

物理教育の話題： 箔検電器実験による電位概念の形成とその教材化

伊藤 克美, 小林 一夫^a, 小栗 美香^b, 高野 友美^c, 五十嵐 尤二
新潟大学教育学部物理, ^a 元千葉県立土気高校,
^b 新潟大学大学院自然科学研究科, ^c 宇都宮市立泉が丘中学校

2017 受理

概要

電圧またその背後にある電位は、抽象的で捉えにくい概念である。電磁気学の歴史を振り返ると、電位概念を最初に提唱したボルタは、電気量とは独立に、麦わら箔検電器の麦わら（今日では箔）の開く角度に比例する物理量として電位を導入した。本稿では、箔検電器による電位の視覚化を通じた電位概念の形成とその教材化について論ずる。

目次

- 1 はじめに
- 2 電位とは何だろうーその視覚化にむけてー
- 3 電位概念を意識した箔検電器実験
 - 3.1 箔検電器の箔の角度をコントロールし電位を視覚化する
 - 3.2 接触している金属はすべて同じ電位となっている
 - 3.3 電気量が同じでも電位は一般に異なる
 - 3.4 電荷は電位の高いほうから電位の低い方へ移動する
 - 3.5 電位と電池の電圧との関係
 - 3.6 電荷の移動の可視化
- 4 おわりに

1 はじめに

小中学校の理科で電気分野を苦手とする生徒が多い。2003年の国立教育政策研究所の調査では、児童生徒が理科で「よくわからなかった」と回答した上位6分野のなかに、小中いずれも電気分野が入っていた [1]。電気分野を苦手とする原因の一つは、電流の発生原因である電圧の扱い方にあるように思われる。回路の中で電気の粒が動いて電流となるというイメージが描かれても、その粒を動かす働きをもつ電圧の概念が小学校ではでてこない。また、中学校でも、摩擦によって生じる静電気がある条件のもとで空気中を移動する放電現象などを扱い、実際に移動する電気の実体が電子であることにふれるが、放電を引き起こす原因が電圧にあることにはふれていない。「電流を流

な高さの差」などのイメージを持っており、これを乾電池の接続問題に応用できる学生は、物理2科目履修者でもその3割程度にとどまっていた。これは、中学校や高校で電位を直接測定したことがないことにも起因するであろう。通常、オームの法則によって電圧の概念が導入されるが、仮に電位の差が電圧であるとして電位概念が導入されても、電位概念を導入する必然性もその物理的意味も必ずしも明らかではない。これでは生徒が理解に戸惑うのは当然かもしれない。電位概念の形成は困難な課題であることがわかる。

そこで、電位概念の形成に向けて次のような提案をしたい。まず、小学校段階でも可能なら「電圧＝電流を流す働きの強さ」であることに触れ、2つの乾電池の直列接続と並列接続の効果の違いを実験だけでなく電圧の違いとして説明する工夫が欲しいと考える。中学レベルでは、電気回路を扱う前に摩擦による静電気現象の所で電位を導入したい。ここで、抽象的である電位の概念をより身近なものとして、いわば視覚的に捉える「秘密兵器」がある。これが箔検電器である。

箔検電器は通常、帯電体を近づけると箔が開いたり、帯電した箔検電器に別の帯電体を近づけた時の箔の開閉で帯電体の電荷の符号を決めるなど、もっぱら電気量の大小や電荷の符号を観察する装置として用いられてきた。

箔検電器は通常2つの仕方で用いられる：1) 帯電体を近づけたときの箔の開きの大きさから電気量の大小を観察する；2) 帯電した箔検電器に別の帯電体を近づけた時の箔の開閉で帯電体の電荷の符号を決める。

しかし、電磁気学の歴史をたどると箔検電器が電位概念の形成と深く関わっていることが明らかになってきた [4]。この点で中心的な役割を果たしたボルタによると「電位とは箔検電器によって測定されるもの」とされ、電気量と独立な物理量として導入された [5]。彼は、「箔検電器の箔の開く角度が大きければ箔検電器が持つ電位（の絶対値）も大きい」と考えたが、この推論は実験的に確認されている [6]。

