

# 音波のよもやま話 (その14)

## 探触子から強い音を出す③

High power sound form transducers(3)

(有)アイ・エス・エル 宇田川義夫

### ◆はじめに

前回の続きで「送信音響出力を如何に大きくするか」の話である。

### ◆集束

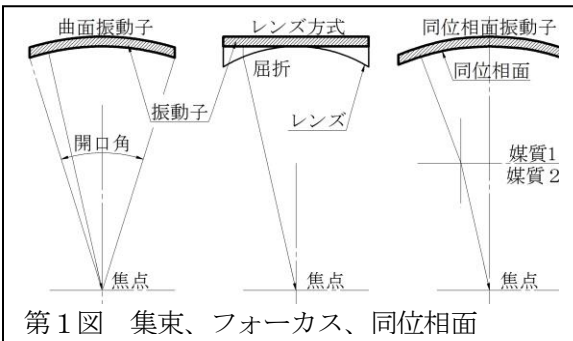
音の集束に第1図の様な音響レンズや振動子自体湾曲させたり、前節の並列駆動振動子を曲面状に並べたものが使われる。何れも音が集束するので大きな音圧が得られる。

音が屈折する様な状況、例えば水から鋼に伝

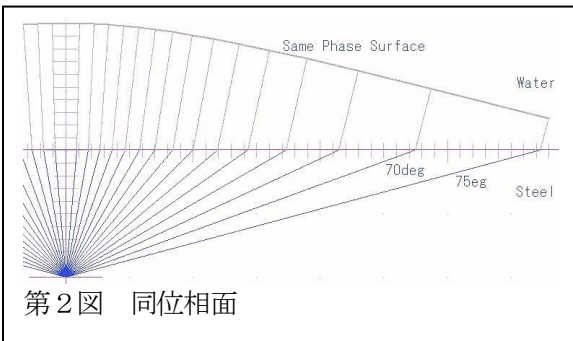
面の曲面振動子を製作すると強く集束できる。集束計算にはウェブにあるフリーの Focus ソフトを使うと容易に計算できる。5 度おきに水か鋼に縦波伝搬した場合の同位相面を計算した例を第2図に示す。垂直付近の同位相面は非球面であるが、角度が大きくと事実上平面となる。水-鋼間屈折の場合、斜角の 70 度など屈折角度が大きいと曲面によるフォーカス効果は少なくなり、曲面振動子と平面振動子との差は僅かとなる。また、垂直でも入射角度が大きい部分ではモード変換により、フォーカス効果が減る。

これらの集束は簡単に例えば高い周波数 10MHz で、径 100φ の振動子を Φ1 にフォーカスさせれば「重ね合わせの原理」から、面積比 10000 倍相当の音圧も可能な様に思えるが、実際に試すとそうならない。集束部と周囲の音圧差が大きく、音の進行に直角方向の音圧傾斜がフォーカスするほど高くなり BED (Beam Edge Diffusion ビーム端の拡散) が強く発生し、どんどん外に広がっていき、その結果フォーカス点は思うように強くない。強い焦点を作ろうとするほど、広がろうとすると言う事である。海の波で波長 10m、高さ 1m の波はあるが、波長 1m で高さ 10m の波は無い。極端な動的エネルギー集中を自然物理は許してくれない。

送・受信一探法の場合、第1図で開口角が大きいほど、レンズなどと同様強くフォーカス出来る。例えば 10MHz 10φ で焦点距離 10mm と F 値 (径と焦点距離の比) を 1 にすると、水中で 0.1φ 程度のフォーカス幅となり、毛細血管などを画像化できる。が、これは受信時の合成開口の効果が多くを占め、送信音場はそれほど強く結ばれていない様である。計測用のセンサーを水中に入れると場が荒らされ、正確な測定ができず、傾向観察的話ではある。また、水中放



