「物理学概論II」電磁気

物質がある場合の電磁気学

導体・誘電体・磁性体

知能機械専攻

下 条 誠

はじめに

これまでは，真空中の電磁気学を学んできた

ただし物質がある場合，電場，磁場などに影響を及ぼす．

ここでは，物質がある場合の電磁気学を学ぶ

物質として次の3種類を取り上げる

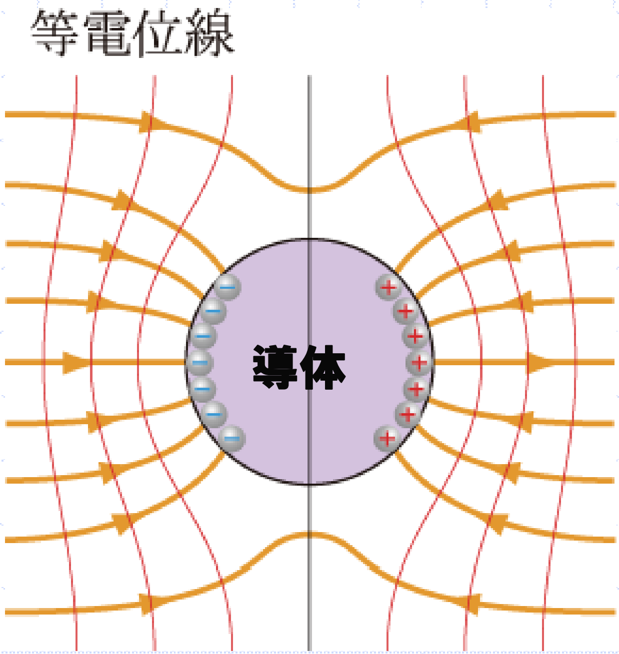
- 導体：電気を伝える物質
- 誘電体：絶縁体
- 磁性体：磁界で磁化する物質

導体があると？

導体中には，電気を伝える自由電荷がある

電場をかけると，その自由電荷が電場の方向に移動する．

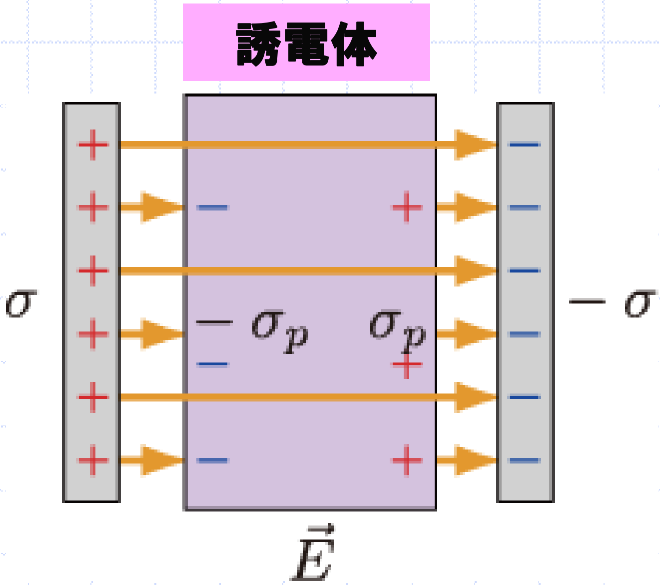
電場は，その移動した自由電荷によって影響を受ける



誘電体があると

誘電体は，電気を通さない絶縁体で，プラスチック，ガラス，セラミックなどがある

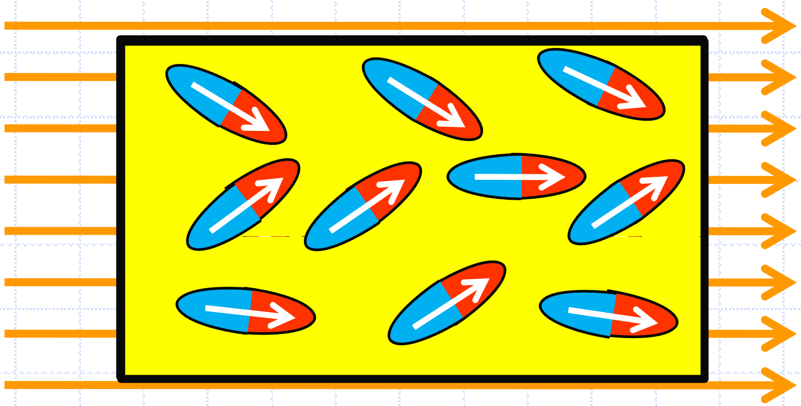
誘電体に電場をかけると誘電体表面の電気力線側に＋と－の電荷が現れ，電場に影響を与える

