探触子の送信と受信の入れ違い？

45度縦波斜角探触子の FDTD 模擬結果の第5図①を見ると、探触子から色々な方向に音が出ていて、探触子から出るビーム中心線を記すなら第7図の様になるだろう。

非破壊超音波の書物や教科書には探触子のビームの中心線を第8図①の様に、送信波のビームが SDH「きず」を狙っている様に書かれている。実際は、傷からは第5図③の様に縦波、横波、表面波が発生し戻ってくる波の内、振動子と探傷器の組み合わせで受信感度の高い波、振動子面と波面が合った波のみをエコーとして画面に表示される。従って、送信ビームを表示す

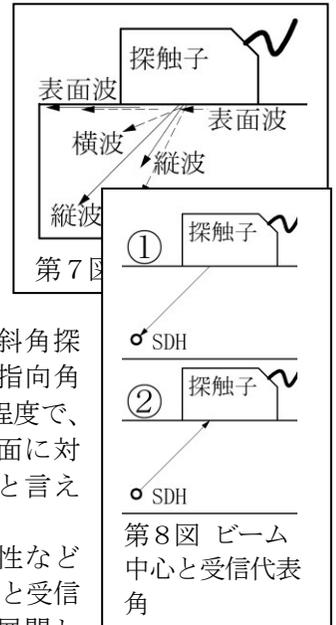
るのではなく、受信指向特性の中心線の矢印を探触子に向かう方向にして第8図②の様に受信代表角を記すべきである。

全ての探触子はその送信特性より受信特性=受信フィルターの効果が大きい。この受信特性はアレイ装置同様、振動子面の「開口合成」の効果である。アレイ装置で各素子の位相をずらして波面と振動子面の平衡度による変化は容易に確認できる。市販の標準的垂直探触子の受信指向角や斜角探触子の媒質中受信指向角半値幅は2~10度程度で、これ以上傾いた波面に対しては感度が無いと言える。

従来のビーム特性などの理論計算も、送信と受信を勘違いして理論展開している場合が殆どで、ほぼ全て間違いと言った方が良い。送信と言いながら、計算式は開口合成の受信特性を計算する式に近く、その結果、実験結果と近くなる為、勘違いを助長している様だ。

◆探触子の機能を表す適切な名称

振動子からのメイン・ビームの広がりや、振動子の横振動の為、板厚相当のエコーが観測される場合がある。第5図 FDTD 模擬結果を見ても分かる様に、ビームは線ではなく、広がりを持っている。ラテラル波(表面波)や板厚方向の波もかなり強い強度で存在し、そこに反射源が有ると、当然探触子に戻ってくる。しかし、



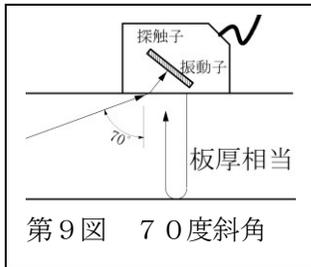
縦波斜角,低周波地震動,RIAA,スパイクパルサー,脱分極

受信の際に振動子面と探触子に入ってきた音の波面が一致しないと感度が非常に悪くなる。振動子が発電しても傾いた音は低周波になり、探傷器の帯域下限以下となり、エコーとして探傷器の画面に表示されない。

通常の探傷感度では、70度方向の反射体からのエコーが良く表示されるが、感度を上げると、振動子端から板の裏面から反射してくる縦波エコーも観測される。これはメイン・ビームの広がり底面に当たり、振動子に戻ってきた音が、振動子と探傷器のフィルター動作で十分排除できなかったためである(第9図)。

