

音波のよもやま話 (その13)

探触子から強い音を出す②

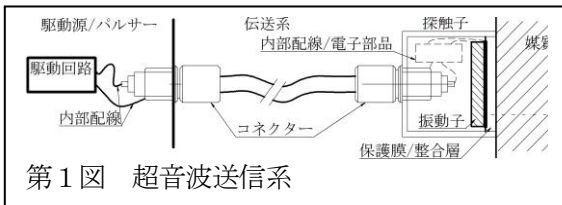
High power sound form transducers(2)

(有)アイ・エス・エル 宇田川義夫

◆はじめに

前回は送信音響出力を大きくする方法に関して、探触子以外の部分の話をした。

今回は前回示した第1図の全体図で探触子内部での細工に付いて述べる。一部の方法は、例えば振動子に電子部品を加える事は、ケーブル途中やパルサー側で細工も可能である。



第1図 超音波送信系

◆探触子での細工

探触子は特注品が容易に注文できる。非破壊検査の対象物が多岐にわたるので、当然と言える。器用なユーザは自作できる。大昔、超音波探触子は使う工場では自作していた。例えば米国のアパラチア山脈の中にあるスタンダード・スチールの検査職人は自作し、それが元に始まったのが米国エアロテック社であり、現在の非破壊の GE センシングや医療のフィリップス探触子関係の源流である。目標にする仕様によるが自作する気になればそれほど大変ではない。後述の感度を上げる電気的中和は水晶時代から行われており、探触子の外にインダクタンスを配置しても感度が上がるので細工も簡単である。手間がかかるので量産では行われなくなっているが、自作なら時間をかけ調整できる。

探触子で送信音波を強くするには、主に以下の方法がある。どれを採用すべきか、それぞれの目的条件で異なる。

- (A) 振動子の素材選定
- (B) 振動子の構造化

- (C) $\lambda/4$ 法と $\lambda/2$ 法
- (D) 保護膜などの音響マッチング
- (E) 横振動を縦振動にするなどの構造
- (F) 積層、並列駆動
- (G) 集束
- (H) 電気的中和
- (I) オーバーシュート
- (J) 共振による
- (K) トランス
- (L) 自己バイアス

以降各方法の解説を述べる。

◆振動子の素材定

探触子を設計する場合、それぞれの目的によっては選択方法が異なり、経験によるところが多い。工業的に手に入りやすい、長期的に安定供給される振動子は殆ど分極操作されたもので、脱分極条件が、最大音出力の限界となる。一般の脱分極はメーカーが提示しているが、多くは極低い周波数の三角形状の数kVの高電圧で試験した結果で、印加する周波数、振動子の形状で変化するので、実験して確かめるしかない。実験自体が大変なので、とりあえずメーカー値を目安に使う場合が多い。

強い音を出すと言う意味では、同じ電圧で振動子に多くの電力供給できる、即ち誘電率の高い振動子が選ばれる。同じ振動子材質系では、大まか誘電率と脱分極電圧は反比例するので、パルサー・レーザの条件からグレードを決める事も多い。一方誘電率の高い振動子材質は横振動が多く、横振動を嫌う目的には使い難い。横振動が少ない振動子、例えばニオブ酸系振動子は感度が悪いが脱分極電圧は高い。

メーカーにより測定方法やグレードが異なるが大よその脱分極電圧は以下である。殆どの材料は耐圧より脱分極電圧が低い、ポリマー振動

子のシアン化ビニリデン P(VCN/VAc)に至っては耐圧が脱分極電圧が常温では上回る。高い電圧の送信回路が実現できれば、セラミックを超える送信感度の可能性もあるが、現状では適した電子回路の設計ができない。

(狭帯域)PZT系 400~2kV/mm

(広帯域)ニオブ酸系 3k~8kV/mm

P(VCN/VAc) 50kV/mm 以上

高い周波数では振動子厚さが極薄いので、100MHz 程度まではポリマー系や ZnO 等のスパッタリング、100MHz 以上はスパッタリングによる製造など方法が限られ、パルサーの電気的特性との相性で選択する。

