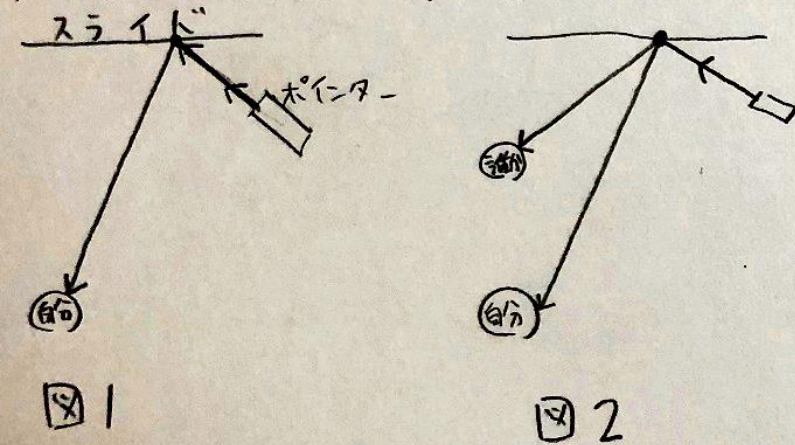


Q: 朝ごはん食べられなかったら、迷惑にならない範囲で食べてもいいですか？

A: かまいませんよ。授業の雰囲気が悪くならないように気をつけて下さいね。

授業で使うポインターをみて疑問に思ったこと。

僕の目に届く光は図1のように進んだ光だと思う。でも他の誰かに届く光は図2のように進んでいる。少なくとも一方は反射の法則が成り立っていないことからポインターは反射ではなく、スライド上の一点が光源になるようにしているということだろうか。



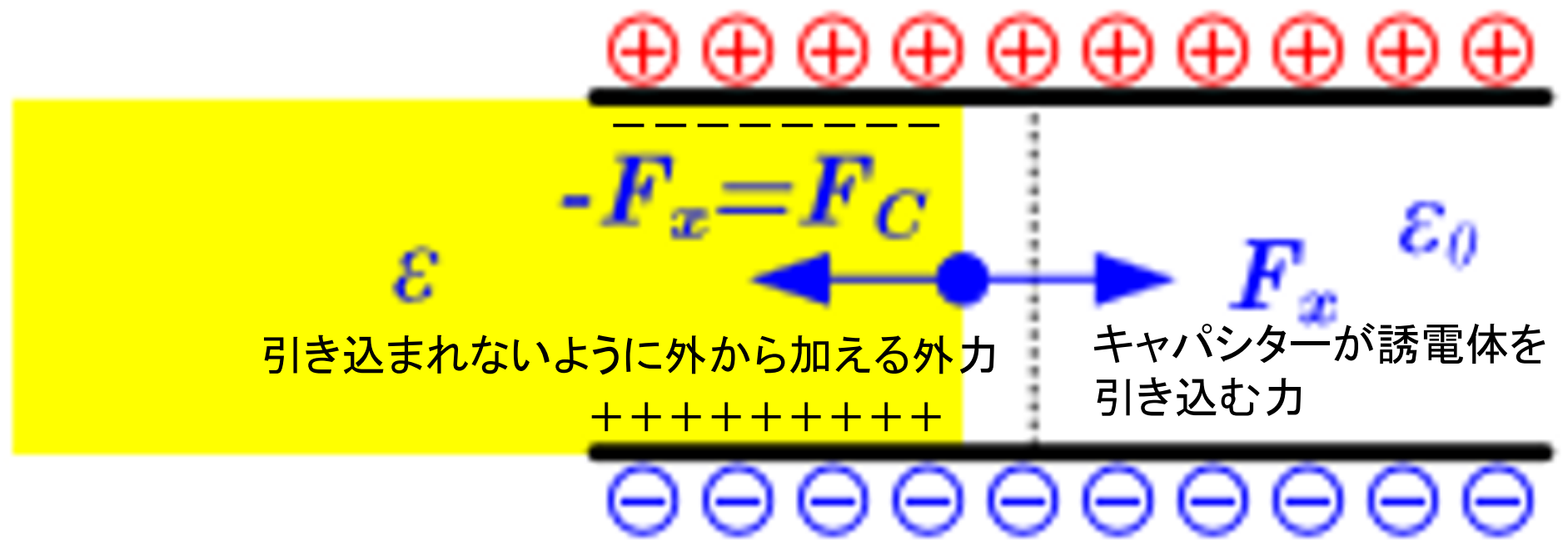
A: プロジェクターのスクリーンは、鏡のような反射でなく、乱反射をするような素材で作られています。紙やこの教室の壁や天井も乱反射するので、同様にどの方向からでも見えます。ガラスの表面では、鏡のような反射をします。

Q: 3万ボルトでやっと1 cm の火花が飛ぶということは、雷とかは1 km, 2 km 上から落ちてくるのだから2億ボルトくらいあるのですか？

A: 単純に計算すると、1 cm 3万ボルトということは、1 km だと10億ボルトです。実際の雷の放電は複雑なので、この計算はそのまま成り立ちませんが、Wikipedia では、雷の電圧は、200万～10億ボルトと記載されています。

