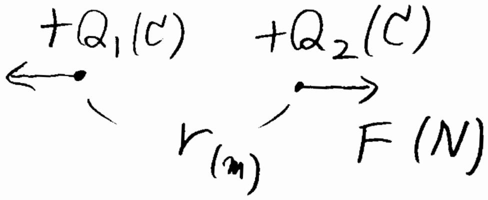
①

クーロンの法則

$$F = k\frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

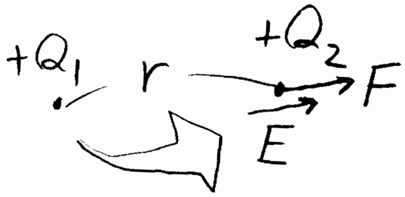


$$k \fallingdotseq 9\times10^9$$

ベクトルで表わすと $\mathbb{F} = k\dfrac{Q_1 Q_2}{r^2}\cdot\dfrac{\mathbb{r}}{r}$ となる。

$k = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}$ と表わされる　$\varepsilon_0 = 8.854\times10^{-12}$ (F/m) 真空中の誘電率

$$\boxed{F = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\varepsilon_0 r^2}}$$ となる。

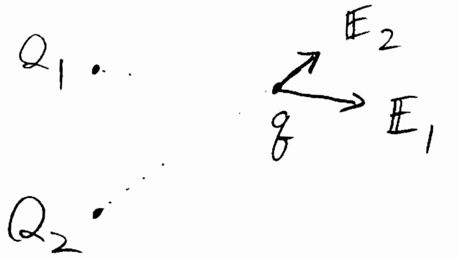


$$F = \frac{Q_1}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\cdot Q_2$$

E：電界 (V/m)

$$\boxed{E = \frac{Q_1}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \text{ と } Q_2 \text{ で } F = Q_2 E}$$

$\mathbb{E} = \dfrac{Q_1}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\cdot\dfrac{\mathbb{r}}{r}$ とすると　$\mathbb{F} = Q_2\mathbb{E}$.



$$\mathbb{F} = q\mathbb{E}_1 + q\mathbb{E}_2 = q(\mathbb{E}_1 + \mathbb{E}_2)$$

(合成した電界に電荷 q をかけると力が求められる。

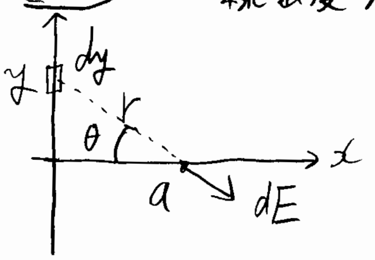
電界を求めることは重要である。

$\mathbb{E}$ は位置 (x, y, z) の関数となっている。→ ベクトル場

電界を電場とも言う (electric field)

温度 $T(x, y, z)$ はスカラー場である。

② 例1　線密度 λ (C/m)



$$dE = \frac{\lambda\,dy}{4\pi\varepsilon_0 r^2},\quad \cos\theta = \frac{a}{r} \text{ より } r = \frac{a}{\cos\theta}$$

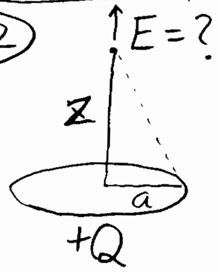
$$\tan\theta = \frac{y}{a} \text{ より } y = a\tan\theta \quad \therefore dy = a\cdot\frac{1}{\cos^2\theta}\,d\theta$$

dEのx方向成分は $dE\cos\theta = \frac{\lambda}{4\pi\varepsilon_0}\cdot dy\cdot\frac{1}{r^2}\cos\theta = \frac{\lambda}{4\pi\varepsilon_0}\,\frac{a\,d\theta}{\cos^2\theta}\cdot\frac{\cos^2\theta}{a^2}\cdot\cos\theta$

$$= \frac{\lambda}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{\cos\theta}{a}\,d\theta \quad \therefore E = \int_{y=-\infty}^{y=\infty} dE\cos\theta = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\lambda}{4\pi\varepsilon_0 a}\cos\theta\,d\theta$$

$$= \frac{\lambda}{4\pi\varepsilon_0 a}\Big[\sin\theta\Big]_{-\pi/2}^{\pi/2} = \frac{\lambda}{4\pi\varepsilon_0 a}\{1-(-1)\} = \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0 a}$$

例2



$$dE = \frac{\lambda\,dl}{4\pi\varepsilon_0(z^2+a^2)} \quad \text{ただし } 2\pi a\lambda = Q$$

dEのz方向成分は

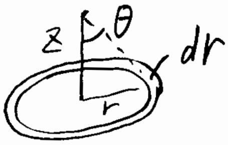
$$dE\cos\theta = \frac{\lambda\cos\theta\,dl}{4\pi\varepsilon_0(z^2+a^2)}$$

$$\therefore E = \oint \frac{\lambda\cos\theta\,dl}{4\pi\varepsilon_0(z^2+a^2)} = \frac{\lambda}{4\pi\varepsilon_0(z^2+a^2)}\cdot\frac{z}{\sqrt{z^2+a^2}}\oint dl = \frac{\lambda z\,2\pi a}{4\pi\varepsilon_0(z^2+a^2)^{3/2}}$$

$$= \frac{zQ}{4\pi\varepsilon_0(z^2+a^2)^{3/2}}$$

$z \gg a$ の時 $\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 z^2}$ に帰着する

例3



面密度 σ (C/m²)　上の結果を利用して

$Q = \sigma\cdot 2\pi r\cdot dr$ として

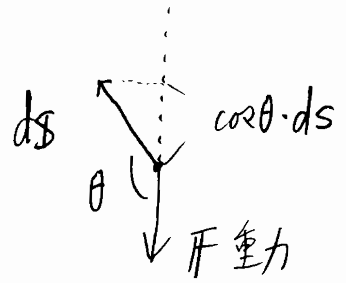
$$dE = \frac{z\sigma\,2\pi r\,dr}{4\pi\varepsilon_0(z^2+r^2)^{3/2}},\quad \cos\theta = \frac{z}{\sqrt{z^2+r^2}},\quad r = z\tan\theta$$

より $dr = z\frac{1}{\cos^2\theta}\,d\theta$

$$\int dE = \int_0^{\pi/2} \frac{z\sigma\,2\pi\,z\tan\theta}{4\pi\varepsilon_0\left(\frac{z}{\cos\theta}\right)^3}\cdot z\,\frac{1}{\cos^2\theta}\,d\theta = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}\int_0^{\pi/2}\tan\theta\cdot\cos\theta\,d\theta$$

$$= \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}\Big[-\cos\theta\Big]_0^{\pi/2} = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}[-0+1] = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$$

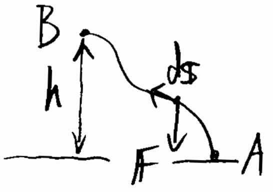
③ 電位



ds 動かすのに必要な仕事 $dW = -\mathbb{F}\cdot d\mathbf{s}$

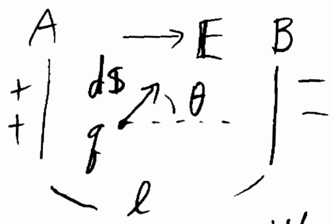
$\theta = \pi$ の時 $|\mathbb{F}|\cdot|d\mathbf{s}|$

$\theta = 0$ の時 $-|\mathbb{F}|\cdot|d\mathbf{s}|$



AからBまで動かすのに必要な仕事

$W = \int_A^B -\mathbb{F}\cdot d\mathbf{s} \longrightarrow \underline{mg\cdot h}$