媒質が決まっています、保護膜が絶対条件でその特性に合わせざるを得ない事もある。例えば透過損失の少なくなる様な振動子材料である。

大面積振動子になると、誘電率が低い素材を使わないと、パルサーが振動子をまともに駆動してくれない。或いは、振動子を分割して、複数のパルサーで励振するしかない。

色々な要因が絡むので、経験豊富な人に相談するのが近道である。

筆者のごく一般的な選択手順は以下である。先ず Q 値を考える。Q 値が 1 に近ければ以下とし、それ以外は、Q 値分余裕を取る。例えば以下の V_p の代わりに $V_p \times Q$ を脱分極電圧と考える。

使用条件での、振動子の容量を C 、設計又は使用しようとしているパルサーの最大駆動能力の電圧電流を V_p 、 I_p 、振動子への電流注入時間を t とする。

$$V_p \approx \frac{I_p \times t}{C} \quad \text{式(1)}$$

連続波の場合 t は 1/4 周期としている。

この程度の容量 C で脱分極が V_p 以上の振動子を探し、横振動が多、少ない又は電氣的に処理できるかでさらに選択する。良いものが無い場合は、以降の色々な細工や電氣的バイアスを加えて脱分極を抑えたり、Q 値を下げる方法を考える。

一般的に放電破壊電圧は脱分極電圧より遥かに高い。但し、接触媒質が染み込む事を前提に設計する場合は注意が必要で、振動子電極間に水等が染み込むと耐圧が急激に下がる。多くの接着剤は水を浸透させるので、注意が必要である。パルス駆動だと、放電して波形が歪んでも、多くの場合殆ど気が付かない。炭化し短絡して、或いは振動子が剥離してから劣化に気が付く事

が大半である。放電で電極が飛んで、短絡が自己修復されほとんど波形が変わらないことも多い。

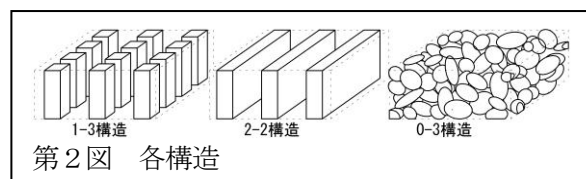
◆連続励振の場合の注意

ステップやスパイク・パルス励振だと脱分極電圧程度までの電圧が加えられるが、連続或いは波数の多いバースト、場合によってはスクエアの場合は励振間隔が短い為、脱分極電圧が下がる。特に Q 値の高い探触子、即ち発生した音が直ぐに外に出て行かない場合はこの傾向にある。更に励振に伴い発熱する場合は、キューリー温度が低い材料では脱分極電圧は更に下がる。例えばニオブ酸系では 20°C と 120°C を比較すると脱分極電圧は大体 1/4 に下がる。

1960 年代前の例えば超音波肉厚計は共振法が使われ、探触子に大電力が供給されていた。こう言った強力な電力供給では発熱が大きく、冷却技術がその性能を決めた。殆どが水冷回路を付属させていた。現在なら小型ファンやヒートパイプによる小型冷却装置があり、より容易に冷却できる。

◆振動子の構造化

第 2 図の 1-3、2-2、0-3 構造が一般に実用化されている構造化振動子の構造である。図ではセラミック振動子材質の部分を描いてある。間は接着剤や多孔質材で満たされている。市販の



単一振動子材の電氣的、或いは音響的特性が適切でない場合に採用する。数値は接続の XYZ 軸方向を示し、0-3 構造では、セラミック同士が接続されていないので 0、プラスチックが XYZ3 軸すべての方向に接続されているので 3 となつて 0-3 と呼ばれる。3 つの各構造はプラスチック業界では 3-1 構造、2-2 構造、3-0 構造と呼ばれる。

