

静電気学習教材の開発

—身の回りの静電気—

Development of teaching material for study of static electricity

—the static electricity on substances in the environment—

澁谷 翔・梅原香織・古屋康則・仲澤和馬・中村 琢*)

Sho Shibuya, Kaori Umehara, Yasunori Koya, Kazuma Nakazawa and Taku Nakamura*)

〒501-1193 岐阜市柳戸1-1 岐阜大学教育学部 理科教育

要 約

理科の電気分野「静電気」の単元で、演示実験等に使用する目盛付箔検電器を安価な材料で製作した。高電圧を発生させる回路を用いて、電圧と箔の開く角度の関係を求めた。箔に帯電する電気量を計算し、これまで定性的にしか扱えなかった静電気学習を、定量的に考察できる実験方法を提案した。

1. はじめに

中学校、高等学校における物理分野の電気では、「静電気」を扱う。中学校学習指導要領解説理科編では、「静電気と電流は関係があることなどを、観察、実験を通して理解させることが主なねらいである。」とし、「異なる物質同士をこすり合わせると静電気が起こり、それらの帯電した物体間に空間を隔てて力が働き、その力には引力と斥力の2種類があることを見いださせる」と記述している^[1]。高等学校学習指導要領解説理科編では、「電気と磁気」において、「電荷が相互に及ぼしあう力や電界(電場)の表し方を理解させることがねらいである。」とし、「摩擦帯電や箔検電器の実験、電界の様子を観察などを行うことが考えられる。」としている^[2]。

静電気は身近な現象であるがゆえに、多くの理科の授業では現象の確認と性質の定性的な理解にとどまっているように思う。身の周りの静電現象に結び付けながら、短い授業時間の中で簡単に実験ができ、なおかつ深い考察ができる教材にはどのようなものがあるだろうか。

学校現場でよく用いられる実験器具に箔検電器がある。箔検電器は、電荷にはたらく静電気力による金属箔の開き方を見ることにより、物体の帯電の有無や程度、電荷の正負などを調べる装置である。箔の開きを目視で確認するため、あくまで定性的な装置である。

そこで本稿では、箔の開く角度を測定する目盛付箔検電器を製作して、身の回りの帯電物体の電気量の比較ができるような実験方法を考えたい。電気量との関係に結び付けるには箔の開く角度と電圧との関係を知る必要がある。しかし静電気の電圧は非常に高く、また流れる電流も少ないということから、実際に電気量を測定することは困難である。本稿では、使い捨てカメラの内部にある高圧回路と、コッククロフト・ウォルトン回路を用いて高電圧を生じさせ、変化させる電圧と箔の開く角度との関係を導く。製作した装置はいずれも安価であるため、学校現場で使用できるものとする。また高校物理で学習する電荷の公式を用いて、データをもとに電気量の導出も可能とする。

2. 実験の原理

箔検電器に、負に帯電させた塩ビパイプを接触させると箔が開く。これは塩ビパイプの負の電荷と同種の電荷が箔に移るので、静電気力によって箔に反発力が生じるためである。このときに箔の開く角度を θ [°], 与えた電荷を Q [C] とすると、図1のように2枚の箔には等量の電荷 $Q/2$ [C] が蓄えられる。

* Tel:058-293-2249 (e-mail:nakamura@gifu-u.ac.jp)

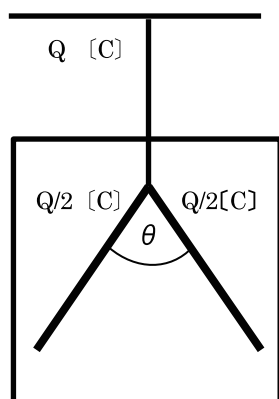
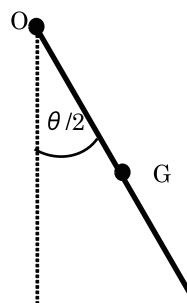