以上を踏まえて、われわれは、現在学校現場で使われる機会の少なくなった箔検電器を簡素な電位計として活用し、電位概念を学ぶことを提案した [7]。本稿では、より具体的に電位概念の形成に関する教材の開発と展開を提示することとする。

3 電位概念を意識した箔検電器実験

箔検電器のふるまいは、通常、静電誘導によって説明される。静電誘導は、導体間の電氣的な相互作用によって導体表面に局所的に電荷が生じる現象である。例えば、帯電していない箔検電器に帯電体が接近すると、静電誘導によって箔検電器の金属円盤部分に帯電体と異符号の電荷が、また箔には帯電体と同符号の電荷が生じる。しかし、箔検電器全体としては電荷はゼロのままである。このことは、導体の電氣的状態を特徴づけるには電気量だけでは不十分であることを示唆している。ここで登場するのが「電位」である。

以下、電位を意識して次のような実験を行う。

3.1 箔検電器の箔の角度をコントロールし電位を視覚化する

箔検電器の実験を行う上で、はじめに箔の開き方をある程度コントロールすることが求められる。帯電棒を近づける方法では、箔検電器の静電容量の関係もありなかなか難しいものがある。ここでは、ボルタが考案した電気盆の方法を用いて箔を開かせることを考える。さらに、箔検電器に金属の物体（例えば金属缶）を乗せて静電容量を増やす。

電気盆と静電容量の調整によって、箔の開く角度をある程度自由にコントロールできることを以下で説明する。

【実験1】樹脂（あるいは単に発泡スチロールなどでよい）と柄付金属板からなる電気盆を用いて金属を帯電させる方法

- ① 樹脂を毛皮で摩擦する。
- ② 柄付金属板を樹脂にのせ、指で触る。
- ③ 柄の部分を持って金属板を持ち上げる。この時、金属板は正に帯電している。

この方法を用いると、柄付金属板の大きさを選ぶことによって、集める電荷量を簡単に調整することができる²。

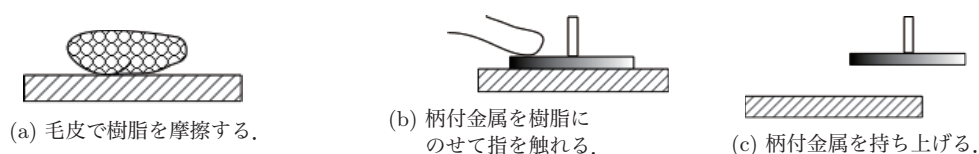


図2: 電気盆を用いて金属を帯電させる。

【実験2】箔検電器の箔を開かせる。

帯電した柄付金属板と箔検電器を用意する。

- ① 箔検電器をアルミフォイルのような金属の上に載せアースする。
- ② この柄付金属板を閉じた箔検電器の上部金属円盤に近づける。近づけただけで箔は開く。遠ざければ箔は閉じる。
- ③ この柄付金属板を閉じた箔検電器の上部金属円盤に接触させる。接触によって箔は開く。金属を遠ざけても箔は開いたままである。

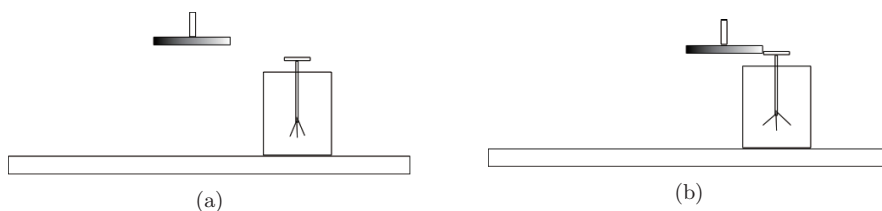


図3

【電位の定義について】

箔検電器の箔が開いたとき箔検電器の中心部分の金属の電位は高いといい、箔の開き方でその電位の値を測定することができる。電位は、概ね角度に比例する³。

² ボルタは様々な大きさ（小さいものは直径5 cm、大きいものは直径30 cm以上）の金属板を用いて実験を行っていた。

³ 正確には、箔の開きが小さければ、その角度は電位の絶対値に比例することがわかっている。ここでは、簡単のため電位の符号は考えないことにする。

②と③より、金属の電位は、帯電した他の金属を近づけただけでも上昇し、また、金属に電荷を与えたときも上昇することがわかる。つまり、金属が電位を持つのはこの2つの要因による。

