

手作り箔検電器の教育的活用

Educational Usage of Handmade Leaf Electrosopes

森 千鶴夫[†]
Chizuo Mori

Abstract: Leaf electrosopes are easily made by hand and have high sensitivity to static electricity. They are useful for educational experiments in electro-physical phenomena. Very simple leaf electroscope using tissue paper (facial paper) and that using aluminum foil for accurate measurement are presented. It is shown that hand-made leaf electrometers can be applied to the experiment of frictional-electrification phenomena, and measurements of electric resistance and electrostatic capacity.

1. はじめに

箔検電器は簡単に手作りでき、しかも静電気に対して感度が高いため、いろんな電気物理現象の教育的実験に使用されている。筆者は 3 年前に本報告のノートに箔検電器について報告¹⁾したが、その後にも折に触れて箔検電器を利用してきた。新しく工夫した事柄は教育上も役立つと考えられるので、それらについて述べる。

主な工夫は、①箔として、ティッシュペーパーを使用、②摩擦静電気の正負に関する実験、③薄いアルミニウム箔を使用し、目盛り板を付けた検電器を作成したことによる定量的実験における読取り精度の向上、④高抵抗値の測定と抵抗体の直列、並列に関する実験、⑤コンデンサーの静電容量の測定と直列、並列に関する実験、などである。

2. 最も簡単な箔検電器の作製とそれによる電気高抵抗の測定

図 1 に、ペットボトルに合成樹脂のストローをセロテープで貼り付け、両端にクリップの付いた導線をストローに図のように貼り付ける。ティッシュペーパーの 1 枚 (通常 2 枚が合わさっているがそのうちの 1 枚) を 5 mm × 60 mm 程度の短冊状に切り、上のクリップで挟む。下のクリップでクッキングアルミ箔 (約 1 cm × 2 cm) を挟み、荷電に使う。また図 1 では、A4 の紙を幅 6 mm、長さ 75 mm に切り、更に 1 部を残して、幅 1.5 mm、長さ 65 mm に切りを入れて、4 枚の細長い

紙を作り、この紙の切り残した 1 端を下のクリップで挟んでいる。この紙はその電気抵抗値を測定するためのものである。ペットボトルの下には、クッキングアルミ箔を敷いて、他の導線のクリップで挟み、この導線の他端のクリップで測定したい紙の端を挟む。導線の配置などには注意が必要である。

図 1 の上左図のように、荷電していない時にはティッシュペーパーの箔は垂れ下がっている。上右図のよ

うに、紙の 1 枚の電気抵抗 R を測定したい場合には、1 枚をクリップで挟み、衣服などで塩化ビニール (以下塩ビ) のパイプで摩擦し、パイプの端を、上の導線の下端のクリップに付けたアルミ箔に触れる。塩ビパイプには負の摩擦電気が生じているので、荷電用のアルミ箔やティッシュペーパー箔には負の電荷が荷電される。荷電を数回繰り返せば、ティッシュペーパー箔の端は上昇しストローとの角が大きな角度になる。

この箔検電器の静電容量 C は容量計で測定して 1 pF であった。また、後述するように、箔の開き角度 θ と電圧 V (即ち角度と電荷量 Q) はほぼ直線関係がある。

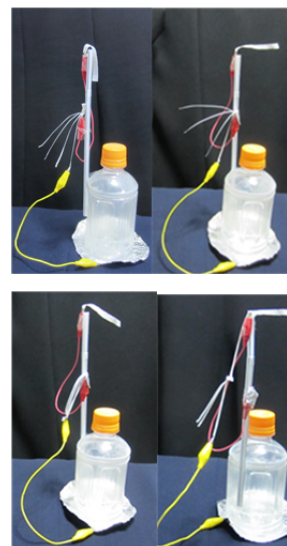


図 1 ティッシュペーパーを箔にした検電器で紙の電気抵抗値を測る。上左: 荷電していない状態、上右: 1 枚の紙の電気抵抗を測る、下左: 4 枚を測る、下右: 2 枚を直列にして測る。

