

# 導体と不導体(誘電体)

周期表

1 1 H	2											13 5 B	14 6 C	15 7 N	16 8 O	17 9 F	18 10 Ne
3 Li	4 Be											13 13 Al	14 14 Si	15 15 P	16 16 S	17 17 Cl	18 18 Ar
11 Na	12 Mg	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 31 Ga	14 32 Ge	15 33 As	16 34 Se	17 35 Br	18 36 Kr
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	*1	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	*2	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Uub	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo

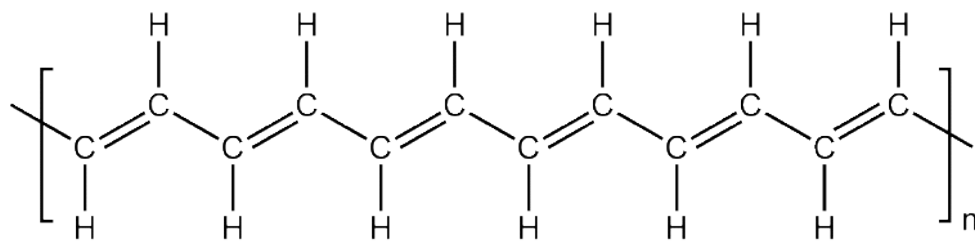
*1 ランタノイド:	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
*2 アクチノイド:	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

- 1 常温で固体
- 金属元素
- アルカリ金属
- 常温で液体
- 半金属元素
- アルカリ土類金属
- 常温で気体
- 非金属元素
- ハロゲン
- 人工元素
- 希ガス
- 遷移元素

