

## 2.5 誘電体の境界条件

- 2種類の誘電体，誘電体 1 と誘電体 2，の境界面を考える．それぞれの誘電率を  $\epsilon_1$ ， $\epsilon_2$  とし，境界面に電荷はないものとする．

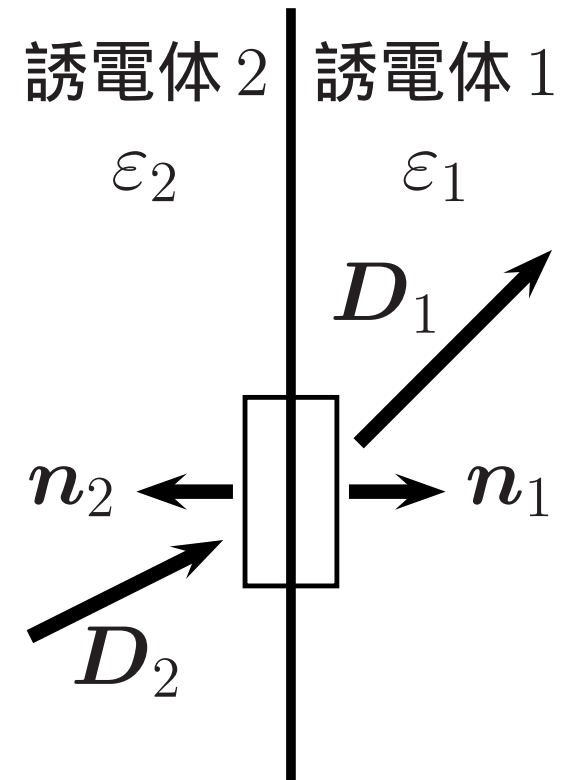
- 境界面を囲む微小なうすい円筒 (底面積  $\Delta S$ ) を考えて，ガウスの法則を適用すると，

$$(1) \quad \int \mathbf{D}(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{S} = 0.$$

厚さがゼロの極限で，(側面からの寄与は無視できる)

$$(2) \quad \mathbf{D}_1 \cdot \mathbf{n}_1 \Delta S + \mathbf{D}_2 \cdot \mathbf{n}_2 \Delta S = 0.$$

ここで， $\mathbf{D}_i$  は誘電体  $i$  中の電束密度， $\mathbf{n}_i$  は境界面の誘電体  $i$  方向の単位法線ベクトル．



$$(3) \quad \mathbf{n}_1 = -\mathbf{n}_2 (\equiv \mathbf{n})$$

ゆえ、

$$(4) \quad (\mathbf{D}_1 - \mathbf{D}_2) \cdot \mathbf{n} = 0.$$

従って、 $D$  の法線成分は連続 となる。 $E$  については、

$$(5) \quad (\varepsilon_1 \mathbf{E}_1 - \varepsilon_2 \mathbf{E}_2) \cdot \mathbf{n} = 0$$

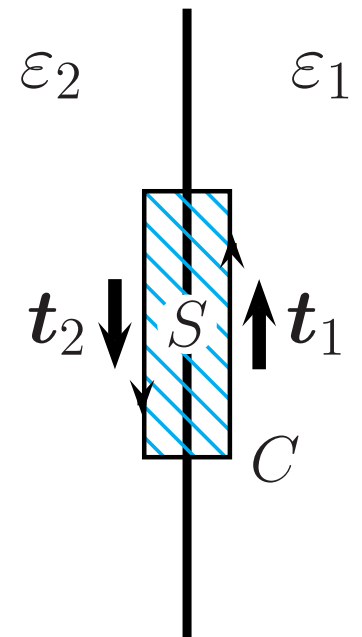
ゆえ、 $\varepsilon_1 \neq \varepsilon_2$  なら、 $E$  の法線成分は不連続 となる。

