

物理学実験I 電磁気学

■ 定常電流の作る電場

- ◆ 等電位線
- ◆ 電気力線の性質
- ◆ オームの法則
- ◆ 重ね合わせの原理

担当: 佐藤、浅野(TA)

連絡先:

物理学専攻 素粒子実験研究室

内線4270

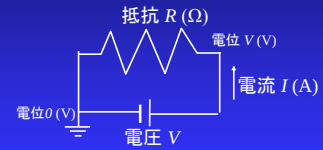
ksato@hep.px.tsukuba.ac.jp

1

電流と電位(オームの法則)

- 抵抗 $R(\Omega)$ に電位差 $V(V)$ をかけたときに流れる電流 $I(A)$

$$V = R \cdot I$$



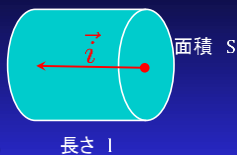
2

抵抗率

- 抵抗 R は、物質の長さ
に比例し、面積に反比
例する。

$$R = \rho \cdot l / S$$

- この ρ を抵抗率と呼ぶ。



3

電位と電場の関係

- 電位 ϕ と電場 $\vec{E}$ の関係は、

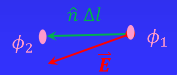
$$\vec{E} = -\nabla\phi$$

$$(E_x = -\frac{\partial}{\partial x}\phi, E_y = -\frac{\partial}{\partial y}\phi, E_z = -\frac{\partial}{\partial z}\phi)$$

→ 等電位面(線)と電場は垂直

- $\hat{n}$ 方向に Δl だけ進んだときに電位がどれだけ変わるか? ($\hat{n}$:長さ1のベクトル)

$$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 = -\vec{E} \cdot \hat{n} \Delta l$$



4

テキスト(1)式の導出

- 電流が流れる微小体積の前面・後面の電位を考える。

- 電位と電場の関係

$$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 = \vec{E} \cdot \hat{n} \Delta l$$

- $\hat{n}$ 方向の電流は:

$$I = \hat{n} \cdot \vec{j} \Delta S$$

($\vec{j}$: 電流密度 (A/cm^2))

- 抵抗率の定義:

$$R = \rho \Delta l / \Delta S$$

以上3式をオームの法則 ($\Delta\phi = R I$) に代入する:

$$\vec{E} \cdot \hat{n} \Delta l = \rho \Delta l / \Delta S \times \hat{n} \cdot \vec{j} \Delta S$$

$$\vec{E} \cdot \hat{n} \Delta l = \rho \hat{n} \cdot \vec{j} \Delta l$$

$$\rightarrow \vec{E} = \rho \vec{j} \quad \text{電場と電流は平行}$$

5

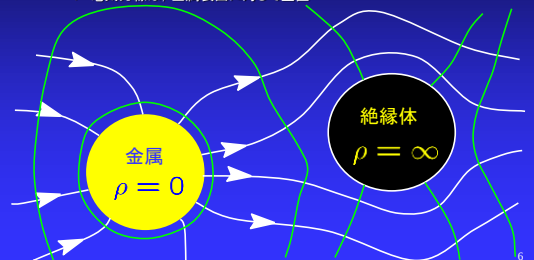
等電位面と電気力線

- 電気力線=電流の流れ(オームの法則)