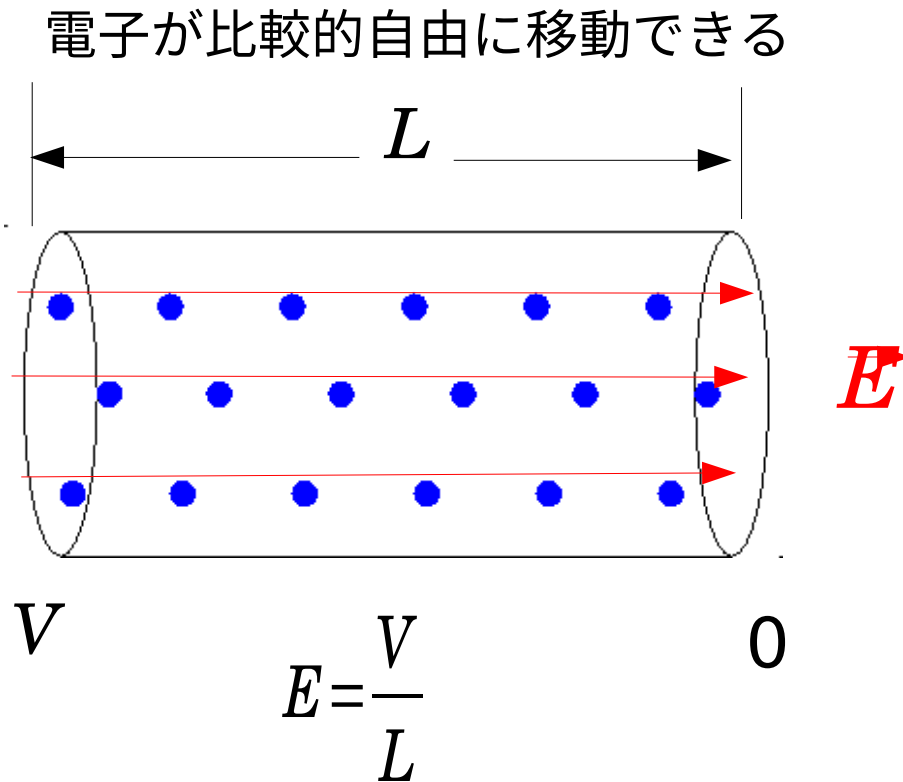
注：ほとんどの有機化合物は不導体。

## ほとんどの有機化合物は不導体

と思っていたら、高伝導率有機化合物が発見された



# 導体



電位差があると、内部に電場ができて電子が移動して電位差を消そうとする。

逆に言うと、**電子の移動が無い状態**では、

導体の内部に電場は存在しない。

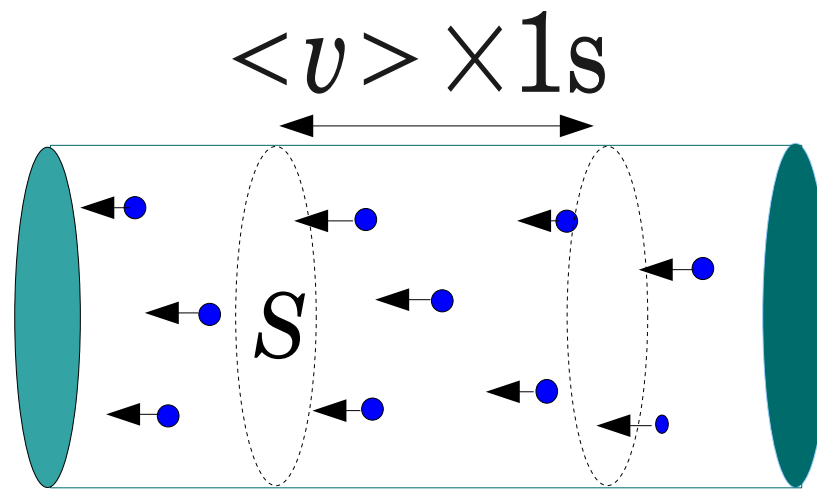
つまり、導体の電位はどこでも一定。

電流を流しつづけるためには、電位差を維持する必要

**==> 起電力**(発電機、電池など)

電流

断面積



単位時間 (1s) に断面を通過する電荷の量 = 体積  $[S \langle v \rangle]$  中の移動できる電荷

(方向も考えて)

$$\vec{I} = -e\rho_e S \langle \vec{v} \rangle$$

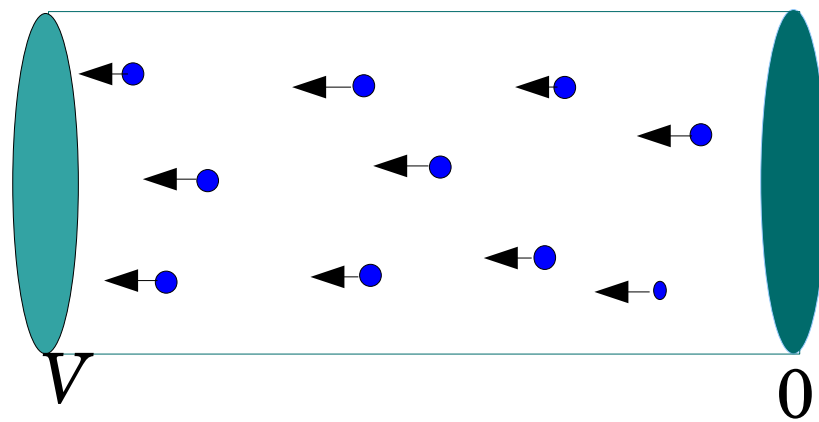
ただし、 $\rho_e$  は移動できる電子(自由電子)の密度

粘性抵抗(速度に比例する抵抗)を仮定すると、 $\langle \vec{v} \rangle = \alpha \vec{E}$

(方向を忘れて、)

ここで $\alpha$  は導体の性質により決まる定数。

$$I = e\rho_e S \cdot \alpha \frac{V}{L} = \frac{S}{L} [e\rho_e \alpha] V$$



$[e\rho_e\alpha]$  は、物質の性質だけで決まり、電気伝導度と呼ばれる。

$$R \equiv \frac{L}{S[e\rho_e\alpha]} \quad \text{とおくと} \quad I = \frac{V}{R} \quad (\text{オームの法則})$$

