電位分布の測定

[実験テーマの概要]　電荷の周囲に作られる電位の分布を調べる。

1. 電荷、電場(電界)、電位、等電位線の定義や単位、概念を調べておきなさい。

2. 点電荷周囲の電位を調べておきなさい。

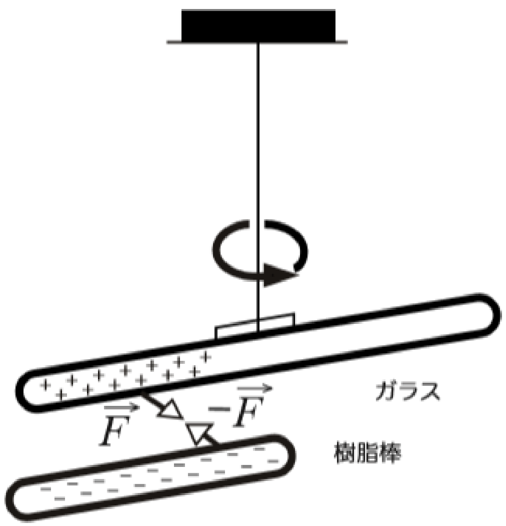
3. 平行に置かれた2枚の平板の間の電位を調べておきなさい。

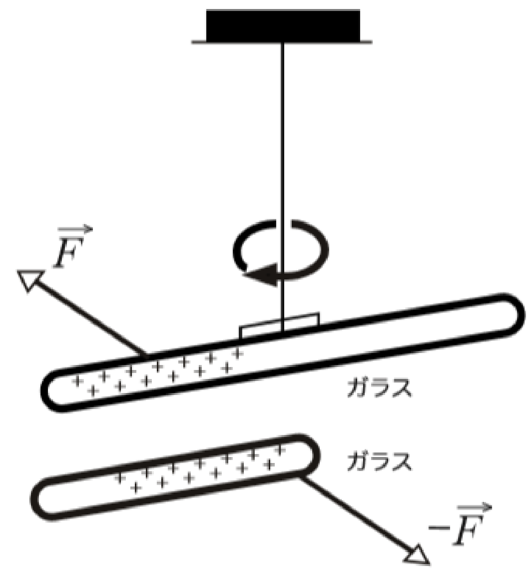
4. 本スライドで重要な概念や関係式、キーワードをノートにまとめよ。

[電荷の性質]

毛皮でこすった樹脂棒
絹でこすったガラス棒
→ 棒同士が引きつけあう

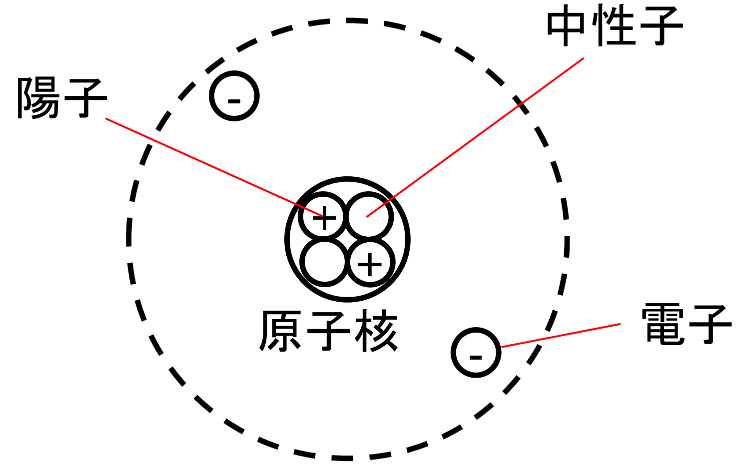
絹でこすったガラス棒
絹でこすったガラス棒
→ 棒同士が反発する





原子の構成要素

陽子　（正電荷と呼ぶ）
中性子
電子　（負電荷と呼ぶ）



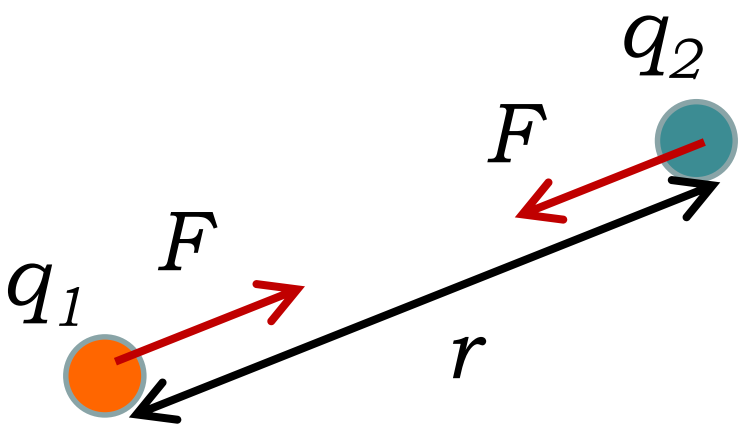
通常は正・負電荷のバランスが取れているが、材料の種類によっては擦り合わせると電子がどちらかに移動して、バランスがくずれる。

プラス（＋）に帯電（電子を逃がしやすい）	マイナス（－）に帯電（電子を受取りやすい）

毛皮　ガラス　羊毛　ナイロン　レーヨン　鉛　絹　木綿　麻　木材　膚　人などの皮　亜鉛　アルミニウム　紙　クロム　エボナイト　鉄　銅　金　ゴム　ポリスチレン　白金　ン　ポリプロピレ　ポリエステル　アクリル　ポリエチレン　セロファン　塩化ビニル

・バランスが崩れた状態（帯電）　同種の電荷同士　斥力　が作用する
異種の電荷同士　引力

[クーロンの法則]　電荷間に働く引力、斥力（静電気力）の大きさを表す法則



F[N]

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1 q_2}{r^2}$$

q[C]

r[m]

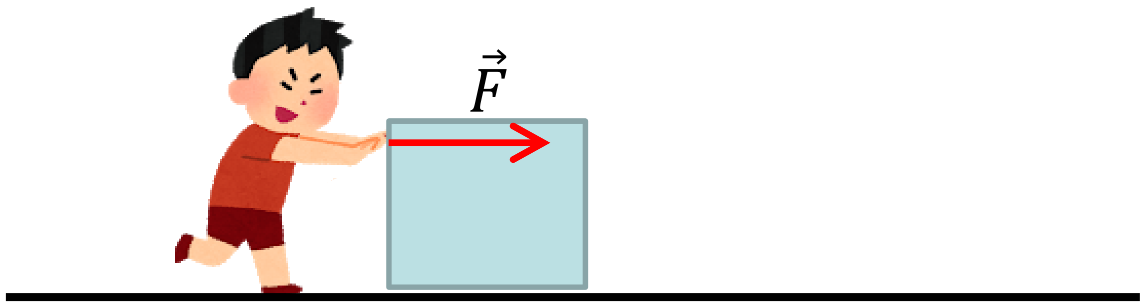
静電気力の大きさは2つの電荷の**電気量**をq_1 ,q_2に比例し、電荷間の距離をrとの2乗に反比例する。

電気量　電気的な偏りを表す量
電子1個の電気量　1.6×10^{-19} Cとする。

この式で、比例定数ε_0を真空の誘電率とよび、
$\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}\ \mathrm{C^2/Nm^2}$ とする