【実験3】金属缶⁴をのせた箔検電器の箔をいろいろな角度に開かせること。

これから説明する実験では、箔検電器の箔の開き方ある程度コントロールする技術が必要となる。まず最初に、そのための方法を紹介する。

- ① 様々な大きさの柄付金属板を用意する。
- ② 箔検電器の上に帯電させようとする金属缶をのせる。
- ③ 柄付金属板を帯電させ、それを箔検電器の上の金属缶に接触させ、箔の開き方を見る。
- ④ 箔が $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$ くらい開くような柄付金属板を選んで、同様の手続きを繰り返せばそれ以上の開きを実現することができる。

この方法を用いて、以下の実験を行う。

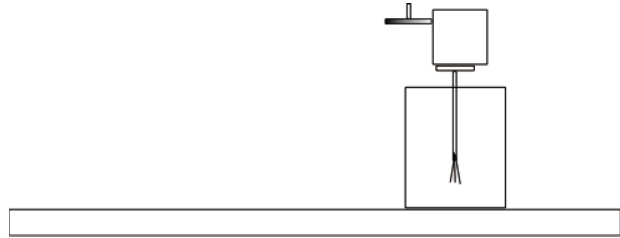


図 4

3.2 接触している金属はすべて同じ電位となっている

【実験4】2つの箔検電器を用意し、上部の金属円盤に金属板を渡すなどして接続し、容器同士も金属で接続する。すなわち、並列に接続する。

実験1の要領で帯電させた柄付金属板を、箔検電器にのせた金属板に近づける。このとき、2つの箔検電器の箔は同じように開く。また、この柄付金属板を箔検電器にのせた金属板に接触させても、2つの箔検電器は同じ振る舞いをする。

アースした容器の電位に対して、2つの箔検電器の箔は同じ電位にあるために、2組の箔は同じように開くものと理解される。

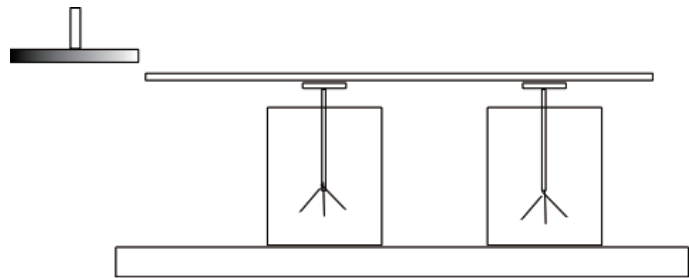


図 5

⁴空缶は、表面がコーティングされている場合が多いので接触部分は削っておくこと、また、空き缶や割りばしをアルミホイルなどで包んだものを用意してもよい。これら場合もアースしたとき電荷が残留しないよう注意が必要である。表面が加工されていない金属の板や棒を使用の方が箔検電器の振る舞いは安定する。

【実験5】箔検電器を3つ並列接続して同じ実験を繰り返す。やはり、3組の箔が同じくらい開く様子が観察できる。

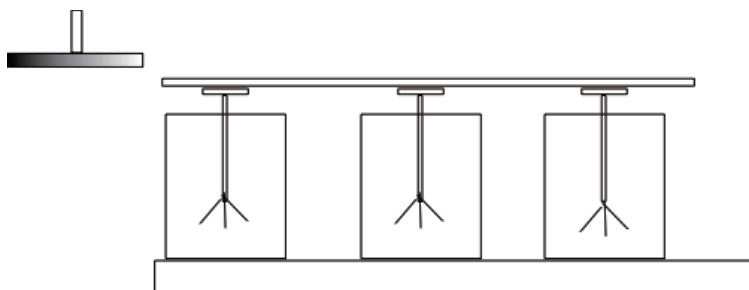


図 6

【実験6】箔検電器の上に大きさの異なる金属缶をのせ金属缶を導線で接続する。電気盆で帯電した柄付金属板を近づけたり接触させたりしても、2つの箔検電器の箔の開き方は同じである。