Q: 平行板キャパシターに誘電体を挟み込むとエネルギーが ϵ_0 倍になるのは、電池につないであるときに限られると考えてよいですか？

A: 誘電体を挟み込むとき、誘電体には、平行板キャパシターに引き込まれるような引力が作用するので、キャパシターは仕事をします。仕事をした分エネルギーが減ります(キャパシターに蓄えられているエネルギーは $1/\epsilon_0$ になります)。
電池がつないであると、電池が仕事をして充電します(極板の電荷が増えます)。その結果キャパシターに蓄えられているエネルギーは ϵ_0 倍になります。



Q: $F = k \frac{qQ}{r^2}$ は真空中で使えるが、誘電体中でも使っていいのですか？

A: 誘電体中の分極電荷もすべて考慮するなら使ってよいです。誘電体といっても、微視的に見れば、真空中に誘電体を構成する電子や原子核があるだけです。それらをすべて考慮すれば、これまで真空中を仮定して勉強してきたことはすべて成り立っています。実際は、分極電荷は複雑に分布するので、事実上使えないと考えた方がよいです。 $F = qE$ については、電場 E が分極電荷を含めて求めていけば、問題なく使えます。

Q: $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ なので $k = \frac{1}{4\pi\epsilon}$ と考えるのはアリですか？

A: 前回第9回⑦⑧の誘電体中の点電荷(例: 水中のイオン)のように、両方の電荷が誘電率 ϵ 中にあり、上のようなクーロン力の式の k において、そう考えてもよいです。

電流

: 電荷の流れ (荷電粒子の移動)

例①: 金属中における

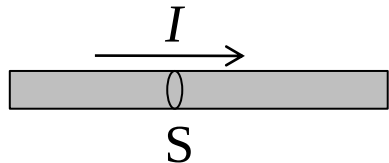
自由電子

の移動

例②: 電解質溶液中における正イオンや負イオンの移動

例③: ネオン管・蛍光灯・ブラウン管 中における電子やイオンの移動

時間 Δt に面Sを通過する電気量を Δq とすると、面Sを通過する電流 I は



$$\text{電流 } I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

単位: アンペア [A] = [C/s]

面Sを通過する電流 I は、単位時間に面Sを通過する電気量である。

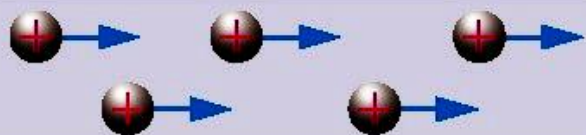
$$\Delta q = I \Delta t$$

電流の向き

電場 E



電流



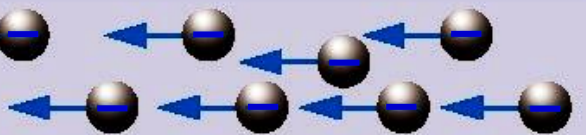
(a) 正イオン

低電位

電場 E



電流



(a) 自由電子, 負イオン

電流の向き: 正電荷の移動の向き
負電荷の移動の向きの逆

電流と電場の向きは同じ

電流は高電位から低電位の向きに流れる

高電位

導線を流れる電流

電荷密度 $-ne$, 体積 vA

$-e$: 電子の電荷 (e : 素電荷)

n : 単位体積あたりの自由電子の数

v : 自由電子の平均速度
(ドリフト速度)

電子 (電荷: $-e$)

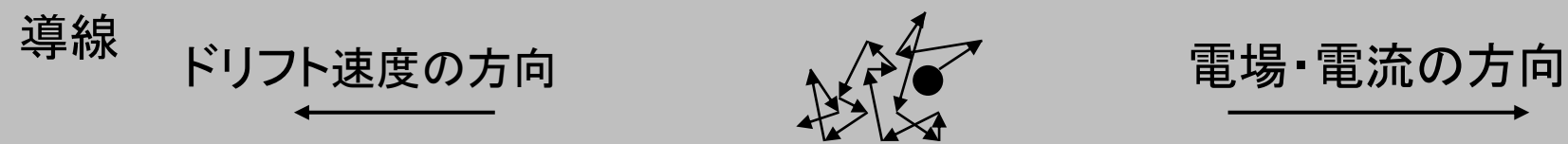
断面積 A

v

1秒間に、導線中の体積が vA 中にある自由電子が導線の断面を通過する。
体積 vA 中には、 vAn 個の電子があり、電荷の総量は $vAne$ (絶対値) である。

電流の強さ $I = nevA$

(注) 電流の向きと自由電子の
ドリフト速度の向きは逆



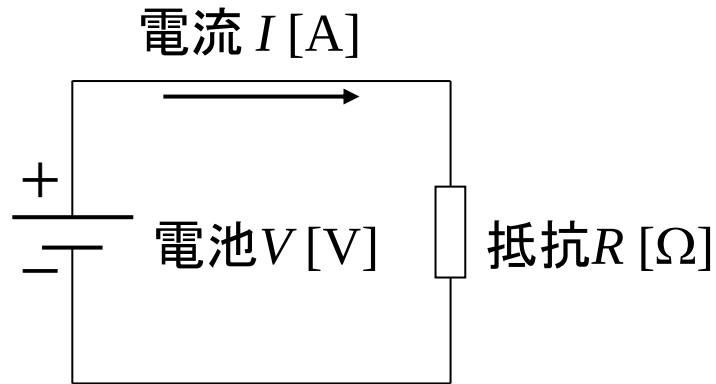
自由電子は導線中の原子等と衝突してランダムに動きながら次第に電場と逆方向へドリフトする。 drift : 漂流
真空中では、電子は一様な電場中で等加速度運動をするが、上のような場合、多数の電子の平均をとると等速運動である。

