

圧電素子の大研究 #1

大山鳴動ねずみ一匹
ならぬ電子カウベル
大小そろえれば
パーカッションセットに？
簡単だから作ってみて。
大正琴への道は遠いかもなあ

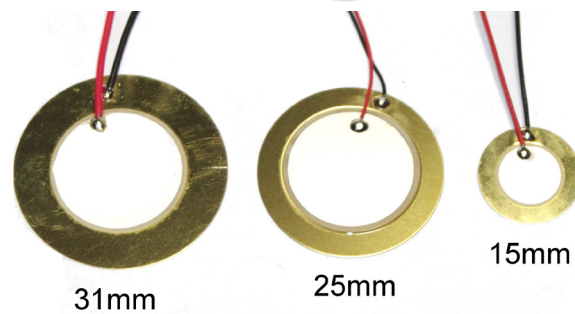


■ わかってないかも ■

圧電素子はこれまでに沢山扱ってきた。クリスタルイヤフォン、クリスタルマイク、クリスタルピックアップといった音響製品、無線関係では水晶振動子、クリスタルフィルタ。だからそれらパーツの使い方や、どんな回路で動かすのかは一応心得ているつもりでいた。でもそれはパーツとしての使い方であって、むき出しの圧電素子となると確たる知識はない。秋月では右の3種類が手に入る。大小の違いは？ どう使い分けるのだ？ 大正琴エレキ化にあたって、どんな使い方が賢いのだろう？ ここはひとつ、いろいろやってみるしかないでしょう。

写真の3個は本来は発音素子。信号電圧を加えると音を発する。スペックにはかなり高い共振周波数が書いてあって、fo がそんなに高く大丈夫かな、これで200Hzとか録れるのかな、と不安になる。結論から言えば、まあ大丈夫みたい。低い周波数が苦手なのは確かだけれど、一般的なスピーカだってfoが100Hzでも10kHz以上まで再生するでしょ。

そう思えるのは、ずーっと昔イヤフォンを改造してピックアップにしたことがあるから。左がクリスタルイヤフォン。透明の部分はネジ込み式になっていて本体から簡単に外



せる。中をのぞくと一面ほぼ平らで、中央に小さなヘソのようなものがある。多分ここに虫ピンのような針を立てればピックアップになるのだろうと、もちろんやってみた。セメダインで針を固定してレコードの溝にあてると、ちゃんと再生できる！ 感激した瞬間、あっけなく針が取れて実験終了。接着剤のセメダインが弱すぎたのか、私の腕が悪かったのか（後者だね）。でもこれで、造りさえしっかりしていれば音の出口は音の入り口にもなる、と再確認した。

今回扱う圧電素子は原理的にはイヤフォンの中身と同じ。ただ、まっ平らな形状にどう対応していいかわからない。真ん中にピンでも立てればいいのか？

なお、上記のクリスタルイヤフォンをはじめ、この当時の音響製品の「クリスタル」には水晶など使われていない。今と同じセラミック素材だ。もしかすると最初期には水晶だったのかもしれない。圧電効果を持つ焼き物（セラミック）が出現して置き換わったのだろう。最後まで置き換わらなかったのは水晶振動子だけかも。今

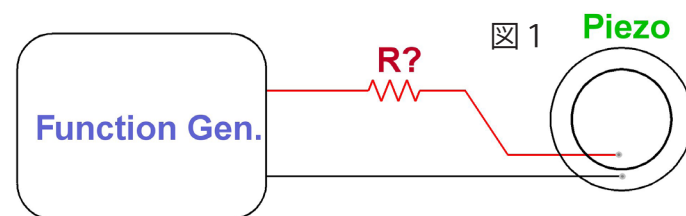
でもちゃんと水晶を使っている。といってもバラして売ればお金になるほどは入っていない。雲母のような薄片で、これにヨーチンを塗ると周波数が下がるとか、怪しげな伝説もある。

どうせついでだから昔の圧電製品について書いておこう。どれも概してB級パーツでマトモなHiFiオーディオには使われなかった。周波数特性がナチュラルにローカットだったからで、今の35cmウーファの帯域では收音も再生もまず不可能。それでも当時のトランジスタラジオはローなど出なかったから割れ鍋に綴じ蓋、ベストマッチだったのかもしれない。