[†] 愛知工業大学工学部電気学科 客員教授
〒595-0935 豊田市八草町八千草 1248

図 2 において、電圧 V に関して次の式が成り立つ。

$$-V = -V_0 \times \exp(-t/RC) \quad (1)$$

但し、 t は荷電をしなくなった時の電圧 $-V_0$ からの経過時間である。RC は時定数と呼ばれ、時間 (秒) の単位を持つ。

同じことであるが、開き角 θ に関して次の式が成り立つ。

$$\theta = \theta_0 \times \exp(-t/RC) \quad (2)$$

角度 θ が θ_0 の 1/2 になる経過時間 $t_{1/2}$ を測れば、式 (2) から式 (3) が得られ、抵抗値 R が求められる。

$$\ln(2) = t_{1/2}/RC \quad (3)$$

得られた結果を表 1 に示す。4 枚を並列にした場合の抵抗値は 1 枚の場合のほぼ 1/4 に近く、2 枚を直列にした場合には 2 倍に近く、おおむね正しく測れていると思われる。ただし誤差は $\pm 30\%$ 程度は見込まなければならない。しかし、こんな簡単な方法でも、電気抵抗の並列、直列の合成の関係を確かめることができる。ただし紙は湿度によって大きく変化するので、表 1 の値は一例である。

表 1 A4 の紙 $1.5\text{mm} \times 65\text{mm}$ の抵抗値

紙の枚数 (並列)	経過時間 $t_{1/2}$ (s)	抵抗値 R (Ω)
1	21	3.03×10^{13}
2	11	1.58×10^{13}
3	7	1.02×10^{13}
4	6	8.6×10^{12}
2 枚直列	44	6.32×10^{13}

3. 精密な箔検電器の作製

3-1 ティッシュペーパーを使った箔検電器

図 3 に、かなり本格的な手作りの箔検電器を示す。コーヒーの空瓶にスチロールフォームを削って差込み、絶縁体とした。

直径 0.6mm のステンレスの針金の下部を折り返し、2 重にして電極にした。針金の上部を、スチロールフォームの下面から通し、上面に出てきた針金の先端を再びスチロールフォームの中に差し込んで、針金、すなわち電極が動かないように固定する。

箔として何を使うかはかなり問題である。市販の箔検電器は可撓性が大きい錫箔がよく用いられている。しかし、素人には取り扱いにやや熟練を要する。今回

はティッシュペーパーの利用を紹介する。

図 1 と同じように、ティッシュペーパーを短冊のように切り、電極にセロテープで貼り付ける。これで完成である。図 3 の上左図は、箔を含む電極に荷電していない状態である。上右図は塩ビのパイプを衣服で摩

擦して、上部の針金電極に触れて荷電した場合である。負の電荷が荷電されている。ティッシュペーパーは極めて取り扱いが容易で、感度が高く、かつ破損する心配がない。ティッシュペーパーは通常 2 枚から成っているの、塩ビのパイプで 2, 3 回荷電すれば、上右図のように、それぞれが 2 枚に分かれる。2 枚を 1 枚にすれば錫箔の市販の箔検電器と同じである。

2 章で述べたように、紙箔の抵抗値は $\sim 10^{12} \Omega$ 程度で大きいために、紙全体に電荷が行き渡るのにやや時間がかかる。そのために箔の動きに数秒の時間遅れがあるが、これは却って電気良導体とそうでない材料の相違を理解するのに役立つ。

3-2 アルミニウム箔を使った箔検電器

図 3 の下左図は、キャラメルハイソフットの包み紙を水に浸して、紙と分離したアルミ箔を使用したもので、筆者の経験では、簡単に手に入るアルミ箔の中では最も薄いと思われる。クッキングアルミ箔でもよい。アルミ箔は剛性が大きいので、ステンレス線の電極の横棒を作り、その棒にアルミ箔が自由に回転できるように取り付けてスムーズに動くようにした²⁾。

箔の開き角を読み取るために、ガラス瓶の両面に分度器の目盛りをコピーした目盛り紙 (前面のガラスに貼る目盛りは視差を考慮して、やや縮小した目盛り) を貼り付け、アルミ箔の先端を両方の目盛りを合わせて読み取るようにすれば、読取りの誤差は ± 0.5 度以下のように小さくなる。感度はティッシュペーパーよりもやや劣るが、再現性はよく、精度はより高い。

4. 箔検電器による高抵抗や静電容量の測定

4-1 高抵抗の測定

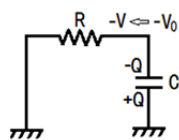


図 2 高抵抗 R の紙を接地した時の電気的等価回路

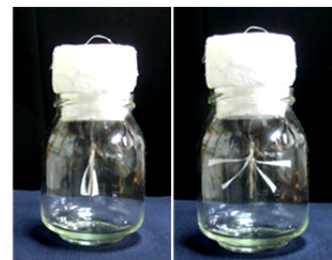


図 3 上左: ティッシュペーパーの箔検電器 (荷電していない)、上右: 同 (荷電している) 下左: アルミ箔の検電器 (荷電している)

例として、紙ファイルの表紙を長さ 140mm、幅 1～12mm のいろいろな幅に切った紙の抵抗値はどの程度であろうか？ このような高抵抗の測定は、特殊な装置がなければ通常は困難であるが、箔検電器はこうした測定に適している。



