電子材料

担当：　　岩本光正　教授

講義　　金曜日　3－4 時限

○　講義内容

誘電体材料

磁性材料

物性の起源は何かを探り、電子材料を学ぶための基礎を身につける。

教科書

１．電気電子物性工学

著者　岩本光正

出版　数理工学社

２．　電気電子物性

著者　　岩本光正

著者　　オーム社

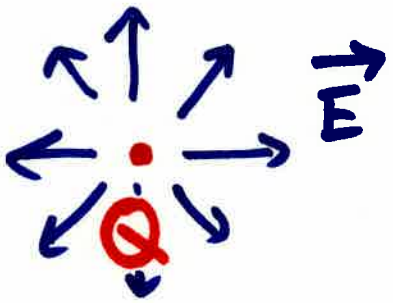
評価

中間試験、　期末試験、

レポートなど

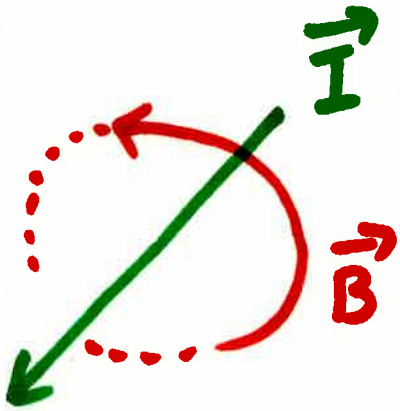
磁性・誘電体材料の性質

誘電体物性 ⟶ 電場



Gaussの法則

磁性体物性 ⟶ 磁場



Ampereの法則

Maxwell's equation

$$\begin{cases} \nabla \cdot \vec{D} = \rho & \text{---} ① \\ \nabla \times \vec{E} = -\dfrac{\partial \vec{B}}{\partial t} & \text{---} ② \\ \nabla \cdot \vec{B} = 0 & \text{---} ③ \\ \nabla \times \vec{H} = \vec{i} + \dfrac{\partial \vec{D}}{\partial t} & \text{---} ④ \end{cases}$$

$\Rightarrow$ 定常状態 $\dfrac{\partial}{\partial t} \to 0$

$$\left.\begin{array}{l} \nabla \cdot \vec{D} = \rho \\ \nabla \times \vec{E} = 0 \end{array}\right\} \to \text{誘電体}$$

独立

$$\left.\begin{array}{l} \nabla \cdot \vec{B} = 0 \\ \nabla \times \vec{H} = \vec{i} \end{array}\right\} \to \text{磁性体}$$