[電場(電界)]

物体を押すことを思い出そう。

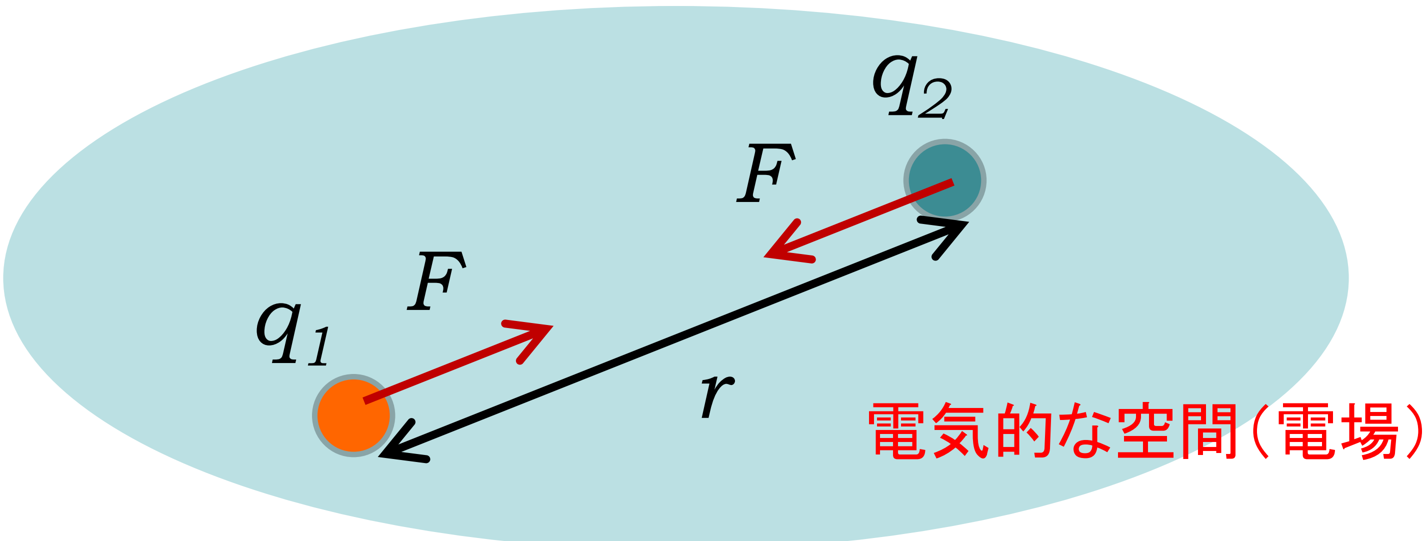


物体に直接触れて押すことで、物体は移動する(加速度が生じる)。物体に加速度を与える作用を力と呼ぶ(ここで、力は大きさと方向があるので、ベクトルで表す)。

この場合、物体に直接触れることで、物体に力を与えていることに注意しよう。

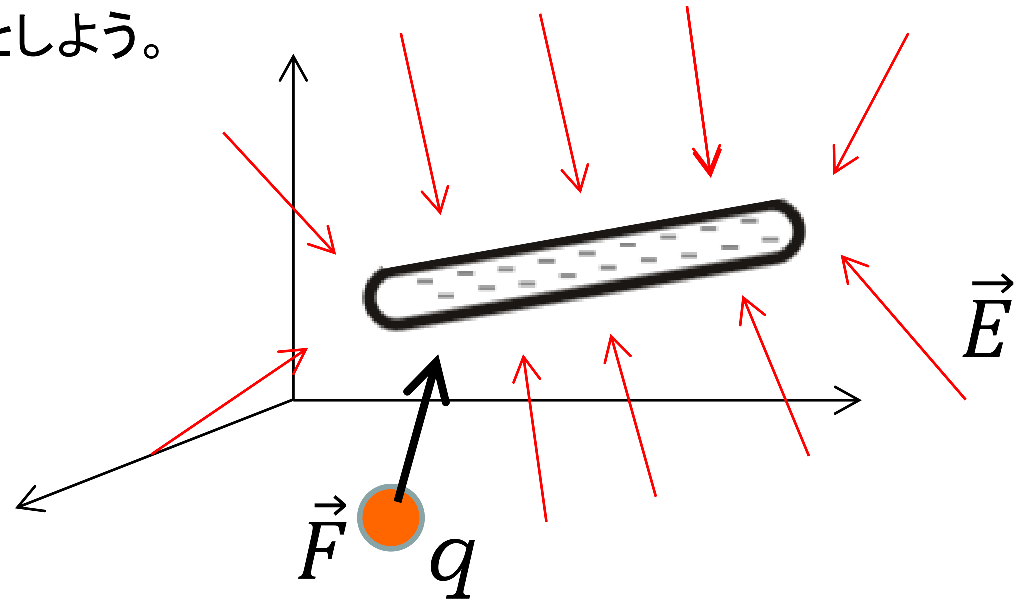
[電場(電界)]

物体間(電荷間)に作用する静電気力を考えよう。
直接触れていなくても力が発生する。これを、「電荷の周囲には電気的な空間(電場)が作られており、そのやりとりによって、静電気力が発生する」と考えよう。



力が大きさと方向性を持つベクトルなので、電場もベクトルで表したい。一方で、場の概念は抽象的(目にみえない)なので、その定義や単位が既知の量である力(F[N])を基にして電場を定義しよう。

電場という未知の空間を調べるために、探査器具[プローブ:ここでは電気量qの試験電荷]を置いて位置を変えていき、そのプローブに作用する力のベクトル($\vec{F}$)を測定していったとしよう。



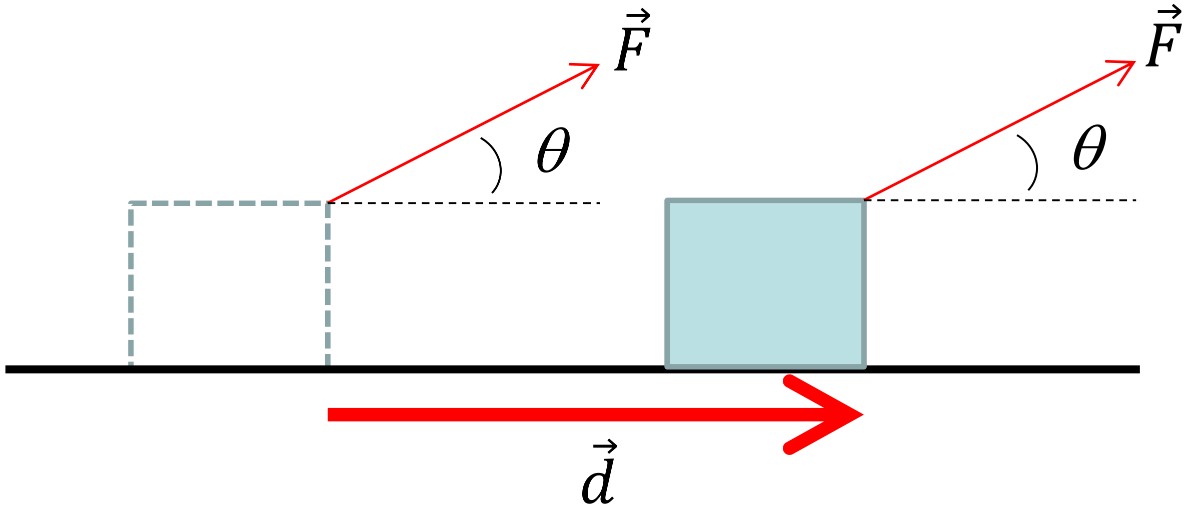
このとき電場ベクトル$\vec{E}$を次のように定義する。

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

この定義では、電場の単位は「力と電気量の単位」を用いて、E [N/C]とする(電気量1 Cあたりに作用する力と表す)。次々と、プローブを置きながら作用する力を測定していくことで、電場ベクトル$\vec{E}$の全容(位置の関数)が調べられる。調べられたこの電場中に電気量q_xの電荷が置かれれば、その置かれた位置から、電荷に作用する力の大きさと向きが $\vec{F} = q_x\vec{E}$ から解る。