第1図 集束、フォーカス、同位相面



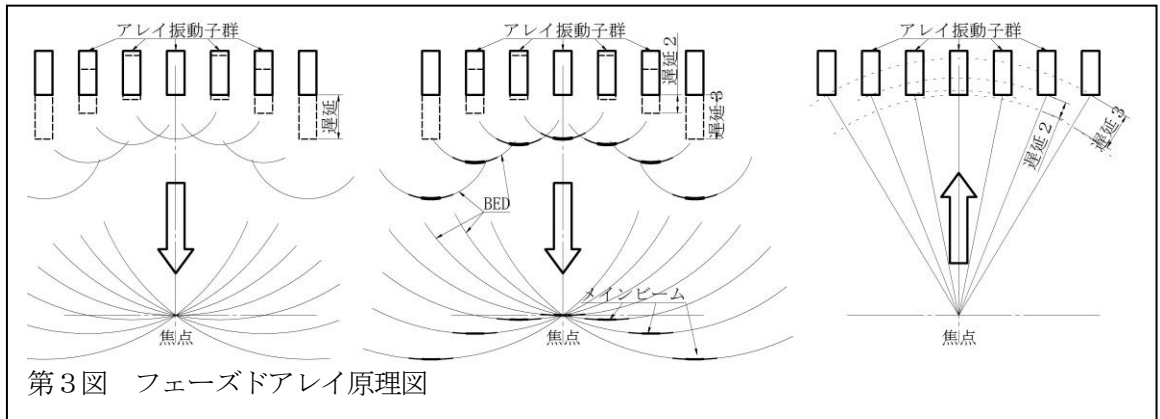
第2図 同位相面

搬する場合は、単純な球面振動子などでは屈折後振動子の周囲からのビームは手前、振動子中央からのビームは奥で集束し、焦点がぼやける。一点で集束したい場合、集束目標点から逆に振動子へのスネルの法則を使って、等位相面 (焦点からの音伝搬時間が同じ面) を計算し、非球

射の場合経験的には開口角が 50 度を超えると焦点での音圧強度は飽和し始める。

集束と言う意味では超音波フェーズドアレイ

気機械結合係数が低く単独では弱い音しか出せなかった。中和する事により、送・受信感度で 30dB 程度の感度アップができ、当時販売され始



の第3図左の様な原理説明図が宣伝等にある。これは物理的な意味は無いが、皆が知っている「ホイヘンスの原理」を使った素人相手の説明図である。超音波は機械振動なので「ニュートンの慣性の法則」などに縛られる。よって振動子の前後振動で発生したメインビームは真っ直ぐ進み、その部分が最大強度となる。メインビームから発生した BED が球面波的に広がり、それらが焦点で重なる。BED はメインビームに比べ弱く、その結果弱い集束しか得られない。

なお、振動子素子が極小さく、ピッチも狭く、位相制御も  $\lambda/20$  とか小さくすると、1枚の曲率をもった振動子が働いたのと同じとなる。が残念ながら、そう言ったものを製造できない。

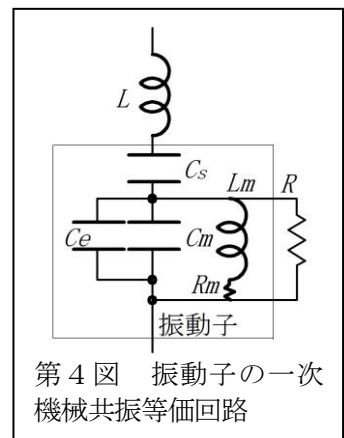
フェーズドアレイ装置は第3図右の様に、小さな反射源からの球面波を受信後、電氣的に遅延させ加算、即ち「合成開口」の効果で強い集束効果を得ている。送信音波の集束効果は強く無いと思った方が良い。二次元アレイ素子の間隙、ピッチを小さくしても5倍の音圧を超える経験はない。受信された電気信号は情報で、情報は頭の中で考えたようになるが、物理現象は必ずしも頭の中と同じにはならない。なお、円形ビームでは内側 BED が中心に集まり、強い音圧となることがある。詳しくは次回以降説明する。

#### ◆電氣的中和：昔から使われて来た良い方法

スパイク・パルサーによって励振する際、探触子にインダクタンスを付加すると高い音圧が発生する事が知られており、1970年頃までは水晶振動子に適用されていた。水晶の誘電率、電