誘電体・絶縁体材料の性質

電荷の蓄積 → 分極現象

C

電流の流れを断つ → 伝導現象

R

電磁気学（Maxwellの方程式）

$$I = I_c + \frac{\partial D}{\partial t}$$

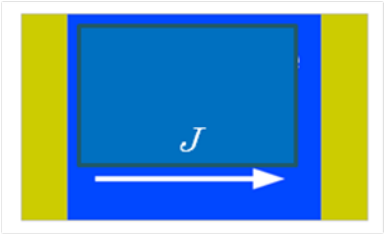
伝導電流　変位電流

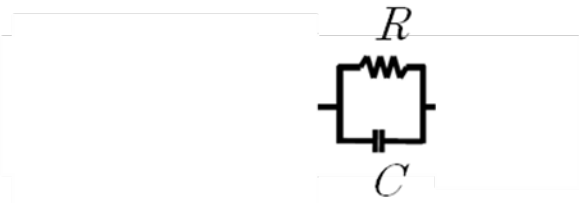
材料を横切って流れる電流

1. 導電電流　　2.変位電流

$$\vec{J} = en\mu\vec{E} + d\vec{D}/dt$$

1: R　　2: C



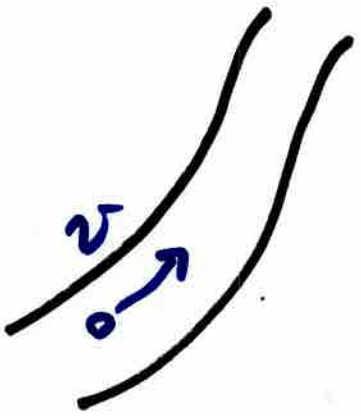


R= ρ d /S　　C= ε S/d

2 つの電流の流れるパスがある

電気伝導現象

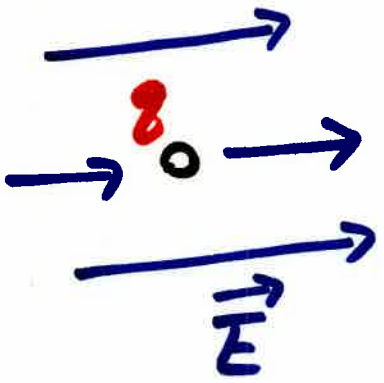
$$\vec{i_c} = en\vec{v}$$



en：キャリア

v：速度

$$\vec{v} = \mu\vec{E}$$



μ：移動度

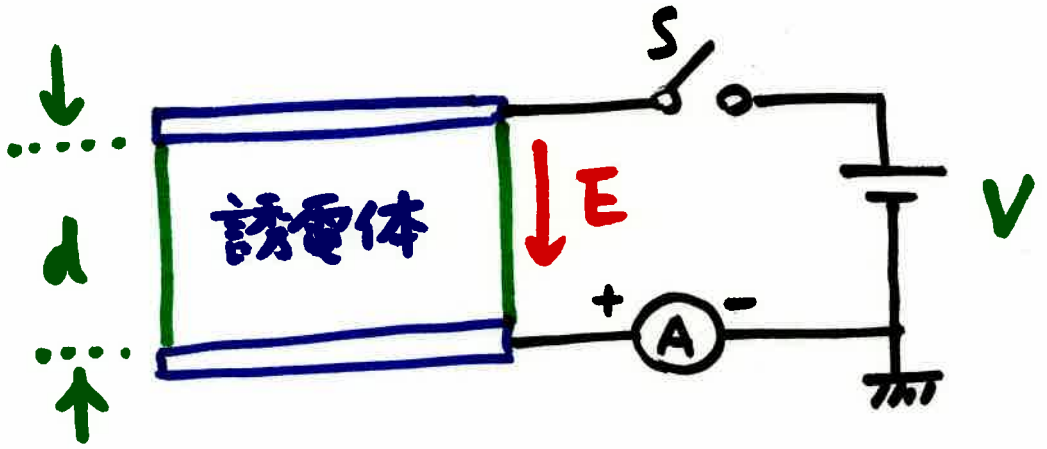
$$\vec{f} = e\vec{E}$$

$$\vec{i_c} = en\mu\vec{E} = \sigma\vec{E}$$

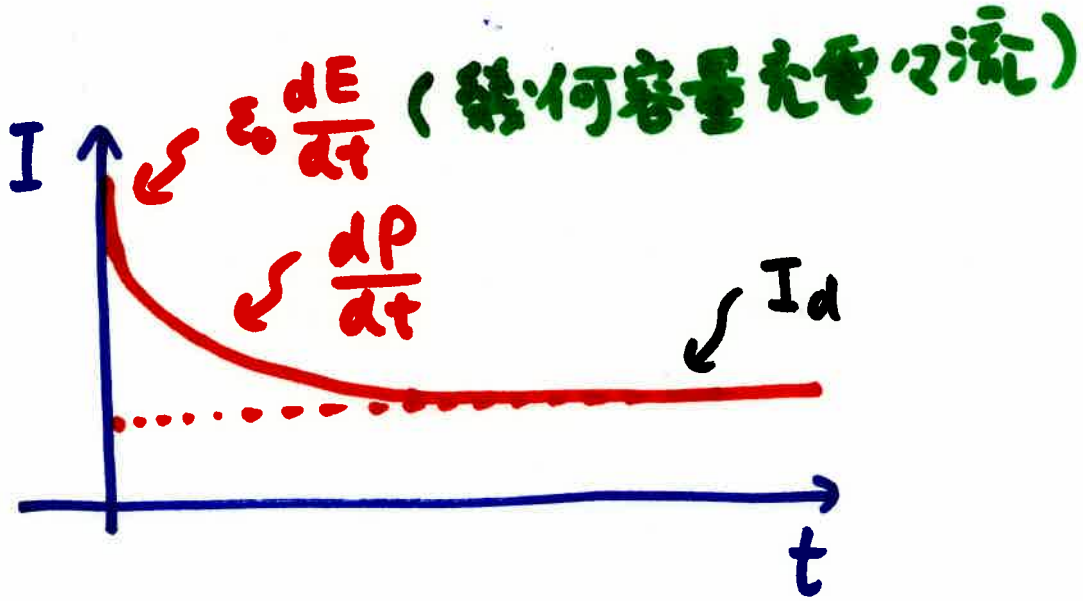
$$\sigma = en\mu = \frac{1}{\rho}$$

σ：導電率

ρ：抵抗率



$$E = \frac{V}{d}$$



I－t特性

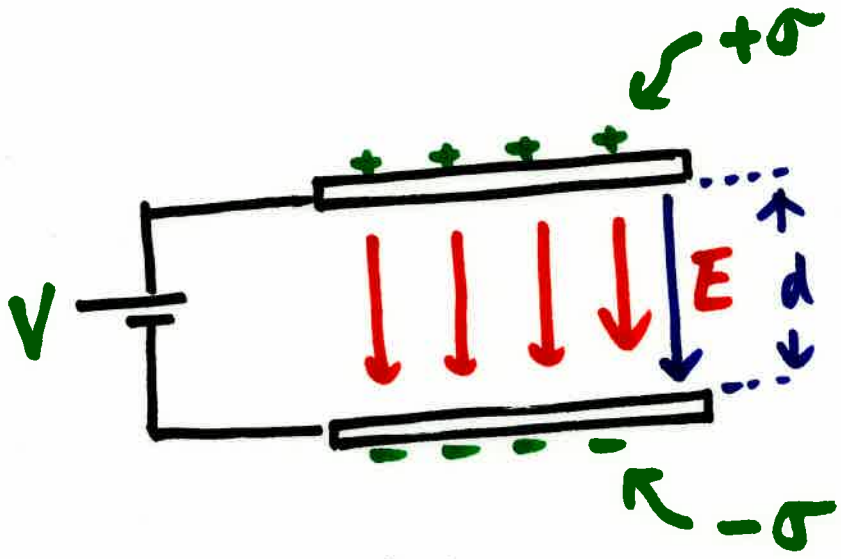
$$I = I_d + \frac{dD}{dt} \quad \cdots ①$$

