

音波のよもやま話（その6） 誘電体、圧電体、圧電振動子

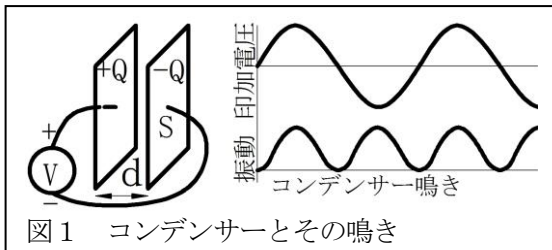
(葡)アイ・エス・エル 宇田川義夫

◆はじめに

超音波非破壊検査には主に圧電振動子を用いた探触子が使われる。圧電振動子は単に振動子とも呼ばれる。今回はこの圧電振動子の話をする。圧電振動子の別名は「圧電体」で、「誘電体」の仲間である。まずは誘電体の話から始めよう。

◆誘電体

平行に配置した2枚の金属はコンデンサーを形成し、電荷を貯める事ができる。大電力高周



波の伝達には今でも単なる並行板のコンデンサー（真空コンデンサー）が使われており、板の間は真空にして放電を避けている。

静電容量 C のコンデンサーの端子電圧 V と溜まっている電荷 Q の関係を以下に示す。

$$V = \frac{Q}{C} \quad , \quad Q = CV \quad (1)$$

電荷 Q と電圧 V は比例関係にある。容量 C は電荷を貯める能力を示す。同じ電圧 V でも容量 C が大きければ多くの電荷を貯められる。電圧 V は相対的に電荷が多い少ないかを測定した結

果で、単なる相対値であり、その原因は電荷である。重要な事は「電荷が無ければ電圧は存在しない」である。乾電池に 1.5V 程度の電圧があるのは、-電極に貯まっている電子の量（電荷）が、+電極より多く、その為 1.5V の電位が発生している。電子回路を動かしているのは電圧ではなく電子（電荷）である。電圧は単に電荷の供給能力を示す指標である。

コンデンサーに蓄えられたエネルギー Ec は以下で示される。

$$Ec = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{Q^2}{2C} \quad (2)$$

スパイク型パルサー探傷器等では、内部の結合コンデンサーとコンデンサーへの充電電圧を上式に代入し mJ の単位でパルス・エネルギーとしてカタログに表示している。一回の送信パルスで探触子にどの程度のエネルギーを供給できるかを示している。

電極間が真空で電極の縦横寸法が隙間間隔 d に比べ十分大きな場合、静電容量 C は以下の式で示される。

$$C = \epsilon_0 \frac{S}{d} \quad (3)$$

ϵ_0 は真空の誘電率で、 $8.85 \times 10^{-12} \text{Fm}^{-1}$ 又は $8.85 \times 10^{-10} \text{Nm}^2 \text{C}^{-2}$ S : 電極面積

この隙間に絶縁物質の誘電体が入ると平行板コンデンサーの静電容量 C が ϵ_0 倍に増す。

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d} \quad (4)$$

ϵ_r は真空と比べた時の物質の誘電率比で、真空では1、空気では1.00006と真空との差は殆どない。真空や空気では d 、 S が変わらない限り C は一定と考えて良い。

電極間は静電気引き合いその電極間引力 F は次式で計算される。

$$F = \frac{1}{2} E D S = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{2} V^2 S d^{-2} \quad (5)$$