- 電気力線は等電位面に常に垂直

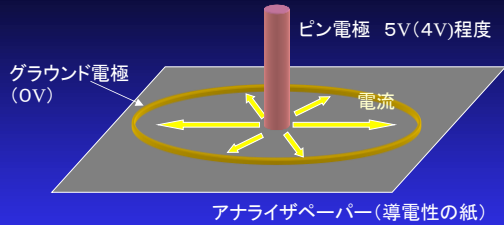
- 金属表面は常に等電位

◆ 電気力線は、金属表面に対して垂直



6

実験の原理

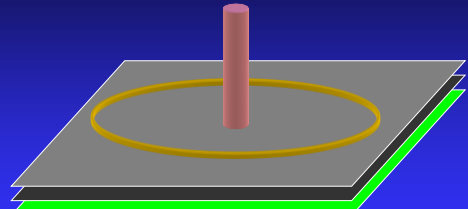


アナライザペーパーの抵抗は空気よりもはるかに小さいので、ほぼすべての電流はアナライザペーパー内を流れる。

↓
2次元とみなすことができる

7

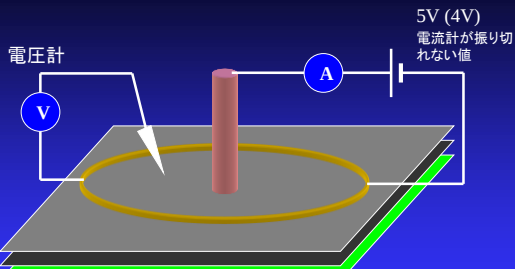
はじめるときの確認事項



アナライザペーパー、カーボン紙、方眼紙を重ねたあと、固定する前に、アナライザペーパー上で電極で点を打つてみる。しっかり方眼紙に測定点の印が付くやり方を習得してからセットアップを組む。

8

実験方法



注意：
アナライザペーパーを破らないように！
(局所的に抵抗が変化し、電流分布が変わる)

アナライザペーパー
カーボン紙
方眼紙

9

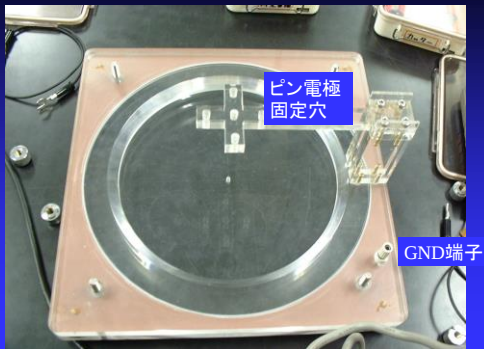
実験セットアップ



この写真は、テキストのセットアップ図と比べて、テスターとデジタルマルチメータの接続・用途が逆。どちらで実験しても良い。

10

円形電極



11

定電圧電源



12

デジタルマルチメータ(DMM)

電圧、抵抗
の+端子



電源

測定量設定

共通一端子

端子間の電圧を測定する

13

テスター



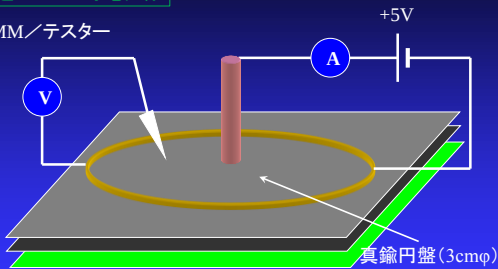
端子間の電圧を測定する

14

実験1: 等電位線の形状

課題: 1Vの等電位線

DMM/テスター



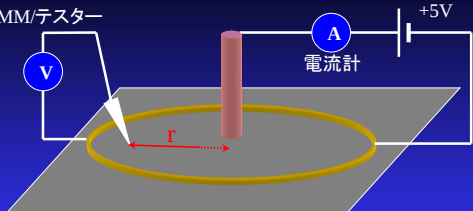
真鍮円盤(3cmφ)

テスターでアナライザーペーパー上の1Vとなる場所を探し、点を打っていく。

15

実験2: 電位分布の測定

DMM/テスター



電流計

- 中心電極からの距離 r の関数として電圧をテスターで測定
 - ◆ $r=2.0\text{cm}, 3.0\text{cm}, 4.5\text{cm}, 7.0\text{cm}, 10.0\text{cm}, 11.0\text{cm}$
- 課題
 - ◆ 片対数グラフ($\log r$ vs V)。正方眼のグラフは作成しなくてよい。
 - ◆ 面積抵抗率の計算。

