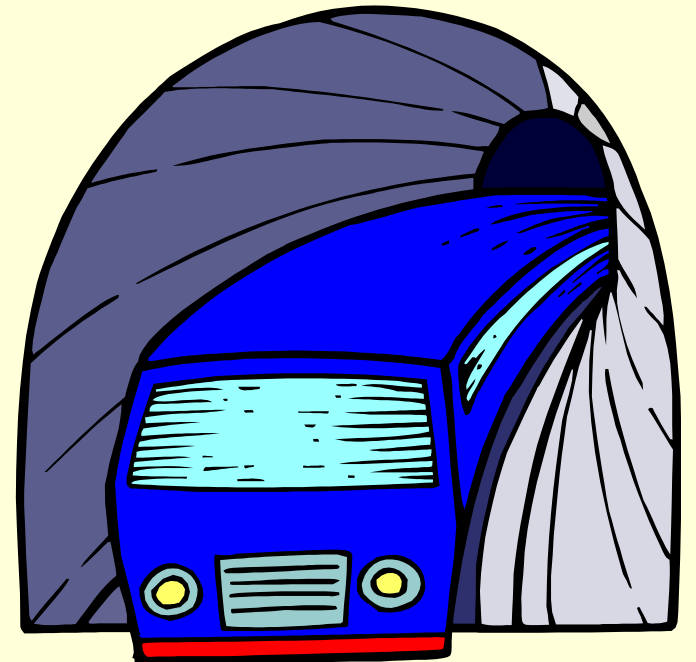
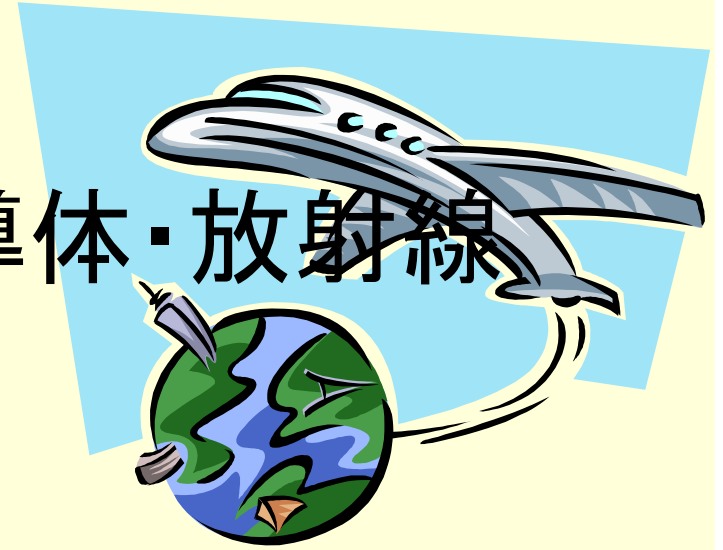
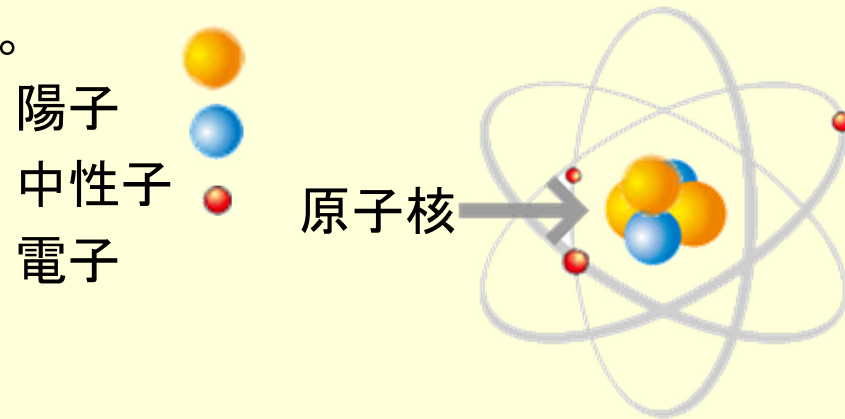


第14章 原子の構造と半導体・放射線



原子の構造と表し方

原子は、中心に**原子核**とその周りを飛んでいる-の電気を持つ**電子**から出来ています。原子核は+の電気を持つ**陽子**と電氣的に中性な**中性子**から出来ています。



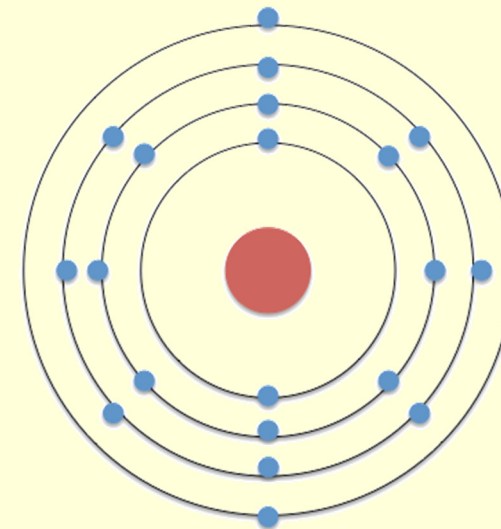
原子の種類は、原子の中の陽子の数によって決まり、水素なら1、ヘリウムなら2となります。この数のことを**原子番号**、これに中性子に加えた数を**質量数**といいます。

例：ヘリウム

質量数 $\Rightarrow$ 4
原子番号 $\Rightarrow$ 2 **He**

原子核の周りを回る電子の軌道は、内側からK殻、L殻、M殻...と呼ばれ、その中には電子が2個、8個、18個...と入れる数に制限がある。さらに、最外殻は最大8個という制限もある。

物質はこれらの原子が集まって出来ているが、その最外殻の電子は共有する。あたかも、それぞれの原子が腕を伸ばしているようになり、そのため周期表の4価の原子(C、Si、Ge)は互いに4本ずつの腕を伸ばして8本が繋がった構造になり、強い結合となる。

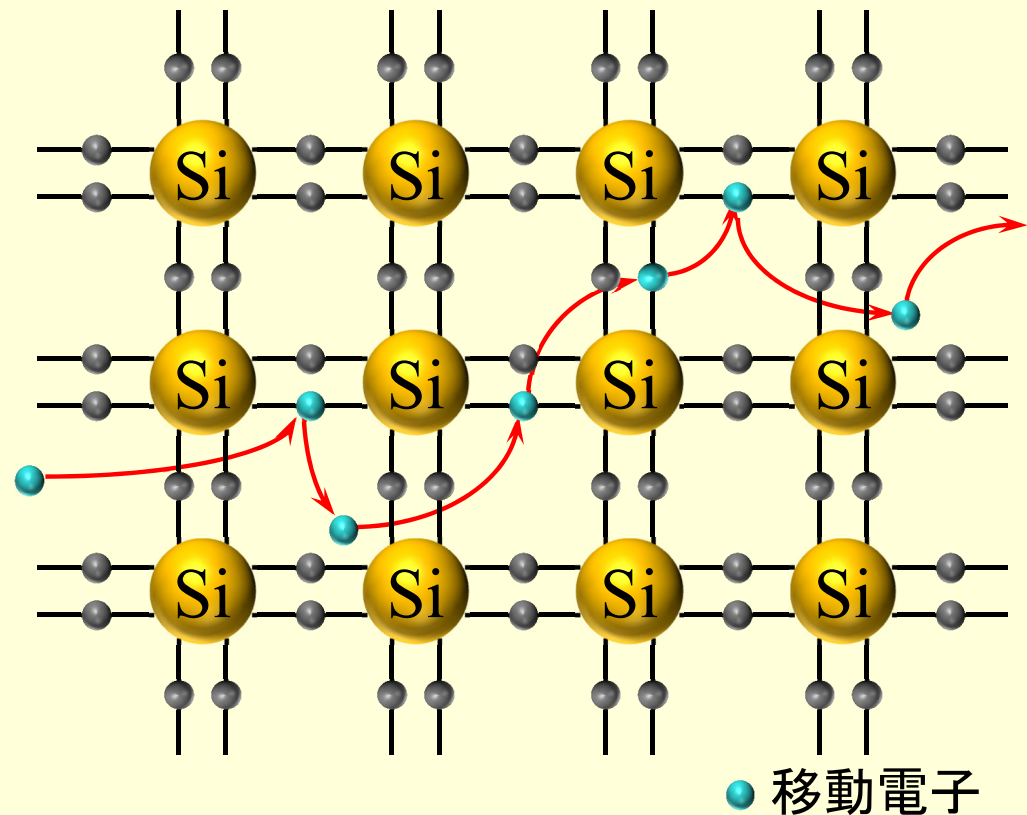


半導体とその構造

ゲルマニウム(Ge)やケイ素(シリコン; Si)などは4価の原子で、原子構造の最外電子殻に4個の電子(価電子)を持っている。この4価の原子だけで結晶を作ると、価電子同士が互いに共有するので、強い結合を持つ共有結合の結晶ができる。このような物質を**真性半導体**という。