E : 電界の強さ、 D : 電束密度、 F : 電極間に働くマクスウェル応力(クーロン力)とも呼ばれる。

同軸ケーブルの中心導体とシールド間に使われている半透明柔軟な樹脂はポリエチレンで比誘電率が2.3である。樹脂の中では比誘電率が比較的小さい。同軸は芯線とシールド間は同心円で距離 d は一定で、ある意味コンデンサーである。市販の50Ω特性インピーダンスの同軸ケーブルは1mあたり約95pFである。実際に同軸を一定の長さに切って、目的の容量のコンデンサー部品として使う事もある。樹脂の比誘電率は一部を除き10以下である。ポリエチレンは絶縁体で、絶縁体と言うと電気を絶縁するイメージがあるが、誘電率は空気より大きく、従って良く交流電気信号通すと言える。絶縁体は交流に対して絶縁している訳ではなく、良く誘電している材料である。交流に対しては絶縁したいなら、環境特性を考慮しながら比誘電率の小さな材料が使われる。電線のガイシは酸化シリコンや酸化アルミニウムを主体としたもので比誘電率は6程度で、材料自体の50Hzや60Hzに対する絶縁は十分だが、高周波ではあまり良くないし、ケーブル間距離が近づくと損失が多くなる。伝送距離が長いと低い誘電率の材料でも損失になるので、例えば四国本州間に電力送電用海底ケーブルでは50/60Hz送電でなく、直流送電を行っている。

液体では石油のように比誘電率2と小さいものや、水のように比誘電率80のものもある。水道水な

ど水に不純物(イオン)が含まれるともっと大きな比誘電率を示し、また導電性となる。超音波自動探傷装置では接触媒質に水を使う。信号を回転部分に搭載した探触子に送る場合に水の高い誘電率と導電性を使った回転超音波探傷装置がある。超音波スキャナーと呼ばれる大きな水槽に検査対象材料を沈めて検査実験する装置があるが、水は良い伝導体なので、超音波探触子を水槽の水が電氣的に繋がり、大きなアンテナとしてノイズを受ける事も良く経験する。

昔探触子に使われていた水晶振動子は比誘電率4.6と低いので、インピーダンスの高い真空管回路で効率よく駆動できましたが、半導体時代になると水晶は電氣的インピーダンスが高すぎて使いにくくなった。因みに大昔は探傷器の送信電圧は数kVと大きく、その代り駆動電流は1A以下だった。現在は数百Vで10A程度である。なお、水晶など結晶は方向で比誘電率が多少変わる。

最近の探触子に多く使われるPZTは作り方により比誘電率が1000~6000程度で水晶に比べ格段に大きい。超音波探触子の振動子が水晶振動子からセラミック振動子に移って行った初期にはチタン酸バリウム(略称チタバリ)が使われましたが今は殆ど使われていません。これは比誘電率が1000程度で、現在セラミック・コンデンサーとして良く使われている。

前記引力 F の式(5)で示される様にコンデンサーはどれも電圧を加えれば電荷が溜まり、両方の電極間に静電力が働くので、交流を加えると音が出る。この力は電極に加える電圧の方向に依らず常に引っ張る力の為、交流電圧を加えると図1下の様に加えた電圧周波数の2倍の周波数の音を発生する。「コンデンサー鳴き」と呼ばれる。高級オーディオでは、オーディオ信号の伝搬経路に沢山のコンデンサーが使われていて、彼方此方でこのコンデンサー鳴きの音が出る。その音が別のコンデンサーや部品に伝わって歪を生じる。その為、コンデンサーの品種

選定やその配置方法などが設計の一つのコツになる。高級オーディオは重いのは、スピーカからの音が電子部品に伝わって歪むのを避けるのが主目的だ。

あらゆる絶縁体の誘電率が真空より大きいのは、材料内の原子内陽子と電子或いはイオンの位置関係がずれるからである。図2

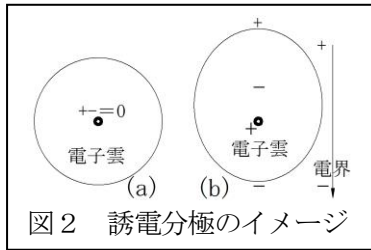


図2 誘電分極のイメージ

の様に原子電界を与えると、(a)のように原子核中心に電子が均等に回っている状態から(b)の様に電界方向に電子の運動中心に変化する。これを(誘電)分極と呼ぶ。電極に挟まれたコンデンサーの場合、図3の様に電圧を加えると物質(原子、単