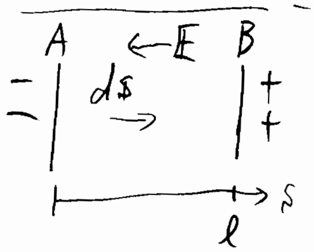


ds 動かすのに必要な仕事 $dW = -q\mathbb{E}\cdot d\mathbf{s}$

AからBまで動かすのに必要な仕事

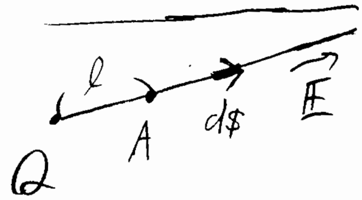
$$W = \int_A^B -q\mathbb{E}\cdot d\mathbf{s} = q\cdot \underline{\int_A^B -\mathbb{E}\cdot d\mathbf{s}}$$

Eが一定なら $W = q\cdot(\underline{-El})$ ⟶ Aに対するBの電位（電位差）



Aに対するBの電位は

$$V_B = -\int_0^l \mathbb{E}\cdot d\mathbf{s} = -\int_0^l -E\cdot ds = El$$



無限遠に対するAの電位は

$$V_A = -\int_\infty^l \mathbb{E}\cdot d\mathbf{s} = -\int_\infty^l \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 s^2}ds = -\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0}\left[-\frac{1}{s}\right]_\infty^l$$

$$= \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0}\left[\frac{1}{l} - \frac{1}{\infty}\right] = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 l}$$

$$V = -\int \mathbb{E}\cdot d\mathbf{s}$$

逆に $E(r) = -\dfrac{dV}{dr}$

点電荷Qからr離れた所で

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

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

$$\begin{tikzcd}
F \arrow[r, "\int ds"] & \text{位置エネルギー} \\
E \arrow[u, "\times q"] \arrow[r, "\int ds"] & \text{電位} \arrow[u, "\times q"']
\end{tikzcd}$$

④ $E = -\dfrac{dV}{dr}$ を三次元で考える。 $(dV = -E \cdot dr)$

$$\Delta V = \frac{\partial V}{\partial x}\Delta x + \frac{\partial V}{\partial y}\Delta y + \frac{\partial V}{\partial z}\Delta z$$

偏微分の説明を入れる

$\left(\dfrac{\partial V}{\partial x}, \dfrac{\partial V}{\partial y}, \dfrac{\partial V}{\partial z}\right) = \mathrm{grad}\,V$, $(\Delta x, \Delta y, \Delta z) = \Delta \mathbf{s}$ と表わす。

(∇V)
ナブラ

$\Delta V = \mathrm{grad}\,V \cdot \Delta \mathbf{s} \xrightarrow{\Delta \mathbf{s} \to 0 とすると} \boxed{\mathbf{E} = -\mathrm{grad}\,V}$ $\left(E = -\dfrac{dV}{dr}\right)$

↑ gradV

ベクトル量　スカラ量

$\Delta \mathbf{s}$ と gradV が同じ方向の時 $(\theta = 0)$ ΔV は最大となる

→ gradV は最大傾斜の方向のベクトルである。

gradV ⊥ 等電位面　（電気力線の接線方向を示す。）

位置エネルギー差は $U_{AB} = q \cdot V_{AB}$ と表わされ、V と J/C は同じ単位。
(J)　(C)(V)

AB間のエネルギー差は道すじによらない。
↓
元に戻るとエネルギー差は0となる → 保存的であると言う。
$\left(\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = 0\right)$

電荷が存在すると周囲には E（ベクトル場）と V（スカラ場）ができる。

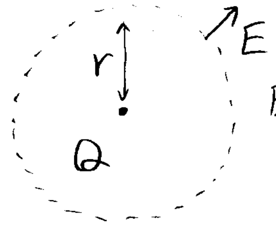
$V = -\int \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s}$, $\mathbf{E} = -\mathrm{grad} \cdot V$ の関係がある。

E をもとめる方法に必殺技

- ガウスの定理を用いる

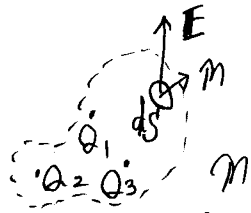
- V をもとめてから E をもとめる。→ 電気双極子の時（前期後半で）

⑤ ガウスの定理



$$E=\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \rightsquigarrow \underbrace{4\pi r^2}_{\text{球の表面積}} E=\frac{Q}{\varepsilon_0}$$

⇓ 一般化



$$\oint_S \mathbf{E}\cdot \mathbf{n}\, dS=\frac{\sum_i Q_i}{\varepsilon_0}$$

$\mathbf{n}$: dS の法線ベクトル

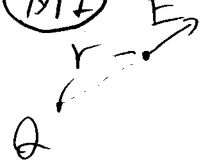
$\oint_S$ は閉曲面全体の積分を示す。

。Qが連続的に分布している場合

$$\boxed{\oint_S \mathbf{E}\cdot \mathbf{n}\, dS=\frac{1}{\varepsilon_0}\int_V \rho\, dv}$$ ガウスの定理 積分形

→ Eが一定の時くらいしか役に立たない。

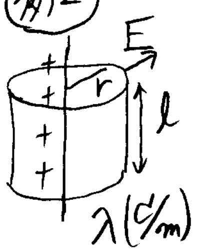
例1



$$\oint_S \mathbf{E}\cdot \mathbf{n}\, dS=4\pi r^2 E=\frac{Q}{\varepsilon_0}$$

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

例2

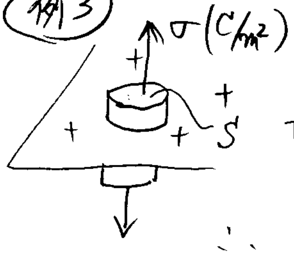


$$\oint_S \mathbf{E}\cdot \mathbf{n}\, dS=\int_{上面}\mathbf{E}\cdot \mathbf{n}\, dS+\int_{側面}\mathbf{E}\cdot \mathbf{n}\, dS$$

$$+\int_{下面}\mathbf{E}\cdot \mathbf{n}\, dS=0+2\pi r l+0=\frac{l\lambda}{\varepsilon_0}$$

$$\therefore E=\frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0 r}$$

例3

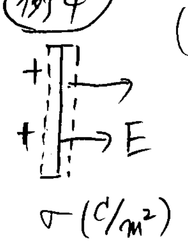


$$\oint_S \mathbf{E}\cdot \mathbf{n}\, dS=\int_{上面}\mathbf{E}\cdot \mathbf{n}\, dS+\int_{側面}\mathbf{E}\cdot \mathbf{n}\, dS$$

$$+\int_{下面}\mathbf{E}\cdot \mathbf{n}\, dS=SE+0+SE=\frac{\sigma S}{\varepsilon_0}$$

$$\therefore E=\frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$$

例4



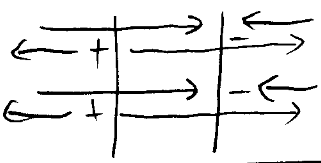
$$\oint_S \mathbf{E}\cdot \mathbf{n}\, dS=\int_{左面}\mathbf{E}\cdot \mathbf{n}\, dS+\int_{側面}\mathbf{E}\cdot \mathbf{n}\, dS$$

$$+\int_{右面}\mathbf{E}\cdot \mathbf{n}\, dS=0+0+SE=\frac{\sigma S}{\varepsilon_0}$$

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

ガウスの定理は対称性の良い場合しか簡単に計算することができない。

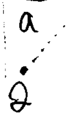
例4の見方をかえると



$$\frac{\sigma}{2\varepsilon_0}\times 2=\frac{\sigma}{\varepsilon_0}$$ と考えることができる。

電位(差)を求める。

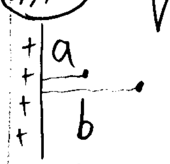
例1



$$V=-\int_\infty^a \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}dr=\frac{-Q}{4\pi\varepsilon_0}\int_\infty^a r^{-2}dr$$