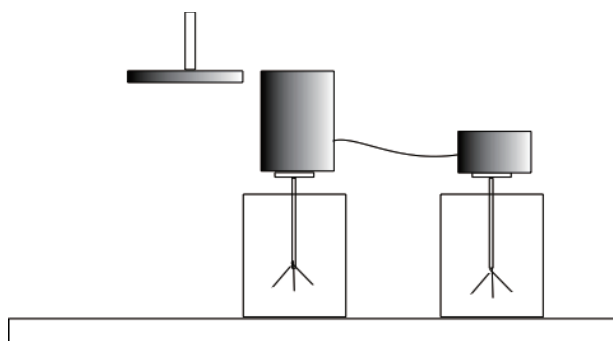


図 7

以上のことから、金属で接続された金属はすべて同じ電位となることがわかる。ただし、電荷の移動は終わっているとす。

3.3 電気量が同じでも電位は一般に異なる

【実験7】 箔検電器に電荷を与え、箔を大きく開かせておく。次に帯電していない金属缶を箔検電器にのせる。さらにその上に帯電していない同じ大きさの金属缶をのせる。この過程での箔の開き方の変化を観察する。

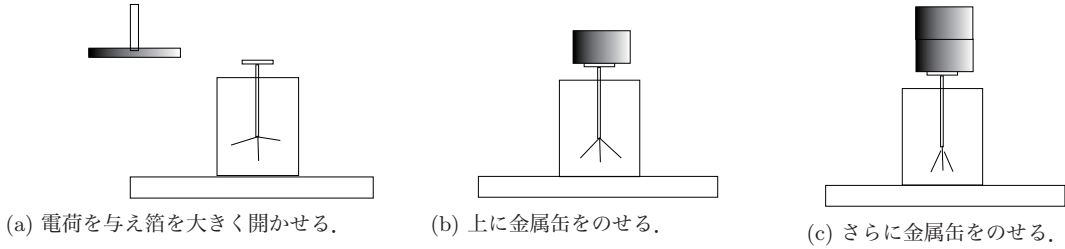


図 8

帯電していない金属缶を帯電した金属缶にのせても全体の電気量は変わらない。しかし、箔の開き方は小さくなっていく。つまり、電位は低くなっていく。このことから電位（箔の開き方）と電気量は別物であり、箔の開き方だけでは電気量を測定することはできないことがわかる。

3.4 電荷は電位の高いほうから電位の低い方へ移動する

ここでは、電荷の量（電気量）の大小とは無関係に、どんな場合にも電荷は電位の高い方から低い方へ移動することを確認する。

【実験 8】2つの箔検電器を用意し、それぞれに電気量を与え異なる電位にしておく。例えば図のように右側の箔検電器の開き方を大きくし、左側の開き方を小さくする。（すでに述べた箔検電器の開き方をコントロールする方法による。）

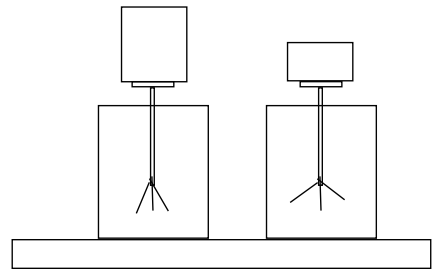


図 9

この2つを導線で結ぶと、電位の高い方（箔の開き方が大きい方）から低い方（箔の開き方が小さい方）で電荷が移動し、電位が同じになって箔の開きが同じになる。

箔の開き方を反対にしても（つまり、左を大きくし右を小さくしても）導線で結んだときは箔の開きは同じになる。つまり、箔の開きが大きい方から箔の開きが小さい方へ電荷は移動する。