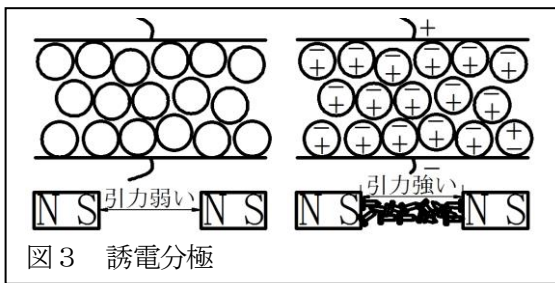


図3 誘電分極

位胞、イオン)に++と電荷の分極が現れる。図3下に示した様に、2つの磁石のSとN極を単に向い合せ、離して置けば引力は僅かである。その間に鉄くぎを連なって沢山置けば、鉄くぎはSNSN...と磁化し、2つの磁石間により強い引力が発生する。磁化も単に分極と呼ぶこともある。コンデンサーの誘電体も同じ様な事である。引力が発生し電極間 d を縮まり、その d の変化分容量 C が比誘電率分変化し、 C が一定ではなくなる。 C が成るべく変化しない材料が良いコンデンサー材料となる。

一般に静電容量 C には電圧依存性がある。市販比誘電率の低い材料を使ったコンデンサーは容量 C の電圧依存性は小さいが、比誘電率の高い材料で作ったものは電圧依存性が高い。携帯

電話に使われるセラミック・コンデンサーは小型化が重要で、その為誘電率の高い材料が使われ、定格電圧を印加すると静電容量がカタログ値の30%以下になるものもある。こう言った誘電率の高いコンデンサーは信号を伝えると信号波形が歪むので、この目的に使う場合は配慮が必要である。

種々の誘電体の中で癖のあるモノが圧電体と焦電体で、圧電体は加えた力に比例した電荷が発生するものである。別の言い方では、コンデンサー鳴きと異なり加えた電気信号周波数と同じ周波数の音が出るものである。これは外部電圧を加えない状態で、電圧を加え一定のバイアスが加わった状態と同じような内部の分極が

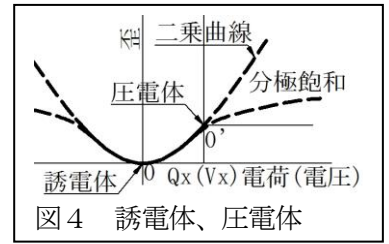


図4 誘電体、圧電体

起きてからである。ネジのドライバーの先に磁石を一度接触させるドライバーが磁化して、鉄ネジを保持できる。同様な現象が誘電体の中で起きている。

図4で単なる誘電体は電極間の電荷と歪の関係は理論上、概略二乗曲線になる。圧電体では原点を0にずらして傾斜部分で使っている。すでに内部に Vx 電圧相当の歪が有る状態と言っても良い。

通常分極操作は飽和近くまで行っているため、それ以降は二次曲線からずれる。

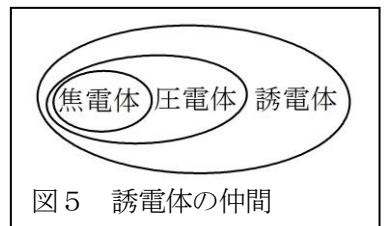


図5 誘電体の仲間

焦電体は温度変化により電極に電荷が発生する現象で圧電体の殆どが大なり小なりこの現象を生じ、その性質が目立つものを焦電体と呼んでいる。焦電体圧電体誘電体の関係を図5に示す。