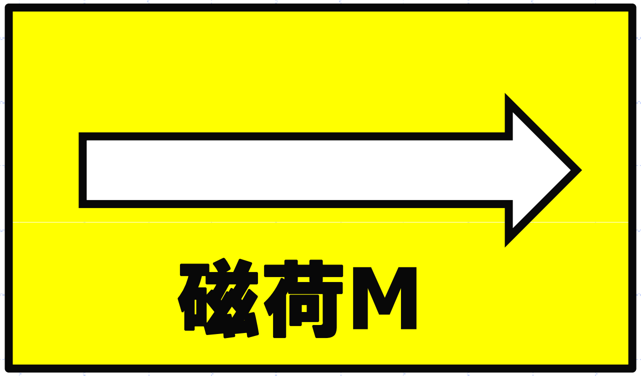


磁性体があると

全ての物質が磁性体であるが，通常，強い磁性体のことを示す．

磁場があると，磁性体は磁場の方向（通常）に磁化され，磁場に影響を与える





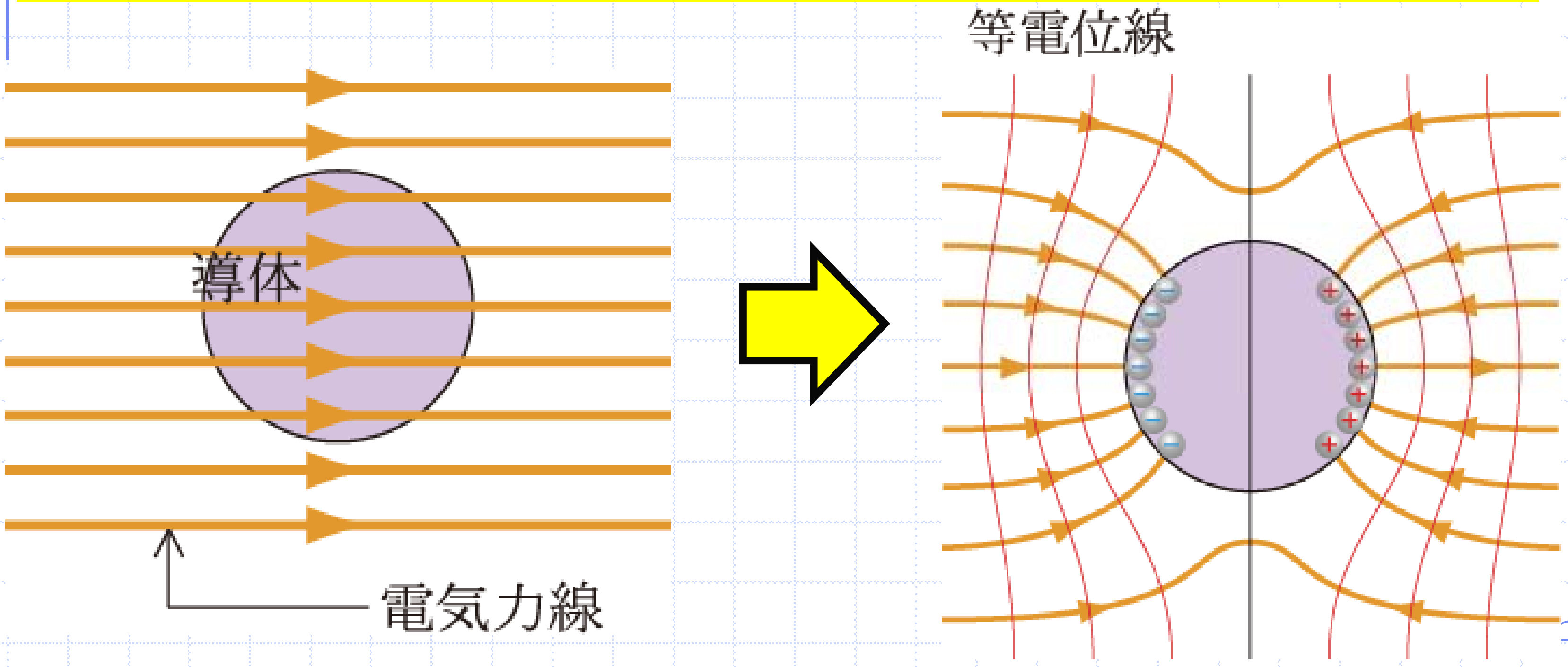
導体と電場

導体とは

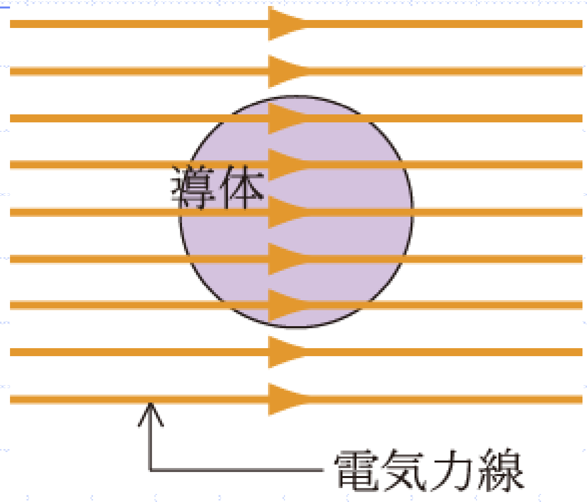
導体とは電気をよく伝える物体(物質)である

導体には，自由に動ける電荷である自由電荷が存在する

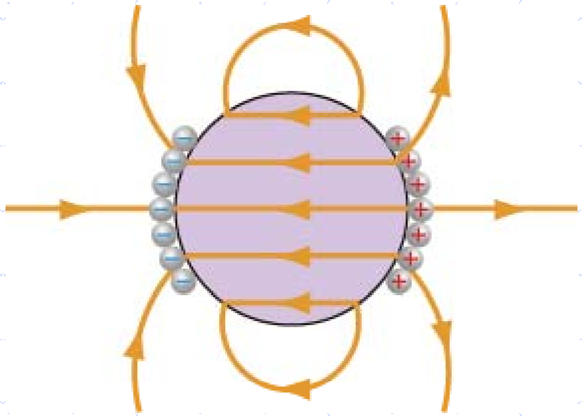
導体を静電場の中に置くと，導体中の自由電荷は電場の方向に移動する



導体と電場1



(1)外部から加えた電場



(2)誘起した電荷が作る電場

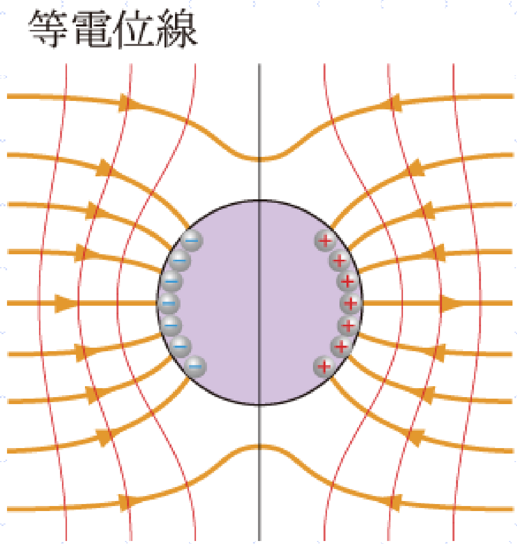
導体を静電場の中に置く

導体中の自由電荷が移動

- 正電荷→電場方向
- 負電荷→電場と逆方向

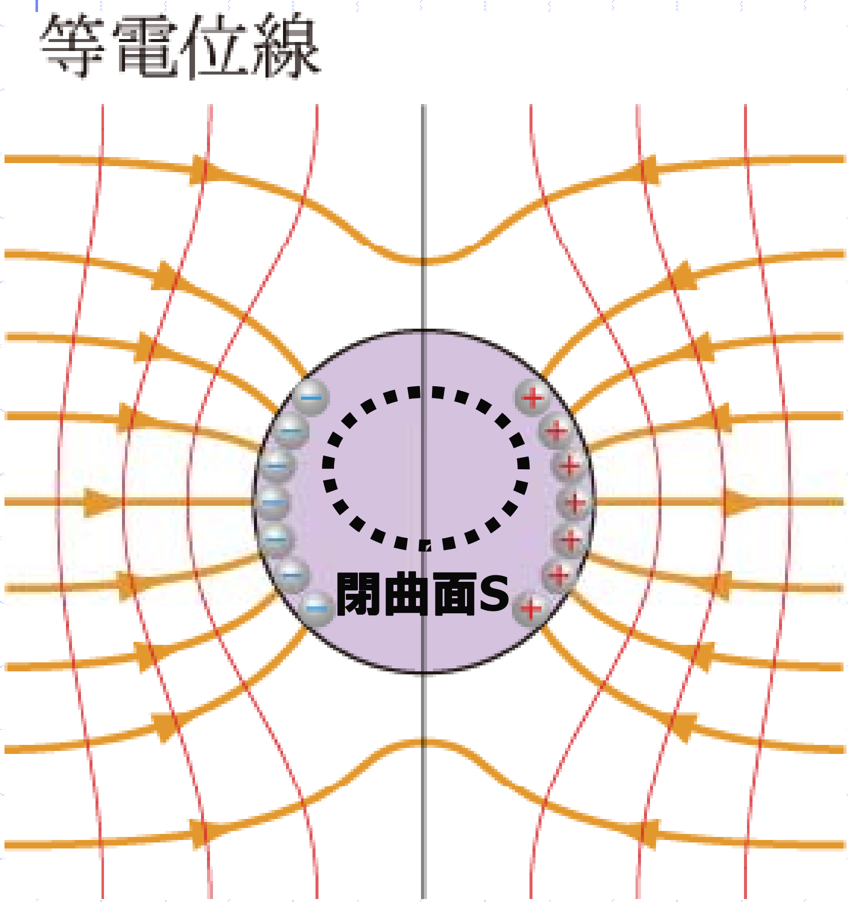
導体内部の電場が0になるまで続く

静電誘導