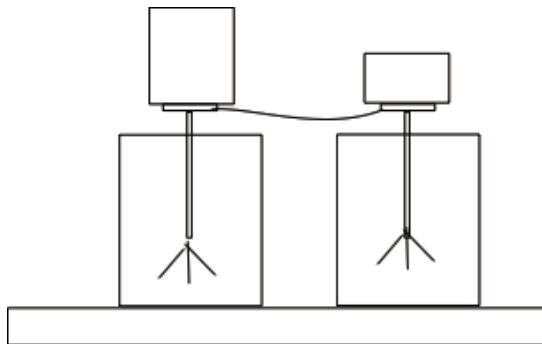


図 10

この原理によりライデン瓶への充電の現象を理解する。

【実験9】ライデン瓶の充電

箔検電器 A には実験7と同様に金属缶をのせ、箔検電器 (B) にはライデン瓶に接続する。電気盆の柄付金属板に電気をためて、箔検電器 A に接触させる。箔検電器 A の箔が開く。次に、柄付金属板を遠ざけて、箔検電器 A と箔検電器 B を接続させる。箔検電器 B つまりライデン瓶に電荷が蓄えられる。これを繰り返す。A の箔の開きが B よりも大きければ、いつでもライデン瓶に充電が可能である。

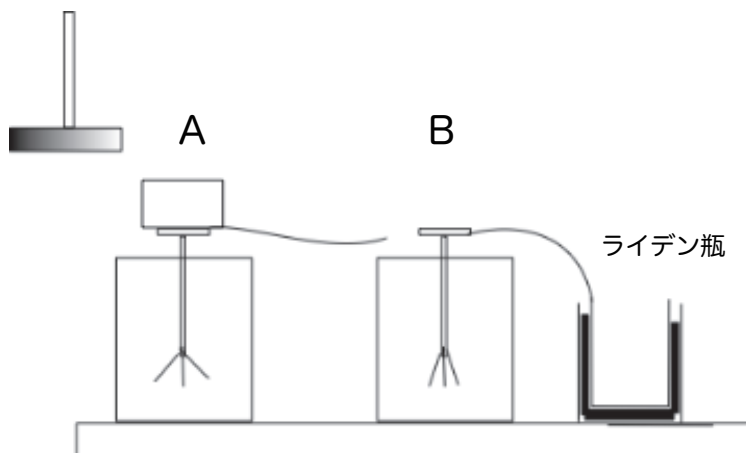


図 11

3.5 電位と電池の電圧との関係

電池を使っても箔検電器の箔を開かせることが可能である。このことは、電池の電圧と箔検電器の電位との間に密接な関係があることを示している。さらに、電気回路において電流として流れる「電気」と静電気現象で箔検電器の箔を開かせる「電気」が同一のものであることを示している。諸々の電気現象における関連性や同一性は、ファラデーによって各種の実験によって確認されているところであるが、この実験もその一つである。

【実験10】 箔検電器に9Vの電池を直列に10個程接続して、箔検電器の金属円盤と箔検電器をのせたアルミホイールに電圧をかけて箔を開かせてみる。

100Vだと箔がわずかに(鉛直軸から10°程度)開く⁵。

3.6 電荷の移動の可視化

2個の箔検電器をタコ糸などで接続すると電荷がゆっくり移動することが観察できる。

⁵直流電源装置を使って500Vまであげると40°～50°程度開くことが確認できる。

【実験11】3mほどのタコ糸を用意し、ピンと張った状態でその両端を2個の箔検電器の金属円盤にセロテープで固定する。箔検電器を帯電させて2つ箔検電器の箔が同じ角度で開くようにする。片方の箔検電器をアースしたまま、もう片側の箔検電器の箔が閉じるまでの時間を計る。

タコ糸は絶縁体であるが、高電圧のもとではゆっくりと電荷が移動することが知られている。この実験では（タコ糸の種類にもよるが）、電荷の移動には数十秒かかる。

4 おわりに

ボルタが「帯電体から電荷が離れようとする度合い、帯電体間の引力や斥力の度合い」と表現した物理量が電位である。この捉え方には、「潜在的な能力の高さ」という意味合いと「電気張力」という意味合いとの両方が含まれていると考えられる。前者はその後ポテンシャル概念へと、後者はオームの法則などにつながっていく。

ボルタは、複数の検電器を並列接続して、性能の異なる検電器の麦わらの開き方の違いを比較していた。並列接続での「等電位性」を巧みに利用していたことになる。本稿では、麦わら（箔）検電器を使って電位概念を提唱したボルタの考え方に沿って、教材化を試みた。