図1 箔検電器の模式図


 図2 片側の箔が $\theta/2$ °開いた様子

ここで片側の箔について考える。図2のように箔を吊るす支点をOとし、また箔の重心をGとする。片側の箔の質量を m [kg]、長さを L [m]、重力加速度を g [m/s²] とすると、箔の重心Gの位置エネルギー E_1 [J] は(1)式のように角度 θ に依存する。

$$E_1 = mg \cdot (L/2) \cdot \{1 - \cos(\theta/2)\} = 2mg \cdot (L/2) \cdot \sin^2(\theta/4) \quad (1)$$

また片側の箔に蓄えられる電荷が $Q/2$ [C] のときに生じる電圧を V [V] とすると、箔の静電エネルギー E_2 [J] は、

$$E_2 = (1/2) \cdot (Q/2) V = (1/4) \cdot QV \quad (2)$$

となる。箔が静止したときには $E_1 = E_2$ となると考えると、

$$2mg \cdot (L/2) \cdot \sin^2(\theta/4) = (1/4) \cdot QV \quad (3)$$

となり、電荷 Q は(4)式ようになる。

$$Q = \{8mg \cdot (L/2) \cdot \sin^2(\theta/4)\} / V = \{4mgL \sin^2(\theta/4)\} / V \quad (4)$$

箔検電器に高電圧をかけたときの箔の開く角度を測定すると、(4)式を通じて、角度と電荷の関係を導くことができる可能性があり、本稿では実験で確認する。

3. 実験器具の製作

3-1. 材料

実験器具を安価に製作するために、できるだけ身近な材料を使用した。箔検電器と高電圧回路の製作に用いた材料を、それぞれ表1と表2に記す。

表1 箔検電器の製作に使用する材料

材 料	サ イ ズ	個 数	価 格
エナメル線	外径 1.9×10^{-2} cm, 長さ5.0 cm	1本	26円
プラスチック容器	210 ml	1個	21円
真鍮棒	外径0.10 cm, 長さ5.0 cm	1本	3円
プラスチック円盤	10cm ³	1個	—
アルミ箔	3.0×0.50 cm ²	1枚	—
方眼用紙	3.0×6.0 cm ²	1枚	—
合 計	—	—	50円

表 2 高圧回路の製作に使用する材料

材 料	詳 細	個 数	価 格
FUJIFILM 使い捨てカメラ	写ルンです シンプルエース	1 個	—
株式会社アイテック 整流用ダイオード	1N4007, 耐電圧1 kV	30個	180円
秋月電子 セラミック コンデンサ	電気容量1000 pF, 耐電圧 2kV	30個	900円
合 計		—	1080円

