**Ⅰ　実験目的**

導電紙を用いて、一様な電界中に導体を置いた場合の等電位線と電気力線を求めることで静電界の様子を直感的に理解する。

**Ⅱ　実験原理**

空気中に導体を配置し、これらにある電位を与えると静電界が生じ、この静電界中の空間の点はその位置によって定まる電位を持つ。電位は１個の量によって定まるスカラー量であり位置の関数である。電位勾配から、電界と電位との関係は



で与えられ、各成分に分けると、

　，　　，　

で与えられる。

電気力線とは、電界の向きと大きさをベクトルで表し、あらゆる点においてそのベクトルと接するように引いた曲線である。従って、電気力線の接線方向は電界のベクトルの向きを示している。また、電気力線の密集度は電界の大きさを示している。

等電位面とは、＝一定の点の集合であり一般に曲面になる。の定義から、電界は等電位面に沿った方向には成分を持たないので、電気力線は等電位面に垂直となる。いま、の値を一定間隔で取って、それぞれの値に対する等電位面を描くと、等電位面の間隔と電界の大きさは反比例し、電気力線は等電位面に垂直であることから、この等電位面の形状により、静電界の様子を直感的に理解することができる。

空気中に電極を置いて空間の各点の電位を知るには、非常に難しい測定技術を要する静電測定に代わって、次のような方法もとれる。一様な導電性を持つ媒質の中に導体の電極を配置し、これらの電極に電位を与え、媒質中に電流が流れるようにしておき、媒質中の各点での電位を測定する方法である。このとき電極の電導度を媒質に比べて十分に高くしておくと、電極は真空中の静電界の場合と同様にそれぞれ等電位とみなすことができ、空間の各点は静電界の場合と同様にその位置によって定まる電位を持つ。しかもそれぞれの電極の形、配置、与える電位を静電界の場合と等しくしておくと、空間の各点の電位分布は静電界の場合と全く等しくなる。ただし、媒質は十分に広い範囲に広がり、周辺における電流の歪みは無視できるものとする。この場合には十分に内部抵抗の高い電圧計を用いれば、空間の各点の電位を正確に求めることができる。

さらに、三次元的に等電位面を求めることは困難なので、二次元の問題として取り扱う。すなわち、方向に一様な電極配置のときには、等電位面は軸に平行な曲面となるので、軸に垂直な平面を考えると、任意の平面において合同な曲線を得ることになる。従って、そのうちの1つの平面で考えると、等電位面と平面の交線すなわち等電位線が求まる。この場合には平面上に等電位線を求める問題となるので、実験も容易に行うことができる。

**Ⅲ　実験方法**

**〈実験の準備〉**

1. 図１のように、導電紙をベークライト板の上に置いて、2枚の電極板を対辺（ABおよびCD）に取りつけた。ABを－電極、CDを＋電極とした。このとき、電極と導電紙との接触をよくするために、ベークライト板と導電紙との間にクッションを挿み、さらに、両端の電極が平行となる様にクリップで片側4ヶ所ずつしっかり押さえた。
2. 直流電源の出力端子と2つの電極をリード線で結んだ。デジタルメーターはダイヤルをＶに合わせ、測定端子のＣＯＭ．をリード線（黒）で電源の－側に、またＶ端子は測定用プローブ（赤）に取りつけたリード線に接続した。
3. 電源のスイッチをいれ、出力電圧を約10Vにした。プローブを＋電極側に接触させて電源の電圧を変化させ、ボルトメーターの読みが10.00Vになるように調節した。（この際、0.2V程度の誤差は差し支えない、とした）

**〈導電ペイントを塗る前の等電位線の様子〉**

1. プローブを導電紙に当てるとボルトメーターが－極を基準としたその点の電位を示すことを確認した。次に、1Vごとに同じ電位を示す点を探し、それらの点をつないで等電位線を描き、全ての等電位線が電極に平行な直線になることを確認した。

**〈導電ペイントを塗った後の等電位線の様子〉**

1. 導電紙の中央に、図2のような図形を、導電ペイントを塗って描いた。ドライヤで十分に乾かしてから、電極間に10Vの電圧をかけ、図形上の任意の点の電位がほぼ等しくなることを確認した。（この際、0.2V程度の誤差は差し支えない、とした）