$$D = \varepsilon_0 E + P \quad \cdots ②$$

$$\Rightarrow I = I_d + \varepsilon_0 \frac{dE}{dt} + \frac{dP}{dt}$$

伝導電流　　分極電流

理想的な誘電体



$E = \frac{V}{d}$

真空中

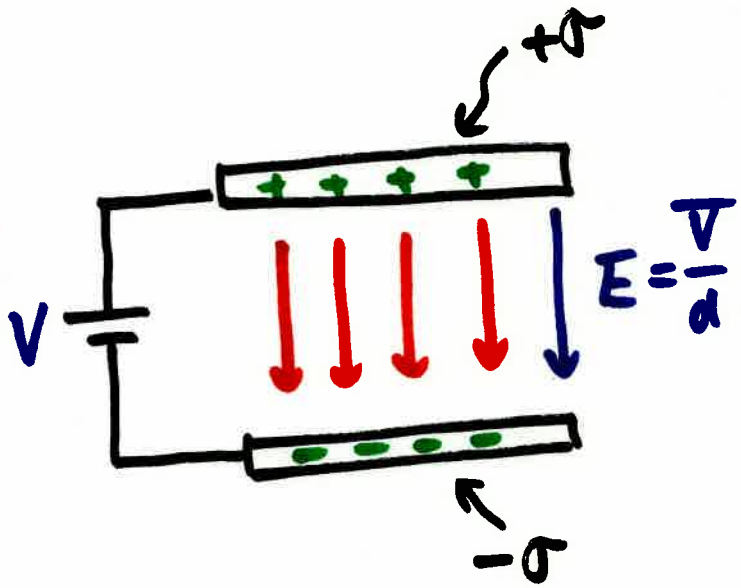
Gauss の法則　$\nabla \cdot \vec{D} = \rho$

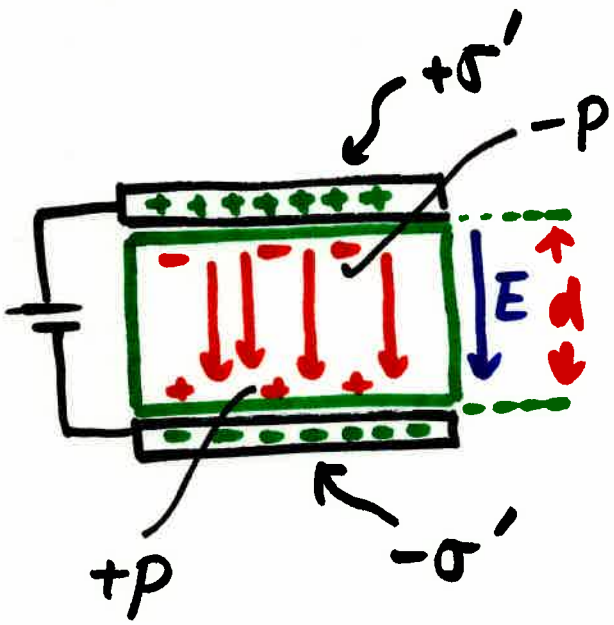
$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} = \frac{V}{d}$　　$\sigma = \varepsilon_0 E = D$

"真空" に電場が拡がる

ε_0 とは何か？

$\varepsilon_0 = 8.85416 \times 10^{-12}$ F/m





真空中

誘電体あり

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

$\varepsilon_r = \dfrac{\sigma'}{\sigma}$ ：比誘電率

(利用可能な電荷量の割合)

$\sigma = \sigma' - P$　P：分極電荷

$$\begin{cases} \sigma = \varepsilon_0 E \\ \sigma' = \varepsilon_0 \varepsilon_r E \end{cases}$$

$$\sigma = \sigma' - P \quad \cdots (1)$$

$$\begin{cases} \sigma = \varepsilon_0 E \\ \sigma' = \varepsilon_r \varepsilon_0 E \end{cases}$$