めた感度の高いセラミック系チタバリと同等の感度を得ていた。ただ、中和調整する手間がかかるので、水晶振動子はセラミック系に置き換わっていった。

電荷の蓄え方には色々ある。電池は化学的に、多くは電気二重層構造で電荷をたくわえる。フィルム・コンデンサーは誘電現象で電荷を蓄える。セラミックコンデンサーは歪で電荷を蓄える。内部の粒界の分極方向がランダムで、伸びる粒界と縮む粒界があつてコンデンサー全体の伸び縮みは少ない。振動子はこれを、分極操作して粒界の分極方向を揃えたものである。歪の発生、即ち音の出るコンデンサーと思えば良い。歪と電荷は 1:1 で対応している。構造上、平行な部分があると、機械的共振をするので、円板形状で厚さ方向分極された



振動子は単純コンデンサーで無くなり、機械的共振特性を持つ。基本波のみに着目すると、音響発生目的の振動子の等価回路は有名なメイソンの基本波の等価回路より第4図の枠内に示す等価回路の方が理解しやすい。元々のコンデンサーとしての容量に機械的共振の為の  $Lm$  と損失  $Rm$  を加えたものである。

径方向にも振動する成分も含む分布定数系の振動子の等価回路は各種考えられる。その中で目的に合った等価回路を使えば良い。厚さ方向のみ振動子とするとして、第4図を使う。振動子をスパイク・パルサーで励振すると（振動子に電荷を供給した後、直ぐに回路を切断すると）、反共振周波数に近い周波数の機械振動＝音が発生する。圧電振動子は電気エネルギーを機械的歪で蓄えるコンデンサーで  $C_m$  がその役割を果たす。図では  $L_m$  が加わり、これと  $C_m$  で構成されるタンク回路となり、エネルギーが振動しながら電氣的に蓄えられる。電氣的タンク回路で機械的振動  $F_0$  を等価的に表している。電氣的に測定される反共振  $fa$ （インピーダンスの絶対値が大きく成る）との関係は以下である。

$$F_0 = fa = \frac{1}{2\pi\sqrt{LmCm}} \quad \text{式 (1)}$$

振動子単体をハンマーなどで叩いた場合発生する機械的共振である。 $R_m$  は機械的損失で図では  $L_m$  に直列に挿入されているが、 $LmCm$  タンク・ループに直列で、 $C_m$  に直列に書いても良い。一般に平板状振動子では数%以下であるので以下では無視するが、形状で変化が激しい。 $R_m$  は熱変換の損失である。電極は銀か金で多少電流が流れると熱損失があるが、極僅かなので無視する。 $C_e$  は振動子の機械的変位に関与しない静電容量成分であるが、最近の振動子では  $C_m$  に比べ十分小さいので無視する（構造化振動子例えば 1-3 コンポジットでは無視できない事がある）。 $C_s$  は  $LmCm$  タンク回路に直列容量で、これが十分大きければ  $C_s$  の等価インピーダンスが低くなり、励振電圧がタンク回路と良く繋がり効率良く電気エネルギーを機械エネルギーに変換してくれる。単独で効率（電気機械結合係数）の良い振動子は概して  $C_s$  が  $C_m$  に比べ大きい。 $R$  は音響負荷で、接している媒質に出る音の消費を示す。媒質の音響インピーダンスや振動子形状次第で位相反転や歪を発生するが、等価回路としては表現できないので、単純抵抗とした。振動子のみの状態の  $R$  は無限である。音響インピーダンスが振動子と同じ無限大媒質で全ての音が媒質に伝搬するなら、 $Cm=Lm=R$  となる。基本波のみを考えているので、外部への損失  $R$  は内部損失  $R_m$  に直列に描いても良い。

低い周波数では  $L_m$  の等価抵抗は小さく、例えばテスターに付属の 1 kHz 程度の周波数の容量計では  $C_s$  のみが計測される。タンク回路の

反共振周波数では  $C_m$  と  $L_m$  は同じ等価インピーダンス値になる。より高い周波数では  $L_m$  の等価抵抗が大きく電流は流れにくく、 $C_s$  と  $C_m$  の直列に相当する容量  $Ch$  が計測される。