問題： 銅でできた導線の断面積を 1 mm^2 、銅の自由電子の密度を 10^{29} 個/m^3 (銅1原子あたり1個の自由電子に相当)とすると、この銅線に 1 A の電流が流れているときの、自由電子のドリフト速度を求めよ。($e = 1.6 \times 10^{-19}$)

電流の強さ $I = envA$

$$v = \frac{I}{enA} = \frac{1}{1.6 \times 10^{-19} \times 10^{29} \times 10^{-6}} \div 6 \times 10^{-5} \text{ [m/s]}$$

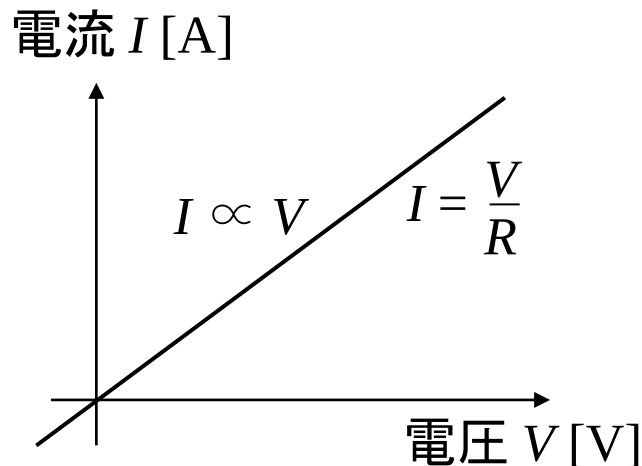
導線中の自由電子のドリフト速度はとても小さい。
(注) 電気信号(電場の変化, 電流の変化)の伝わる速さは光速に近い。



回路に電流を流そうとする電源の働きを

起電力 という

単位は電位差の単位のボルト(記号 V)