図4 アルミ箔検電器による高抵抗や静電容量の測定

図4の上左の図のように、紙の一方の先を 2pF の静電容量を持つアルミ箔検電器の電極にクリップで留め、他の先端を検電器の下に敷いたアルミ箔に接地する。塩ビのパイプを布などで摩擦して静電気を発生させる。この場合には負の電荷がパイプの表面に生じている。箔検電器の上部の針金の電極に塩ビパイプ近づけると箔が開く。その状態で電極に指先を触れると箔が閉じる。指を離してからパイプを遠ざけると箔は再び約 20～30 度を開く。この時に箔検電器に荷電された電荷は正の電荷 +Q で、電圧は +V₀ である。塩ビのパイプを針金の上部の電極に直接触れてもよい。この場合には負の電荷が荷電される。

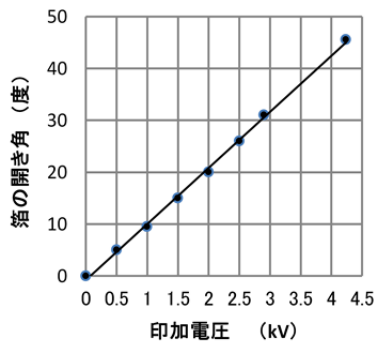


図5 アルミ箔検電器の印加電圧と箔の開き角の関係

荷電後の箔の開き角は時間の経過とともに小さくなり、箔は徐々に閉じる。箔の開き角と電圧の間には図5に示すように、角度が 50 度程度以下では直線的な関係がある。したがって、箔が閉じる時間から紙の抵抗値が求まる。最初 V₀ に充電された電圧（開き角度が θ₀ になる）が、時間経過 t（秒）と共に

電圧 V（角度 θ になる）に低下する。2章で述べた方法によって、箔の開き角が 1/2 になる時間 t_{1/2} を求めれば抵抗 R が得られる。

実際の測定は開き角が 30 度程度になるように荷電して、角度が 20 度になってから時間の計測を開始し、角度が 10 度になるまでの時間を求めた。ストップウォッチの代わりに 100 円ショップで買ったタイマーを使った。図6に測定結果を示す。この箔検電器の静電容量 C は手持ちの電子式テスター（デジタルマルチメーター）で測定して 2 pF であった。なお、静電容量は簡単な機器で測定できるが、対象とした紙のような高抵抗は簡単には測定できない。

紙の断面積を S（=厚さ d×幅 W）、長さを L、抵抗率（固有抵抗）を ρ とすれば抵抗 R は次式で表される。

$$R = \rho L/S = \rho L/(d \times W) \quad (4)$$

また、式（3）と（4）より次式を得る。

$$\log(t_{1/2}) = \log(\ln(2) \times \rho CL/d) - \log W \quad (5)$$

式（5）は、経過時間 t_{1/2} の対数と紙の幅 W の対数は -1 の勾配の直線関係になることを示している。図6にこの関係を示す。2回の測定はほぼ一致している。

幅 1mm、長さ 130mm の紙の t_{1/2} は 36 秒であったので、式（3）から、抵抗値 R は 2.6 × 10¹³ Ω が得られる。幅 10mm の紙は、t_{1/2} が 2.8 秒なので、約 2 × 10¹² Ω であった。図6の両対数目盛のグラフ上で勾配がほぼ -1 なので、表面漏洩電流の影響はほとんどないことが分かる。ただし、湿度の影響は大いに受ける。

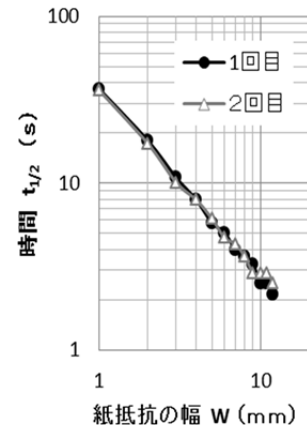


図6 いろんな幅 W の紙抵抗で接地した場合に、幅 W と箔の開き角が半分になる時間 t_{1/2} の関係

式（4）から紙の抵抗率 ρ を得ることができる。紙の厚さ d は約 0.5 mm であったので、抵抗率 ρ は約 (7.7～10) × 10⁷ Ω m になった。この値は上述のように湿度の影響を受けるので、冬季と夏季、晴天の日と雨の日では異なる。