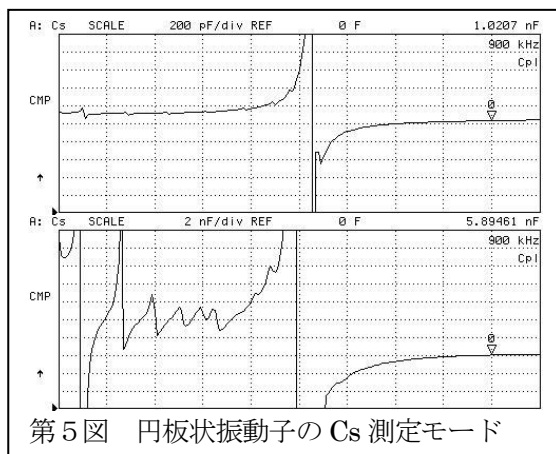
$$Ch \sim Cs + Cm \quad Cm \sim Ch - Cs \quad \text{式 (2)}$$

基本波より高い周波数で高調波共振が現れるので広い周波数帯域の観測では注意が必要である。

$Ch$  の測定は共振周波数  $F_0$  の 1.5 倍程度の周波数で、測定する事が多い。

インピーダンス・アナライザで直列容量 ( $C_s$ ) 測定モードとすると、 $C_s$  と  $Ch$  が容易に測定できる。基本波以外の共振、横振動など色々な共振が現れるので、それらを除いた平均的な値を読んで  $Ch, C_s$  を求め、 $C_m$  を計算で算出する。第5図は  $C_s$  測定の例で図上に径（横）振動等が少ない振動子、図下に厚さ振動と径（横）振動が多く且つ  $C_s$  の大きな振動子を示す。横軸中央付近の共振より低い周波数と高い周波数での容量の比が大きいほど、即ち  $C_s$  が  $C_m$  に対し相対的に大きいほど、中和しなくても大きな音を出せ、中和しても効果が薄い。 $C_s$  が  $C_m$  に対し相対的に小さいほど中和の効果が大きい。

外部にインダクタンス  $L$  を配置し、 $L$  と  $C_s$



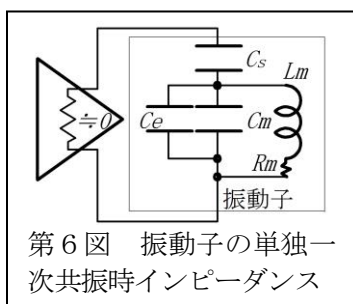
第5図 円板状振動子の  $C_s$  測定モード

の直列共振周波数が、 $L_m$  と  $C_m$  の並列反共振周波数と同じになる様にする、 $L$  と  $C_s$  の電氣的インピーダンスは、振動子の反共振数で零となり、効率よく機械的共振部分の  $LmCm$  を励振することが出来るが、 $CmCs$  の計測には誤差がつきもので、また、パルサーの駆動回路インピーダンスにより振動子の発振周波数は変化する、一般的に手巻き線トランスを用いて巻き数を変えて調整している。 $L$  を含む電氣的インピーダンスが低すぎてパルサーと整合しな

い場合がある。連載第 12 回のトランスでのインピーダンス・マッチングの考えと、インダクタンスによる感度アップを同時にする為、トランスを用いる。トランスは一次と二次と分離したタイプは巻数調整が大変なので、多くはオート・トランス型（単巻トランス）を使っている。上記  $L$  により  $C_s$  を消す方法を電気屋は中和と呼んでいる。

入力エネルギーに対する総音響エネルギーの変換効率は、この中和処理により多くの振動子素材は 100% に近づく。但し共振が条件なため、広帯域探触子では使えないが、中帯域までは効果がある。