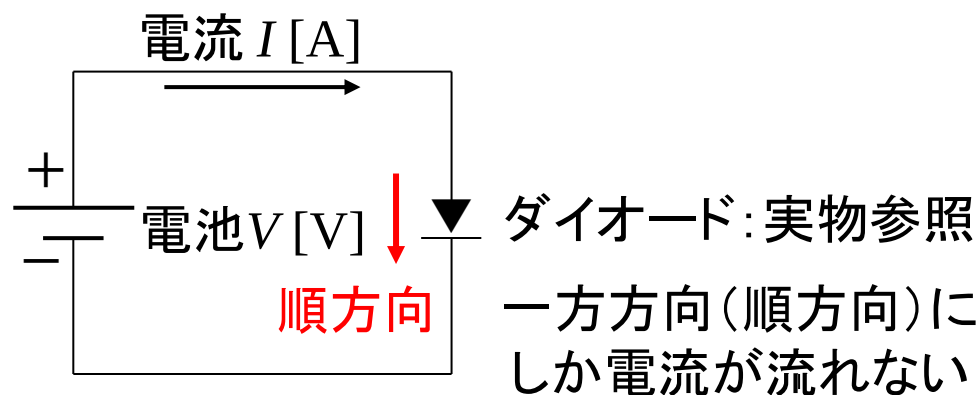


オーム の法則 : $V = RI$

抵抗器の両端の電位差 V は、
抵抗器を流れる電流 I に比例する。
その比例定数 R が電気抵抗(抵抗)である。
抵抗の単位は Ω (オーム) = V/A

オームの法則の適用限界

金属ではよく成り立つが、ダイオード・放電管・電解質溶液等では成り立たない。



交流を直流に変換 (整流)
するときなどに用いる。

LED
発光ダイオード

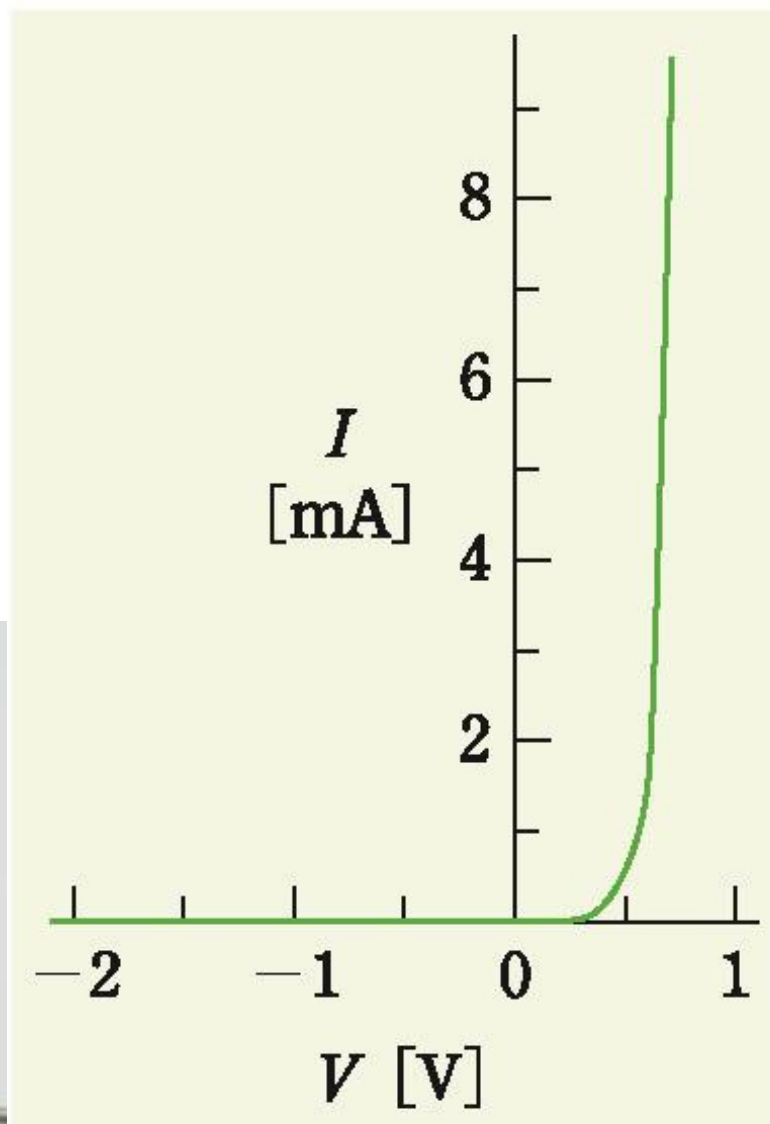
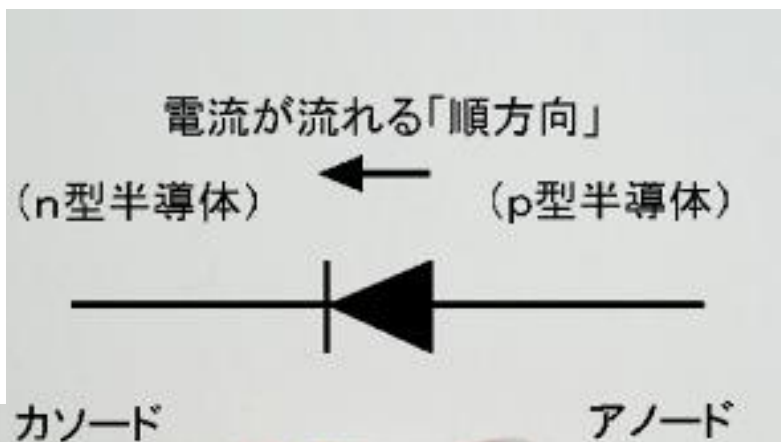
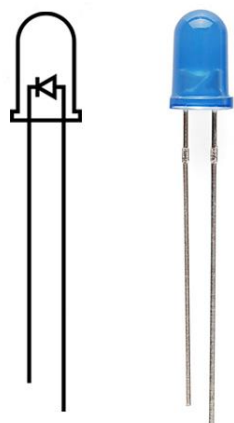
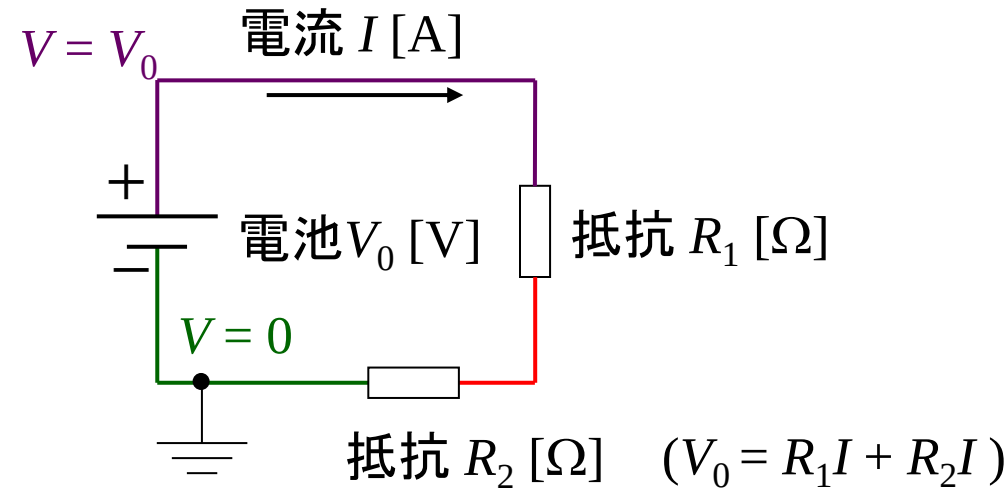


図19.8

電圧降下

電気抵抗 R をもつ物体に電流 I が流れると、電流の向きに電位は RI だけ低くなる。



電気回路の電位の基準点 ($V = 0$) は、アース (接地) がしてあれば、その電位を $V = 0$ とする。

問題: 左の図の赤い導線の電位を求めよ。

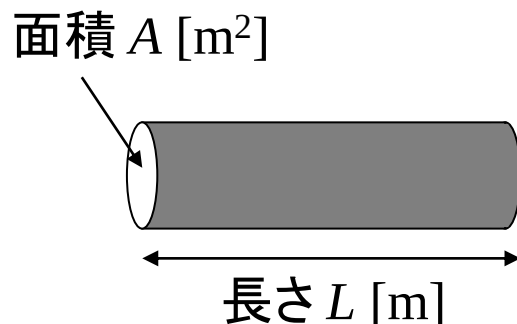
アース (0 V)
 地面に電極を埋める
 (地球の電位は 0 V としている)
 水道管 (金属) 等でも OK