[仕事と電位]

物体に力を作用させ、物体を移動させる。この時、物体に与えるエネルギーを仕事と呼ぶ。



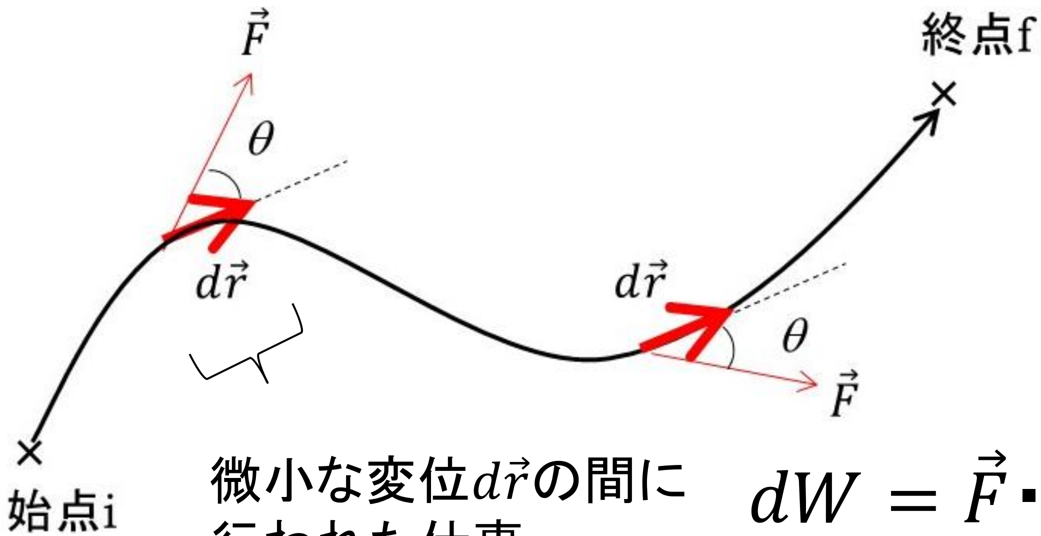
仕事を次のように定義する。単位はW [N・m = J ジュール]とする。

$$w = F\cos\theta d = \vec{F}\cdot\vec{d}$$

ベクトルの内積

$$\vec{a}\cdot\vec{b} = ab\cos\theta$$

物体の移動が一直線上ではない場合でも、図のように微小な区間(変位)に分けて、足し合わせればよい。



微小な変位$d\vec{r}$の間に行われた仕事

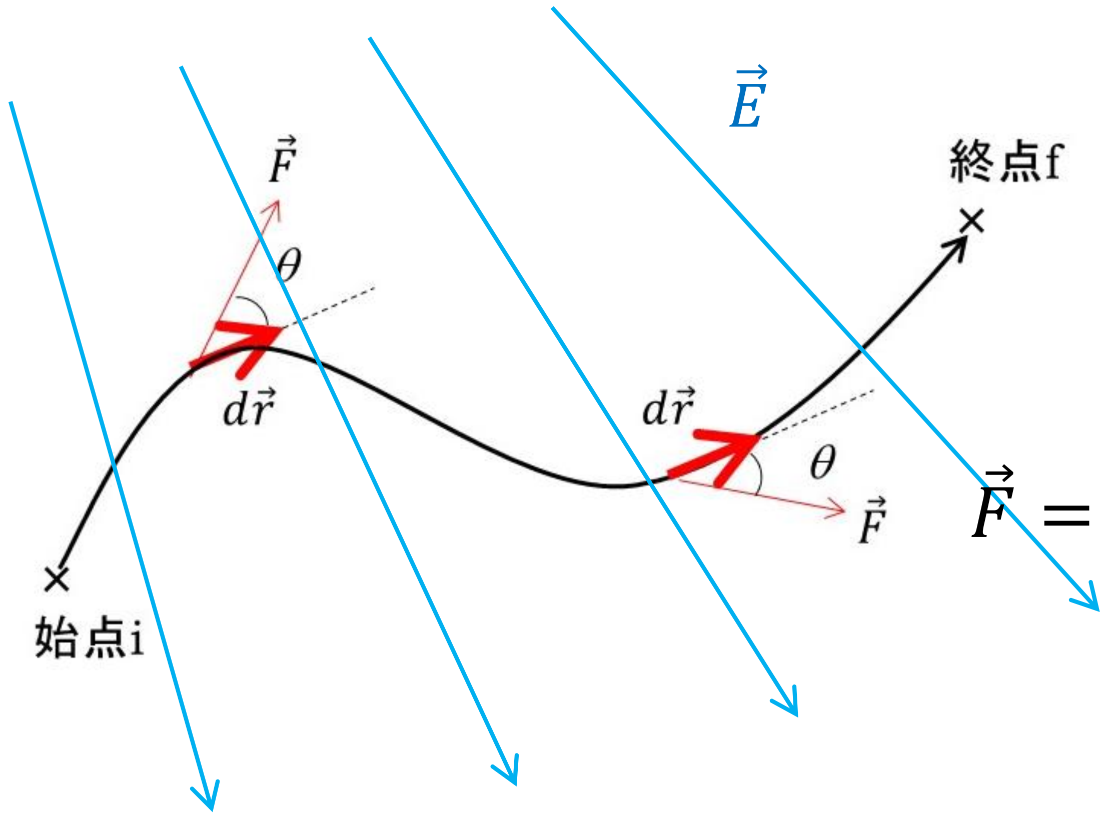
$$dW = \vec{F} \cdot d\vec{r}$$

この場合、始点から終点までの間で物体に行われた正味の仕事W_{net}は、積分を用いて表す。

$$W_{net} = \sum dW = \sum \vec{F} \cdot d\vec{r} \Rightarrow W = \int_i^f \vec{F} \cdot d\vec{r}$$

このとき、 $\Delta U = -W = -\int_i^f \vec{F} \cdot d\vec{r}$ で計算される量をポテンシャルエネルギーの変化量ΔUと呼ぶ。