一様な電場中に導体を置いたときの電場

導体と電場2



平衡状態では導体中の電場は0である．

E=0

0でないと，自由電荷の移動が起こる

平衡状態では，ひとつの導体の全ての点は等電位となる

閉曲面Sの内部の全電気量

＝0

$$\iint_S E_n dA = \frac{Q_{in}}{\varepsilon_0} = 0$$

閉曲面内部の全電荷は0

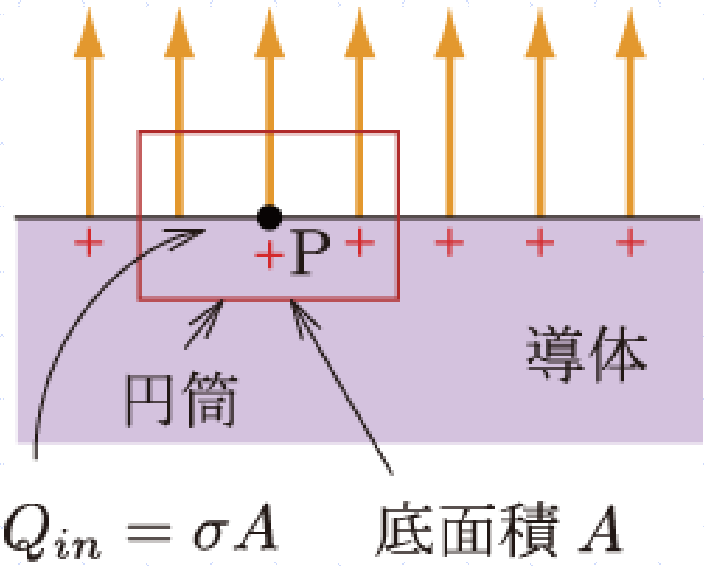
導体表面の電場

導体表面の電場Eを求める

導体表面は等電位

電場は等電位面に垂直

ガウスの法則を適用



円筒を考える

導体内部 E=0

円筒上面を貫く電気力線束 EA

円筒内部の電気量Qin=σA

$$EA = \frac{Q_{in}}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma A}{\varepsilon_0}$$

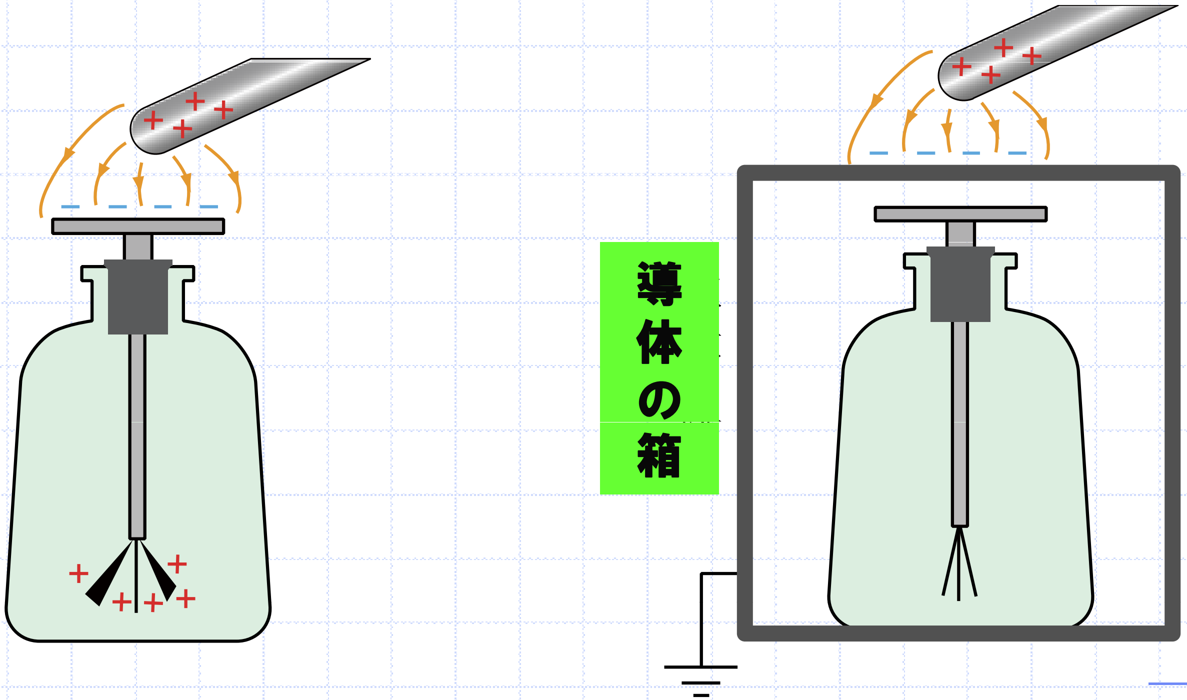
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$$

静電遮蔽 (シールド)