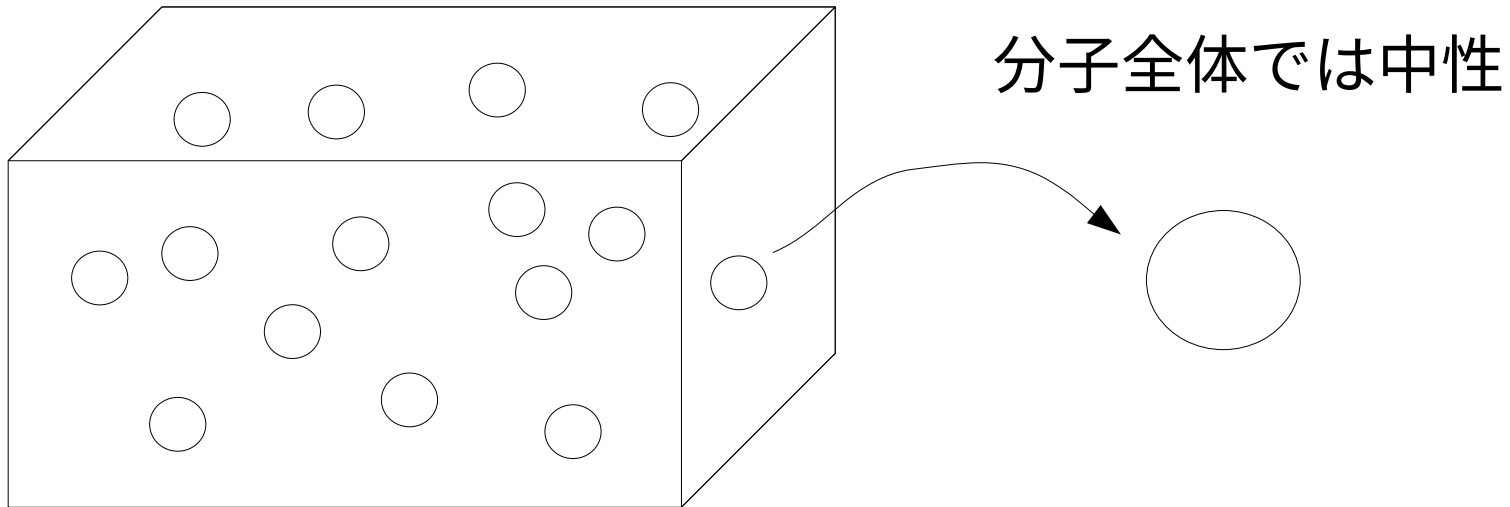
一個の電子が、電位差  $V$  の間を、電場からの力に従って移動すると、 $eV$  だけ、電場による位置エネルギーを失って運動エネルギーを得るが、粘性抵抗を受けながら移動するので、速度の増加はすぐ止まってしまい、その後は、摩擦の場合のように、熱になって放出される。

起電力によって、電位差が一定に保たれている区間を電流が流れている場合、毎秒  $I$  (電流の大きさ) /  $e$  個の電子が移動するので、毎秒

$$W = eV \cdot \frac{I}{e} = V \cdot I = R \cdot I^2 = \frac{V^2}{R} \quad \underline{\underline{(\text{ワットの法則})}}$$

