

音波のよもやま話 (その23)

振動子のトンネル的効果

(補)アイ・エス・エル 宇田川義夫

◆はじめに

前回音波受信時にダンピング抵抗に流れる電流により振動子内に音が発生すると述べた。この現象が良く観測される例〔振動子のトンネル効果的現象〕を述べる。この現象で重要なことは、振動子は圧電素子であると同時に電歪(=電気圧力変換)であり、また圧力を初期値とする音波が各方向に伝搬することである。

余談ではあるが、江崎博士がノーベル賞を取った頃は、電子が本来通過してはいけない障壁の壁を通過すると考えられていたが、現在では電子自体は通過せず、障壁の両側の電子が互いに光子をやり取りして、一見電子が通過するかの様に観測されると考えられている。電子間の静電気力は光子のやり取りにより生まれると考えられている。鏡の反射では、光子そのものが反射するのでなく、一度鏡の電子に入射光子が吸収され、電子が別の光子を発生して、一見反射しているかの様に観測されると考えられている。光の反射は電子による二次輻射なのである。何事も観測される人による感覚と実際とはずれがある。

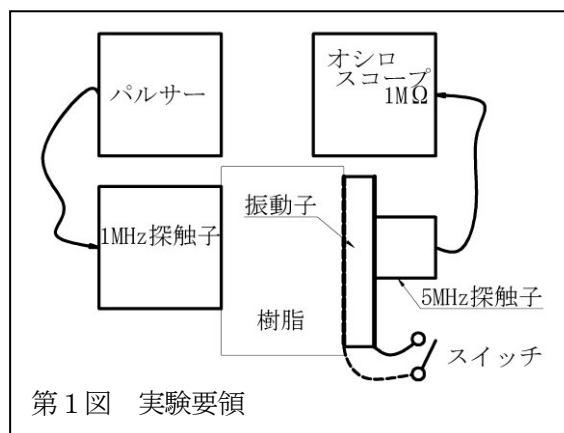
◆実験要領

平板状圧電振動子の片側に送信探触子、反対側に受信探触子を置いて、第1図のような構成で実験をする。全て市販品を使った。スパイクパルサー、1MHzと5MHz直接接触用広帯域探触子、それに樹脂としてポリスチレンである。振動子は電氣的共振周波数0.5MHzの感度の高い(Kt=0.5)PZT系の振動子である。接触媒質は音響インピーダンスが高いHIGHZを用いた。

樹脂は無くても観測できることがあるが、多くはパルサーの電流が強い為、リターン電流が探触子ケーブルに流れノイズとしてオシロスコープに入るのを避ける為である。極薄い銀紙を使ってシールドする事で、リターン電流の漏れを避ける大きな効果が認められるが、少し力が加わると破れるので、作業性が悪い。

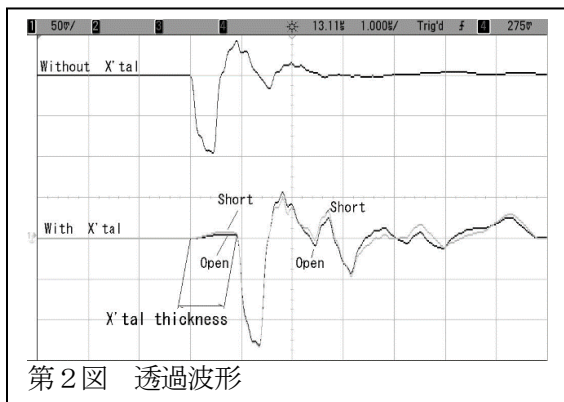
◆透過波

振動子を樹脂と5MHz探触子間に配置しないで、樹脂に5MHz探触子を接触させると、第2図の上の波形となる。市販1MHz以下の広帯域探触子と市販パルサーの組み合わせでは似たような波形が得られる。理想バックキング材の広帯域探触子で保護膜がないと負の矩形波形が得られるが、図ではバックキング材の音響インピーダ



ンスが低めに設計されていて、後ろからの音も少し観測される。低周波探触子バックキング材は減衰優先で設計されるので、一般的にこうなる。

振動子のトンネル効果



第2図 透過波形

また、矩形でなく、段々が観測される。これは保護膜の厚さの2倍相当の時間間隔である。またパルサーの駆動力が十分でなく、立ち上がり立下りが少し緩やかである。

次に0.5MHzの振動子を挟んで透過波を観測すると、第2図下の波形が得られる。濃い線と薄い線の違いは0.5MHzの振動子の電極間を第1図のスイッチで短絡したか開放したかである。