なお、一般に連続波で電氣的共振点でのインピーダンスを測り、カタログ等に掲載される事



第 6 図 振動子の単独一次共振時インピーダンス

がある。これは第 6 図の様にインピーダンスの低い電子装置で駆動した場合の  $C_s C_e C_m$  の並列と  $L_m$  の直列共振状態でインピーダンスがゼロとなり、損失

部分  $R_m$  相当が計測される。基本波付近のパルス駆動ではこの値より高い実効インピーダンスになる。ドライブ回路の負荷として振動子のインピーダンスを知りたい場合、共振点でのインピーダンスは大まかな目安にしかない。また、より高周波では実質容量のみとなり極低い等価抵抗になるので注意が必要である。

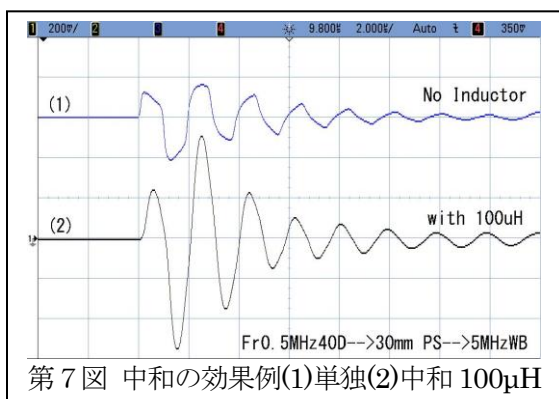
一般に中和細工は感度の低い振動子ほど効果がある。最近の振動子は単独で感度が 100% に近づいた為、中和に大きな期待はできない。それでも広帯域探触子用振動子、ポリマー振動子

などは感度が比較的低いので効果がある。第 7 図は  $K_t$  が 20% 前後の中広帯域用振動子の振動子のスパイク励振の例で、単独では図の(1)である。計算では  $80 \mu\text{H}$  が最適であるが手持ちの  $100 \mu\text{H}$  インダクタンスを使うと、同図の(2)の様に 3 倍程度の送信音圧になった。当然高周波成分は減る。水晶では  $K_t$  が更に低く、 $Q$  値が高いので、インダクタンス値に敏感である。が、ぴったり合うと送信出力は楽に 10 倍を超える事が多かった。送・受信感度では 100 倍に近づく事もあった。なお機械的共振周波数基本波以外で強制的に連続波励振する場合は、使用周波数での外部  $L$  と  $C_s$  を中和すれば最大効率となる。

#### ◆オーバーシュート

広帯域探触子には中和は無駄と書いたが外部のインダクタンス  $L$  は必ずしも無駄ではない。振動子は実質容量なので、パルサーが電圧を瞬時変化させると、大電流が流れる。その電流が徐々に小さくなりながら、容量に充電する。RC 積分カーブに似た電圧波形になる。インダクタンス  $L$  を振動子に直列に入れると、パルサーが電圧変化した瞬間の大電流を  $L$  に貯める事ができる。適当な  $L$  を付けると、振動子端子ではパルサー単独の振動子端子電圧より高い電圧が発生する。一般には本来の印加電圧波形からオーバーシュートしていると言う。インダクタンス  $L$  に溜まった電流のエネルギーが振動子に伝わったのである。パルサーの内部配線インダクタンスや探触子ケーブルが実質この  $L$  と同じ働きをしている場合もある。どの程度のインダクタンスでオーバーシュートが大きく成るかは条件しだいで、一概に言えない。多くの場合  $1 \mu\text{H}$  以下である。一般的にパルサー駆動部の半導体自体の持つインダクタンスや配線で  $0.1 \mu\text{H}$  以上あり、配線も含めると  $1 \mu\text{H}$  に近づき、パルサーだけで適切値を超えている事もある。

スパイク型パルサーや長めのケーブルを繋いだデューティ制御している FET パルサーで良く観測され、本来のパルサー単独の送信電圧より高い電圧、精々 1.5 倍だが振動子に印加されている。送信される音圧は当然その分高い。デューティ制御している FET の場合、FET 駆動時間（ドライブ・デューティ）幅を変えると特定の時間幅で電圧が強くなりオーバーシュートし、送信音が強くなる。以前に腐食肉厚計用パルサーの話をしたが、それと同様で、インダクタンス



