

手作り箔検電器と高電圧、高抵抗の測定

Handmade Leaf Electroscope and Measurements of High Voltage and High Resistance

森 千鶴夫†
Chizuo Mori

Abstract: The construction of a leaf electroscope is very simple, so that it is able to make it by our selves by using surrounding materials. A leaf electroscope is very sensitive to extremely small amount of electric charge and does not take continuous electric current. It means the electroscope has infinite input impedance against direct current voltage. Therefore, it can be used for the measurement of the electromotive force of a direct current high voltage source with a very high output resistance and also for the measurement of very high resistance,

1. はじめに

中学校や高等学校では理科の教科において、摩擦静電気に関する実験が箔検電器を使ってよく行なわれている。これは、箔検電器は極めて微小の電荷で動作し連続的な電流を必要としない、という特性を利用しているが、このことは、箔検電器は極めて感度の高い検出器であり、入力インピーダンスが直流入力に対して無限大であるということの意味している。

箔検電器は構造が簡単なので、身の回りの材料で自作することができる。本稿では、箔検電器を自作し、高い感度を利用して、出力インピーダンスの高い直流高電圧電源の電圧の測定および $10^9 \sim 10^{12} \Omega$ の高抵抗の測定への利用について述べる。箔検電器の多面的な利用は、物理や電気に関する教科において、教育上も有用であると思われる。

2. 箔検電器の自作

材料は、図1に示すようにインスタントコーヒーの空瓶、ステンレスの針金、アルミニウムのクッキングfoil、スチロールフォーム、目盛り用の厚紙、が全てである。

図2(a)に示すように、直径0.5mmのステンレスの針金を一筆書きのように、ニッパを使って折り曲げて、スチロールフォームを突き通す。(b)のように上部を折り曲げ、先端をスチロールフォームに入れて、電極が不安定に動くのを防ぐ。クッキングfoil(使用したのはごく普通のもので、厚さ15ミクロン)を(c)のように折り曲げ



図1 手作りの箔検電器。斜め後方から見ているので、箔の開き角と目盛りとは合っていない。

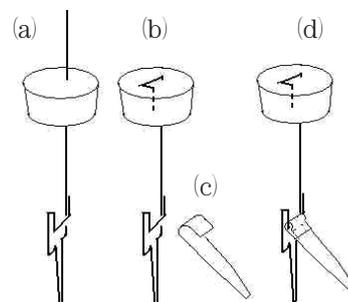


図2 箔電極の作製

† 愛知工業大学工学部客員教授

〒595-0932 豊田市八草町八千草 1248

るとよい。これは先端を直径 3mm のドライバーの軸に巻きつけて折り曲げた。(c) を (d) のように挿入して、余分の部分をピンセットで挟んで、箔の回転にゆとりを持たせて狭める。この作業に若干の熟練が必要である。

図 1 に示すように、目盛り板を作り、それを (d) のスチロールフォームに切れ目を入れて挟み込み、瓶にはめれば出来上がる。

アルミニウム箔は剛性が高いので針金を軸にして容易に回転できるようにする必要がある。錫箔（安価に購入できる）は柔軟なので、より薄い 1.3 ミクロンの箔を電極に貼り付ければ感度の高い箔検電器を得ることができる¹⁾

（追補参照）。しかし、錫箔の扱いは、更に工夫と熟練を要する。市販の箔検電器は錫箔を使っているようである。今回のような目的には、アルミニウムのクッキングフویلで十分である。この箔検電器でも、摩擦静電気の実験に使用することができる。

インスタントコーヒーの空瓶を使ったが、ペットボトルなどのプラスチックは帯電しやすく好ましくない。また、高級なパイレックスガラス瓶なども帯電しやすい。しかしこれらは、帯電防止のスプレー（エレキガードなど）を吹きかけるとよい。スチロールフォームは極めて絶縁性が高く、かつ加工がしやすいので電極支持の絶縁体には好適である。しかし、長く放置しておくと、ほこりが付いて漏洩電流が無視できなくなる。その際には、表面をカッターで少し削るとよい。長期に保管する場合にはビニール袋などで覆っておくとよい。

3. 直流高電圧電源の起電圧の測定

出力インピーダンスが高い数 kV の電源は、図 3 (a) に示すように直流起電圧 V_0 を測定するために、電圧計 V_K をつなぐと、電圧計の内部抵抗 R_K を通じて電流が流れて、電源の内部抵抗 R_0 のために、出力電圧 V は V_0 よりも低下する。高価な象限電位計²⁾ と同じ原理で動作する箔検電器は、(b) に示すように微小容量のコンデンサ C をつないだのと同じで、最初に充電電荷としての極めて微小な電