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

例2



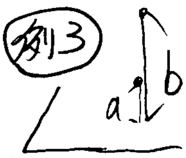
$$V=-\int_b^a \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0 r}dr=\frac{-\lambda}{2\pi\varepsilon_0}\int_b^a \frac{1}{r}dr$$

$$=\frac{-\lambda}{2\pi\varepsilon_0}\left[\ln a-\ln b\right]=\frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0}\ln\frac{b}{a}$$

$a<b$ より $\ln\frac{b}{a}>0$ である。

$b\to\infty$ とすると $V\to\infty$ となってしまう。

例3

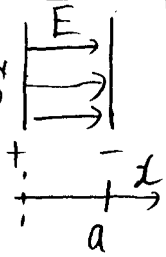


$$V=-\int_b^a \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}dr=\frac{-\sigma}{2\varepsilon_0}\left[r\right]_b^a$$

$$=\frac{\sigma(b-a)}{2\varepsilon_0}>0$$

$b\to\infty$ とすると $V\to\infty$ となってしまう。

例4



$$V=-\int_a^0 \frac{\sigma}{\varepsilon_0}dr=\frac{-\sigma}{\varepsilon_0}\left[r\right]_a^0$$

$$=\frac{\sigma(a-0)}{\varepsilon_0}=\frac{\sigma a}{\varepsilon_0}=\frac{Qa}{S\varepsilon_0}$$

$$Q=\underbrace{\varepsilon_0\frac{S}{a}}_{C:\text{静電容量}}V$$

おまけ 例5

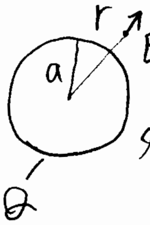
$a<r$ の時 $4\pi r^2 E=\frac{1}{\varepsilon_0}\cdot\rho\frac{4}{3}\pi a^3$

$$E=\frac{\frac{4}{3}\pi a^3\rho}{4\pi\varepsilon_0 r^2}=\frac{a^3\rho}{3\varepsilon_0 r^2}$$

一様に分布 $r<a$ の時

$$4\pi r^2 E=\frac{1}{\varepsilon_0}\cdot\rho\frac{4}{3}\pi r^3 \quad \therefore E=\frac{\rho r}{3\varepsilon_0}$$

例5 導体球殻にQ(C)を与えた時



$a<r$の時　例1と同じ

$r<a$の時　$4\pi r^2 E = \frac{0}{\varepsilon_0}$　$\therefore E=0$

外部からの電磁波の影響を受けない。

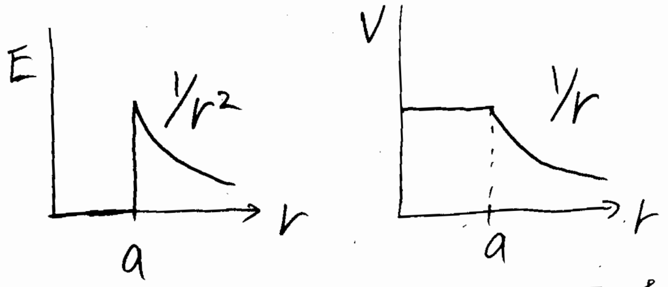
例6 導体球にQ(C)を与えた時

$a<r$の時　例1と同じ

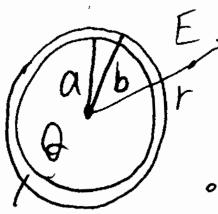
$r<a$の時　$4\pi r^2 E = \frac{q}{\varepsilon_0}$と考える。

$E \neq 0$の時、電荷は力を受けて動き、結局$E=0$となる。よって$q=0$となる。

→Qは導体球表面のみに存在する。



例7 点電荷Qが導体球殻の中にある時



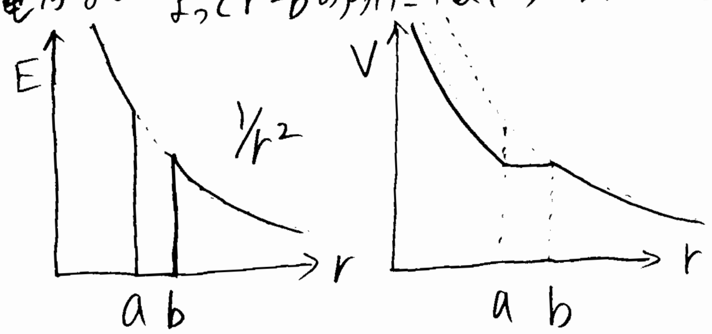
電荷なし

・$r<a$の時　例1と同じ

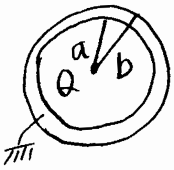
・$a<r<b$の時　$E=0$となるから$r=a$に$-Q$(C)が誘起される

・$b<r$の時　例1と同じ

よって$r=b$の所に$+Q$(C)が誘起される。



例8 例7で導体球殻が接地されている時



・$r<a$の時　例7と同じ

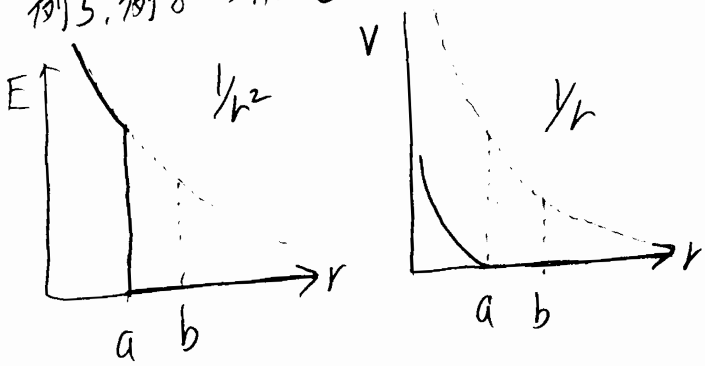
・$a<r<b$の時　例7と同じ

$-Q$(C)は大地から流入する。

・$b<r$の時　$4\pi r^2 E = \frac{Q-Q}{\varepsilon_0} = 0$，$\therefore E=0$

導体球内で発生した電磁波は外へ影響を与えない。

例5，例8 → 静電遮へい(シールド)という。



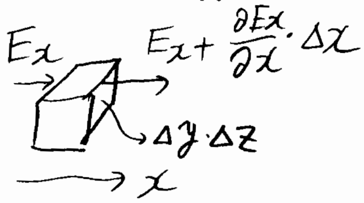
7

ガウスの定理（微分形）

$$\oint_S \boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{n}\,dS = \frac{1}{\varepsilon_0}\int_V \rho\,dv \xrightarrow{\text{微小体積}} \oint_S \boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{n}\,dS = \frac{1}{\varepsilon_0}\rho\,\Delta v$$

$$\frac{1}{\Delta v}\oint_S \boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{n}\,dS \xrightarrow{\Delta v\to 0} \mathrm{div}\,\boldsymbol{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

微小体積として立方体を考える。



$$\oint_S \boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{n}\,dS = -E_x\Delta y\Delta z + \left(E_x+\frac{\partial E_x}{\partial x}\Delta x\right)\Delta y\Delta z$$
$$-E_y\Delta x\Delta z + \left(E_y+\frac{\partial E_y}{\partial y}\Delta y\right)\Delta x\Delta z$$
$$-E_z\Delta x\Delta y + \left(E_z+\frac{\partial E_z}{\partial z}\Delta z\right)\Delta x\Delta y$$
$$= \frac{\partial E_x}{\partial x}\Delta x\Delta y\Delta z + \frac{\partial E_y}{\partial y}\Delta x\Delta y\Delta z + \frac{\partial E_z}{\partial z}\Delta x\Delta y\Delta z$$
$$= \left(\frac{\partial E_x}{\partial x}+\frac{\partial E_y}{\partial y}+\frac{\partial E_z}{\partial z}\right)\Delta v \qquad \therefore\ \mathrm{div}\,\boldsymbol{E} = \frac{\partial E_x}{\partial x}+\frac{\partial E_y}{\partial y}+\frac{\partial E_z}{\partial z}$$

