**『　　電　　界　　』**

平成14年12月5日 実施

**１．実験の目的**

　　電気力線と等電位線が直行するなどの、静電界の様子を直感的に理解する。

**２．実験の概要**

　　空気中に（実質的には真空中と等しい）導体を配置し、これらにある電位を与えると静電界を生じ、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。電界Eと電位との関係は



を持っている。または各成分に分けて考えると

　　　　　　　　　　

で与えられていることは、電磁気学で習ったとおりである。

　電界Eを直感的に理解するためによく用いられる方法は等電位面を描くことである。等電位面とは＝一定の点の集合であり、一般に曲面になる。いま、の値を一定間隔でとって、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に貫いて走るので、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。

　さて、空気中に電極を置いて、空間の各店の電位を知るためには静電測定をしなければならない。これには非常に難しい測定技術を要する。これに代わって、容易な方法は次の方法である。一様な導電性を持った媒質（抵抗体）の中に導体の電極を配置し、これらの電極に電位を与えると、媒質中には電流が流れる。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、空間の各点はその位置によって定まる電位を持つことは静電界の場合と同様である。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、空間の各店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手数を要するので、ここでは簡略化し、二次元の問題として取り扱う。すなわち、ｚ方向には一様な電極配置（この場合、各電極はすべてｚ方向に平行な曲面でできる柱状電極である）の時には、等電位面はz軸に平行な曲面となるので、z軸に垂直な平面で切って考えると、どこを切っても合同な曲線を得ることになる。したがって、この場合には平面状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。本実験では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。

**３．実験の方法**

**(a)　実験に用いた道具**（数）

　　　デジタルマルチメーター（1)、導電紙（１）、電極坂（２）、ワニロード線（２）

　　　測定用プロープ付きリード線（２）、電源装置（１）、トレース紙（１）

　　　ホワイトマーカー（１）、クリップ（８）、ベークライト板（１）、クッション（１）

　　　測定用プロープ（１）、導電ペイント

**(b)　実験手順**

　　１．導電紙（切れ端）と導電クリームの抵抗

を測定した。

　　　　　＊注意： 電導クリームをかき混ぜた。

　　　　　　　　　 筆は使用しないとき、電導

ペイント容器の中に入れた。

　　２．導電紙を図1のようにセッティングをし

た。電源と電極をリード線で結び、デジ

タルメーターをつないだ。

３．電源スイッチを入れ出力電圧を約10[V]に

し、正確な電圧はデジタルメーターを用い

て測定した。このとき、プローブを＋電極

側に接触した。そしてデジタルメーターの　　　　　　　　　図1

値が10.0１[V]であった。

４．プローブを任意の場所に当て、電位がどのように分布しているのかを調べた。

５．導電紙に円形の図形を描いた。このときに図形の大きさと、中心よりも上に描くように注意した。熱風を利用して電導クリームを乾かし、両電極間の電位差が10.01[V]になるように(実験３の値と等しくなるように)調節した。そして図形上と図形の内部における電位が等しいことを確認した。

　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　６．0.5[V]の間隔でホワイトマーカーを用いて等電位線を描いた。

　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　７．図２のように両電導板間を横断するよく線を2本引く。このときの直線をA,Bとする。

　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　A：図形を横断する直線

　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　B：図形を横断しない直線

　　　　　　　　　　　　　　８．この直線上に1cm間隔で　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　　点をとり、その点における電　　　位を測定した。また図形の位置

図２　　　　　　　　　　　　　　は－の電極板から7.1[cm]の位置であった。

９．中心の付近に描いた図形をカッターを用いて切り取った。

10．紙を90°回転させ再び電極に接続し、前回と同様の要領で等電位線を描いた。

11．図形を切り抜く前の線と、切り抜いた後に描かれた線を同じトレーシングペーパーに書き写した。　　　＊この線郡をを別紙に記載

12．手順８で得た結果を表・グラフを書き、以下考察を行った。

**４．実験の結果**

　　　実験の手順７で得られた結果を以下の表にまとめる。

　　　　　　　表１　各直線上における距離とその点の電位の値の関係

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 距 離 | １ | ２ | ３ | ４ | ５ | ６ | ７ | ８ | ９ | 10 |
| A | 0.48 | 0.95 | 1.43 | 1.81 | 2.73 | 3.50 | 4.21 | 4.32 | 4.32 | 4.32 |
| B | 0.50 | 0.97 | 1.38 | 1.77 | 2.46 | 2.92 | 3.35 | 3.77 | 4.25 | 4.71 |
| 距 離 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| A | 4.32 | 4.32 | 5.31 | 5.97 | 6.71 | 7.22 | 7.73 | 8.33 | 9.02 | 9.45 |
| B | 4.95 | 5.30 | 5.81 | 6.44 | 6.85 | 7.40 | 7.92 | 8.34 | 8.81 | 9.33 |