もし、この物体が帯電していて、電場内に置かれており、静電気力と釣り合いながら（加速度が生じないように）、力を加えて物体を移動させたとしよう。

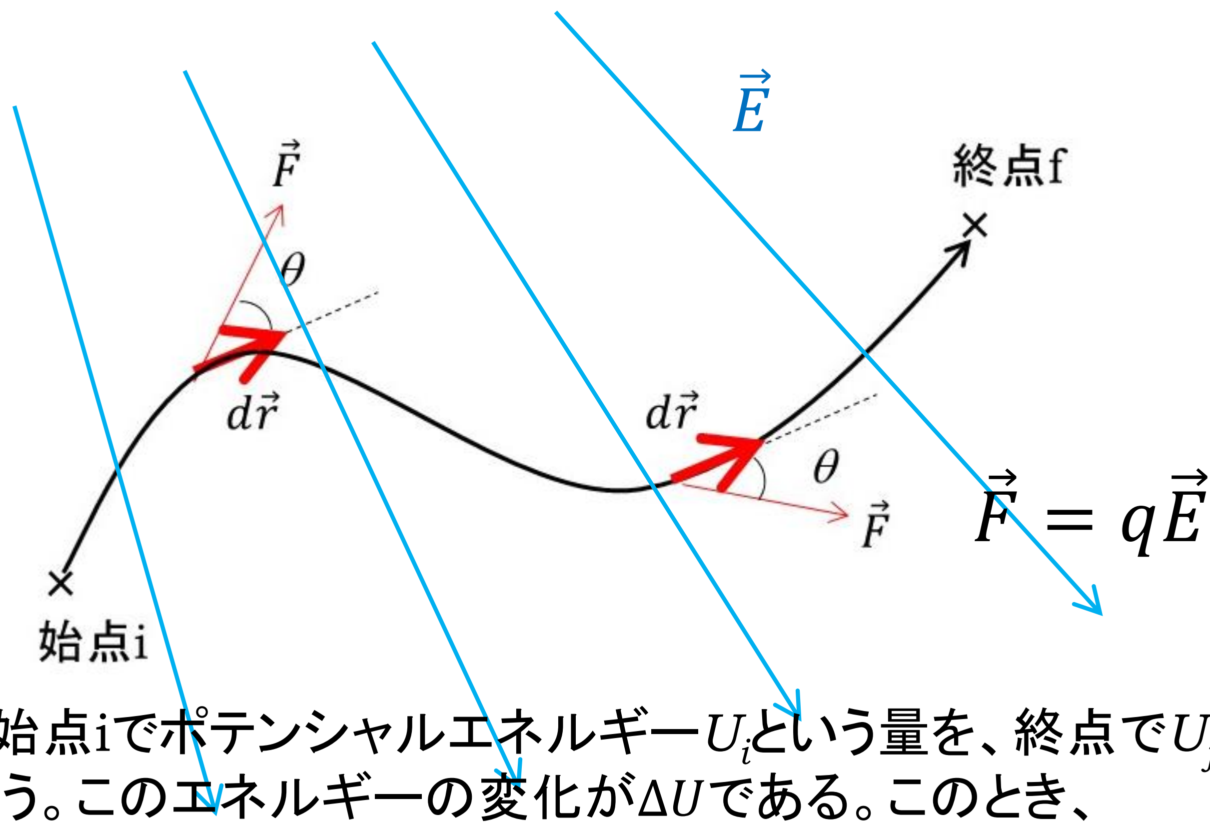


$$\vec{F} = q\vec{E}$$

このとき、 ポテンシャルエネルギーの変化量ΔUは

$$W = \int_i^f \vec{F}\cdot d\vec{r} = \int_i^f q\vec{E}\cdot d\vec{r}$$

$$\Delta U = -W = -\int_i^f q\vec{E}\cdot d\vec{r}$$



この図では、始点iでポテンシャルエネルギーU_iという量を、終点でU_fを持っていた物体を考えよう。このエネルギーの変化がΔUである。このとき、

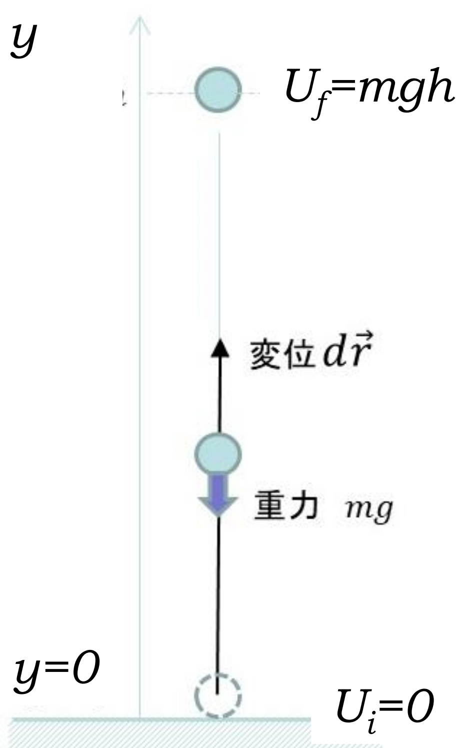
静電気力に逆らって物体にした仕事 ＝ 物体が得たポテンシャルエネルギー

と考えればよい。(エネルギーの基準は実験者が決めて良いので、始点や、終点を基準（U_i =0 or U_f =0）としてもよい。$\Delta U = U_f - U_i$ でU_i =0 とすれば、終点でのエネルギーが、基準からどれだけのエネルギーを持っているか？と読み替えられる。$U_f = U$と書くことにする）

ただし、電気的な考え方では、電場の定義と同じで、電気量1 Cあたりで考える方が都合が良い。そこで、ここでも1 Cあたりの電気的ポテンシャルエネルギーとして電位差ΔVを定義する。

$$\Delta V = \frac{\Delta U}{q} = -\int_i^f \vec{E} \cdot d\vec{r}$$

電位差の単位はエネルギーと電気量の単位を用いて、V [J/C]とし、これをV [V ボルト]と略す。電位差の基準を0とした際に、電位あるいは電圧と呼ぶ。

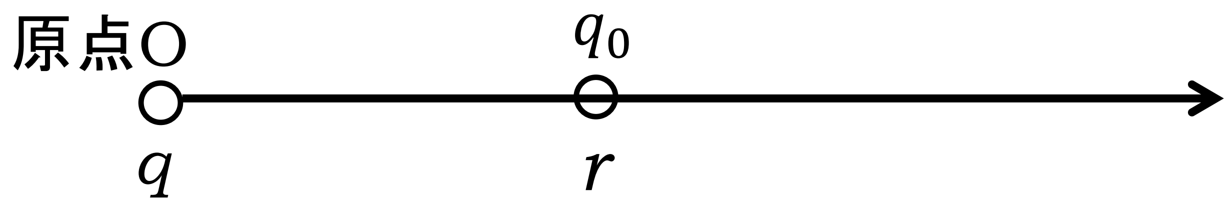


電位はどのように考えれば良いか？
重力もΔUが計算できる。物体を地上（基準 $U_i = 0$）から、重力につり合った力でゆっくりと高さhまで持ち上げた。物体の得たポテンシャルエネルギーは、$U_f = mgh$。

このポテンシャルエネルギーは物体が蓄えたエネルギーであり、落下させれば、ポテンシャルエネルギーが減少した分、運動エネルギーが得られる。

電気的ポテンシャルエネルギーや電位も同様で、電荷の状態でその量が決まっている。高い電位（ポテンシャルエネルギー）を持つ状態は、高い位置エネルギーを持っていると考えればよい。