導線の抵抗は無視する

$$V = V_0 - R_1 I = R_2 I$$

電気抵抗率

金属(導線等)の電気抵抗 R は、長さ L に比例し、断面積 A に反比例する。



$$R \propto \frac{L}{A}$$

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

比例定数 ρ が

電気抵抗率

単位
[$\Omega \cdot \text{m}$]

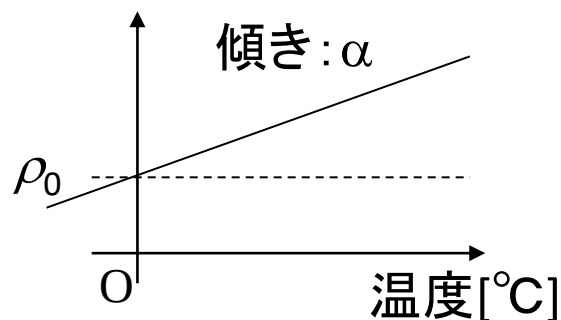
問題: 電気抵抗率の単位が $\Omega \cdot \text{m}$ かを確かめよ。

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

$$\Omega = \Omega \cdot \text{m} \frac{\text{m}}{\text{m}^2}$$

電気抵抗率 ρ の温度依存性

電気抵抗率 ρ



電気抵抗率 ρ は、材質と温度のみで決まる。
 0°C での電気抵抗率を ρ_0 とすると、
 $t^\circ\text{C}$ での電気抵抗率 ρ は近似的に以下ようになる。

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t)$$

α を電気抵抗率の温度係数という。

金属	電気抵抗率 ρ [$\Omega \cdot \text{m}$] (20°C)	温度係数 α	コメント
銀	1.62×10^{-8}	4.1×10^{-3}	最も電気抵抗が小さい
銅	1.72×10^{-8}	4.3×10^{-3}	導線の材料, 8.9 g/cm^3
金	2.4×10^{-8}	4.0×10^{-3}	
アルミニウム	2.75×10^{-8}	4.2×10^{-3}	軽い 2.7 g/cm^3 、高圧送電線
タングステン	10.6×10^{-8}	5.3×10^{-3}	融点 3380°C , フィラメント
鉄(鋼)	$(10 \sim 29) \times 10^{-8}$	$(1.5 \sim 5) \times 10^{-3}$	抵抗率: 大, IHの鍋
ニクロム	$(95 \sim 104) \times 10^{-8}$	$(0.3 \sim 0.5) \times 10^{-3}$	抵抗大きい、 α 小さい

鉄塔の送電線

2.7 g/cm³

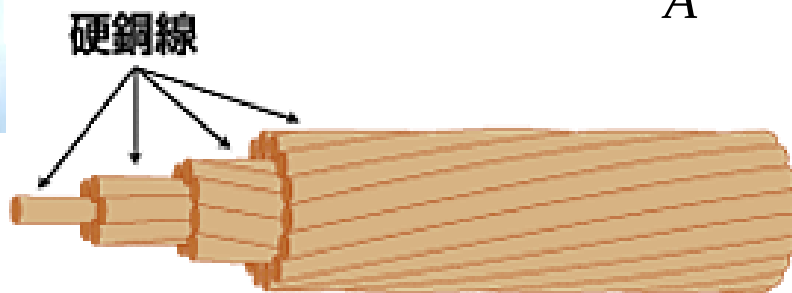
8.9 g/cm³

同じ重さならアルミの電線の断面積は銅の2倍超
電気抵抗率は銅の方が小さいが
断面積が大きい分アルミ線の方が抵抗が小さい

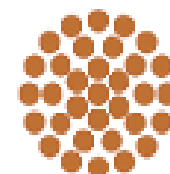
$$R = \rho \frac{L}{A}$$



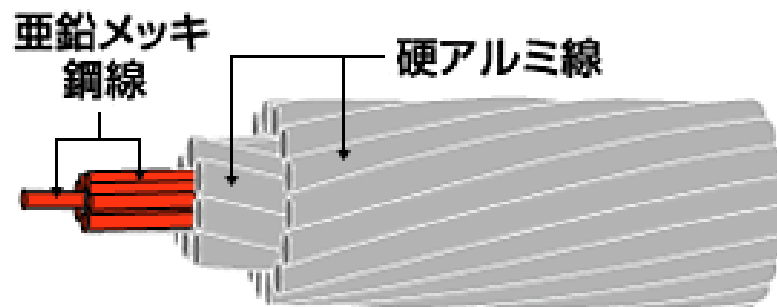
鉄塔の送電線は裸線
(被覆はない)



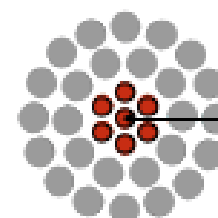
← 18.2 ミリメートル →



電線太さ(断面積) 200平方ミリメートル
1メートルあたりの重さ1.7キログラム



← 28.5ミリメートル →



亜鉛メッキ
鋼線

各層が交互に巻き方向を変える

電線太さ(断面積) 410平方ミリメートル
1メートルあたりの重さ1.7キログラム

問題：断面積が 400 mm^2 のアルミの送電線 100 km の電気抵抗を求めよ。
アルミニウムの電気抵抗率はスライド⑫の値を用いよ。

$$R = \rho \frac{L}{A} = 2.75 \times 10^{-8} \times \frac{10^5}{4 \times 10^{-4}} \doteq 6.9 \text{ } [\Omega]$$