の熱が発生する。

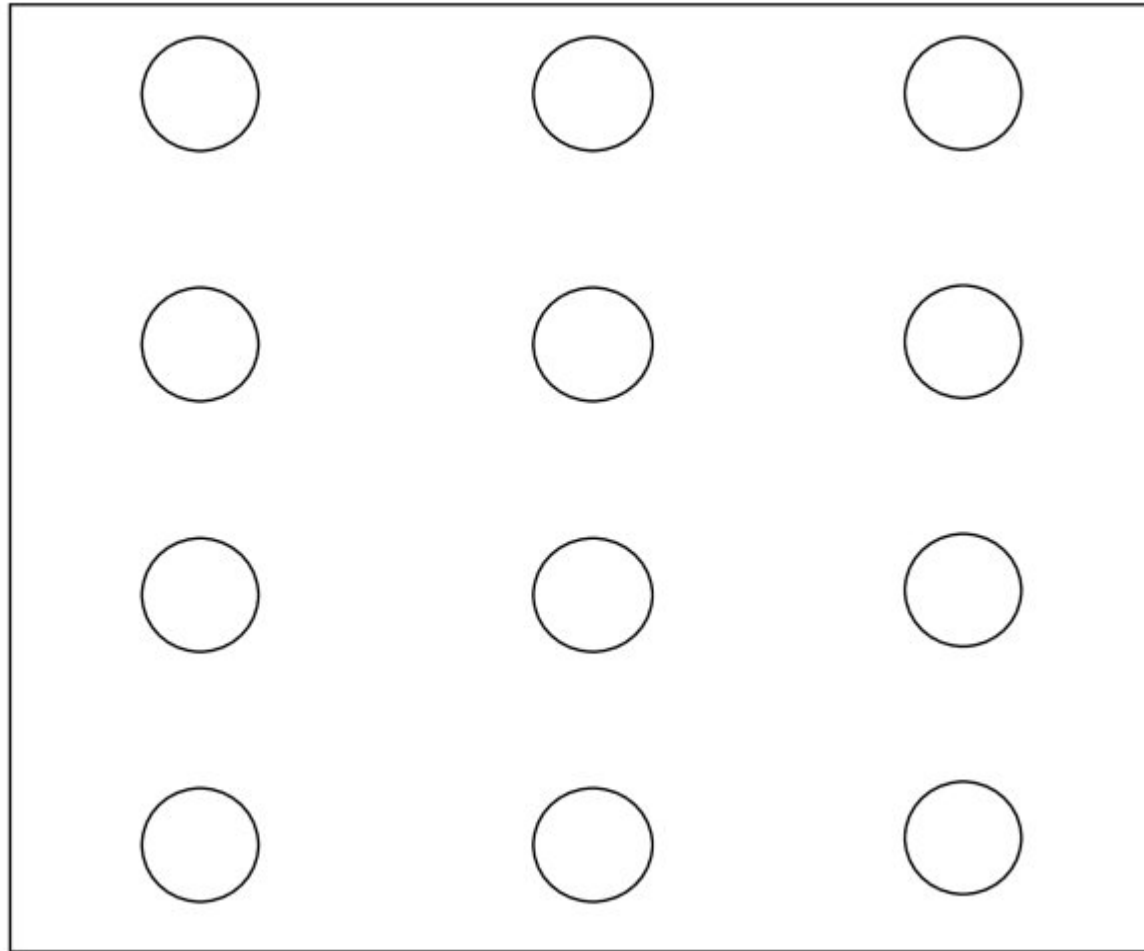
# 不導体＝誘電体（高分子化合物など）



1.分子は、力が働くと**変形**する。