3-2. 自作目盛付箔検電器の製作工程

① 5 cmの真鍮の棒を図3のように曲げ、箔を固定するためのエナメル線を真鍮の棒に巻きつけて先端が約1 cmはみ出るようにする。

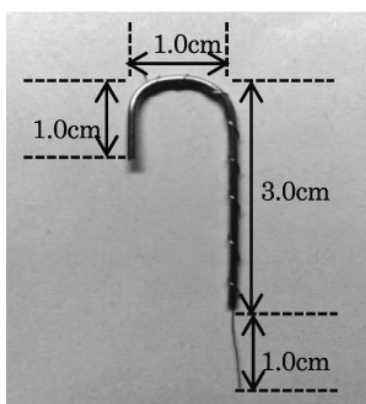


図3 真鍮棒の加工

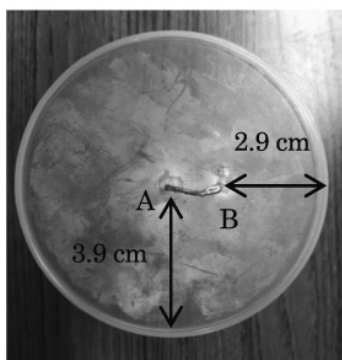


図4 円盤の平面図

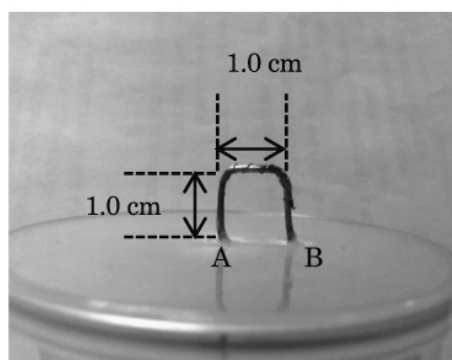


図5 円盤と真鍮棒の固定

② プラスチック円盤の中心に図4のように穴をあけ、①で製作した真鍮棒を通して図5のように固定する。

③ エナメル線に吊り下げる箔は菓子の包み紙から取り出す。本稿では森永の「Hi-Soft」の包み紙を使用した。この包み紙はアルミ箔にビニール等を貼り合わせた合成素材である。包み紙を1分程度熱湯に浸してから、爪で紙を剥がすと薄いアルミ箔だけが残る。これを箔に使用する。図6(a)のように縦3 cm, 横0.5 cmに切断し、エナメル線を通す穴をあける。図6(b)のように箔の穴から上側(約5 mm)を約45°の角度で折り曲げる。このように折り曲げることにより、箔を固定でき、箔が開いた際に2枚の箔が接触するのを防ぐことができる。

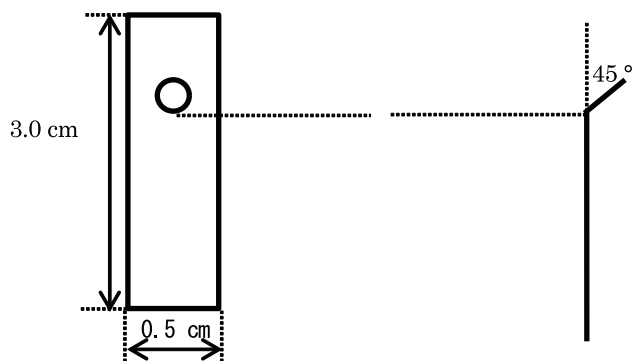


図6(a) 箔の平面図

(b) 箔の側面図

- ④真鍮棒からはみ出ているエナメル線を，図7のように半径0.3cmの円を作るように折り曲げ，箔を吊るす。

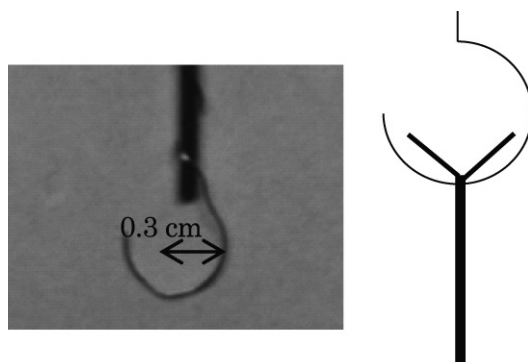


図7 エナメル線と箔の形状

- ⑤箔の開く角度を測定する目盛り紙を製作する。図8のように半径3.6cmの半円形の方眼紙に，角度 10° 間隔で目盛り線を引く。半円の弦の両端から0.7cmの点C，Dと中心Oを図のようにとる。中心から 40° をなす線と円周との交点をE，Fとする。直線CEおよび直線DFに沿って方眼紙を山折りにする。折った部分がプラスチック容器内に固定する際ののりしろになる。

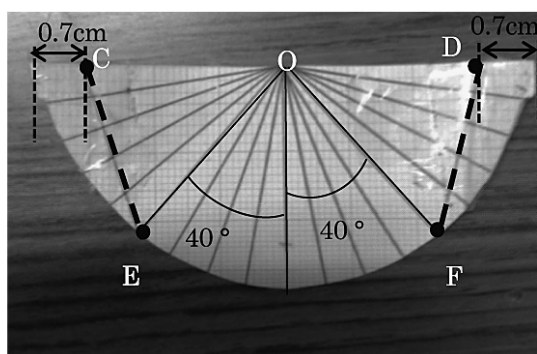


図8 目盛り紙

- ⑥目盛り紙は 0° の線が容器の底面に垂直になるように，両端ののりしろを容器にテープで貼り付ける。
 ⑦蓋をはめて，アルミ箔が 0° の位置にくるように微調整する。図9が完成した目盛り付箔検電器である。負に帯電した塩ビパイプを箔検電器に近づけると，図10のように箔は 40° 開き，製作した箔検電器が機能していることを確認した。