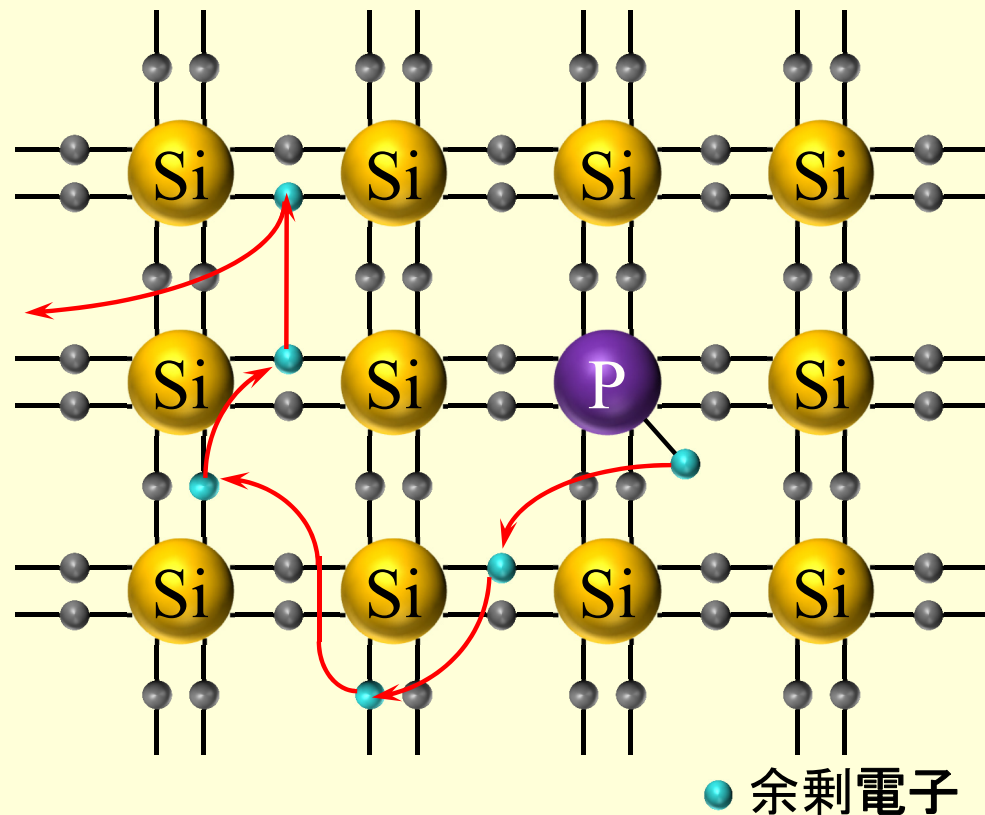


シリコンの単結晶



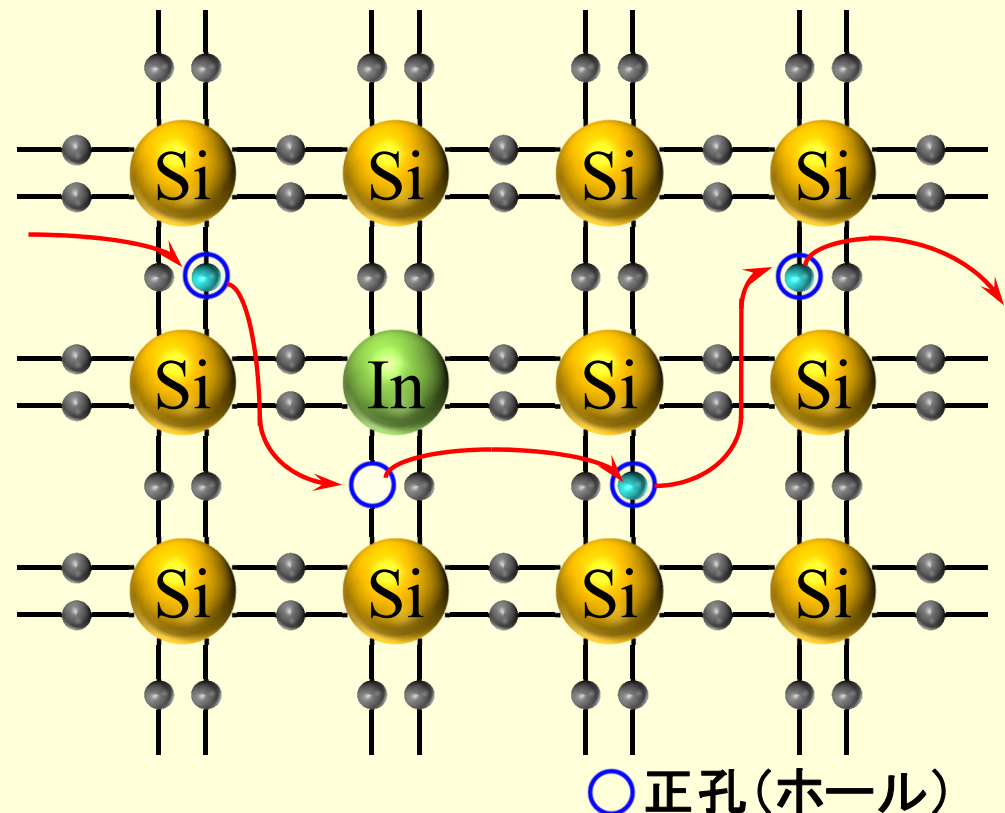
N型半導体

4価のSiに5価のリン(P)やヒ素(As)を少量結合(ドーピング)させると、1個の電子が余ることになる。このドーピングした5価の原子を**ドナー**という。**余った電子は、少しのエネルギーが加えられただけで、すぐ不純物から離れて結晶内を動き回る**。電子が移動した結果、その流れと逆方向に電流が流れる。負(Negative)の電荷をもつ電子が電流のキャリア(担い手)となるので、このような半導体を**N型半導体**という。



P型半導体

インジウム(In)またはガリウム(Ga)など、3価の原子を4価の原子に少量結合させると、電子が1個不足し、そこにホール(正孔:プラスの性質を持った孔)ができる。このドーピングした3価の原子をアクセプタという。少しのエネルギーが加えられるだけで、隣の電子はホールに入り込み、電子が移動する。逆方向に次々とホールができ、それに伴って電流が流れる。正(Positive)の電荷をもつホールが電流のキャリアとなるので、このような半導体をP型半導体という。

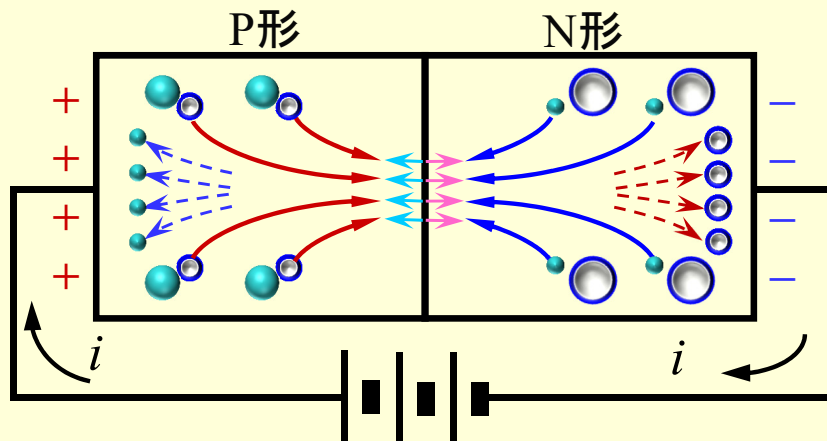


ダイオード

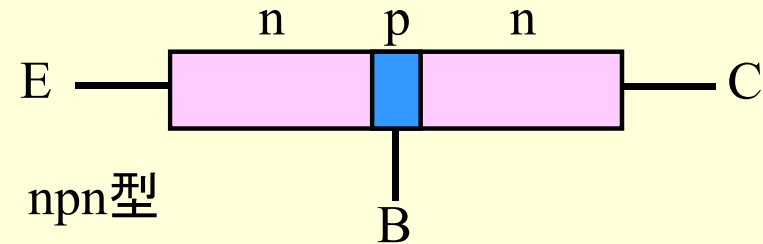
P形半導体とN形半導体を接合したものを**ダイオード**(Diode)という。

N形半導体に $-$ 、P形半導体に $+$ の電位を与える(順方向)と、N形の電子は $-$ に反発して、P形の正孔は $+$ に反発して、どちらも接合面に移動する。接合面では中和が起こり、N形に出来た正孔は回路からの電子を受け、P形に出来た電子は回路に流れ出す。この結果、電子は常に回路を流れることが出来る。

$+$ と $-$ を逆にする(逆方向)と、中心に空乏層が出来、電子は流れなくなる。



P形半導体とN形半導体を3つ組み合わせたものを**トランジスタ**(Transistor)といいます。



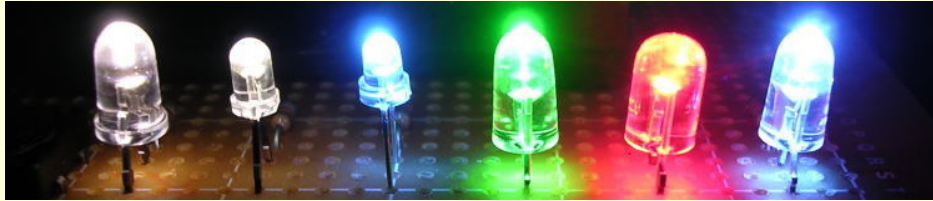
E側に $-$ 、C側に $+$ の電位をかけると、E側の電子がC側に引き寄せられ、Bの正孔と中和するが、B側が薄いため正孔が不足する。C側電子も $+$ に引き寄せられて、B内に空乏層が出来る。ここでBに正孔を増やすように電流を流すと、EからCに向かって流れる電子が中和するだけでなく、さらに流れてきた電子がC側にまで流れる。

B側に流れる電流(小)に比例してC側に流れる電流(大)が流れるので、信号の増幅や、スイッチ代わりに使うことが出来る。

その他の半導体素子

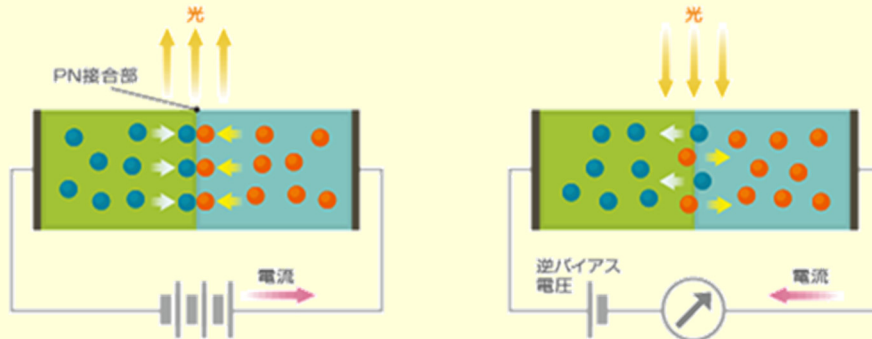
発光ダイオード

GaAs(ガリウム-ヒ素)やGaP(ガリウム-りん)のpn接合ダイオードに順方向電流を流すと、ある電流以上で接合部付近が発光する。この発光現象を利用したものがLED(発光ダイオード)である。



フォトダイオード

pn接合の半導体に光を当てると、p側に正、n側に負の電圧が発生する。この現象をpn接合の光電効果という。



光導電素子(CdSセル)

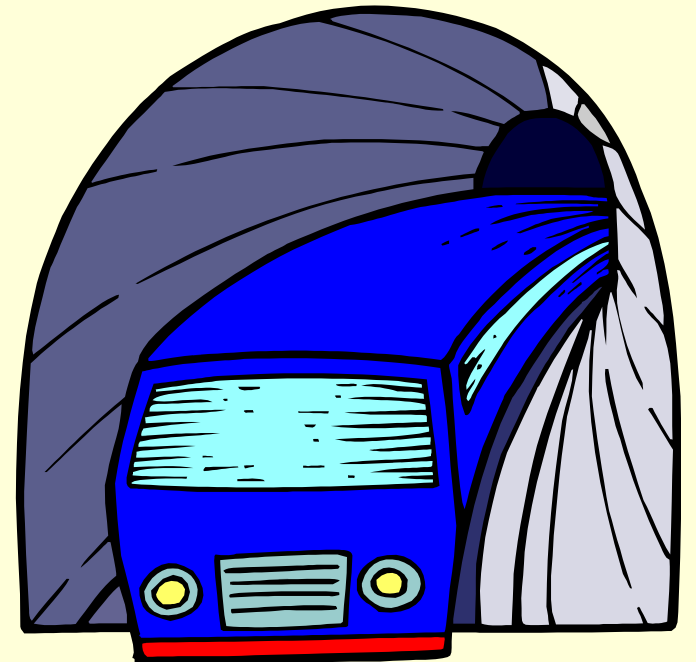
光が当たると抵抗が小さくなる物質で、電圧降下法などを用いて光計測を行う。光量測定器や街灯の自動点滅器などに利用されている。

サーミスタ(Thermistor)

温度変化によって抵抗が変わる半導体素子である。マンガン(Mn)や銅(Cu)の酸化物の混合体で作られ、負荷温度上昇により初めは抵抗も上昇するが、すぐに抵抗が下がってくる傾向を示す。



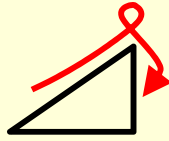
期末のまとめ



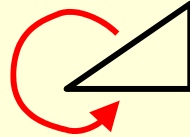
物理で使う数字・文字のルール

三角関数

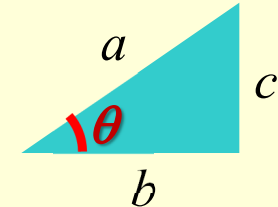
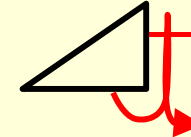
$$\sin \theta = \frac{c}{a}$$



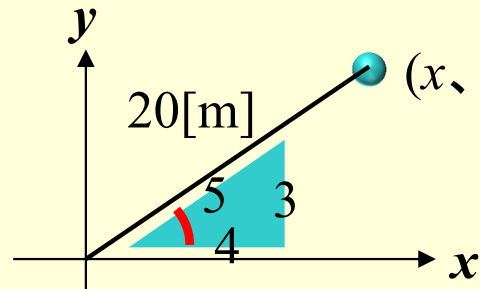
$$\cos \theta = \frac{b}{a}$$



$$\tan \theta = \frac{c}{b}$$



三角関数を使うと、



$x =$

$y =$

向きのある値と向きのない値

スカラー量: 大きさだけを考えて量

例 距離、速さ、質量、時間、温度、...