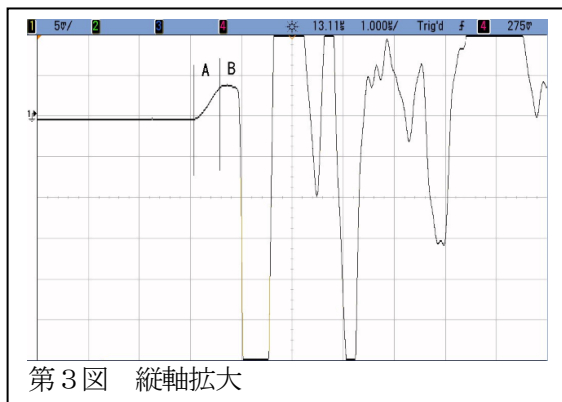
本来0.5MHzの振動子の透過波は厚さ相当の時間の約1 μ 秒遅れて音が伝搬するはずであるが、0.5MHzの振動子が無かった時と同じ位置から小さな音が観測される。受信探触子を銀紙で包むなどしても電氣的にシールドしてもこの現象は変わらない。この現象を「(圧電素子の)音のトンネル効果」と呼んでいる。

また、0.5MHzの振動子の電極間を短絡又は開放すると波形の振幅が変わる。主な先端波の変化は目立たないが、後ろの方に成るほど、画面の外ではもっと変形する。

◆拡大波形

0.5MHzの振動子の電極間開放時の縦軸を拡大した波形を第3図に示す。図を見ると、2つの領域に分かれる。単調増加で振幅が大きくなる領域Aと一定の領域Bである。

なお、0.5MHzの振動子の厚さ相当の時間の約1 μ 秒であるが、図では短い。振動子メーカーのデータシートの音速や音響インピーダンスなどパラメータは水晶振動回路を作る前提でのデータである。音を出す目的で考えられたパラメータではない。振動子を励振すると、励振後の電極間が解放だと、振動子から反共振周波数相



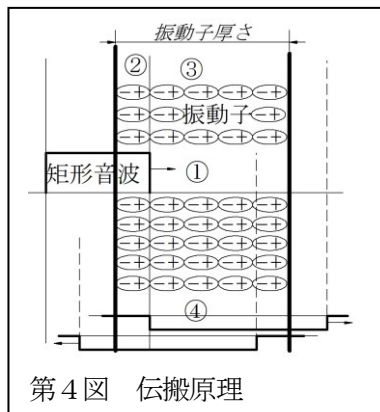
第3図 縦軸拡大

当の音が発生する。励振した直後に振動子間を短絡すると、共振周波数相当の共振音が発生する。反共振周波数は共振周波数に比べ5~50%程度高い周波数で振動子材質による。一般に受信エコーの中心周波数は色々な理由で下がる、特に周波数をスペクトラムのピークや-6dB中間値で規定する場合下がるので、共振周波数で手配した方が、完成した探触子の中心周波数はより目的周波数に近づけることができる。量産の探触子では、公称5MHzの探触子には、反共振周波数即ち出る音が10MHz相当の振動子を使っているメーカーもある。基礎研究の場合には注意が必要である。本来物理的には周期の逆数を周波数とすべきである。が、周波数分布などを同時に計測でき計測の自動化も容易なスペクトラム分析で探触子の周波数を規定するケースが多い。

◆振動子に少し音が入ってくると

第4図に0.5MHzの振動子に1MHzの探触子からの音が少し入った状態を示す。わかりやすくする為矩形音としている。左右は時間で正規化してある。①の様に矩形平面波が振動子に入ると、入った部分の分極が変わる②。振動子は元々内部分極した状態の誘電体で、その分極の増分を示した。この一部分の分極により、誘電体内に分極が光の速さで伝わる③。誘電体内では特に振動子は、光の速さは真空中よりかなり遅いが、音波の速さと比べるとほぼゼロ秒と考えて良い。誘電体は電気を誘う物体という意味で、どこかに分極が発生すると全体に広がる。この誘電分極により内部歪が全体に発生し、そ

