

実験で体験する物理

～PDL 実験(文系)～

千葉大学物理学教員集団編

2024 改訂

目 次

1. 光の実験	1
1-1 実験 光の回折・干渉	2
1-2 実験 光の屈折・反射	4
1-3 実験 光の偏光	8
1-4 実験 光の散乱	11
2. 電場の実験	12
2-1 抵抗と抵抗率	13
2-2 電位分布	15
2-3 電流分布 I	17
2-4 電流分布 II	19
3. 磁場の実験	22
3-1 磁場はめぐる	29
3-2 電流の正体を磁場であばく	24
3-3 電流が作る磁場	26
3-4 磁場が作る電流	28
4. 力学の実験	35
4-1 振り子の実験	31
4-2 回転運動	33
5. 音の実験	35
5-1 周波数と音	36
5-2 弦の振動	39
6. 太陽電池の実験	41
6-1 太陽電池の実験	44
7. 熱の実験	47
7-1 熱放射	48

1 光の実験

光の性質を体験してみよう

1.1 実験 光の回折・干渉

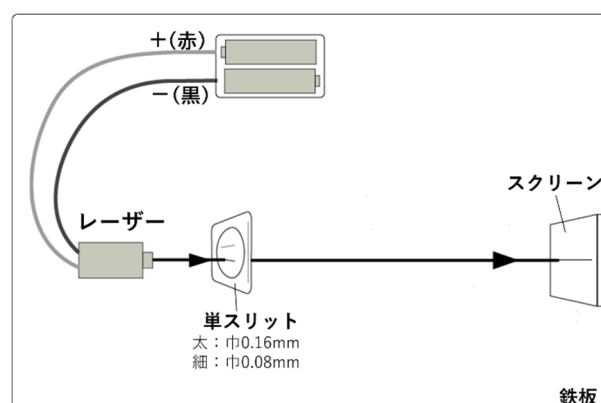
(1) 光がスリットを通るとき

〔準備〕

- ① 右図のように装置を組み立てましょう。
- ② レーザーに1.3V乾電池×2をつなげ、レーザー光を出します。レーザー光を確認する際は、直接覗き込まず、付属のスクリーン等に映して間接的に確認すること。

注意：レーザー光を直接目に入れないこと！！

- ③ レーザー光をスリットに当て、透過した光が当たる場所にスクリーンを立てます。必要に応じて、レーザーの高さをスリットの高さに合わせて磁石を追加するなどして調節する。



〔実験〕

スリットには細いスリットと太いスリットがあります。まず、細いスリットに光を当て、スクリーンに映る像を観察してみましょう。観察するときは周囲を暗くすると、像がよく見えます。

- ① 実際のスリット幅（太 0.16mm 細 0.08mm）と、スクリーンの像幅の大きさを比べましょう。

- ② スリットがない場合とある場合の像をスケッチしましょう。その違いは何でしょうか？

ない場合

ある場合

- ③ スリット幅が太い場合と細い場合のスリット像をスケッチしましょう。どう違うのでしょうか？

太い場合

細い場合

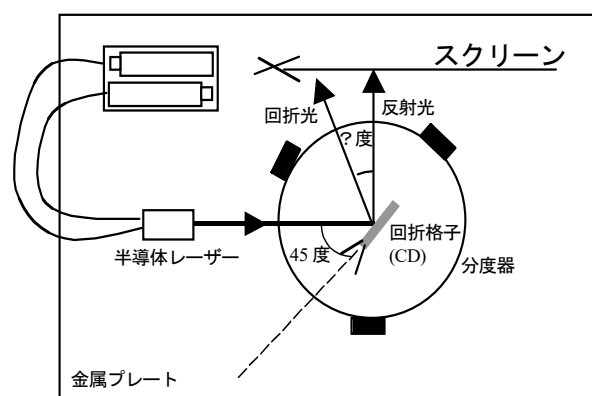
- ④ スリットの代わりに、細い針金を置くと、スクリーン上の像はどのように変化しますか？

(2) 光がCDに当たるとき

〔準備〕 右図のように装置を組み立てましょう。

〔実験〕

- ① 回折格子（CD）に当たって反射する光のほか、反射光とは違う角度にも光が観察されるはずです。これは回折光といいます。スクリーンの像をスケッチしましょう。



- ② 分度器で反射光の角度と回折光の角度は読み取ってみましょう。その様子をスケッチしましょう。

解説:

○半導体レーザーの仕組み

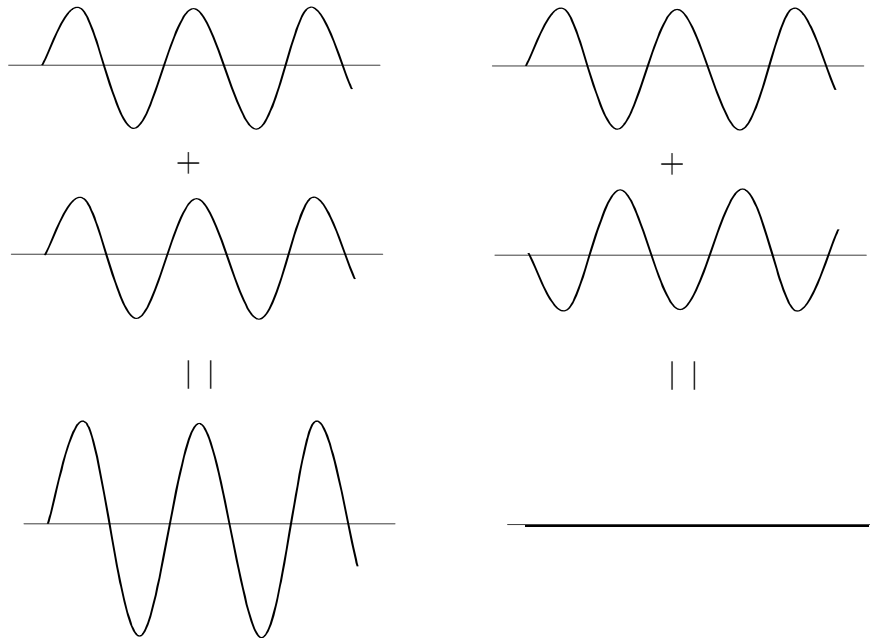
CD,DVD の仕組み

○光の波としての性質

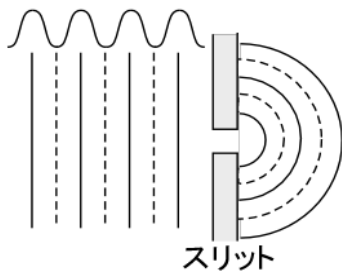
波の重ね合わせ

強め合う

弱め合う



波の回折



・回折：波はまわりこむ

海岸と堤防

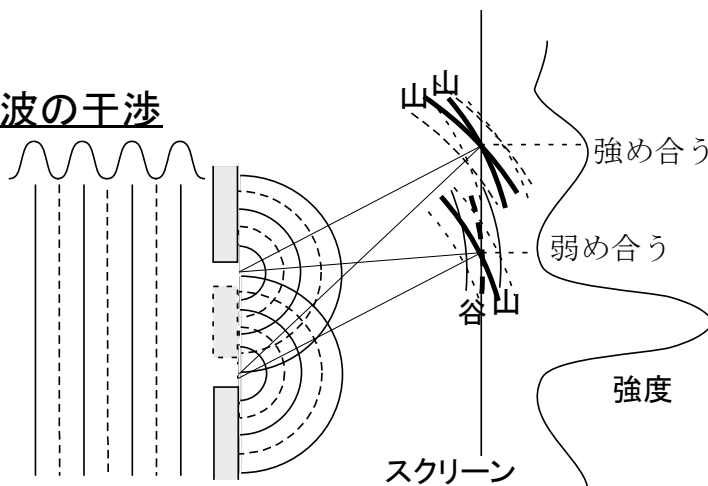
・干渉：波は重ね合う

・「光は波である」

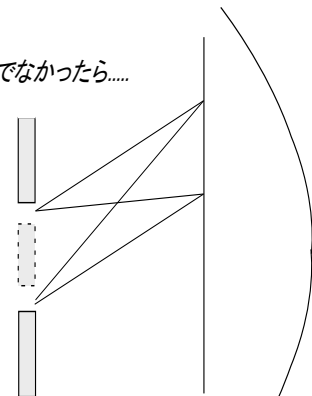
光通信

電波（TV、携帯電話 etc）と仲間

波の干渉



もしも波でなかったら.....



1.2 実験 光の屈折・反射

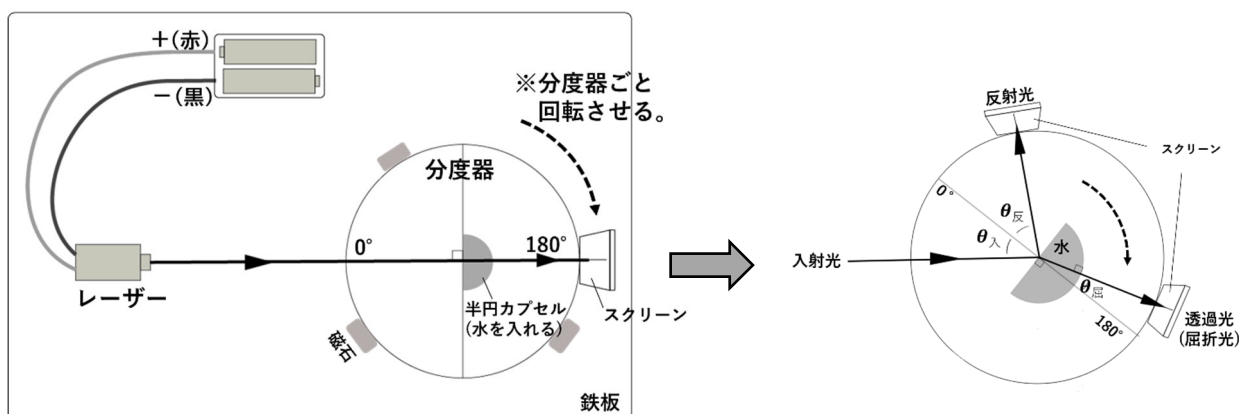
～光が水に入射するときの屈折と反射を調べよう～

〔準備〕

- ① 下図のように鉄板上に分度器を磁石 3 個で挟んで設置し、分度器の中央に半円カプセルを置く。このとき、半円カプセルの反射面と分度器の 0° - 180° 線が直交し、かつ分度器の中心と半円カプセルの円中心が一致するように置く。
- ② 半円カプセルに 8 分目ほど水を入れる。
- ③ レーザーに 1.3V 乾電池 $\times 2$ をつなげ、レーザー光を出す。レーザー光を確認する際は、直接覗き込まず、付属のスクリーン等に映して間接的に確認すること。

注意：レーザー光を直接目に入れないこと！！

- ④ レーザー光が 0° - 180° 線と平行となるように、レーザーの位置と向きを調節する。また、レーザー光の高さも水位内に入射するよう、レーザーの下に磁石を追加するなどして高さを調節する。
- ⑤ 半円カプセルを乗せたまま(水がこぼれないよう)分度器をそっと回転させる。スクリーンを 2 つ使い、水に入射したレーザー光の反射光(水面で反射する光)と屈折光(水の中に入射し屈折し透過する光)を確認する。反射光(または屈折光)がスクリーンの中心線に当たる位置にスクリーン位置を合わせ、そのときに中心線が指す分度器の目盛りを 0° - 180° 線を基準として読み取る。



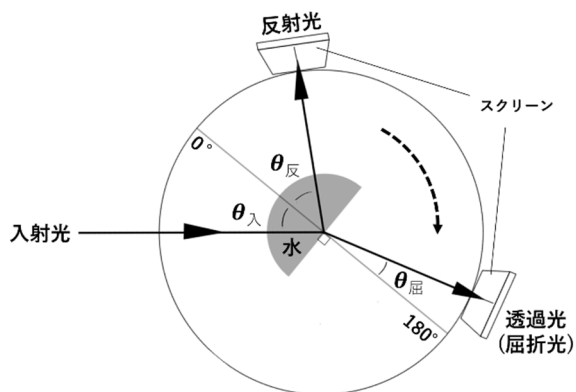
〔実験1〕空気中から水に進む光の反射と屈折を調べる

半円カプセルを乗せた分度器を回転させ、レーザー光の水への入射角 $\theta_{入}$ を徐々に変えていく。このときの反射角 $\theta_{反}$ と屈折角 $\theta_{屈}$ を測定し、下記の表に記録しましょう。測定後、入射角と屈折角から屈折率を計算しましょう。

入射角 $\theta_{入}$	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
反射角 $\theta_{反}$							
屈折角 $\theta_{屈}$							
$\sin \theta_{入}$							
$\sin \theta_{屈}$							
屈折率 $n = \frac{\sin \theta_{入}}{\sin \theta_{屈}}$							

〔実験2〕 水中から空気中に進む光の反射と屈折

次は、半円カプセルを乗せた分度器を実験1から 180° 回転させ、反対向きにする。レーザー光は、水中から空気中に進むようになる。



- (1) 水中から空気中への入射角 $\theta_{\text{入}} = 30^\circ$ の時、反射角 $\theta_{\text{反}}$ と屈折角 $\theta_{\text{屈}}$ は何度になりますか？
 余裕があれば、入射角を変化させたときの反射角と屈折角の変化を調べてみましょう。

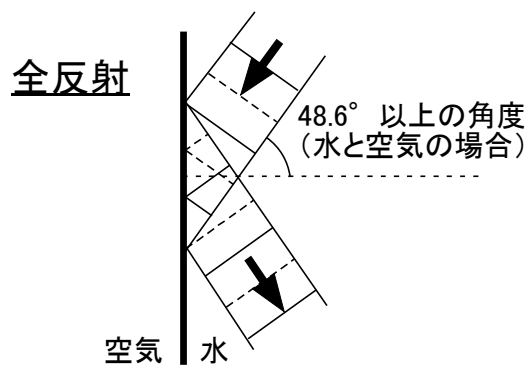
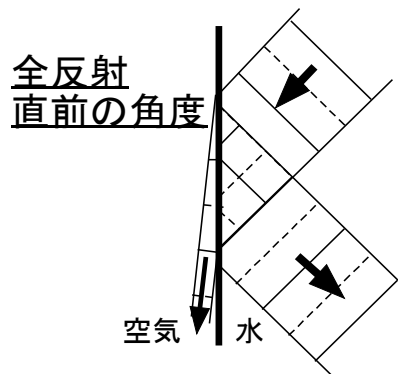
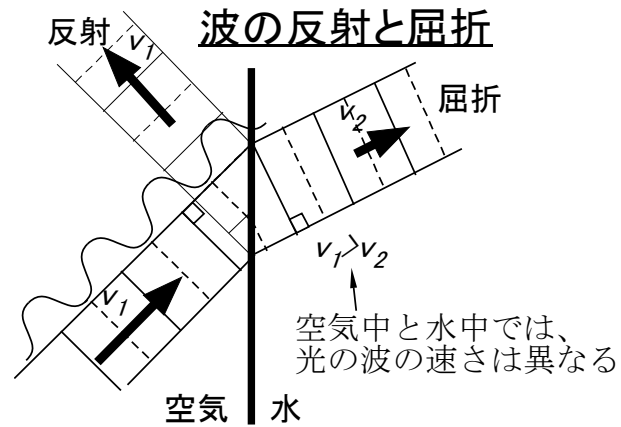
入射角 $\theta_{\text{入}}$	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
反射角 $\theta_{\text{反}}$							
屈折角 $\theta_{\text{屈}}$							
$\sin \theta_{\text{入}}$							
$\sin \theta_{\text{屈}}$							
屈折率 $n = \frac{\sin \theta_{\text{入}}}{\sin \theta_{\text{屈}}}$							

- (2) さらに $\theta_{\text{入}}$ を徐々に大きくすると、ある角度 θ で透過光がなくなります。その角度 $\theta_{\text{入}}$ を調べてみましょう。

解説:

