

ハトメを利用した等電位線測定

設楽 恭平

Drawing Isoelectric Lines using Eyelets

Kyohei Shitara*

Abstract: In our previous experiment on drawing isoelectric lines, we employed brass tacks as point electrodes. Nonetheless, the voltage on conductive paper proved to be unstable due to variations in the contact area between the conductive paper and brass tacks, influenced by the pressing force applied to the tacks. To address this issue, we substituted eyelets for brass tacks as electrodes and enhanced our experimental equipment to achieve more stable measurements.

Key Words: Isoelectric line, Contact resistance

1. はじめに

冬の乾燥した日に、ドアノブとの間で微弱な放電が発生することにより痛みを感じた経験のある人は多いだろう。これは体内に溜まった電荷がドアノブに移動することで発生するものだが、ドアノブに触れてもいない（触れるほど近くではあろうが）のに電荷が移動するという現象は、電荷の間に空間的な隔たりがあっても作用する静電気力の賜物である。遠隔で力が伝達するという事実は古より不思議なものとして、人々の興味を引いてきた。物理学では、そうした不思議な電気の現象を説明するために「電場」という概念を導入した。いささか乱暴な言い方にはなるが、真空には電氣的性質を伝える媒質の役割が備わっており、それを電場と名づけたわけである。電場は同時に真空中の電荷が持つ位置エネルギーの指標となる「電位」の勾配とみなすことができる。こうした「電場・電位」という概念の確立によって、物理学の先人たちは電気現象の定式化に成功したのである。

そうして市民権を得た電場や電位であるが、我々人間はそれらを直接感知する能力を持たない。しかし、さまざまな場面で電気の力を利用することは多く、それを確実に行うためには電場や電位が空間においてどのように振る舞っているかを詳細に知ることは不可欠である。本校の第2学年で行われている物理基礎演習（旧物理実験・演習）の授業では、この見えない電場や電位といったものを「可視化」することで存在を実感してもらうために、等電位線の測定をテーマにした実験を行なっている。本稿では等電位線測定の方法を簡単に説明し、2022年度までに行っていた実験方法の問題点とそれ

に対する2023年度のアプローチを紹介する。

2. 等電位線測定の実験方法

2.1 等電位線の概要

等電位線の測定は物理学実験における定番のテーマであり、さまざまな教育機関で実施されている。導電性のシート状の資料に微弱な電流を流すと、資料の各点間には電位差が生じる。それをデジタルマルチメータで読み取ることで同じ電位となる位置を特定し、それらを線で繋ぐことで等電位線を描くことができる。地図における等高線や天気図における等圧線と要領は同じである。

2.2 本校における実験方法の概要

アルミ箔などの金属シートを用いて実験する場合もあるが[1]、本校物理学教室では導電性の粉末を含んだ「導体紙」と呼ばれる黒色のシートを用いて実験装置を構築している。導体紙はA4サイズの紙で、100枚単位で販売されており、印刷もできるため、導体紙に2cm角の縦10×横13マス目を印刷して、測定の補助に使えるようにしている。

この導体紙に電極となる素材を接触させ、そこに9Vの電池をスナップリードとワニ口クリップで接続する。授業では導体紙上に配置する電極として平行電極と点電極の2種類を想定しており、それらが生み出す等電位線の違いを比較する。平行電極には書道で使用するような鉄製の文鎮を用い、横置きにした導体紙の両端に置いて電池と接続する（図1）。本実験においては導体紙と電極の間に生じる接触抵抗[2]の影響は大きく、平行電極においては導体紙の下にマグネットシートを敷くことで電極と導体紙の密着性を確保し、接触抵抗をなるべく小さく抑えるような工夫を施している。

*教養科

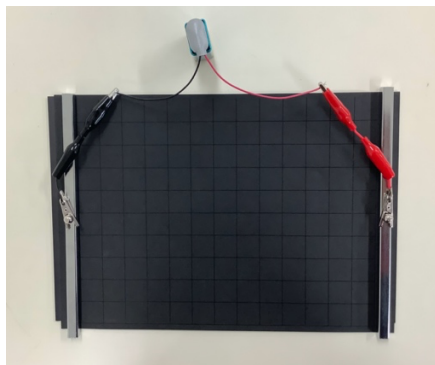


図 1 導体紙に置いた文鎮に電池を接続した様子

点電極に関しては後述する。

90 分の授業時間でシート全体に渡って測定を行うことは困難であるため、前述の印刷したマス目のラインに沿って 0.5V ずつの電位を記録してゆく方法を提案している。その際、デジタルマルチメータの 1 つの端子は 2 つある電極の一方の付近に固定しておき、もう 1 つの端子を探針として使用する。ただ、印刷された部分にはインクが乗っているため、導体紙の電位を正確に測定するためにはそこからわずかにずらして探針を置く必要がある。