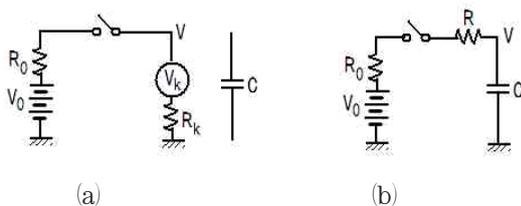


図 3 (a) 高電圧の測定、(b) 高抵抗の測定

流が流れるが、定常状態では電流は全く流れない。このことは、箔検電器の入力インピーダンス（ここでは直流抵抗）は無敵大であることを意味する。

図 4 に、既知の値の高電圧を、箔の針金電極と検電器のガラス瓶の下に敷いたアルミニウムフویل電極との間に印加した場合の箔の開き角度を示す。電源と箔検電器の間に数 $M\Omega$ の保護抵抗をつけても角度は全く変わらない。箔

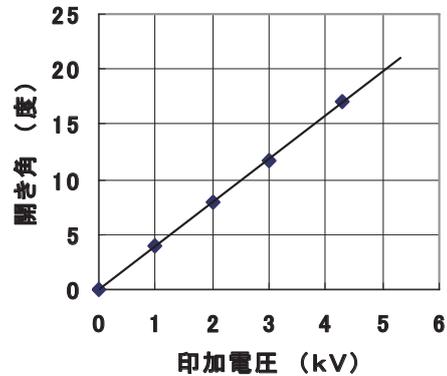


図 4 印加高電圧と箔の開き角

検電器を用いて定量的な値を得る時の弱点は、箔の開き角度の読み取り誤差である。角度の読み取りは、視差をなくする工夫が必要である。単純な測定器ほど、ある種の執念と熟練が必要であるが、その点でもこうした測定器は教育上も意味があるかと思われる。

図 4 の直線性は非常によいが、実は読み取り誤差は $\pm 20\%$ 程度はある。開き角度は 40 度以下になるように、アルミ箔の長さや形状、或いは 2 枚重ねなどをして、この範囲に収まるようにすることが大切で、手作りの場合にはそれが可能である。開き角度をあまり大きくすると、電圧との直線関係がなくなる。電圧校正線が得られれば未知の電圧の測定が容易である。電源の出力抵抗がどんなに大きくても測定できるのが特徴である。

筆者は、レーザープリンタから取り外した小さな高電圧発生器の電圧の測定に活用している。この高電圧発生器は入力 12V で、出力は本測定法によれば 6.3 kV であったが、出力インピーダンスが非常に高く、この方法以外では測定は困難であると思われる。

4. 高抵抗の測定

100 $M\Omega$ 以上の高抵抗の測定は容易ではない。しかし、図 3 (b) に示すように、測定したい抵抗 R を静電容量 C の箔検電器に接続し、電源 V_0 につなげば、箔検電器の電圧 V は次式で示すように、時間 t とともに上昇する。ここで、 $RC \equiv \tau$ は時定数と呼ばれ、時間の次元を持つ。また、 $R \gg 100 M\Omega$ の場合には R_0 は R に比べると無視できるほど小さい。

$$V = V_0 \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) \right\}$$

$$\therefore \frac{t}{RC} = \ln_e \left(\frac{1}{1 - V/V_0} \right) \quad (1)$$

式(1)において、 V/V_0 が $(1-1/e)$ の時、すなわち0.632の時に $t=RC$ になる。したがって、電圧を印加してから、 V が V_0 の63.2%になる時間を測定すれば時定数 RC が求まる。この方法は原理的には C を測定する方法としてすでに知られている方法である。しかし、箔検電器を使って極めて高い抵抗の測定に適用した例はないと思われる。

箔検電器の電極間の静電容量 C が既知であれば R が求まる。逆に R が既知であれば C が求まる。この方法では、 V_0 の絶対値は必要ではなく、開き角の飽和値に対する比が63.2%になる時間を求めればよい。 R を求めるためには C を知らなくてはならない。今回は C を求めるために、箔検電器に既知のいろいろな値のコンデンサ C_K を C と並列になるように外付けし、外挿によって C を求めた。

$10^{10} \sim 10^{12} \Omega$ のような高抵抗の場合には、流れる電流は極めて小さい。したがって、市販のコンデンサでは漏洩電流が大きくてとても使用できない。そこで、図5(a)に