$\oint_S \boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{n}\,dS = \mathrm{div}\,\boldsymbol{E}\,\Delta v$ を多数よせ集めると

$$\oint_S \boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{n}\,dS = \int_V \mathrm{div}\,\boldsymbol{E}\,dv$$

一般のガウスの定理（発散の定理）

$$\oint_S \boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{n}\,dS = \frac{1}{\varepsilon_0}\int_V \rho\,dv \xrightarrow{\text{発散の定理}} \int_V \mathrm{div}\,\boldsymbol{E}\,dv = \frac{1}{\varepsilon_0}\int_V \rho\,dv$$

よって $\mathrm{div}\,\boldsymbol{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$ （ガウスの定理 微分形）

→ ガウスの定理 積分形

$\mathrm{div}\,\boldsymbol{E}$ は $\nabla\cdot\boldsymbol{E}$ とも書く　$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x},\frac{\partial}{\partial y},\frac{\partial}{\partial z}\right)$

⑧

ポアソンの方程式

$$\mathrm{div}\,\mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (\rho \leftrightarrow \mathbf{E}), \qquad \mathbf{E} = -\mathrm{grad}\,V \quad (\mathbf{E} \leftrightarrow V)$$

$$\mathrm{div}\,\mathrm{grad}\,V = -\frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (V \longleftrightarrow \rho)$$ ポアソンの方程式

↳ $$\nabla\cdot\nabla V = \nabla^2 V \quad \left(= \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2}\right)$$

∇^2 を Δ と書いてラプラシアンと呼ぶ

ポアソンの方程式 $\Delta V = -\dfrac{\rho}{\varepsilon_0}$

特に $\rho = 0$ の時，ラプラスの方程式と呼ぶ $\Delta V = 0$

一次元では

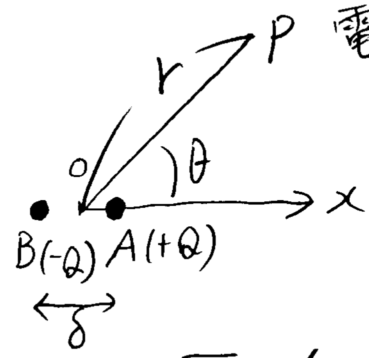
$$\frac{dE}{dx} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \qquad E = -\frac{dV}{dx} \Rightarrow \frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon_0}$$ ポアソンの方程式

ポワソンは魚ですがボアソンは飲み物となります。
Poisson　　Boisson

$$\mathrm{div}\,(k\mathbf{E}) = \frac{\partial kE_x}{\partial x} + \frac{\partial kE_y}{\partial y} + \frac{\partial kE_z}{\partial z} = k\,\mathrm{div}\,\mathbf{E} + \frac{\partial k}{\partial x}E_x + \frac{\partial k}{\partial y}\cdot E_y + \frac{\partial k}{\partial z}E_z$$

$$= k\,\mathrm{div}\,\mathbf{E} + (\mathrm{grad}\,k)\cdot\mathbf{E}$$ となることがわかる。

⑨



電気双極子

P点における電位を求める.

APの長さを求めたい.

$$\overline{AP}^2 = r^2 + \left(\frac{\delta}{2}\right)^2 - 2r\frac{\delta}{2}\cos\theta \quad (余弦定理) \quad \left(\frac{\delta}{2}\right)^2 \fallingdotseq 0 より$$

$$\overline{AP} \fallingdotseq (r^2 - r\delta\cos\theta)^{1/2} = r\left(1 - \frac{\delta\cos\theta}{r}\right)^{1/2} \quad r \gg \delta\cos\theta だから$$

$$\fallingdotseq r\left(1 - \frac{\delta\cos\theta}{2r}\right) = r - \frac{\delta}{2}\cos\theta$$

同様に

$$\overline{BP}^2 = r^2 + \left(\frac{\delta}{2}\right)^2 - 2r\frac{\delta}{2}\cos(\pi - \theta) = r^2 + \left(\frac{\delta}{2}\right)^2 + 2r\frac{\delta}{2}\cos\theta \quad だから$$

$$\overline{BP} \fallingdotseq r + \frac{\delta}{2}\cos\theta$$

$$V_p = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0\left(r - \frac{\delta}{2}\cos\theta\right)} + \frac{-Q}{4\pi\varepsilon_0\left(r + \frac{\delta}{2}\cos\theta\right)} = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{2\cdot\frac{\delta}{2}\cos\theta}{r^2 - \underbrace{\left(\frac{\delta\cos\theta}{2}\right)^2}_{無視}}$$

$$\fallingdotseq \frac{Q\delta\cos\theta}{4\pi\varepsilon_0 r^2} = \underbrace{\frac{p\cos\theta}{4\pi\varepsilon_0 r^2}}_{(極座標)} \quad p = Q\delta : 双極子モーメント$$

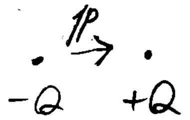
☆ $\theta = \frac{\pi}{2}$ では V_p は 0 となる。

☆ 同じ r において $\theta = 0$ で V_p 最大, $\theta = \pi$ で V_p 最小 となる。

☆ 双極子では V_p は $\propto \frac{1}{r}$ とならず $\propto \frac{1}{r^2}$ となる。

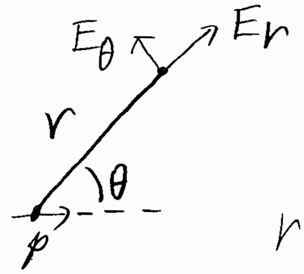
☆ p は Q と δ の積で決まる。

双極子モーメントをベクトル $\boldsymbol{p}$ で表わすと $|\boldsymbol{p}| = Q\cdot\delta$ である。



$$V_p = \frac{pr\cos\theta}{4\pi\varepsilon_0 r^3} = \underbrace{\frac{\boldsymbol{p}\cdot\boldsymbol{r}}{4\pi\varepsilon_0 r^3}}_{(直交座標)}$$ と表わすことができる。

⑩



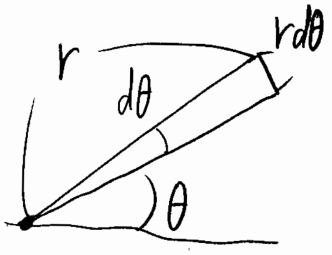
電界を求める。

$\mathbb{E} = -\nabla V = \left(-\frac{\partial V}{\partial x}, -\frac{\partial V}{\partial y}\right)$ であるがここでは、

r方向とθ方向に分けて(極座標)考える。

* $E_r = -\frac{\partial V}{\partial r} = -\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{p\cos\theta}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\right) = -\frac{p\cos\theta}{4\pi\varepsilon_0}\frac{dr^{-2}}{dr} = -\frac{p\cos\theta}{4\pi\varepsilon_0}\cdot(-2)\frac{1}{r^3}$

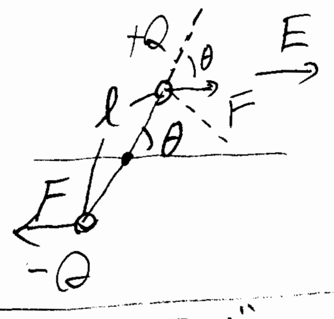
$= \frac{p\cos\theta}{2\pi\varepsilon_0 r^3}$ である。



* $E_\theta = -\frac{dV}{rd\theta} = -\frac{1}{r}\frac{d}{d\theta}\left(\frac{p\cos\theta}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\right) = -\frac{p}{4\pi\varepsilon_0 r^3}\frac{d\cos\theta}{d\theta}$

$= -\frac{p}{4\pi\varepsilon_0 r^3}(-\sin\theta) = \frac{p\sin\theta}{4\pi\varepsilon_0 r^3}$