2.3 点電極における問題点

文鎮による平行電極ではシート上にほぼ様な電場が生じるため、等電位線は文鎮の長さ方向に沿った平行なものが得られる。それに対し、電極の形状を点状のものに変えると、図 2 に示すような線対象の等電位線が得られると期待される。

2022 年度の授業までは、点電極として真鍮の画鋲を用いていた。二つの画鋲を、横置きにした導体紙の両端から少しだけ内側の位置に頭が下で針が上になるように置き、その上からガムテープで（針がガムテープを突き抜けるようにして）貼り付ける（図 3）。ガムテープから出た針の部分にワニ口クリップを接続して電池と接続することで画鋲を点電極とする方法である。当然だが、画鋲の頭の部分は丸みを帯びていたりすると安定しないため、頭が平坦なタイプの画鋲を選んでいる。さらに、平行電極のときと同様に導体紙の下にマグネットシートを敷いておき、導体紙の両端を平行電極で使った文鎮によって固定しておく。こうすることで画鋲と導体紙の密着性がより良くなる。

しかし、画鋲の質量が軽いこともあって、マグネットシートを利用しても画鋲と導体紙の密着性はそれほど良くはならないことがわかった。そこで、実験の際はガムテープから突き出た針の部分にゴムキャップをし、実験班のうちの 1 人が上から押し付けることによって密着性を向上させる方法をとった。ただ、それでも測定中に一定の力をかけ続けることは容易ではなく、どうしても密着度合いにムラが生じてしまう。

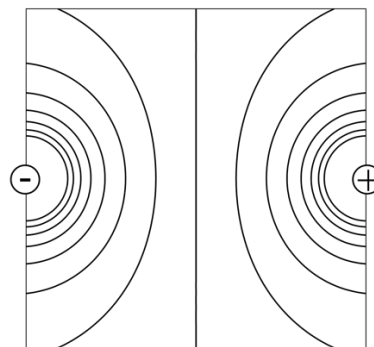


図 2 両端に置いた点電極による等電位線（理論）

そのため実験で得られた等電位線は、実験班によっては十分な本数が得られないことあった。実験の精度改善のためには電極と導体紙の密着性を向上させる新たな方式を導入することが必要であった。

3. ハトメを使用した実験

実験を支援してくださる技術部の方と、導体紙に直接食い込んで固定できるような素材があったら良いと話していたところ、「ハトメ」という素材があることを教えていただいた。ハトメとは書類やカードに穴を開け、紐を通してまとめる際に、開けた穴の周りを補強するために使用する金属の事務用品である。書類以外にも、革製品、例えば靴の紐を通す穴などにも使用されることがある。

真鍮製のハトメ（5mm）を用意し、画鋲と同じように導体紙の両端から少し内側の位置に穴を開けてそこにハトメをかきめることで、導体紙と一体化させた（図 4）。このハトメを電極化するために、電池と接続するのだが、電池から伸びたワニ口クリップでハトメを導体紙ごと挟んでしまうと電極付近が浮いてしまい、測定に支障が出る。そのため、ハトメの外径程度にワニ口を開いて導体紙の真上から挟む方式をとることにした。こうすると導線に引っ張られて導体紙が湾曲してしまうが、そこを文鎮で押さえつけることによって導体紙を平坦に保つことができた。