構造化により、振動子の送信感度が上がると思われているが、探触子としての送・受信実用感度が上がっているのであつて、振動子としての送信感度は逆に下がっている事が多い。振動子の選択する時、透過損失も合わせて設計する

と、性能が悪い振動子の方が総合感度は良くなる事がある。

振動子素材そのものと、同じ素材を使った構造体では測定された電気機械結合係数 K_t 値等は多少の違いがある。例えば PZT で 60% が構造化して 70% になったりする、がこれは単に連続励振の場合の規格で決められた特定の形状 (20Φ2t) の振動子の送・受信総合特性の測定結果で、特に機械的弾性率と Q 値が下がった影響である。また送信と受信の結合係数を分離して計測していないので送信時の K_t の意味が曖昧である。等価圧電定数即ち電圧に対する歪量の値を参考にした方が良い。

プラスチックをバインダーとして構造化すると、その分圧電素材の振動子体積に占める割合 (Volume Fraction) が少なくなる。その VF 分発生出来る音が弱くなるのである。電気的にも構造化すると誘電率が下がり、その分定電圧駆動では注入できる電力が下がる。即ち等価圧電係数が下がる。

同じ振動子を直接接触させ送・受信する場合は構造化すると送信音強度は弱まるが、この弱まった音を受信する時は、柔らかくなった圧電材料が応力を受けるので、送・受信感度特性としては素材とほぼ同等となる。但し、電気的インピーダンスが異なるので、送信は定電圧駆動、受信は高入力インピーダンスで受けた場合の話である。

送・受信の場合で音響インピーダンスの高い金属などに超音波を直接送信する場合は、単一セラミックの方が遥かに感度は高いが、水浸、遅延材付など振動子に接する材料の音響インピーダンスが低い場合は、構造化して音響インピーダンスを下げた振動子の方が有利になる。要は振動子から媒質への透過損失が大きいか少ないかである。医療では媒質が水であること、非破壊ではプラスチック製楔を使った斜角探傷が多いため、単純に 1-3 コンポジットは感度が高いと言う誤解が生まれた。

振動子素材より音響インピーダンスが低い媒質に入射する時に透過損失を小さくしたい場合、或いは電気的インピーダンスを上げたい場合などで構造化振動子は役立つ。

1-3 や 2-2 構造の電極間がセラミック振動子素材で繋がっている構造において、音響インピーダンス Z を決めるのは VF 値 K_v である。

バインダーの発泡体など音響インピーダンス Z が振動子の Z_0 より十分低い材料の場合は単純に

$$Z = K_v \times Z_0 \quad \text{式(2)}$$

となる。この値を媒質との関係で適切に決めると透過損失の少ない振動子となる。1-3 構造などは多くはダイシングソーで製作するが、 K_v を小さくすると、加工時間がかかり、また振動子の細い柱が折れやすいので、加工との相談も必要である。潜水艦ソナー用の低周波の大口径 1-3 構造ではファイバー PZT を束ねて製作し、コストを下げている。

◆ λ/4 法と λ/2 法

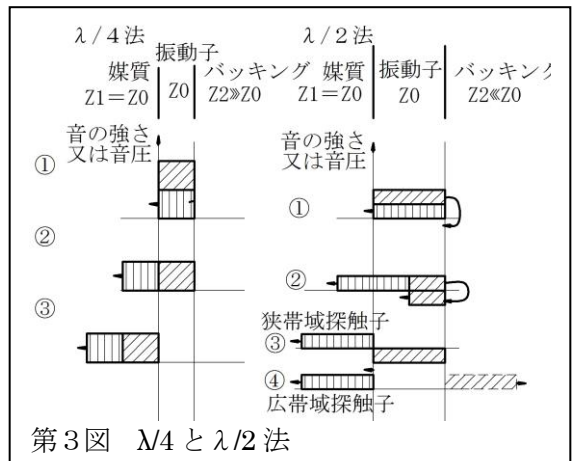
同一素材の振動子の電気的インピーダンス Z_t は径が同じなら厚さ t に比例する。