ベクトル量: 大きさと向きをもった量

例 変位、速度、重さ、力、加速度、...

5km/h で進むとする

速さが一定



速度が一定

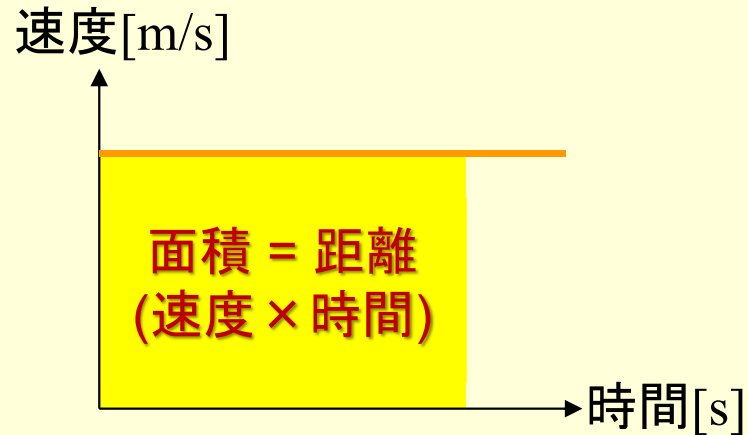


どんな方向に進んでも
5km/h なら OK

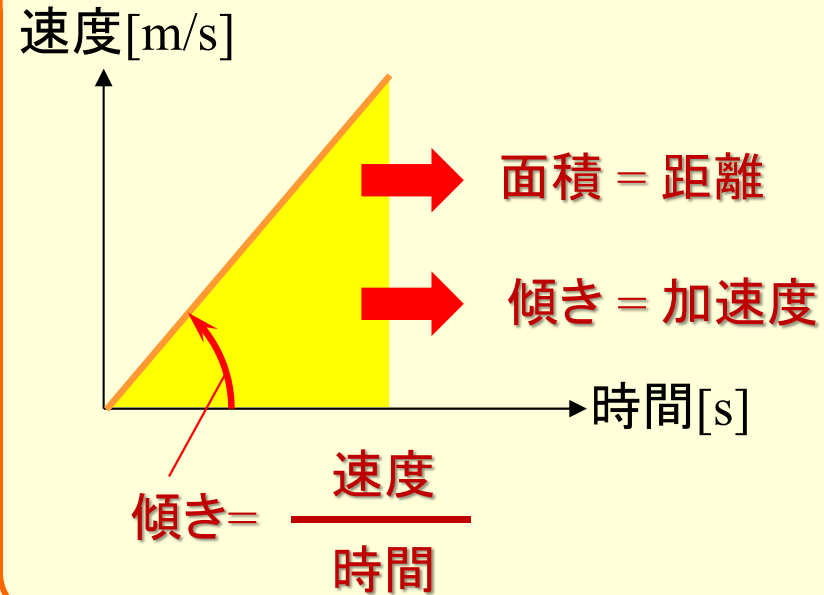
方向が一定 (まっすぐ)
かつ 5km/h である
必要がある

運動の表し方

速度の変わらない運動

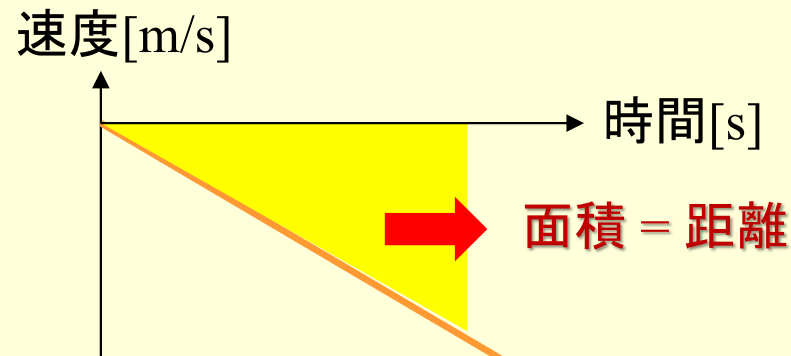


一定の割合で速度の変わる運動



自由落下運動

鉛直下向きに
重力加速度
 $g = -9.8[\text{m/s}^2]$
で落下する。

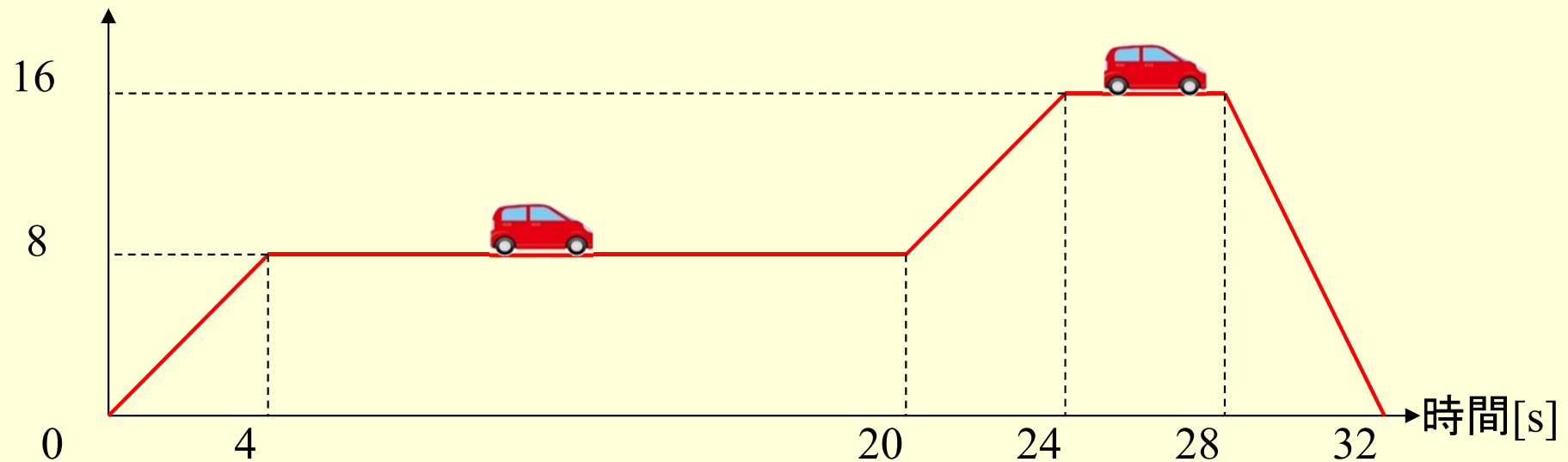


重力加速度は
 $-10[\text{m/s}^2]$ で計算
してもOK

運動の表し方

図のように速度を変化させて走る車の各区間ごとと全体の移動距離を求めなさい。

速度[m/s]



0～4秒

20～24秒

28～32秒

4～20秒

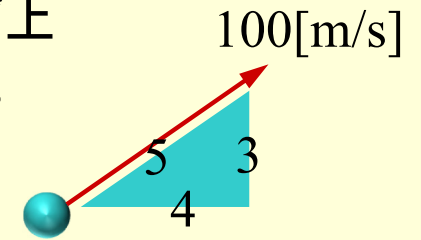
24～28秒

全体

全体の平均の速さはどれ位になるか求めなさい。

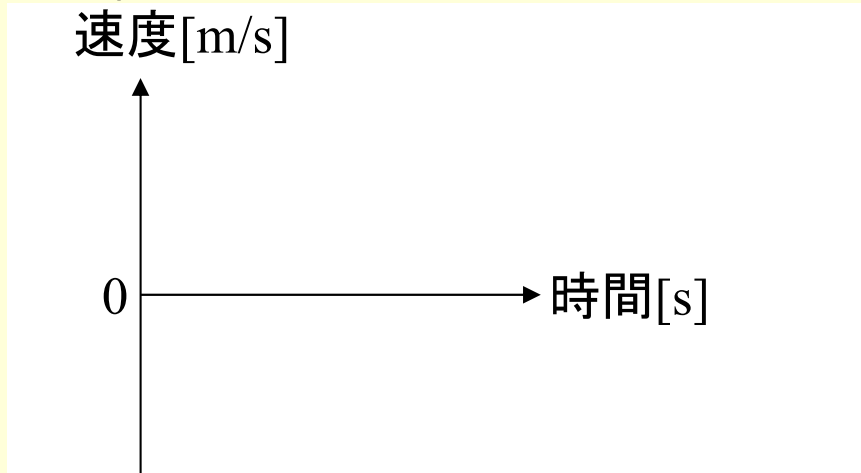
運動の表し方

ボールを初速度 $100[\text{m/s}]$ で斜め上に投げ上げたときを考える。投げ上げる角度を図の三角形のようにしたとき、以下の問いに答えなさい。



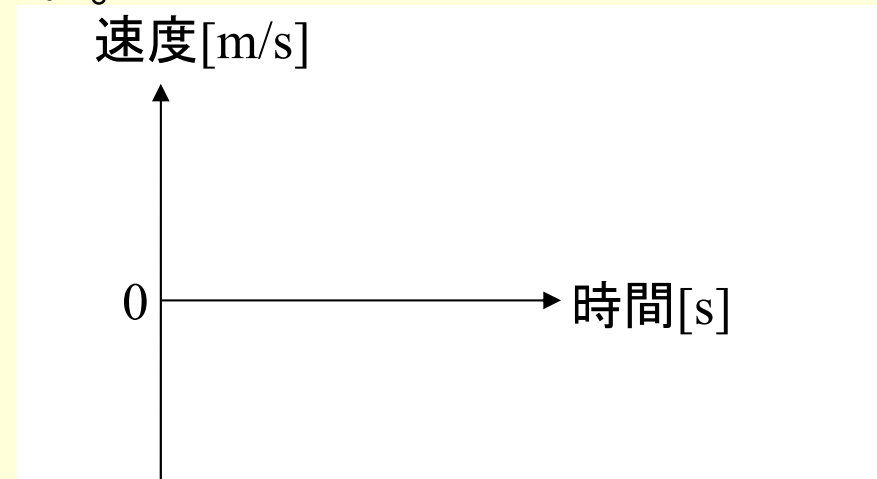
- 1) 縦(鉛直)方向と横(水平)方向の速度 $[\text{m/s}]$ を求めなさい。

- 2) 一番高く上がるまでの時間 $[\text{s}]$ を求めなさい。



- 3) 一番高く上がったときの高さ $[\text{m}]$ を求めなさい。

- 4) 地面に落ちるまでの時間 $[\text{s}]$ を求めなさい。



- 5) 地面に落ちるまでにボールが飛んだ距離 $[\text{m}]$ を求めなさい。



運動の法則と力

ニュートンの運動の法則

1) 慣性の法則

力を受けない
力がつり合っている



〔静止している物体は、静止したまま
運動している物体は、等速直線運動〕

2) 運動の法則

$$\text{力[N]} = \text{質量[kg]} \times \text{加速度[m/s}^2\text{]}$$

3) 作用・反作用の法則

物体Aから物体Bに力を与えると、物体Aは物体Bから反対の力を受ける。

身の回りの力

重力～地球が物体を引く力

$$\text{重力[N]} = \text{質量[kg]} \times \text{重力加速度[m/s}^2\text{]}$$

バネの力～バネを引くと縮もうと、押すと伸びようとする。

$$\text{弾性力[N]} = \text{バネ定数[N/m]} \times \text{バネの伸び[m]}$$

摩擦力～なめらかではない面で物体が動こうとする方向と逆にはたらく力

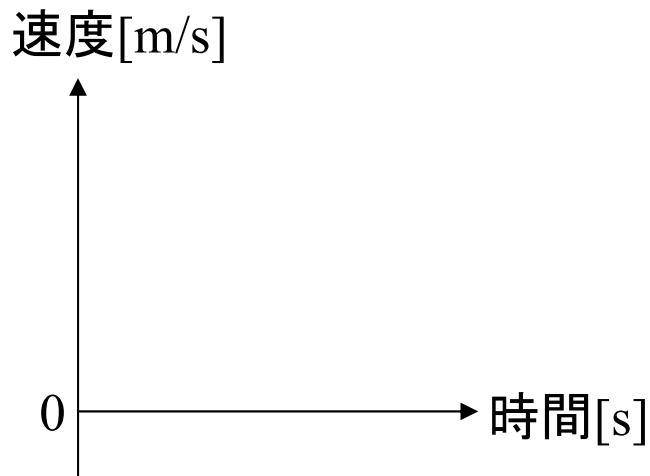
$$\text{摩擦力[N]} = \text{摩擦係数[-]} \times \text{垂直抗力[N]}$$