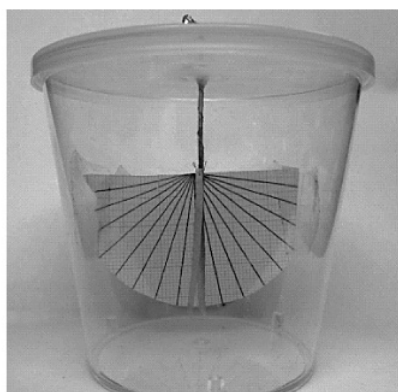


図9 自作目盛り付箔検電器

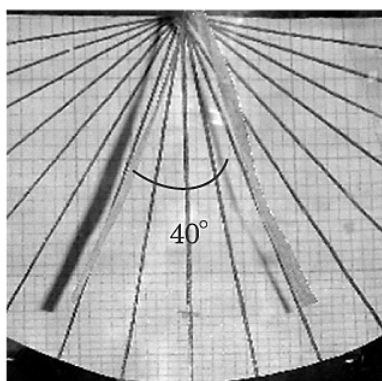


図10 塩ビパイプを近づけた時の箔の開き

3-3. 高圧回路の製作工程

使い捨てカメラ（レンズ付きフィルム）の内部に1.5Vの電池を昇圧する回路が組み込まれている。カメラを解体して内部から回路を取り出し、昇圧回路として使用する。不要な部分を取り除いた基盤の表側は図11 (a) のようになる。これを図11 (b) のように、基板裏のC, D, Eの部分で半田づけしてショートさせる必要がある。この作業によりA, Bから昇圧された交流を取り出すことができる^[3]。

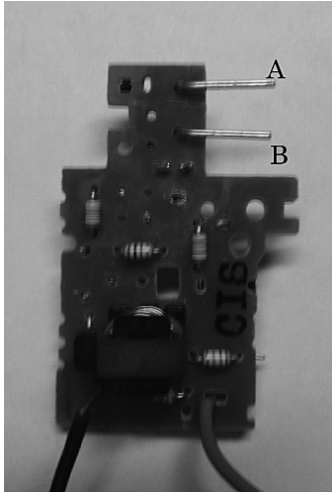
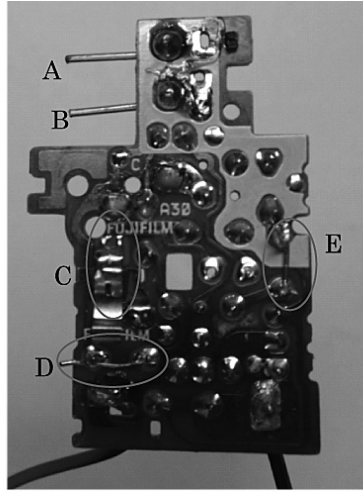


図11 (a) 基板表



(b) 基板裏

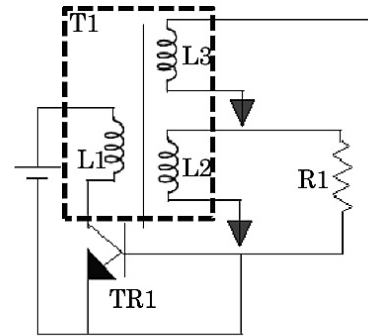


図12 昇圧発振回路^[3]

この昇圧発振回路の原理図が図12である。電源電圧を入れるとトランジスタTR1と昇圧トランスT1のコイルL1とL2により発振を開始する。L3にはL1のとの巻き数に比例して昇圧された交流電圧が発生する。R1は抵抗である。

本研究では、コンデンサとダイオードを用いて比較的簡単に製作できるコッククロフト・ウォルトン回路をカメラの昇圧回路に付加して、高電圧を発生させる^[4]。表2に示したコンデンサとダイオードを用いて、図13 (a) のように半田付けした。図13 (b) は原理図であり、交流電圧を入力するとダイオードD1によりコンデンサC1を充電、ダイオードD2によりコンデンサC2を充電、以下同様にコンデンサC3, C4に充電される。その結果C2, C4はカメラの昇圧回路のみの場合の出力電圧と比べて2倍近く充電され、図13の回路の場合、4倍の直流電圧が得られる。ダイオードとコンデンサの組を増やしていくと出力電圧は、6倍、8倍、10倍…と増加させることができる^{[4][5]}。