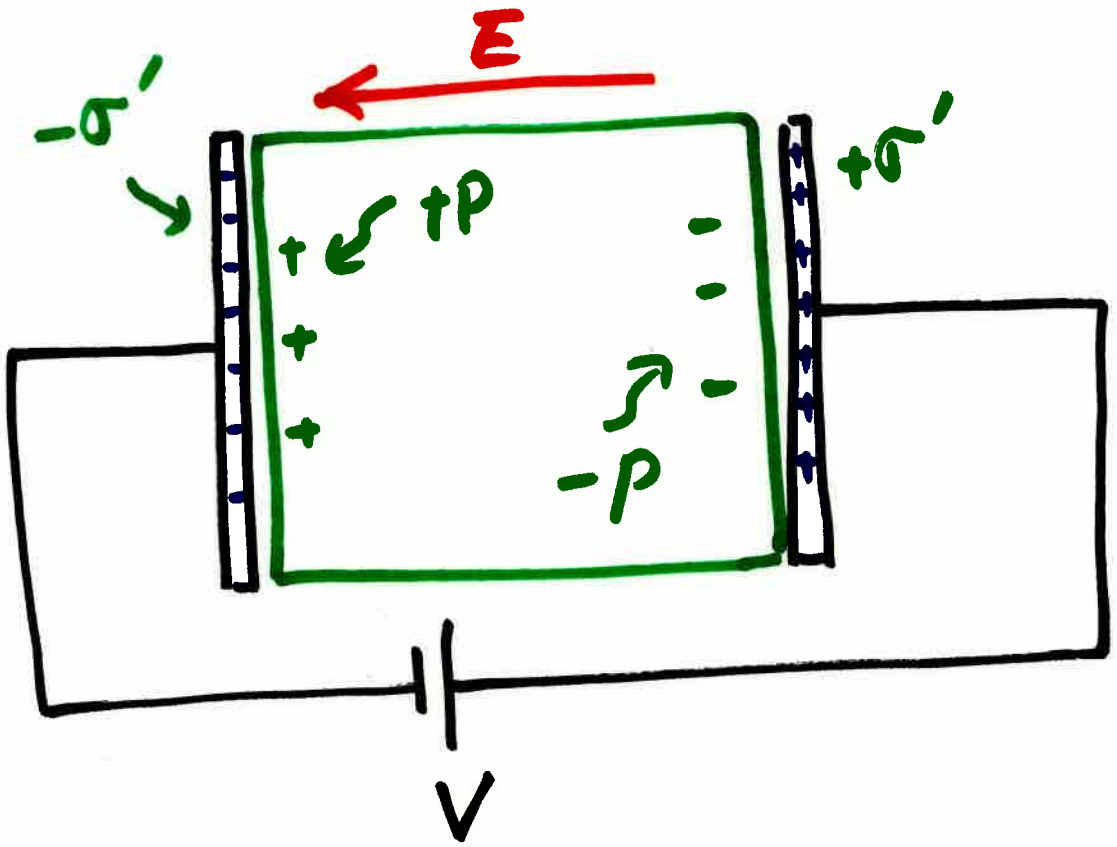
$$P = \sigma' - \sigma$$

$$= \varepsilon_0 (\varepsilon_r - 1) E$$

分極とは？

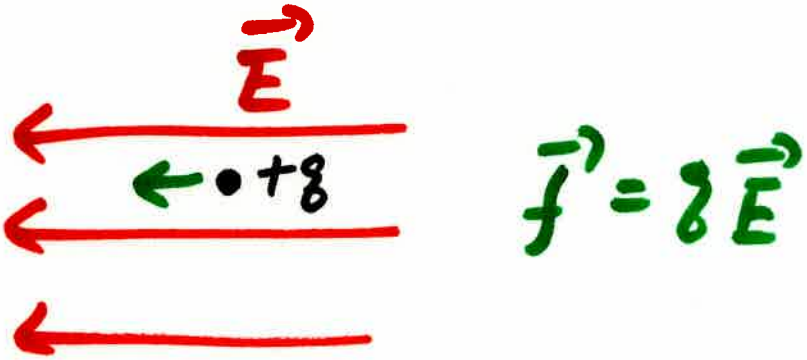
P：分極

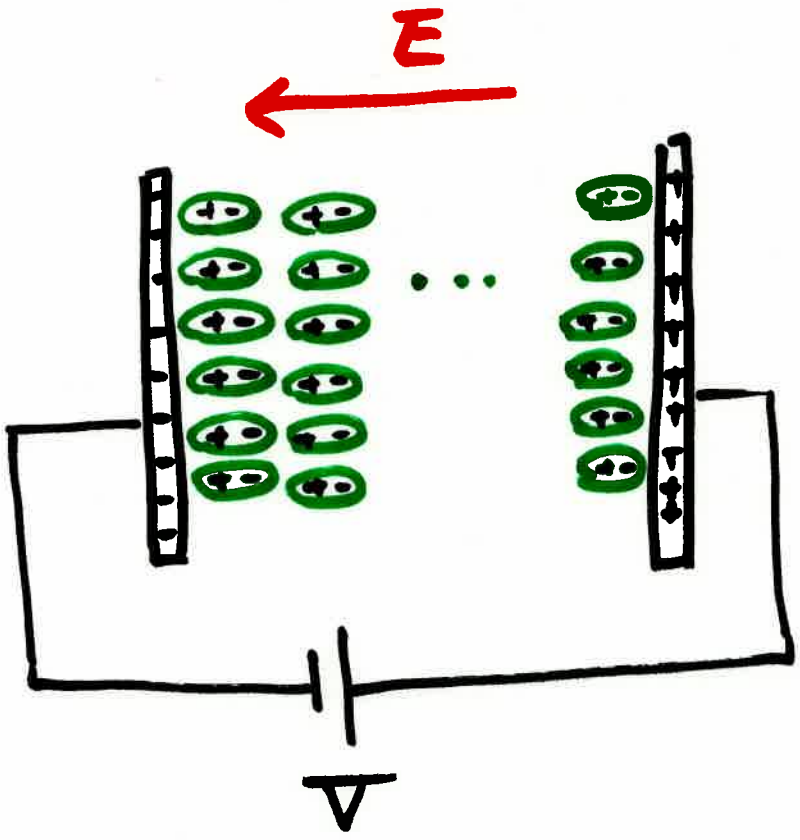
材料の性質によって決まる



$\vec{f} = q\vec{E}$　　電界の作用

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





材料の分極した状態

＋－の電荷の対

双極子

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

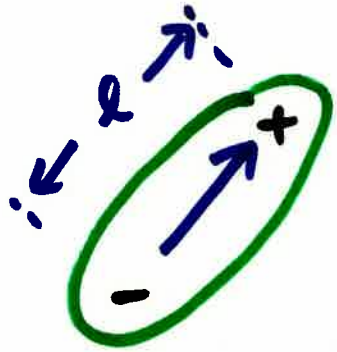
$\mu = ql$

l：変位量

$[\mu] = [q][l]$

C·m

双極子モーメント



Vector量

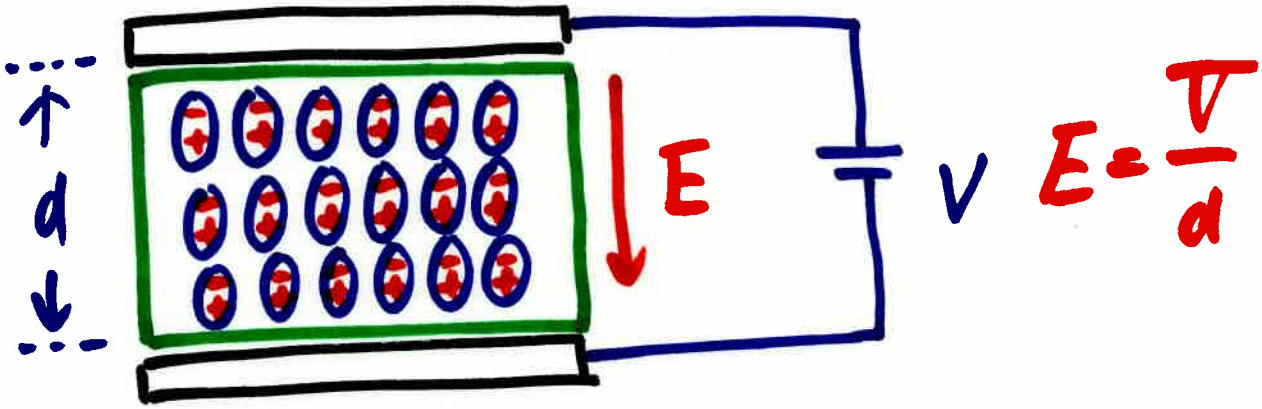
{ 方向
  大きさ

$\mu = ql$

正負電荷の対

$P = N\mu$ $[1/m^3][\cdot cm] = [C/m^2]$

N：単位体積中の双極子数



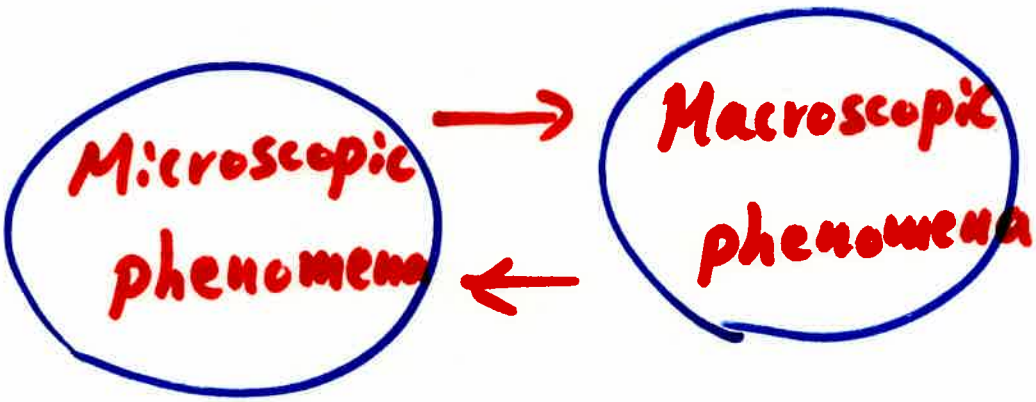
P: 分極量 [C/m²]

$P = N\mu$

N: $\frac{1}{m^3}$

μ: C·m

電子物性



$$N\mu = \rho$$

ミクロな現象とマクロな現象を関係づける.

誘電体物性の基礎

材料の分類

永久双極子

無極性（non-polar） なし

有極性（polar） あり

永久双極子 $\mu \neq 0$ $(E=0)$
(permanent dipole moment)

誘起双極子 $\mu = \alpha E$ $(E \neq 0)$
(induced dipole moment)