16

実験3: 他の方で面積抵抗率を測定



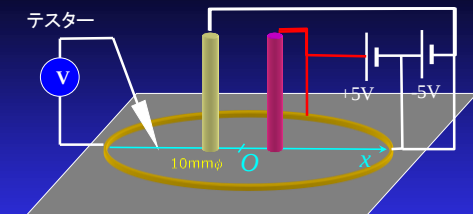
課題
・ グラフ: 抵抗の電極間
距離に対する依存性
面積抵抗率の計算。

- 電極間の距離 r の関数として抵抗をデジタルマルチメータで測定
 - ◆ $r=1.0\text{cm}, 2.0\text{cm}, 3.0\text{cm}, 4.0\text{cm}, 5.0\text{cm}$
- 実験2の結果と比較
- 注意点
 - ◆ 真鍮電極は、出っ張りがあるほうを下にする
 - ◆ メータの読みが安定しない場合は、テスターリードを真鍮電極に強く押さえつける(こすりつける)。あるいは接点をスコッチブライトで磨く。

17

実験4: 重ね合わせの原理

テスター



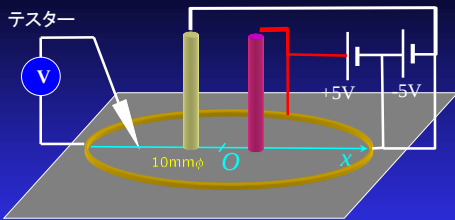
- ピン電極を2本使用して、電位の重ね合わせを見る。
 - ◆ 10mmφの円形電極をピン電極に使用
 - ◆ 電位を x の関数として測定(最低限 $x=0, \pm 2, \pm 4\text{cm}$ の5点)
 - ◆ $\pm 5\text{V}$ と接続しないピン電極は0Vにする(GNDと接続)

$$\begin{aligned} \phi_+ &: +5\text{V}, 0\text{V} & \phi_- &: 0\text{V}, -5\text{V} \\ \phi_{\pm} &: +5\text{V}, -5\text{V} & \phi &: \phi_+ + \phi_- \end{aligned}$$

図解: ϕ_+ と ϕ_- の
10mmφの4グラフ
を一致に重ねて描く

18

実験4: 重ね合わせの原理



- ピン電極を2本使用して、電位の重ね合わせを見る。

- ◆ 10mmφの円形電極をピン電極に使用
- ◆ 電位をxの関数として測定(最低限 $x=0, \pm 2, \pm 4\text{cm}$ の5点)

±5Vと接続しないピン電極は0Vにする(GNDと接続)

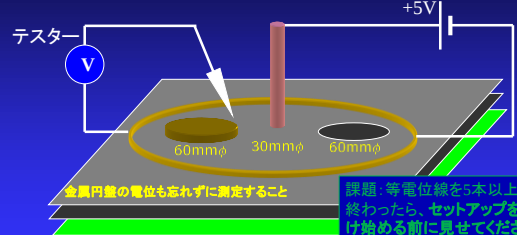
$$\phi_{\pm} : +5V, -5V \quad \phi = \phi_+ + \phi_-$$

19

実験5, 6: 金属円盤、穴のあるときの電位分布

- 実験5と6は、同時に行う。
 - ◆ 金属円盤と穴はピン電極に対して対称の位置に配置する。
- 等電位線を最低5本描く。(5つの電位値について測定する)

金属円盤・穴の周りの電場の様子がよくわかるような電圧値について測定する。



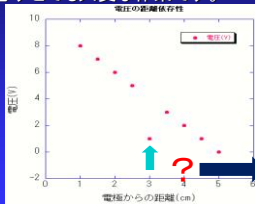
円盤・穴の周りは特に細かく測定点を取ることに。

円盤や穴の縁と等電位線の角度は平行、直角、それとも別の角度かがわかるように！

20

実験の基本

- 測定と同時に、あるいは測定終了直後にグラフを書く
 - ◆ 傾向の把握、測定ミスの早期発見
 - ◆ 実験終了、セットアップ解体後にデータを取り直すのは、必ずとても大変な作業です。