屈折: 媒質中で波の速さが異なると、波は折れ曲がって進む。

全反射: 遅い → 速い の場合の入射では、入射角が大きいと波は全反射する。
(例: 光ファイバー)



[参考：スネルの法則]

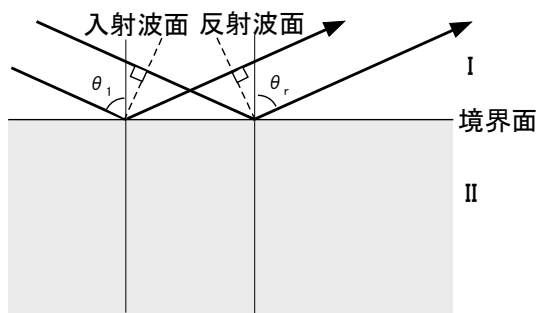


図 1. 入射光と反射光

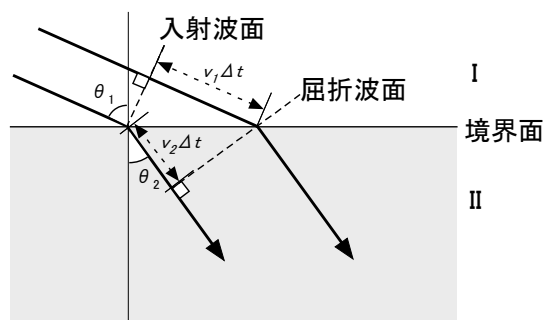


図 2. 入射光と屈折光

図 1 と図 2 に示すように、光の伝搬速度が異なる物質 I と II の境界面に光が入射すると、境界面にて反射する光（反射光）と通過し屈折する光（屈折光）とに分かれる。このとき、入射角度と反射角度は等しい ($\theta_i = \theta_r$) が、入射角 θ_1 と屈折角 θ_2 の間には式 (1) の関係がある。

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = n \quad (\text{一定}) \quad (1)$$

上式において θ_1 を変化させると、それに対応して θ_2 も変化し、そのとき n は一定に保たれる。このことは、物質によって n は決まっており、境界面における光路は、式 (1) によって導かれることを意味している。これをスネルの法則といい、 n を物質 I に対する物質 II の相対屈折率という。

スネルの法則は、ホイヘンスの原理を用いて素元波が作る波面を考えることによって説明することができる。いま、光波の真空中での伝播速度を c 、物質 I, II 中での速度をそれぞれ v_1 , v_2 とすると、物質 I, II の絶対屈折率は、それぞれ、

$$n_1 = \frac{c}{v_1}, \quad n_2 = \frac{c}{v_2} \quad (2)$$

と表され、相対屈折率は

$$n = \frac{n_2}{n_1} \quad (3)$$

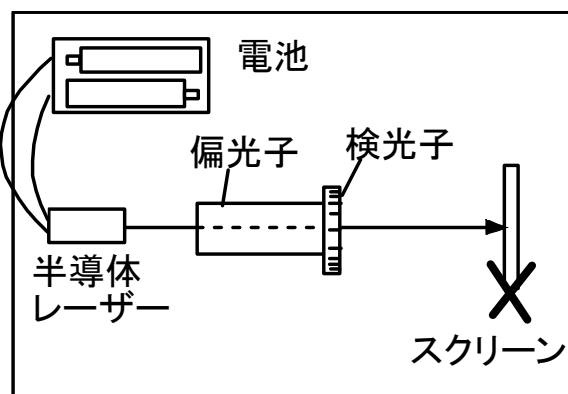
と与えられる。物質 I として空気を考えた場合 $n_1 = 1.0003$ であるので、 $n_2 \cong n$ とみなせる。

1.3 実験 光の偏光

[実験1] 検光子のみ（円筒形容器の蓋部分）を手に持ち、携帯電話の画面や机の反射光などを覗いてみましょう。覗きながら、検光子を回転させると、見え方がどのように変化するのでしょうか？また、教室の蛍光灯についても同じように試してみましょう。

[実験2] 検光子の角度による明るさの変化を詳しく調べましょう。下図のように装置を組み立てましょう。最初に検光子を回転させ、スクリーンに映る光の像が最も暗くなる角度を探し、そのときを 0° とします。そこから検光子を刻み目 8 つ ($=30^\circ$) ずつ回転させ、そのときの像の明るさを自分の目で 4 段階程度 (0, 1, 2, 3) で評価し記録しましょう。測定後、グラフを作成しましょう。

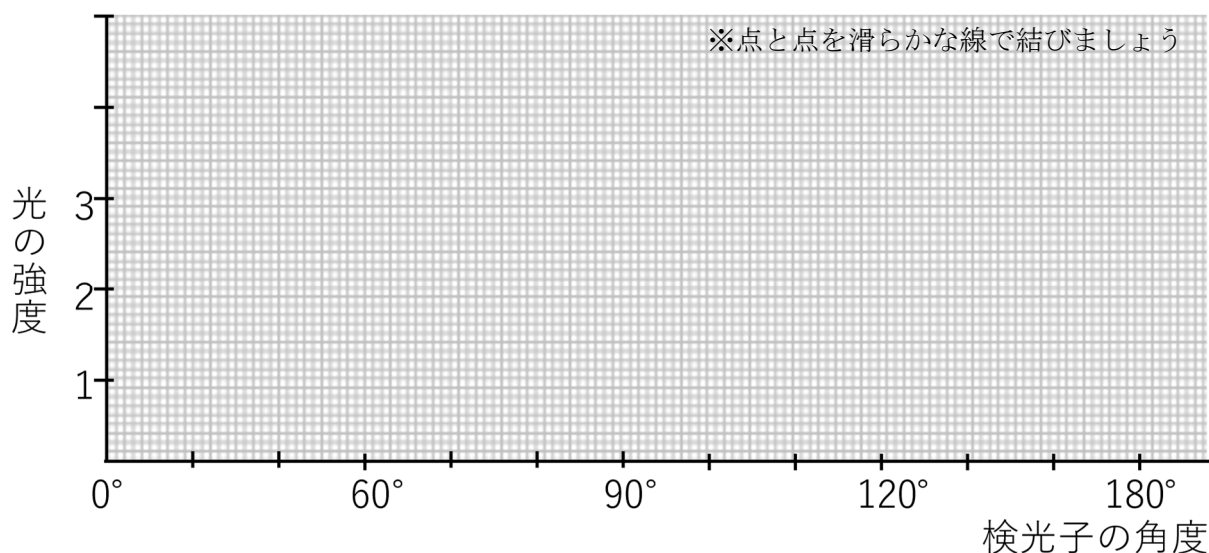
注意：レーザー光を直接目に入れないこと！！



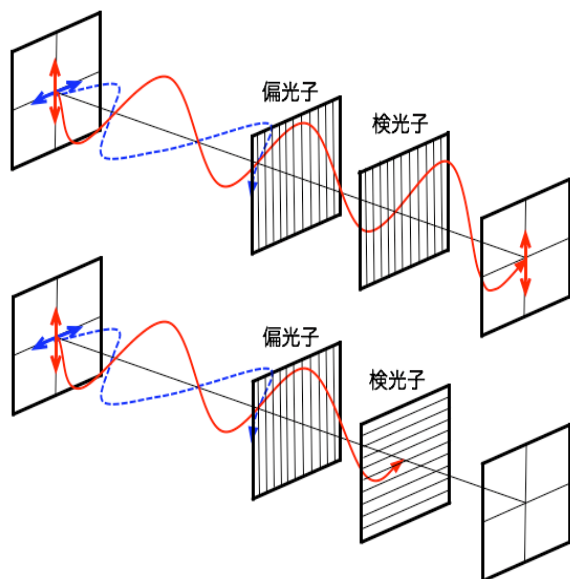
※半導体レーザーの下に磁石 1 個を追加し、偏光子に光が入る高さに調節しましょう。

刻み目の数	検光子の角度 [$^\circ$]	像の明るさ強度 4 段階評価 (0, 1, 2, 3)
0	0	
8	30	
16	60	
24	90	
32	120	
40	150	
48	180	
56	210	
64	240	
72	270	
80	300	
88	330	
95	360	

[発展実験] 余力がある人は、像の明るさの変化を数値測定してみましょう。（装置の組み立ては次の頁参照）明るさ強度の測定はフォトダイオード (PD) を使います。スクリーンのかわりに PD をおき、PD の赤黒端子に抵抗 $1k\Omega$ を挟んでデジタルマルチメータで赤黒端子の電圧値 [mV] を測定します。（光の強度に応じて電圧値が変化します。）



解 説:



偏光していない光が
偏光子と検光子を通過する様子

●太陽光、白熱灯、希ガスレーザー光

--- 横波／偏光なし

光の振動成分（電場成分）は、光の進行方向に対して垂直な面内で振動している。

光は横波⇔音は縦波。

太陽光などは、その面内で 360° あらゆる方向を向いている。（偏光なし）

●半導体レーザー光 --- 横波／偏光あり

特定の方向の振動成分を多く含んだ光（偏光）

●偏光子（検光子）

光の特定の方向の振動成分のみが透過できる。通過した光は偏光となる。

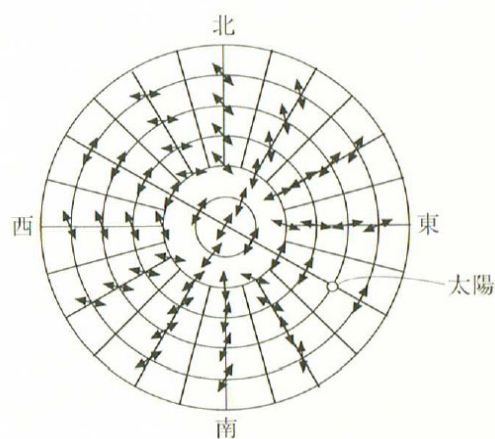
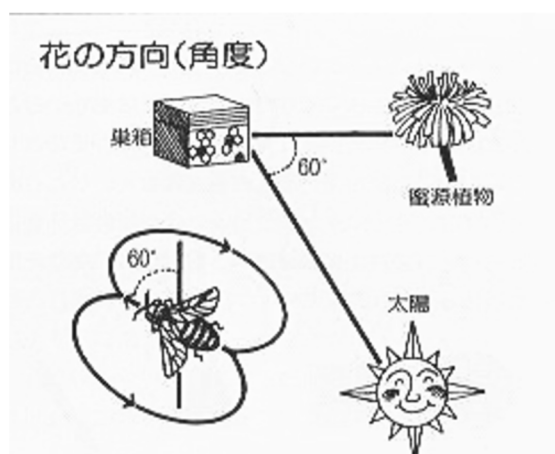
偏光子と検光子のそれぞれの偏光方向が、

→平行のとき、光は透過できる（左上図）

→垂直のとき、光は透過できない（右下図）

[参考：空の青色は偏光している！！]

空の青色は、太陽の光が直接届いた光ではなく、一度空気分子に反射して届いた光であるため、偏光されています。しかも偏光の振動方向は、光源の太陽との方向に依存しています。つまり、東の青空と南の青空は、偏光の振動方向が違っているのです。しかし、残念ながら人間の目には偏光を感知する能力はないので、その違いを感じることはできません。一方、ミツバチは偏光を感知する能力を持ち、空の偏光状況から花と巣箱と太陽の方角を割り出し、仲間にダンスで伝達していることがわかっています。

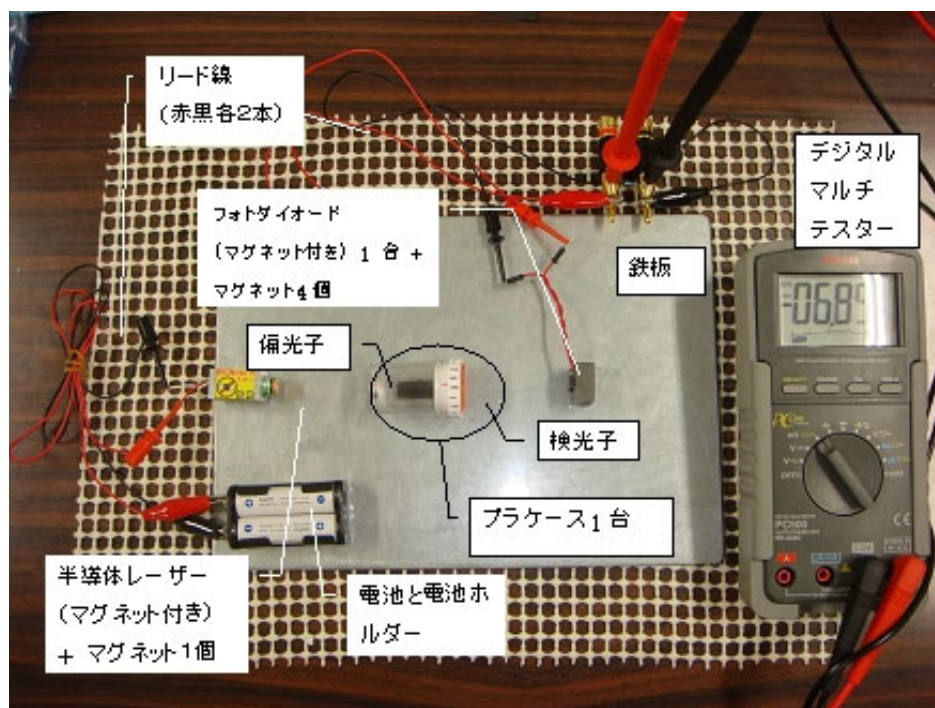


<発展実験：光の強度を定量的(数值的)に測定してみよう>

“フォトダイオード”という部品を使用すると、光を電気に変換することができます。
光の強度を電圧値として、測定してみましょう。

1. 写真のように実験の準備をしましょう。デジタルマルチメータは電圧計として使用します。電圧計は並列につなぐことは中学校で学びましたね。

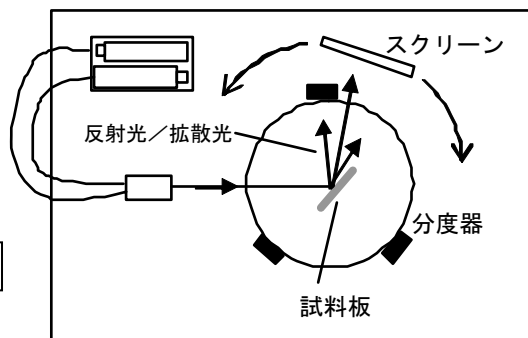
鉄板 1枚	半導体レーザー (マグネット付き) 1台	リード線 (黒、赤 各2本)
電池 (1.2V x 2個) + 電池ホルダー 1個	マグネット 5個 (高さ調整用)	デジタルマルチテスター (DMT) 1台
バインディングポスト 1 個	偏光子・検光子(ブラケース底) 1個	スリット無しフォトダイオード (マグネット付き) 1台
負荷抵抗 (1k Ω) 1個	高さ角度調整用紙片 (TA が 紙をちぎって用意する)	



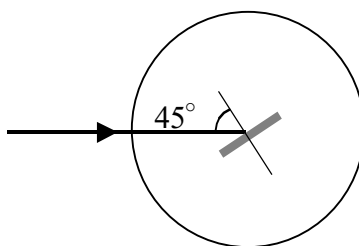
1.4 実験 光の散乱

準備: 右図のように装置を組み立てましょう。
分度器は小磁石で挟み固定すると便利。
分度器の中心に試料板を置き、反射光や
拡散光を観察する。

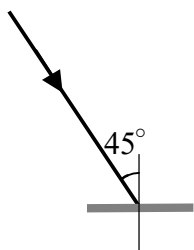
注意：レーザー光を直接目に入れないこと！！



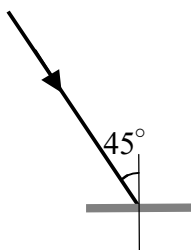
実験: ①入射角を 45° とした時の試料 2 から出る強い輝点は何度の角度に現れますか？



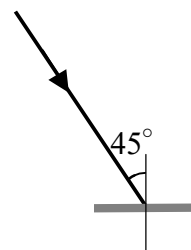
②入射角を 45° とした時、3 種類の試料から光はどのように反射、ないし拡散されますか。また、透過光はどうなりますか。