豆電球のフィラメント(タングステンの細い線)の抵抗

⑮

①測定：豆電球の抵抗をテスターで測定する。2.4 Ω
(ソケットの抵抗を含む)

②豆電球を点灯させたとき、豆電球に流れる電流を測定する。0.12 A

③そのときの、豆電球(ソケット)の両端の電圧を測定する。3.2 V

④問題：点灯しているときの電球(ソケットを含む)の抵抗を計算せよ。

$$V = RI$$

$$3.2 = R \times 0.12$$

$$R \div 27$$

27 Ω

問題: スライド⑫の内容が適用できるとして、点灯していない(20°Cとする)ときのフィラメントの抵抗を求めよ。ただし、前のスライドで電球(ソケットを含む)の抵抗を測定したが、これはフィラメントの抵抗とする。

温度 t °Cにおけるフィラメントの抵抗を $R(t)$ とすると

$$R(t) = R(0)(1 + \alpha t)$$

$$2.4 = R(0)(1 + 0.0053 \times 20)$$

$$2.4 = 1.106R(0)$$

$$R(0) \doteq 2.17$$

問題: 点灯しているときのフィラメントの温度 t_{on} を求めよ。

$$27 = 2.17(1 + 0.0053t_{\text{on}})$$

$$24.83 = 0.0115t_{\text{on}}$$

$$t_{\text{on}} \doteq 2.2 \times 10^3 \text{ °C}$$

温度の関係式はこのような高温までは成り立っていない。

実際のフィラメントの温度は _____°Cくらいである。

問題: スライド⑫をみると、電気ストーブ等で用いられているニクロム線は温度係数が他の金属より1桁小さい。もし、他の金属と同程度だとしたら、どのような問題があるか？電気ストーブを例に検討せよ。

ヒント: 電気ストーブは消費電力が大きい(たくさん電流が流れる)

スイッチを入れたとき、ニクロム線は常温なので、抵抗が小さく、たくさんの電流が流れて、ブレーカーが落ちる可能性がある。

100Wの電球は点灯した瞬間は1000W以上の消費電力

電気伝導率

電気抵抗率 ρ の逆数を

電気伝導率

という。

記号は σ

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

単位: $[1/\Omega \cdot \text{m}]$

電流密度

導線の単位面積あたりの電流を

電流密度

という。

記号は j

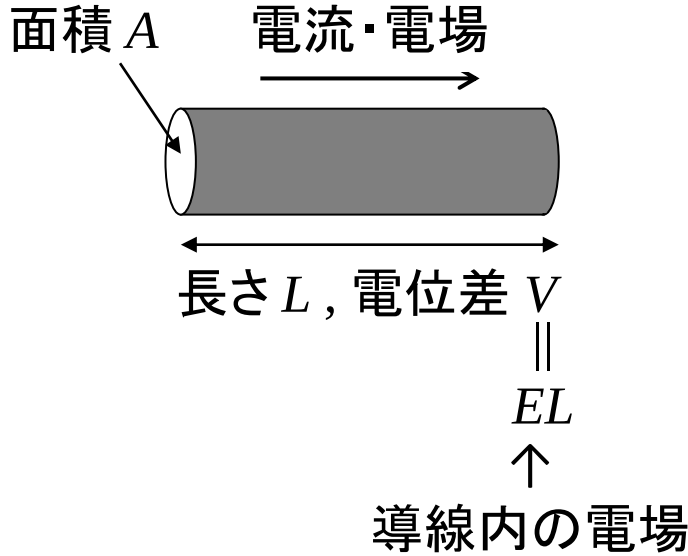
$$j = \frac{I}{A}$$

(A は導線の断面積)

単位
[A/m²]

電流密度 j はベクトル。上の式は電流密度の大きさ
電流密度の向きは電流の向き

電流密度 j と電場 E の関係



$$R = \rho \frac{L}{A}$$

$$V = IR$$

$$\frac{V}{I} = \rho \frac{L}{A}$$

$$\cancel{\frac{EL}{I}} = \rho \cancel{\frac{L}{A}}$$

$$j = \frac{1}{\rho} E = \sigma E$$

$$E = \rho \frac{I}{A}$$

電流の強さ $I = jA = nevA$

$$E = \rho j$$

$V = RI$ を
ミクロで

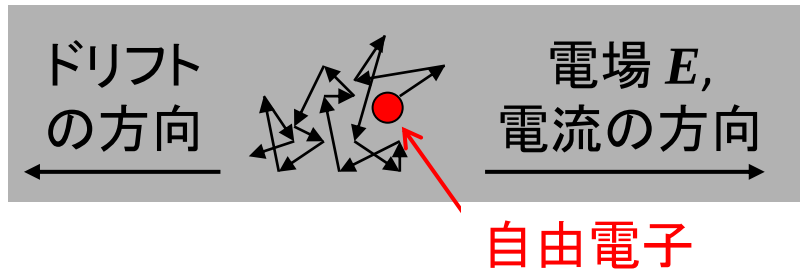
$$j = -nev$$

電場と電流は同じ向き

電流の向きと自由電子のドリフト速度の向きは逆

抵抗を微視的なレベルで考察してみると...