振動子のトンネル効果

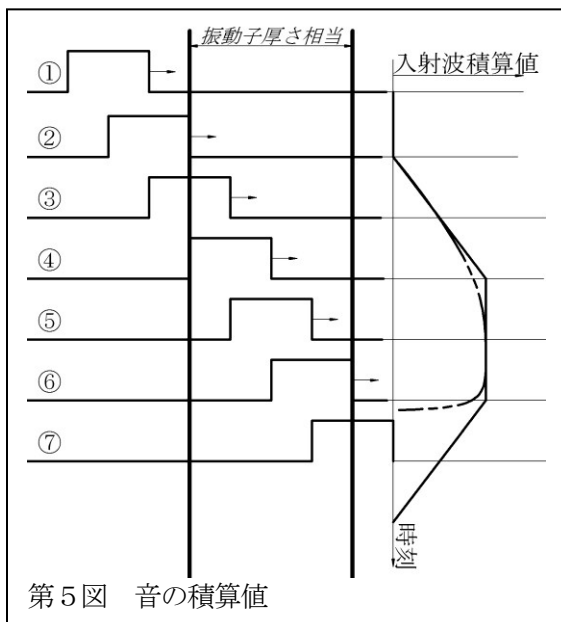


れが音として前後両方向に伝搬する④。一番下だけに図示したが、振動子面全体で起きている。実際の3次元では横方向にも音が移動する。音は振動子の前後両方

に半分に分かれて伝搬する。通常の探触子でも同様、何か音が入ってくると、振動子両面から別の形の音が出ているのである。受信専用探触子であっても、音の送信もしていると言う事である。

また内部で発生した音④の移動は、入力波①同様に新たな分極とさらなる音の発生をもたらす。音⇒分極⇒歪⇒音⇒分極⇒歪⇒と相互作用しながら伝わっていく。

ここで注意しないとイケない事は、入って来た音は内部全体の分極（歪）と④音の発生のためにエネルギーを使っている事である。その為④は音圧としては極小さいが、電極間電圧としては比較的大きく表れる。



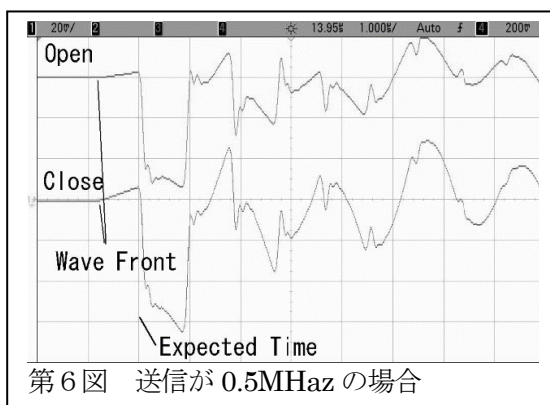
◆音の入射と音の裏面への透過出力波形

第5図に振動子に音が入って来た時の内部音圧の積算値の図を示す。音が入る前が①で左右を位置、縦を音圧振幅とした。入射波パルスの時間幅の半分毎に図にしている。入る寸前が②、半分入った状態が③である。音圧の積算値を図の右に示す。縦軸は時刻となる。音が入り切った状態が④で、②～④まで徐々に音が入る。振動子の中を音が移動中は一定音圧積算値となる④～⑥。以降は出ていくので内部積算値は減っていく。第1図の配置では、受信センサーに音が入っていくので、受信音圧波急に負側に高く成る。第4図の様に伝搬する入射音が振動子全体に音を発生し、その分のエネルギーが入射音からは減るので、受信センサーで得られる波形は二点鎖線の様になる。以上が第3図のAB部分の発生原理である。

なお、入射音発生用の探触子を1MHz、振動子の周波数を0.5MHzにしたのは、起きる現象を把握しやすくする為で、同じ周波数にすると、見失う情報が多いからである。実験研究する時、実験計測系の各部の周波数特性を異ならせる事は、現象を正しく把握するのに良い方法である。

◆同じ周波数での試験

第6図に送信探触子を0.5MHz広帯域にした場合の例を示す。図の上は振動子の電極間を開放（Open）にした場合、下が短絡した場合である。短絡（Close）すると、トンネル効果の現象がかなり大きく、その後の波形も大きく崩れている事が判る。音のトンネル効果で内部歪が発



振動子のトンネル効果

生じた為である。この振動子を受信振動子とした場合第6図は振動子内部でダンピングを掛けると、大きく波形が崩れる事を示す例である。電極が開放の場合は、入力インピーダンス無限大のアンプで受信した状態で、これが正確な音圧波形を観測するアンプとしては最良となる。前述の様に音⇒部分歪⇒分極⇒分極伝搬⇒歪⇒音⇒部分歪⇒分極⇒歪⇒を繰り返すが、ダンピングを掛けると、電極端子に発生した電荷が流れる為に、このほか音⇒分極⇒短絡電流⇒分極⇒歪⇒音⇒と繰り返す分が増える。