試料板 1

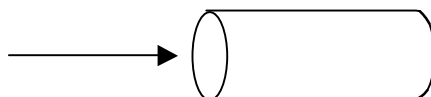


試料板 2



試料板 3

③試料 4 を観察してその様子をスケッチしてみよう。



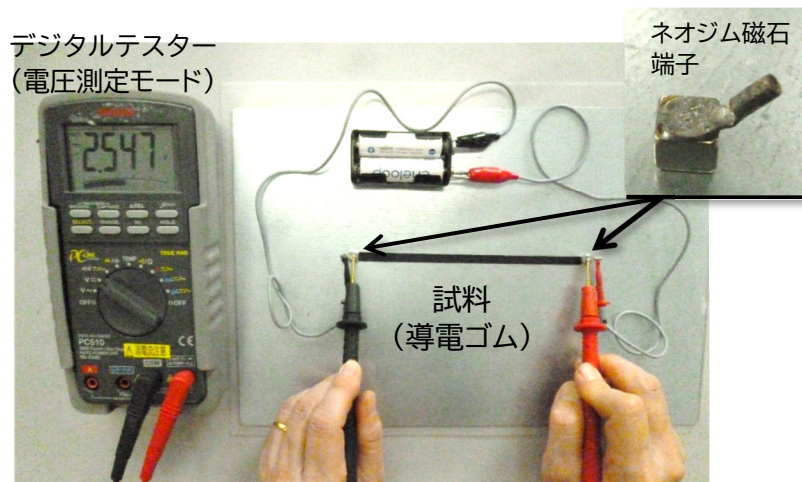
2 電場の実験

電気の性質を体験してみよう

2.1 抵抗と抵抗率

実験① 電圧と電流の関係を調べ、オームの法則を調べよう。

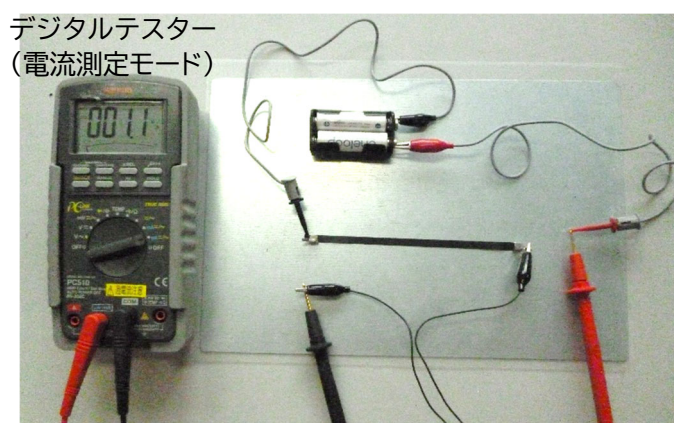
- (1) 電圧測定 - 電池と試料(導電ゴム)で回路をつくり、導電ゴムの両端間の電圧をデジタルテスターで測定しましょう。電池の本数を増やしたとき、それぞれの電圧を測定しましょう。



0 本	V
1 本	V
2 本	V

この実験から何がわかりますか？

- (2) 電流測定 - デジタルテスターを回路から外し、電流測定モードに切り換え、電池と試料(導電ゴム)の回路に直列につなぎ換え、電流値を測定しましょう。電池の本数を増やしそれぞれの電流を測定しましょう。



0 本	μA
1 本	μA
2 本	μA

この実験から何がわかりますか？

- (3) 測定結果からグラフを作りましょう

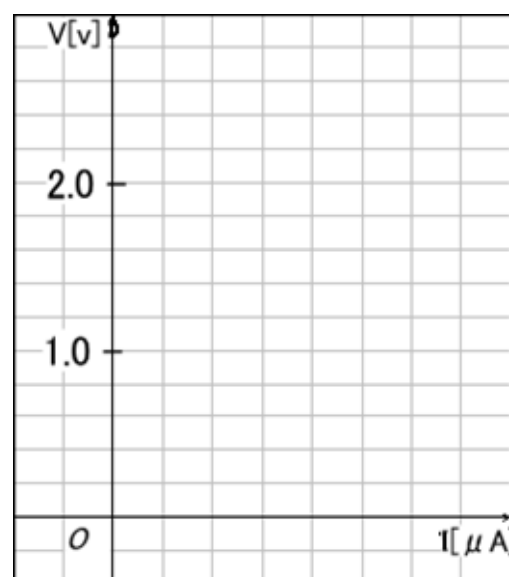
- 横軸を電流 $I[\mu\text{A}]$ 、縦軸を電圧 $V[\text{V}]$ として、測定した結果を 3 点プロットし、直線で結びましょう。
- この傾きが「抵抗」です。これを計算しましょう。

抵抗 (V-I グラフの傾きの値) Ω

- (4) 導電ゴムの抵抗をデジタルテスターで測定しましょう

抵抗 (デジタルテスター測定値) Ω

2 つの抵抗値は一致していますか？



実験② 試料の長さ・厚さを変えると、抵抗値はどう変化するかを調べよう。

(1) 抵抗と試料の長さの関係を調べよう

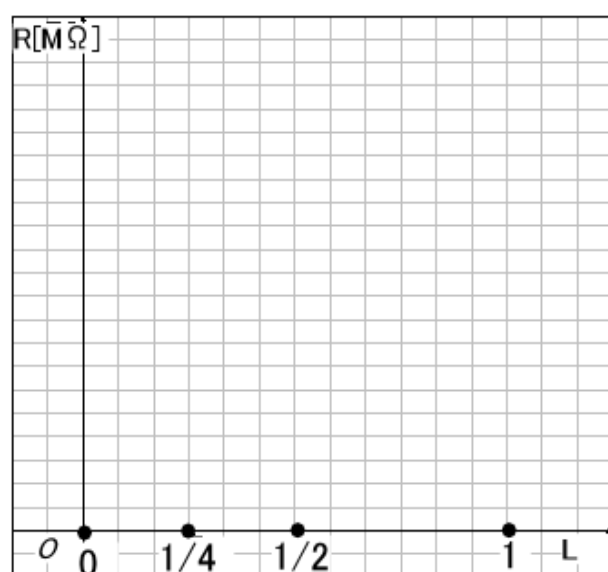
幅 5mm×長さ 145mm の導電ゴムの抵抗値は①の(4)で測定しました。このシートの長さを $L=1$ としましょう。

ア) これを、長さ方向に 2 等分して、幅 5mm×長さ 72.5mm の 2 枚に切断します。このうちの 1 枚の抵抗を測定しましょう。($L=1/2$)

イ) さらに、2 等分すると、5mm×36.25mm が 4 枚できます。このうちの一枚の抵抗を測定しましょう。($L=1/4$)

ウ) 縦軸に抵抗 R 、横軸に長さ L をとって、これら 3 点をプロットし直線で結びましょう。

この実験から何がわかりますか？



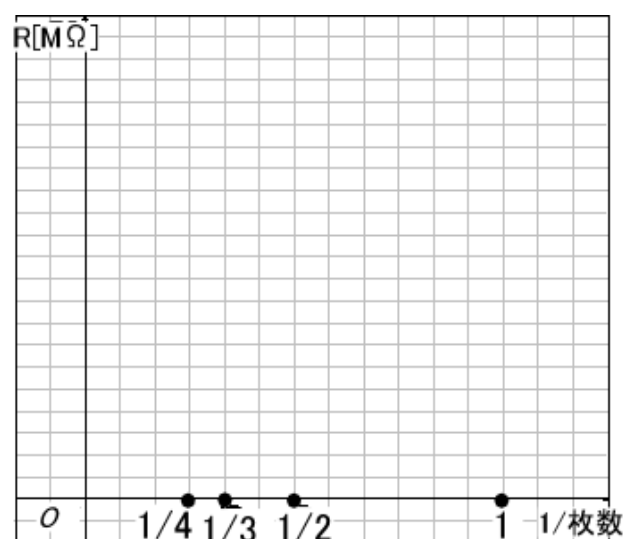
(2) 抵抗と試料の厚さ（枚数）の関係を調べよう

幅 5mm×長さ 36.25mm の導電ゴムの抵抗値は②の(1)のイ)で測定しました。

ア) これを、2 枚/3 枚/4 枚と重ねて、それぞれの抵抗を測定しましょう。

イ) 縦軸に抵抗 R 、横軸にシートの枚数（試料の厚み）の逆数をとって、1, 1/2, 1/3, 1/4 [1/枚] それぞれの抵抗をプロットしましょう。これら 4 点を直線で結びます。

この実験から何がわかりますか？



○ オームの法則：電圧 V = 抵抗 R × 電流 I （電圧は電流に比例している）

○ $R = \rho \frac{L}{S}$ ：抵抗 R は長さ L に比例し、断面積 S に反比例します。ここで、 ρ （ロー）は **抵抗率** と呼ばれる物質固有の定数です。

2.2 実験 電位分布

準備:使用する器具

鉄板 1枚	絶縁シート 1枚	試料-導電性ゴムシート (幅 40mm × 長さ 145mm) 2枚
電池 (1.3V × 2個) + 電池ホルダー 1個	リード線 (赤・黒各2本)	アルミテープ付き棒磁石 2本
デジタルマルチテスター (DMT) 1台	ものさし 一個	

右図のように装置を組み立てましょう。

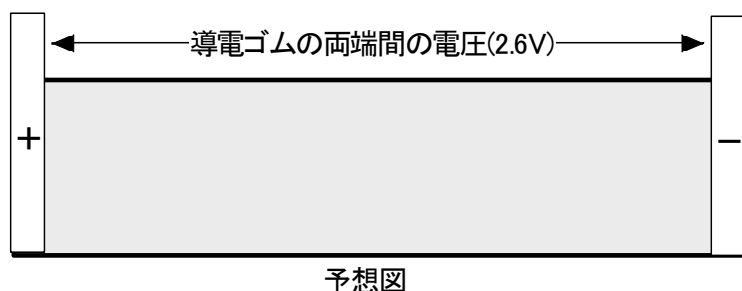
電池と試料(導電ゴム)を直列につなぎます。

テスターのファンクションは、直流電圧を選びます。

実験:

① 導電ゴムの両端の電圧を10等分する電圧の曲線を探し出しましょう-電池2本の場合

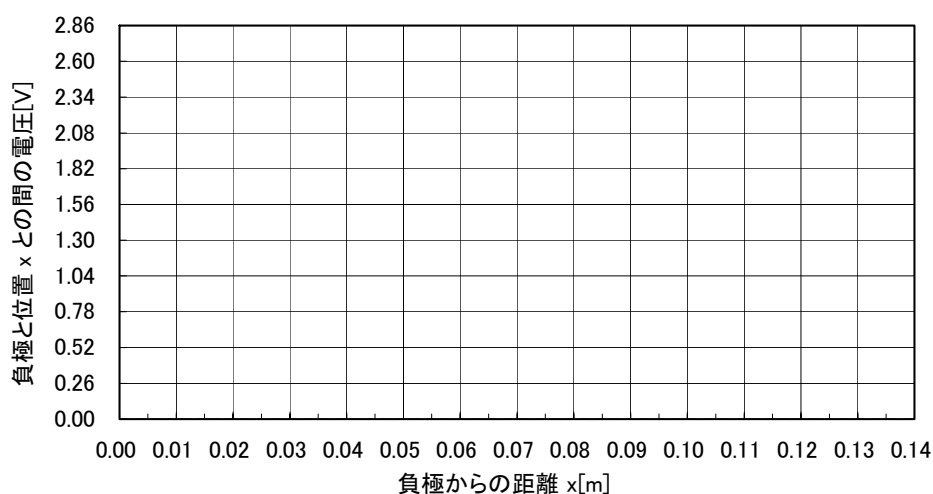
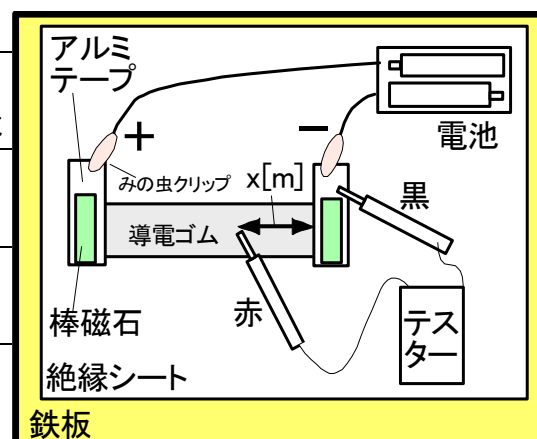
<課題>導電ゴムの両端の電圧を10等分する電圧を探し出します。実験に入る前に、予想図を描いてみましょう



に固定したまま、赤の端子を導電ゴム上にあて、0.26V となる位置を探します。その位置で、赤のテスター端子を強く押し付け、導電ゴムにしるしをつけます。再び0.26V となる別の位置を探し、しるしをつけます。これを繰り返し、これらのしるしが描く曲線がはっきりと分かるまで、続けましょう。

- (4) 今度は
0.52V (= 0.26V × 2)
となる位置を探し、
(2) と同様にしるし
をつけていきます。

- (5) 以降、0.26V の3倍、
4倍、・・・、8倍、9倍の電圧を示す曲線を描いていきます。全部で9本の曲線が出来上がります。



- (6) テスターの黒の端子を当てている負極とこれら9本の曲線との距離(x [m])をそれぞれものさしで測ります。この距離とそれぞれの位置での電圧値のグラフを書きましょう。横軸が距離 x [m]、縦軸が負極とその位置との間の電圧 V [V]とします。さらに、(2)で測定した $x=0$ [m]の時の電圧と、(1)で測定した x が最も長い時（正極と負極の距離）の電圧もプロットしてください。プロットするのは、全部で11点です。
- (7) 11点を結ぶ線は、直線ですか？直線ならば傾きを計算しましょう。これを電場（電界） E と言います。

$$E \text{ (電池2本)} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ [V/m]}$$

直線でないならば、その理由を考えましょう。

この実験から何がわかりますか？

② 導電ゴムの両端の電圧を10等分する電圧の曲線を探し出しましょう-電池1本の場合

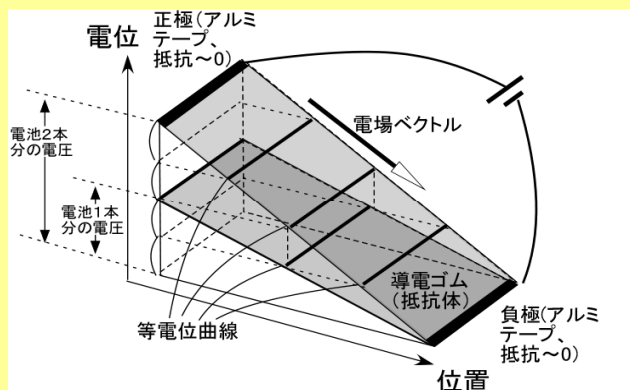
今度は、電池を1本に減らして、①と同じ手順で測定をしましょう。新しい導電性ゴムシートを使います。留意点としては、

- (a) 導電ゴムの両端が約1.3Vです。大きくずれている場合は、新しい電池と交換してください。
- (b) 2本のときと同様に、0.26Vごとに曲線のしるしをつけるため、4本の曲線が完成します。
- (c) これを、電池2本の時の①のグラフと一緒にプロットします。ただし、 $x=0$ [m]の時の電圧と x が最も長い時（正極と負極の距離）の電圧もプロットしてください。よって、プロットするのは、全部で6点です。これらを結ぶ線は直線ですか？直線ならば傾きを計算しましょう。これが電池1本の場合の電場です。

$$E \text{ (電池1本)} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ [V/m]}$$

この実験から何がわかりますか？

<解説>本講義では、負極を基準にして、ゴム上の各点の電圧を測定しました。電圧は“電位”とも言い、地図上の標高に似ています。同じ電位の位置をつなぐと等電位線を描くことができ、本講義ではこれを確認したのです。これは等高線に似ています。電位の傾きは等電位線に垂直な方向で最大となり、これをその位置での電場（ベクトル）と言います。地図上で等高線と物体が転げ落ちる方向が垂直になることに似ています。