○ 境界面にまたがる微小な長方形  $S$  とその周  $C$  を考える。 $\nabla \times \mathbf{E} = 0$  から、

$$(6) \quad 0 = \int_S \nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{S} = \int_C \mathbf{E}(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{r}.$$

境界面に垂直な辺の長さをゼロにする極限を考えると、

$$(7) \quad \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{t}_1 \Delta r + \mathbf{E}_2 \cdot \mathbf{t}_2 \Delta r = 0.$$



ただし,  $E_i$  は誘電体  $i$  中の電場,  $t_i$  は誘電体  $i$  での長方形  $S$  の境界面に平行な辺の方向の単位ベクトル (境界面の接ベクトル),  $\Delta r$  は境界面に平行な辺の長さ.

$$(8) \quad t_1 = -t_2 (\equiv t)$$

ゆえ,

$$(9) \quad (E_1 - E_2) \cdot t = 0.$$

すなわち,  $E$  の接線成分は連続. また,

$$(10) \quad \left( \frac{D_1}{\varepsilon_1} - \frac{D_2}{\varepsilon_2} \right) \cdot t = 0$$

より,  $D$  の接線成分は不連続.

● ポテンシャルについては, 境界面で  $D$  あるいは  $E$  の法線成分が有限である限り,

$$(11) \quad \phi_1 = \phi_2.$$

- $D$  あるいは  $E$  の屈折の法則

境界面の誘電体 1 方向の法線ベクトルと  $D_{1(2)}$  がなす角を  $\theta_{1(2)}$  とする． $D$  の法線成分が連続ゆえ，

$$(12) \quad |D_1| \cos \theta_1 = |D_2| \cos \theta_2 .$$

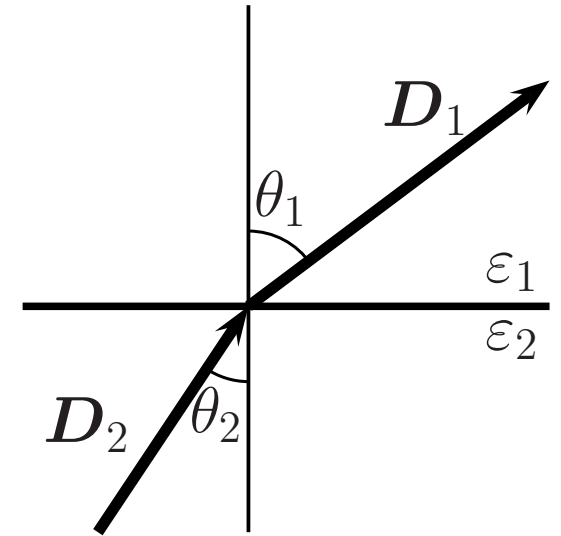
$E$  の接線成分の連続性より，

$$(13) \quad \frac{|D_1|}{\varepsilon_1} \sin \theta_1 = \frac{|D_2|}{\varepsilon_2} \sin \theta_2 .$$

よって，

$$(14) \quad \frac{1}{\varepsilon_1} \frac{\sin \theta_1}{\cos \theta_1} = \frac{1}{\varepsilon_2} \frac{\sin \theta_2}{\cos \theta_2} .$$

$$(15) \quad \frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_2} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} .$$



● 例題 1: 2 種類の誘電体を含む平行板コンデンサー

極板の面積を  $A$  , 極板間の距離を  $d$  とする . 誘電体 1(誘電率  $\varepsilon_1$ ) の層 , 誘電体 2(誘電率  $\varepsilon_2$ ) の層 , 再び誘電体 1 の層と 3 つの極板に平行な誘電体の層で極板間を満たす . 誘電体 2 の層の厚さを  $r$  とする . 各極板に  $\pm Q$  の電荷を与えると電場は極板に垂直で各誘電体層で一定 . 各層の電場 (電束密度) の大きさを  $E_1 , E_2 , E_3 (D_1 , D_2 , D_3)$  とすると ,  $D$  の法線成分は連続ゆえ ,