$$Z_t \propto t \quad \text{式(3)}$$

一方注入される電力 P_t は、パルサーの駆動力が強ければ、即ち定電圧駆動の場合、パルサー電圧を V とすると、電気的インピーダンス Z_t に反比例する。

$$P_t = \frac{V^2}{Z_t} \propto \frac{V^2}{t} \quad \text{式(4)}$$

となり、定電圧駆動で、同じ振動子素材なら振動子が薄い方がより強い強度の音を発生できる。通常の振動子はその機械的自由共振を使う。この場合波長の半分厚さの振動子が使われる。λ/2 法と呼ばれる。厚さを波長の 1/4 と薄くして、片面に振動子より十分大きな音響インピーダンスの物質を配置すると共振周波数は前述と同じとなる。これを λ/4 法と呼ぶ。裏面で反射させて音を強くすると書かれている場合もあるが、正しい表現ではない。定電圧駆動であれば、



第3図 λ/4 と λ/2 法

入力電力が倍になっている。λ/2 法で既に使っているパルサーの駆動力が電流飽和などで限界

の場合は $\lambda/2$ 法探触子を $\lambda/4$ 法探触子に交換しても無駄である。

第3図に定電圧駆動時の $\lambda/2$ と $\lambda/4$ 法の原理を示す。バックングに振動子の音響インピーダンスより十分大きい材料又は十分小さい材料を配置する。ここでは媒質側は振動子と同じ音響インピーダンスと同じ音速として書いてある。 $\lambda/4$ 法では通常金属がバックングに使われる。振動子に強力なスパイク・パルサーで瞬時電荷を与えた場合を考える。定電圧駆動の場合音の強度は $\lambda/4$ 法の倍である。

第3図の①の様に振動子内では均一音圧が発生し、半分のエネルギーは媒質側に、残り半分はバックング側に進む。バックングで反射する時、位相反転せずに反射する。 $\lambda/4$ 相当進んだ状態を図の②に示す。更に $\lambda/4$ 相当進むと③となり、振動子の厚さの倍の半周期、即ち振動子の厚さが $1/4$ 周期の音が出る。通常は媒質の音響インピーダンスが振動子より小さいので、一度に全部の音が媒質に出ず、位相反転して振動子内で減衰振動を繰り返す事になる。

通常の振動子の自由機械共振を使う $\lambda/2$ 法を図の右側に示す。裏面バックング側に進んだ音はバックングで位相反転するので、振動子の厚さが半周期 $1/2$ 相当の正負の音ができる。正負の振幅差と言う意味では $\lambda/4$ と同じ振幅となる。広帯域探触子はバックングを振動子と同じ程度の音響インピーダンスとしているので、後面方向に伝わる音は吸収され④の様になる。発生した音の50%のエネルギーを後ろに逃すのもったいない。 $\lambda/4$ 法では後ろに伝搬する音の大半を前に反射させるので、発生した音のエネルギーを100%使っていて効率が良い。帯域が比較的広い中帯域の場合には、後ろで吸収しないで反射させる $\lambda/4$ 法がより有利になる。

◆音響マッチングによる方法

探触子では振動子の保護目的で振動子の前に保護膜を付ける。これらは保護と同時に音響整合層になっている。振動子、保護膜、媒質の音響インピーダンスをそれぞれ Z_0 、 Z_1 、 Z_2 とすると、

$$Z_1 = \sqrt{Z_0 * Z_2} \quad \text{式(5)}$$

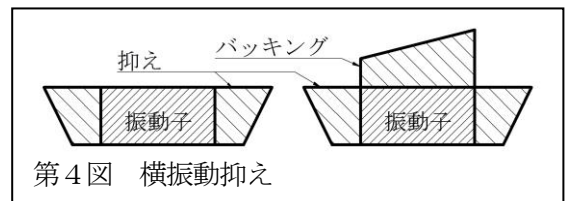
の条件で透過損失は最小になる。空中超音波用など振動子と対象媒質の音響インピーダンス差が大きく透過損失を減らしたい場合、整合層を2、3層と多層にする。