永久双極子モーメント

E=0で存在

誘起双極子モーメント

E≠0で発生

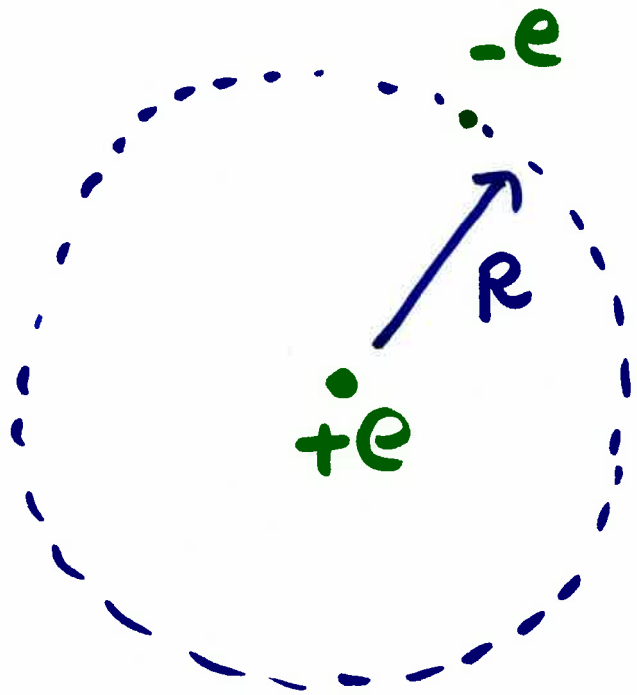
$\mu = \alpha E$

原子 ⇒

正電荷の中心位置

＝負電荷の中心位置

⇒ 永久双極子なし

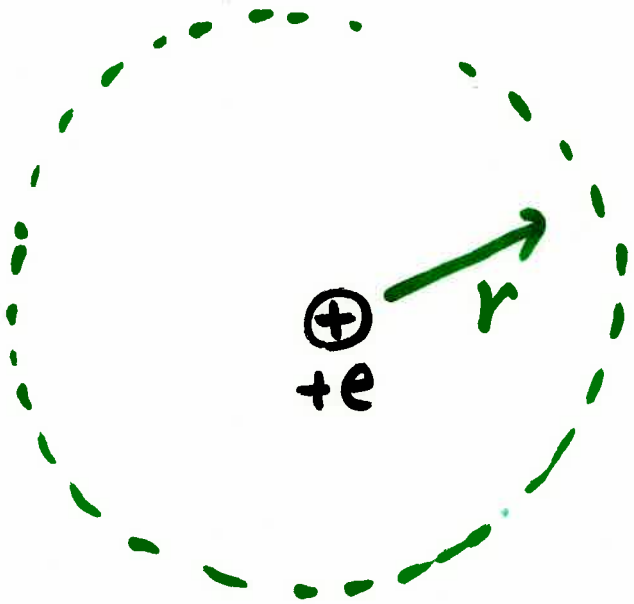


水素原子

$R \simeq a_0$（ボーア半径）

0.529 Å

$1\text{Å} = 10^{-10}\text{m}$



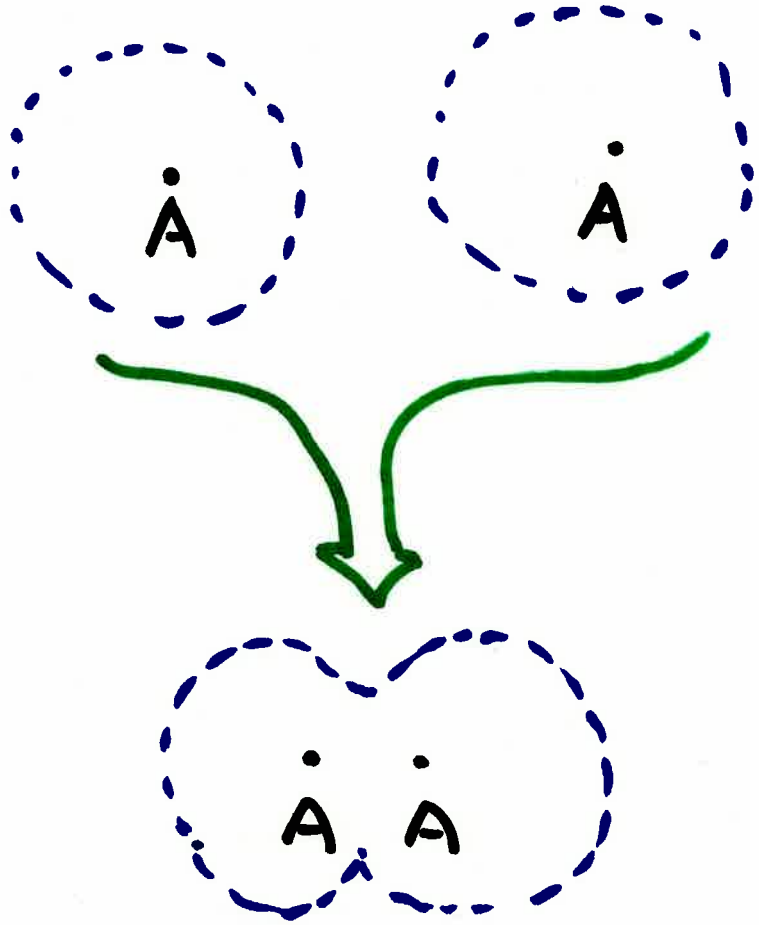
$$\psi_1 = \frac{1}{\sqrt{\pi}}\left(\frac{1}{a_0}\right)^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{r}{a_0}\right)$$