クリスタルカートリッジは携帯用レコードプレーヤ、低価格のステレオセットには必ず付いていた。クリスタルマイクは汎用品や消耗品として、オモチャからバスガイドさんのマイクまで、世の中のマイクの8割以上を占めていたと思う。ポータブルラジオにクリスタルイヤフォンは定番で、現在のヘッドフォンは通信用途か放送局にしかなかった。

とはいえ音の悪さ以上にどれも使い方はメチャ簡単というメリットもあった。イヤフォンを鳴らすのにパワーアンプは要らない。そこそこのレベルの信号を直接つなげば実用上十分な音量で鳴る。クリスタルマイク、ピックアップから出てくる信号はかなり大きく、プリアンプは要らない（どちらも1MΩで受ける）。

ローが出ない周波数特性は、通信分野では好都合だ。へたにローがあると音声がブーミーになり了解度が落ちてしまう。だからアマチュア無線のマイクには、高級コンデンサマイクよりクリスタルマイクが向いている。今でも使われていて、有名な高級品は冗談のように高い。アマチュアならマイクくらい自作したら？



Wave Form : Sine and Tri
Freq. 100Hz--15kHz
Signal Level : 1Vr.m.s.

fo : 3.7kHz±0.4
Zfo : 300ohm
Input Level :
30Vp-p(max)

■ 基礎実験 1 ■

秋月で売ってるピエゾ素子の取説には、收音についてのデータは載っていない。左下の図1、右側が取説（直径31ミリ）の抜粋。Zfoというのは共振周波数でのインピーダンス。スピーカのfoみたいなものだ。考えてもしょうがないから、まず鳴らそう。以前作った8038のファンクションジェネレータから1kHzサイン波を出して加えてみる。最初は少々怖かったので、間にR?という抵抗を入れた。10kから始めて1k、100Ωと小さくして行く。何も起きないし音も出ない。ん？もしかしてこの素子は単に振動するだけで空気までは動かせない？スピーカのボイスコイルもそうだから。試しに手近にあった弁当箱大のプラケースに接触させてみた。おーおー、鳴ってる鳴ってる。

接触面積が大きければ良いというものではなかった。ベタベタ押し付けるよりケースのフチに点で接触させたとき音量が増える。一筋縄では行きそうもない。

結局R?は不要とわかった。ただこれは加えた信号レベルが1Vrmsの場合で、大振幅になったらわからない（私のジェネレータは1Vまでしか出せない）。波形を換えて三角波にしても音は微妙にしか変わらない。歪は少なそうなのに、これは謎。更に矩形波にすると、なんとまったく鳴らなくなった。そういうものなのかなあ。

振動しているのは中央の白い部分。ここに押しつぶすような力を加えると音量は小さくなる。当たり前の現象にしても確認しておいた。

さて、foが約4kHzで、どこまでの範囲で発音するのか？サイン波で100Hzから15kHzまでスイープしてみた。下限は200Hz、上限は12kHz。ほぼ音量レベルに変化はない。なお上限については老人の耳なので、若い諸君は信じない方がいい。

素子のサイズで音量やf特は変わるのかわかるべく、他の2種もテストした。意外なことに、耳で聞く限りまったく同じ。どうして？

■ 基礎実験 2 ■

たとえばダイナミックマイクと普通のスピーカ(ダイナミック型)の基本構造は同じ。スピーカはマイクとしても使えるのはご存知だろう。「音⇄振動」変換は逆もまた真なのだ。ただ、変換効率やらなんやらで常に逆が実用になるとは限らない。マイクに信号電流を加えても、鳴る前にボイスコイルが燃えて切れるだろう。ギターピックアップに信号を加えたら弦は振動するだろうか？ やっぱりコイルが先に焼き切れる。これらの実験は決して薦めない。

ここで本筋から外れる話。大昔に常用されていたカーボンマイク。そう、ヒトラーやスターリンの演説で見えるやつ。構造は簡単で、直流をかけた二枚の電極間に墨の粉を詰めただけのものだ。音の振動で墨の粉が揺れて電極間の抵抗が変わって流れる電流が変わる。変化分を取り出せば音の信号になる。ノイズが多めなだけで出力はかなり大きく、結構良い音がしたし、安かったから私も使っていた。