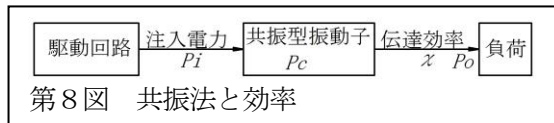
第 7 図 中和の効果例(1)単独(2)中和  $100 \mu\text{H}$

に電流を流しておいて、急に切断しようとする  
と、電流変化を抑えようとインダクタンス内の  
電荷が外部に出る現象である。

オーバーシュートはある意味電氣的共振で次  
項も絡んだ現象でもある。

### ◆共振による方法

共振により振幅を大きくする事は良く行われ  
る。電子部品の自動はんだ付けの時に、方向が  
ランダムだと困るのでパーツフィーダーで電子  
部品を整列させる。パーツフィーダーを共振さ  
せ、振幅を大きくして、小さく軽い部品に十分  
力を与えている。

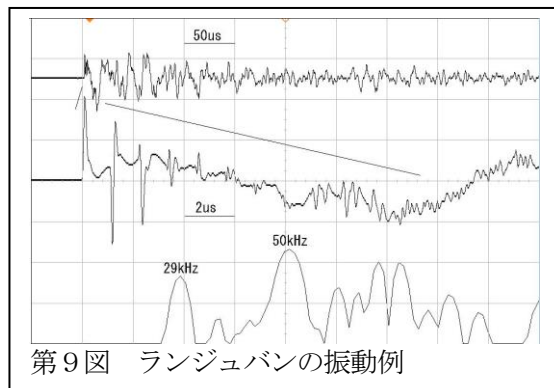


第8図 共振法と効率

前回述べたボルト締め付けランジュバン振動  
子 (BLT) も共振を利用している。圧電振動子  
の変位は精々  $1\mu\text{m}$  程度が最大だが、BLT 全体  
の共振で、振幅を大きくしている。

何れも振幅は大きくなるが、第8図の様に注  
入エネルギーが増えているわけでない。負荷へ  
の伝達エネルギーは入力エネルギーを超える事  
はない。

因みに2枚の振動子とアルミの付加体ででき  
たBLTをスパイク・パルス駆動すると、第9図  
の様に初めは振動子厚さ相当の短いパルス音波  
が発生し、全体を何度か往復している内に、段々  
全体の共振周波数成分の低い周波数が主体とな  
る。



第9図 ランジュバンの振動例

図の中央は励振直後を拡大したものである。  
二枚の振動子の厚さ相当でパルス音が発生して  
いるのが判る。低周波のウネリは圧電素子の径  
振動である。一番上の長いレンジの波形を周波  
数分析した結果が図の一番下で  $50\text{kHz}$  の径振

動が一番卓越していて、カタログ値の共振  
 $28\text{kHz}$  に対応する反共振周波数  $29\text{kHz}$  が現れて  
いる。この場合後で述べる  $Q$  値は共振周波数を  
 $F_r$ 、反共振周波数を  $F_a$  として

$$Q = \frac{F_a + F_r}{2 \times (F_a - F_r)}$$

$$= \frac{29+28}{2 \times (29-28)} = 28.5 \quad \text{式(2)}$$

となる。

鐘や音叉なども叩いた瞬間は、高い周波数成  
分を含む音が発生し、時間経過と共に全体の共  
振周波数が顕著となり、快い鐘の音色に変わる。  
図は強制励振用の共振周波数  $28\text{kHz}$  のBLTで、  
多くの場合共振ループに組み込んで使う。パル  
ス駆動では反共振周波数  $29\text{kHz}$  が現れる。強制  
励振回路と言ってもドライブ回路が  $0\Omega$  ではな  
いので、実際の発振周波数は共振主波数  $28\text{kHz}$   
と反共振周波数  $29\text{kHz}$  の間のどこかになる。負  
荷を付け、負荷から音が戻ってくる構造で使う  
場合は共振と反共振周波数の範囲外の周波数に  
なる事も多い。