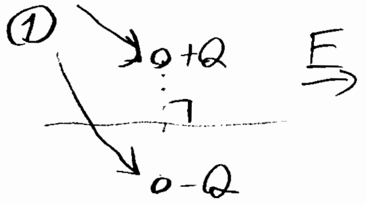
双極子の受ける力(のモーメント)



$N = \left(F\sin\theta\times\frac{l}{2}\right)\times 2 = QEl\sin\theta = pE\sin\theta$

これをベクトルで表わすと $\underline{\mathbf{N} = \mathbf{p}\times\mathbf{E}}$ となる。

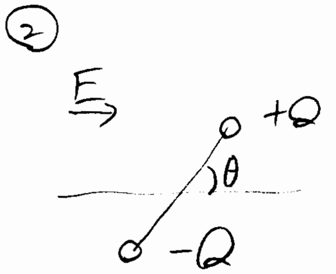
双極子のエネルギー



①→②に要するエネルギー

$U = \int_{\pi/2}^{\theta} pE\sin\varphi\, d\varphi = -pE\left[\cos\varphi\right]_{\pi/2}^{\theta} = -pE\cos\theta$

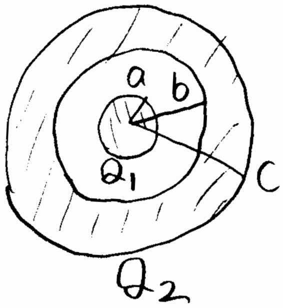
ベクトルで表わすと



$\underline{U = -\mathbf{p}\cdot\mathbf{E}}$ となる。

⑪

電位係数, 容量係数, 誘導係数



左図のように導体球(Q_1に帯電)と導体球殻(Q_2に帯電)がある。V_1, V_2を求めたい。

＊$r=c$の球を閉曲面にとってガウスの定理を用いると

$$4\pi c^2 \cdot E = \frac{Q_1+Q_2}{\varepsilon_0} \quad \therefore E = \frac{Q_1+Q_2}{4\pi\varepsilon_0 c^2}$$

$$\therefore V_2 = \frac{Q_1+Q_2}{4\pi\varepsilon_0 c}$$

＊$r=a$の球を閉曲面にとってガウスの定理を用いると

$$4\pi a^2 E = \frac{Q_1}{\varepsilon_0} \quad \therefore E = \frac{Q_1}{4\pi\varepsilon_0 a^2} \quad \therefore V_1 = \frac{Q_1}{4\pi\varepsilon_0 a}$$ これはうそ!

$r=c$における電位は $V_2 = \frac{Q_1+Q_2}{4\pi\varepsilon_0 c}$ でこれは$r=b$における電位でもある。

$$V_1 = V_2 - \int_b^a \frac{Q_1}{4\pi\varepsilon_0 r^2}dr = V_2 - \frac{Q_1}{4\pi\varepsilon_0}\left[\frac{1}{-1}r^{-1}\right]_b^a$$

$$= V_2 - \frac{Q_1}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{b}-\frac{1}{a}\right) = \frac{Q_1}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{a}-\frac{1}{b}+\frac{1}{c}\right) + \frac{Q_2}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{1}{c}$$

まとめると

$$\begin{cases} V_1 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{a}-\frac{1}{b}+\frac{1}{c}\right)Q_1 + \frac{1}{4\pi\varepsilon_0 c}Q_2 \\ V_2 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0 c}Q_1 + \frac{1}{4\pi\varepsilon_0 c}Q_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \end{pmatrix}}_{\text{電位係数}(1/F)} \begin{pmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} q_{11} & q_{12} \\ q_{21} & q_{22} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \end{pmatrix}$$

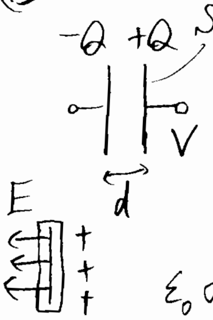
対角要素→容量係数 (F)
非対角要素→誘導係数

どちらも対称行列となる→相反性

※ $Q_1=q$, $Q_2=-q$の場合 $V_1 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{a}-\frac{1}{b}\right)q$, $V_2=0$となる。

⑫

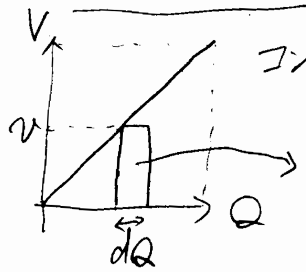
静電容量



$Q=CV$ ガウスの定理より $E\cdot S=\frac{Q}{\varepsilon_0}$ ∴ $E=\frac{Q}{\varepsilon_0 S}$ よって $V=Ed=\frac{dQ}{\varepsilon_0 S}$

$Q=\frac{\varepsilon_0 S}{d}V \rightarrow C$：静電容量 単位F：ファラッド　$\boxed{C=\varepsilon\frac{S}{d}}$ 覚える！

ε_0の単位は？ $F=\square\frac{m^2}{m}$ より $\square=F/m$

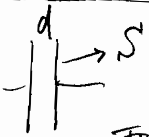


コンデンサに蓄えられるエネルギー

$U=QV$と思いきや 実は $\frac{1}{2}QV$となる。

$dU=v\cdot dQ$　　$U=\int dU=\int v\,dQ=\frac{1}{2}QV$

$Q=CV$より $U=\frac{1}{2}CV^2=\frac{Q^2}{2C}$ とも表わすことができる。



$$U=\frac{1}{2}QV=\frac{1}{2}CV^2=\frac{1}{2}\frac{\varepsilon_0 S}{d}(dE)^2=\frac{1}{2}\varepsilon_0 S d E^2=\underbrace{Sd}_{\text{体積}}\cdot\underbrace{\frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2}_{\text{単位体積当りのエネルギー}}$$

電界が存在する時の単位体積当りのエネルギーは（エネルギー密度）$\boxed{\frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2}$ となる。

ハイレベル　微小体積dvの電荷はρdvである。

$$dU=\frac{V\cdot\rho dv}{2}\rightarrow U=\frac{1}{2}\int V\rho\,dv=\frac{1}{2}\int V\cdot\varepsilon_0\,\mathrm{div}\,\boldsymbol{E}\,dv$$

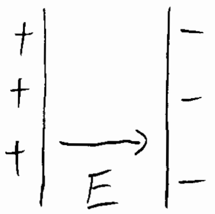
ところで $\mathrm{div}(V\boldsymbol{E})=V\,\mathrm{div}\boldsymbol{E}+\mathrm{grad}V\cdot\boldsymbol{E}$ より $V\,\mathrm{div}\boldsymbol{E}=\mathrm{div}(V\boldsymbol{E})-\mathrm{grad}V\cdot\boldsymbol{E}$

$$U=\frac{\varepsilon_0}{2}\int\mathrm{div}(V\boldsymbol{E})\,dv+\frac{\varepsilon_0}{2}\int\underset{\boldsymbol{E}}{\underset{\parallel}{(-\mathrm{grad}V)}}\cdot\boldsymbol{E}\,dv=\frac{\varepsilon_0}{2}\oint_S V\boldsymbol{E}\cdot\boldsymbol{n}\,dS+\int\frac{\varepsilon_0\boldsymbol{E}^2}{2}dv$$

閉曲面を大きくして全空間を考えると第一項は0となり $\sim r^{-3}$ ↓0 $\sim r^2$

$U=\int\frac{\varepsilon_0\boldsymbol{E}^2}{2}dv$ を得る。　$\frac{\varepsilon_0}{2}\boldsymbol{E}^2$はエネルギー密度を示している。

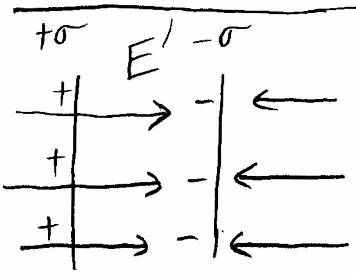
コンデンサの極板にかかる力



面積S, 電荷 σ C/m^2 とする

ガウスの定理を用いてEを求めると $S\cdot E = \dfrac{S\sigma}{\varepsilon_0}$

$\therefore E = \dfrac{\sigma}{\varepsilon_0}$ よって力は $S\sigma \times E = \dfrac{S\sigma^2}{\varepsilon_0}$ 圧力は $\dfrac{\sigma^2}{\varepsilon_0}$ まちがい