媒質が水などの場合、広帯域用では通常 $\lambda/10$ 以下相当、狭帯域用では $\lambda/4$ の膜を付ける。狭帯域の場合、整合層は共振層（多くは $\lambda/4$ ）になっており、後述するが上記より効率的に音を伝搬する。その分帯域幅が狭まる。

計算上最適な音響インピーダンスの材料の入手が困難だったり、製作可能とは限らないし、耐久性接着性など他の条件を満足しない場合が多い。更に最良透過損失の材料で音波波形を満足できるとは限らない。多くの場合経験に頼っている。初めての条件の場合、送信波形のシミュレーション・ソフトで、日ごろ使っている何種類かの材料とその厚さを変えて、候補を幾つかに絞り試作するのも一つの手である。

◆横振動を縦振動にするなどの構造

PZTは非常に送信感度が良い。しかし欠点は横振動する事である。その分注入エネルギーの多くが横振動の為無駄になる。単にこの成分を抑えるため、並列にインダクタンスを入れて、横振動成分を電気的に出ない様にする事があがるが、その分損をしている。横振動を抑えるには、横方向に音響インピーダンスの高い物質を配置し、抑えればよい。主要な振動子材料は音響インピーダンスが $8M \sim 30MRayls$ なので、これより大きな材料を使う。音響インピーダンスの小さな振動子では銅などの金属が良い。タ

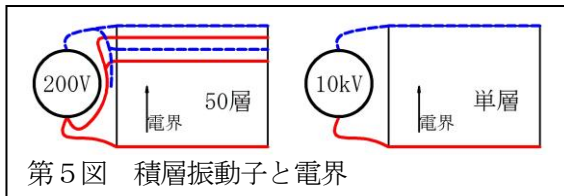


第4図 横振動抑え

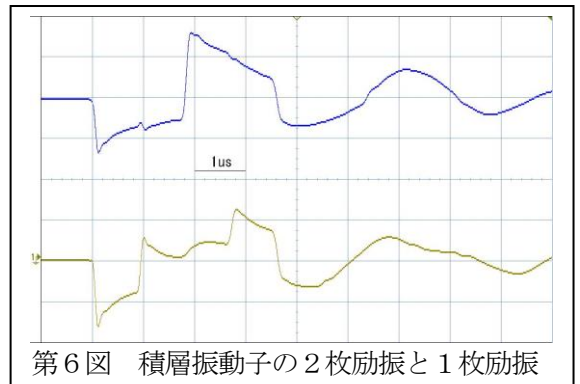
ングステンは $100 MRayls$ と大きいので効果が高く、セラミック系振動子にも使える。付加した材料の裏面反射があり、これが邪魔な場合傾斜を付けるなどの配慮が必要である。また前述の $\lambda/4$ 法の場合は、図のように裏面も囲うと良い。この側面を囲う方法は薄い振動子には効果が低く、低周波の円柱状の振動子に使われる。

◆積層

ボルト締めランジュバン振動子 (BLT) は振動子を2枚積層したものが多い。振動子両側の金属付加体が共にアース側になる様にするのが主目的であると同時に、低周波の振動子は電気的インピーダンスが高いため、それを半分にする