探触子に使われるチタバリ、PZT結晶は圧電

体であり、焦電体である。チタバリは単結晶が販売されているが、多くは微粉末粉を焼結した多結晶で使われる。単結晶は作るのが大変だからだ。PZT も市販されているのは多結晶体である。多結晶は細かな結晶を固めて焼いたもので、そのままでは圧電性を示さない。細かな結晶の方向がランダムで、伸びるものと縮むものが打ち消し合ってしまう、単なる誘電体である。前述の様に同じチタバリ素材が携帯電話の中で多量にコンデンサーとして使われていて、圧電性の無い、コンデンサー鳴きする単なる誘電体である。このコンデンサーは圧電体とは呼ばない。

チタバリ、PZT を圧電体として使う場合は、分極と言う操作をする。電極間に高い電圧を加えて、無理やり各小結晶の分極の向きを大体同じ方向に並ばせる。この分極方向を無理矢理回転出来る材料を強誘電体と呼ぶ。強誘電体の強は誘電効果が強い意味ではないので、注意必要である。

コンピュータのメモリ FeRAM に強誘電体が使われている。分極方向を電圧で制御できる性質を使ったもので、分極の方向をデジタル値の0と1に対応させている。

分極された強誘電体は内部に歪=応力が発生していて、分極操作前の焼いた状態より壊れやすい状態になっている。分極操作中に割れる振動子もある。また、分極操作により誘電率が変化する。その為、ゆっくり印加電圧を変えた場合、図4の様な単純な二乗曲線にはなりません。図8の様に、それも凸凹しながら、一定の方向

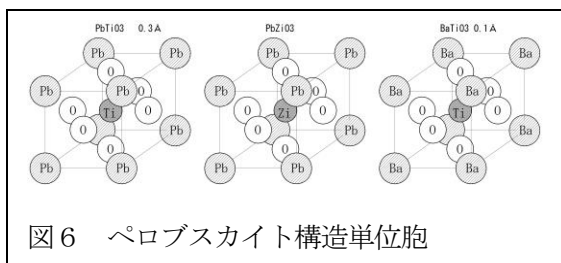


図6 ペロブスカイト構造単位胞

に変化していく。分極操作により誘電率が増える材料、減る材料がある。この変化量を分極操

作が十分かどうかの確認にも使える。

PZT の化学記号は $Pb(Zr,Ti)O_3$ で、 $PbZrO_3$ と $PbTiO_3$ が約半々存在する。何れも XYO_3 の化学式で表示される図6のペレブスカイト構造と呼ばれ、強い分極を示す。ペレブスカイト構造は最近では太陽電池としても脚光を浴びている。チタバリの化学記号は $BaTiO_3$ で図6右の同じペレブスカイト構造である。Ti原子が結合する時の腕が長く(或いはTiの大きさが大きいと考えても良い)、中心から面中央に0.1Åずれた位置にある。酸素もその影響でTiと反対方向に少しずれる。PZTの $PbTiO_3$ ではTiのずれは0.3Åである。単位胞が6面体なので、どの面にずれるかは運不運ですが、隣の結晶胞と同じになるのが一番安定する。磁石を{SN}{SN}{SN}と並べると安定するのと同じです。一方この並びの隣の列では同じ順序より、逆に{NS}{NS}

{NS} 並ぶ方がより安定するが、これも運不運で決まる。単位胞は隣の分極するとその強い電界で自分も同じ方向に分極しようとするので図7(a)拡大の

様にある塊で方向を揃う。多くのPZT圧電体は1μm程度の微粉結晶

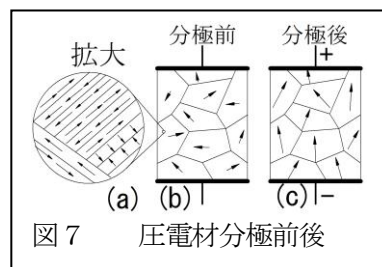


図7 圧電材分極前後

を仮焼成して目的のサイズの粒子にして、更に、これを固めて1200°C程度で焼く。高温では自発分極が無い結晶構造であるが、温度が下がると構造が変わって自発分極する。この微粉内部で自発分極は図7(a)(b)様に各粒子が異なる方向となり、全体では分極が無い状態である。それに分極操作時に電圧を加え強い電界を与えると電界が各微粉、更に内部の単位胞に伝わり、図7(c)の様に各粒子が電界方向に分極が進む。具体的にはPZTでは1mm厚さ当たり数kVの電圧を加えて分極する。圧電体の種類、グレードで分極電圧は異なる。また、常温で分極出来