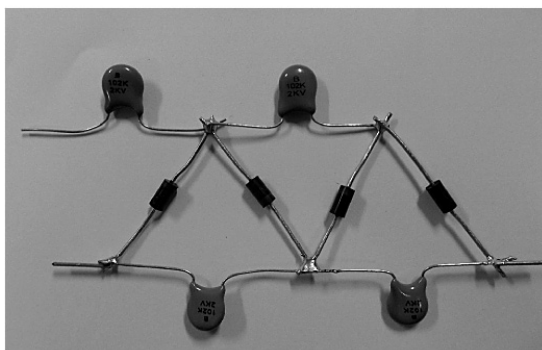
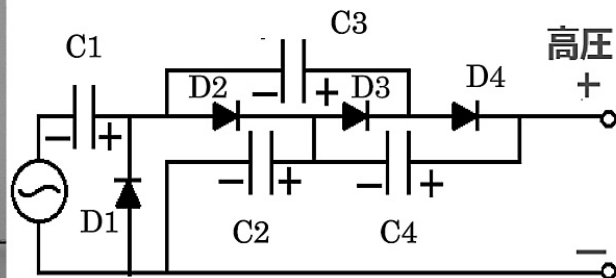


図13 (a) 入力電圧を4倍に昇圧する回路



(b) 原理図^[5]

完成した高圧回路が機能するかを評価した。高圧回路に直流電圧を加えたときのカメラ出力電圧及

び、2倍、4倍、6倍、8倍、10倍の各昇圧回路に適用した出力を測定した。結果は図14のように入出力電圧が比例関係となり、期待どおり昇圧できることを確認できた。

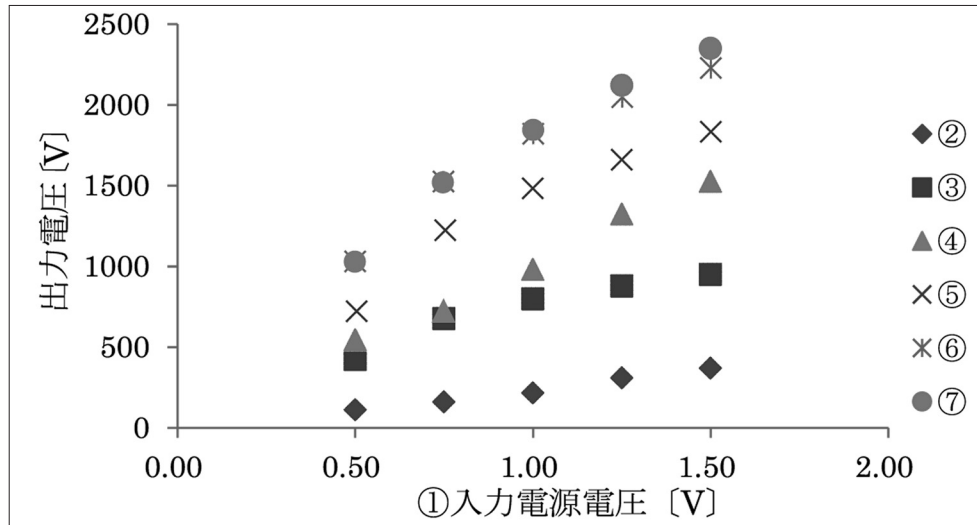


図14 カメラの回路に入力した直流電圧と得られた出力電圧の関係。横軸の①は入力電源電圧，縦軸の②はカメラ基盤の出力電圧，③以降はカメラの基盤に昇電圧回路を組み合わせたときの出力電圧である。③は2倍，④は4倍，⑤は6倍，⑥は8倍，⑦は10倍の電圧回路を付加したときの出力電圧。