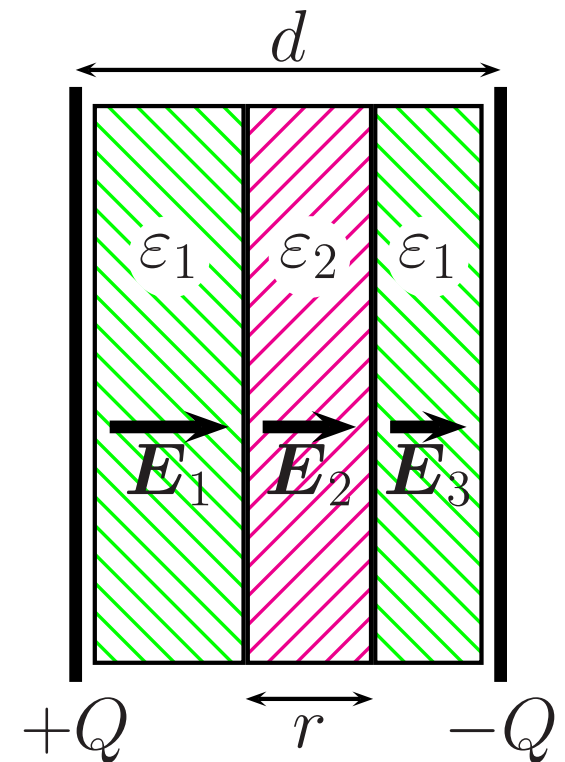
$$(16) \quad D_1 = D_2 = D_3 = \frac{Q}{A} .$$

$E$  で書くと ,

$$(17) \quad \varepsilon_1 E_1 = \varepsilon_2 E_2 = \varepsilon_1 E_3 = \frac{Q}{A} .$$

よって ,

$$(18) \quad E_1 = E_3 = \frac{1}{\varepsilon_1} \frac{Q}{A} , \quad E_2 = \frac{1}{\varepsilon_2} \frac{Q}{A} .$$



(電場の接線成分はゼロで境界条件を満たしている.)  
極板間の電位差  $V$  は,

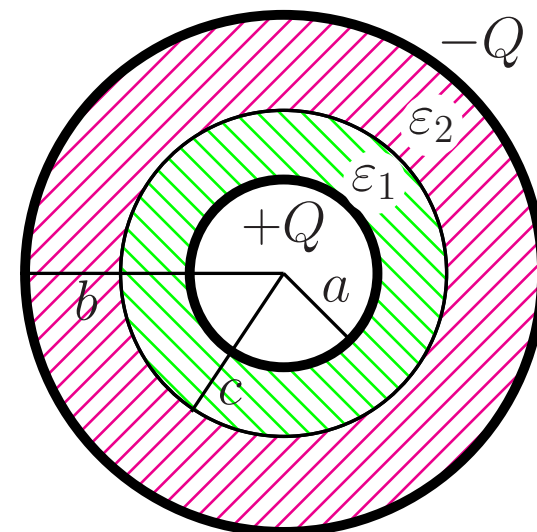
$$(19) \quad V = E_1(d - r) + E_2r = \left( \frac{d - r}{\epsilon_1} + \frac{r}{\epsilon_2} \right) \frac{Q}{A}.$$

静電容量は,

$$(20) \quad C = \frac{Q}{V} = \frac{A}{\frac{d-r}{\epsilon_1} + \frac{r}{\epsilon_2}}.$$

### ● 例題 2: 誘電体を含む球形コンデンサー

○ 同心状に 2 種類の誘電体を詰めた場合:  
内側が誘電体 1, 外側が誘電体 2, 内側の極板の半径  $a$ , 電荷  $+Q$ , 外側の極板の半径  $b$ , 電荷  $-Q$ , 誘電体 1 と誘電体 2 の境界面の半径を  $c$  とする. 電場は球対称で動径方向を向く.