る材料と高温にしないと分極しにくい材料がある。条件次第で分極に要する時間は数秒のものもあれば、数時間かかる材料もある。

分極後、印加電圧を0に戻しても、大まか同じ内部分極状態のままである。この状態で圧電素子として機能する。歪は式(5)より遥かに大きくなる。高誘電率、すなわち電荷を貯める能力が高い理由は大きな歪が電荷を貯める為である。

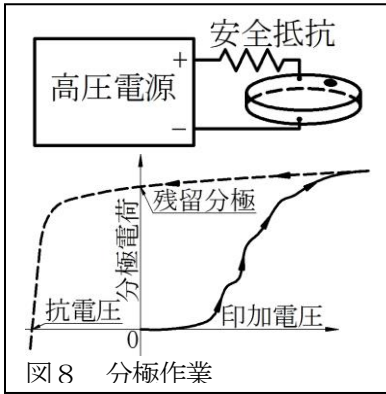


図8 分極作業

分極作業の例を図8に示す。通常正電圧を加えたい側に印をつけてから分極作業に入る。高い電圧が必要な場合は放電しにくいシリコン系液体に着けるなどする。通常は一定の高圧電圧から安全抵抗を通して印加する。図8のヒステリシス曲線と呼ばれるグラフは圧電振動子にゆっくりした三角波電圧を加えた場合の例である。凸凹しながらだんだん分極が進み、最後に飽和する。その後、電圧を0に下げても注入した電荷は残ったままとなる。ヒステリシス曲線を得るには、数 Hz から数十 Hz の高電圧三角波波形を振動子に印加して測定するが、実際のじっくり分極する場合と異なる結果になる。また、実際には電極間漏れ電流があるので、その分多量の電流を流す必要もある。

一定の電圧を逆に加えると、分極を無くすことが出来、抗電圧と呼んでいる。高温でないと分極しにくい材料(ニオブ酸系など)は、常温で逆電圧を印加しても常温ではなかなか脱分極しないで、負の強い音圧を発生する場合などに使える。分極が無くなる事を脱分極と呼ぶ。一方アレイ振動子などに使われている PZT は常温でしかも比較的低い電圧で脱分極が起きるの

で逆電圧の印加には注意が必要である。

◆圧電振動子の電気記号

圧電振動子は図9の様な記号を使う。コンデンサーの記号の内側に太い線や四角を記す。この意味は振動体で、コンデンサーの仲間だが、その中に振動するものがあるとでもいう意味の様である。

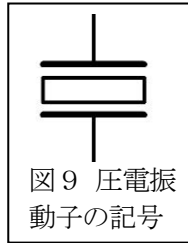


図9 圧電振動子の記号

◆振動子の電極電荷と力

印加する電圧と振動子の厚さ、圧力の関係を考える。図10の(b)は分極したチタン酸バリウム圧電素子の単位胞(結晶の最小単位)である。+印は負の電荷が多い事を示し、+印は負の電荷が不足の状態である。電極方向に分極されていて、分極の度合いを矢印の長さで示している。