球対称

双極子能率 μ_x

$$\mu_x = \int_v \psi_1^*(ex)\psi_1 \, dv$$

AA形 2原子分子



2つの原子が同じであれば

分子の場合も

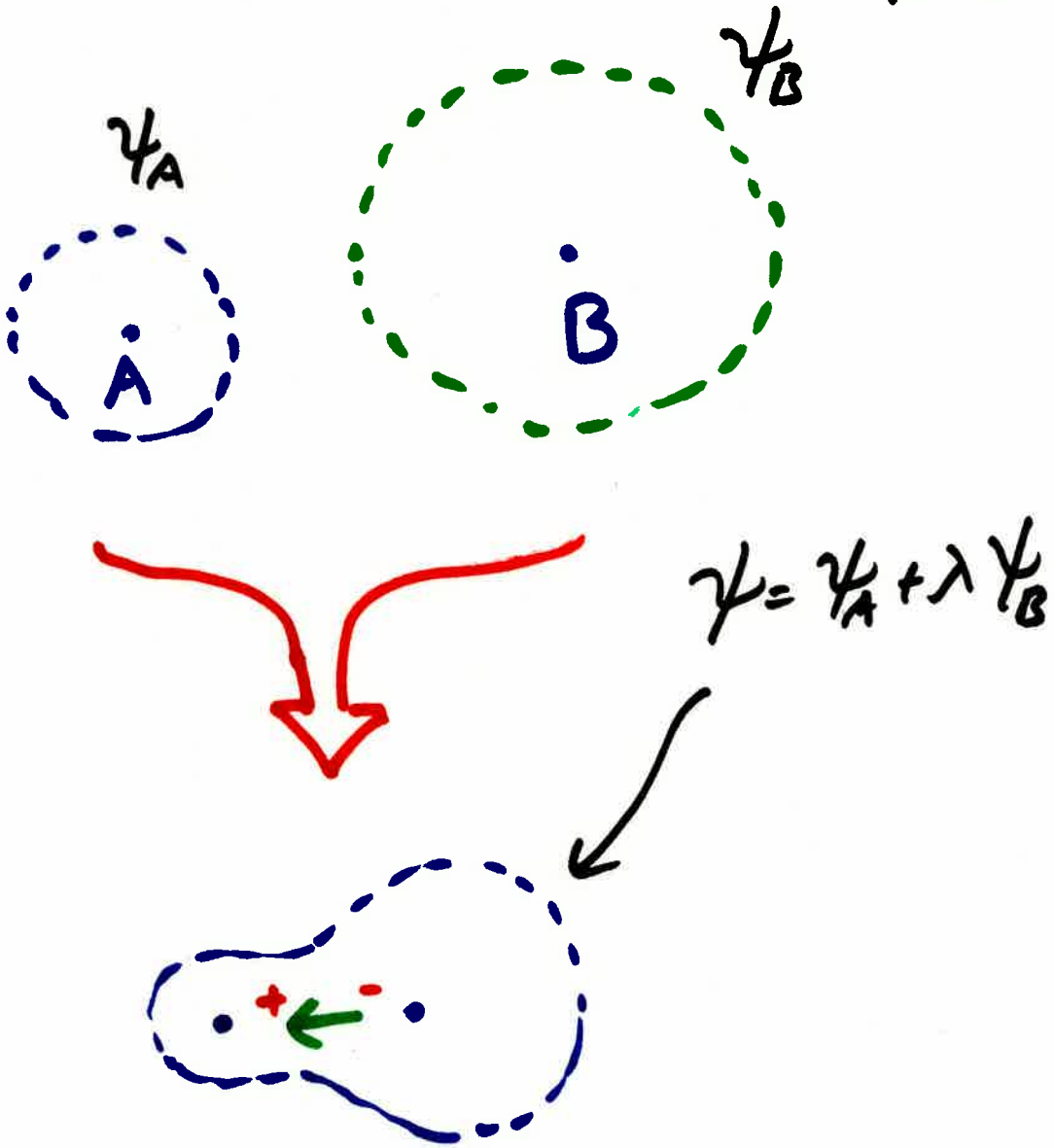
正電荷重心位置

＝負電荷重心位置

永久双極子の発生なし

AB形 2原子分子　HCl

H^+Cl^-



正負電荷の重心位置のずれ

永久双極子能率の発生

AB形分子，AB_2形分子の双極子モーメント

分子	双極子能率	
CO	0.11	D(デバイ)
HCl	1.04	
NO	0.1	
CO_2	0	
H_2O	1.9	
H_2S	0.9	
NO_2	0.4	

$1D = 3.33 \times 10^{-30}\ C \cdot m$

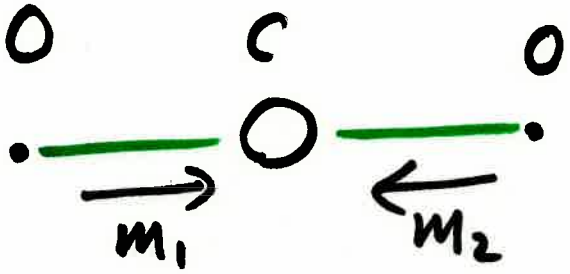
$M = ql$

$q: 1.6 \times 10^{-19}\ C$

$l \simeq 10^{-10}\ m$

CO_2

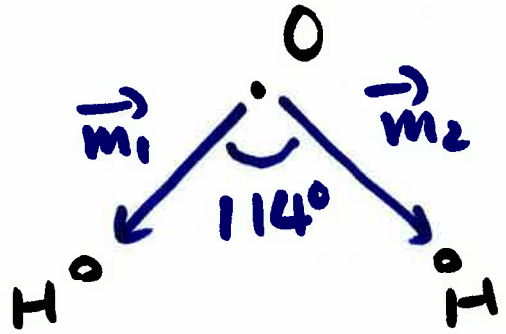