る為でもある。BLT はフランスの物理学者ポール・ランジュバンが圧電効果を発見したピエール・キューリーの示唆を受け開発されたものである。両側の付加体金属は、全体の共振周波数を低くする為である。水晶は共振周波数の低い厚いものが手に入らず、基本周波数は MHz 帯である。潜水艦のソナーなどに使う数十 kHz に下げる為、付加体を付け全体の共振を使う事に成った。現在は電気的インピーダンスがより小さい PZT が使われる。セラミックやガラスの圧縮強度は大きい、引張強度が小さい。大体 10:1 で引張強度が弱いのである。金属は圧縮と引張強度が同じ程度である。分極したセラミック振動子の場合、分極操作により内部歪が発生し、時として分極中にその内部応力で割れる事もある。脱分極に至らない様な弱い電圧印加でも破損する事がある。実際に非破壊用の探触子に比べると BLT に入力される電力エネルギー密度は数桁低い。だが、共振状態付近で BLT の一部に音が集中するなど、壊れやすい状態にある。その為、与圧を与えて、割れない様にしている。因みに振動子が割れても形を留めていれば振動子としては機能する。一部の探触子は製作工程で大きな圧力を加えて接着するが、振動子が割れている事が良くあるが、電極が繋がっていれば超音波性能は大した差が無い。多くの BLT の脱分極電圧が数 kV であるが、実際に加える電圧は大半 1kV 以下である。ボルトで締めつける理由は与圧の他、接着構造の連続波で使った場合の発熱による剥離対策である。電極に厚めの柔らかい銅合金を使って接着剤を無くして共振付加体も含め一体化する為にボルトで締めつけている。機構などに取り付ける場合もボルトやナット構造があると便利である。誘電率の高い PZT の静電容量は、例えば 0.5MHz 40ϕ で 10nF 程度である。これは 500kHz だと 30 Ω 相当程度と 50 Ω 系に近いが、20kHz だと 800 Ω 相当と可なり高くなる。2 枚配置し、電極を並列接続すると、半分となる。駆動回路の電圧が同じなら、振動子に供給する電力は、振動子インピーダンスが半分になると 2 倍になる。



上記 BLT 構造では、全体の一部で音を発生しているので、単一振動子に比べその分音の強さは薄まる。

そこで 2 枚では無く、3 枚、4 枚積層と言うアイデアになる。IC 製造過程で露光装置は精度の高い位置制御が必要で、サブミクロの位置制御に積層圧電素子が使われている。これは数十又は数百層の積層圧電素子である。耐圧は最大 200V の物が多い。この積層振動子はその共振周波数より十分低い周波数で変位を発生する事を目的にしているが、200kHz 程度までの強い超音波の発生にも使われている。

第 5 図の様に積層しなくても、同じ振動子材質の単相に積層数分高い電圧を印加すると同じ音圧や変位が発生する。例えば 50 層の積層振動子各層に 200V と加えるのと、50 層の相当厚さ全体に 10KV の電圧を加えるのと圧電結晶胞は同じ電界を受けるので、結局同じ音圧、変位が発生する。実際には電極厚さが占める割合が小さい分、単層の方が有利である。

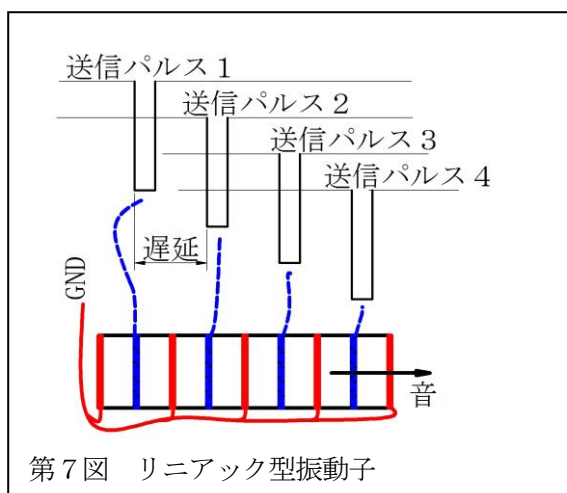
100kHz を発生する駆動回路を考えると、10kV より、200V の方が楽である。電子回路設計の難易度と積層のコストなど天秤にかけて方針を決める必要がある。振動子素材自体は耐圧や脱分極の限界があるので、積層しようが、しまいが、それ以上に強い音は発生出来ない。