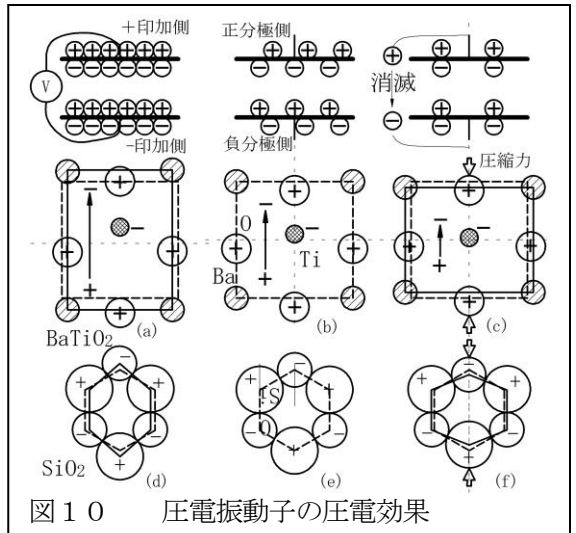


図10 圧電振動子の圧電効果

この状態に分極と同じ方向に(a)の様に電圧を加える。理想的な方向を向いた単位胞では、正に電圧加えるとそれに比例して内部の分極が増える。電極には内部分極と同等量の逆の電荷が溜まっていて定常状態では電極内外の電荷総量は差し引き0である。一つの系内では核融合等の現象が無い限り電子の数の増減は有りません。

単位胞内中央の負電荷の原子と正電荷の原子

が互いにより離れる方向に電界が加わる。図上下方向に伸びる事になる。分極がより大きく成った状態である。分極と同じ方向に電圧を加えると伸び、逆方向に電圧を加えると縮む。

拘束して電極間寸法距離 d が変わらない様にした状態で、分極方向に電圧を加えると、伸びを押さえられるので、内部圧力が大気圧相当から増える事になる。逆方向に電圧を加えると内部圧力が減る事になる。

ミクロに説明すると、電圧加えた瞬間、各粒子は静止状態で、そこに電界が加わり(a)の様になり単位胞内での移動が起きる。移動による変位が、さらにその静電気力の変化が繋がっている周りの原子に移動の力を与える。

電圧を加えて振動子が伸びたり縮んだりするときは、最初に電圧を加えた瞬間は、単に内部圧力(応力)が発生して、その後内部圧力で各原子が移動し、振動子全体の寸法が変わる。

次に状態(b)に電極方向に圧力を加えた場合である。(c)の様になり圧力相当分単位胞の厚さが減り、分極は弱くなる。電極にあった正負の電荷は内部分極相当に減る。元々の(b)状態から電荷が少なくなる状態に変化する。負分極側から正分極側に電子が移動する。電流が流れない場合は、負電圧加えて分極した電極には負の電荷=電子が余分になる。その為、テスターなどで電圧を測ると下の電極面を基準として、上の電極面は正の電圧が観測される。なお、アナログ型テスターは電圧を測っているのでは無く、分流抵抗に流れる電流をコイルの電磁力で針を振って測っている。電流が流れるので直ぐに電極にある電荷は無くなる。入力インピーダンスの高いデジタル・テスターやオシロスコープで測定しないと発生電圧は上手く観測できない。

図10(d)(e)(f)にキューリー夫人の夫ピエールと兄ジャックが圧電現象を発見した強誘電体では無い圧電体の水晶 SiO_2 の結晶単位胞の圧電関係を合わせて示す。

図を眺めると圧電体は電荷を機械的歪でも貯

める物質と言え、これは重要な事である。電池は化学反応で電荷を貯めるコンデンサーの一種です。圧電体でない単なる誘電体も歪で電荷を蓄える部分があるのでコンデンサー鳴きをするが、この機械的歪は溜まった電荷への寄与は極僅かです大半は誘電分極で電荷を貯めると言える。電荷には3種類の貯め方がある。

