

圧電素子の放電時における移動電子数の測定実験

圧電素子をカチッと押して放電させると、電気火花が飛ぶ。このときどのくらいの電子が移動するのであろうかと思い実験してみる気になった。やってみると考えていたほど簡単ではなく、測定実験はかなり難しいことが分かった。難しい原因は

- ①放電はごく短時間に行われる。(電流が小さい)
- ②放電時の電圧は高い(一般に空気中での放電は 1cm 当たり 1 万ボルト必要と言われているので、圧電素子の放電は数千ボルトあると考えられる。手に放電すると痛い。)

考えられる測定方法

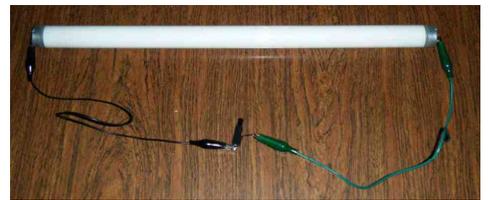
A;圧電素子に 2 つの電気抵抗を直列につないで分圧する。これに電流を流し電気抵抗に加わっている電圧を測定する。

B;コンデンサーに電気を蓄え、この電圧を測ることにより電気量を計算する。

C;箔検電器に放電し、箔の開き具合から電気量を計算する。

D;LED や蛍光管をつないで放電すると光るので、この光の量を求めて計算する。

(LED に直接つないで放電すると壊れるので、電気抵抗を間に入れる)

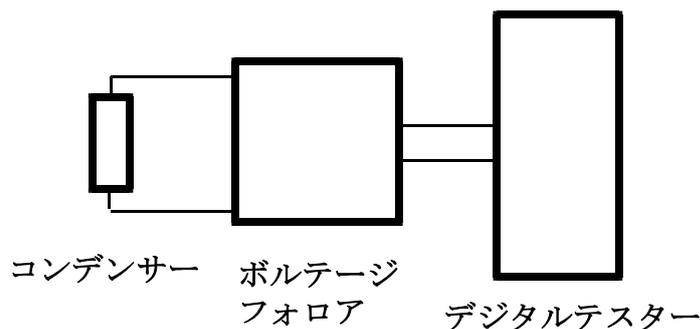


結局、実際に測定実験ができたのは B と C であった。

A は PC オシロスコープを使って行ったが現象の時間が短いのか、測定できなかった。

D は電気のエネルギーを光のエネルギーに換算して求める方法であり、発想としては魅力的であるが、実際に行おうとすると具体的な方法が思いつかなかった。

コンデンサーに電気を蓄える方法の実験



静電容量が小さくて耐電圧が大きなコンデンサーを 10 種類秋月電子から購入して実験した。圧電素子の正極、負極を直接コンデンサーに接続すると、何回か行っているうちに壊れるようなので、負極とコンデンサーの金属線の間を数ミリメートル開けて火花放電を起こさせて電気を蓄電させた。この方法では全部の電子が移動するか(空気中等に逃げないか)定かではなかったが行ってみることにした。また、圧電素子を手でカチッと押して放電させるのであるが、毎回同じ量の電気が発生しているかは不確かであった。まずは実験をしてみて結果を検討してみることにした。

コンデンサーの電圧は、直接デジタルテスターを接続するとすぐに電圧が下がり測定できない。これを防ぐために、間にオペアンプ AD822ARZ を使ったボルテージフォロア(入力抵抗が数メガオーム)を入れて電圧の降下を少なくして測定した。

測定データ

コンデンサー		No. 4	No. 7	No. 1
電 圧 測 定 値	1	0.33	0.11	0.39
	2	0.28	0.16	0.49
	3	0.35	0.18	0.58
	4	0.23	0.29	0.57
	5	0.36	0.33	0.31
	6	0.29	0.36	0.42
	7	0.34	0.17	0.24
単 位 は V	8	0.27	0.19	0.25
	9	0.30	0.35	0.59
	10	0.48	0.34	0.58
	平均	0.323	0.248	0.442

- No. 4 メタリライズドポリエステルフィルムコンデンサー 0.015 μ F 250VAC
 No. 7 メタリライズドポリエステルフィルムコンデンサー 0.022 μ F 250V
 No. 1 メタリライズドポリプロピレンフィルムコンデンサー 0.01 μ F 630V

コンデンサーに蓄えられた電気量を $Q = CV$ の式に入れて計算した。また、これらの数値を電子1個の電気量（電気素量 $e = 1.6 \times 10^{-19}$ クーロン）で割って電子数を求めた。