第 6 図は共振周波数が 0.5MHz(波長 $1\mu s$ 相当、反共振周波数は 5.5MHz で波長は $0.9\mu s$ 相当)の 2 枚の振動子を積層し、2 枚の電極を接続して励振した場合と片方の振動子のみを市販スパイク・パルサーで励振した場合の振動子から出てくる音圧波形である。2 枚同時の場合 $2\mu s$ 弱のパルスが観測される。中間に積層境界相当の小さな凸凹も観測される。振動子の径振動も含まれているので、初動の厚さ振動は矩形波と考えられる。1 枚励振の場合は、2 枚励振の小さな凸凹の位置までの矩形音波が観測される。

振動子の後面側に伝搬した矩形音波は表に出てくるまでに1枚の3倍の距離を伝搬するので、先端から $3\mu\text{s}$ 弱に現れる。なお大きな $10\mu\text{s}$ 強のうねりは径振動である。

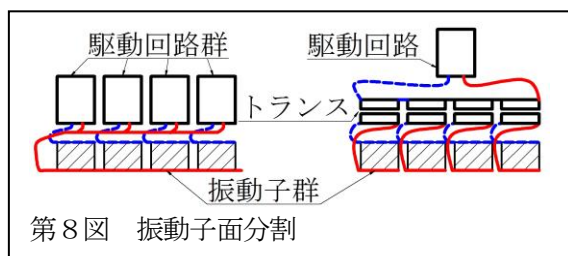
振幅は2層の場合より少し高いが、これはパルサーが理想の定電圧駆動でないので、2倍の負荷で2倍の電流を流せなかったためである。積層数が多い場合市販パルサーでは駆動力が足りない事が多いので、注意が必要である。

第5図では積層全体での共振周波数の音を出す事を考えたが、積層一枚の発生した音が次の振動子に伝わった時に、その振動子を励振するような電子加速器のリニアック的積層振動子の



利用方法もある(第7図)。2層4組程度以下の積層までは有益な効果が確認されていて、ネックは伝達損失や振動子の歪電効果で思うように電力を上げられない事である。効率の高い振動子では、ほぼ役立たない。

高い周波数或いは大面積の振動子は電気的イ



ンピーダンスが低く、扱いにくい。 30MHz 以上の高周波探触子に誘電率が低いポリマー系振動子を使う一つの理由である。透過法で大面積を一度に探傷したい場合、例えば 1MHz で 1m 四方と言った大面積振動子の場合、電気的インピーダンスが極低い。多くの場合 1Ω 以下である。

前述のトランスによるインピーダンス整合も配線のインダクタンスや抵抗成分の為に必ずしも有効でない。その為振動子を分割して、複数の駆動回路に繋ぐか、トランスで並列直列変換をする事に成る(第8図)。筆者は 10MHz $\Phi 100\text{mm}$ のフォーカス探触子を作った時に、効果を確かめたが、この大面積でも8分割程度で8台のアバランシェ・パルサーを使って 10MHz 成分を良く発生した。なお、その時の振動子はセラミック振動子では電気的インピーダンスが高すぎたので、粉状のセラミック振動子をプラスチックとゴムの混合物に混ぜコンポジット化し誘電率を下げた0-3コンポジットを用いた。

◆あとがき

探触子の細工に関して、半分ほどを今回述べた。次回に続ける。

◆今回知った事

- (1) 振動子素材で放電耐圧、脱分極電圧は異なり、駆動回路に合った材料を選択する
- (2) 1-3 や 2-2 構造化により容易に音響透過損失を減らし、送信音圧が上げられる
- (3) 一般に中広帯域探触子の場合、バッキングで減衰させる $\lambda/2$ 法より、 $\lambda/4$ の方が効率は良い
- (4) 音響マッチング層を付加すると透過損失が減る
- (5) 横振動が大きな振動子では、周囲を抑えて縦振動に変換して効率を上げる
- (6) 送信回路と積層数を適切に設計すると大きな音が出せる
- (7) 大面積で低インピーダンスの振動子の場合、振動子を分割し、多数の駆動回路で駆動する

<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)

・
・