* このとき０cmにおける電位は0.00[V]である。
* 距離の単位は[cm]である。

上の結果を別紙のグラフ用紙に書き込んでおく。［図a］

**５．実験の考察**

**(1)　導電ペイント上における任意の点でなぜ電位は等しいのか**

　　　　　電界の中に導体を置くことで、導体中　　　　　　　　表面上に電荷が存在

自由電子が電界と反対の向きに力を受け

て、**導体の表面上に電荷**が分布するので、

この導体の表面に電荷が集まってしまう

これを**静電誘導**という。誘導された表面

電荷が作る電界と導体の外部の電界の関

係は大きさが等しく、反対向きの性質を

持っている。そのために**導体の内部では**　表面上に存在しない

**電界が打ち消しあう**ために電界が存在し

ないので、導体の内部では等電位になる。

（もし導体の表面に電荷が集まらなけれ

ば、ガウスの法則より電荷１つ１つが電

界を作ってしまうので、導電内において

等電位にはならない）。

　　　　　＊　図３を参照　　　　　　　　　　　　　　　　　図３

1. **図形内部における任意の点での電位はなぜ等しいのか**

導電ペイントは導電性粒子である銅やニッケルを含み、これらによって描かれた線自体は導線になる。（(1)を参考）導体は「**静電状態において表面上では等電位であるために、電気力線が表面から垂直に伸びていて、内部に電界は存在しない**」という性質を持っている。このために導電ペイントで描いた図の内部に電気力線は入り込むこともない。すなわち**導電体の内部には電界が存在しない**ことになる。この現象を**静電遮蔽**という。このために図の内部でも等電位になるのである。

1. **等電位面と電気力線(電界)はなぜ直行しているか**

ある電気力線上の点に点電荷を置いて考えてみる。電気力線とはその線上における接線方向がその点での電界の向きになるように引いた線のことである。ここで、点電荷を電気力線に対して平行(電界Eの方向)へと動かすと、点電荷は電界から仕事を受け、電位が変化する。しかし**点電荷を電気力線に対して垂直に動かしていくと、点電荷は電界から仕事を受けない**(仕事は力の向きに対して垂直方向には仕事を行わない)ので電位が変化しない。

　このことを数学的に考えてみることにする。

　まず電界Eと電位の関係ははじめに書いたように次の関係を持つ。



　　　　　　　　　　

これを別の表し方をしてみることにする。電場内の１点Aから他の点Bに至る積分を考えると電位は以下の式で与えられる。



この積分式は積分の経路に関係しないから基準点を０と考えて積分路を考えてみることにすると





となり、A点とB点の電位差を表すことになる。ここで電位差は基準点のとり方によらない。(電磁気の授業では電位を求めるときの基準点は無限遠方∞として考えている)

等電位であるということは、　であることである。すなわち



　　　　　を満たすことになる。ある領域内の至る所でE=0を満たすとすれば、その領域内の2点A,Bについて



　　　　　であるから、その領域内の全ての点は等しい電位を持つために、そのような点を含んでいる領域全体は等電位面であることがいえる。

　　　　　　一般の電場内でA点における電界をE、電位をとして、Aから任意の方向

(今回はｓ方向とする)に微小距離dsだけ離れた点をBとして、その点における電位をとすれば、



として考えることができることより







ここでEとｓの方向の成す角をθとすると



で与えられる。また点Aを通る等電位面を考えて、その面内にｓ方向を選べば





したがって上の式を満たす変数θの値は

　　

として考えることができる。

　よって等電位線(ｓ方向、直線AB方向)と電気力線(Eの方向)とは直行することが証明できた。

1. **得られた等電位線が初めのときの電気力線になるのはなぜか**

１度目の実験では等電位である点の集合をホワイトマーカーで記した。そして2度目の実験の前に、導体を切り取った図形における等電位の点の集合を同じように記した。このときの等電位線が電気力線として考えられる理由について考えてみる。

導体部分を切り抜き、導体紙を90°　　　 　　　　電気分極

回転させる。導体内を切り抜くことは、

言い換えると導体の金属から空気を誘

電体として考えることにしたことにな

る。導電紙と空気中の**比誘電率**は空気

中における値の方がはるかに小さい。

一様な電界中に絶縁体を置くと**電気分**

**極**が起こる。**分極電荷**は誘電対の表面に　　　　　　　　静電誘導

存在しているために、電気力線は誘電

体(今回の実験では切り抜いた図形)を避

けるようにして通る。**電気力線と等電位**

**線とは直行する**ので、2度目の実験にお

ける等電位線は図形に対して垂直に入り

込んでいくと考えることができる。すな

わちこれが1度目の実験における電気力

線と等しいと考えられるのである。　　　　　　　　　　図４

さらに電気力線は＋の電荷から－の電荷に向かって流れているのに対し、等電位線は直行していくので、図形を切り取る前の電気力線を等電位線で表すには、90°回転させればよいことになる。