秋葉原では1個50円くらいで買えた。もっと安く調達するには公衆電話から失敬する手もあったが、私が所属していた物理部では禁止行為で、みつければ即退部。ただ、電話の送話器を開けてみたことはある。実に簡単で、送話器のフタは回すと外れ、中に秋葉原で売っているのと同じマイクがあった。メンテナンスを簡単にするためか、配線はなくてスプリングで抑えられているだけ。これじゃ「盗んでください」みたいなものだ。充分誘惑には駆られる。

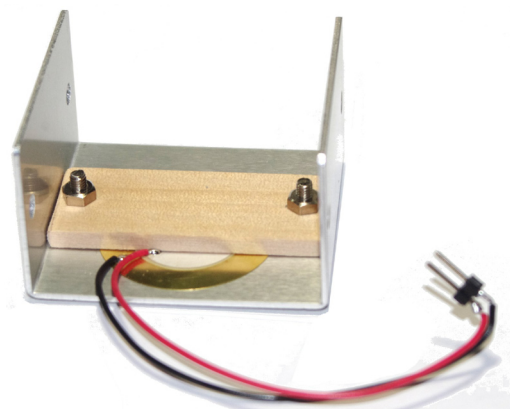
カーボンマイクの原理を使ったカーボンスピーカは見たことがない。でもスピーカまがいはあった。いわゆるカーボンアンプだ。マイクと同じような形の小型スピーカと思えば大体合っている。カーボンマイクの出力をこれにつなぐと、そう小さくない音量で鳴る。これをピッタリ接近させた別のカーボンマイクで拾うと、最初のマイク出力の何倍かの振幅になる。つまり増幅される。アンプでなくて何であろう。

話を戻して、それじゃ圧電素子からはどんな音が出るのだろう。まず一番簡単に、リード線をオシロのプロブ(Zin=1M)につないでみた。素子の丸い面に向かって大声を出しても反応なし。空気振動くらいでは発電しないようだ。ドライバの柄で軽く叩くと、今度は波形が出た。叩く強さを変えると、もちろん出力レベルも変わる。しかしどこかヘンだ。いや、全然ヘンじゃないのだけれど、マイク出力を見慣れている目には違和感がある。どうも波形が素っ気なさ過ぎる。素子を叩いた音は耳でも聞こえる。この実験は作業台の上でやっていた。周囲には測定器やラックなど、音を反射する雑物がいっぱい。私の耳には、レベルが極端に低いとはいえ、反射音も聞こえていたはず。オシロの波形にはそれが一切無い。まるで無反響室でマイク集音したみたいだ(以前やったことがある)。

考えてみれば当たり前。 piezo は自分が揺れた分しか発電しないのだから。周囲の空気がどう揺れても関係ない。まあ空気の揺れが大きくて piezo 自体をも揺らせば話は別だろうが。

これは piezo 集音において、かなり大きな特徴だと思う。マイクと同じ発想でセッティングしてはいけない。piezo は空気を読めない。拾うのはあくまで振動だけだ。

そこで、いろんな振動物にくっ付けるため下のように YM-50 のフタに木材で固定してみた。よく見えるように取り払ってあるが、piezo の中心部が過度に押し付けられるのを防ぐため素子と木の間にティッシュを何枚か挟んで使っている。木材を使ったのも同様に、必要以上に素子を押しさないためだ。だから留めビスも、素子が動かない程度にしか締めていない。



YM-50 のフタをいろんな振動物に押し付けて piezo の音を聴く。ノイズが怖いので、素子から FET プリアンプ(大正琴のために作ったもの)につなぎ、その出力をオシロで見ると同時にヘッドフォンでモニター。まず、よく鳴りそうなカナモノから。蚊取り線香の罐は取っ手が付いていて吊るしやすい。底面に YM-50 モジュールを養生テープで貼り付け、罐の各所を叩いてみる。