[電位(演習1)]



電荷量qの電荷が原点Oに固定されている。電荷量q_0の試験電荷を位置rに置いた。

(1) 試験電荷に作用する静電気力の大きさを求めよ。 $F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{qq_0}{r^2}$

(2) 試験電荷の位置での電場の大きさを求めよ。

$$E = \frac{F}{q_0} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^2}$$

(3) 原点Oに固定された電荷の周囲の電位を求めよ。

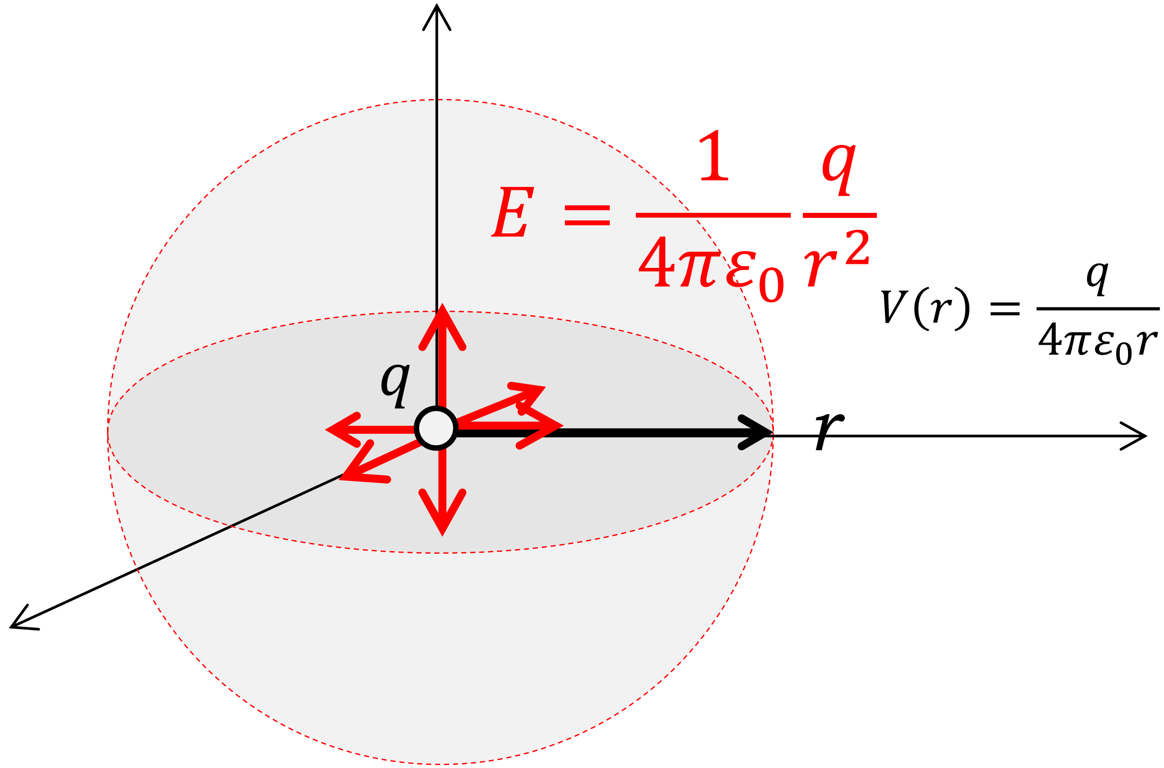
$$\Delta V = \frac{\Delta U}{q} = -\int_i^f \vec{E}\cdot d\vec{r} = -\int_i^f \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^2}\,dr = -\frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\int_\infty^{r_0}\frac{dr}{r^2}$$

$$= -\frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\left[-r^{-1}\right]_\infty^{r_0} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\left[\frac{1}{r_0}-\frac{1}{\infty}\right] = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r_0}$$

$\Delta V = V(r_0) - 0$ としたので、$V(r_0) = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r_0}$

r_0を任意の点とするなら、rと書き換えた次式が得られる $V(r) = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r}$

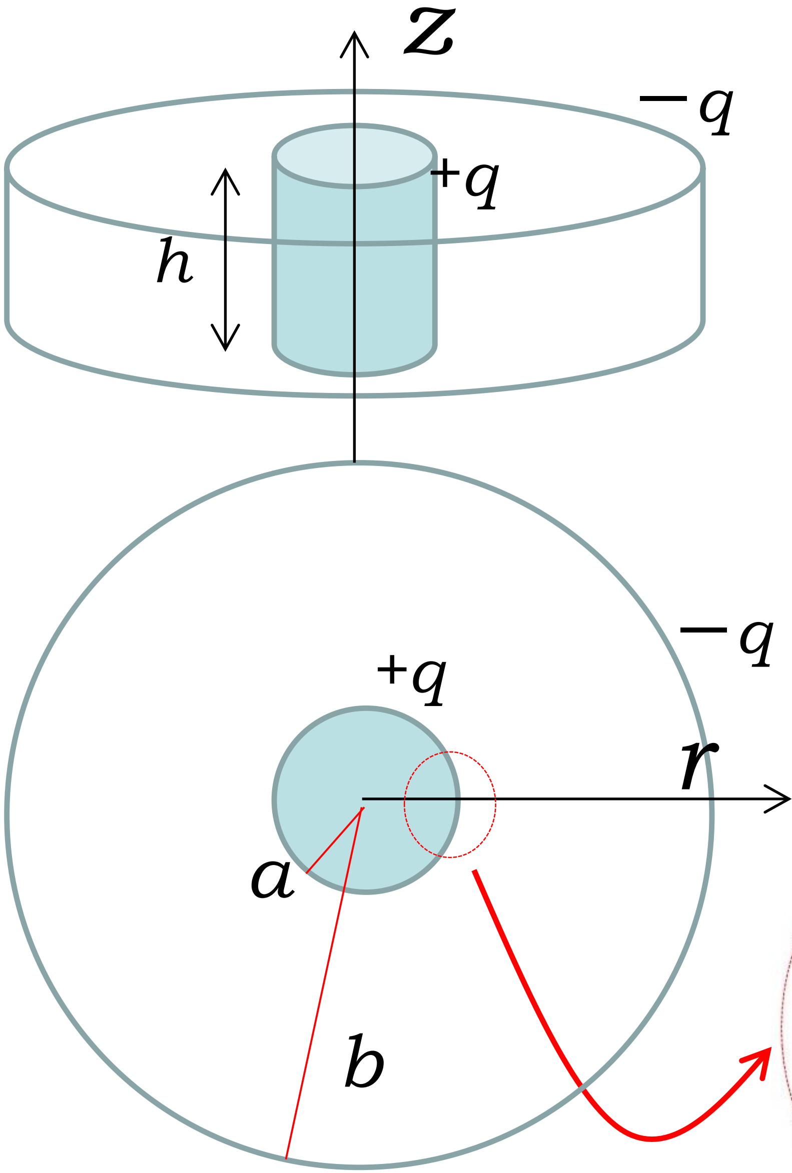
$V(r)=\frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r}$ の関係を考察しよう。