　　　　　　　　　図２　導電ペイントで描いた図形

A

C

D

B

1. 再びリード線で電源と接続し、電圧をかけて両極間の電圧が10.00Vになるよう調節し、次に、1Vごとに同じ電位を示す点を探し、それらの点をつないで描いた等電位線を、ホワイトマーカーでなぞった。

**〈導電ペイントの図形を切り抜いた後の等電位線の様子〉**

1. 再び電源を切り、リード線を外し、導電紙を取り出して、描いた図形を周辺の外側に沿って正確にカッターナイフで切り抜いた。
2. 再び導電紙をベークライト板に載せ、今度は90度回転させて、図3のように、AC，BDの対辺に①の場合と同じように電極を取りつけた。

　　図３　90°回転させた図形

A

C

D

B

1. ⑥と同じ要領で、描いた等電位線をホワイトマーカーでなぞった。
2. ⑦で切り抜いた図形と⑥と⑨でなぞったホワイトマーカーの線を、トレーシングペーパーに書き写した。

**Ⅳ　実験結果**

1. **導電ペイントを塗る前の等電位線のイメージ図**

・１Ｖごとの等電位線は、ほぼ等間隔で、全て電極に平行となった。

1. **導電ペイントを塗った後、切り抜いた後の等電位線**

（添付したトレーシングペーパーに示した）

・導電ペイントで描いた図形の線上および内部は、ほぼ等電位となった。

・導電ペイントを塗った後の等電位線は、図形を避けるようにして描かれた。

・導電ペイントを切り抜いた後の等電位線は、切り抜いた部分へ集まるようにして描かれた。

・導電ペイントを塗った後、切り抜いた後の等電位線は、互いにほぼ直交していた。

**Ⅴ　考察**

1. **導電ペイントを塗る前と塗った後の時の(－)極からの距離と電位差の関係**

導電ペイントを塗る前の(－)極からの距離と電位差の関係を、表１およびグラフ１に示す。

|  |  |
| --- | --- |
| 電位（V) | (－)極からの距離[cm] |
| 0 | 0 |
| 1 | 2.05 |
| 2 | 4.1 |
| 3 | 6.18 |
| 4 | 8.25 |
| 5 | 10.34 |
| 6 | 12.43 |
| 7 | 14.51 |
| 8 | 16.59 |
| 9 | 18.68 |
| 10 | 20.75 |

表１　導電ペイントを塗る前の関係

導電ペイントを塗った後の(－)極からの距離と電位差の関係を、表２およびグラフ2、グラフ３に示す。但し、図１でのAB方向（縦方向）に、辺ACからの距離が３(cm)、18(cm)の2ヶ所をとって調べてみた。

　　　　　　　　表２　導電ペイントを塗った後

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 電位（V) | (－)極からの距離[cm] (3cm) | (－)極からの距離[cm] (18cm) |
| 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1.65 | 1.8 |
| 2 | 3.42 | 2.78 |
| 3 | 5.12 | 4.1 |
| 4 | 7.01 | 5.08 |
| 5 | 9.25 | 9.2 |
| 6 | 13.55 | 13.07 |
| 7 | 15.72 | 15.72 |
| 8 | 17.55 | 17.51 |
| 9 | 19.12 | 19.09 |
| 10 | 20.75 | 20.75 |

導電ペイントを塗る前と塗った後のグラフを比較すると、ペイントの影響の少ない端での電位の測定値は－極からの距離にほぼ比例して大きくなっていく。

グラフ２およびグラフ３から、ペイントの影響のある中央での電位の測定値は、初めは急な勾配で電圧が上がり、導体の部分では電位が一様になっていて、そして導体を通り過ぎるとまた始めと同じ傾きで電圧が上がる、ということが予想できる。

1. **導電ペイント上では等電位になる理由**

導体を電界の中に置くと、導体内の自由電子が電界と反対の向きに力を受けて移動し、最終的には導体表面のみに電荷が分布するようになる（このように外部の電界の影響で正・負の電荷が分離することを静電誘導という）。この表面電荷が作る電界と外部の電界は大きさが等しく向きは反対であるから、互いに打ち消し合い、導体内部の電界は0になる。