見事に鳴った。どんな音かというと、まさにキンチョー蚊取り線香の罐を叩いた音でしかない。それもリリース部分がほとんど消えていて、味も素っ気も無く、想像力(創造力)のカケラもない。ただ非常にリアルなのはたしかだ。もしかするとアース蚊取り線香なら違う音になるのかもしれない。でもアースは異様に臭いのでうちにはない。

その後、台所でアルミの寸胴や平鍋、4ミリ厚のアルミ片手鍋など片端から叩いてみた。中には使えそうな音もあったけれど、私は効果音の音源を探しているのではないと気付いたので、いい加減でやめた。特筆すべきは寿司桶。ちゃんと木の音がして和太鼓のようだった。いざれ使おう。

台所以外で試してみたいのはお寺の梵鐘。どこまでが金物の振動で、余韻部分の喰りはどんな風に收音されるのか。程度の良いコンデンサマイクと同時に録って比較したい。それと日光の鳴竜。マイクでならきれいに録れるのはわかっている。天井か床に piezo をセットすれば録れる？ それとも空気振動だからだめなのか。

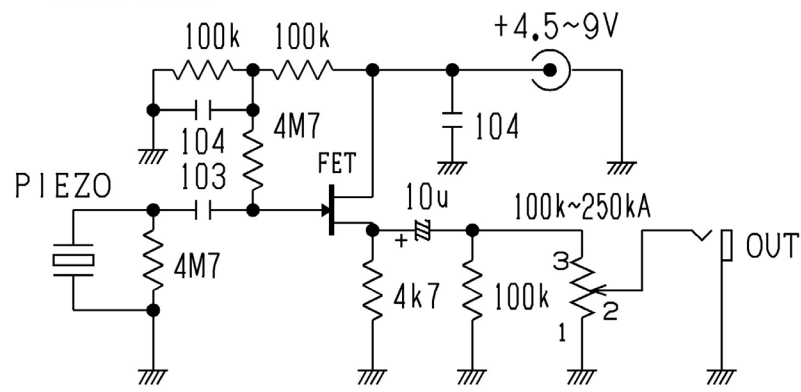
■ 叩いてから考える ■

私は基礎研究に向いていない。コツコツとデータを取って整理して表にして概要をまとめて……など、楽しいのは長くて最初の日。データを基に理詰めで作ったところで、コケるときはコケる。それより、大体わかったら、まずやってみて、ケつまづいたらそこから学ぶ。失敗せずに完成させようとするから失敗したときに大打撃を受けるのだ。ダメかもしれないと思いながら、やっぱりコケたときには派手に転びつつ大発見も得られる。どっちが楽しい？

ここまででわかったことは、piezo は振動しか拾わないという当たり前の事実だけ。だから真空中でも音を拾える。宇宙服のヘルメットに貼り付ければ、ヘルメット内にマイクは要らない。また、物体の中に仕込めば微かな振動も察知できる。たとえば古い橋の構造の中に埋め込んでおけば鉄材がきしむ度合いなどもわかるだろう。全然畑違いの分野だけだね。

とりあえず宇宙に行く計画も橋梁設計の勉強も予定に無いので、カウベルを作ることにした。いや、本当はエレキ木魚をがよかったのだが、適当な木魚を持っていない(普通そうだろう)。そこで、ある程度不規則な振動をしそうな箱にくっ付けて振動を拾おうというもの。多分これをいろいろ試せば大正琴にも応用できるだろうし。(お寺の鐘や仏壇のリンなど面白そうなものはいっぱいあるけど、鳩山町には鐘のあるお寺はない。リンは位牌と一緒に押入れのどこかにしまっ場所を忘れた。道元さんは多分怒らないだろう)

カウベルとして適当なサイズのアルミとプラスチックのケースを並べて叩いてみた。叩く面によって音が変わって結構面白い。プラケースも無視できない。縦横の長さが違うと3種類の音が出る。ふたを閉めたとき、開けたときでも変わる。小さな箱を爺さんが大真面目で叩き比べる姿は、多分常軌を逸していただろうが。結局タカチの T10-4-7 というシャーシ(フタ無し)に決めた。トップの写真がそうだ。