$m_1 = m_2 \qquad \theta = \pi$



$\mu = 0$

H_2O

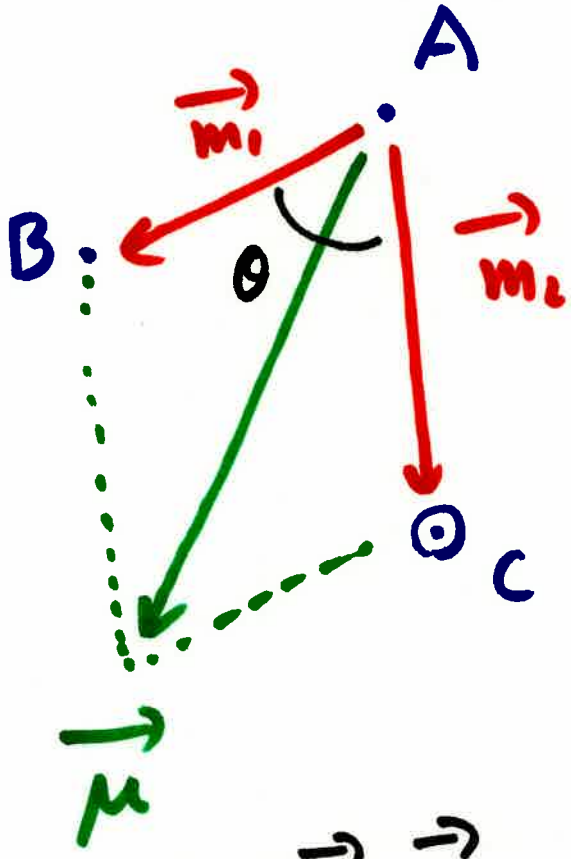
$\mu = 1.9\ D$



$\theta = 114°$

AB_2型　3原子分子

3原子系 → 2原子系の結合



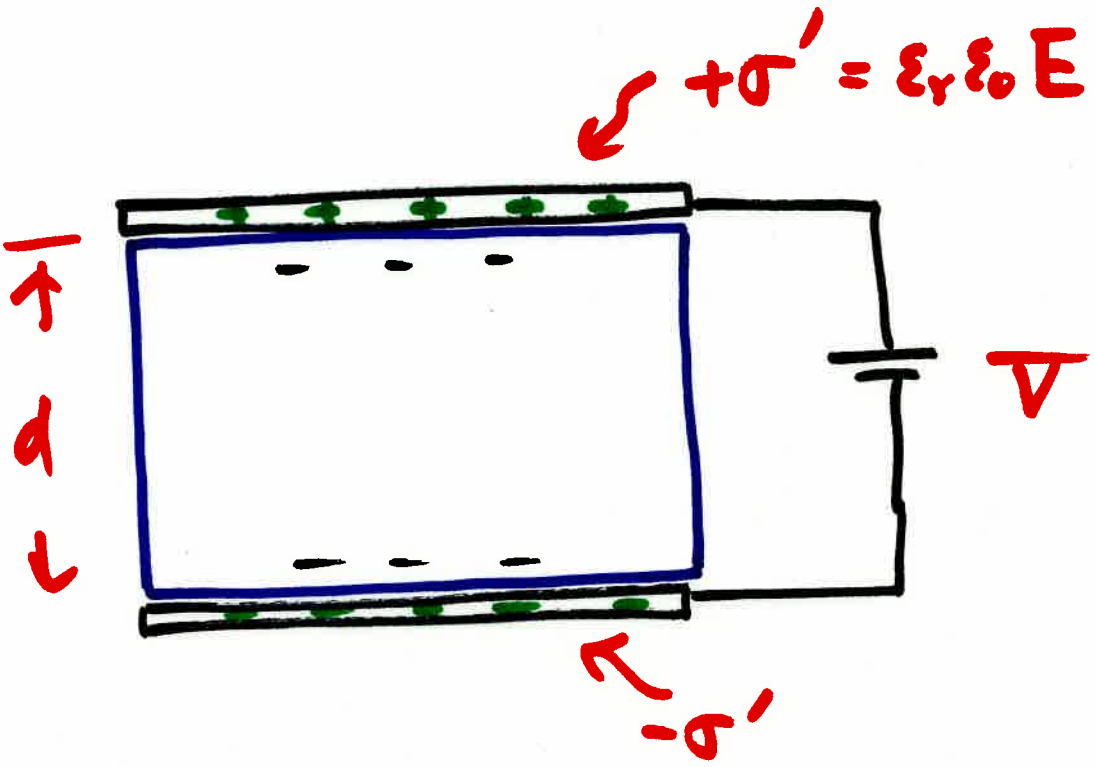
$$\vec{\mu} = \vec{m}_1 + \vec{m}_2$$

$$|\vec{\mu}|^2 = \vec{\mu}\cdot\vec{\mu}$$

$$= (\vec{m}_1 + \vec{m}_2)\cdot(\vec{m}_1 + \vec{m}_2)$$

$$= |\vec{m}_1|^2 + |\vec{m}_2|^2 + 2|\vec{m}_1||\vec{m}_2|\cos\theta$$

$$|\vec{\mu}| = \sqrt{|\vec{m}_1|^2 + |\vec{m}_2|^2 + 2|\vec{m}_1||\vec{m}_2|\cos\theta}$$