導線



自由電子に働く力 : $F = qE = -eE$

自由電子の運動方程式 : $ma = -eE$

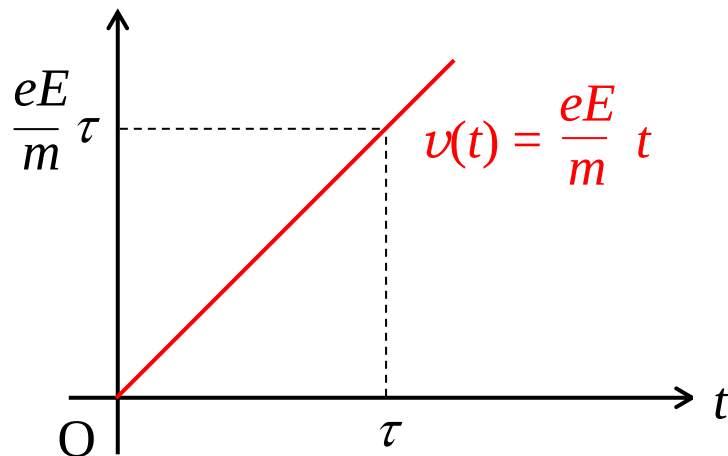
自由電子の加速度 : $a = -\frac{eE}{m}$

自由電子は熱運動している正イオンや不純物と衝突し等方的に散乱される。
(衝突後の初速度は等方的で移動には寄与しないので考えなくてよい。)
衝突から次の衝突までの平均時間を τ とすると、 $\bar{v}$ (=ドリフト速度) は

ドリフト方向
の速度 v

$$\bar{v} = a\tau = -\frac{e\tau}{m} E$$

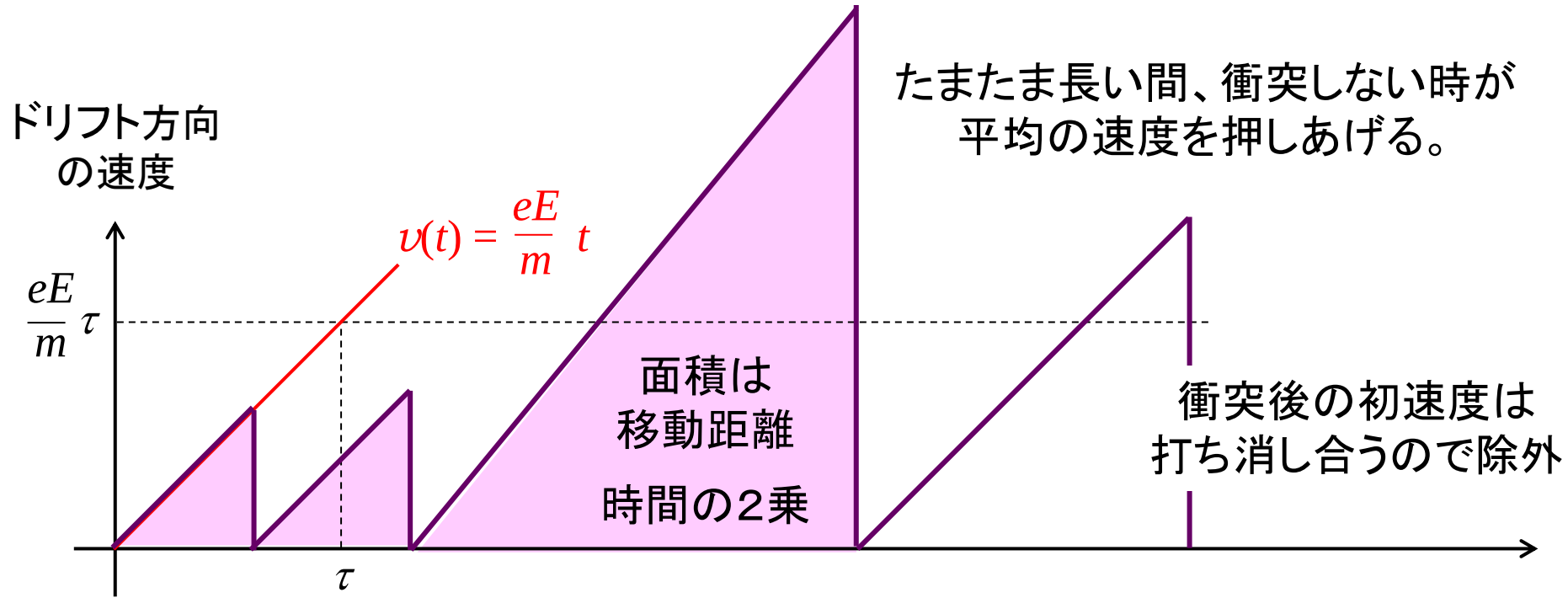
必ず τ だけ時間が経つと衝突する
なら $\bar{v}$ はこの半分であるが、
実際の衝突はランダムに起こるので
左のようになる。



衝突後の初速度はランダムで
移動には寄与しないので除外

衝突がランダムに起こると・・・

(21)



平均の2乗 < 2乗の平均
どのような「ランダム」かによるが、この場合
 $2 \times \text{平均の2乗} = 2\text{乗の平均}$

(厳密な説明省略)

参考: p241 演習問題B2参照

どのような「ランダム」か少しでも説明すると...