運動の法則と力

質量が150,000 [kg]、エンジンの出力が600,000[N]の飛行機が、静止した状態から滑走路を加速して30[s]後に離陸した。このとき以下の問いに答えなさい。

1) 加速度の大きさを求めなさい。

2) 離陸する直前の飛行機の手速を求めなさい。

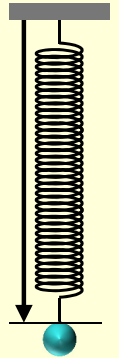


3) 滑走路は最低何[m]必要か。

天井からつるしたバネに1[kg]や2[kg]のおもりをぶら下げてバネの長さを測ったところ、それぞれ0.3[m]、0.4[m]になった。このとき以下の問いに答えなさい。

1) バネの自然長(おもりがないときの長さ)を求めなさい。

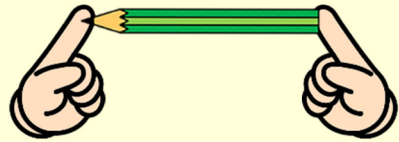
2) バネ定数を求めなさい。



圧力と物体を回転させる力

面積あたりの押す力

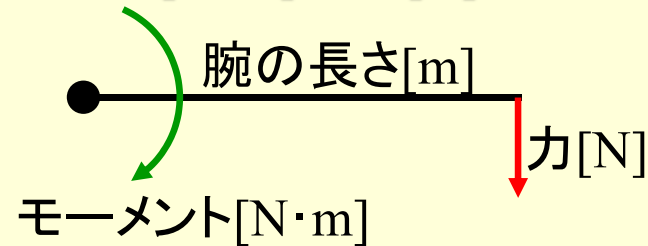
$$\text{圧力[Pa]} = \text{力[N]} \div \text{面積[m}^2\text{]}$$



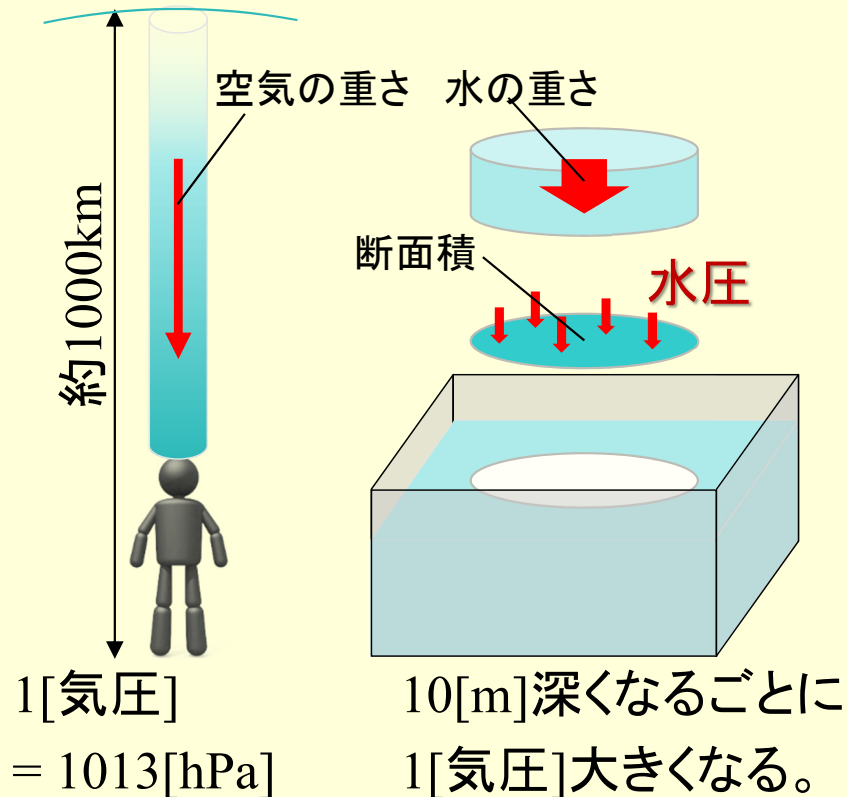
圧力が大きい
ほど痛い！

回転させようとする能力

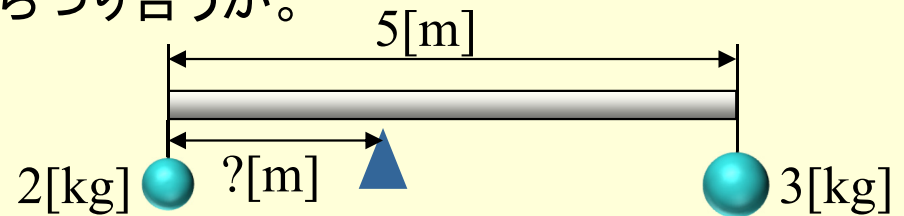
$$\text{モーメント[N}\cdot\text{m]} = \text{力[N]} \times \text{腕の長さ[m]}$$



大気圧と水圧



図のように質量の無視できる5[m]の棒の両端に2[kg]と3[kg]のおもりをぶら下げた。支点の位置を左から何[m]のところにしたらつり合うか。



力の効果の表し方

力でどれ位の距離を動かしたか⇒**仕事**

仕事[J]

$$= \text{力[N]} \times \text{移動した距離[m]}$$

力をどれ位の時間与えたか⇒**力積**

力積[N・s]

$$= \text{力[N]} \times \text{加えた時間[s]}$$

仕事をする⇒**エネルギー**が変わる

運動エネルギー[J]

$$= \frac{1}{2} \times \text{質量[kg]} \times \text{速度[m/s]}^2$$

位置エネルギー[J]

$$= \text{質量[kg]} \times \text{重力加速度[m/s}^2] \times \text{高さ[m]}$$

弾性エネルギー[J]

$$= \frac{1}{2} \times \text{ばね定数[N/m]} \times \text{伸び[m]}^2$$

力積を与える⇒**運動量**が変わる

運動量

$$= \text{質量[kg]} \times \text{速度[m/s]}$$

運動量保存の法則

全部の運動量の合計 = 一定

力学的エネルギー保存の法則

全部のエネルギーの合計 = 一定

単位時間あたりの仕事

仕事率[W(ワット)]

$$= \text{仕事[J]} \div \text{時間[s]}$$

力の効果の表し方

質量 $2[\text{kg}]$ のボールをロープで $20[\text{m}]$ 持ち上げ、一番上まで来たところでロープを切った。このとき以下の問いに答えなさい。

1) 手がした仕事を求めなさい。

2) ボールが地面に落ちた瞬間の速度を求めなさい。

3) ボールが落ちた地点にバネ定数 $25[\text{N/m}]$ のバネがあったとすると、バネは何 $[\text{m}]$ 縮んだか。

平面上を質量 $1.0[\text{kg}]$ の台車Aが右方向に $0.50[\text{m/s}]$ で、吸盤をつけた質量 $2.0[\text{kg}]$ の台車Bが左方向に $0.70[\text{m/s}]$ で進んでいる。2つの台車は衝突し、Bの吸盤によって2の台車は一体となってある速度で動き始めた。運動量保存の法則を用い、この速度を求めなさい。

気体分子の運動と熱エネルギー

熱量保存の法則

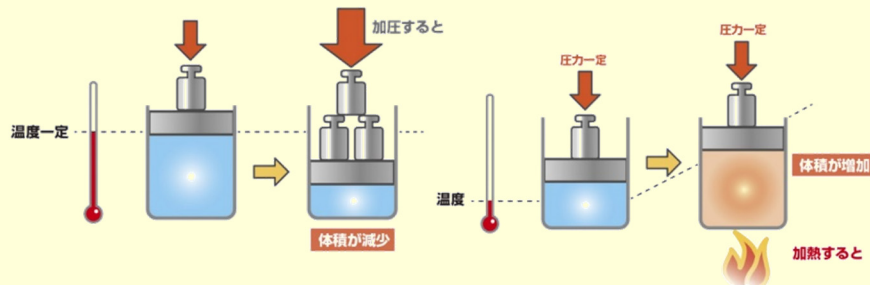
$$\begin{array}{l} \text{AとBを混} \\ \text{ぜた温度} \end{array} = \frac{\begin{array}{l} \text{Aの質量} \times \text{比熱} \times \text{温度} \\ + \text{Bの質量} \times \text{比熱} \times \text{温度} \end{array}}{\begin{array}{l} \text{Aの質量} \times \text{比熱} \\ + \text{Bの質量} \times \text{比熱} \end{array}}$$

絶対温度

$$\text{絶対温度[K]} = \text{摂氏温度[}^{\circ}\text{C]} + 273$$

ボイル・シャルルの法則

$$\frac{\text{圧力[Pa]} \times \text{体積[m}^3\text{]}}{\text{絶対温度[K]}} = \text{一定}$$



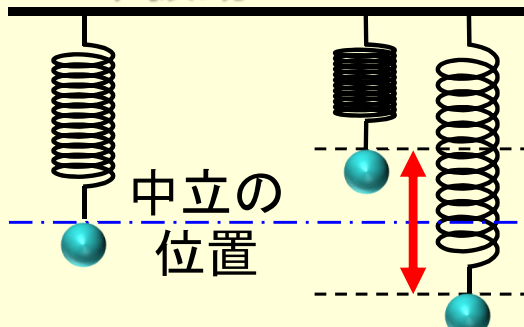
質量800[g]の鉄球(比熱0.45[J/g・K])を240[°C]に熱して、温度20[°C]質量700[g]の水(比熱4.2[J/g・K])に入れた。温度はどれ位になるか。

ピストンのついた体積を変えることのできる容器に理想気体を入れた。気体の体積は $2.0 \times 10^{-2}[\text{m}^3]$ 、圧力は $2.0 \times 10^5 [\text{Pa}]$ 、温度は27[°C]である。圧力を変えずに温度を87[°C]にしたとき、気体の体積を求めなさい。