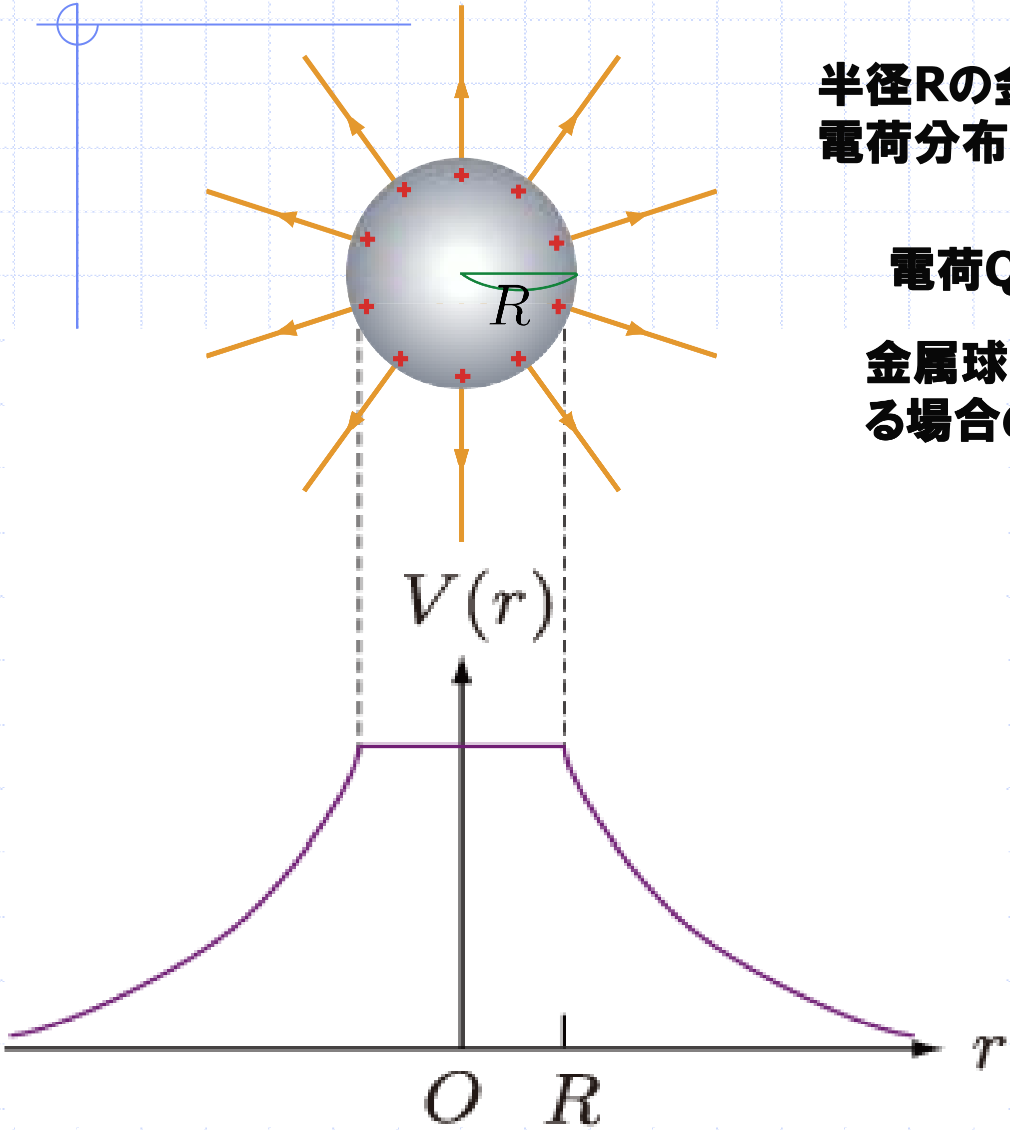
導体内部の空間は電場E=0

導体で囲まれた空間には，導体外部電場が影響を与えない

静電遮蔽(シールド)という



導体と電場例題



半径Rの金属球が電荷Qを帯びている．この電荷分布のつくる電場と電位を求めよ

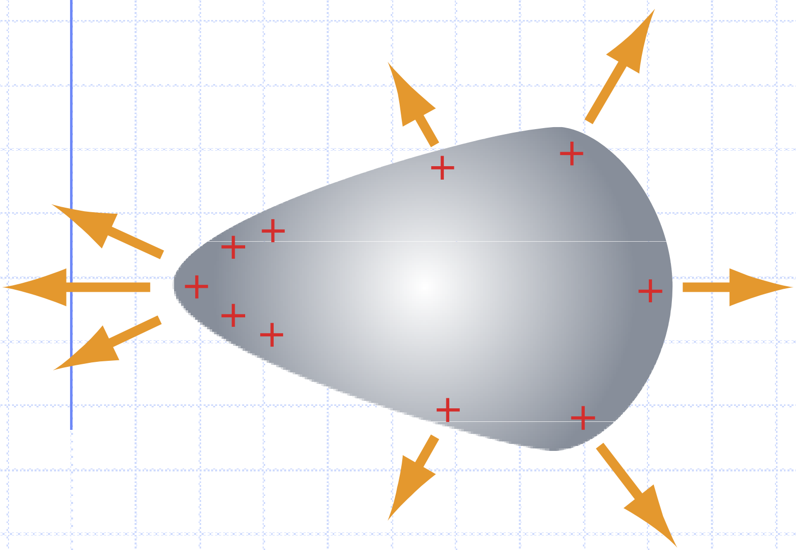
電荷Qは球表面に一様に分布する

金属球の外部の電場は，球中心に電荷Qがある場合の電場と同じになる

$$E(r)=\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \quad r\geq R$$

$$V(r)=\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r} \quad r\geq R$$

導体と電場3



半径rの導体
表面での電場

$$E(r) = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$$

半径rの導体
表面での電位

$$V(r) = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r}$$

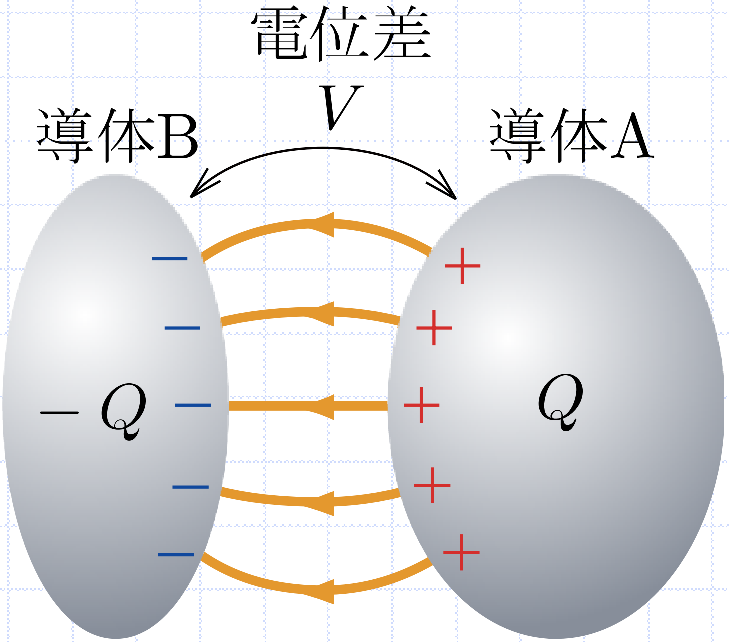
半径が小さいほど，表面での電場が強い

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$$

半径が小さいほど，表面での電荷密度が高い

尖った導体の部分から放電が起こる ⇨ 避雷針

キャパシター



導体Aに正電荷,導体Bに負電荷を与えると互いに引き合うため，電気量を蓄える.