このような現象は探触子の間に挟んだ振動子で起きているばかりでなく、送信探触子や受信探触子の振動子の中でも起きている。探触子が繋がっている探傷器等は短絡開放の中間的な状態である。また、縦振動が伝わってきても、この現象により振動子縦横あらゆる方向に振動が起きている事も留意する必要がある。

最近では感度の良い振動子を探触子に使う傾向にあり、結果前記のような歪は増えていることになる。入射音波の波形により忠実な波形を観測したい場合、感度の悪い振動子を使った方がよい。又送信時も同様の現象が起きていると考えられるので、FGなどで任意電圧を与えて、特定の音を出したい場合も同様である。

1-3 コンポジット振動子素材はPZT系でこの現象が大きい。1-3 コンポジットの素材にニオブ酸系を使うと、感度は下がるが、SNは上がる。単一振動子それも粒界が小さな振動子の方がSNはより高い。SN重視する場合は、感度余裕がある限り、細かな粒界の振動子を使うのが鉄則である。表面エコーなど妨害エコー高さが大きく、その後ろにある小さな欠陥を見つける様な探傷、例えば航空機材料、車のブレーキピストン材などの微細欠陥検出には1-3 コンポジットや粒界の粗い振動子は使えない。

圧電素子を用いた測定、例えば加速度や振動計測にチャージ・アンプを使っている。AEでも一部使われている。これは振動子の全て電荷を外部電子回路に取り出す回路構成で、振動子電極端子間を短絡したのと同じ状態である。電流が流れる事により振動子内に音を発生し歪を発生させている。チャージ・アンプは必ずしも良

い方法ではない。振動計測や一部のAEでは結局歪んだ音波を観測している。連続波での周波数特性などのデータが付いていて広帯域だからと安心したら、とんでもない間違いを犯す可能性がある。連続波での計測では観測されないからである。センターのデータシートに載せられた周波特性が良いからと言って、歪の無い波形を受信しているとは限らない。インパルス（又はインデンシャル）応答を測定しないと、良し悪しは判らない。

探触子に探触子ケーブルを付けるが、例えば2m長さの50Ω同軸ケーブルは約95pF/mの2倍約200pFの容量である。高周波探触子の容量は同程度の事が多く、探触子ケーブルを付けるとそれだけで、高周波成分はスイッチで短絡したのと似た状態となって内部歪が多く発生する。音圧波形を測定する為、圧電素子を用いた探触子（ハイドロホン）で測定する場合、探触子からケーブルを伸ばすとその分、歪が多くなる。ケーブルを使わず直接HIGHZ（高入力インピーダンス）アンプに繋ぐのが最良の方法である。

◆コンデンサー型とダイナミック型のマイク

音声域の音の受信には主にコンデンサー型と電磁誘導を使ったダイナミック型のマイクロホンが主に使われる。ダイナミック型はコイルと磁石の相互移動で発電して音に比例した電圧波形を得るもので感度が良い。が、振動子同様電気と機械振動=音が可逆で且つ効率が良い為、自分自身で歪むと同時に、歌手などの手からの振動を受ける。バネでマイクを吊った形などで対処している。ただし、この歪が心地よく聞こえるので愛用する歌手も多い。一方コンデンサー型もコンデンサー型スピーカが世にある様に、音電気変換は可逆であるが、感度が頗る悪い。その為、自分自身で発生する歪が少ないし、外部振動を拾うことも少ない。感度が悪いのを補うためコンデンサーマイク専用のFETやICが販売されている。歌手が使っているヘッドセットマイクロフォンはコンデンサー型が大半だ。コンデンサー型マイクロホンはMHz領域用にも作られ、歪を少なくする為、コンデンサーの直後に半導体を配置し、発生した電荷をほとん

振動子のトンネル効果

ど移動させない方法がとられている。感度が悪いが、歪は少ない。歪を嫌う計測には圧電振動子より良い場合が多い。また、MHz用のコンデンサ型送信センサーも売られているが、高周波耐電圧が低く、大きな音を発生するとプラズマが発生し寿命を縮める。

◆誘電体内の分極伝播

誘電体内で分極が伝播する速度は非常に速いと言ったが、実際には以下の様に誘電率が大きいと、音速と比べ早いといい難くなる。速度Cは以下となる。

$$C = \frac{C_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad \text{式(1)}$$