箔検電器の実験は、静電気現象に特有の困難がある。天候、特に湿度に左右され、電荷が空気中に逃げてしまったり、場合によっては挙動が不安定だったりすることも起こる。上の実験では、電気容量を増やすために箔検電器と金属缶の接続を考えたが、表面が加工されていない金属棒などを用いる方が振る舞いは安定するようである。

検電器の構造について歴史的に見ると、初期の検電器には容器がなかった。フランクリンなどは、ブリキのような金属の先に縫い糸の束を絹糸でくりつけたような素朴な容器なしの検電器を用いていた。ボルタの麦わら検電器は容器つきであった[8]。

箔検電器が簡素な電位計とみなせるためには、箔が箔検電器以外の帯電体の電場の直接的影響を受けにくいように遮蔽する必要がある。容器の存在は重要である。実際、箔と金属円盤を容器から取り出してしまうと、容器の内部にある時と比べて箔の振る舞いがきわめて不安定になってしまう。

また、容器として通常用いられているガラスは絶縁体ではあるが、2つの箔検電器をガラス棒で接続すると電流が流れることが確認できる。高電圧のもとでは、ガラス容器はむしろ金属に近い性質を持つと考えられるかもしれない。容器としてガラスが用いられているのはそのためであろう。しかし、遮蔽効果を高めるには、容器の素材として、通常のガラスよりは金属部分を増やす方が望ましい。実際、高価ではあるが、二つの側面はガラス板で、箔と金属円盤を連結する心棒を囲む絶縁体以外は、直方体の残りの面がすべて金属で覆われている箔検電器が市販されている。

容器を金属にしてしまうと、箔検電器を導体の集まりすなわち導体系として扱って、「遮蔽コンデンサーモデル」といったものを考えることができる。このモデルを使って、箔検電器の電位が箔の角度の単調増加関数で記述でき、角度が小さければ両者が比例関係にあるというボルタの推論を理論的に証明できる[9]。

ここで示したように、箔検電器を使った実験によって「電位に差があると電位が同じになるまで電荷が移動する」ことが確認できる。箔検電器実験では電位差すなわち電圧はすぐになくなってしまいが、電圧を恒常的に作り出す電池などの電源装置があれば、長い時間電流を流すことができる。電流を生み出すものは電圧であり、電圧概念の獲得こそが電気回路の深い理解のために重要であると考えられる。

箔検電器は、扱いにくいところもあるが、シンプルで奥深い実験道具である。

本研究は、科学研究費補助金「基盤研究(B)」(課題番号15H02912F, 15H02913F)の助成を受けて行った。

参考文献および注

- [1] 国立教育政策研究所 平成 15 年度小中学校教育課程実施調査状況調査質問紙調査結果一理科.
- [2] 高野友美 平成 28 年度新潟大学大学院教育学研究科修士論文.
- [3] 小林翔兵, 伊東明彦 宇都宮大学教育学部教育実践総合センター紀要 第 3 号 (2013) 209.
- [4] 例えば, G. Pancaldi *Volta: Science and culture in the age of enlightenment*, Princeton Univ. Press (2003).
木原壮林 Review of *Polarography* **60** No.1 (2014) 59.
小林一夫 「学生と教師のための電磁気学史」,
<http://www.ed.niigata-u.ac.jp/~itoh/EMhistoryv1.pdf>
- [5] A. Volta and H. George Phil. Trans. **72** (1782) 237.
- [6] 森千鶴夫 愛知工業大学研究報告 **49** (2014) 159.
- [7] 五十嵐尤二, 伊藤克美, 小林一夫, 高野友美 「電位概念の形成を促す箔検電器実験」,
大学の物理教育 **23** (2017) 158.
- [8] 新訳ダンネマン大自然科学史 三省堂 安田徳太郎 訳・編 第 7 巻 (1978) などにボルタの麦
わら検電器のスケッチがある.
- [9] 五十嵐尤二, 伊藤克美, 小林一夫 「箔検電器の物理と電位概念」, 投稿準備中.