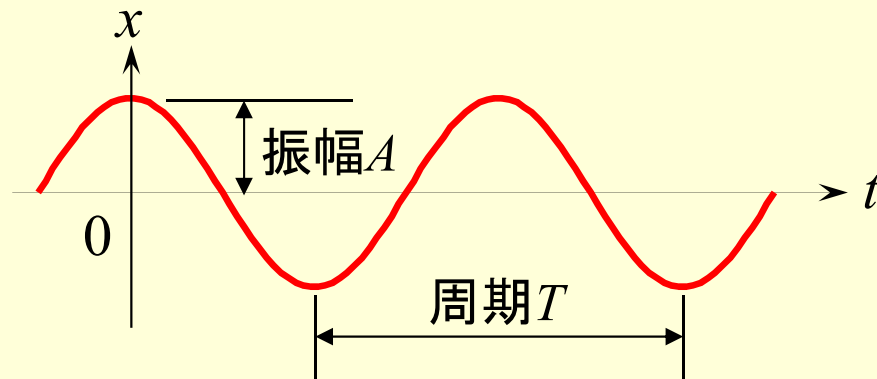
波の性質

単振動

バネを中立の位置から伸ばして手を離すと、一定の周期、一定の振幅で振動する。これを**単振動**という。



単振動の時間 t [s]と振れ幅 x [m]の関係は図のような正弦波になる。



振幅 A [m] 最大の振れ幅

周期 T [s] 同じ振れ幅になる時間

周波数 f [Hz] 1秒間に振動する回数

$$\text{周波数 } f [\text{Hz}] = \frac{1}{\text{周期 } T [\text{s}]}$$

単振動するおもりを水面に着けると、波が広がっていく。

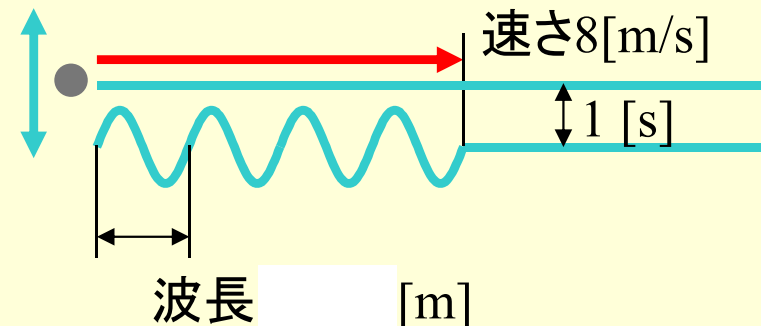
波長 λ [m] 波1つの長さ

波の伝わる速さ v [m/s]と、周波数 f [Hz]、波長 λ [m]の関係は、

$$\text{速さ } v [\text{m/s}] = \text{周波数 } f [\text{Hz}] \times \text{波長 } \lambda [\text{m}]$$

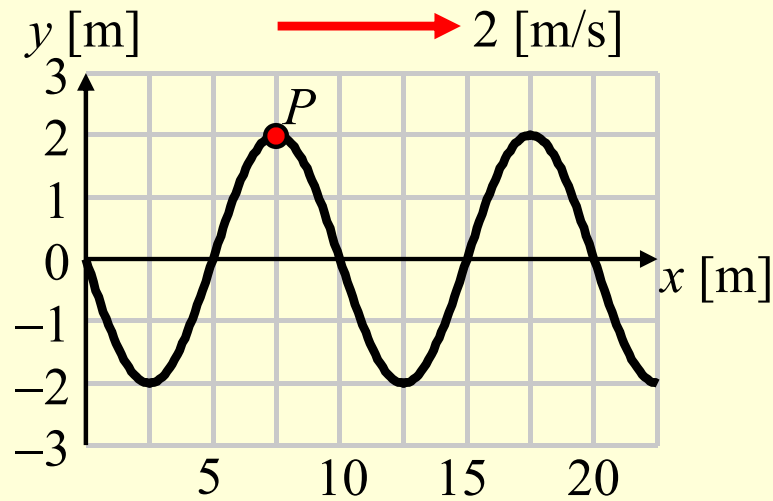
となる。

周波数2[Hz]



波を表す2つのグラフ

水面に広がる波の振動する方向を y 軸、進む方向を x 軸と表すと、下の図のような波が観測された。



(1)波の振幅、波長、周波数、周期をそれぞれ求めなさい。

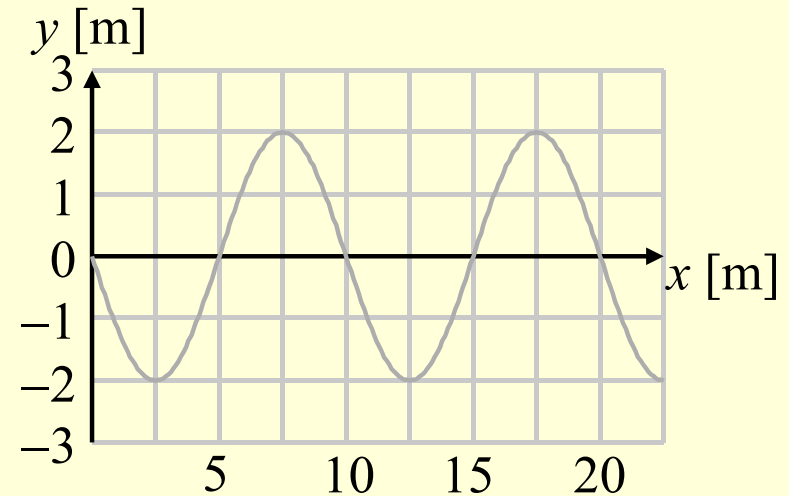
振幅

波長

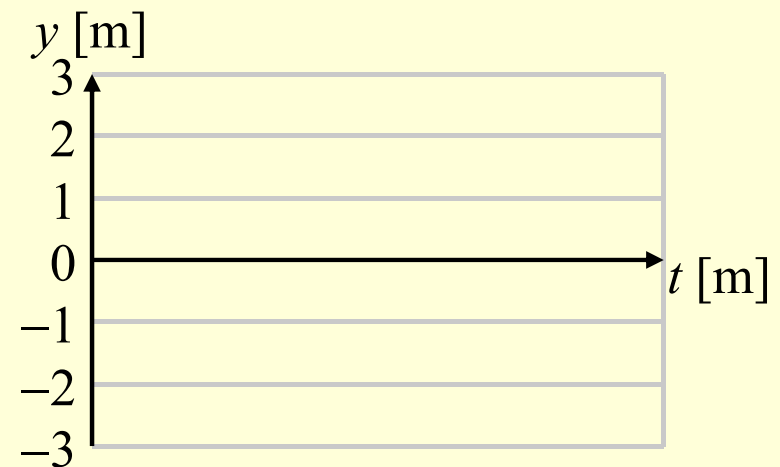
周波数

周期

(2)この波の2.5[s]後のグラフを書け。

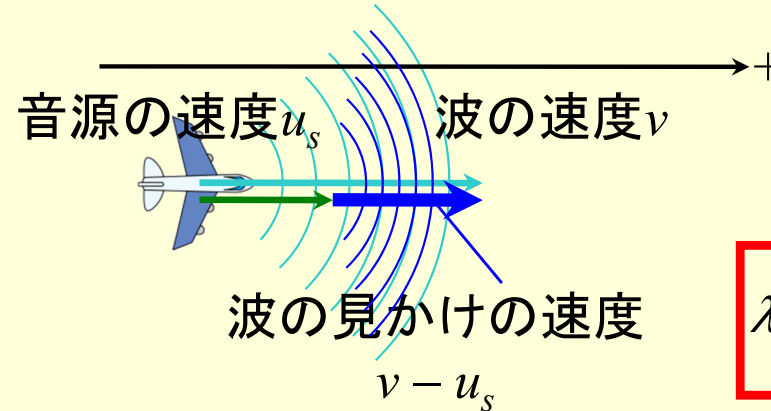
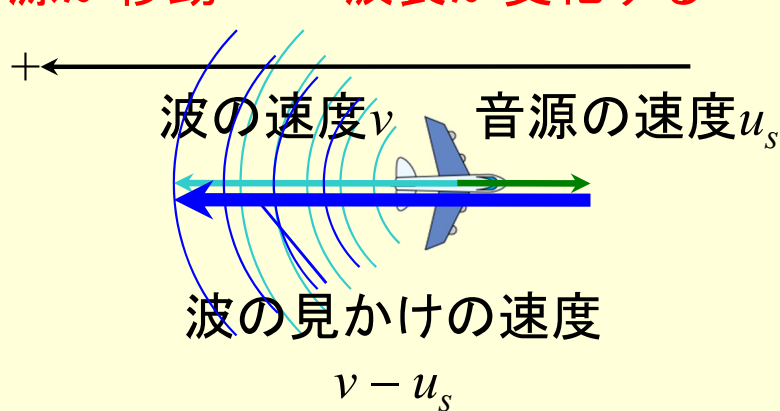


(3)P点の振動について、時間と振幅の関係を表すグラフ(y - t グラフ)を書け。



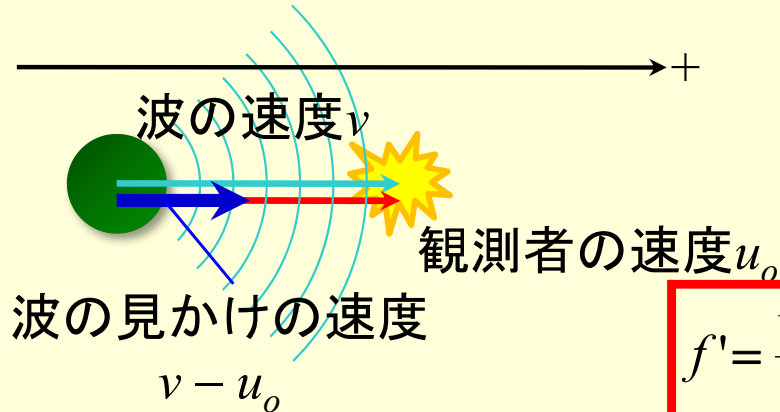
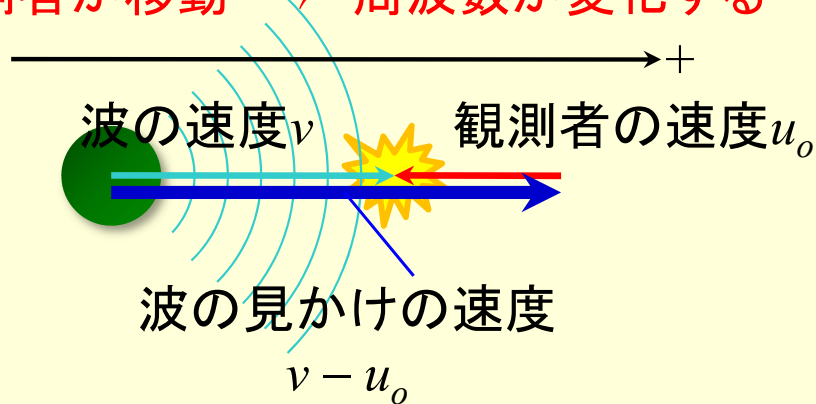
ドップラー効果

音源が移動 $\Rightarrow$ 波長が変化する



$$\lambda' = \frac{v - u_s}{f}$$

観測者が移動 $\Rightarrow$ 周波数が変化する



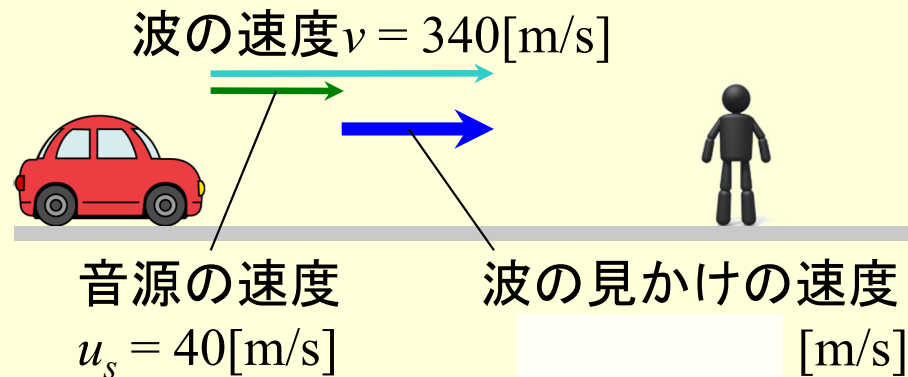
$$f' = \frac{v - u_o}{\lambda}$$

$\lambda' = \frac{v - u_s}{f}$ を $f' = \frac{v - u_o}{\lambda}$ に代入すると $f' = \frac{v - u_o}{\lambda'} = \frac{v - u_o}{v - u_s} \times f$