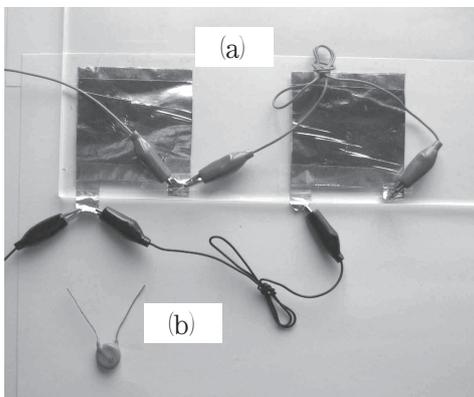


図5 箔検電器へ外付けしたコンデンサ
(a) 手作りのコンデンサ (2個並列)
(b) 市販のコンデンサ (耐電圧6kV)

示すように、厚さ5.1mmの亚克力樹脂の両面に、アルミニウム箔を5cm×5cmに切って貼り付けて電極にしたコンデンサを2個手作りした。亚克力樹脂の比誘電率はあまり確定的ではないがデータ³⁾から3.0として計算すると静電容量は13.0pFになる。2個並列にすれば26.0pFである。厚さ5.1mmの亚克力樹脂の電気絶縁性は極めて高く、漏洩電流は無視できる。このコンデンサを箔検電器に並列に外付けした。

図6(a)に示すように、ファイルの紙の表紙(厚さ0.45mm)を巾1cm、長さ15cmにカットし、クリップで電極をつけた紙抵抗に対して測定した充電の時定数(式(1)

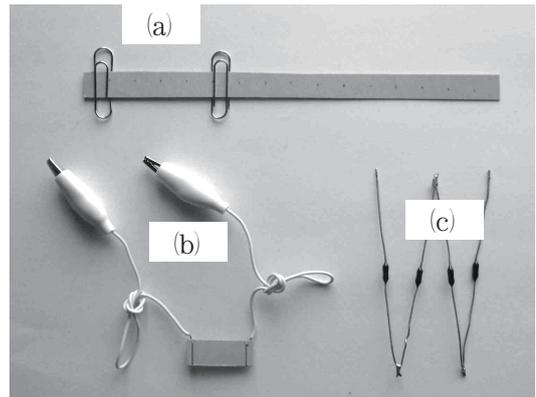


図6 各種の高抵抗
(a) ファイルの紙の表紙を1cm巾にカットした高抵抗体($\sim 10^{12} \Omega$)
(b) (a)に電極を付け、撥水性表面処理をした高抵抗体($4 \times 10^{11} \Omega$)
(c) 市販の高抵抗体($400M \Omega$, 100×4)

参照)を図7に示す。印加電圧 V_0 は3kVである。横軸は外付けしたコンデンサ(図5(a))の値で、パラメータは紙抵抗のクリップ電極間の長さである。それぞれの直線を後方(横軸の負の側)に外挿した値の平均値は6.0pFであったが、これは箔検電器の静電容量 C と考えてよい。

この値は、箔検電器の模擬として、半径2cmの球電極を内径4cmの球電極の内部に置いたコンデンサを考え、

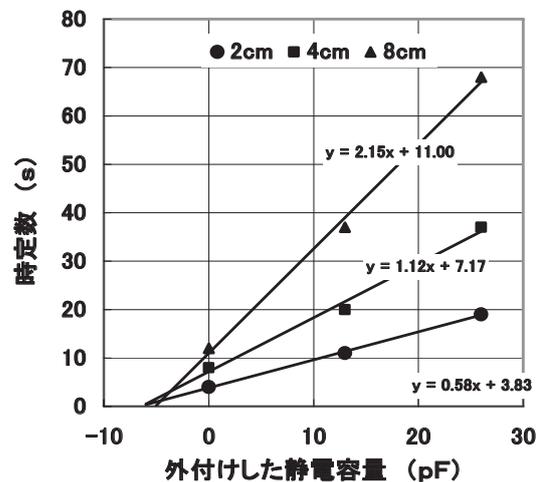


図7 高抵抗を通じて箔検電器に充電する時の、外付けコンデンサの静電容量と充電の時定数の関係

その静電容量を計算すると4.45pFになり、6.0pFに近い。また、錫箔の重力と電荷の反発力から、電圧 V_0 を印加した時に開く角度に必要な電荷量 Q を理論的に求め¹⁾、この値をアルミニウム箔に換算した電荷量 Q から、 $C=Q/V_0$ で求めた静電容量は7.3pFであった。これらのことから

も、実験的に得られた 6.0 pF の値は妥当であると思われる。

抵抗 R を、 $R = (\text{時定数}) / C$ として求めた結果として、図 6 (a) の紙抵抗において 4 cm の場合には、 $R = 1.2 \times 10^{12} \Omega$ であった。これは $3.0 \times 10^{11} \Omega / \text{cm}$ になり、固有抵抗 ρ は $3.4 \times 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ となる。上記の紙抵抗 (巾 1 cm) に、図 6 (b) のように、ホッチキスで電極を付け (電極間距離 2 cm)、それにリード線をハンダ付けし、防水剤 (アメダス) をスプレーした高抵抗体は、 $4 \times 10^{11} \Omega$ であった。このような高抵抗体は市販では極めて高価である。