従って、例えば「斜角横波70度の探触子」は、「探触子に主に70度で入射してくる横波をエコーとして表示する探触子」と言える。

更に、送信特性と受信特性の何れが効果的か明確にする為、探触子の名称としては「斜角70度横波受信用探触子」と名付けた方が良いかもしれない。



エコー波形と探触子から出る音(ビーム)はまるっきり異なる事を認識した上で、振動子を励振するパルサーの波形の話をする。

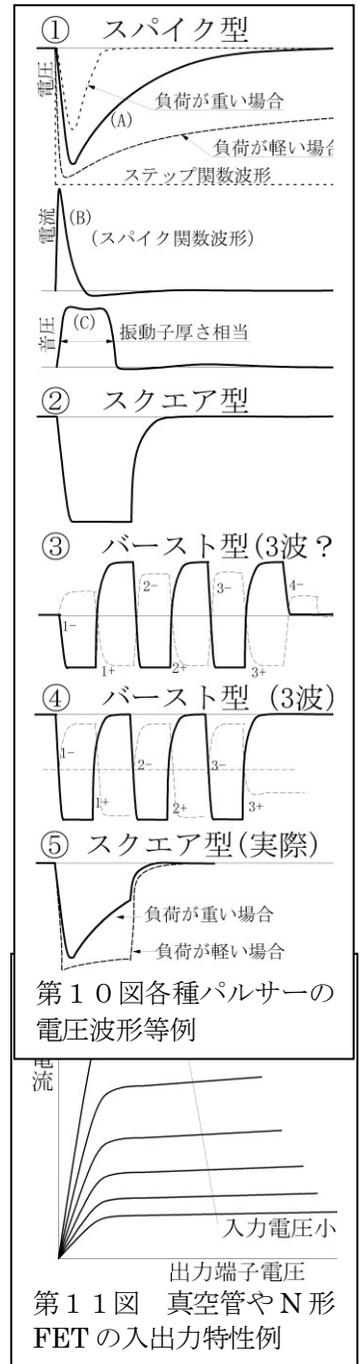
### ◆昔から使われてきたスパイク型の原理

2000年頃までは、スパイク・パルサーが主流であった(第10図①)。ゼロ電圧から瞬時に負電圧になって、緩やかにゼロ電圧に戻る。負荷が重い場合は負の鋸歯状の電圧波形になる。負荷が軽い場合、所謂ステップ関数と呼ばれる波形で、制御技術論では、その結果生じる例えばエコーは、インディアル応答と呼ばれ、インパルス応答の積分波形である。入力を電圧では無く、電流とすれば、インパルス応答となる。負荷としては探触子や探触子ケーブルであるが、探傷器内に組み込まれたダンピング抵抗も負荷となり、探触子を繋がないで、ダンピング抵抗を変えて、オシロスコープでこれらの電圧波形変化を確認できる。振動子は一種のコンデンサーで電圧の変化が無ければ電流が流れない。電圧の変化が有ると電流がなされる。ステップ変化の際に電流が流れ、徐々にゼロ電圧に戻る軌

間は殆ど電流は流れない。その為、ステップ状に急に電圧変化する部分は、電流では(B)の様なスパイク状になり、スパイク・パルサーの名前が付いた。電圧ではなく、電流の波形を言っていたと思われる。(電圧の図(A)もスパイクに近く、これをもってスパイクと言った可能性もある)広帯域探触子の場合、このスパイク電流で、振動子厚さ相当の矩形の音圧が発生する。

元々真空管やMOSFETは第11図の様に入力電圧により、出力電流を変化させる素子で、出力の電流波形に関心を持っていた。従って「立ち上り時間」と言う、「電流の立ち上り時間」を意味した。負荷が理想抵抗の場合、オシロスコープなどで出力電圧を測定すると、抵抗負荷では電圧の立ち下がり時間が、電流の立ち上り時間に相当するので、代用できる。

測定は抵抗負荷の電圧の立ち下り時間で行い、結果の意味としては、「電流の立ち上り時間」となる。立ち上がりに関して誤解が多いので、こ



縦波斜角,低周波地震動,RIAA,スパイクパルサー,脱分極

ここで明記した。電流と電圧を勘違いしてか、一部の探傷器メーカーは、電圧波形がスパイク状のパルサーをスパイク・パルサーと呼んでいる。海外の論文では電圧がスパイク型の場合、間違いを避ける為かニードル型と呼んでいる。注意が必要である。

現在主流になっているスクエア・パルサーは、初期は②の様なスクエア電圧を与えていた。しかしスクエアの先端で①(B)の様なスパイク状パルス電流が流れ、振動子が振動した直後に、振動子内の音の移動に伴い、逆起電力が発生して、折角振動子に送った電荷(エネルギー)がパルサーに戻され(専門用語でキックバックと言う)、結果感度が落ちる。逆起電力は振動子が、「電歪」素子でもあり、「圧電」素子でもある可逆素子の為だ。電圧を加えると、振動子が歪む、即ち音が出る。音即ち音圧が加わると、電荷が発生する。振動子を送信回路(パルサー)で駆動したつもりが、振動子により、パルサーが駆動されてしまう。昔のスパイク・パルサーはキック・バックを避ける工夫、逆起電力素子ダイオードを出力に配置していて、このキックバックに依る逆流は無い。

逆流を避ける為、殆どのスクエア・パルサーはスパイク・パルサーと言いながら、短時間電圧を加え、半周期遅れて短時間GNDに繋ぐ方法、即ち負と正電圧の旧来のスパイク・パルサーの時間をずらして働かすのと同様機能に収束している。バースト・パルサーなども同様な方法の送信感度が高く、一部のメーカーは逆流を防止している。リニア・アンプを使ったパルサーは逆流防止が出来ず、エネルギーが振動子からパルサーに戻り、その分探触子からの送信出力が落ちる。

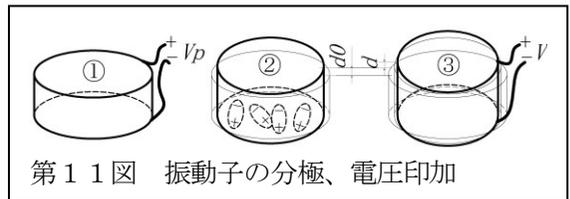
結局大昔から使われたスパイク・パルサーは先人が苦勞して作った理想形と言う事である。