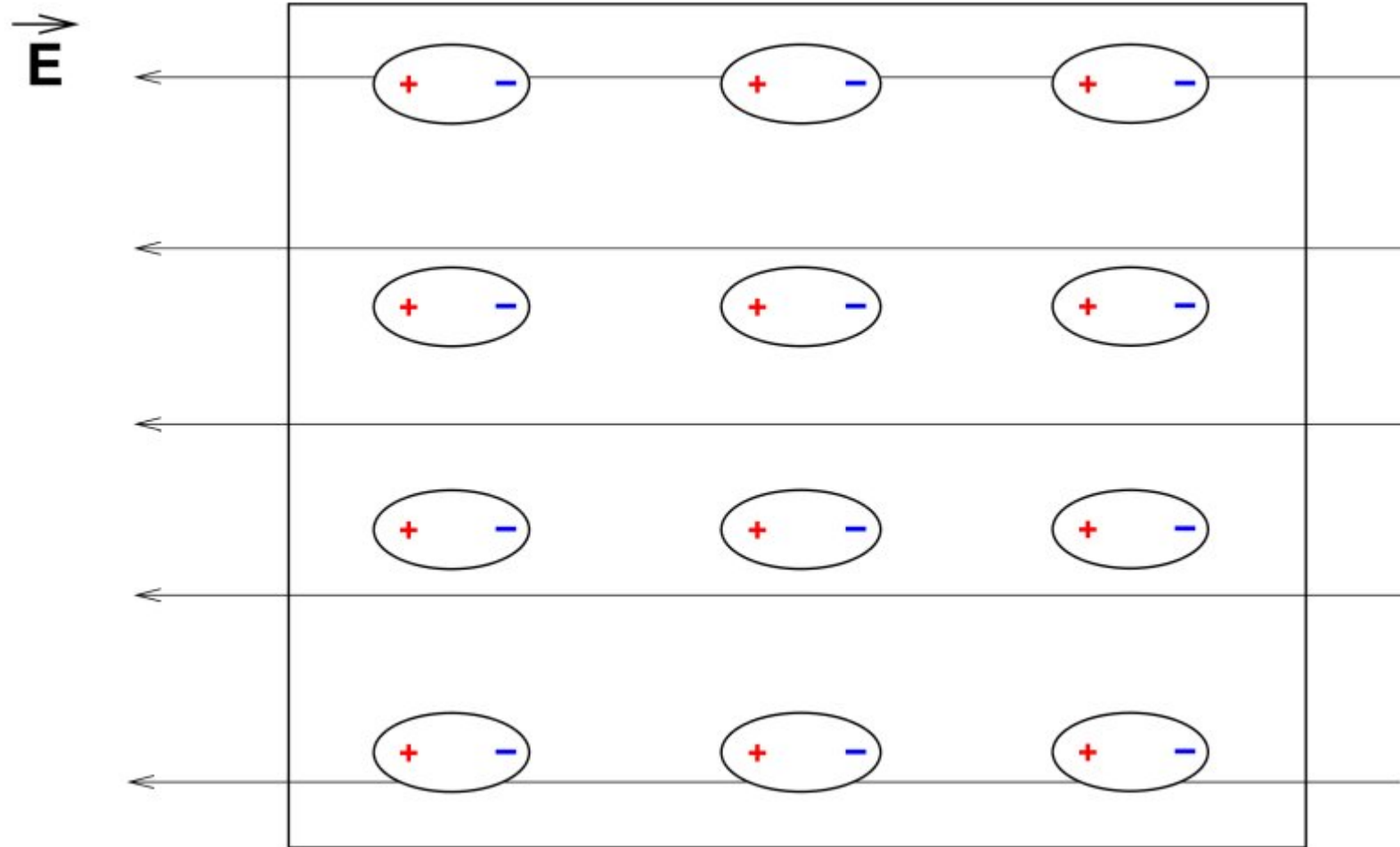
2.電子は、分子内部では動くことができるが、**分子の外には出られない。**

## 電場と誘電体分子