$-\sigma$による電界を同じようにして求める。

$E'\cdot 2S = \dfrac{S\sigma}{\varepsilon_0}$ $\therefore E' = \dfrac{\sigma}{2\varepsilon_0}$

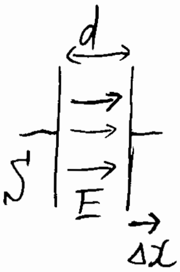
$+\sigma$がうける力は $\sigma\cdot S\times E' = \dfrac{S\sigma^2}{2\varepsilon_0}$ $\therefore$圧力は $\dfrac{\sigma^2}{2\varepsilon_0}$ 正しい

仮想変位による力の求め方

$W = F\cdot x \rightarrow -\Delta W = F\cdot \Delta x \rightarrow F = -\dfrac{\Delta W}{\Delta x}$

↳ エネルギーを減らす方向に力が働く

$\Delta W = F\cdot(-\Delta x)$
力と逆方向に動かすとエネルギーWが増加する



$\Delta W = \dfrac{1}{2}\varepsilon_0 E^2\cdot \Delta x\cdot S = \dfrac{1}{2}\varepsilon_0\left(\dfrac{\sigma}{\varepsilon_0}\right)^2 S\,\Delta x$ （σは一定）

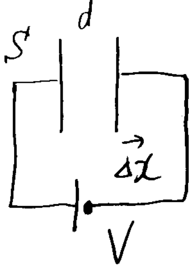
$F = -\dfrac{\Delta W}{\Delta x} = -\dfrac{\sigma^2 S}{2\varepsilon_0}$ 圧力は $-\dfrac{\sigma^2}{2\varepsilon_0}$ となる。

見方を変えると （Q一定, Vは変化）

$W = \dfrac{1}{2}QV = \dfrac{1}{2}\sigma S\cdot\dfrac{\sigma}{\varepsilon_0}d = \dfrac{\sigma^2 S}{2\varepsilon_0}d$

$F = -\left(\dfrac{\partial W}{\partial d}\right)_\sigma = -\dfrac{\sigma^2 S}{2\varepsilon_0}$ 圧力はSで割って $-\dfrac{\sigma^2}{2\varepsilon_0}$

⑭ V一定, Q変化の場合は



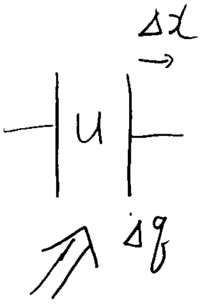
$$W=\frac{1}{2}QV=\frac{1}{2}CV^2=\frac{1}{2}\frac{\varepsilon_0 S}{d}V^2$$

$$F=\left(\frac{\partial W}{\partial d}\right)_V=\frac{\varepsilon_0 S}{2}V^2(-1)\frac{1}{d^2}=-\frac{\varepsilon_0 S}{2}\left(\frac{V}{d}\right)^2=-\frac{\varepsilon_0 S}{2}E^2$$

$$=-\frac{\varepsilon_0 S}{2}\left(\frac{\sigma}{\varepsilon_0}\right)^2=-\frac{\sigma^2 S}{2\varepsilon_0}$$ 圧力はSで割って $-\dfrac{\sigma^2}{2\varepsilon_0}$

→ Q一定の場合と異なるのは Qの流れによるエネルギーの出入りがあるから。

説明

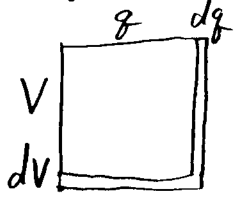


$$\Delta q\cdot V=F\cdot\Delta x+\Delta U$$

$$dq\cdot V=F\cdot dx+dU$$

☆外から電荷としてエネルギーが流入
☆機械的仕事と静電エネルギーの増加に使われる。

$$d(qV)=q\,dV+V\,dq$$



ところで $dU=d\left(\frac{1}{2}qV\right)=\frac{1}{2}V\,dq+\frac{1}{2}q\,dV$

$$F\,dx=dq\cdot V-dU=dq\cdot V-\left(\frac{1}{2}V\,dq+\frac{1}{2}q\,dV\right)$$

$$=\frac{1}{2}V\,dq-\frac{1}{2}q\,dV$$

☆$dq=0$ (q一定)の時 $F\,dx=-\frac{1}{2}q\,dV$ $\therefore F=-\frac{q}{2}\left(\frac{dV}{dx}\right)_q$

$$\Rightarrow F=-\left[\frac{d\left(\frac{qV}{2}\right)}{dx}\right]_q=-\left(\frac{dU}{dx}\right)_q$$

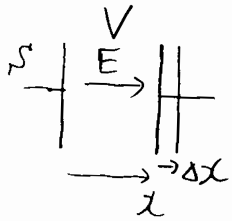
☆$dV=0$ (V一定)の時 $F\,dx=\frac{1}{2}V\,dq$ $\therefore F=\frac{1}{2}V\left(\frac{dq}{dx}\right)_V$

$$\Rightarrow F=\left[\frac{d\left(\frac{Vq}{2}\right)}{dx}\right]_V=\left(\frac{dU}{dx}\right)_V$$

⑭ 仮想変位による力の求め方

＊ Q一定では　圧力は $-\dfrac{\sigma^2}{2\varepsilon_0}$ となる。

＊ V一定では



$$\Delta W=\frac{\varepsilon_0}{2}\left(\frac{V}{x+\Delta x}\right)^2 S(x+\Delta x)-\frac{\varepsilon_0}{2}\left(\frac{V}{x}\right)^2 S x=\frac{\varepsilon_0 V^2 S}{2}\left(\frac{1}{x+\Delta x}-\frac{1}{x}\right)$$

$\Delta W=-F\Delta x$ に代入して

$$F=-\frac{\Delta W}{\Delta x}=-\frac{\varepsilon_0 V^2 S}{2}\,\frac{\frac{1}{x+\Delta x}-\frac{1}{x}}{\Delta x}=-\frac{\varepsilon_0 V^2 S}{2}\,\frac{-1}{(x+\Delta x)x}$$

$$\Rightarrow \frac{\varepsilon_0 V^2 S}{2}\,\frac{1}{x^2}=\frac{\varepsilon_0 S}{2}\left(\frac{V}{x}\right)^2=\frac{\varepsilon_0 S}{2}E^2=\frac{\varepsilon_0 S}{2}\left(\frac{\sigma}{\varepsilon_0}\right)^2=\frac{S\sigma^2}{2\varepsilon_0}$$

$\Delta x\to 0$ とする

よって圧力は $\dfrac{\sigma^2}{2\varepsilon_0}$ となりQ一定と反対向きの力となってしまう。

○V一定では電荷の流入(出)がおこる。($\delta Q\cdot V$ のエネルギが流入)

$\Delta W=F(-\Delta x)+\delta Q V$ と考えなければならない。

$$\Delta Q=\varepsilon_0\frac{S}{x+\Delta x}\cdot V-\varepsilon_0\frac{S}{x}V=\varepsilon_0 S V\left(\frac{1}{x+\Delta x}-\frac{1}{x}\right)$$