ドップラー効果

40[m/s]で走る車が600[Hz]の音を鳴らしながら走っている。ただし、音の速度は340[m/s]とする。

(1)車の前方に立っている人がこの音を聞いたとき、人が聞く音の波長と周波数を求めなさい。



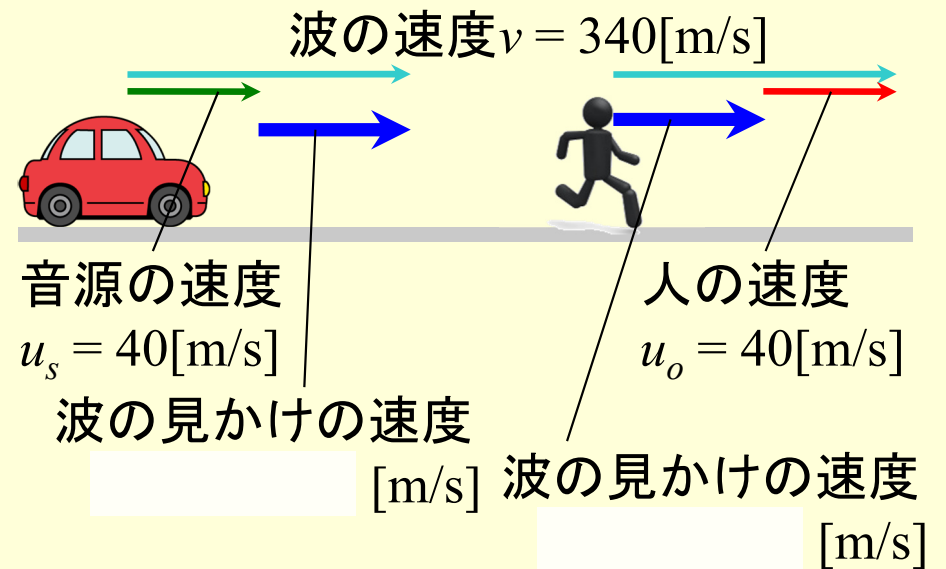
見かけの速度と周波数から波長は、

$$\lambda = \frac{\text{波長}}{\text{波の周期}} = \frac{\text{波の速度}}{\text{周波数}} = \frac{\text{波の見かけの速度}}{600} = \text{ } [m]$$

聞く人は止まっているので、音の速度は変わらないので、周波数は、

$$f = \frac{\text{周波数}}{\text{波の周期}} = \frac{\text{周波数}}{\frac{1}{f}} = \text{ } [Hz]$$

(2)音を聞いていた人が、車と同じ方向に40[m/s]で動いたとき、この人が聞く音の波長と周波数を求めなさい。



見かけの速度と周波数から波長は、

$$\lambda = \frac{\text{波長}}{\text{波の周期}} = \frac{\text{波の速度}}{\text{周波数}} = \frac{\text{波の見かけの速度}}{600} = \text{ } [m]$$

聞く人も動くので、見かけの速度と音源から聞こえる波長から、周波数は、

$$f = \frac{\text{周波数}}{\text{波の周期}} = \frac{\text{周波数}}{\frac{1}{f}} = \text{ } [Hz]$$

光の性質

光応用センシング

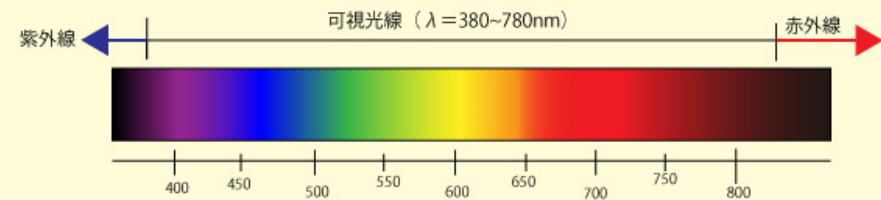
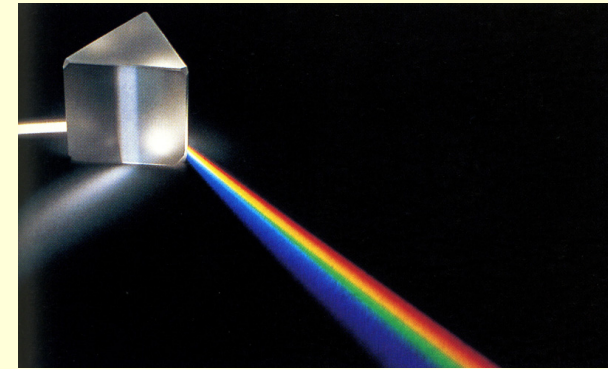
非接触・非破壊・耐電磁ノイズの特徴から、さまざまな分野で利用されている。

光と電磁波

光とは、**横波**である**電磁波**のうち、波長が760[nm]から380[nm]の可視光線と、その外側の赤外線および紫外線を指します。電磁波はエネルギーの波なので、真空中でも伝えることができ、お陰で地球は太陽からの光で暖められています。光の速度は約30万[km/s]（1秒で地球を7周半）ととても早いです。

光の分散

光をプリズムに通すことでさまざまな波長の光に分けることができます。



紫外線

ビタミンDの生成に不可欠で、殺菌作用もあります。ただし、大量に浴びると老化促進や皮膚病の原因にもなりやすいです。

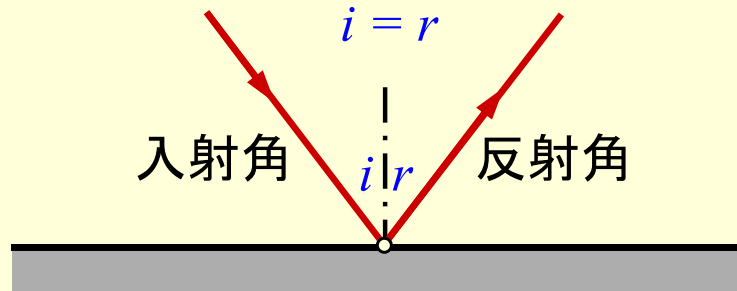
赤外線

地表まで届いて暖める作用があります。

光の性質

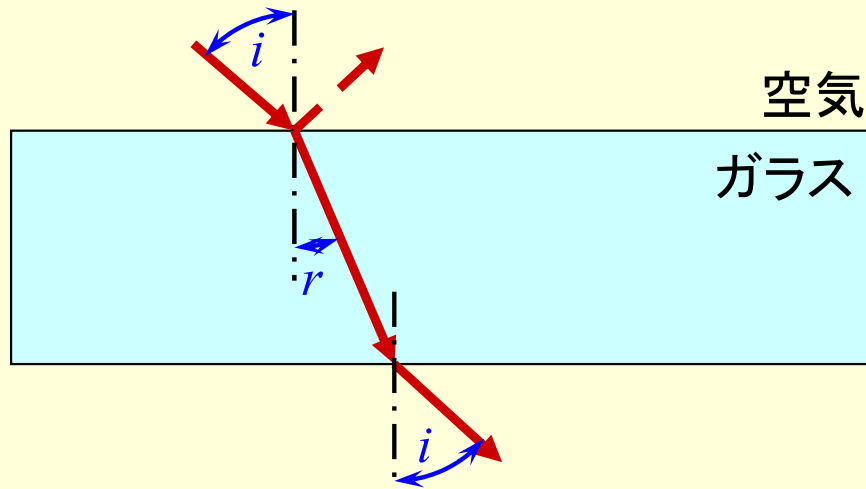
1) 反射

正反射の場合、**入射角=反射角**



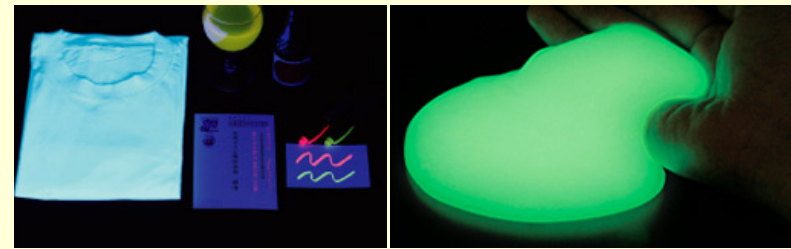
2) 屈折

媒質によって進む速度が違うことにより光が折れ曲がる性質



3) 吸収と発光

物質はある固有の波長の光をエネルギーとして吸収する性質がある。通常は熱として放出するが、一部の物質は光として放出する。短時間で明るいものを**蛍光**、長時間で弱いものを**りん光**という。



4) 散乱

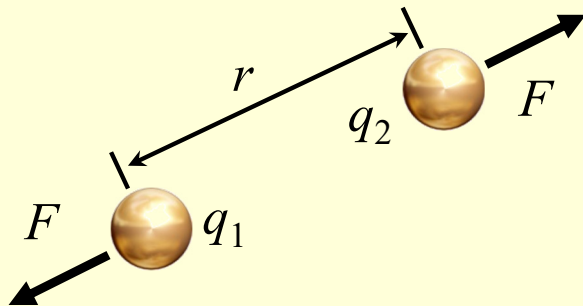
光が小さな物質に衝突したり相互作用を起こすことで、光の方向や性質が変化する事。

レイリー散乱は、水蒸気のように小さな粒のときに起こり、夕焼けや朝焼け、青空の原因になる。ミー散乱は、氷の結晶や乳タンパクのように大きな粒のときに起こり、雲や牛乳の色の原因になる。

クーロンの法則と電場（電界）

クーロンの法則とは、2つの電荷にはたらく力を $F[\text{N}]$ 、2つの電荷の電気量を $q_1[\text{C}]$ 、 $q_2[\text{C}]$ 、距離を $r[\text{m}]$ とすると、

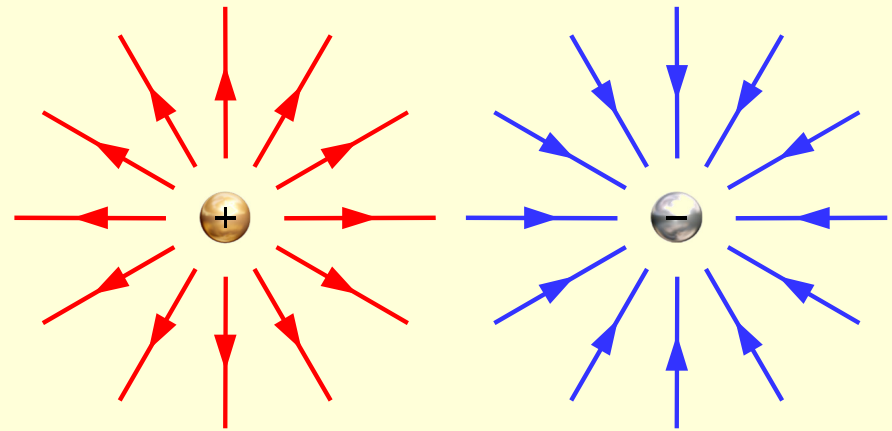
$$\begin{aligned} & \text{クーロン力 } F[\text{N}] \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\text{電気量 } q_1[\text{C}] \times \text{電気量 } q_2[\text{C}]}{(\text{距離 } r[\text{m}])^2} \end{aligned}$$