分子の中の電荷は、特に局在していない。

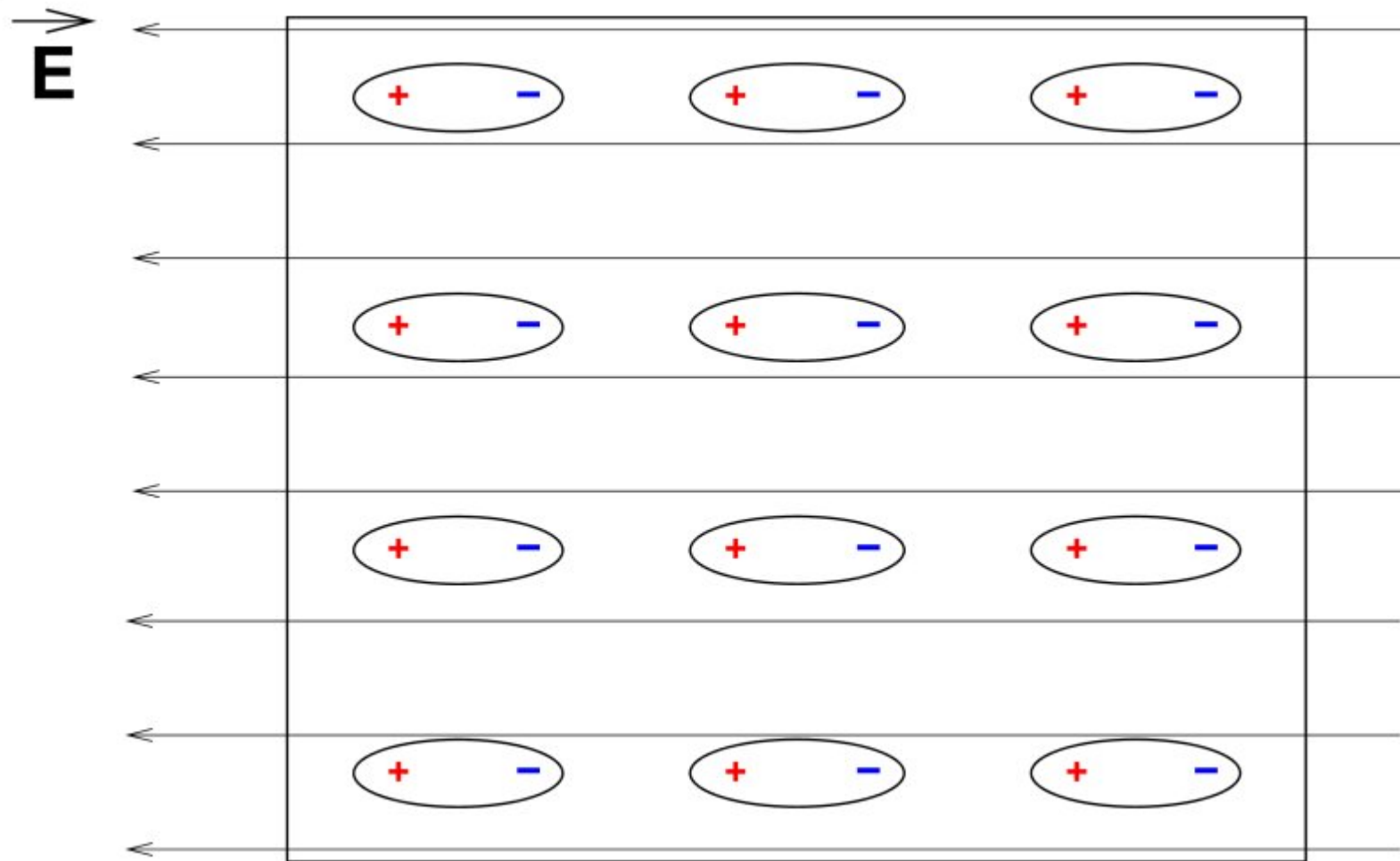
# 電場と誘電体分子



分子の中の電荷が局在しはじめる (分極)