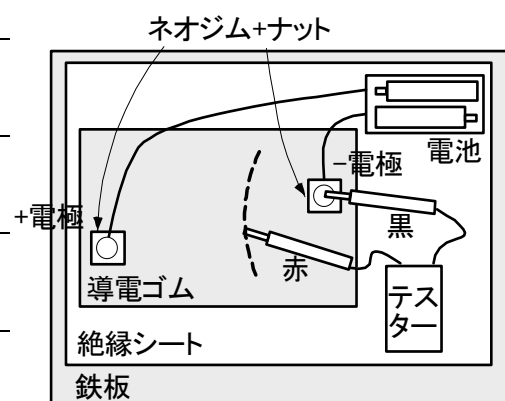
2.3 実験 電流分布 I

① 導電ゴムの両端の電圧を10等分する電圧の曲線を探し出しましょう-電池2本の場合

準備:使用する器具

鉄板 1枚	絶縁シート 1枚	試料-導電性ゴムシート 1枚
電池(1.3V×2個) + 電池ホルダー 1個	リード線 (赤・黒各2本)	ネオジム磁石電極 2個
デジタルマルチ テスター(DMT) 1台		

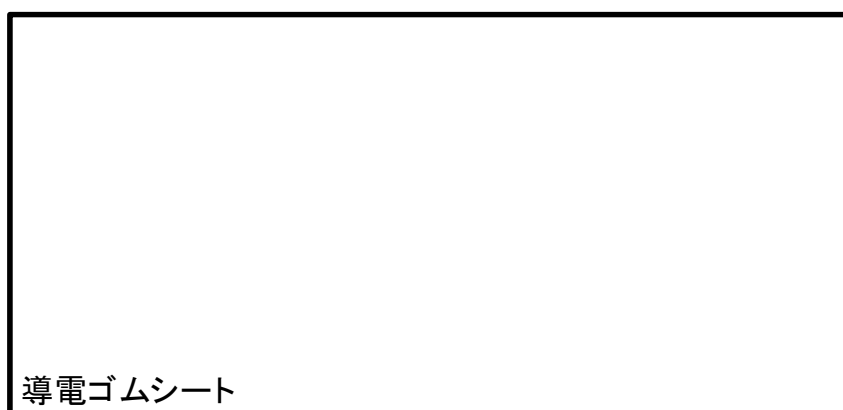
右図のように装置を組み立てましょう。電極は、シートの隅に自由に置きましょう。テスターのファンクションは、直流電圧を選びます。



実験：導電ゴム上の電極間の電圧を10等分する電圧の曲線を探し出しましょう

- (1) 負極にテスターの黒端子を当て、正極にテスターの赤端子を当てて、電圧を測定します。2.6V 程度であることを確認します。大きくずれている場合は、別の電池に交換しましょう。
- (2) テスターの黒の端子と赤の端子の両方を負極にあてて、電圧が 0V であることを確認します。
- (3) 次にテスターの黒の端子は負極に固定したまま、赤の端子を導電ゴム上にあて、0.26V となる位置を探します。その位置で、赤のテスター端子を軽く突き刺し、導電ゴムにしるしをつけます。再び 0.26V となる別の位置を探し、しるしをつけます。これを繰り返し、これらのしるしが描く曲線がはっきりと分かるまで、続けましょう。
- (4) 今度は $0.52V (= 0.26V \times 2)$ となる位置を探し、(3)と同様にしるしをつけていきます。
- (5) 以降、0.26V の 3 倍、4 倍、・・・、8 倍、9 倍の電圧を示す曲線を描いていきます。全部で 9 本の曲線が出来上がります。

<課題 1>実験に入る前に、電池の電圧を10等分する9本の曲線の予想図を電極の位置とともに描いてみましょう。



予想図

<課題2> 2つの電極を描き、実験で得られた9本の曲線群をスケッチしましょう。これが等電位線です。

導電ゴムシート

実験結果

<課題3>

ゴムシートの端と等電位線はどのように交差していますか？

なぜ、このように交差するのでしょうか？

<課題4>

正極に始まり負極に終わり、どの等電位線とも垂直となるような曲線をスケッチした等電位線の図に描いてみましょう。これが、電流線です。

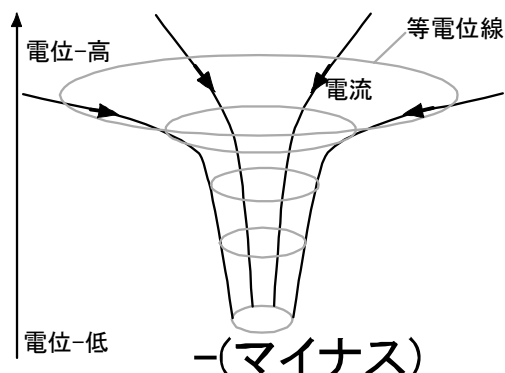
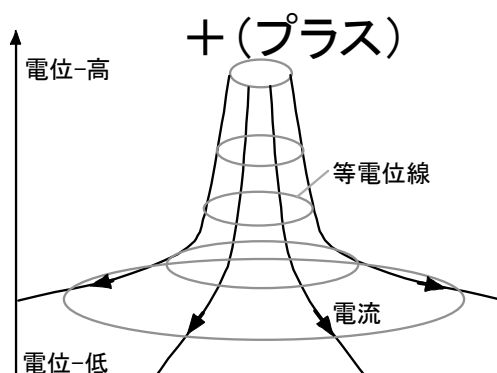
解説： ● 等電位線：電位の等高線 → 等電位線に垂直な方向に電流が流れる

電位の傾きが急 = 等電位線が密 = 強い電場 → 大きい電流

電位の傾きが緩 = 等電位線が疎 = 弱い電場 → 小さい電流

● 電場：電気を流そうとする強さ（電位の勾配の大きさ）

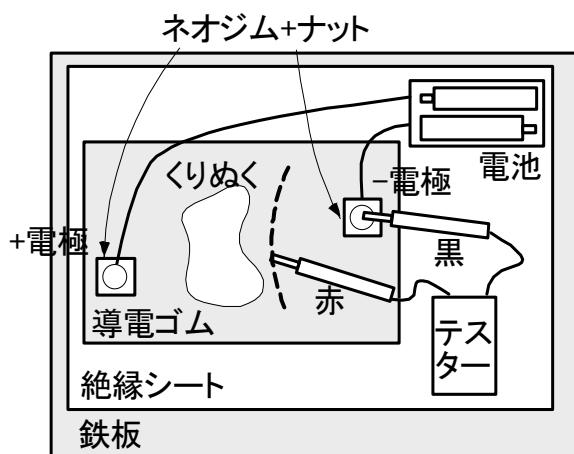
● 電流線：電流の流れを表す曲線



2.4 実験 電流分布Ⅱ

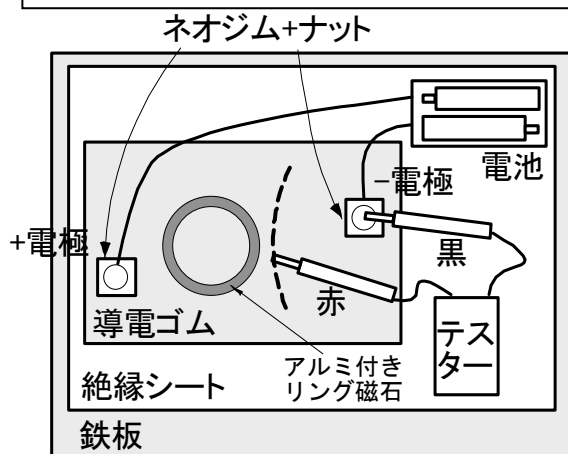
実験1:

導電ゴムを自由な形にくりぬいた時の電位分布を測定しましょう。



実験2:

導電ゴム上にアルミテープ付きリング状磁石を置いた時の電位分布を測定しましょう。



準備:使用する器具

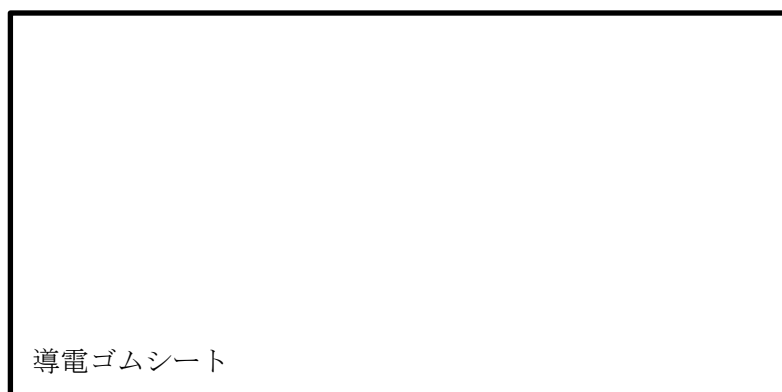
鉄板 1枚	絶縁シート 1枚	試料-導電性ゴムシート 1枚
電池(1.3V×2個) + 電池ホルダー 1個	リード線 (赤・黒各2本)	ネオジム磁石 2個 + ナット 2個
デジタルマルチテスター(DMT) 1台	実験1の場合---はさみ 1個	実験2の場合---アルミテープ付きリング状磁石 1つ

上図のように装置を組み立てましょう。電極は、シートの隅に自由に置きましょう。テスターのファンクションは、直流電圧を選びます。

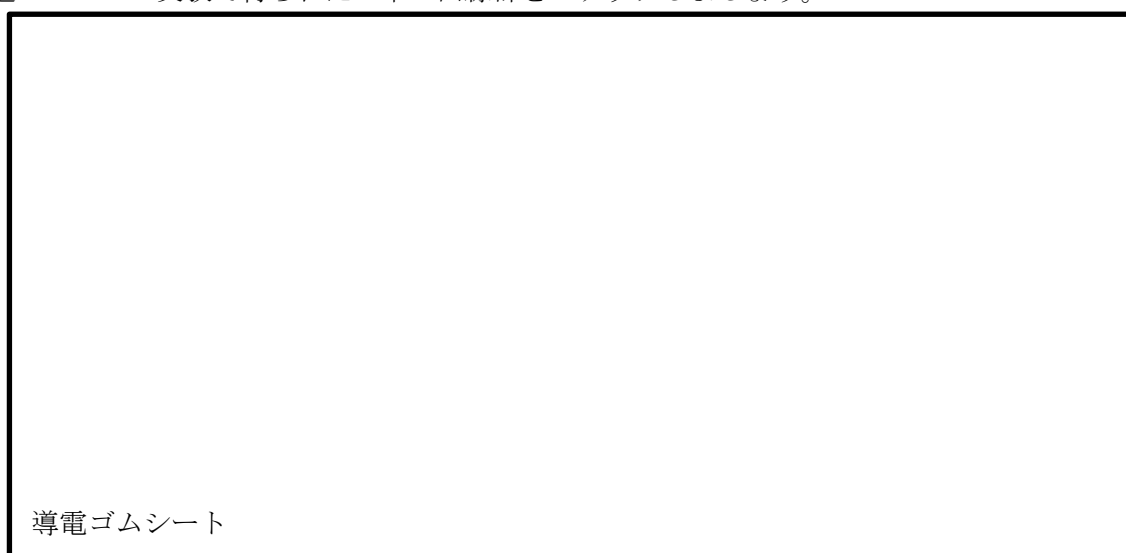
実験:

- (1) 実験1の場合は、はさみで導電ゴムを自由な形にくりぬきます。実験2の場合は、アルミ付きリング状磁石を中央あたりに置きます。
- (2) 負極にテスターの黒端子を当て、正極にテスターの赤端子を当てて、電圧を測定します。2.6V程度であることを確認します。大きくずれている場合は、別の電池に交換しましょう。
- (3) テスターの黒の端子と赤の端子の両方を負極にあてて、電圧が0Vであることを確認します。
- (4) 次にテスターの黒の端子は負極に固定したまま、赤の端子を導電ゴム上にあて、0.26Vとなる位置を探します。その位置で、赤のテスター端子を軽く突き刺し、導電ゴムにしるしをつけます。再び0.26Vとなる別の位置を探し、しるしをつけます。これを繰り返す、これらのしるしが描く曲線がはっきりと分かるまで、続けましょう。
- (5) 今度は $0.52V (= 0.26V \times 2)$ となる位置を探し、(3)と同様にしるしをつけていきます。
- (6) 以降、0.26Vの3倍、4倍、・・・、8倍、9倍の電圧を示す曲線を描いていきます。全部で9本の曲線が出来上がります。

- <課題1.> 実験に入る前に、電池の電圧を10等分する9本の等電位線の予想図を描いてみましょう。
- 実験1の場合は、電極とくりぬいた図形を、実験2の場合は電極とアルミ付きリング磁石も一緒に描きましょう。



- <課題2.> 実験で得られた9本の曲線群をスケッチしましょう。



- <課題3.> 前回の実験Cの曲線と比較してみましょう。くりぬいた図形またはアルミ付きリング磁石を置くと等電位線はどのように変化しましたか？なぜ、このように変化するのでしょうか？

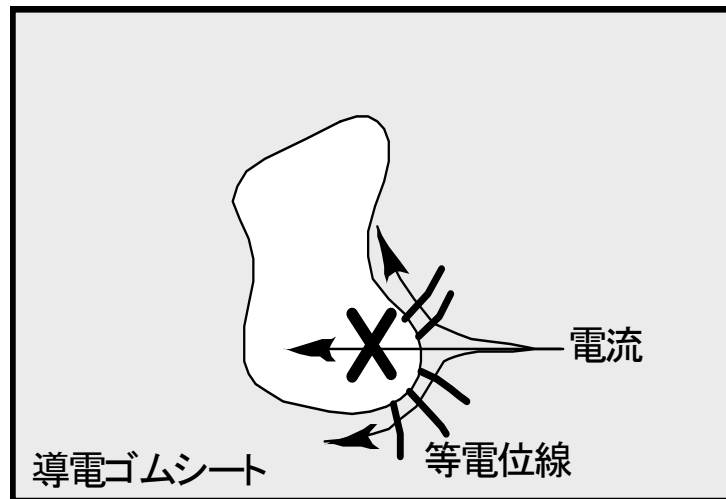
- <課題4.> くりぬいた部分またはアルミ付きリング磁石の中の電圧（電位差）を測定してみましょう。

- 、
- <課題5.> 余力がある人は、正極に始まり負極に終わり、どの電位線とも垂直となるような曲線（電流線）をスケッチした等電位線の図に上書きしましょう？

解説:

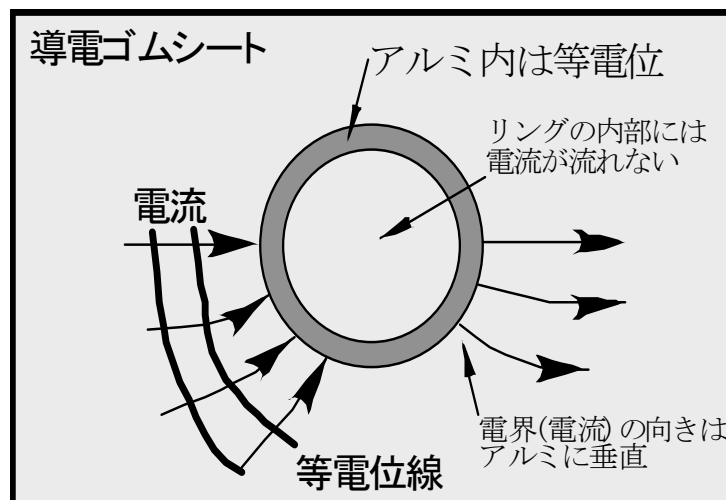
＜実験 1＞

電流はくりぬいた図形で消滅することなく、くりぬいた図形の縁を流れる。
等電位線は電流の向きに垂直なのだから、電位線はこの図形に垂直に交わる。



＜実験 2＞

アルミの比抵抗 $2.5 \times 10^{-8} [\Omega \text{m}]$ は、導電ゴムの比抵抗 約 $5 [\Omega \text{m}]$ に比べ非常に小さい。よって、アルミ内部には電位差がないと考えてよく、内部は等電位とみなせる。また、等電位線は交差することがないため、等電位線はこのアルミを避けるような曲線を描く。電流の方向はアルミに垂直である。