$(Q=CV)$

$$\frac{\varepsilon_0 V^2 S}{2}\left(\frac{1}{x+\Delta x}-\frac{1}{x}\right)=-F\Delta x+\varepsilon_0 S V^2\left(\frac{1}{x+\Delta x}-\frac{1}{x}\right)$$

$$F\Delta x=\frac{\varepsilon_0 S V^2}{2}\left(\frac{1}{x+\Delta x}-\frac{1}{x}\right)=\frac{\varepsilon_0 S V^2}{2}\,\frac{-\Delta x}{x(x+\Delta x)}$$

$$F=-\frac{\varepsilon_0 S V^2}{2}\,\frac{1}{x^2}$$ ($\Delta x\to 0$ とした)

$$=-\frac{\varepsilon_0 S}{2}\left(\frac{V}{x}\right)^2=-\frac{\varepsilon_0 S}{2}E^2=-\frac{\varepsilon_0 S}{2}\left(\frac{\sigma}{\varepsilon_0}\right)^2=-\frac{\sigma^2 S}{2\varepsilon_0}$$

よって圧力は $-\dfrac{\sigma^2}{2\varepsilon_0}$ 　Q一定と同じ結果を与える。

⑮

静電容量の計算

$Q = CV$　同じVでもCが大きい方がQが大きい。

Cが大きい → 多くのQを蓄えることができる。

例1

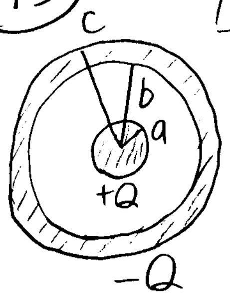
$$V = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 a} \rightarrow Q = \underbrace{4\pi\varepsilon_0 a}_{C} \cdot V$$

aが大きいほどCは大きくなる。

例2

$C = \varepsilon_0 \dfrac{S}{d}$ となる　既習

例3



同心球　$a < r < b$ における電界は（$c < r$ には電界はない）

$$4\pi r^2 E = \frac{Q}{\varepsilon_0} \quad \therefore E = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$$

$$V = -\int_b^a \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r^2} dr = -\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0}\int_b^a r^{-2} dr$$

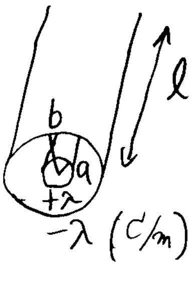
$$= -\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0}\Big[(-1)\, r^{-1}\Big]_b^a = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{b}\right)$$

$$\therefore Q = \underbrace{\frac{4\pi\varepsilon_0}{\frac{1}{a} - \frac{1}{b}}}_{C} V \qquad C = \frac{4\pi\varepsilon_0}{\frac{1}{a} - \frac{1}{b}}.$$

☆ cは無関係

☆ $b \to \infty$ とすると例1と同じとなる。

例4　同心円筒



$a < r < b$ における電界は

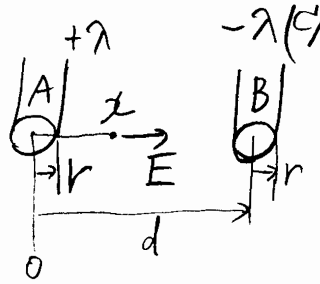
$$2\pi r \cdot l\, E = \frac{\lambda l}{\varepsilon_0} \quad \therefore E = \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0 r}$$

$$V = -\int_b^a \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0 r} dr = -\frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0}\int_b^a r^{-1} dr$$

$$= -\frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0}\Big[\ln r\Big]_b^a = -\frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0}\ln\frac{a}{b} = \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0}\ln\frac{b}{a}$$

よって　$\lambda = \underbrace{2\pi\varepsilon_0 \dfrac{1}{\ln b/a}}_{静電容量} V$

⑯ 例5 送電線　xの場所における電界を求める。



Aによる電界 $\dfrac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0 x}$，Bによる電界 $\dfrac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0(d-x)}$

λが均一に分布と仮定 $(r \ll d)$

$$\therefore E = \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{x} + \frac{1}{d-x}\right)$$

$$V = -\int_{d-r}^{r} E\,dx = \int_{r}^{d-r} E\,dx = \int_{r}^{d-r} \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{x} + \frac{1}{d-x}\right)dx$$

$$= \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0}\Big[\ln x - \ln(d-x)\Big]_{r}^{d-r} = \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0}\left[\ln\frac{x}{d-x}\right]_{r}^{d-r}$$

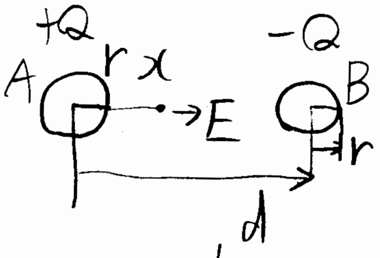
$$= \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0}\left(\ln\frac{d-r}{r} - \ln\frac{r}{d-r}\right) = \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0}\ln\frac{d-r}{r}\cdot\frac{d-r}{r}$$

$$= \frac{\lambda}{\pi\varepsilon_0}\ln\frac{d-r}{r} \fallingdotseq \lambda\cdot\frac{\ln\frac{d}{r}}{\pi\varepsilon_0} \quad (d \gg r)$$

$$\therefore \lambda = \frac{\pi\varepsilon_0}{\ln\frac{d}{r}}V$$

$$\frac{\pi\varepsilon_0}{\ln\frac{d}{r}} = C \ (\mathrm{F/m})$$

例6 2つの導体球



Aによる電界 $\dfrac{Q}{4\pi\varepsilon_0 x^2}$，Bによる電界 $\dfrac{Q}{4\pi\varepsilon_0(d-x)^2}$

$$E = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{x^2} + \frac{1}{(d-x)^2}\right)$$

$$V = \int_{r}^{d-r}\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{x^2} + \frac{1}{(d-x)^2}\right)dx = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0}\left[-\frac{1}{x} + \frac{1}{d-x}\right]_{r}^{d-r}$$

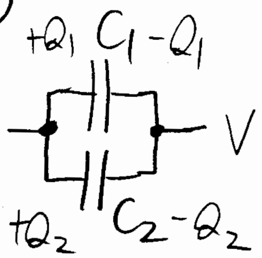
$$= \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0}\left\{\left(-\frac{1}{d-r} + \frac{1}{r}\right) - \left(-\frac{1}{r} + \frac{1}{d-r}\right)\right\} = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{2}{r} - \frac{2}{d-r}\right)$$

$$= \frac{Q}{2\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{d-r}\right) \fallingdotseq \frac{Q}{2\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{d}\right) \quad \therefore Q = \frac{2\pi\varepsilon_0}{\frac{1}{r} - \frac{1}{d}}V$$

$$\frac{2\pi\varepsilon_0}{\frac{1}{r} - \frac{1}{d}} = C$$

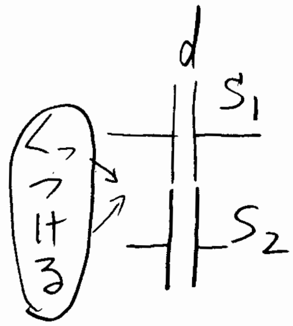
(18)

コンデンサの並列接続



$Q_1 = C_1 V,\quad Q_2 = C_2 V$

$\underbrace{Q_1 + Q_2}_{Q\text{とする}} = (C_1 + C_2)V \Rightarrow Q = CV$ ただし $\boxed{C = C_1 + C_2}$

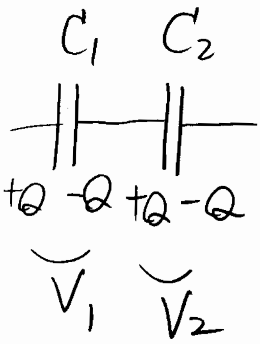


$C_1 = \varepsilon_0 \dfrac{S_1}{d}$

$C_2 = \varepsilon_0 \dfrac{S_2}{d}$

$C = \varepsilon_0 \dfrac{S_1 + S_2}{d} = C_1 + C_2$

コンデンサの直列接続

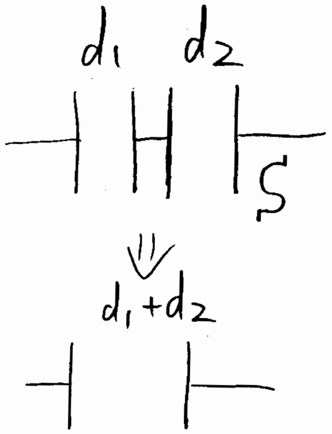


$Q = C_1 V_1,\quad Q = C_2 V_2$

$V = V_1 + V_2 = \dfrac{Q}{C_1} + \dfrac{Q}{C_2} = Q\left(\dfrac{1}{C_1} + \dfrac{1}{C_2}\right)$