静電気力の大きさは固定された電荷との距離で決まるので、固定された電荷の周囲の電場の従って、その積分から求められる電位も$V(r)=\frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r}$となり、電荷からの距離で電位、あるいは試験電荷を置いたときに作用する力が決まる。大きさは全方位に向かって$E=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^2}$が作られる。

<u>電位の平面的な広がりの場合は、上記に従わない。</u>

[電位(演習2)]

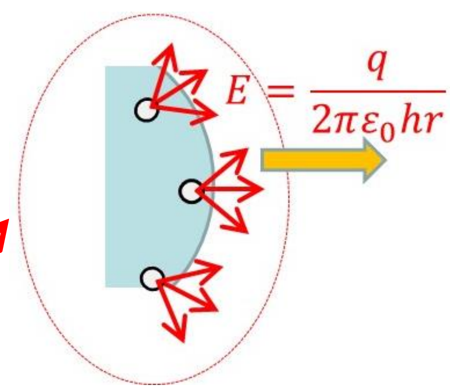


高さがhで外径aの内円筒と、内径bの外円筒の中心を一致させ、それぞれを$+q$、$-q$に帯電させた。

内、外円筒の電荷は、点電荷と扱えるので前ページの電場を作る。しかし、それぞれの電荷が作る電場は半径方向以外が打ち消しあう。そのため、半径方向に大きさが $E = \dfrac{q}{2\pi\varepsilon_0 hr}$ の電場が生じ、位置 r の電位は

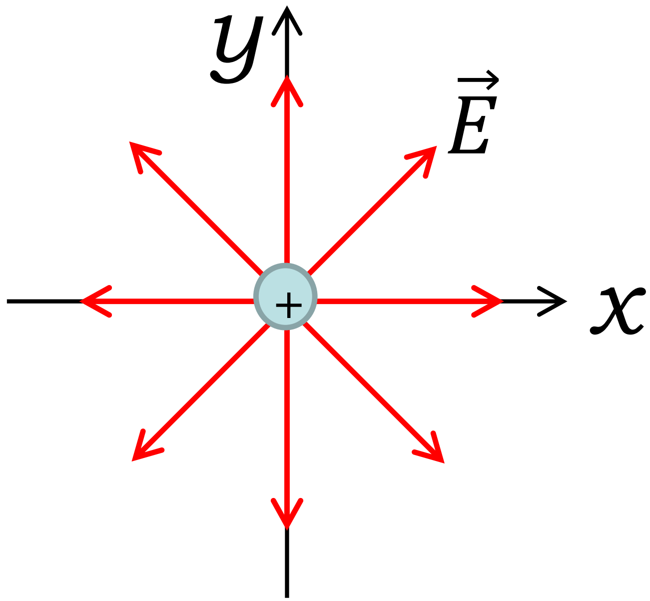
$$V(r) = \frac{q}{2\pi\varepsilon_0 h} \ln\frac{b}{r}$$

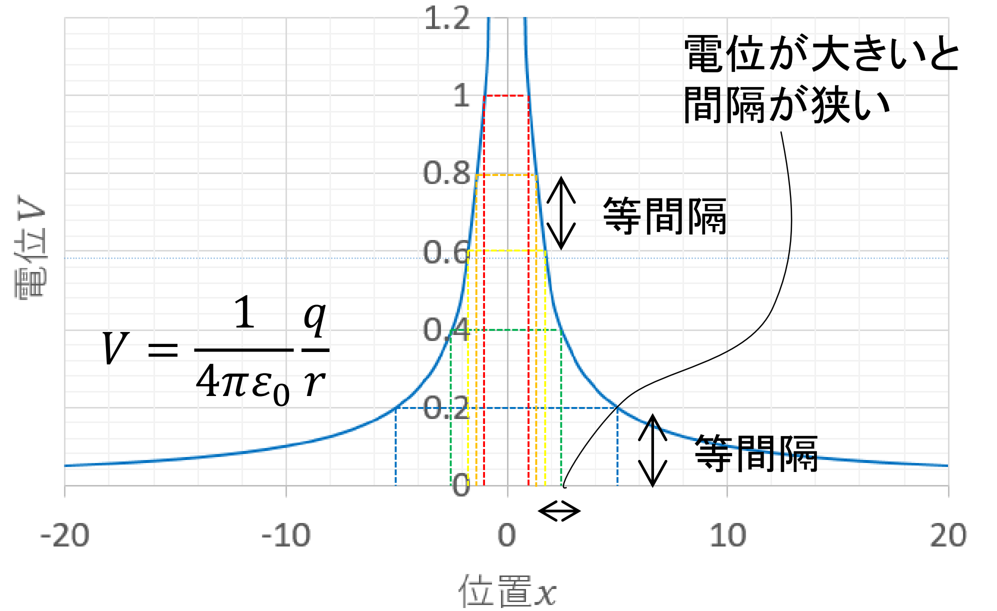
となる（導出法は、HPに掲載）。



[等電位線]

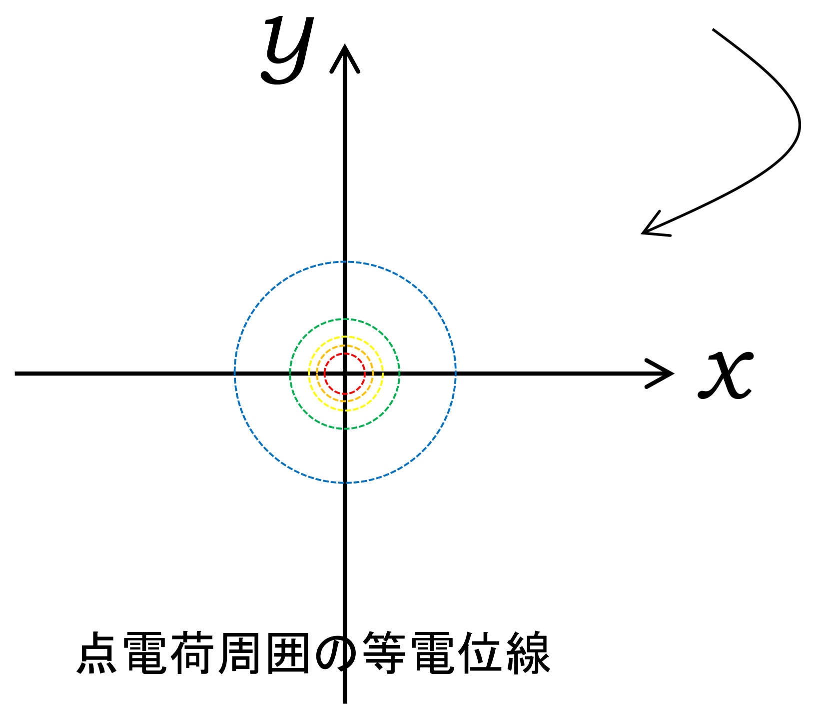
電場ベクトルを図示すると、矢印から
その方向は分かる。





計算された点電荷周囲の電位 (y=0上)

電圧はスカラー量なので、ベクトルを書けない。電圧の分布を表すのに、等電位線（空間中で電位の等しい位置を結んだ線）で表す。地図の等高線と同じで、電圧の正負や大きさの分布がわかる。