バースト・パルサーで③の様な正負の電圧を加える方法がとられることが有るが、振動子は電流駆動であるので、電圧の変化量に比例した音が出る。正負3波の励振では、3.5波が発生し、最初と最後は音圧が他の約半分となる。同じ音圧を発生したいなら、④の波形にする必要がある。リニア・アンプを用いサイン波形で励振したい場合は、 $(1 - \cos)$ 波形で励振する。振動子には正電圧を加えると脱分極する恐れが有る

ので、必ず正電圧を加えないようにするのが鉄則でもある。

#### ◆圧電素子の静的印加電圧と歪の関係

探触子の振動子に使われる圧電素子は、強誘電体で、電圧に比例した歪を生じる。探触子に使われる大半の振動子は、圧電効果のない状態(無分極)のセラミックの焼き物に電圧を印加して分極させ圧電効果を得る。ヒステリシス現象などの話は以前の回で記したので、音に強く関係する部分のみ記す。第11図の様に円盤状の



第11図 振動子の分極、電圧印加

振動子①に電圧  $V_p$  を加え分極操作すると、 $d \cdot 0$  だけ厚さが増え、ポアソン現象で径は小さくなる②。内部の粒界は図の様に平均的に分極されている。これに分極時に加えた電圧と同じ向きに電圧  $V$  を印加すると、更に厚さが  $d$  大きくなり、径は小さくなる。この変化率は通常に分極条件や探傷器の電圧では 0.1%以下、多くは 0.01%以下である。

電圧を加えると内部圧力が上がり膨らもうとし、それに釣り合う振動子の弾性体として引っ張り力が発生する寸法まで厚さが増える。

電圧  $V$  を加えた瞬間、前述の様にパルス電流が流れ、内圧が発生し、直後瞬時の厚さの変化は最大  $d$  の2倍ほど変化し、振動しながら時間経過と共に  $d$  に収束する。振動の初期は三角波的振動で、徐々にサインカーブに近づく。寺の鐘や音叉を叩くと、初期は高調波成分が多く、次第に基本波に成るのと同様である。この様子を次回 FDTD で模擬しよう。

#### ◆あとがき

探触子の受信特性を、探触子からの音波のビーム特性と勘違いしている書物や論文が多い。殆どの探触子の特性は、探触子面の開口合成特性だと認識する事が重要である。

#### ◆今回知った事

(1) 光弾性可視化装置で観測すると、探触子や反射体から、探傷器の画面のエコーと

縦波斜角,低周波地震動,RIAA,スパイクパルサー,脱分極

の関連が判らない多くの色々な波が発生している。

- (2) エコーは探傷器と探触子と言う強い「フィルター」が掛かった状態で観測をした結果である。
- (3) 探傷器は、表示波形に低周波成分が少ないので、昔から検波波形を使っている。
- (4) 45度縦波斜角の送信音波は、超音波可視化装置と二次元 FDTD で似た結果となる。
- (5) 振動子入射波面と振動子面とを一致させない事が邪魔なエコーを除く探触子の設計法で、探触子メーカーは良く利用している。
- (6) 従来超音波理論は、送信と言いながら、計算式は開口合成の受信特性を計算する式に近く、その結果、実験結果と近くなる為、勘違いを助長している様だ。
- (7) レイ法でビーム中心を示すより、開口合成での感度の高い受信代表角を示す方が理に適っている。
- (8) 斜角横波70度の探触子」は、「探触子に70度で入射してくる横波をエコーとして表示する探触子」と言える。
- (9) パルサーの「立ち上り時間」は本来「電流の立ち上り時間」の意味。
- (10) スパイク・パルサーは「電流がスパイク状」のパルサーの事。
- (11) 一部のメーカーはスパイク・パルサーを電圧がスパイク状パルサーと勘違いしている。
- (12) 真空管やMOSFETは入力電圧により、出力電流を変化させる非線形素子
- (13) 「立上り時間」は元々電流の立上り時間の意味。測定が難しいので、今は電圧の変化を測って代用している。
- (14) 「電歪」素子でもあり、「圧電」素子でもある可逆素子で、振動子を励振した積りが、振動子に送信回路がドライブされている。
- (15) 振動子には正電圧を加えると脱分極する恐れがあるので、必ず正電圧を加えないようにするのが鉄則

<参考文献>

超音波技術入門—発信から受信まで(2020/10初版6刷、日刊工業新聞社)

Y.Udagawa and A.Yamada, "Simulation and Verification Experiment of Radiation Sound Pressure Waveform from Finite Aperture Piezoelectric Transducer", The 34th Symp. Ultrason. Elect. (2013).

USE2013 Analysis and Observation of Sound Wave Field from Finite Aperture Piezoelectric Transducer - Fact-finding of Misfit between Conventional Analysis and Experiment Observation

Kuhn.G.J.,Lutsch,Elasticwavemodeconversion at a solid-solid boundary with transverse slip.