4. 実験方法

使い捨てカメラの回路とコッククロフト・ウォルトン回路を組み合わせた昇圧回路を用いて箔検電器に高電圧をかけ、出力電圧と箔の開く角度を測定した。

- 図15の回路図のように装置を組む。最初に2倍電圧回路を用いる。このとき箔検電器のプラスチック容器底面に一辺6.0cmの正方形のアルミホイルを置き、端子をつなげアースを取る。アルミホイルは内部の箔に触れないようにする。
- 0Vの時の箔の位置を確認してから、入力電圧を、0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50 Vと順にあげていき箔の開く角度を読み取る。使い捨てカメラの回路は耐圧が1.50Vであるので、それ以上の電圧をかけないようにする。実験中は回路には触れないように注意する。

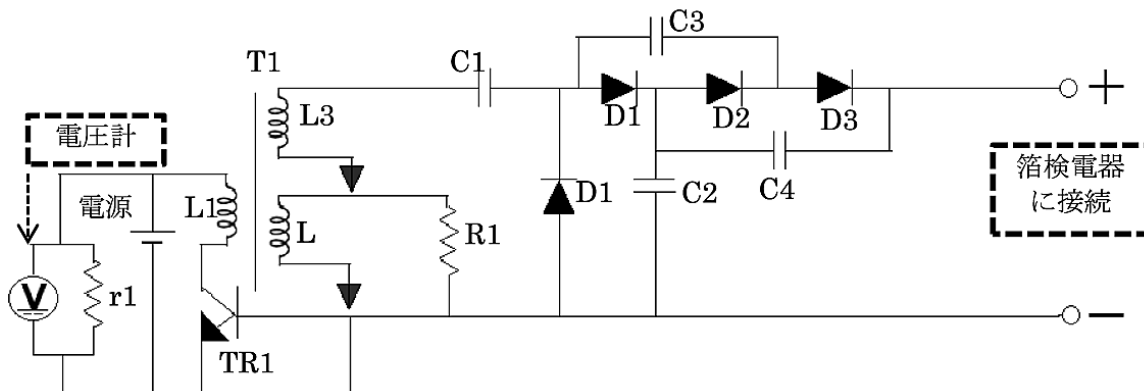


図15 実験の回路図

- 実験が終わったら入力電源がOFFになっていることを確認してから、容器の内部の箔と底面のアルミホイルをショートさせる。放電する瞬間、「パチッ」と激しい音がする。放電させた後、4, 6, 8, 10倍電圧回路を同様に調べる。

5. 結果の解析と考察

実験で得られた、箔検電器に加える電圧と箔の開く角度との関係を図16に表す。電圧と箔の開きには比例関係がある。多少データがばらついているが、これは箔が帯電した直後に急激な静電気力が生じ、アルミ箔に折り目がついてしまうことの影響であると考えられる。市販の箔検電器で使用されるような、薄く滑らかな金属箔にすればより詳細な角度の変化を確認できると考えられる。2500Vよりも高い電圧では、箔が静電気力で飛んでしまうため使用できない。

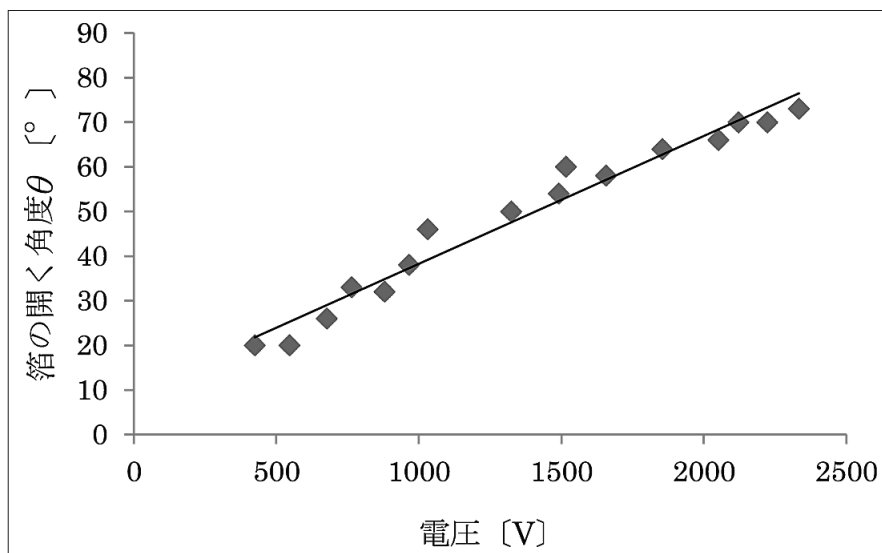


図16 出力電圧と角度の関係

(4) 式から電圧を電気量に変換できる。実験で得られた箔の角度と電気量の関係は図17のようになる。この箔検電器の箔の角度を測定すれば、帯電した電気量を求めることができる。