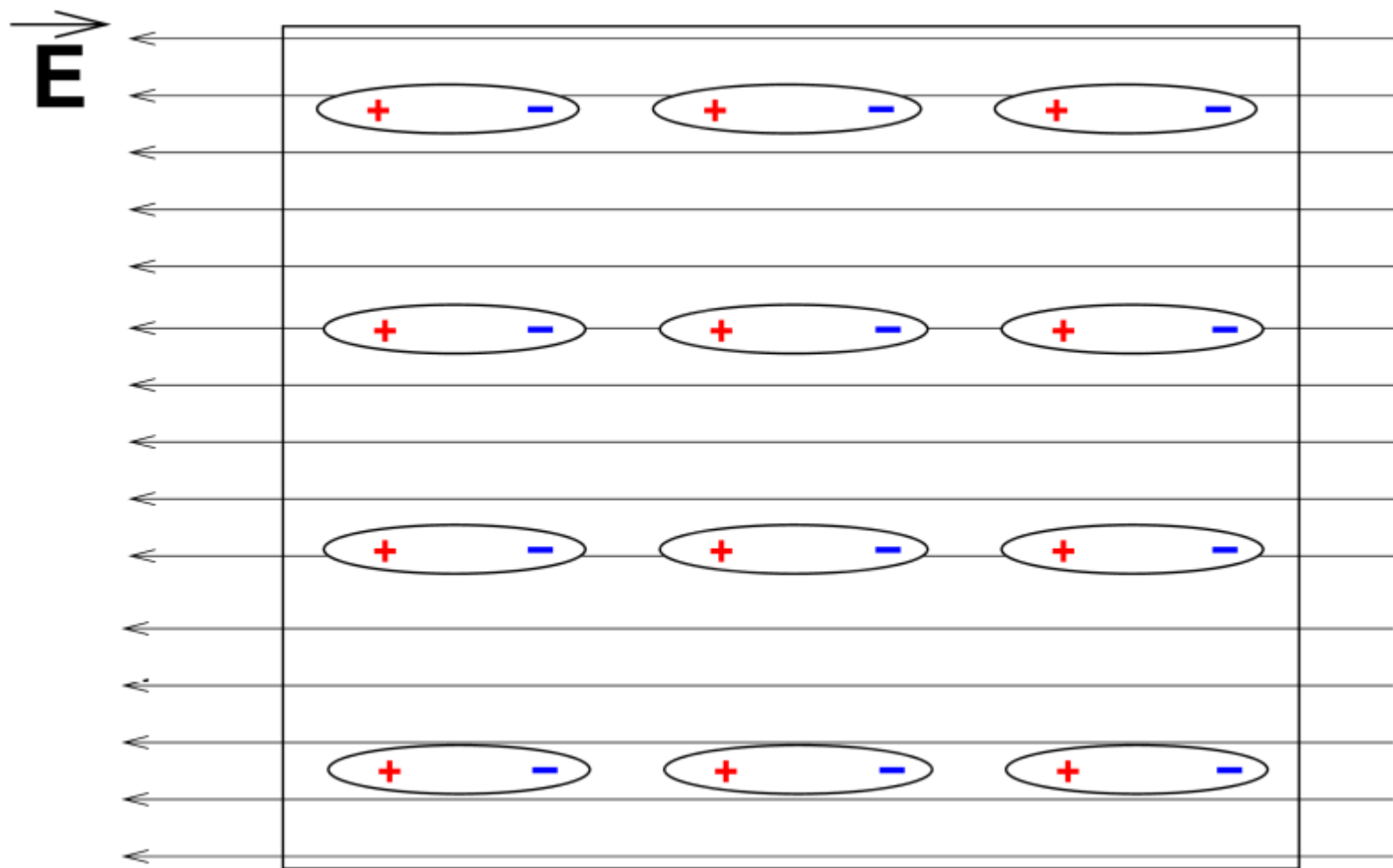


# 電場と誘電体分子



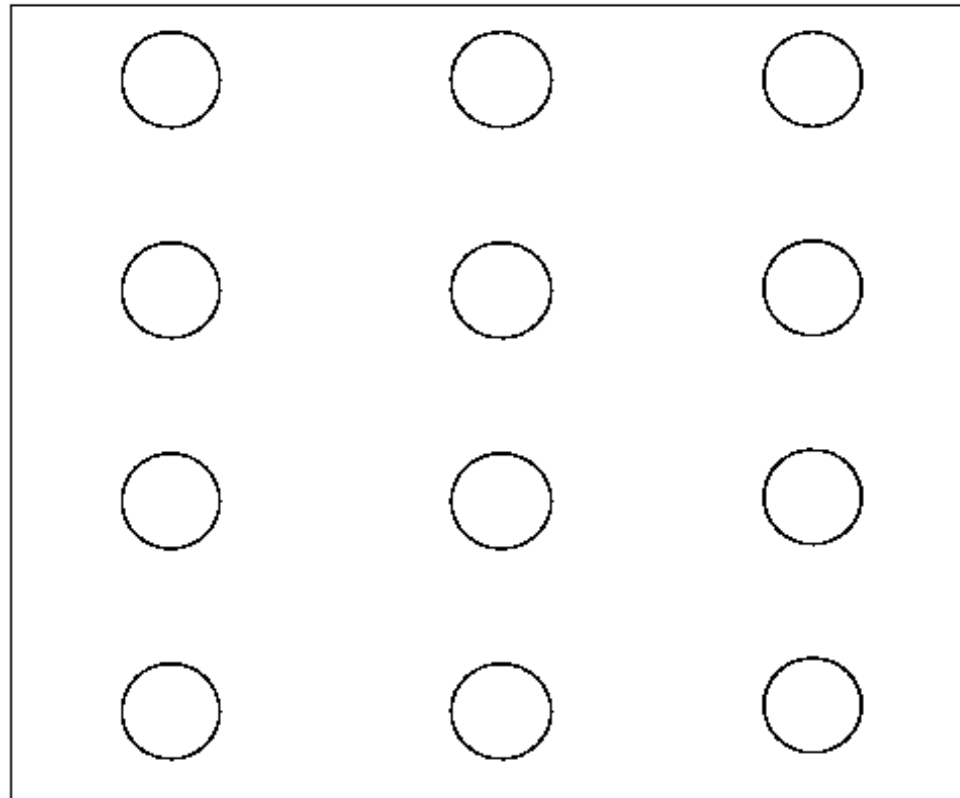
電場とともに **分極** が大きくなる。

# 電場と誘電体分子