なお、スパイク駆動の振動子からは厚さ相当  
の矩形音波が発生するが、第9図では尖ったパ  
ルスが発生している。これは振動子からのリード  
線に振動子と同じ面積の  $0.1\text{mm}$  の銅合金を使  
っており、音響インピーダンスの差があるので、  
このような波形になる。使う周波数が低いので  
銅合金内部の音響損失が少なければ問題ない。

共振タイプの振動子を使う場合の負荷への電  
力  $P_o$  は入力電力を  $P_i$ 、振動子から負荷への伝  
達効率を  $\chi$  とすると以下となる。振動子内の損  
失は無いとする。

$$P_o = P_i \times \chi \quad P_o > P_i \quad \text{式(3)}$$

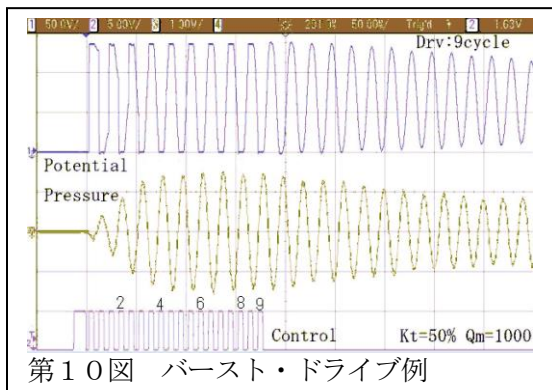
伝達効率  $\chi$  が良いと入力されたエネルギー  $P_i$   
はそのまま負荷に伝わる。

伝達効率  $\chi$  が悪いとき、振動子への入力電力  
の一部電力が負荷に伝わり、残りは共振回路に  
残る。振動子から出ていく電力より入ってくる  
電力が大きい間は、振動子内に貯まっているエ  
ネルギー  $P_c$  が段々大きくなる。この振幅が大き

サイクル	振動子内電力	負荷への電力
1	100%	1%
2	100+99%	1.99%
3	100+198.09%	2.98%
...		
N	100+9900%=100	100%

表1 共振を使った連続駆動例

く成った状態で負荷にエネルギーを伝える事に



より、悪い伝達効率を補って、実質的効率を上げようとするのが共振法である。

例として、表1の様に $\chi$ を1%とすると、連続波の $P_i$ の電力の最初の1サイクルの内99%は振動子内に残る。

次の1サイクルでは振動子内は199%のエネルギーが溜まって、その1%即ち2%弱が負荷に伝わる。サイクル毎に負荷に供給される電力は増えて行って最後は駆動回路出力電力 $P_i$ がそのまま負荷に伝わる事になる。振動子への入力エネルギーと振動子からの出力エネルギーが同じとなってこれ以上は振動子内のエネルギーは増えない。

振動子の耐圧や脱分極電圧に近い電圧で駆動する場合は、振動子内部エネルギーが増えると直ぐに破損する。脱分極電圧ギリギリで駆動すると、電気機械変換効率の良い振動子では2サイクル以下で脱分極することもある。共振法は電気機械変換効率の悪い振動子、振動子から負荷への伝達効率が悪い、振動子の印加電圧に余裕がある場合など使える方法である。その為主に耐圧が高い低周波で使われる。積層や音響整合技術の発達で段々使われなくなってきている。

上記議論は毎サイクル電力を振動子に供給できる様な場合で、通常は定電圧駆動に近いので、振動子からの逆起電力(歪電)で、注入可能な電力 $P_i$ が段々減ってくるので、負荷への電力も計算の様には上がらない。

駆動回路には耐電圧の限界がある。例えば1200V耐圧のFETを使う振動子駆動回路はFETに1200V以上の電圧が加わると壊れるので、1200V以下の保護回路が入っている。この保護回路以上に振動子端子電圧を上げられない。