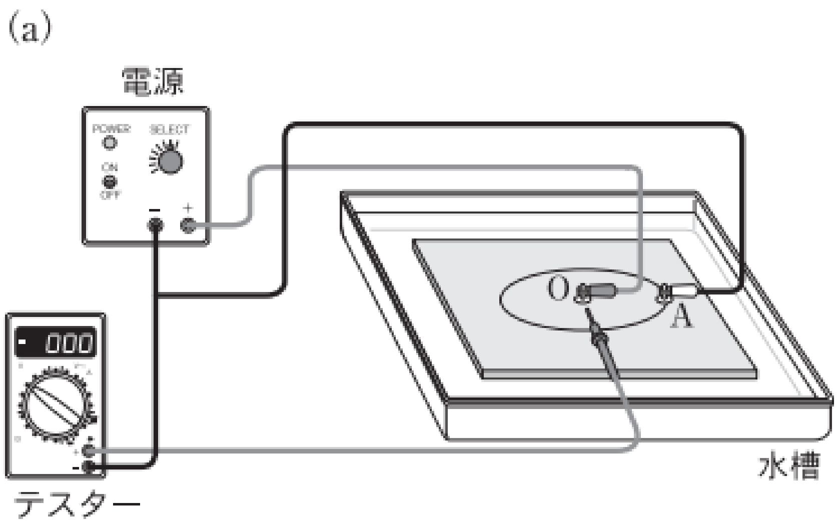
点電荷周囲の等電位線

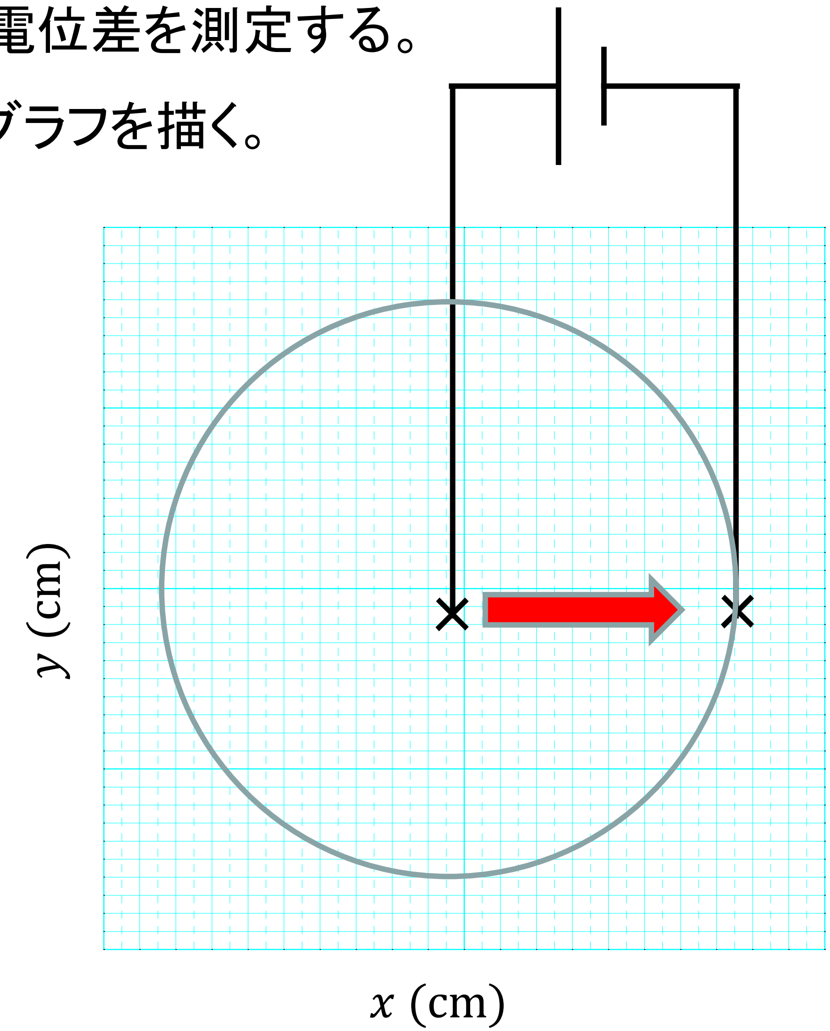
・円環が固定された目盛板を水槽内に置き、円環が漬かる程度に水を入れる。

・図(a)の回路を組み、電源の起電力を12 Vに設定する。

・点OA間上で、点Oからの距離が1 cm、2 cm、・・・の位置にプローブを接しさせ、それぞれの位置でのグラウンドに対する電位差を測定する。

横軸をx(位置)、縦軸を電位として、ノートにグラフを描く。

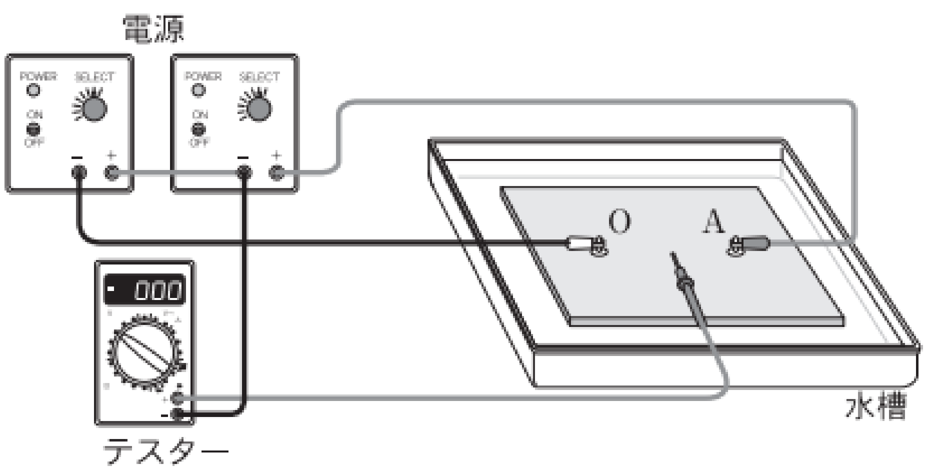


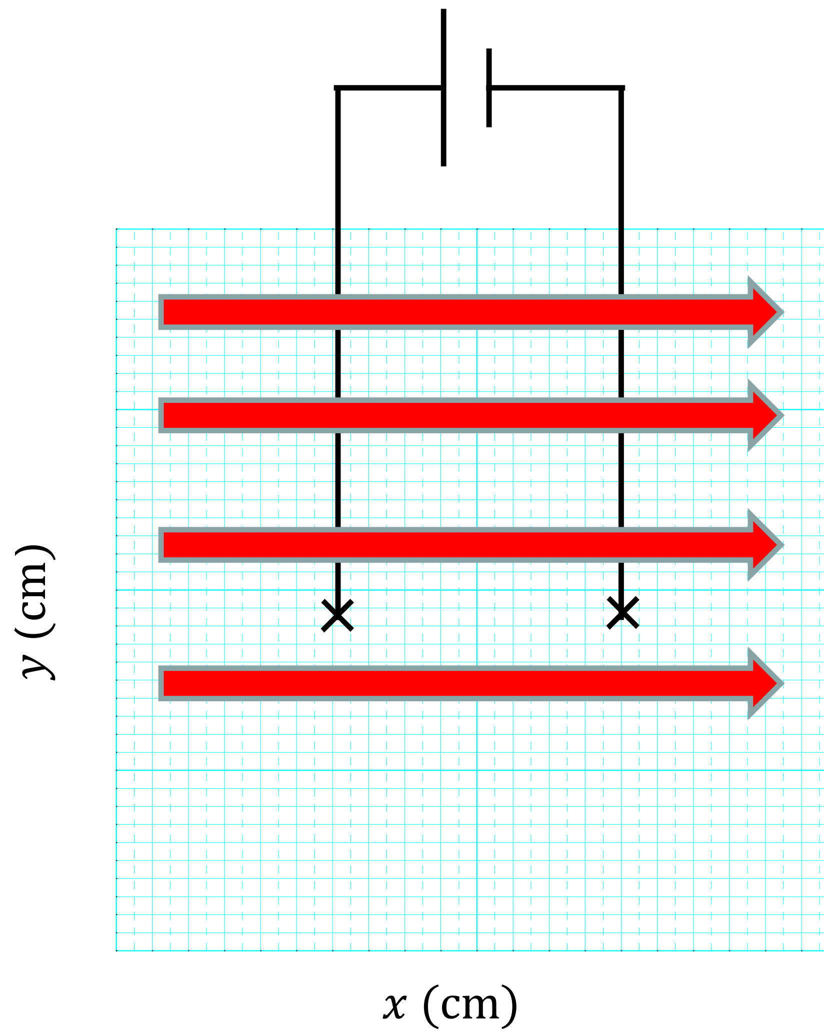


・図(b)の回路を組み、電源の起電力を12 Vに設定する。

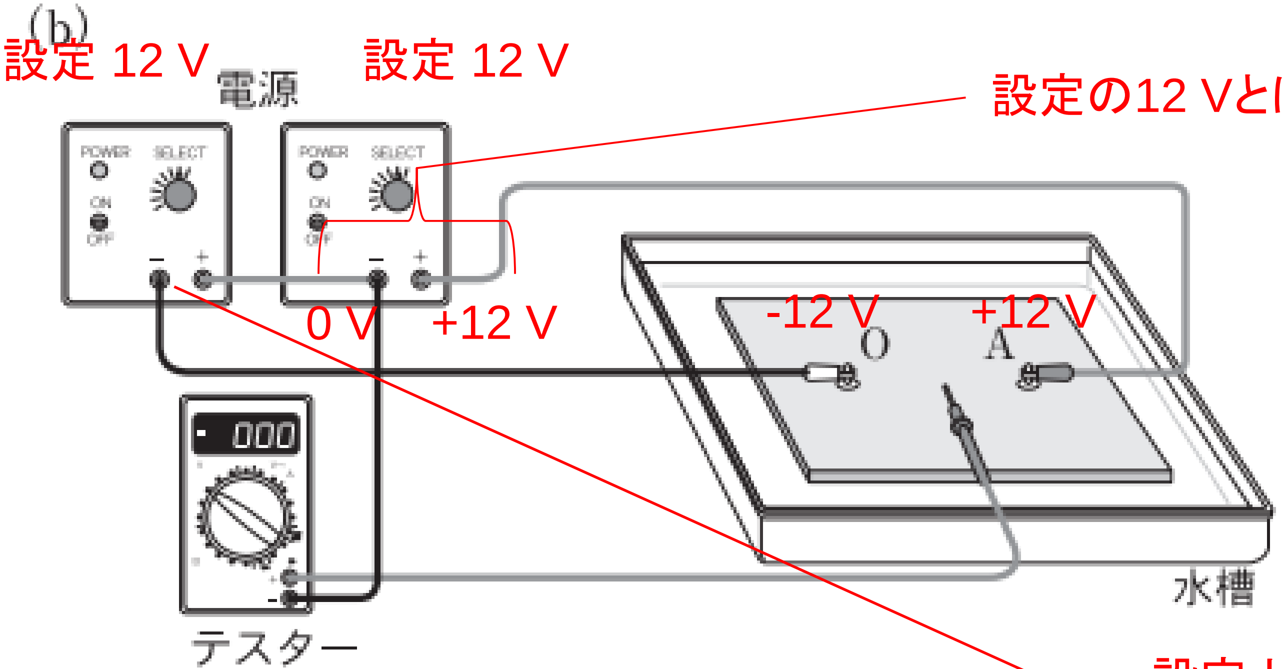
・OA周囲で2　cmおきにプローブを接しさせ、それぞれの位置での電位差を測定し、電位分布を調べる。エクセルシートに電位を入力し、等高線図を作成する。

(b)



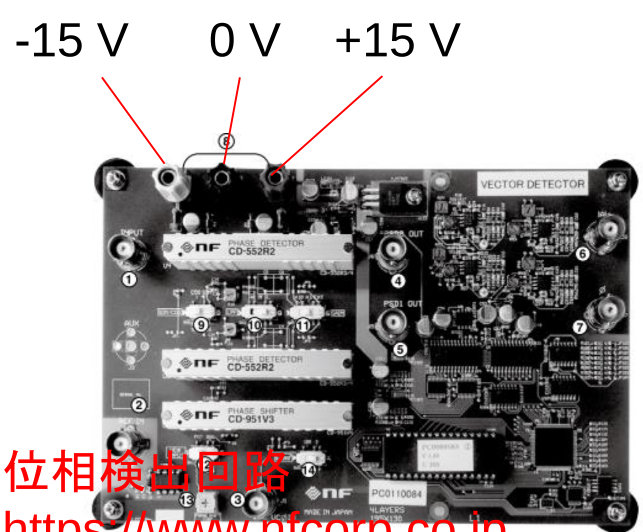


なぜ、直流電源が2個いるのか？



設定の12 Vとは電位差が12 V