キャパシター

$$Q = CV$$

C:電気容量

電気容量の単位：1V(ボルト)の電位差によって1C(クーロン)の電気量が蓄えられるときの電気容量を1F(ファラッド)という

$$F = C/V = C/(J/C) = C^2/(N \cdot m)$$

誘電体と電場

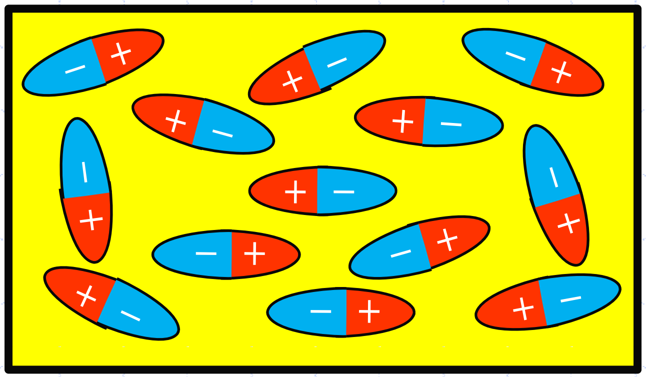
誘電体とは

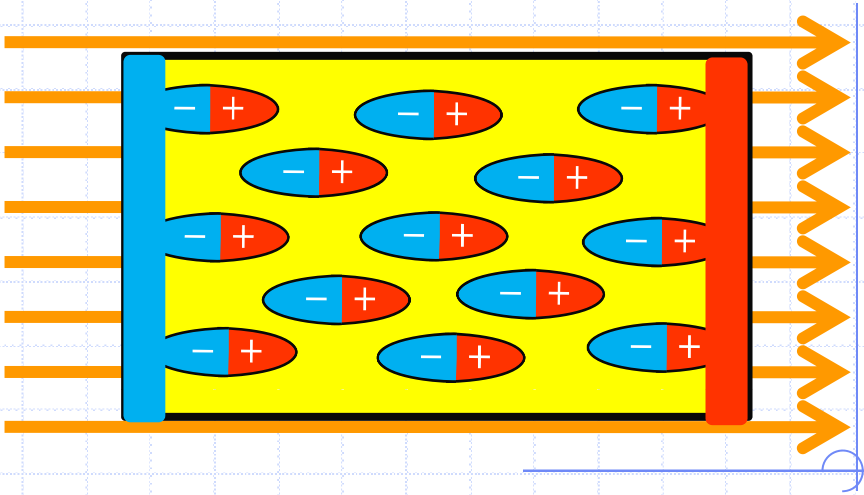
誘電体は，電気を通さない，絶縁体もしくは不導体である

誘電体には，自由に動ける電荷である自由電荷が存在しない

誘電体を静電場に置くと，内部の分子，原子，あるいは結晶構造では，電気力を受け分布が一方に偏る

誘電体表面の電気力線側に＋と－の電荷が現れる

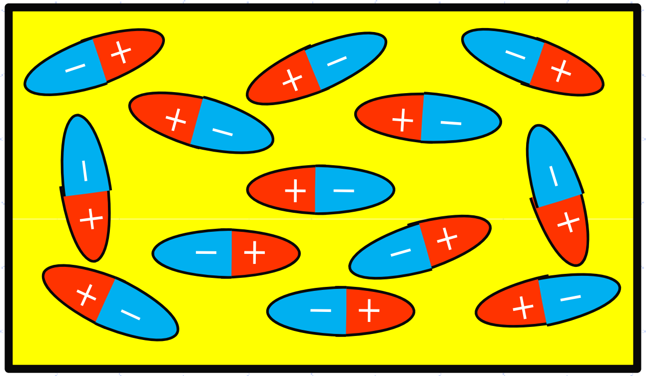


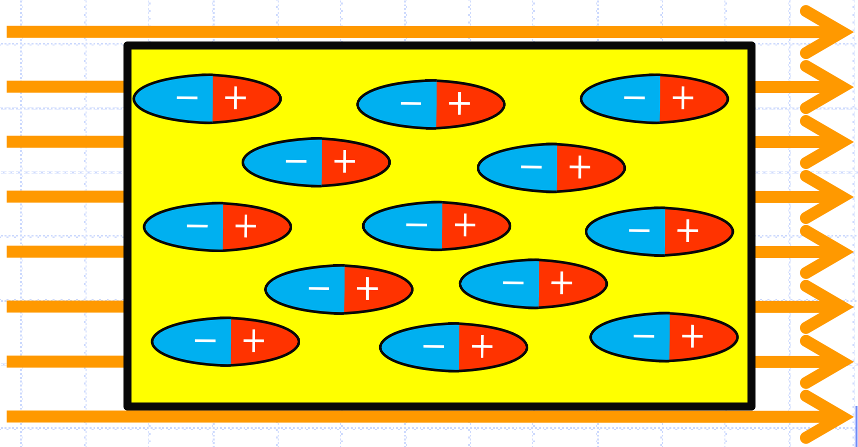


誘電体とはなにか？

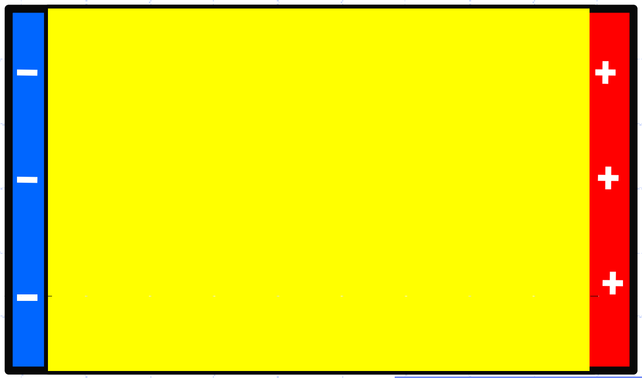
電気を通さない，絶縁体もしくは不導体

例：プラスチック，ガラス，セラミック，アクリル，雲母（マイカ），油・・・・





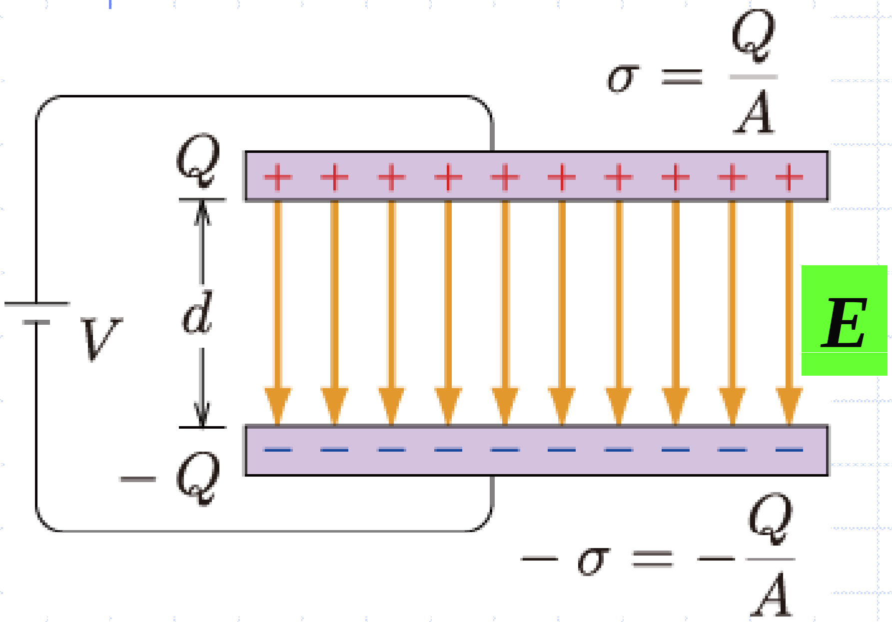
分子，原子，あるいは結晶構造では，
電気力を受け分布が一方に偏る



絶縁体表面の電気力線側に＋と－
の電荷が現れる

誘電分極

誘電体とキャパシター(1)



真空中のキャパシター

起電力Vの電池をつなぎ，面積Aの極板上の電荷をQ,-Qとする

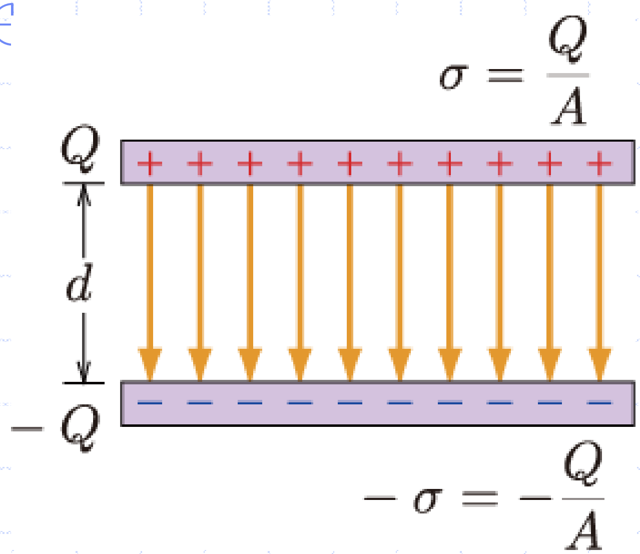
極板の電荷密度

$$\sigma = \pm \frac{Q}{A}$$

極板間の電場

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$$

誘電体とキャパシター (2)