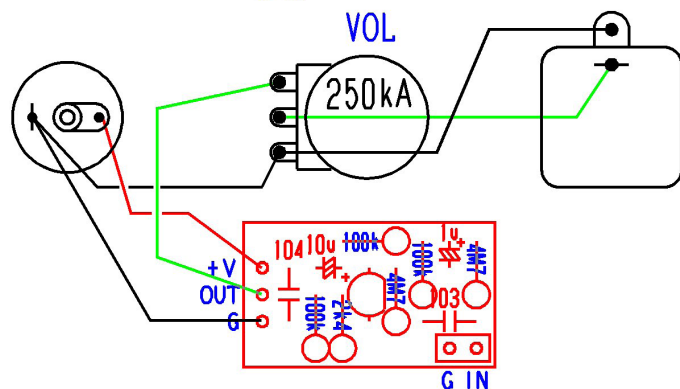
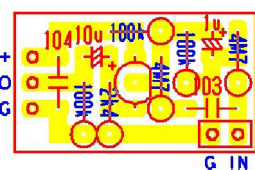
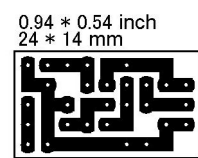


■ Kan-Bell ■

まずは音が出ればいい。これでピエゾの取り付けかたなど、実際に試すことにする。音量VRくらいは付けたいからバッファは必須。大正琴のFET バッファをそのまま使うことにした。まあ、このバッファも最適かどうかは不明ながら、インピーダンス変換器としては立派に働く。右に基板データを再録しておこう。変更点は大正琴では使わなかったアース穴を1個無くしてあるだけ。

下が内部構造。基板を両面テープで固定したのは、もしかすると不正解。シャーシ自体を叩くのがだから振動が加わる。はがれて落ちる？心配な人は基板サイズを左右15ミリ程度延ばしてビス穴をあけよう。箱の中のスペースは充分にあるから。

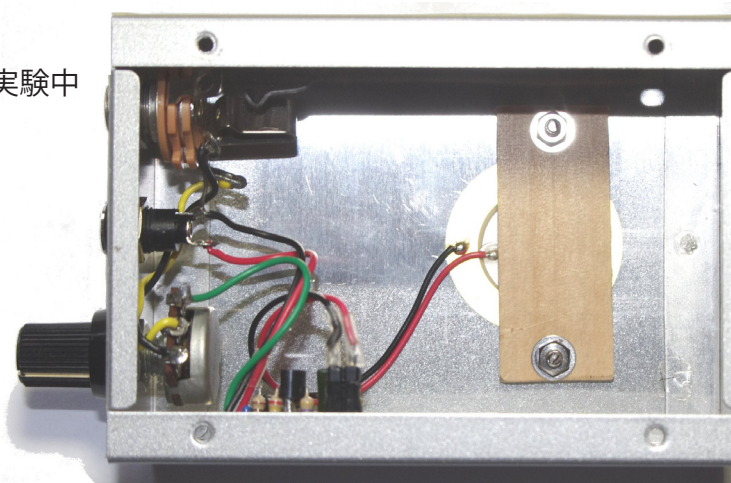
VRには250kAを使った。たまたま近くに転がっていたからで、ここは100kAでも同じ。50kA だって問題ないはず。楽器アンプでなく卓やオーディオアンプにつなぐなら10kA～50kAの方がいい。



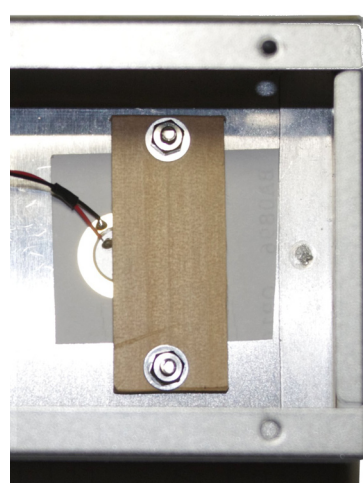
出力ジャックには非絶縁型を使った。これで黙っていてもアースが取れる。

一番の問題はどのサイズのピエゾを、どう取り付けるか。チューニングに近い作業だ。まず、私がしたように木材で軽めに押し付けるか、それとも中心部（白い部分）は押さずに金属のフランジ部分だけをタマゴラグのような金具で抑えるか。さらにピエゾを直接箱にくっつけるか、ケースとの間に薄いスポンジ、テープや紙を挟み込むか。これらで音はかなり変わる。そして方法によってはケースのどこを叩くかで音が大きく変わったり、それほど変わらなかったり。組み合わせはイヤになるほどあって、組み合わせを楽しむというより「俺はいったい何をやっ