より、

＝定数（一定）

と分かる。すなわち、導体内部は等電位となる。

今回の実験では、導電紙と導電ペイントの抵抗率の差が十分大きいため（導電紙＞導電ペイント）、導電紙が不導体とほぼ同じ性質を持ち、導電ペイントが不導体中の導体とほぼ同じ性質を持つ、と考えられる。従って、上で述べた理由から、導電ペイント上では等電位となるのである（言い換えると、導電ペイントは等電位線になる、ということである）。

1. **トレーシングペーパーに描いた２つの等電位線が直交する理由**

導電ペイントで描いた図形上では電界はなく電位は等しいので、描いた図形の線は等電位線と見なせる。図形を切り抜く前、電流は導体内を通過できる。従って、等電位線は図形（の輪郭）に平行に、図形に沿って存在する。そして、等電位線と電気力線が直交することを考えると、電気力線は図形に対して垂直に存在すると考えられる。

次に、導電ペイントで描いた図形を切り取ると、その切り取った部分は全く電荷を有さないので、真空であるとみなすことができ、他の部分にくらべ抵抗が大きいと分かる（より、が得られる。真空の場合なので、真空部には無限大の抵抗ができるということになる）。従って、電流は切り取った部分に沿って通ることになる。

このとき、電流の流れる方向が電界と平行であることと、電気力線の定義から、電流の向きと電気力線の向きは等しいと考えられる。つまり、電流が通る線は、電気力線に等しいといえる。従って、図形を切り抜いた後、電気力線は、図形（の輪郭）に平行に、図形に沿って存在する。そして、等電位線と電気力線が直交することを考えると、等電位線は図形に対して垂直に存在すると考えられる。

以上のことから、二つの等電位線はお互いに他方の電気力線になると考えられるので、２つの等電位線は直交すると分かる。

上の説明で電気力線と等電位線は直交すると述べたが、その証明を以下にする。

まず、電位の定義から、2点A,B間の電位は、電気力線に沿って2点間を1[C]の電荷が移動する際の仕事量によって求められる。そこで仮に、電気力線と等電位面(線)が角度θで交わっているとし、電荷を距離だけ動かしたとする。

このときの仕事量を、加えた力を用いて表すと、



となる。この場合、等電位面内では、力および距離がどんな値をとっても、電位が等しいので仕事量である。従って、

、すなわちとなる。

以上のことから、等電位面(線)と電気力線は直交すると分かる。

等電位面

θ

電気力線

1. **導電ペイントで描いた図形の内部では等電位になる理由**

導電ペイントは絶縁体の合成樹脂に粉末状の銀、銅、ニッケルやカーボンブラックなどの導電性粒子を混合した塗料であり、導電ペイントで塗った部分は導体となる。この時、

* 1. 導体内部の電界は0で、一続きの導体は等電位である。
  2. 導体の表面は等電位面であり、電気力線は導体表面に直交している。
  3. 導体に電荷を与えると、その表面にのみ分布し、曲率の大きい場所ほど密に分布する。

という性質を持つ。

従って、導電ペイントで囲まれた図形の内部の電界は、外部の電界と電気的に隔離され（外部の電界の影響を全く受けず）、特にそこに電荷がない場合、電界は0で、図形内部は導体と等電位となる（このことを静電遮蔽という）。

**（５） 誤差について**

考察の（１）において、思うようなグラフを得られなかったのは、(－)極からの距離が０．１mmまでしか正確に測れなかったこと、プローブの先端にも幅があることなどの誤差によると考えられる。また、その他の要因としては、導電紙面に手などが触ってしまったため、水分や油分の付着によって、その部分の導電性に影響を与え等電位面に歪みを生じさせてしまったことが挙げられる。

**（６） 感想**

　導電ペイントで描いた図形が、かなり複雑だったため、考察の（１）では思うような結果が得られなかったのではないかと思います。（等電位線が途中で途切れてしまい、ペイントの影響のある中央での電位を測定することができなかったので）

**Ⅵ　参考文献**

　「自然科学実験　物理学編」　慶応義塾大学理工学部

　「電磁気学」　後藤尚久　講談社