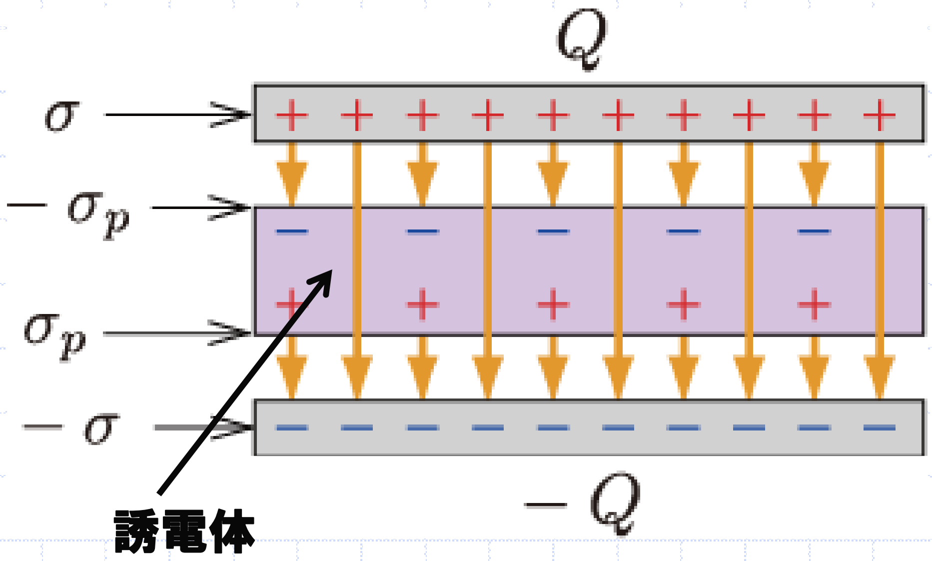
極板間に誘電体をさし込む

極板上の電荷±Qは変化なし

誘電体の分極による電荷σ_pのため電場が弱まり，電圧が減少する

$$V = Ed$$

$$V \to \frac{V}{\varepsilon_r}$$

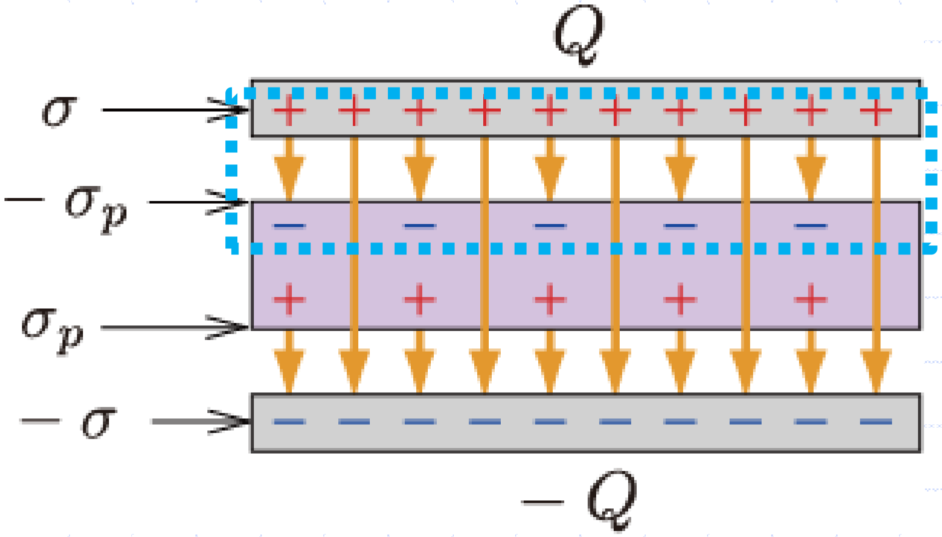


しかし，電荷量は変わらないため，キャパシターの電気容量は増加する

$$C_0 = \frac{Q}{V} \to C = \frac{Q}{(V/\varepsilon_r)} = \varepsilon_r C_0$$

$\varepsilon_r \succ 1$ 比誘電率

誘電体とキャパシター(3)



σ:電荷

σ_p:分極による電荷

$\sigma - \sigma_p$ 電荷密度

$$E = \frac{\sigma - \sigma_p}{\varepsilon_0}$$ 誘電体内の電場

$$E = \frac{\sigma - \sigma_p}{\varepsilon_0} \rightarrow \frac{\sigma}{\varepsilon_r \varepsilon_0}$$ とすると

$$P = \sigma_p = \sigma - \varepsilon_0 E$$
$$= (\varepsilon_r - 1)\varepsilon_0 E$$

P:分極 C/m^2

誘電体とキャパシター(4)

$$P = \sigma_p = \sigma - \varepsilon_0 E = (\varepsilon_r - 1)\varepsilon_0 E$$

分極の大きさPは，電場の強さEに比例する．

等方的な誘電体では，PはEと同じ方向を向く

$$\mathbf{P} = (\varepsilon_r - 1)\varepsilon_0 \mathbf{E} = \chi_e \varepsilon_0 \mathbf{E}$$

$$\chi_e = \varepsilon_r - 1$$

電気感受率

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$$

物体の誘電率

電束密度(1)

電場は，自由電荷と分極電荷の両方によってつくられる．

$$\varepsilon_0 \iint_S E_n dA = Q_0 + Q_p$$

ここで以下の式で示される新しい場Dを導入する

$$\boxed{\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}}$$

Dを電束密度とよぶ

電束密度Dは電荷密度σに等しい．

$$P = \sigma_p = \sigma - \varepsilon_0 E \Rightarrow \sigma = \varepsilon_0 E + P$$

自由電荷Q_0からはQ_0本の電束線がでる．

電束密度 (2)

多くの物質では分極Pと電場Eは比例するため，電束Dは以下のように記述できる

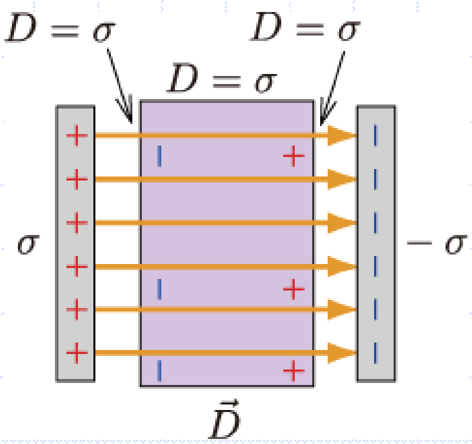
$$\mathbf{P} = (\varepsilon_r - 1)\varepsilon_0 \mathbf{E}$$

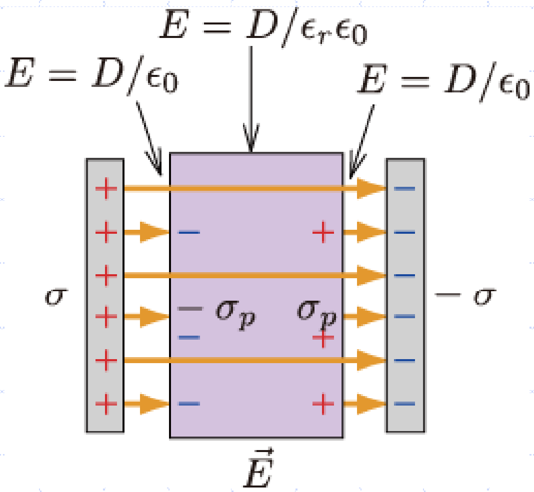
$$\boxed{\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}} \Rightarrow \boxed{\mathbf{D} = \varepsilon_r \varepsilon_0 \mathbf{E} = \varepsilon \mathbf{E}}$$

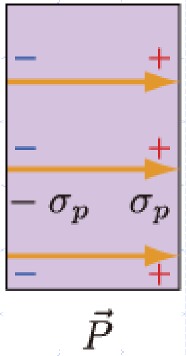
$$\boxed{\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0}$$ 誘電体の誘電率