No.4 のコンデンサーから求めた電気量[c]	4.7×10^{-9}	電子数[個]	2.9×10^{10}
No.7 のコンデンサーから求めた電気量[c]	7.0×10^{-9}	電子数[個]	4.4×10^{10}
No.1 のコンデンサーから求めた電気量[c]	4.4×10^{-9}	電子数[個]	2.8×10^{10}

電子数はどのコンデンサーも 10^{10} であり、測定方法、測定値は一応信頼できる。

2. 箔検電器を使った測定の実験

箔検電器の円盤に、圧電素子の負極をリード線をつないで放電し、箔検電器を負に帯電させる。これが図1である。見やすいように箔を太い線で描いてある。これに帯電していない同じ箔検電器を接触させて、電気量を半分にする。これが図2である。同じ操作を行って図3、図4を得ることができる。これらの箔のなす角を使って以下の計算を行う（図1の箔の開きは大きすぎるので除外する）



図1



図2



図3

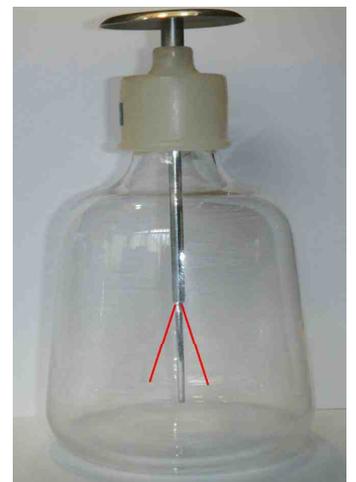


図4

箔検電器 測定データ

	図 2	図 3	図 4
箔の角度	50 度	29.5 度	18.1 度

箔の質量 m の計算

材質はスズ

スズには α スズと β スズがあるが、常温では β スズが安定である。

β スズの密度は $7.365 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$

箔の厚さは $1 \mu\text{m} \sim 2 \mu\text{m}$ とナリカのサイトに出ているので $1 \mu\text{m}$ を使用する。

(http://www.rika.com/product/prod_detail1.php?catalog_no=B10-1170)

以上の数値を元に箔の質量を計算すると

$$m = 4.2 \times 10^{-7} \text{ kg}$$

非常に大雑把な考えで、以下のように計算する。

- ①箔の真ん中に電荷及び質量が集中しているとする。
- ②対応する金属板の電荷も真ん中に集中しており、電荷量を箔の電荷量と同じ Q とする。
- ③クーロン斥力と重力が釣り合っ図のような状態になるとする。
- ④金属表面の電荷分布は一様とする。(正しくは分布に差がある)

以上より、クーロン斥力 $f = k \frac{Q^2}{r^2}$

$$k = 8.99 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{A}^2\text{s}^2$$

$$r = 12.5 \sin \theta \text{ mm} = 1.25 \sin \theta \times 10^{-2} \text{ m}$$

(これはあまり厳密ではないけれど、概数を求めるにはこれでよい)

$$g = 9.8 \text{ m/s}^2$$

$$\text{釣り合いの関係より、} f = mg \cdot \tan \theta$$

一方、箔検電器の金属部分の全面積を箔の面積で割ると **13.4** になる。

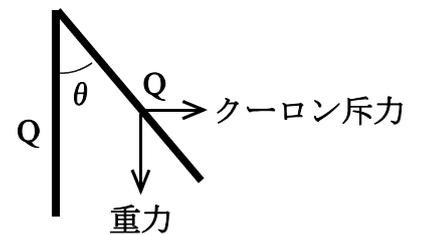
図 2 の箔の部分の電荷 Q_2 は図 1 の箔の部分の電荷 Q_1 の 2 分の 1 になっている。
 同様に、図 3 の箔の部分の電荷 Q_3 は図 1 の箔の部分の電荷 Q_1 の 4 分の 1 になっている。
 同様に、図 4 の箔の部分の電荷 Q_4 は図 1 の箔の部分の電荷 Q_1 の 8 分の 1 になっている。

これらを元に、図 1 の箔検電器の全電気量をそれぞれ計算することができる。

以下に計算値を示す。また、これらの数値を電子 1 個の電気量 (電気素量 $e = 1.6 \times 10^{-19}$ クーロン) で割って電子数を求めた。

図 2 から求めた図 1 の全電気量 [c]	8.3×10^{-9}	電子数 [個]	5.2×10^{10}
図 3 から求めた図 1 の全電気量 [c]	7.3×10^{-9}	電子数 [個]	4.6×10^{10}
図 4 から求めた図 1 の全電気量 [c]	7.0×10^{-9}	電子数 [個]	4.4×10^{10}

どれもほぼ同じような数値になった。



コンデンサーを使った実験の数値と、原理が違う方法で求めた箔検電器を使った実験の数値がほぼ同じ値（同じ 10^{10} 個のオーダー）になったので、信頼性があると考えられる。