その場でこの点だけ再測定すれば、原因が解明できる。

- 今日は、実験ひとつひとつが終わるたびに、私に結果を報告してください。

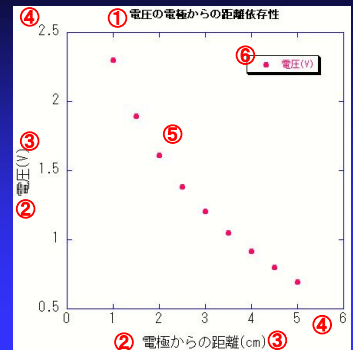
21

グラフの書き方

- ① グラフの名前
- ② 軸の名称
- ③ 軸の単位
- ④ 軸の数値
- ⑤ データ点
- ⑥ 凡例

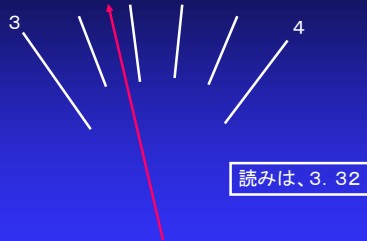
◆ (2種以上のデータを同時にプロットする場合)

グラフ・軸の名前、単位や凡例は、書いてないと見る人は理解できない。
・ 書いてないとレポートは減点。



測定器の値の読み方—最小目盛の1/10まで

例1



例2

定規: 1mmの単位まで目盛りがふってある。
→ 0.1mmの単位まで読み取る。

23

有効数字

- 最小桁は誤差を含む。
- 和、差...最小桁の大きいほうに一致
- 積、除...桁数の小さいほうに一致
- (例)

$$23.4 + 115.123 = 138.523$$

23.4は、 $23.4 \pm 0.X$ の意味。

したがって、138.523も、 $\pm 0.X$ 程度の誤差で、0.0Xの桁までの精度は主張できない。

- ・ 138.5まででしっかり止めてレポートすること。
- ・ (物理では、普通に減点対称になります)

$$3.46 \times 1.2 = 4.152$$

24

レポートに関する注意

- 質問、提出に関しての相談がある場合は、私に連絡 (Eメール) ください。
- 手書きを薦めるが、ワープロでも可。
 - ◆ 丁寧に書いてください。
 - ◆ レポートや論文は「提出してあげるもの」でなく「読んでもらうもの」です。
- 等電位線: グループで一枚しかできないので、コピーして提出してよい。
- グラフは、各自が作成する。共同研究者のコピーではダメ。
 - ◆ レポートにグラフを貼るときは、グラフに「図1」、「図2」、...と名前を付け、「図1はXXXXの測定結果である」のように、必ず本文中で説明すること。貼ってあるだけだと、意図がわからない。
 - ◆ とくに、軸のタイトルと数字、単位を必ず書き込むこと。
- レポートは、自分の言葉でまとめること。
 - ◆ コピペは一切、減点の対象とします。
 - ◆ 読みやすい構成、記述に努める。

25

読みにくい段落分けについて

良い例

- 全体に共通なこと(あれば)
- 実験 1
 - ◆ 目的・原理
 - ◆ 測定方法
 - ◆ 測定結果
 - ◆ 考察
- 実験 2
 - ◆ 目的・原理
 - ◆ 測定方法
 - ◆ 測定結果
 - ◆ 考察
- 実験 3
 - ◆

悪い例

- 目的・原理
 - ◆ 実験 1
 - ◆ 実験 2
 - ◆
- 測定方法
 - ◆ 実験 1
 - ◆ 実験 2
 - ◆
- 結果
 - ◆ 実験 1
 - ◆ 実験 2
 - ◆

程度によるが、本授業のレポートでは減点の対象にします。

26