4・2 コンデンサーの静電容量の測定

図 4 の上右図のように、小コップ 3 個の間にッキングフォイルを巻いて作ったコンデンサー（小コンデンサーと呼ぶ）を箔検電器に並列に付け、4.1 で使用した幅 10mm の紙で接地した。摩擦した塩ビパイプで荷電するが、この場合には、コップのコンデンサーの静電容量が大きいため、摩擦した塩ビパイプを検電器の上部の針金ないしクリップの金具にくっつけて、塩ビの負の電

荷を電極に直接移す。コンデンサーの容量が大きいため、20 回ほど繰り返し荷電する必要がある。3kV 程度の高圧電源があれば、それで荷電すれば容易

である。適当な角度（20 度以上）に箔が開くと荷電を止める。この荷電後の経過時間と箔の開き角の測定結果を図 7 に示す。図 7 には大コンデンサーの場合も測定しているが、このコンデンサーの場合には、摩擦静電気ではとても充電できないので、3kV の直流高電圧を電極に印加して充電した。

図 7 は片対数目盛りの方眼紙上でほぼ直線的に減少している。これは式（1）の関係が満たされていることを示している。 $t_{1/2}$ を求めるには、その開き角が最初の 1/2 になる時間を知るだけで良い。

小コンデンサーの場合の $t_{1/2}$ は図 7 から 3.1 分であった。したがって、式（3）と $R=2 \times 10^{12} \Omega$ から、静電容量 C は 132pF を得る。電子式テスターで測定すると 159pF であった。大コンデンサーの場合の $t_{1/2}$ は 13.9 分であった。したがって静電容量 C は 599pF を得る。電子式テスターで測定すると 654pF であった。箔検電器による測定方法はおおむね正しいと言える。

5. 摩擦静電気の実験

ティッシュペーパーを細く切って束ねた纏い（まとい）の下部を図 8 のように、クリップで挟み、導線の下クリップを図 8 の上左のようにストローに付けたセルテープに挟む。衣服で摩擦した塩ビパイプの先を、下のクリップの金属に触れると纏いは開く（上右）。こ

のクリップに荷電しやすいようにアルミ箔を挟んでおくとい。摩擦した塩ビのパイプを近づけると、中左図のように纏いは逃げる。中右のように、テフロンシートで摩擦した塩ビパイプを近づけると、下左のように纏いはやや近づいてくる。塩ビパイプと摩擦したテフロンシートを近づけると下右のように纏いは逃げる。この現象は、周期律表の第 7 族のフッ素と塩素の化学的性質の相違を良く表している。

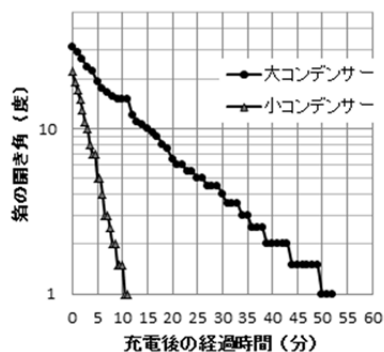


図 7 静電容量の大きなコンデンサーを箔検電器に並列に付けて、幅 10mm の紙抵抗で接地した場合の箔の開き角の減少の様子

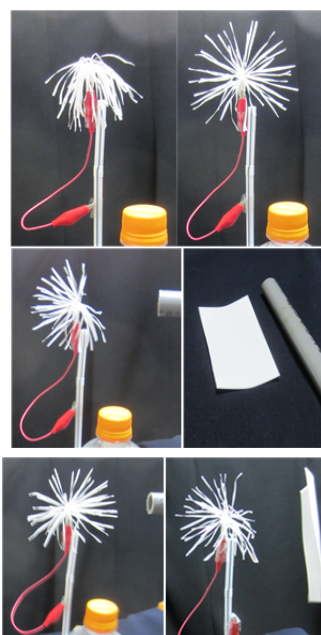


図 8 摩擦静電気によるティッシュペーパーで作った纏い（まとい）の実験。上左：荷電していない、上右：塩化ビニールのパイプを衣服で摩擦して負の電荷を荷電、中左：上右で使った塩ビパイプを近づけると纏いは逃げる、中右：テフロンシートで塩ビパイプを摩擦する、下左：このパイプを近づけると纏いは寄ってくる、下右：テフロンシートを近づけると逃げる。

6. まとめ

本報告ではティッシュペーパーを用いた箔検電器やアルミニウム箔を用いた箔検電器の手作りの仕方と、紙などの高抵抗の測定、コンデンサーの静電容量の測定について述べた。教育現場で若干とも活用して頂ければ幸いである。

文献

- 1) 森 千鶴夫：手作り箔検電器と高電圧、高抵抗の測定、愛知工業大学研究報告 第 46 号、平成 23 年、pp255-258
- 2) 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

(受理 平成 26 年 3 月 19 日)