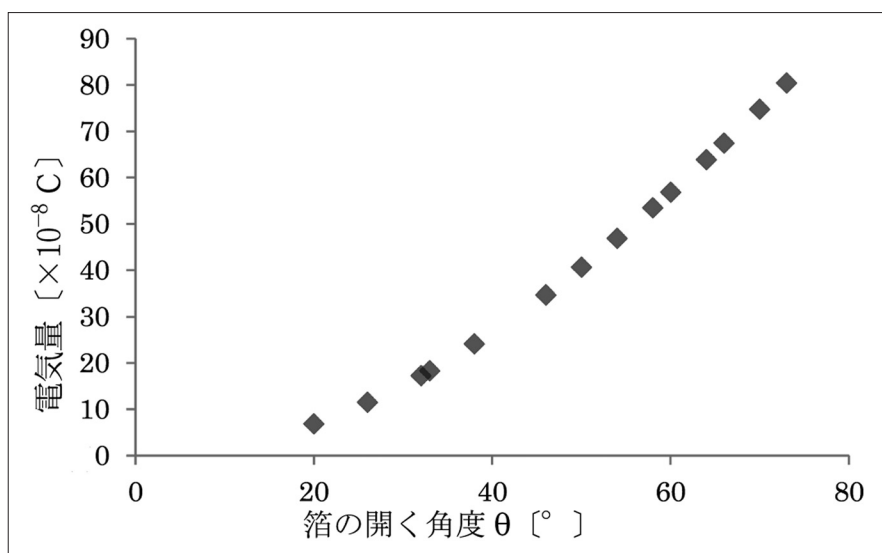


図17 角度と式(4)から求めた電気量の関係

本稿の初めに塩化ビニルパイプと使用した際、製作した箔検電器の箔の開きは40°を示した。図17より塩化ビニルパイプにより生じる電圧は1kV程度だと考えられ、電気量は(2)式より約 $25 \times 10^{-8} C$ であると考えられる。

6. まとめ

目盛付箔検電器と、使い捨てカメラの回路にコックロフト・ウォルトン回路を付加した昇圧回路を製作した。これまで定性的な使用が一般的であった箔検電器の静電気実験を、箔の開く角度を測定して蓄積する電気量を、定量的に推定することを可能とした。箔の角度と電気量との関係を求めた。作成した箔検電器は電気量に応じて箔の角度が速やかに変わり、反応も良いので、静電気力の大小を確認するなどの通常の理科授業で使用はもちろん、高等学校の物理における電気量の測定にも耐えるものである。しかし、この実験は高電圧を取り扱うために、教師の演示には問題ないが、生徒が用いるとなると感電予防の工夫が必要である。

実験では電圧の高い方の端子を箔に接続しアースの端子を下のアルミホイールに接続して、電圧を印加していたが、端子を逆にしてもまた箔が開くのを確認できた。このことから電子を箔にためることも可能であり、授業の場での更なる活用が期待できる。

今後の課題は、算出した電気量が正当であるか否かを実測する必要がある、なおかつ角度の読み取り誤差を小さくすることである。また理想的には、アルミ箔もより薄くより滑らかに広がるような金属箔を選定する必要があると考えられる。

引用文献

- [1]「中学校学習指導要領解説(理科編)」, 平成20年9月, p.34.
- [2]「高等学校学習指導要領解説(理科編)」, 平成21年12月, p.43.
- [3] <http://homepage2.nifty.com/pascal/jtool53.html> おもしろ理科実験
- [4]「高校物理雑記帳」, 村田憲治 著, 工学社, 平成23年3月, pp.72-73
- [5] <http://www.alles.or.jp/~taihoh/science/cockcroft.htm> 倍電圧整流
- [6]「高等学校物理Ⅱ」, 数研出版, 平成15年3月, p.88