$Q = \underbrace{\dfrac{1}{\dfrac{1}{C_1} + \dfrac{1}{C_2}}}_{=C} V$

$\therefore\ \boxed{C = \dfrac{1}{\dfrac{1}{C_1} + \dfrac{1}{C_2}}}$

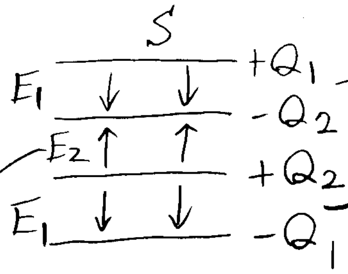


$C = \dfrac{1}{\dfrac{1}{C_1} + \dfrac{1}{C_2}} = \dfrac{1}{\dfrac{d_1}{\varepsilon_0 S} + \dfrac{d_2}{\varepsilon_0 S}} = \dfrac{\varepsilon_0 S}{d_1 + d_2}$

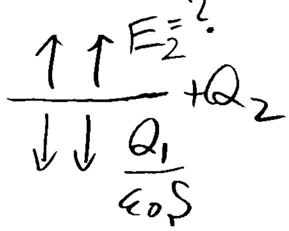
$= \varepsilon_0 \dfrac{S}{d_1 + d_2}$

並列，直列の合成容量の計算は合成抵抗とは逆の計算となる。

⑰ 例7 積層のコンデンサ



$$S \cdot E_1 = \frac{Q_1}{\varepsilon_0} \quad \therefore E_1 = \frac{Q_1}{\varepsilon_0 S}$$



$$S \cdot \frac{Q_1}{\varepsilon_0 S} + S E_2 = \frac{Q_2}{\varepsilon_0}$$

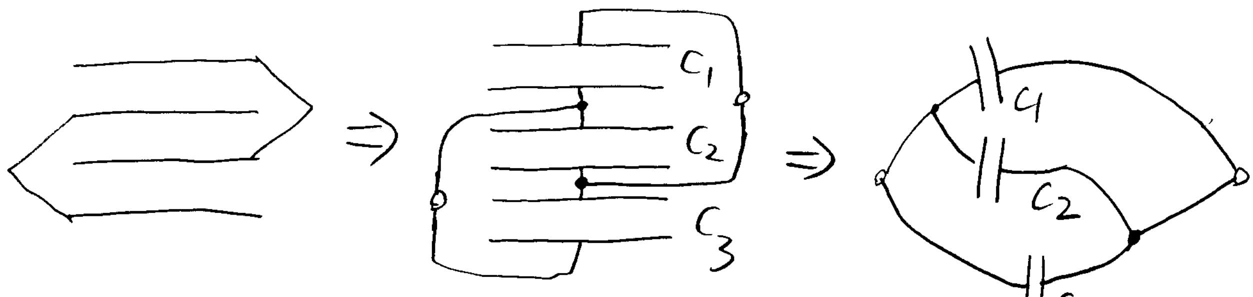
$$S E_2 = \frac{Q_2 - Q_1}{\varepsilon_0} \quad \therefore E_2 = \frac{Q_2 - Q_1}{S \varepsilon_0}$$

$$V_1 = E_1 \cdot d = \frac{Q_1 d}{\varepsilon_0 S}, \quad V_2 = E_2 d = \frac{Q_2 - Q_1}{S \varepsilon_0} d$$

$V_1 = V_2$ より $Q_1 = Q_2 - Q_1 \quad \therefore 2Q_1 = Q_2$

$$Q = Q_1 + Q_2 = Q_1 + 2Q_1 = 3Q_1$$

$$V = V_1 = \frac{Q_1 d}{\varepsilon_0 S} = \frac{d}{\varepsilon_0 S} \cdot \frac{Q}{3} \quad \therefore Q = \underbrace{3 \cdot \frac{\varepsilon_0 S}{d}}_{=C} V$$

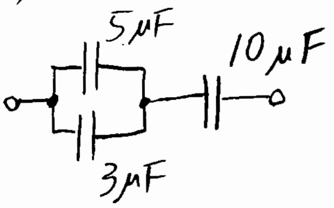


つまり Cを3つ並列にしたものである。

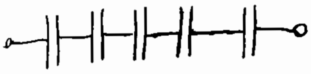
$C = \varepsilon_0 \frac{S}{d}$ の3倍となっている。

問題集

(1) 合成容量を求めよ.

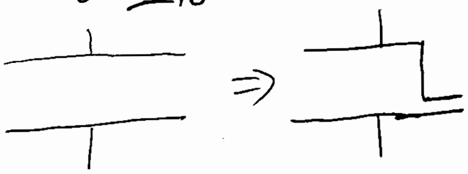


10μF を5つ



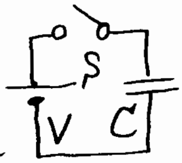
(2) 10μFのコンデンサの極板間距離を5倍にすると容量はいくらになりますか。

(3) 60μFのコンデンサにおいて電極面積の20%の部分がへこんで極板間隔が$\frac{1}{10}$になってしまいました。容量はいくらになりますか。



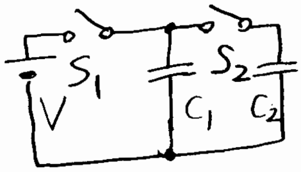
(4) ◦Sをとじた時Cにたまる電荷は?

◦Sをひらき、Cの電極間隔を3倍にするとC両端の電圧は?



(5)

◦S_1をとじた時C_1にたまる電荷は?



◦S_1をひらき、S_2をとじた時C_1両端の電圧はいくらか?

◦この時C_1, C_2にたまる電荷はそれぞれいくらか。

◦S_2をひらき、S_1をとじるとC_1の電荷はいくらか。

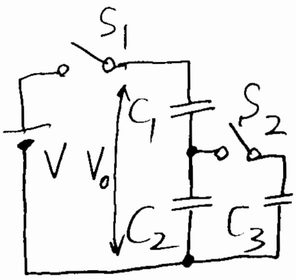
◦S_1をひらきS_2をとじるとC_1両端の電圧はいくらか。

◦この時C_1,C_2の電荷はそれぞれいくらか。

◦上の操作を無限回繰り返すとC_2にたまる電荷はいくらか。

20

(6)



。S_1をとじた時C_2の電荷は?

。S_1をひらきS_2をとじるとC_2の電荷は?

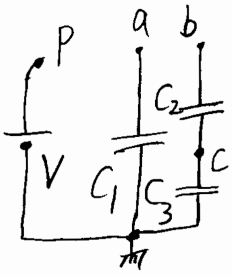
。この時C_1, C_2の電圧はそれぞれいくら?

。この時V_0はVの何倍になりますか。

(7) (6)の回路でS_1をとじて, S_1をひらかないでS_2をとじるとC_2の電荷はいくらになりますか。又C_2の電圧は?

(8) (6)の回路でS_1とS_2をとじてS_1をひらき, C_3の電極間隔を2倍にするとC_3の電荷と電圧はいくらになりますか。

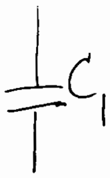
(9)。端子Pをbに接触させた。
C_3の電圧は?



。Pをbから離し, cに接触させた。
bの電位は?

。Pをcから離しa, bを接触させた。
b, cの電位は?

(10)



。C_1にQをためて極板間をn倍にしたら電圧は何倍?

。C_1に電圧Vをかけて極板間をn倍にしたら電荷は何倍?

。C_1に並列にC_2をつなぎ, C_1の極板間をn倍にしたら容量はどうなりますか。