3 磁場の実験

3.1 磁場はめぐる $\text{div } \mathbf{B} = 0$

皆さんのまわりに満ちあふれている「磁場」(Z I B A)。身近なはずなのに、なぜか実感がありません。冷蔵庫にくっついていてメモ留め磁石から、産業用強力磁石、そして地球も大きな磁石です。この磁石から出ている磁場にはどのような性質があるのでしょうか。また、磁場は他の物にどのような作用を及ぼすのでしょうか。色々な物で調べてみましょう。

裏技シリーズ1：方位磁石の直し方

(1) 磁場はどのような性質があるのだろうか。

- ・実験A： 棒磁石のまわりに置いた方位磁針はどのように向くだろうか。(向き)

実験結果

(2) 磁石から広がる「磁束」を磁場観察槽を使って観察し、記録しよう。(方向、濃さ)

- ・実験B1： 1つの棒磁石のまわりの磁場 どのように分布？
- ・実験B2： 2つ以上の棒磁石を取り囲む磁場 NS、 NN、 SSなど自由にどうぞ

予想

実験結果

(3) 磁石にくっつくもの(あるある)、 つかないもの(ざらにある)、 反発するもの？！

- ・実験C：色々なものが磁石にくっつく(引かれる)かどうか調べ分類しよう。

例： クリップ、 消しゴム、 シャーペンの芯

=>高感度に調べるために： 調べるものを糸で釣り、強力磁石を近づけてみる。

- ・磁石にくっつくもの _____
- ・つかないもの _____
- ・反発するもの _____

(4) 磁場を通すもの、通さないもの (シールド)

- ・実験D： 色々な材料の板で磁場が通るかどうか調べよう。

プラスチック板、鉄板、銅板、アルミ板など手近にあるもので試してみよう。

- ・プラスチック板 _____ アルミ板 _____
- ・鉄板 _____ () _____
- ・銅板 _____ () _____

結局、どのようなものを使えば磁場を遮ることができるのだろうか？

(5) 磁石になったクリップ

- ・実験E： クリップ自身が磁石になったことを示して下さい。(方法と結果を書く)

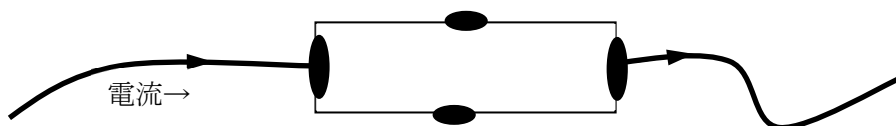
3.2 電流の正体を磁場であばく ホール効果

日常生活で不可欠の電気製品、これは電気が流れることで動作しています。この「電流」の正体は導線を流れる「電子」だということは、中学校の理科で勉強した（はず？）です。これも身近な事のはずなのに、なぜか実感がありません。それを目に見える形にしてくれるのが「磁場」なのです。今日は実験がしやすいように「ケイ素（シリコン）」に電流を流し、そこに流れている電流の正体が電子である事を調べてみましょう。また、電気測定に使われる「テスター」の使い方に慣れて下さい（役に立つよ）。

参考：等電位線の実験で学んだことをぜひ利用してください。

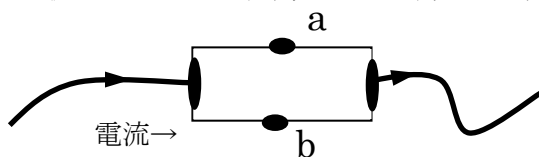
（１）ケイ素に電池をつなぎ、電流を流す。

- ・実験A 1： このときの電池の電圧をテスターで調べる。電池の電圧 _____ V
- ・実験A 2： ケイ素に流れる電流の大きさをテスターで調べる。
 - ・ ケイ素に流れる電流の大きさ： _____ A
 - ・ ケイ素の抵抗の値を計算してください。抵抗値 _____ Ω
 - ・ このときのケイ素の中の等電位線を予想して描いてみよう。



（２）電流をまたぐ電極 a・b 間の電圧を測定。（正・負、大きさ）

- ・実験B： 電流をまたいだ電極間の電圧を測定して記録



電圧測定の基準の電極：(a ・ b)

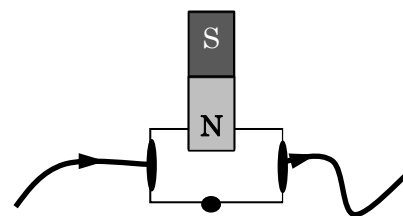
↑テスターの黒線をつないだ方

a・b 間の電圧の大きさ _____ V

（３）磁場を加えた時の、電流をまたぐ電極 a・b 間の電圧を測定（ホール効果）

- ・実験C： ケイ素に棒磁石を当て、電極 a・b 間の電圧を測定し、記録する。

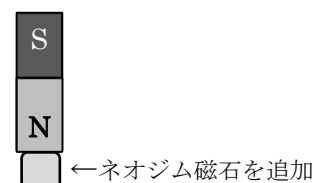
電圧（N極を近づけた）	_____	}	差
電圧（磁石なし）	_____		
電圧（S極を近づけた）	_____	}	差



（４）余裕があれば・・・磁場をパワーアップしてみる

- ・実験D： 棒磁石の先に、強力磁石をつけて磁場の強さをパワーアップする。これを使って実験Cを試みてください。磁場が強くなると何か変わりましたか？

電圧（N極を近づけた）	_____	}	差
電圧（磁石なし）	_____		
電圧（S極を近づけた）	_____	}	差



(5) 考えてみよう

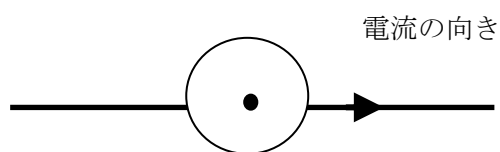
電気を持った粒子が磁場中を運動すると、「ローレンツの力」を受けます。ローレンツ力により、その電気を持った粒子の分布に偏りを生じ電位差が生じます（ホール効果）。この力の向きは、有名なフレミングの左手の法則で表される向きです。さあ、皆さんが実験した結果（実験C）によると、ケイ素を流れていた電流の正体は、どのような電荷（正・負）を持った粒子だったと結論されますか？

3.3 電流が作る磁場 $\text{rot } \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{i}$

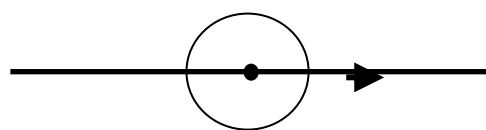
皆さんが磁場を利用するときは何を使っていますか？ もちろんすぐに思いつくのは磁石（永久磁石）でしょう。でも日常生活の様々な場面では電磁石が活用されています。これは電流が作る磁場を利用したものです。電流が流れているまわりには、必ず磁場が生じます。それは電流に対してどのように生じているのでしょうか。PDL実験で確かめてみましょう。

（1）1本の電線のまわりの磁場

- ・実験A： 電流を取り囲むように磁場が生じている事を、電線の上や下に置いた方位磁針で確かめてみてください。



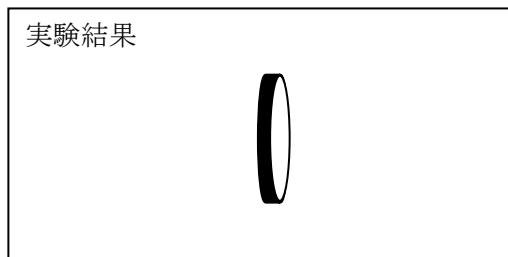
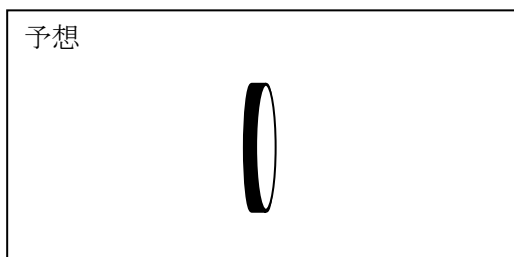
方位磁石を電線の上に置いた場合



方位磁石を電線の下に置いた場合

（2）50回巻いた円形コイルの磁場（強い！？）。（向き、大きさ）

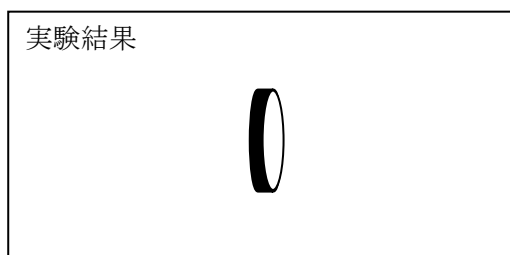
- ・実験B1： 円形コイルに生じた磁場の向きを方位磁針で調べ、スケッチしてください。



- ・実験B2： 円形コイルに流す電流の向きを変えると磁場の向きは_____

（3）50回巻いた円形コイルの磁場の分布の詳細。

- ・実験C： 実験Bを方位磁針の代わりに磁場観察槽を置いて磁場の分布を観察してください。



(4) 考えてみよう 円形コイルの作る磁場はどのような分布？ 何かに似ている？

電気の世界では、+電荷や-電荷が存在し、+電荷から「電束」（電気力線）が湧き出して広がり、-電荷で吸い込まれています。また、一方の電荷だけ存在する場合でも電束は広がっています。では、磁場も同様に考える事ができるのでしょうか。磁場実験の1回目「磁場はめぐる」では、磁束はすべて途切れることなく永久磁石の周りに分布していることを見ました。今回の電流が作る磁場も全く同様に電流を取り巻くように分布しています。これは、磁場の世界に「磁荷」が存在しないことを示しています。つまり、すべての磁場はある意味で「電流」により生じており、永久磁石も例外ではありません。それでは、永久磁石の磁場はどのような「電流」により生じているのでしょうか。想像してみてください。

＜考察＞永久磁石はどのような「電流」によって生じているのか。

3.4 磁場が作る電流

$$\text{rot } \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

今回は電流が磁場を作っていることを見してきました。じゃあ、逆に磁場が電流を作ってもよさそうです。ぜひ実験で確かめてみましょう。静電気や雷以外の「使い物になる電気」は、実際、なんとほとんどが磁場を用いて作られています。

(1) 磁場により電流は発生するか？

- ・実験A1： コイル内に磁石を置いた後、コイルの電線にテスターをつなぎ、コイルに電流が流れているかどうか（または電圧が発生しているかどうか）確かめてください。

- ・実験A2： コイルの電線にテスターをつないだままで測定値を監視しながら、コイル内から磁石を取り出してみてください。何が起きましたか。

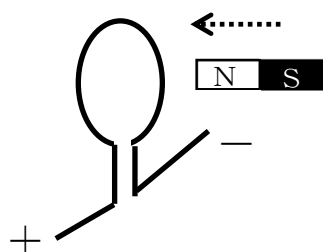
(2) 磁場によりコイルに生じる電圧の性質。 （向き、大きさ）

- ・実験B： 円形コイルに生じた電圧の大きさや向き（符号）は何で決まるのでしょうか。色々やってみて、その特徴を調べて下さい。

(3) 考えてみよう 円形コイルに生じる「起電力」と誘導電流

磁場の変化によりコイルに生じた電圧を「**誘導起電力**（ゆうどう きでんりょく）」と言います。どうしてこのような電圧がコイルに生じるのでしょうか。元々、電線に電流を流そうとするときは、電池を使って「電圧（電位差）」を加えます。単位長さ（1 m）当たりの電位差のことを「電場」と言います。導線で作られているコイルに電圧が発生したという事を素朴に考えると、磁場によりコイルの電線に沿って「電場」が生じ、それをコイルの電線に沿って足し合わせた値が「コイル全体に生じた誘導起電力」であると思われます。つまり、磁場が**変化**しているところのまわりには電場が発生しているものと考えられます。

今、下図のような1回巻きのコイルに磁石のN極を近づけ、誘導起電力が生じ左の電極が＋、右の電極が－となる電圧が生じたとします。このとき、コイルの左右の電極をつなげば電流が流れるはずです。コイルにはどちら向きの電流が流れるのでしょうか。また、この電流によりコイルに生じる磁場の向きはどうなっているのでしょうか。図中に生じる電流と、それによって生じる磁場を矢印で描いて下さい。



4 力学の実験

振り子の実験

A 君と B さんの会話

A「振り子は周期的に左右に往復しているよね」

B「そうね。振り子の周期は何で決まるの？」

A「さあ、なんだろう」

B「ひもの長さと錘（おもり）の重さかしら」

A「試して見たら？」

B「そうね」

B さんはひものが短くなるように持って揺らした。

B「短く持つと速くなるわね」

A「じゃ、錘としてもう一枚 50 円玉を付けて
みたら？」

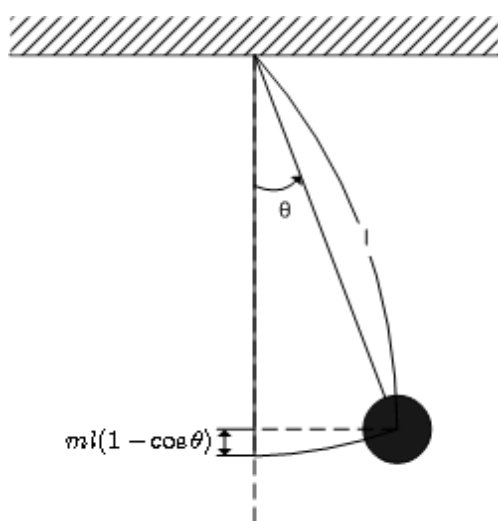
B「ええと..... あら、殆ど変わらないわ」

A「そうなんだ。長さには関係するけど、
重さには殆ど関係ないんだ????????」



柱時計

「振り子の長さを変えたときの振動周期を測定してみよう！」



単振り子

実験 A. PDL の振り子の周期測定をして重力加速度を求める。

実験 B. 巨大振り子の振動周期の測定（理学部 3 号館で測定）

ストップウォッチ、記録ノート、筆記用具を持参。

4.1 実験A 小型の振り子を使って重力加速度 g を求めよう

(1) 加速度とは

加速度とは単位時間当たりの速度の変化率のことをいいます。アクセルを踏むと車が加速します。このとき車に乗っている人は、後ろにひっぱられる感覚で加速度を感じます。地上の物体は常に下向きの重力が働いています。自由落下運動、振り子の運動、重りをつるしたバネの振動などはこの重力によって引き起こされる運動です。物体に加わる力を F 、質量を m 、加速度を a とすると、 $F = ma$ の関係が成り立ちます。

重力によって生ずる加速度を**重力加速度**といい g で表します。重力加速度は地上ではおおよそ 9.8 m/s^2 の値を示しますが、どこでも同じ重力加速度というわけではなく、南極や北極ではだいたい 9.82 m/s^2 、赤道地方では 9.78 m/s^2 程度です。日本でも北海道北東部で 9.806 m/s^2 、沖縄で 9.791 m/s^2 、千葉県では 9.798 m/s^2 という値が観測されています。 9.80665 m/s^2 の加速度を $1G$ と表します。スペースシャトル打ち上げ時の加速度は $3G$ 、2008年6月14日に発生した岩手・宮城内陸地震の瞬間的な揺れの強さを表す加速度はそれよりも強い $4G$ 超 ($4,022$ ガル、 $1G$ は 980.665 ガル) でした。これは国内観測史上最大のものです。

今回は **PDL** (パーソナル・ディスク・ラボ) によって、どの程度の精度で重力加速度が求められるかを実験します。なるべく正確に測定することを心掛けましょう。また測定値がおおよそ 9.8 m/s^2 にならない場合はその原因も考えてみましょう。