実験中



決定



てるんだ」と思えてくる。苦闘3時間、コピー用紙を1枚挟み込むことで決着。カウベルなのでローはそれほど要らないから、まあリクツには合っている。それに紙を挟むとケースを叩く場所での音の違いも少なくなるようだ。

以上の試行錯誤?には31ミリと25ミリの素子を使っていた。特に意味無く大きい方がいいだろうとボーッとやっていた。ところが最後に念のために15ミリ素子にしたところ、なんと大当たり！（あくまで私にとって）。目指していた音に一番近くなった（ミシシッピークイーンのエントロのカウベル）。

外部から信号を加えて発音させた実験では3種とも差はなかったが、叩いて出てくる音の周波数特性は少し違って、小さい方がわずかにハイ寄りになるようだ。結果オーライですけど。

■ 禅問答（手を叩くとパンツと音がする。右手が鳴ったか左手が鳴ったか？ それとも？）

音響の基礎は人並みに知っているつもりだった。物体が振動して、物体にくっついている空気を押し引きして気圧の変化を生み、気圧変化はそこにとどまらず、周囲に拡散して行く。つまり、物体の振動の様子が、まったくそのままではないにせよ波紋のように広がり、人間の耳に入って鼓膜を揺らして音になる。

マイクの仕組みは耳と同じようなものだから、人間に聴こえる音ならしっかり録れる。聴こえないほど小さい音も高い音も録れる。

電気音響においては、そのような現象を「音」と考えているはず。でもさあ、音ってそれだけ？真空中にも空気を伝播しない音があるはず。最初の振動が物体（主に固体）ではなく空気自体だった場合、考え方を少し変えないと対応できないのでは？

ピエゾで音を拾う努力をされていて、ふと原点に戻ってしまった気がした。音ってなんだ？結局のところ、知識としては知っていても心底わかってないことだけは自覚できた。

あるいは、私が感ったのは音源からの直接音

記事トップの写真のように（ごめん、見えない）、叩かれる箱は底を抜いた状態（裏板は付けない）で、下部を浮かせて空気が通るようにしている。こうしないと音がこもって使い物にならない。実験では3ミリくらい浮かせればちゃんと鳴り始めるとわかった。私は8ミリのスペーサで床板から浮かせている。

その床板は廃物利用。TD9-12-4の底板の成れの果て。ケース上側は各種実験用に使用済みで穴ぼこだらけ。底板だけが無傷で残ったらしい。サイズがちょうどいいので使った。

底板は金属でなくてもまったく問題なさそうだ。屁理屈をこねれば質量がどうのこうのになるのだろうが、合板やMDFで充分いける。なにしろこれは「楽器」なのだ。面白い音が出ればそれでいい。

と反射音との比率？が、根拠なく勝手に信じていたのとは違っていただけ。私たちは日常聴いている「音」の中で、たとえレベルは低くても反射音は大きな要素だ。無響室ではまったく反射が無いから自分の声も空気振動としては聴こえない。骨伝導で聴こえるだけ。音の響きの有り難味がわかる。

前述したように、ピエゾで録れる音は純粋に音源の振動だけなのだ。それから後の空気による反射や共振はまったく録れない。

当たり前だろ、何を今更、と自分でも思うけれど、人間って身にしみてわかるのは難しい。ま、わかったところで大正琴エレキ化計画にどれだけ役立つかは、やってみなくちゃわからないが。最終的には空気振動も拾いたくなるだろうなあ、みたいな予感もかすかにする。

大正琴に穴をあける前に、もう少し空き缶と遊んでみたい。缶の音の録り方がわかれば他の音源にも応用できるはず。まずは実験用にFETプリアンプを沢山作らねば。