図 6 (c) のように、市販の既知の高抵抗 $400 \text{ M}\Omega$ ($100 \text{ M}\Omega$ を 4 個直列で $4 \times 10^8 \Omega$) の抵抗値を時定数による方法で測定し、この方法の妥当性を検討した。この抵抗値は紙抵抗体に比べて桁違いに小さいので、測定できる程度の時間、すなわち数秒に時定数を大きくする必要がある。そのために、外付けの静電容量 C を大きくしなければならない。この場合には、 R が小さいために、電圧印加時に流れる電流が大きく、コンデンサの漏洩電流はあまり問題にならない。したがって、図 5 (b) に示すように市販のコンデンサ (2200 pF 、耐電圧 6 kV) を使用することができる。それでも時定数は 0.9 秒で、箔の開き角の読取り誤差は大きい。

このコンデンサを 5 個ほど並列につなげば、かなりの精度で読取ることができるが本実験に際しては持ち合わせがなかった。1 個の場合で、無理に読み取って抵抗値を計算すると、 $450 \text{ M}\Omega$ になり、高抵抗値を測定するための本方法が妥当であることが分かる。筆者は、ガイガーミュラー計数管の外部消滅のための高抵抗体の測定に利用している。

5. 箔検電器のいろんな利用

箔検電器は摩擦電気の発生実験に活用されているが、同種の実験で、ビニールテープを引き剥がした時、ゴムを引き伸ばした時、冬の乾燥時にアクリル樹脂系の着物を脱いだ時、などに発生する静電気で箔が開く実験や、箔が開いた状態でローソクの炎を近づけた時、ガイスラー管を高真空で放電させた時、紫外線を照射した時、などに箔が閉じる実験、など、多くの身の回りの現象に関連させて使用することができる。また、放射線・放射能の測定にも使用できる。

6. 結論

箔検電器は摩擦静電気の発生などの教育実験によく用いられているが、構造が簡単なために、身の回りの物品で容易に自作することができる。感度の高さおよび直流入力インピーダンス無限大の特性を利用して、出力抵抗の大き

な直流高電圧電源の電圧の測定や、絶縁抵抗に近い高抵抗の測定などの実用測定に利用できる。そのほか、身の回りのいろんな現象にも利用でき、大いに活用できると思われる。また本稿で述べた内容は、場合によっては電気の基礎を理解するための学生実験にも適していると思われる。

謝辞

本稿は、中部原子力懇談会が進めている“放射線ウオッチング”プロジェクトに関連して、また、愛知工業大学工学部電気科における電気電子計測の講義にも関連してまとめたものである。同学科の鷲見哲雄 教授および森 正和教授には種々の便宜をはかって頂いた。関係の方々に感謝致します。

参考文献

- 1) 森 千鶴夫: 手作り箔検電器と放射線の測定、Isotope News, No. 634, 17-22, 2007
- 2) 西野 治: 電磁気計測 (改訂版)、p 104, 電気学会, 1979
- 3) yamaden-sensor/technology/table.html

補記

角型のコーヒャ瓶を使うと、ガラス面が平面なので箔の先端が見やすい。アルミニウム箔の場合には、高圧電源から電圧を印加する場合は別であるが、普通の摩擦静電気実験に使用する場合には、開き角を 30 度以上にするのはかなり難しい。アルミニウム箔は薄いほどよいが、取り扱いが難しくなる。

補図 1 に、アルミニウム箔を数枚重ねた中央の電極の両側に、厚さ $1.3 \mu\text{m}$ の錫箔を貼り付けた検電器を示す。貼り付ける糊は、導電性を与えるために塩を少し混ぜた学童用の糊 (たとえばヤマト糊) を用いた。錫箔は極めて安価にインターネットで購入できる。アルミニウム箔は剛性が強く、貼り付ければ動作しない (開かない) が、薄い錫箔は非常に柔軟性に富み、電極に貼り付けて



補図 1 丸型のコーヒャ瓶に作った錫箔 (厚さ $1.3 \mu\text{m}$) 検電器

るのがよい。取り扱いには若干の熟練を要するが、少し慣れればできる。この検電器は市販の検電器に比べて感度において全く遜色はなく、通常の摩擦静電気の実験に有用である。

(受理 平成 23 年 3 月 19 日)