電束密度(3)

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$$







誘電体中

$$D = \varepsilon_r \varepsilon_0 E = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{\sigma}{\varepsilon_r \varepsilon_0} = \sigma$$

$$E = \frac{\sigma - \sigma_p}{\varepsilon_0}$$

$$P = \sigma_p$$

すきま

$$D = \varepsilon_0 E = \varepsilon_0 \frac{\sigma}{\varepsilon_0} = \sigma$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$$

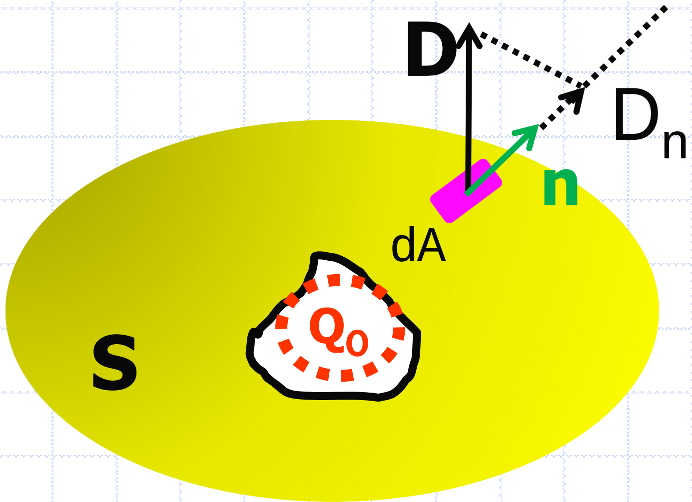
$$P = 0$$

電束密度のガウスの法則

閉曲面Sの内部から出ていく電束Φ_E

=

閉曲面S内部の全自由電荷Q_0



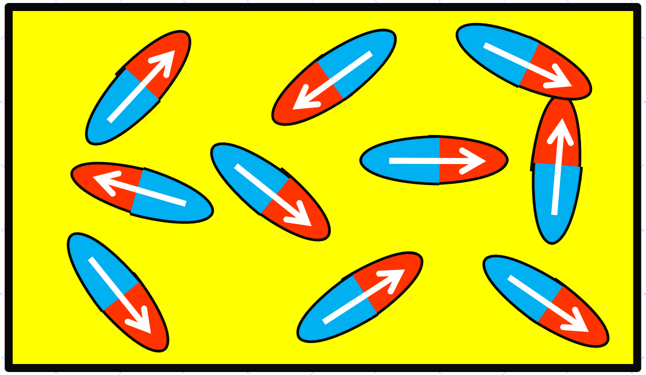
$$\iint_S D_n dA = Q_0$$

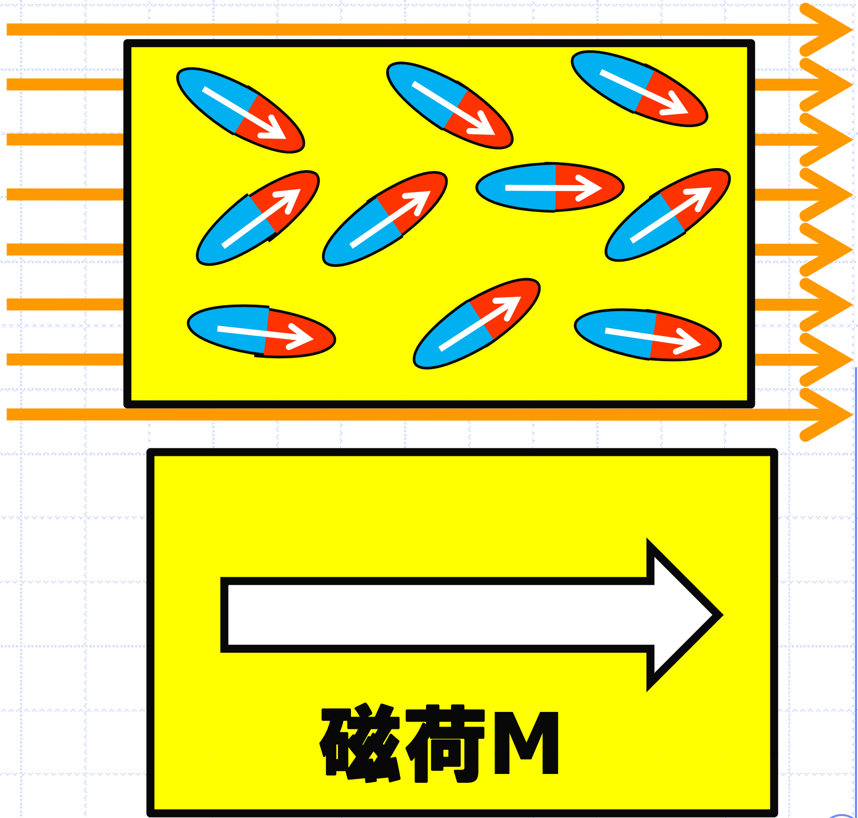
磁性体と磁場

磁性体とはなにか？

磁性を帯びる物質．全ての物質が磁性体であるが．通常，強い磁性体のことを示す．

例：酸化鉄，酸化クロム，コバルト，フェライト・・・・





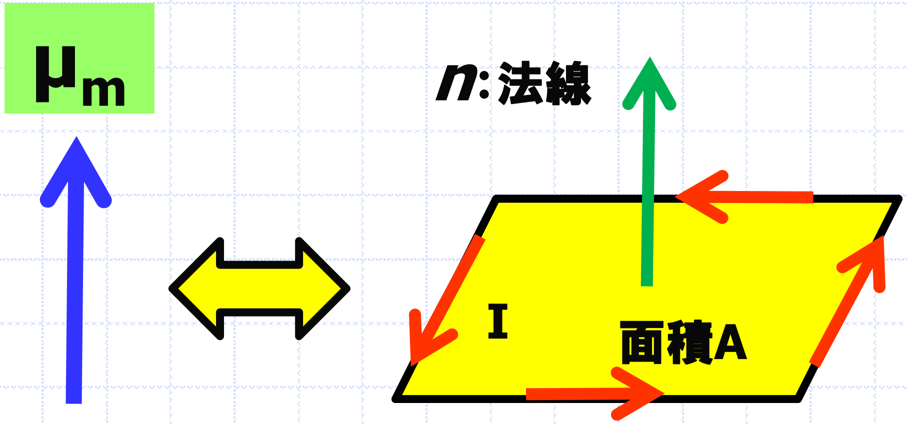