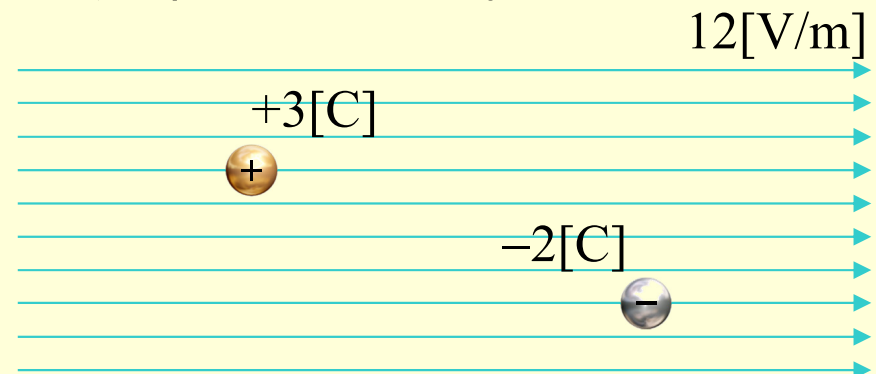
一方の電気量を $1[\text{C}]$ とすると、点電荷 $q[\text{C}]$ がまわりに作る**電場（電界）**をあらわすことができる。

$$\begin{aligned} & \text{電場（電界）の強さ } E[\text{V/m}] \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\text{電気量 } q[\text{C}]}{(\text{距離 } r[\text{m}])^2} \end{aligned}$$

電場（電界）の向きに沿って線を引いたものを**電気力線**という。

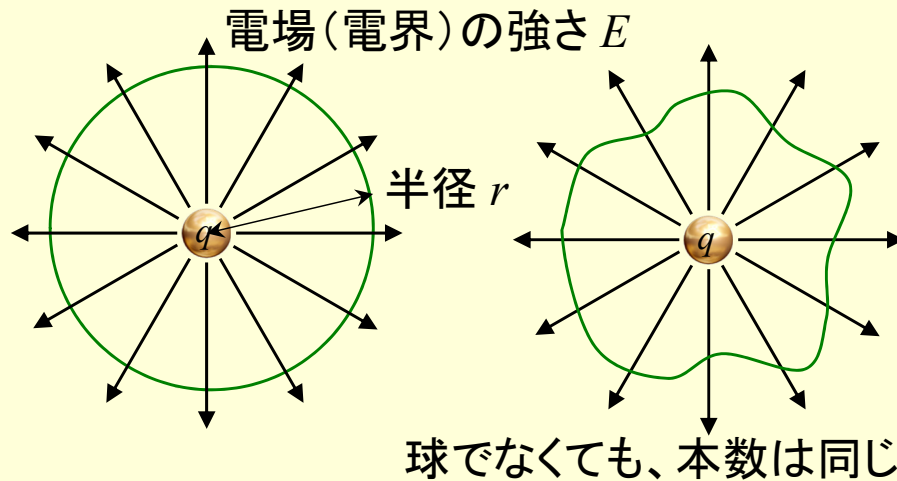


図のように $12[\text{V/m}]$ の静電場（電界）が分布している。 $+3[\text{C}]$ 、 $-2[\text{C}]$ の点電荷を置いたときにはたらく静電気力を求め、図に矢印で示しなさい。



ガウスの法則

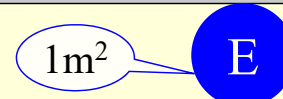
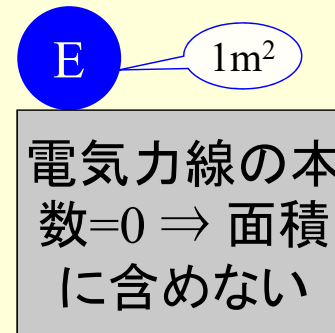
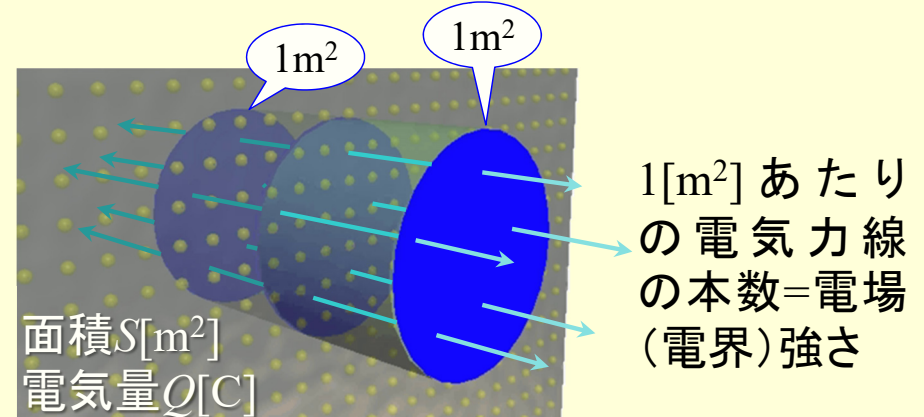
点電荷 $q[\text{C}]$ のまわりを貫く電気力線の本数 $N[\text{本}]$ は囲む形が変化しても変わらない。これを**ガウスの法則**という。



電場(電界)の強さ $E[\text{V/m}]$ 、その面積を $S[\text{m}^2]$ とすると、

$$\begin{aligned} & \text{電気力線の本数 } N[\text{本}] \\ &= \text{電場(電界)} E[\text{V/m}] \times \text{面積 } S[\text{m}^2] \\ &= \frac{\text{電気量 } q[\text{C}]}{\text{誘電率 } \epsilon_0} \end{aligned}$$

平板全体の電気量 $Q[\text{C}]$ 、面積を $S[\text{m}^2]$ とすると、 $1[\text{m}^2]$ あたりの電気量は、 $Q \div S$ になる。このときの電場(電界)の強さを $E[\text{V/m}]$ とすると、

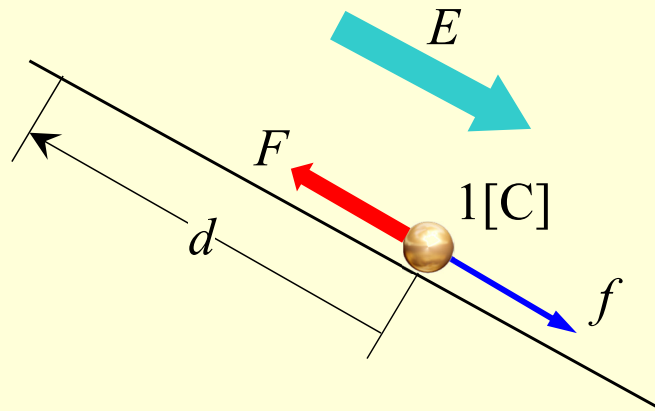


展開図の $2[\text{m}^2]$ だけが電気力線の貫く面積となるので、

より、

電位とコンデンサ

一様な電場(電界)で点電荷を動かす仕事は、摩擦のない斜面の上でボールを持ち上げる仕事と同じに考えられる。



電場(電界)によって落ちようとする力 $f = 1\text{[C]} \times E\text{[V/m]} = E$ に対して、持ち上げる力 F の大きさは f と同じなので、 E となる。この力で距離 $d\text{[m]}$ だけ移動する仕事が 1[C] に対する仕事つまり電位差 V となるので、

電位差 $V\text{[V]}$

= 電場(電界) $E\text{[V/m]} \times$ 距離 $d\text{[m]}$

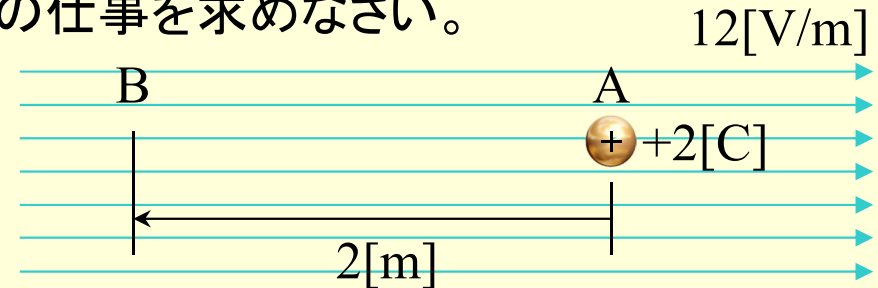
コンデンサに蓄えられる電気量 $Q\text{[C]}$ は、コンデンサの電気容量 $C\text{[F]}$ と電位差(電圧) $V\text{[V]}$ を用いて、

電気量 $Q\text{[C]}$

= 電気容量 $C\text{[F]} \times$ 電位差 $V\text{[V]}$

と表される。

12[V/m] の静電場(電界)が分布している。2点ABの距離が 2[m] であったとき、電位差(電圧)を求めなさい。また、AからBまで $+2\text{[C]}$ の点電荷を移動させたときの仕事を求めなさい。



電位差

仕事

電流・電圧・抵抗、直列回路

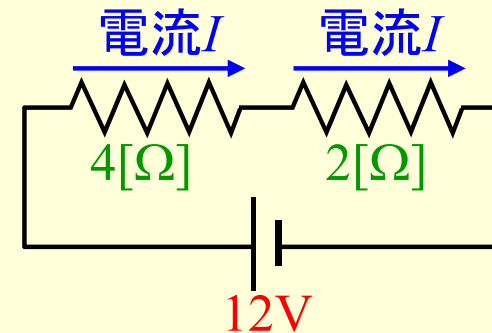
押す力(電圧)



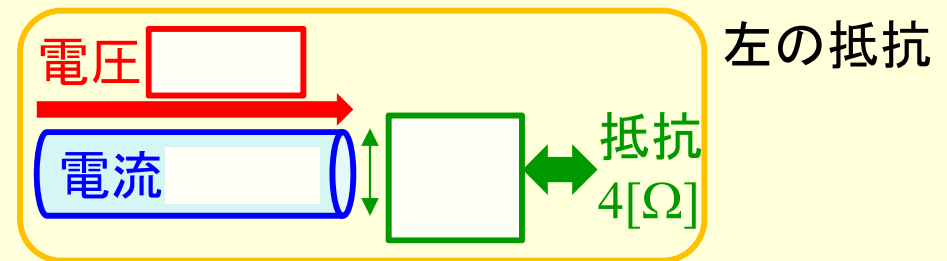
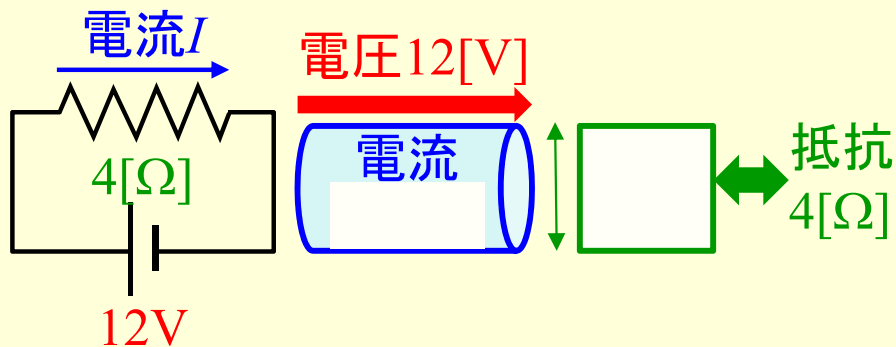
押す力(電圧) × 流れやすさ = 水の量(電流)

押す力(電圧) = 水の量(電流) × 流れにくさ(抵抗)