C_0 は真空中の光の速度、 ϵ_r は比誘電率。例えばPZT系の振動子では比誘電率が5000を超えるものがある。光が1mを伝播するのに真空中では約3nsであるが、PZTの中では1mを伝播するのに230nsかかる。これを無視して実際の近いシミュレーションができるが疑問である。高速と低速の現象が共存するシステムを「ステイフ(硬い)システム」と言って、シミュレーションするのが大変な領域である。音という遅い現象を上記の誘電中の光の速度でも十分な空間分解能で計算しないと不味いかもかもしれない。

日頃我々に関係する物理現象は、全て電子による現象である。化学反応も実質電子の反応である。力が伝播するのは歪波=応力波=音波が伝播する為で、電子間の歪みは電子による。振動子が電荷を与えると音を出すのも電荷=電子が結晶内で分極=電荷の変位をするためである。電子と通して色々な現象が同時に発生する。その為特定の現象の解析が複雑になる。それ故、理論的検討をするより、作って実験した方がより効率的な事が多い。

◆あとがき

誘電体(絶縁体)が、分極状態(電界が加わったり、誘導電流が流れている状態)にあるなら、どんな誘電体、例えば水でもこの現象が発生している可能性がある。ただし振動子に使う強誘電体を違って、音圧に対する分極と分極に対する歪が極小さいので検出するのは難しいかもしれない。骨は圧電性があり、骨の中の音の伝播

に絡んで圧電 FDTD シミュレーションの研究をしている様であるが、筆者には詳細は定かでない。圧電振動子材料を超音波的に測定する場合、得に波形の先端を観測する場合にはトンネル効果的現象がある事に留意すべきだ。

また、音を探触子で受信する場合、受信探触子に入った音が⇒分極⇒歪⇒音と音を発生していることも注意する必要がある。

強磁性体は同様に音波の発生にも使われるが、これも音が⇒磁区に分極⇒分極の伝搬⇒歪⇒音と同様の事が起きている事が確認される。

◆今回知った事

- (1) 本来周期の逆数が周波数だが、最近ではスペクトラムアナライザが簡単に手に入るので、周波数分析結果から周波数を規定する事が多い。
- (2) 圧電振動子単体に音を通過させると、片面に音が入った瞬間裏面から弱い音が発生し、トンネル効果の様な現象となる。
- (3) 振動子内では、音⇒分極⇒歪⇒音と相互作用しながら伝搬する。
- (4) 振動子の電極間を短絡すると、電極間に発生した電荷が流れるので、音⇒分極⇒短絡電流⇒歪⇒音⇒の現象分、歪が増える。
- (5) 実験する場合、実験計測系の各部の周波数特性を異ならせる事は、現象を正しく把握するのに良い方法である。
- (6) 入射音波の波形により忠実な波形を観測したい場合、感度の悪い振動子を使った方がよい。
- (7) 表面エコー直後の小さな欠陥を見つける場合、感度余裕があるなら、1-3コンポジットなどより感度の悪い粒界の小さな単一振動子による探触子の方がSNは高い。
- (8) 送信時も同様の現象が起きていると考えられるので、FGなどで任意電圧を与えて、特定の音を出したい場合も感度の悪い振動子と使った方場良い。
- (9) 圧電素子に加わる音圧測定にチャージ・アンプが使われる事があるが、チャージ・アンプの入力に流れ込む電流により圧

振動子のトンネル効果

電振動子内に音が発生し歪ませるので必ずしも良い方法ではない。

- (1 0) 既存のチャージ・アンプを用いた加速度計や AE は歪んだデータを検出しているので注意が必要である。
- (1 1) 入力インピーダンス無限大か十分高いアンプで受信する方がまだ。
- (1 2) 探触子ケーブルは、圧電振動子からの電荷を流すので、探触子ケーブルは最短にしないと、歪が増える。
- (1 3) 受信探触子で音が入射すると、別の音を発生している送信探触子になっていることに注意が必要である。
- (1 4) 音波のシミュレーションをする際、圧電素子での送・受信では、光速まで考慮する必要があるかもしれない。
- (1 5) 音圧を正しく測りたい場合、感度の良い振動子を使うより、悪い振動子の方が歪の少ないことが多い。
- (1 6) 連続波による周波数特性が良くても、歪が大きい可能性があるので、インパルス又はインデシアル応答を調べるべきだ。

<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)

・
・