＊電気分極と分極電荷

　　　絶縁体を電界の中にいれると、その単位となる原子(分子)などの＋電荷は電界の向きに、－電荷は電界と反対向きに力を受ける。それらの電荷は原子(分子)に束縛されているので、原子(分子)から離れることはないが、分子の内部においては微小な変位を生じる。このような現象を電気分極(electric polarization)と呼び、このとき変位する電荷を分極電荷という。しかし一様に分極が起きていても、物質内では平均してみると電気的には中性であるが、その両端には導体における静電誘導のように電荷が現れる。

　　　電界が加わることによって、＋－の電荷は反対向きにずれることから＋－の

電荷が両端に現れるのである。

　　　静電誘導は電界の中に誘電率を加えた場合に起こるものであり。電気分極は電界の中に絶縁体を加えたときに起こる現象である。(図４参照)

＊　比誘電率：で与えられる。空気中()

と誘電体()における誘電率の比を求めたもので

ある。誘導体を挿入するとこの値は１より小さ

くなることはない。

1. **今回の実験のグラフ・トレーシングペーパーから読み取れること**

２つの直線を比較してみると、Aを表しているグラフ（導電ペイントで描かれた図形を横断している直線）の特徴は**図形上の点において等電位であるために、グラフの傾きは０**(横軸と平行)である。

(図５におけるaの近傍)しかし等電位の領

域以外の点ではグラフの傾きを作っている。

(図５におけるｂの近傍)

それに対してBを表しているグラフ（図

形を横断していない直線）の特徴はグラフ

の**傾きがほぼ一定**である。なので群を抜い　　　図５ 直線Aにおける電位差

て急な勾配や、緩やかな勾配を作っている

部分はない。

　言い換えるとAのグラフは傾きが一定

ではなく、急な勾配、緩やかな勾配、傾き

を持っている直線である。特に**図形近辺で**

**は電位差が急激に変化している**ことが読み

取れる。Bの直線は一定の傾きをもってい

る、すなわち**－の極板からの距離と電位は**　　 図６ 直線Bにおける電位差

**比例の関係にある。**

　トレーシングペーパーを見てみると、最初に描いた等電位線は**図形を避けるように分布している**が、次に書いた等電位線（始めに描いた等電位線に対する電気力線）は**図形に対して吸い込まれるように分布している**のが読み取れた。

　また2つの関係が等電位線と電気力線であるので、お互いの交点を局所的に調べてみると、**直行している**ことが伺えた。このことについての原因は上の(4)で記したことが原因である。

1. **今回の実験における誤差について**

今回は質量などの測定はなく、唯一考えることのできる誤差は、マーカーにおける線の太さ、電位を読み取るときのプローブの値の読み取る大きさであるが、今回は敢えて考えないものとする。

**６．感想**

　　　今回の実験が3度目だった。今回の実験が３回の中でも最も易しかったように思う。それは今までの2回における実験で、測定するものが多い、道具の扱いが難しい、調べるものの数が多すぎる。誤差を求めるのが複雑であるなどの困難であった課題が多かったためである。それに対して今回は測定したものは電位の値だけであり、等電位線を引くという手間は多いが、失敗の少ない実験であったためである。

　　　レポートを書くことにも少しずつではあるが慣れてきたために、書き上げるスピードが上がった、そのために細かな所に少しでも工夫を加えよう、少しでも読みやすいようなレポートを作成しようなど、自分の中にも余裕が少しずつ生まれてきたように思っている。

　　　実験そのものに関しても今回は電気力線と等電位線が直行することを確かめるという実験の目的も2次元における実験ではあったものの達成できたように感じている。

　　　僕は機械工学に進んでいこうと考えているので、電磁気学とは直接の結びつきの少ない学科になってしまうが、今も授業で電磁気学を学んでいるので、今回の実験で得た結果を少しでも活かしていきたいと考えている。

　　　最後に何度もレポートを読み返し間違いを訂正して、誤字脱字のないよう確認しましたが、もし見つけた場合はご了承下さい。

７．参考文献

　　　　・　自然化学実験 物理学編　　　　　　慶応義塾大学 理工学部　2002

　　　　・　物理学B・Ｄ　(電磁気学)　　　　　 慶応義塾大学 理工学部　2002

　　　　・　　　基礎物理学　　　　　佐藤 清雄　他 著　　　　三共出版　1994

　　　　・　 大学理工系物理学　 　佐々木 宗雄 他 著　　　　理工学社　1980