◆局部音圧と電極に現れる電荷、電荷

前項までに微粉結晶に歪=力がある場合に電荷が発生する事を説明した。が、電極間には沢山の微粉結晶があるので、その一つに発生した

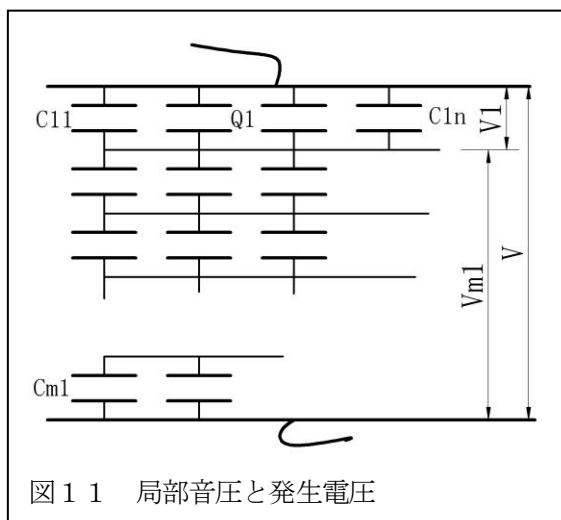


図11 局部音圧と発生電圧

電荷は電極にどのように伝わるのか説明する。電極間は沢山の小さな圧電コンデンサーがつながったものとして表現できる。本来微粉結晶の配置はランダムだが、圧電素子に垂直に音波が伝わる場合、観測する波の波長は微粉結晶サイズに比べ十分大きいとすると、図11の様な電極に平行なコンデンサーの縦横の並びと考えるとよいだろう。この中の1個の小コンデンサー部分に音圧があり、他はゼロの状態を考える。例えば $C11$ から $C1n$ の n 個の内、1個に Q の電荷が発生すると、その電荷が $C11$ から $C1n$ に分配され $V1$ の電圧が発生する。どの微粉に Q が発生しても同様なので、 $C11$ から $C1n$ に発生した音圧の合計に比例した電圧が $V1$ に発生する。 $C11$ から $C1n$ 以外は音圧がゼロなら、 Vm

I は電圧ゼロなので、電極間に VI がそのまま現れることになる。即ち、いろいろな部分に音圧がある場合、音圧の体積積分相当の電圧が V に現れる。

$$V = k \int P dv \quad (6)$$

V : 圧電振動子の電極間電圧 P : 局部圧力
 dv : 局部体積 k : 比例係数

なお、この誘電現象で、一部に音が入ると、発生した電荷が、誘電現象で全体に広がり、各粒界に電界を与え、この電界が音を発生する。圧電素子の端に音を入れると、全体から弱い音はその瞬間発生する。一種の音のトンネル的効果である。

◆圧電振動子の探触子内の接続

非破壊用探触子は、図12の様に内部の圧電振動子の正分極側を接線の GND に、負分極側

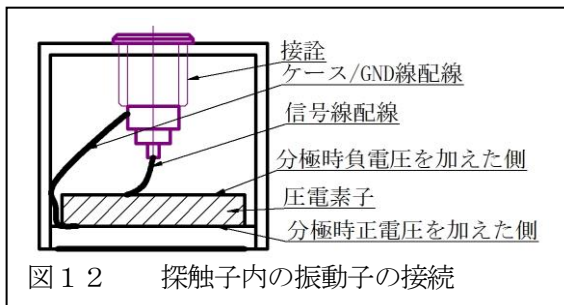


図12 探触子内の振動子の接続

を接線芯線に繋いでいる。従って脱分極しない様に負電圧を発生するパルサーを使い、その結果探触子前面から正の音圧が出る。正の音圧を受けると負の電圧が探触子端子に発生する。波形表示画面のある機器の多くでは、負音圧を受信すると波形は画面上に振る様に設計してある。

また、探触子に入射した音圧波形を表示しているので無く、各種フ

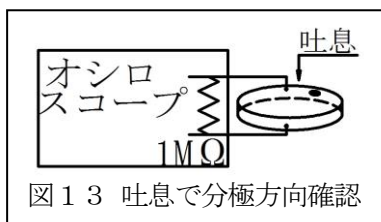


図13 吐息で分極方向確認

ィルターが加わった結果を表示するので、注意が

必要である。画面表示や FR 出力は単に信号でメーカーにより何を表示しているかは異なる。非破壊以外の探触子では必ずしも上記同様の電極の方向とは限らず、確認する必要がある。簡単な確認方法としては、探触子やセンサーをオシロスコープの入力に繋ぎ、入力を $1M\Omega$ に設定して、探触子やセンサーの振動子側面に強い息を吹き替えると観測する電圧の方向で振動子