ガウスの法則 (の積分形) を用いると, 誘電体中で半径  $r$  の球面上では,

$$(21) \quad D(r) = \frac{1}{4\pi} \frac{Q}{r^2}.$$

( $D$  の法線成分は連続.) 電場は,

$$(22) \quad E(r) = \begin{cases} \frac{1}{4\pi\varepsilon_1} \frac{Q}{r^2}, & a < r < c, \\ \frac{1}{4\pi\varepsilon_2} \frac{Q}{r^2}, & c < r < b. \end{cases}$$

(電場の接線成分はゼロ.) 電位差は,

$$(23) \quad \begin{aligned} \phi(a) - \phi(b) &= \int_a^b E(r) dr = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_1} \int_a^c \frac{dr}{r^2} + \frac{Q}{4\pi\varepsilon_2} \int_c^b \frac{dr}{r^2} \\ &= \frac{Q}{4\pi} \left[ \frac{1}{\varepsilon_1} \left( \frac{1}{a} - \frac{1}{c} \right) + \frac{1}{\varepsilon_2} \left( \frac{1}{c} - \frac{1}{b} \right) \right]. \end{aligned}$$

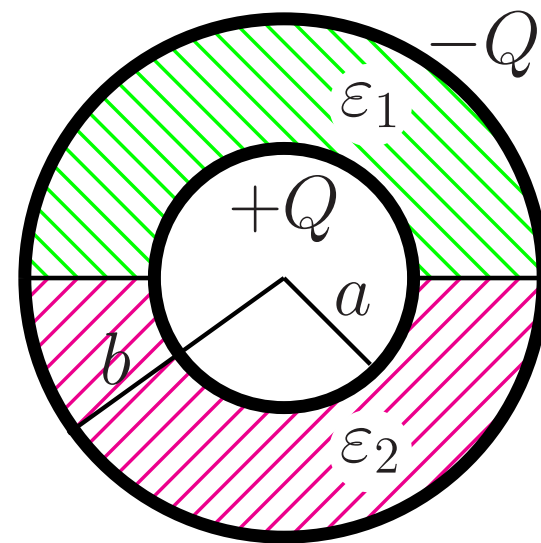
静電容量は、

$$(24) \quad C = \frac{Q}{\phi(a) - \phi(b)} = \frac{4\pi}{\left[ \frac{1}{\varepsilon_1} \left( \frac{1}{a} - \frac{1}{c} \right) + \frac{1}{\varepsilon_2} \left( \frac{1}{c} - \frac{1}{b} \right) \right]}.$$

○ 上下に詰めた場合:

上半分を誘電体 1, 下半分を誘電体 2 で満す. 境界付近を考えれば, 電場の接線成分は連続で, 極板がそれぞれ等電位だから法線成分はない. 従って, 電場は動径方向を向き, 誘電体中で  $r$  のみの関数となっている.  $E = E(r)$ . よって,

$$(25) \quad D(r) = \begin{cases} \varepsilon_1 E(r) & \text{上半分,} \\ \varepsilon_2 E(r) & \text{下半分.} \end{cases}$$





ガウスの法則を半径  $r(a < r < b)$  の球面に適用すると,

$$(26) \quad Q = \int_{\text{上半球面}} \varepsilon_1 E(r) dS + \int_{\text{下半球面}} \varepsilon_2 E(r) dS \\ = 2\pi r^2 \varepsilon_1 E(r) + 2\pi r^2 \varepsilon_2 E(r).$$

よって,

$$(27) \quad E(r) = \frac{1}{2\pi(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} \frac{Q}{r^2}.$$

電位差は

$$(28) \quad \phi(a) - \phi(b) = \frac{Q}{2\pi(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} \int_a^b \frac{dr}{r^2} = \frac{Q}{2\pi(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} \left( \frac{1}{a} - \frac{1}{b} \right).$$

静電容量は,

$$(29) \quad C = 2\pi(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \frac{ab}{b - a}.$$