電池を接続したハトメと導体紙の間の電位差をデジタルマルチメータで測定すると 0.50 V～1.00 V 程度あった。それに



図 3 導体紙に貼り付けた画鋲（左：俯瞰、右：横から）

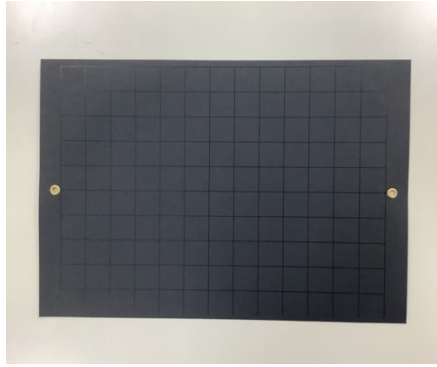


図 4 ハトメを埋め込んだ導体紙

対して画鋲を電極として使用した際には、上からの押し付けがない状態で 2.50 V 程度だったため、接触抵抗は小さくなっていると言えそうである。また、導体紙の中心軸（電極間を結んだ線）上での固定した端子との電位差をプロットすると図 5 のようになった。ハトメを使用した場合の方が全体的に電位差は高くなっていることがわかる。授業では 0.5 V 間隔での等電位線の記録を求めているため、同じ電池を使用するのなら接触抵抗を減らしてなるべく導体紙上の両端における電位差を大きく保った方が、記録できる等電位線の本数が増える。さらに、測定したデータから予想される等電位線を比較すると、画鋲を使用したものは 3.0 V の等電位線までしか記録できていないのに対し（図 6）、ハトメを使用した方では 5.0 V までの等電位線が記録できている（図 7）。

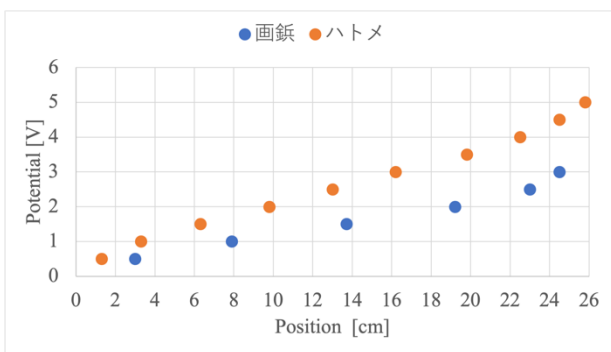


図 5 導体紙の中心軸上の電位差

4. まとめ

導体紙との密着性という点において、ハトメが適していることが確認できたが、ワニ口との接続で力がかかってしまうことから導体紙が破れてハトメが外れてしまうようなことがあった。特に、ワニ口を一旦外して接続し直すようなときによく起こった。

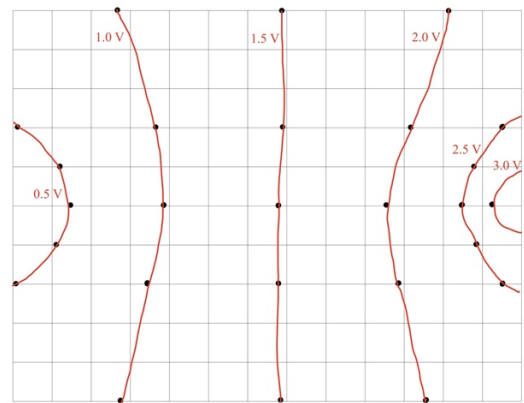


図 6 電極に画鋲を使用した際の等電位線

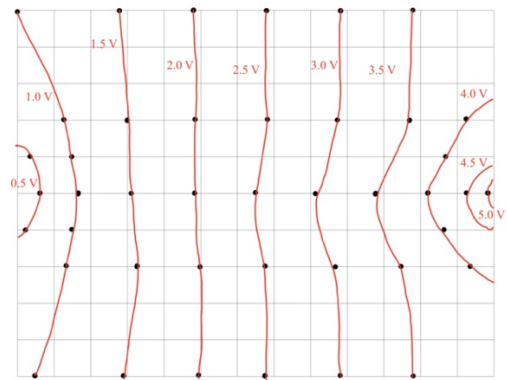


図 7 電極にハトメを使用した際の等電位線

導体紙が破れてしまうと新しいものに交換する必要があり、それまでとっていたデータは無効となって一からやり直しということになるため余分な時間を費やしてしまう。ワニ口とは別の方式での接続を考える、またはハトメの穴の部分にハンダを流して毛のように導線をたたせてそこにワニ口を挟むなどの方式を考えているが、他の素材を挟むことで接触抵抗がさらに増えてしまうという懸念もある。より良い実験のため、今後も改善方法は模索していく予定である。

参考文献

- [1] 細田宏樹, 物理教育 **58**, 160-161 (2010)
- [2] 玉井輝雄, エレクトロニクス実装学会誌 **3**, 256-262 (2000)