(2) 振り子の準備

PDL 振り子セットを用い、下図のように机上に小型振り子を設置しましょう。

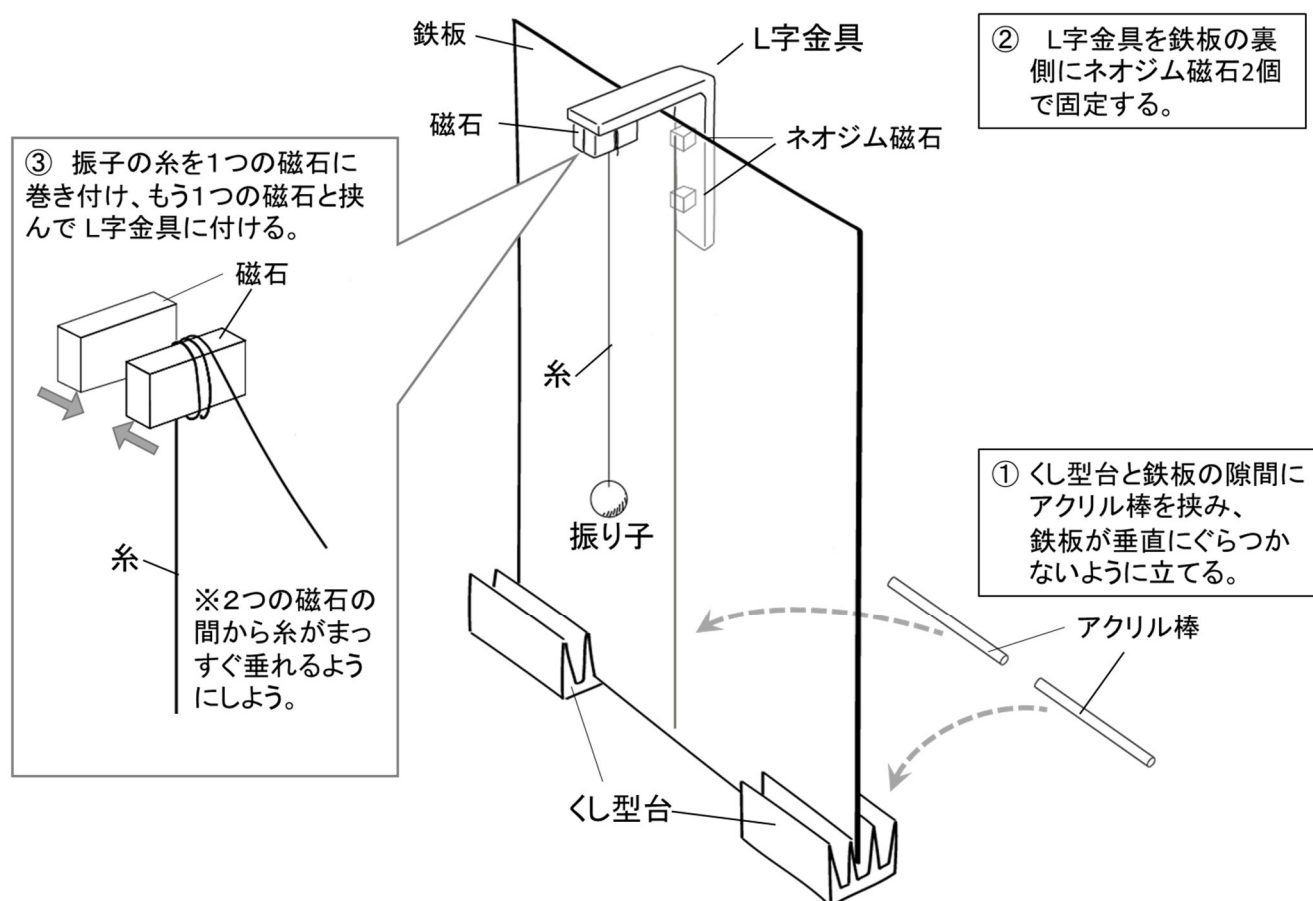


図 1. PDL 振り子の組み立て

(3) 測 定

振り子の長さを変化させたときのそれぞれの振動周期を測定します

- ① 糸の長さ測定: 振り子を吊るした状態で定規を当て、糸の長さを測ります。
このとき、フェライト磁石の下端 (振り子の支点) から球の中心までの長さを測定しましょう。
- ② 振り子の糸の長さを 5 c m, 10 c m, 15 c m, 20 c m などいくつか設定し (ぴったりの数値でなくてもよい)、それぞれについて往復 20 回の時間 (秒) をストップウォッチで測定します。振り子を振動させるとき、振幅がなるべく小さくなるようにした方がうまく測定できます。
- ③ 往復時間の測定は、同じ糸の長さについて 3~4 回繰り返して測定し、平均をとって決めます。このとき、極端に離れている値は除いて平均をとります
- ④ 20 往復の平均時間を 20 で割り、1 往復あたりの時間を求めます。この時間が周期 T です。
- ⑤ 振り子の長さ l と周期 T の関係をグラフにします。

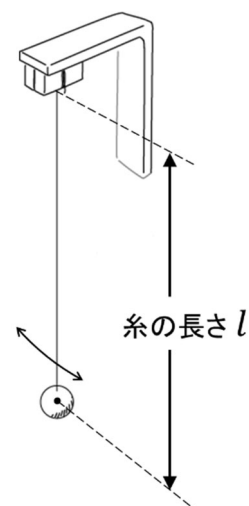


図 2.糸の長さ

振り子の長さ l		m	m	m	m	m
20 往復時間 (s)	1 回目					
	2 回目					
	3 回目					
	4 回目					
20 往復の平均時間 (s)						
周期 T (s)						
周期 T の 2 乗 (s^2)						
重力加速度 g (m/s^2)						

- ⑥ 振り子の長さ l と周期の 2 乗 T^2 の関係をグラフにします。 l と T^2 はどのような関係になっていますか。
- ⑦ 計算式 (別紙 ①式) を使って重力加速度を計算します。
- ⑧ 重力加速度の値は 9.8 m/s^2 に近い値がでましたか? 良い値がでなかったときはその原因を考えてみましょう。

4.2 回転運動の実験

(1) はじめに

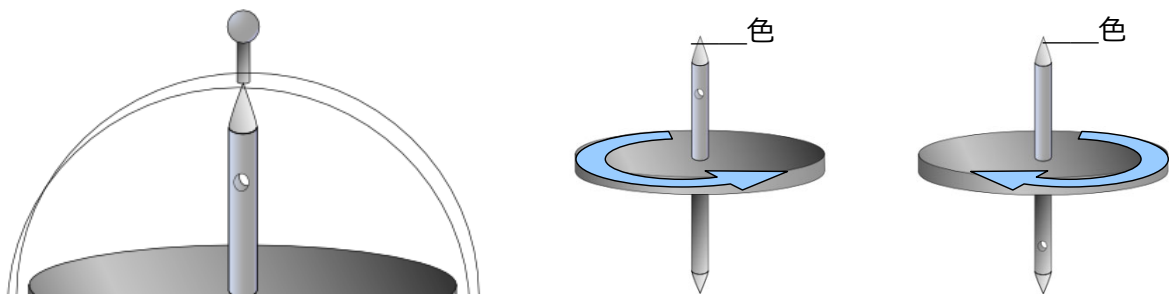
物体が運動するとき、物体に変形がなければ、その動きには、物体の大きさに比べて大きな空間を動き回る場合と、どこかを中心にぐるぐる回る場合があります。サッカーや野球のボールがまっすぐ進んだり、重力その他の影響で軌跡（動いた道筋）が弓なりに曲がったりする運動と、ボール自身がぐるぐるスピンする運動があります。大きな空間を動き回る運動は『並進運動』と呼ばれ、その様子を観察するには物体の大きさに比べて大きな空間が必要ですが、ぐるぐる回る『回転運動』は物体程度の空間で観察できます。そして、特に大きな勢いのある回転運動には不思議で興味深い現象があります。さまざまな現象を体験し、**回転の向きと、三次元的な方向の関係に注意しながら、正確に記録しましょう。**

(2) 目的

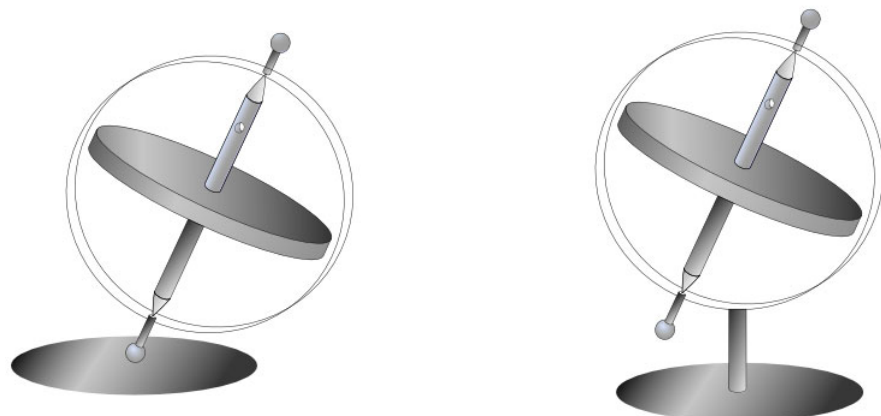
1. 地球ゴマを決められた方向に回転させる。
2. コマに力をかけたとき、回転軸の向きの変化には法則性があることを調べる。
3. 回転台に乗り、自分でかけた力とは異なる方向に回転することや、質量分布の変化により回転速度が変化する様子を体験する。

(3) 地球ゴマの実験

作業1：指示された向きに回すための、ひもの巻き付け方を図示しよう。（板書の指示を記入）



作業2：地球ゴマでいろいろな回転運動を観察しよう。スピン回転の向き、首振り運動の向き、また重力の向きや指で押した向きを記入し、それらのあいだに法則性があることを見出そう。



作業3：地球ゴマで、重力の効果を消し去り、指の力で補いながら、いろいろな向きでの実験
をしてみよう。高速回転の向き、指で押した向き、首振り運動の向きを図に記入する。図は自由に使
ってよい。系統的に変える場合だけでなく、全く違う場合も試してみることに。



(4) 回転台の実験

作業4：回転台による観察を行う。回転台に乗り降りするとき、台が勝手に回ることがあるので十分注意すること。

- ① 回転台の中心の真上に自分の重心が来るように回転台に乗る。車輪の軸を水平に持ち、友人に車輪を勢いよく回してもらってから、右の軸を上げ左の軸を下げたり、あるいは逆の向きに力をかけると、自分の力で体が回転し始める。力の向きと回転の向きが直交するという現象を体験しよう。
- ② 両手にアレイをもって回転台の中心の真上に自分の重心が来るように回転台に乗る。両腕を縮め、アレイを回転台の回転軸の近くで支える体勢をとり、友人にからだを回してもらおう。回転台が一樣な速さでうまく回ったら、両手を広げ、アレイを回転台の回転軸の遠くで支える体勢をとる。からだの回転の速さが変化する様子を体験しよう。

MEMO

実験日

学生証番号・氏名

実験で体験する物理 回転運動 (担当 教育学部 加藤徹也)

5 音の実験

5.1 周波数と音

音は、気体や液体、固体中をその原子や分子の振動が伝わっていく波である。空気中では、音は空気分子の振動が伝わっていく波である。例えば、太鼓を叩くと膜が振動する。このままでは音にならないが、膜近くに空気分子があることによって、空気分子が膜に押されて振動し、これがさらに隣の空気分子を押して振動させ、次々に空気分子の振動が空気中に伝わっていく音となる。

今回は、電磁石（コイル）と発信器を使った簡単な装置で音を発生させてみよう。

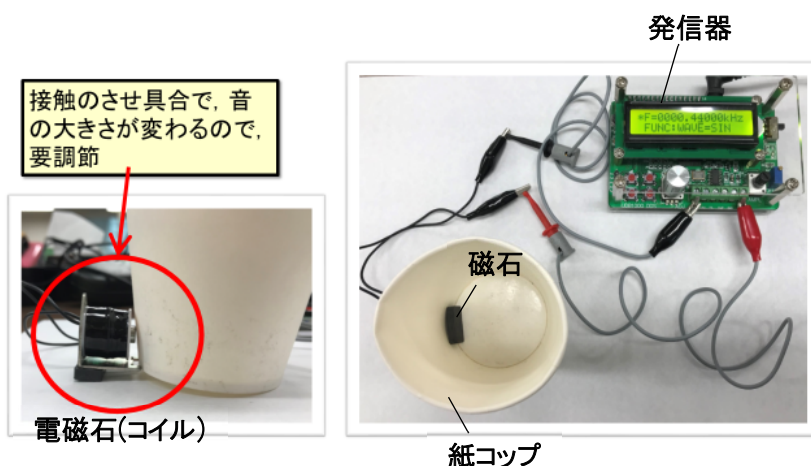
実験 1 「発信器と電磁石で紙コップから音を出してみよう」

1. 振動数と周波数

音源となる物体（例：太鼓の膜）が一秒間に振動する回数を振動数[回/s]=[Hz]といい、音波（空気分子の振動）の振動数を周波数[回/s]=[Hz]という。

2. 装置を組み立てて、音を出す

紙コップの内側に磁石、外側に電磁石（コイル）をおき、コイルに発信器をつなぎ、交流電流を流す。交流によってコイルの磁力が周期的に変化し、これによって磁石が振動して紙コップが振動し、音が発生する。

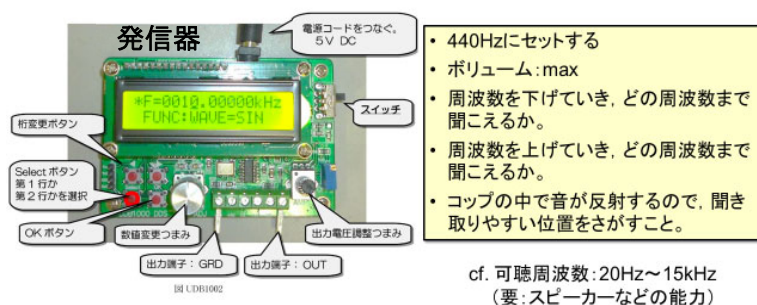


3. 音の高さを変えてみる

紙コップの振動数を発信器で変化させ、振動数と音の高さとの関係を見てみよう。

- ① 表 1. 音と周波数を参照し、「ド、レ、ミ、ファ、ソ、ラ、シ、ド」を出してみよう。

- ② 聞こえる音と、音叉やキーボードの音と聞き比べてみる。



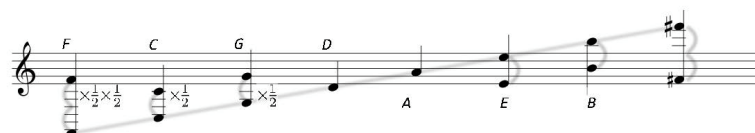


図1 ピタゴラス音階の振動数比（オクターブと五度による音程だけを繰り返すことで構成）

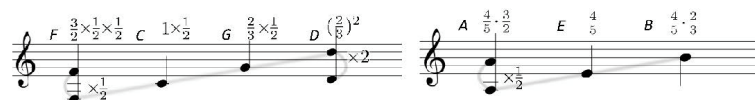


図2 純正調音階の振動数比（オクターブと五度を基本、一部で長三度を重視した音程で構成）

参考図書：小方 厚 著「音律と音階の科学」講談社ブルーバックスB1567、2007年

備考：音階と振動数比

ひとつの弦からなる楽器をモノコードという。弦にかかる張力を一定に保ち、駒の位置を変えて（長さ L を変えて）弾いたとき、整数比で分割した一部分が鳴る音の高さは、残りの部分が鳴る場合と響きあう音程となる。主な整数比は

1:1 分割長さは $1/2$ と $1/2$, 元の長さの音より両方とも 1 オクターブ高い

2:1 分割長さは $2/3$ と $1/3$, 元の音より五度上と、そのオクターブ上（例：ド→ソ+ $\dot{\text{ソ}}$ ）

2:3 分割長さは $2/5$ と $3/5$, 元の音より六度上と、その五度上（例：ド→ラ+ $\dot{\text{ミ}}$ ）

である。現代的には、より一般的に議論できる振動数で比をとる。振動数 f と長さ L は逆数の関係 $f = v/2L$ がある。ただし、 v は弦に伝わる横波の速さで、一般の場合、振動数 f に依存しない。