設定上、正負の端子間の電位差が12 Vとなる。正を0 Vにすれば、負は-12 Vになる。



位相検出回路
https://www.nfcorp.co.jp

① INPUT
② REF IN
③ VC ϕIN
④ PSD2 OUT
⑤ PSD1 OUT
⑥ |A| OUT
⑦ ϕ OUT
⑧ −15V/GND/+15V
⑨ SIN/COS (SW2)
⑩ LPF (SW3)
⑪ GAIN (SW4)
⑫ VC ϕ INPUT (SW1)
⑬ PHASE SHIFT±100°
⑭ 0/180° (SW5)

+12 V～0 Vの電位分布を測定するなら電源は1つで良い。+12 V～-12 Vの場合負の電圧を作るために、2個の電源を使用した。このように、正から負の電圧を必要とするのは様々な検出回路に用い垂れている。

この実験では、水を入れた水槽に、電源の正負の端子を沈める。

テスターは、テスター内部を流れた電流値を、電圧に換算して表示している。そのため、電源の正負の端子間に電流が流れないと、その一部をテスター内部に取り込み、電圧を測定することができない。

水道水は、イオン等の不純物を含んでいるため、電圧を加えると、わずかに電流が流れる。

このような実験では、正負の端子を点電荷とはみなせず、平面的な電場・電位の分布を考えることに注意すること。