$$E = \frac{V}{d}$$

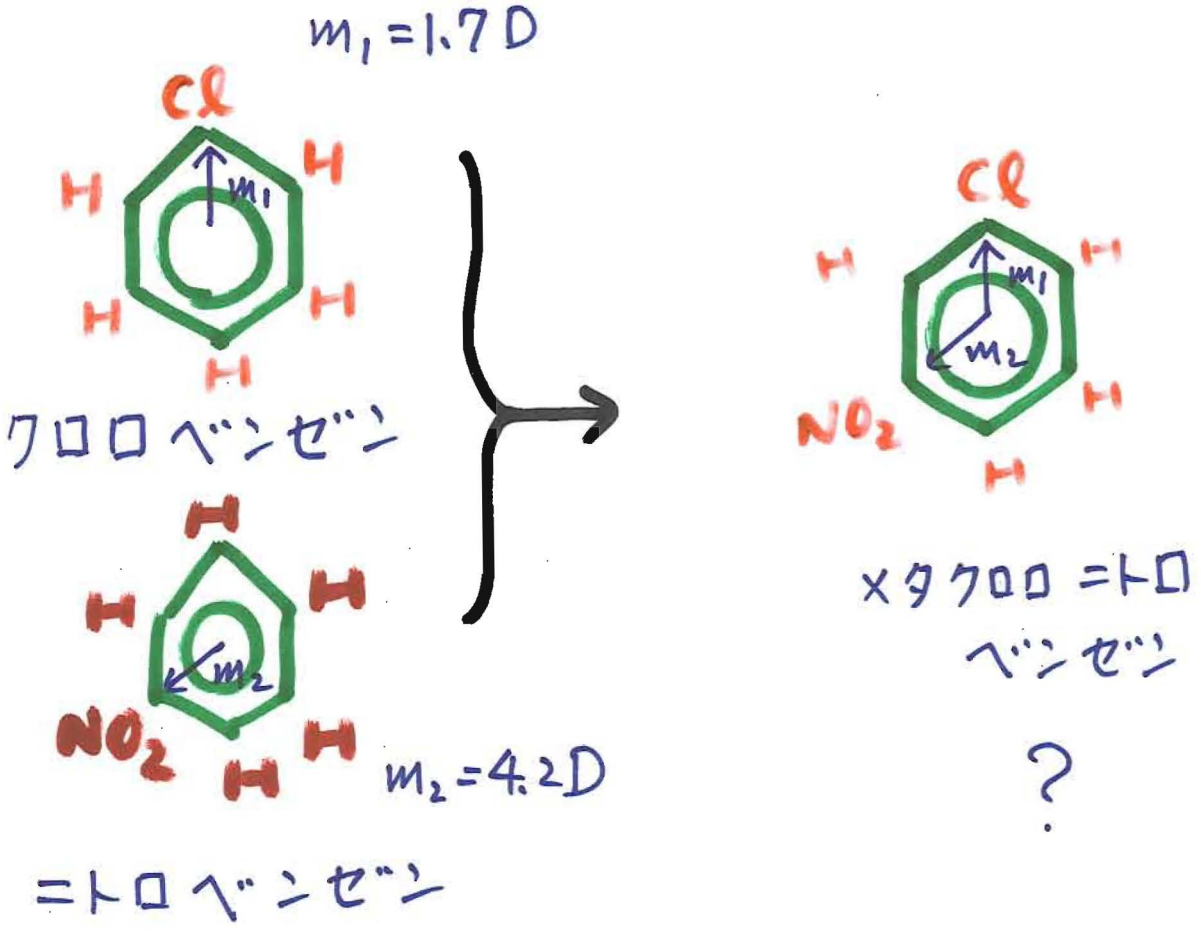
電極xの電荷は？

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

ε_r → 小 ：材料 絶縁

ε_r → 大 分極x 誘電

問 クロロベンゼン及びニトロベンゼンの双極子能率を1.7D, 4.2Dとして, メタクロロニトロベンゼンの双極子能率を求めよ



解答

分子の双極子能率は，ベクトル和で与えられるよって

$$\vec{m} = \vec{m_1} + \vec{m_2}$$

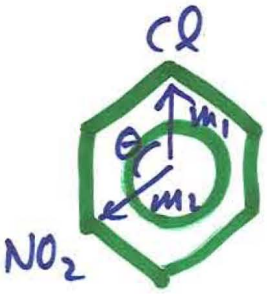
$$|\vec{m}|^2 = \vec{m} \cdot \vec{m}$$

$$= (\vec{m_1} + \vec{m_2}) \cdot (\vec{m_1} + \vec{m_2})$$

$$= |\vec{m_1}|^2 + 2(\vec{m_1} \cdot \vec{m_2}) + |\vec{m_2}|^2$$

$$= |\vec{m_1}|^2 + 2m_1 m_2 \cos\theta + |\vec{m_2}|^2$$

$$m^2 = m_1^2 + 2m_1 m_2 \cos\theta + m_2^2$$



$\theta = 120°$

$m_1 = 1.7\,D$

$m_2 = 4.2\,D$

$$m = \sqrt{m_1^2 + 2m_1 m_2 \cos\theta + m_2^2}$$

$$= \sqrt{1.7^2 + 2 \times 1.7 \times 4.2 \cdot \cos 120° + 4.2^2} \simeq 3.67\,D$$