長さを繰り返し $2/3$ 倍し、必要に応じてオクターブ低くとることにより、1 オクターブ中にある音すべて（ピアノの白鍵7+黒鍵5と対応する12音）が得られる。紀元前580年頃生まれたピタゴラスが示したというこの**ピタゴラス音階**は数学的に美しいものの、三度（例：ド→ミ）が美しく響かないなど、音楽的感觉とは少しずれている。紀元140年頃のブトレマイオスは、少しだけ整数比の数を増やすことで美しい三度の響きが得られることを使い、E, A, Bの音を少し低めにとった。これは**純正調音階**として知られている。なお、現在ピアノなどでは、転調のしやすさを優先し、等比級数に基づく**平均率音階**が用いられている。最高に美しいハーモニーを響かせるためには、響きあう音のあいだの音程は純正調音階に近いものでなければならない。

音名	C(ド)	D(レ)	E(ミ)	F(ファ)	G(ソ)	A(ラ)	B(シ)	C(ド)
ピタゴラス音階	1.0000 1	1.1250 $9/8$	1.2656 $81/64$	1.3333 $4/3$	1.5000 $3/2$	1.6875 $27/16$	1.8984 $243/128$	2.0000 2
振動数 [Hz]	260.74	293.33	330.00	347.65	391.11	440.00	495.00	521.48
純正調音階	1.0000 1	1.1250 $9/8$	1.2500 $5/4$	1.3333 $4/3$	1.5000 $3/2$	1.6667 $5/3$	1.8750 $15/8$	2.0000 2
振動数 [Hz]	264.00	297.00	330.00	352.00	396.00	440.00	495.00	528.00
平均率音階	1.0000	1.1225 $= 10^{\frac{2}{12}r}$	1.2599 $= 10^{\frac{4}{12}r}$	1.3348 $= 10^{\frac{5}{12}r}$	1.4983 $= 10^{\frac{7}{12}r}$	1.6818 $= 10^{\frac{9}{12}r}$	1.8877 $= 10^{\frac{11}{12}r}$	2.0000
振動数 [Hz]	261.63	293.66	329.63	349.23	392.00	440.00	493.88	523.25

表1 音階と振動数。A音 = 440.00 Hz を基準とした。 $r = \log_{10} 2 = 0.30103$ である。

実験2「和音やうなりを作り出してみよう」

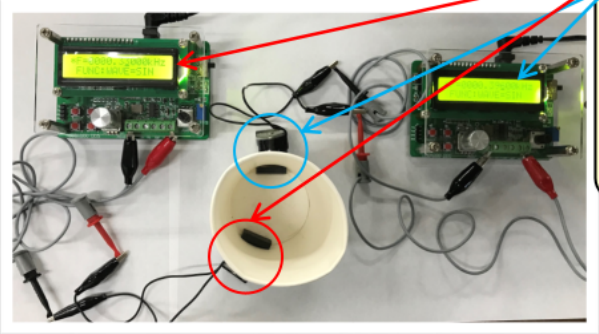
2つの音を重ね合わせると、うつくしいハーモニー(協和音)やうなりが生まれる。それらは、2つの音の振動数の関係による。振動数比が簡単な整数比の時にハーモニーとなり、振動数の差がわずかなときに(例えば1 Hz) うなりとなる。

1. 和音を作る

1つの紙コップで2つの音を同時に鳴らしてみる。表1を参照しながら2音の振動数比を設定し、和音を作ってみよう。

和音の実験

9



- 発振器とコイルを2セット使用。
- 「ド」、「ミ」、「ソ」の周波数のいろいろな組み合わせにセットする。
- その他の音の組み合わせも試す。

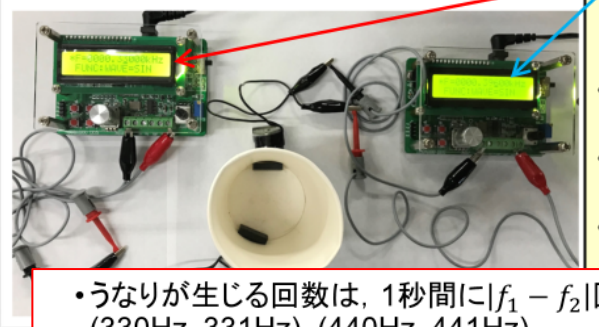
※1セットずつケーブルをつないで(はずして)、それぞれから音が出ているかを確認。

2. うなりを作る

うなりの実験

10

※うなりが聞こえにくい時は、ボリュームを調整して、2音のバランスを調整する。



- 2つの周波数差が1Hzになるように設定する。
eg. 440Hz, 441Hz
- どのように聞こえるか?
- 5秒間のうなりの回数を計測する。
- 周波数差を1Hzずつ大きくしていくと、か?

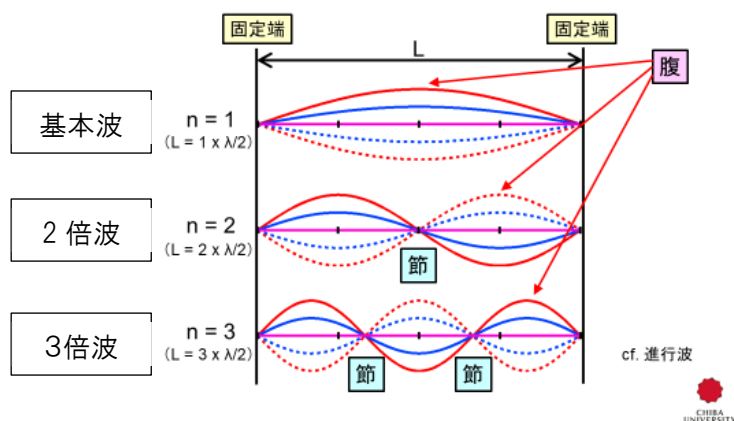
• うなりが生じる回数は、1秒間に $|f_1 - f_2|$ 回。
(330Hz, 331Hz), (440Hz, 441Hz),
(10,000Hz, 10,001Hz)など
→ 周波数調整に利用

5.2 弦の振動

弦の共振（定在波）について

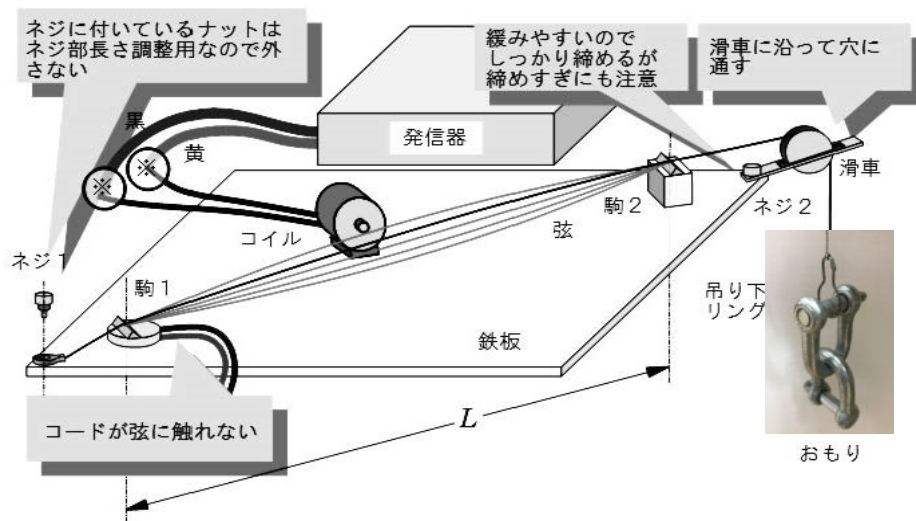
ギターやバイオリンなど両端が固定された弦は、弦を弾くと、同じ材質で長さや張力が同じであれば、弾き方に関係なく同じ高さ（周波数）の音が出る。このとき、**共振(定在波)**が起きている。

弦の共振は、弦に発生した波が弦の両端で反射を繰り返してお互いに強め合う現象であり、弦の長さが波長の半分の長さの整数倍であるときに限り生じる。共振の周波数は、弦の長さ L [m]、弦の張力 T [N]、線密度 σ [kg/m]（同じ材質であれば太さに相当）に依存する。



実験 1 「弦を共振させてみよう（基本波）」

1. 装置の組み立て



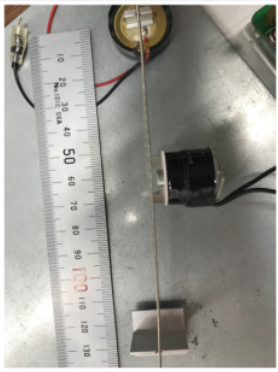
図のように弦を組み立てる。弦に電磁石（コイル）を近づけて置き、コイルに交流電流を流すと、コイルの磁力が交流によって周期的に変化し、スチール製の弦は押されたり引かれたりして振動する。

設定条件
- 一番太い弦を使用 - 弦の長さ $L = 20 \text{ cm}$（コマとコマの長さ） ※ コマの下に磁石などで高くし、弦がコマから浮かないようにすること。 - おもり 2 個（約 380 g） - コイルは弦の中央付近に、弦に接触しない程度になるべく近く置く。 - 発信器の周波数 $f_1 \sim 70 \text{ Hz}$ 付近。 - 発信器の周波数を 1 Hz ずつ変えながら共振周波数を探す。

2. 弦の長さ、おもりの重さを変えてみよう

弦の長さを変えると？

8



- 一番太いワイヤを使用。
- 弦の長さ $L = 10\text{ cm}$
- おもり 2個 (約380 g)
- 周波数 $f_2 (= 2f_1)$ 付近
- 電磁石の位置を、弦の半分の位置に

おもりの重さを変えると？

9

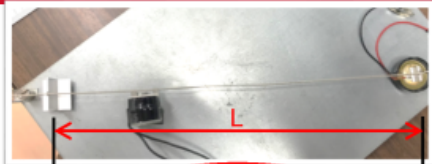


- 一番太いワイヤを使用。
- 弦の長さ $L = 20\text{ cm}$
- おもり 3個 (約570 g)
- 周波数 $f'_1 (= \sqrt{3/2}f_1 \sim 1.2f_1)$ 付近
- 波形の記録

3. 2倍波、3倍波を発生させてみよう

高調波の発生(2倍波, 3倍波)

10



L

$n = 1$

$n = 2$

$n = 3$

- 一番太いワイヤを使用。
- 弦の長さ $L = 20\text{ cm}$
- おもり 3個 (約570 g)
- 2倍波 ($f'_2 (= 2f'_1)$) 付近
- 3倍波 ($f'_3 (= 3f'_1)$) 付近
- 波形の記録
- 電磁石を当てる位置に注意!

目で見てわかりにくい場合は、
耳で聞いて、音の大きさを判断して探す

4. 弦を弾くと共振現象

が起こるという

- 「弦を弾く」
 - 「全ての振動数を入力」に相当
 - 共振周波数しか生き残れない
(基本波, 2倍波, 3倍波, ...)
 - 各周波数成分の比率は, 系(楽器)に固有
 - これらの合波(足し合わせた波)が,
固有の音として聞こえる(音色)

e.g. $y = \sin(\omega_1 t) + 0.1\sin(2\omega_1 t) + 0.7\sin(3\omega_1 t) + 0.03\sin(4\omega_1 t) + 0.6\sin(5\omega_1 t) + 0.01\sin(6\omega_1 t) + 0.05\sin(7\omega_1 t) + 0.5\sin(8\omega_1 t) + \dots$

フーリエ級数展開
フーリエ変換



6 太陽電池の実験

太陽電池

身の回りは光であふれています。その光が持つエネルギーを電気エネルギーに変換する素子を太陽電池といいます。太陽電池は如何にして光のエネルギーを電気のエネルギーに変えているのか？普通の電池との違いは？太陽電池のしくみや、特性について本 PDL 実験を通して考え、理解を深めましょう！

〔目的〕

- (1) 太陽光発電のしくみ、特性について学ぶ。

考えてみよう！ 太陽電池はどのようにして作られている？
普通の電池（乾電池）と何か違う？

- (2) 光エネルギー、電気エネルギーについての理解を深める。

考えてみよう！ 光のもつエネルギーって？色（波長）によって異なるの？
電気のエネルギーは？ 電圧×電流×時間 単位はジュールだよね。

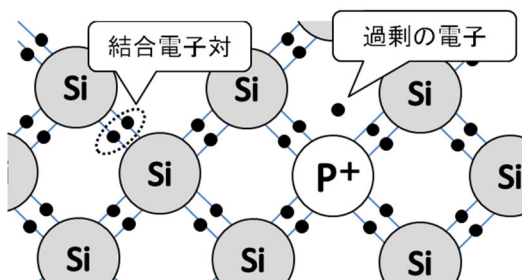
〔実験器具〕

太陽電池（可変抵抗 1.5 Ω ～100 k Ω 付き）・モーター・羽・フォトダイオード(足の長い方がプラス)・電子オルゴール・コンデンサー・マイナスインプライバー・リード線（赤、黒 各2本）・デジタルマルチメーター(DMM)

〔原理〕

太陽電池は光のエネルギーを直接、電気エネルギーに変換する素子です。どのような構造をしているのかを簡単に説明してみましょう。まず、重要なことは、太陽電池はn型、p型と呼ばれる半導体から構成されていることです。ケイ素Siの結晶は半導体であることは聞いたことがあるでしょう。Siは価電子の数が4つで、隣接する4つのSiがもつ価電子と結合電子対をつくりネットワークをつくることで結晶ができます。ここに、リンPのような価電子の数が5つの原子を不純物として添加するとどうなるでしょうか？（図1(a)）結合に使われない1つの電子（過剰の電子）が存在しますね。この電子は正にイオン化したPからの電気力で緩やかに束縛されていますが、常温では熱エネルギーによって束縛から離れて自由電子として振舞います。このような過剰の電子がいる半導体をn型半導体と呼びます。では、Siの結晶にインジウムInのような価電子の数が3つの原子を不純物として添加するとどうでしょうか？（図1(b)）今度は電子の不足が生じますね。この状態を正孔（ホール）と呼びます。常温では近くの電子が移動してホールを埋めることで、電子の移動したあとに新たなホールができるといったことの繰り返りで、（正孔）ホールは自由に動くことができるようになります。動くのはあくまでも電子ですが、正の電荷をもった粒子（正孔）の動きとして考えることが一般的です。このように電子の不足（正孔）が生じている半導体をp型半導体と呼びます。

(a) n型半導体



(b) p型半導体

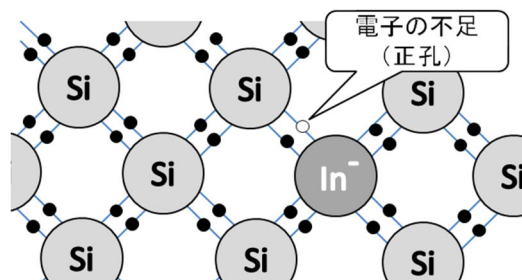


図1. (a) n型半導体、(b) p型半導体

これらのn型、p型半導体を接合させるとどうなるでしょうか？図2(a)に示すように、接合面付近で

は、n 型の過剰な電子が、p 型の正孔と合体して見かけ上消滅します。その領域を空乏層と呼びます。そうすると、P+ と In-イオンが接合付近に存在することになり、空乏層には電位差が生じます。エネルギーで考えると図 2(b) のようになります。