結論として、ライター等に使われている普通の大きさの圧電素子が放電するとき**移動する電子数は数百億個（ 10^{10} 個のオーダー）**である。

以前行った実験、2枚の A4 サイズ程のアルミ箔をラップで挟んで簡易コンデンサーを作り、9ボルトの乾電池で充電して LED に接続すると LED が一瞬発光する。このときに流れた電子数を測定すると 10^{10} 個のオーダーであった。現象は違うが、同じくらいの電子の動きによることが感覚的には納得できる。

ちなみに、小さな霧1滴の大きさは数マイクロメートルなので、直径 $4 \mu\text{m}$ として計算すると、この霧1滴の中に 1.2×10^{12} 個の水分子が入っている。上記の電子数と比べると百倍はある。何となく納得できるかもしれない。

追加実験：圧電素子の正極を使って箔検電器の箔を開かせられるか

以前行った実験では、圧電素子から出ている電子数を測定するために、リード線で圧電素子の負極と箔検電器の金属板を接続して箔を開かせた。

このとき、圧電素子の正極を使うと箔はほとんど開かなかった。何故だろうと思っていたが、理由は分からなかった。しかし、発電原理を考えると、正負の電気は同じだけ発生しているはずなので、今回はそれを調べてみた。

1. 圧電素子の構造

左；ライターの中に入っている圧電素子

右：分解したところ

左下が圧電素子本体の圧電性セラミックス（直径3mm、長さ5mmほど）

バネが2つ入っている

ばらばらになったプラスチックは写っていない

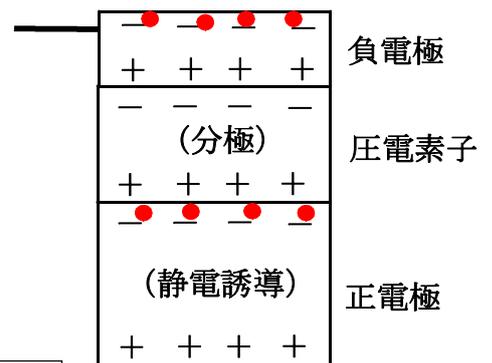
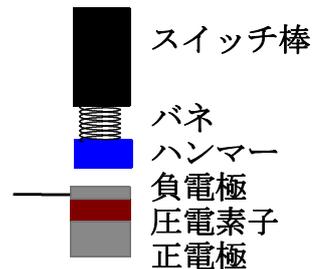


2. 発電原理

圧電素子は次の順番で動作する

- ①スイッチ棒を押す
- ②バネが圧縮される
- ③スイッチ棒があるところまで押されると、バネの力によりハンマーが圧電素子セラミックス（負電極）をたたく
- ④その瞬間、圧電素子セラミックスが縮み、分極により表面に正負の電荷が現れる。
- ⑤圧電素子セラミックスに接触している金属が静電誘導により図のように電荷の移動が発生する。実際に移動するのは金属内の自由電子である。

内部構造模式図



電気発生のおくみ

●は金属内の自由電子

3. 正電極で箔検電器を開く

以前の実験で正電極から箔検電器の箔を開かすことができなかつた原因は以下のことであることが分かつた。

- ① スイッチのプラスチック棒と正極の金属との間の抵抗は無大ではなかつた。手でスイッチ棒を押さえて発電させても、すぐに手に電気が逃げると。糞虫クリップでスイッチ棒及び正極を挟んでデジタルテスターで測定すると $11\text{ k}\Omega$ あつた。
- ② スwitchのプラスチック棒とプラスチックカバーは絶縁されている。
- ③ 正電極とプラスチックカバーは絶縁されている。
- ④ 負電極の金属線は他のどの部分とも絶縁されている。

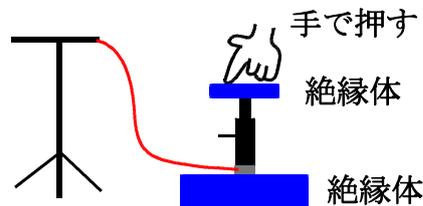
4. 実験結果

以上のことより、圧電素子の正電極及びスイッチ棒を絶縁して実験すると、箔は開いた。その様子を写真で示す。箔の開きは、負極を使ったときよりも少し小さい。原因はよく分らない。とりあえず、圧電素子で正負の電気は原理的に同じ量の電気が作られており、きちんと絶縁することにより正電極を使つても箔検電器の箔が開くことが確かめられた。

圧電素子の正電極を
箔検電器に付ける



スイッチを手で触ると箔は閉じる



圧電素子を絶縁してスイッチの棒を押すと箔は開く
(箔検電器は圧電素子の正電極に接続されている)



正電極を使った実験。箔の開きを赤線で示している。