分子，原子，あるいは結晶構造では磁性がある

図のように正負の磁荷が並んだものを磁化されたという

外部磁場を与えなくても磁化された状態のものもある

電流ループが作る磁場1

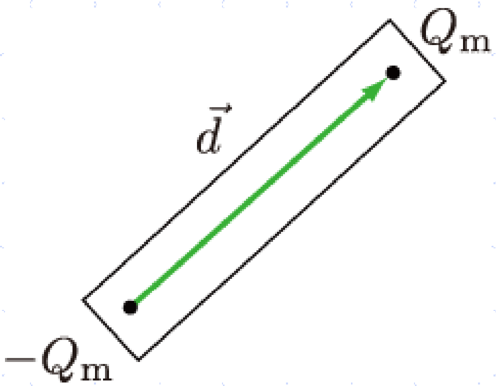
ループ電流により発生する磁場μ_m



$$\mu_m = AIn$$

n: 法線ベクトル
（大きさ1）

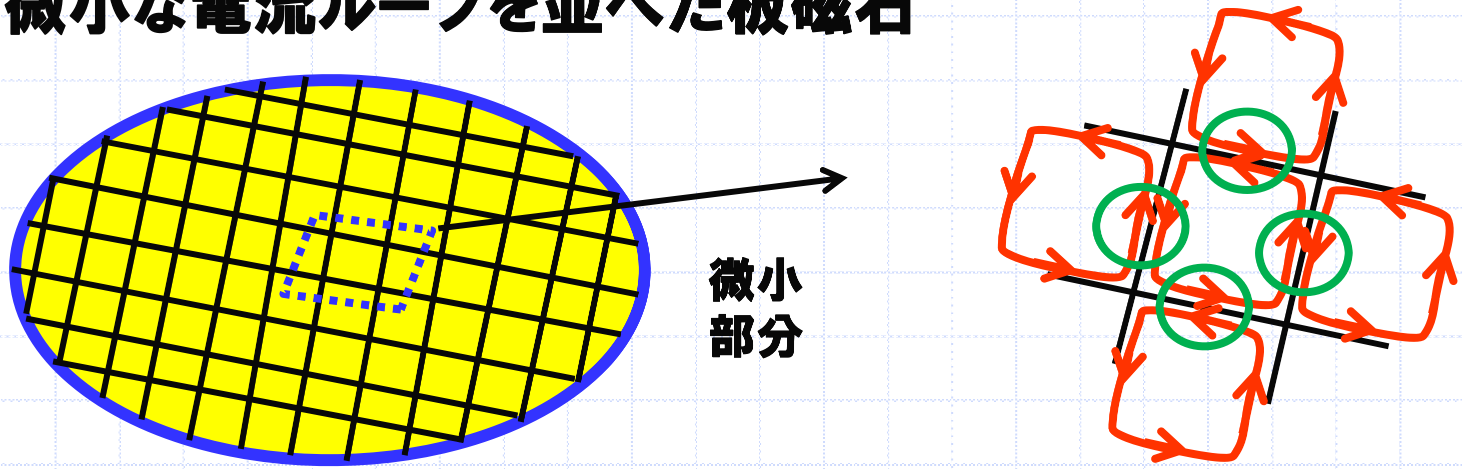
磁気モーメント



$$\mu_m = Q_m d$$

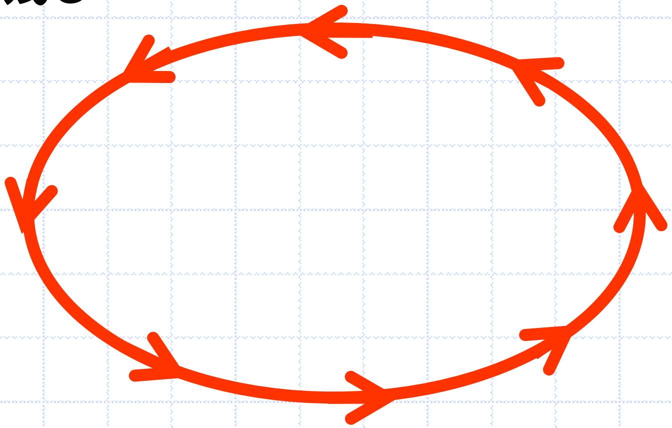
電流ループが作る磁場2

微小な電流ループを並べた板磁石

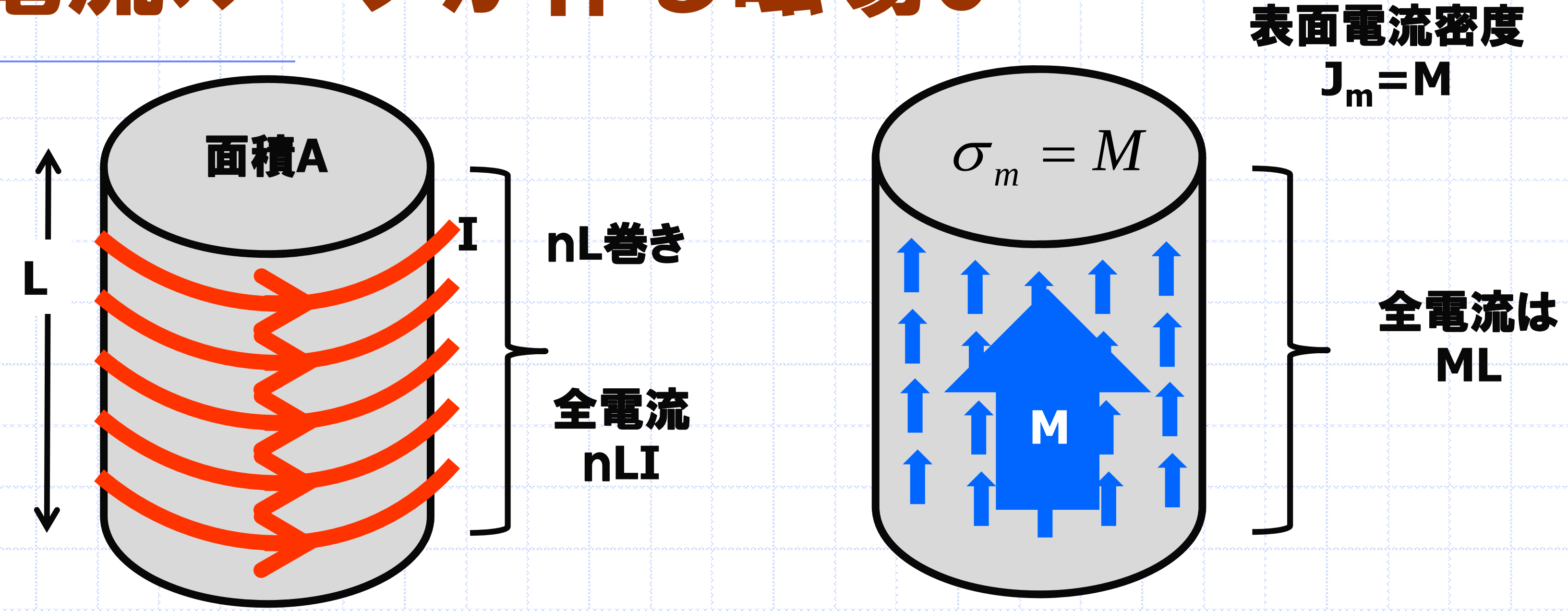


ループ電流は，打ち消しあって
電流ゼロになる

外側のループ電流のみ残る



電流ループが作る磁場3



n:単位当たりの巻き数

磁化M:単位体積当たりの磁気モーメント

同じ磁場Bとなる　nI ⟺ |M|=M

磁化Mの磁性体中の微視的な電流の作る磁場Bを巨視的にみると，磁性体の側面をめぐって流れる表面電流密度“Jm=M”の表面電流がビオサバールの法則に従って作る磁場Bと同じである.

磁場H

磁場を作る電流→伝導電流I_0＋磁化電流I′

$$B = B^{(C)} + B^{(m)}$$

$$B^{(m)} = \mu_0 \left(H^{(m)} + M \right)$$

$H^{(m)}$ 磁性体表面に現れる磁荷Q_mによる磁場

$$B^{(C)} = \mu_0 H^{(C)}$$