22

導線中の自由電子が衝突したあと、 t 秒後に次の衝突をしないで走り続けている確率 $P(t)$ は

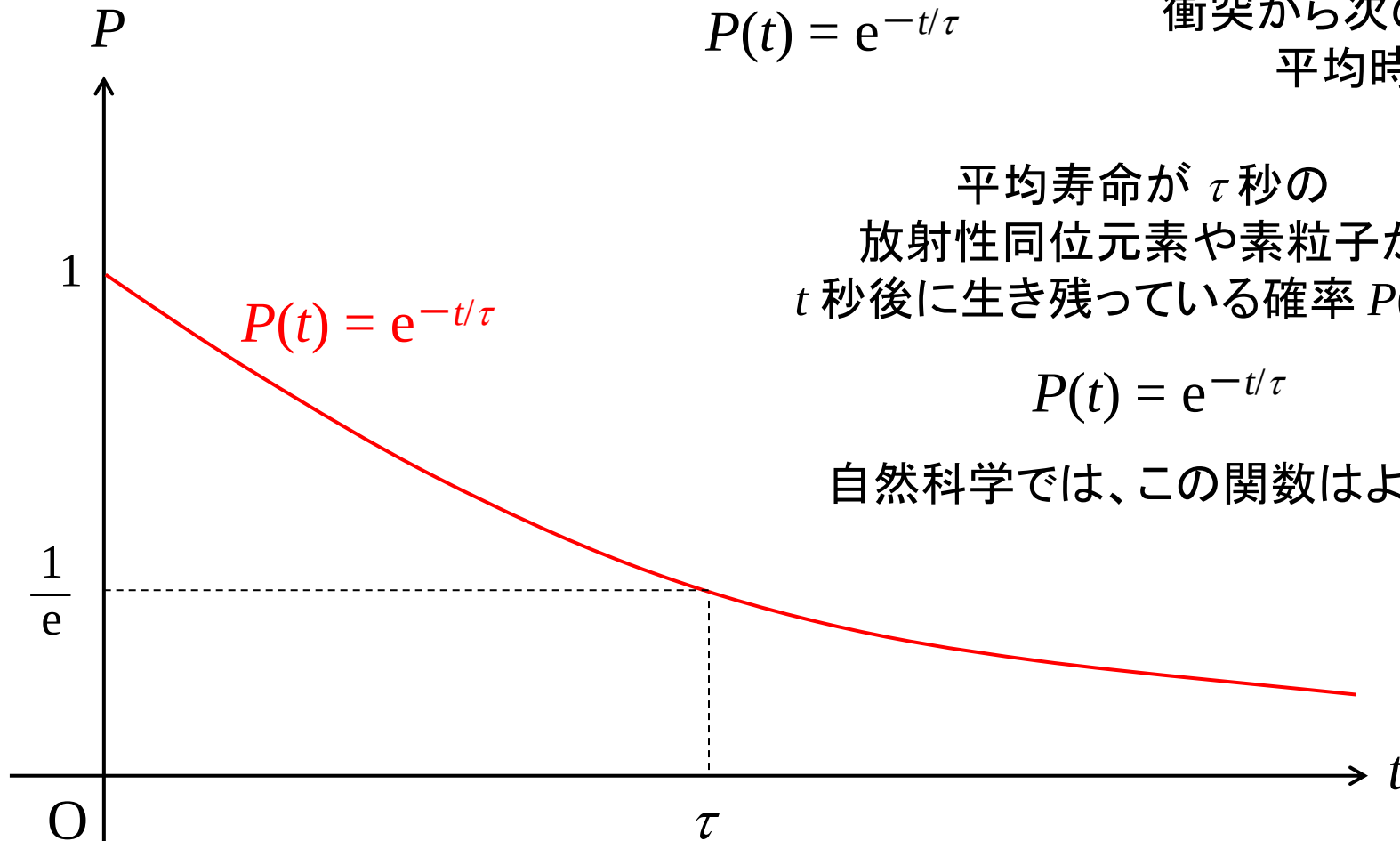
$$P(t) = e^{-t/\tau}$$

衝突から次の衝突までの
平均時間が τ

平均寿命が τ 秒の
放射性同位元素や素粒子が
 t 秒後に生き残っている確率 $P(t)$ も

$$P(t) = e^{-t/\tau}$$

自然科学では、この関数はよくでてきます。



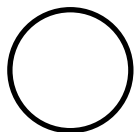


シャボン玉に映った景色の解説

特徴

- ①シャボン玉の上下に同じ景色が映っている。
- ②2つの景色は互いに上下も逆、左右も逆

上から見た
シャボン玉、カメラ、
ビル群の位置関係
は以下のように
なっている。



カメラ

ビル群



横(水平方向)から見た図

空

ビル

シャボン玉の上半分の景色は
シャボン玉の手前で反射
シャボン玉の下半分の景色は
シャボン玉の奥で反射

カメラ

地面

上から見た図

シャボン玉の上半分の景色は
右にあるものは右に映る
シャボン玉の下半分の景色は
右にあるものは左に映る

ビル群

カメラ

分けて考える必要が
あったので混乱した。