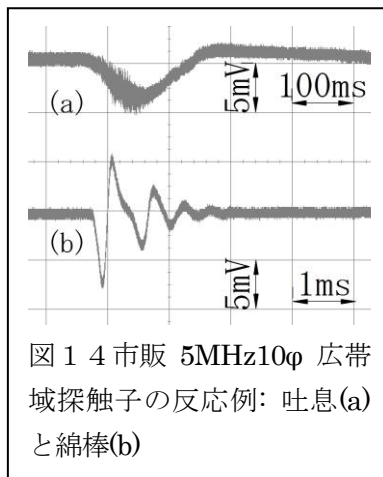


図14 市販 5MHz10φ 広帯域探触子の反応例: 吐息(a)と綿棒(b)

の配線極性が確認できる(図13)。なお、吐息は正の圧力で 0.05 気圧 ($50\text{cmH}_2\text{O}$) 程度である。強く吹くと 0.1 気圧になる事もある。単に方向を知りたいなら綿棒で軽く叩いてもよい。探触子づくりのプロも電極の方向が分からなくなった時に使う一番簡単な方法で、同時に大まかな圧電感度の良し悪しも確認できる。海外ではシャープ鉛筆の芯を探触子表面で折る方法も取られている。折る時のエネルギーが大体一定しているのと、径相当の MHz 帯の高い周波数成分が発生するので通常の探傷器で観測できる。

なお一部の探触子では、振動子に並列にインダクタンスなど電子部品が組み込まれている事がある。この場合は低い周波数成分の電荷は電子部品に吸収され上記の様な大きな振幅の波形が観測できない。この場合は鉛筆の先端で保護膜や振動子面を軽く叩くと正音圧が発生し、波形が観測できる。

◆あとがき

探触子の振動子として使われる圧電体に関して述べた。次号以降の内容の基礎になる。少し

難しい話もありますが、十分理解し頂きたい。
次回は振動子からの音の発生をお話します。

(16) コンデンサーには単純誘電体、内部歪、化学反応の3つの電荷の蓄積方法がある。

◆今回知った事

- (1) コンデンサーに貯まる電荷はコンデンサーの静電容量に比例
- (2) 並行板コンデンサーの静電容量は面積に比例し、距離に反比例する
- (3) 比誘電率が大きいほど並行板コンデンサーの容量は増える
- (4) 圧電振動子=圧電体は誘電体の仲間。
- (5) 誘電体はコンデンサー鳴きする
- (6) コンデンサー鳴きの周波数は印加電圧周波数の2倍
- (7) 圧電振動子は与えた電圧の周波数で振動する
- (8) 水晶振動子は誘電率が低く、電気的インピーダンスが高いため、真空管時代は容易に十分励振できたが、半導体時代になると、励振が難しく使われなくなった
- (9) 圧電振動子は、分極方向に電圧を加えると伸び、逆に電圧を加えると縮む
- (10) 圧電振動子は、寸法が変わらない様に厚さを抑えた状態で、分極方向に電圧を加えると圧力が上がり、逆に電圧を加えると圧力が下がる
- (11) 非破壊用の探触子は正分極側をケースに繋ぎ、負分極側を端子芯に繋いでいる。
- (12) 非破壊用の探触子は負パルス電圧入力で正の音圧を発生し、正の音圧を受信すると、負の電圧が発生する。
- (13) 非破壊探触子に正電圧加えると逆分極の危険性がある。
- (14) 圧電振動子電極間には内部の音圧の体積積分相当の電荷が発生する
- (15) 圧電振動子や探触子の分極極性は吐息や綿棒でわかる