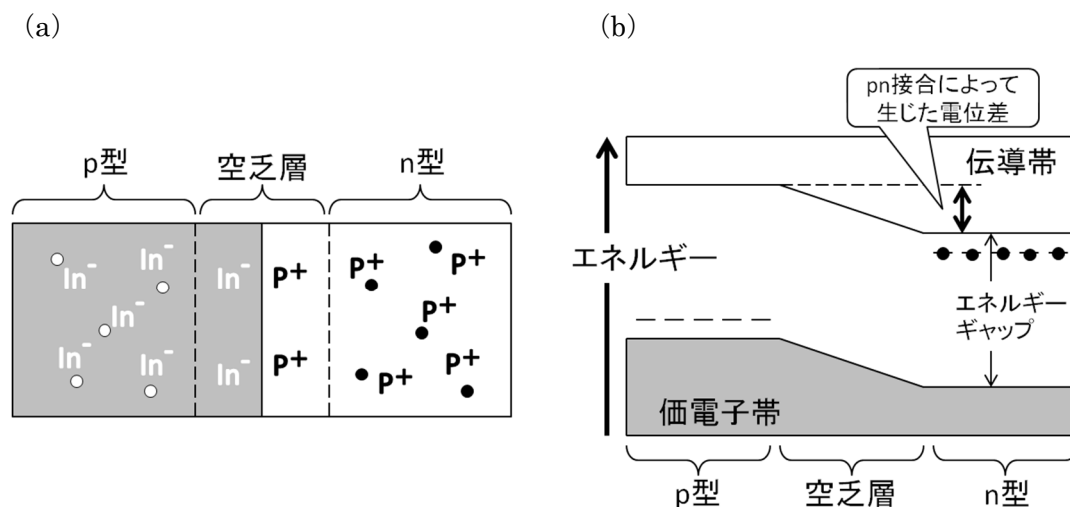


図 2. pn 接合

ここにエネルギーギャップを超えるエネルギーをもつ光を入射すると、図 3(a) で示すように、光によって価電子帯にいる電子が伝導帯にたたき上げられ、電子と正孔ができ、空乏層での電位差によって、電子は n 型の方へ、正孔は p 型の方へと移動します。図 3(b) に示すように、n 型、p 型の両端に電極を付け、電極間を回路でつなげると光照射で生成される電子と正孔が互いに逆向きに流れることで電気が流れ、電球などを光らせることができます。

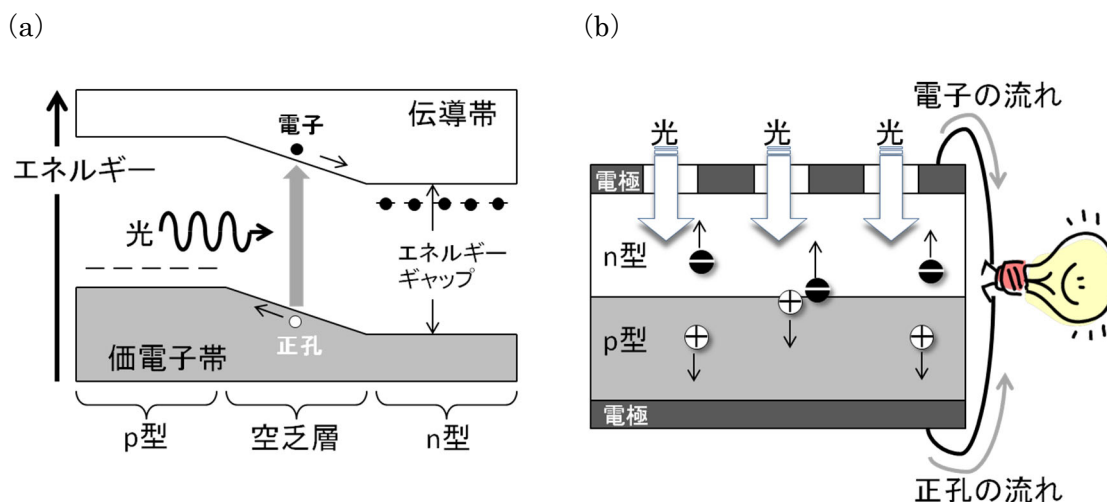


図 3. 光起電力の発生と太陽電池の動作

以上が簡単な原理です。では、実験をしてみましょう！

6.1 太陽電池の性質を調べる実験

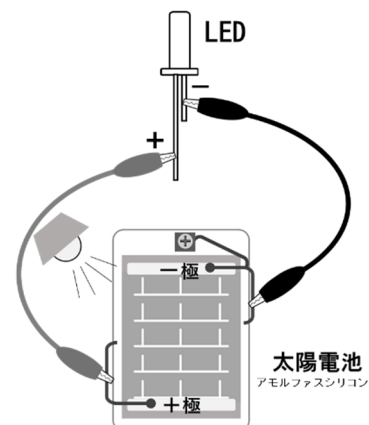
太陽電池に光が照射されると、光エネルギーが電気エネルギーに変換されます。太陽電池に発生する電圧を**光起電力**、発生する電流を**光電流**と呼びます。光起電力と光電流を実際に測定し、太陽電池の性質を調べましょう。

(1) 太陽電池に光を当て、生じる電気エネルギーを使ってみよう。

- (ア) LED を光らせる
- (イ) 電子オルゴールを鳴らす
- (ウ) 羽つきモーターを回す

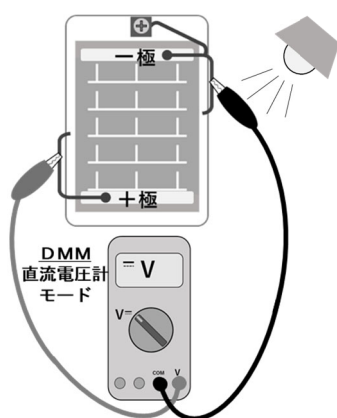
➡それぞれ動作させるには最低限必要な電力がある。

※電力不足で動作できない場合はどうしたら良いか？考えてみよう。

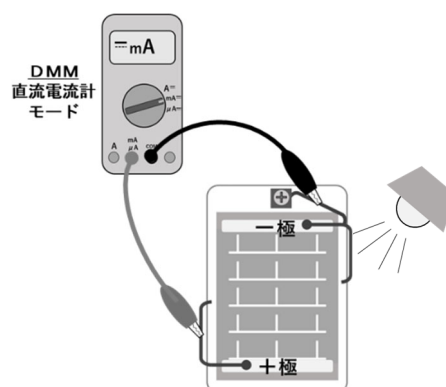


(2) 抵抗体をつながない状態での光起電力と光電流

まず、太陽電池に一定の光を当てたときに発生する**光起電力**（＝電圧）と**光電流**（＝電流）がどのくらいであるかを、電気エネルギーを消費する抵抗体（LED やモータなど）をつながない状態で測定してみましょう。



図(a) 電圧測定



図(b) 電流測定

- ① 図(a)のように、太陽電池にデジタルマルチメータ(DMM)を電極の極性に注意してつなぎ、DMMのレバーを直流電圧測定モードにし、電圧値[V]（光起電力）を読みます。このときの電圧（光起電力）を**開放電圧**といいます。
開放電圧： _____ **V**
- ② 次に、当たる光量が変化しないように注意しながら、図(b)のようにDMMの赤端子をmA・ μ A差込に差し替えてDMMのレバーを直流電流測定モードにし、電流値[mA]（光電流）を読みます。このときの電流を**短絡電流**といいます。
短絡電流： _____ **mA**
- ③ 光源を遠ざけたり近づけたりして光の当たる量を変化させると、開放電圧と短絡電流がどう変化するか調べましょう。

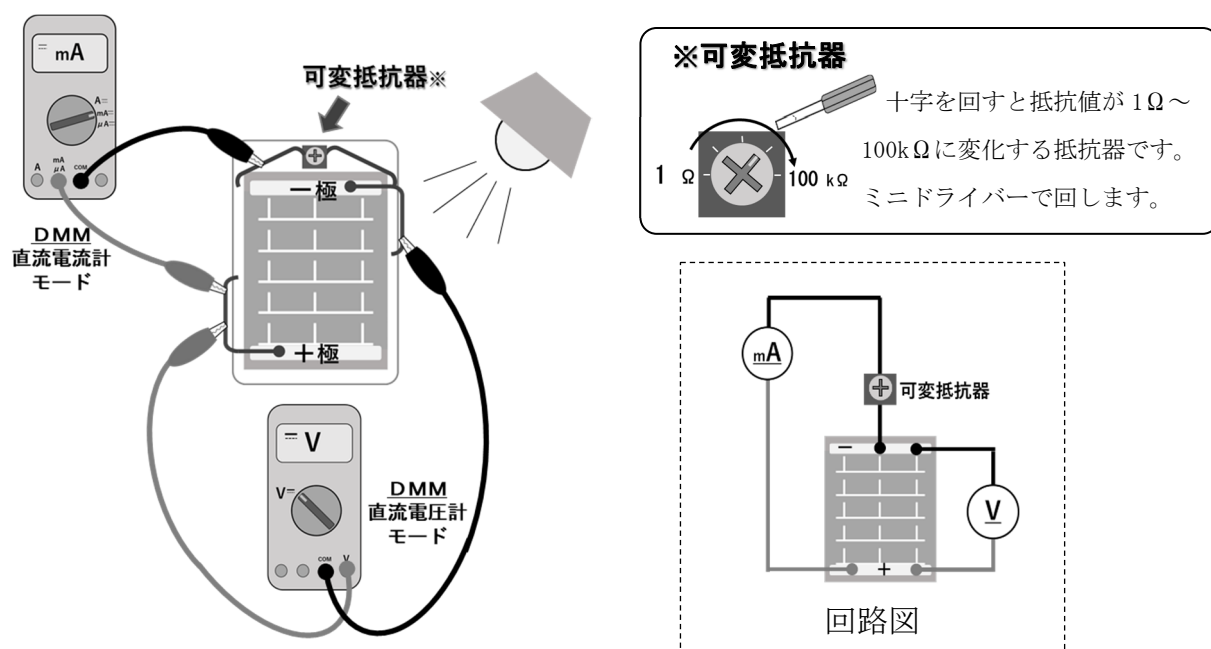
明るくした時（光の量↑）： _____

暗くした時（光の量↓）： _____

(3) 抵抗体をつないだ時の光起電力と光電流

次に、太陽電池の＋極と－極に電気を消費する抵抗体（可変抵抗器※）をつなげたときの、光起電力と光電流の関係を調べましょう。

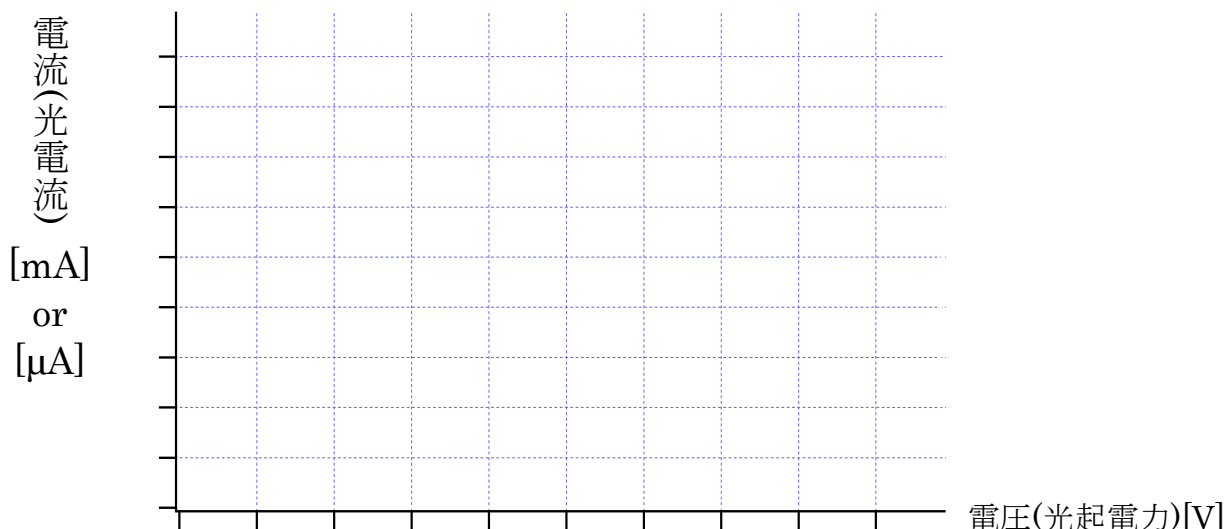
- ① まず、上記(1)の測定時と同じ明るさ（同じ光量）になるように光源を設置します。以降、測定中、光量が変わらないように注意します。
- ② 下図(c)のように、太陽電池に抵抗体（可変抵抗器）をつないだ回路を作り、DMM を 2 台つなぎます。DMM 1 台で電圧値[V]（＝光起電力）を、もう 1 台で電流値[mA]（＝光電流）を測定します。
- ③ 次に、可変抵抗器の十字の向きをミニドライバーで回して抵抗値の設定を変化させ、上記②と同様にして、このときの抵抗値での電圧値と電流値を測定します。同様にして、抵抗の設定値をいくつか変えて電圧値と電流値の測定を繰り返し、記録します。



図(c) 抵抗体をつないだときの電圧・電流測定

光起電力 (電圧) [V]						
光電流 [mA] or [μA]						

測定結果をグラフにプロットし電圧－電流特性グラフを作成しましょう。開放電圧(電流=0)と短絡電流(電圧=0)も含めてプロットしましょう。



- 太陽電池の最大出力： W

- (5) 太陽電池の出力をあげるにはどうしたらよいか？

- ・ どのような光を照射したら良いか？（太陽光と蛍光灯の光の違いなど）
- ・ 光の強度、光のエネルギーとは？（強度とエネルギーの違いは？）
- ・ 光の照射強度を変えると何が変化する？（電流値と電圧値どちらが大きく変化するかな？）

7 熱の実験

「熱放射」

放射温度計

ステファン・ボルツマンの法則

黒体の表面から単位面積、単位時間あたりに放出される電磁波のエネルギー j が、その黒体の温度 T の 4 乗に比例するという物理法則である

$$j = \sigma T^4 \quad [\text{W/m}^2]$$

ここで、ステファン・ボルツマン定数は $\sigma = 5.7 \times 10^{-8} [\text{W/m}^2/\text{K}^4]$ である。

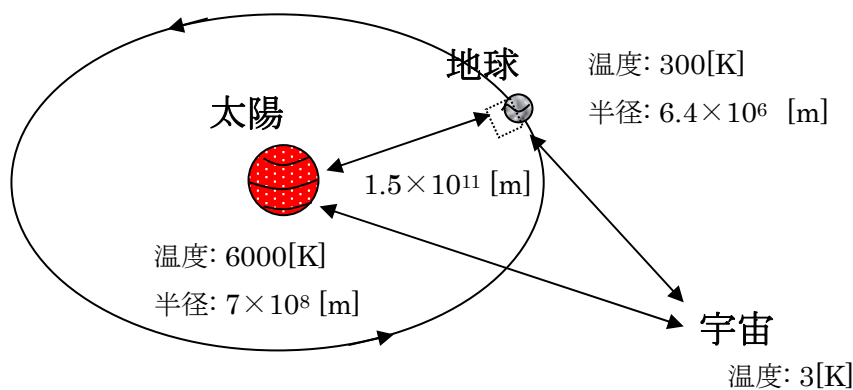
ウィーンの変位則

黒体から放射のピークの波長が温度に反比例するという法則である。

$$T \times \lambda_{\text{max}} = 0.003 \quad [\text{K} \cdot \text{m}]$$

ここで、 T は黒体の温度[K], λ_{max} はピークの波長[m], $0.003 [\text{K} \cdot \text{m}]$ は比例定数である。

太陽-地球-宇宙の温度の関係



【小論文】（アンケートに追加）

①,②のテーマについて報告を書く。内容は授業全体についてのものであっても 1 又は複数のテーマに関するものであってもよい。目的は「受講者と授業の評価資料」と「将来の本授業履修者への紹介」。

○科学的結果の報告（通常のデータに基づくもの）

①受講者の行動と心（感動、好奇心の高揚、詰まらないという思いなど）の動きや変化について（そのような動きが生じた理由や説明もあればなお良い）

②本実験体験による「人と自然世界との係わりについての考え」の変化（例えば：自然世界についてのイメージ、自然法則についての信頼性、自分にとっての価値序列、自然界における人類や個人の行動規範（モラル）の変化についてなど）

太陽エネルギーのサイズ