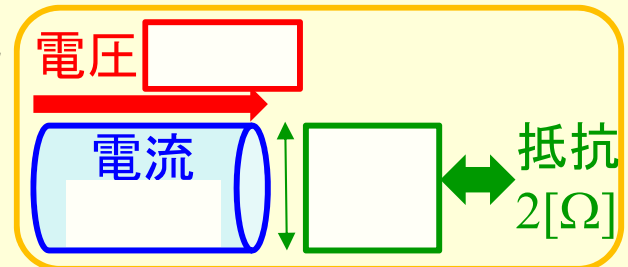
直列回路



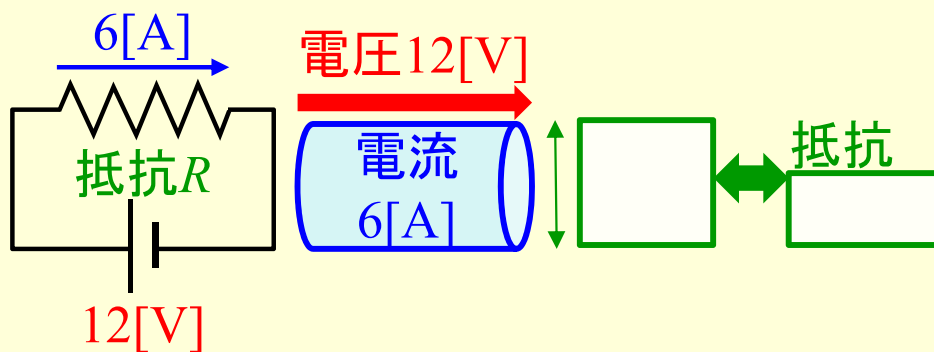
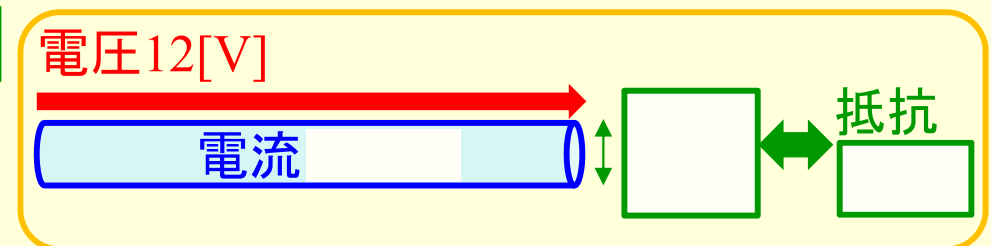
全体抵抗は
各抵抗の和



右の抵抗

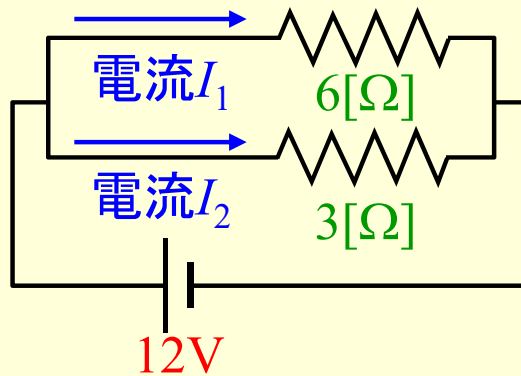


全体



並列回路、電力

並列回路



電圧

電流

上の抵抗

抵抗
6[Ω]

電圧

電流

下の抵抗

抵抗
3[Ω]

電圧12[V]

電流

全体

抵抗

電力

電気が1[s]あたりにどれ位の仕事ができるかを表す。

$$\text{電力 } P[\text{W}] = \text{電流 } I[\text{A}] \times \text{電圧 } V[\text{V}]$$

電力量

電力[W]に時間[s]をかけると、電気がどれ位の仕事をしたのかが表すことができる。

ジュール熱

電気が流れることにより、抵抗などで発生する熱のことをさす。

電流が作る磁場(磁界)

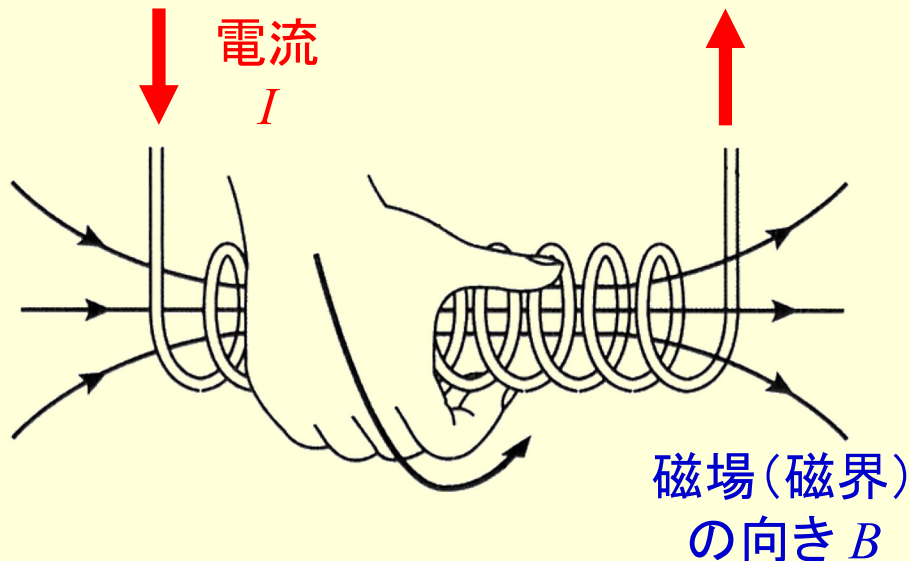
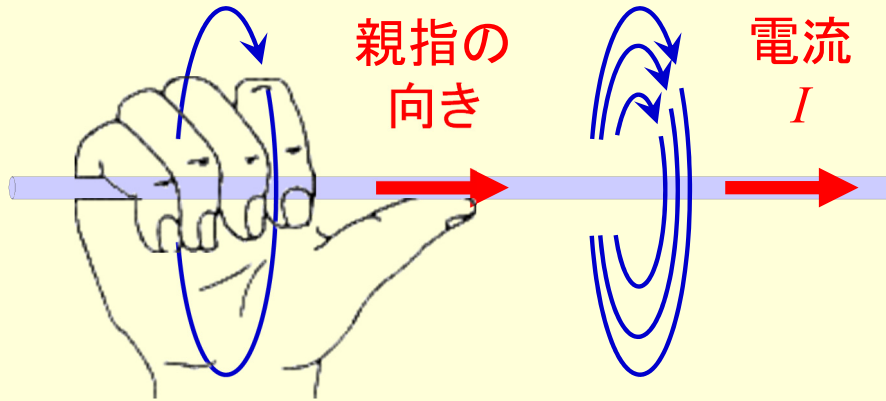
右ねじの法則

4本指の向き

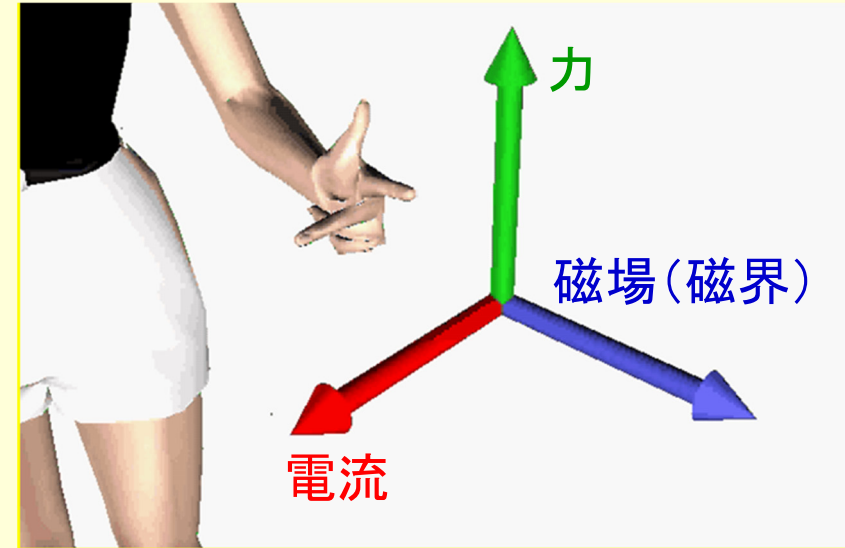
磁場(磁界)
の向き B

親指の
向き

電流
 I



フレミングの左手の法則



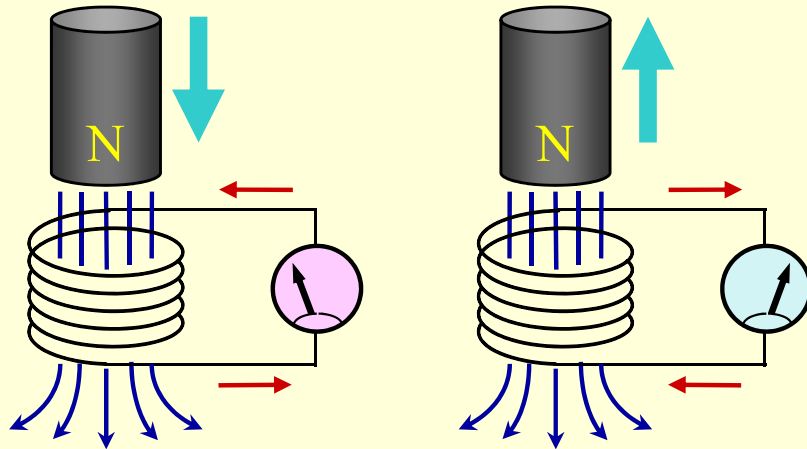
磁場(磁界)の中で電流を流すと、磁場の強さ(磁束密度) $B[\text{Wb/m}^2]$ 、電流の大きさ $I[\text{A}]$ 、導線の長さ $\ell[\text{m}]$ に比例した **ローレンツ力** $F[\text{N}]$ が、フレミングの左手の法則に従った方向にはたらく。

ローレンツ力 $F[\text{N}]$

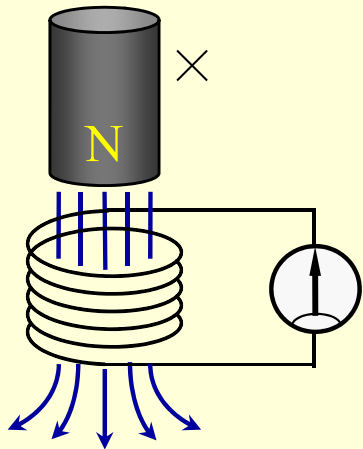
= 磁束密度 $B[\text{Wb/m}^2]$ $\times$ 電流 $I[\text{A}]$
 $\times$ 導線の長さ $\ell[\text{m}]$

電磁誘導・交流の性質(変圧器)

電磁誘導



磁石を近づけたり、遠ざけたりすると、それを妨げるように電流が流れる。



磁石の動きを止めた途端に電流は流れなくなる。

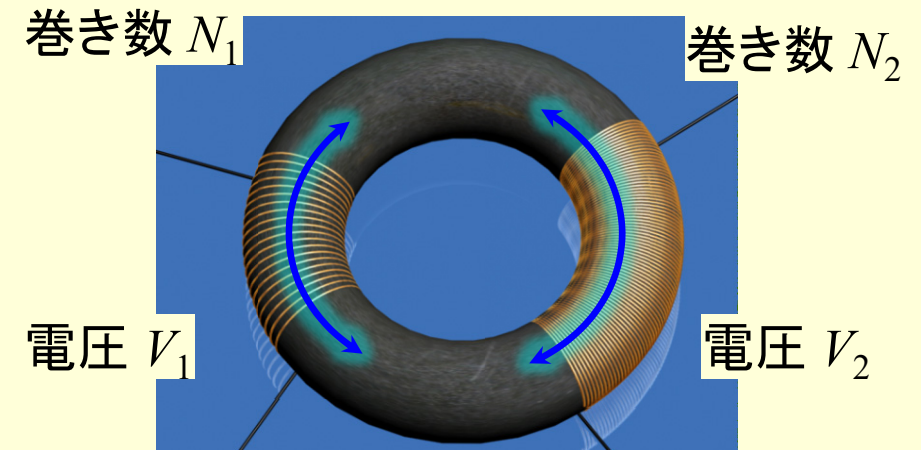
このように磁場(磁界)を妨げるように電流が流れることを**電磁誘導**という。

交流

モーターを一定の回転数で回すと、回路に時間とともに変化する電気が流れる。これを交流という。

変圧器

図のような変圧器に交流の電圧を与えると、左右の電圧は巻き数に比例した関係になる。



$$N_1 : N_2 = V_1 : V_2$$