その為もあって、電気機械結合係数の高い振動子は2、3サイクルのバースト励振で内部音圧はほぼ飽和してしまう。

第10図は $K_t$ が50%の機械的 $Q_m$ が1000の振動子を9サイクルのバースト励振した場合である。図上は励振電圧波形(振動子の端子波形)、図中は振動子から出てくる音圧波形である。バースト励振の4波程度で飽和の90%に達しており、それ以降なかなか音圧は上がらない。励振電圧は9回の励振後は振動子の歪電効果でほぼ電源相当の電圧が発生している事が判る。カタログの $Q_m$ が1000であるが、細いワイヤ保持機構や振動を観測するセンサーにエネルギーが吸収され実質 $Q$ 値は30以下に下がっている。

相対的に駆動力の弱い(低電圧駆動でない)バースト・パルサーでは、毎回僅かな電力しか振動子に供給できないので、振動子の実効 $Q$ 値が高ければバースト励振はそれなりの効果がある。

回路がより複雑なバースト・パルサーより、単純なスパイク・パルサーの方が最初の立下りの供給電圧電流(電力)は容易に高くでき、結局スパイク・パルサーの方がバースト・パルサーより送信音圧が高い場合が多い。5MHz振動子を対象とした5kV程度で駆動力のある、例えば100Aのスパイク・パルサーは設計製作が容易であるが、振動子が破損するので市販されてない。多目的の高速高電圧スイッチとして部品で販売されており、入手は可能である。

セラミック振動子単体での $Q$ 値は10~3000程度である。負荷との音響結合を上手く設計すると、負荷が接続された場合 $Q$ 値が100以上の事は滅多にない。通常10近くになる。その為例えばランジュバン振動子でも振動子自体の $Q$ は100もあれば御の字で、通常はもっと低い。また、低い方が負荷の無い時の、共振による、内部エネルギーが高まる事による破損を防げる。負荷が付いた状態から負荷が無くなって、 $Q$ が非常に高い状況が生まれる場合、その瞬間のドライブ周波数もピッタリ合うと振動子内部の一部に膨大なエネルギーが集中し破損に至る事がある。強い音波をバーストや連続で発生する場合、それを防ぐ設計が重要である。

#### ◆トランスによる方法

インピーダンス・マッチング用の広帯域トランスを探触子に内蔵する方法である。前々回述べたのでここでは記さない

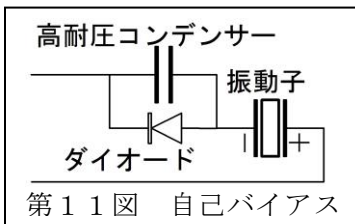
<参考文献>

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)

#### ◆自己バイアス

前々駆動側で振動子に直流バイアスを加える様になると脱分極が抑えられる話をしたが、探触子内部に組み込むこともある。駆動にアンプを使い、正負の両極の電圧でしか励振出来ない場合によく使う手である。ダイオードとコンデンサーで第11図の様に、振動子の分極方向と

同じ方向にバイアス電圧を作る。図には書いていないが、高抵抗で溜まった電荷を放電する様になっている。



#### ◆あとがき

如何に強力な音波を出すかに関して3回に渡って述べた。電氣的な話が多かった。次回からは音自体の話に戻る。

#### ◆今回知った事

- (1) フォーカスで強い集中音を作ろうとするとBEDで広がり、思ったほど集中しない
- (2) 等価回路は目的に合ったものを使う
- (3) 電氣的中和で大半の振動子は100%に近い送信効率になる
- (4)  $C_s$  が  $C_m$  に対し相対的に小さいほど中和の効果が大きい
- (5) 水晶振動子でも中和によりセラミック振動子並みの音圧強度を発生していた
- (6) 単独で感度の良い振動子は  $C_s$  が  $C_m$  に対し相対的に大きい
- (7) インダクタンスで広帯域振動子でも少し感度があげられる
- (8) 共振を上手く使うと、電気エネルギーを効率よく音響出力に変えられる
- (9) 実効Q値が大きい、即ち伝達効率が悪い場合にバースト励振で音を大きくできる
- (10) 駆動力の高いパルサーではあまりバーストの効果が無いが、駆動力の低いパルサーでは効果がある