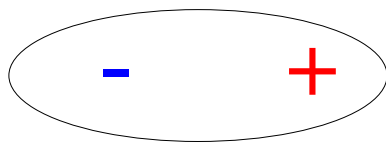


さらに電場が強くなると...

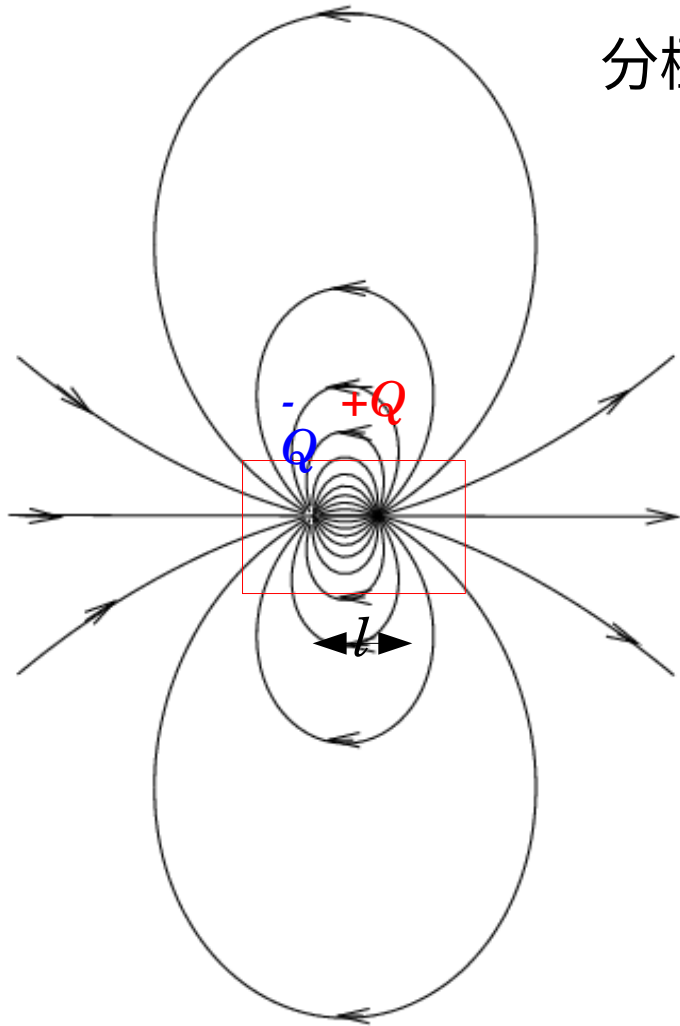
だんだん強くなってゆく電場と誘電体分子



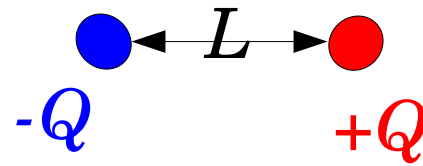
分子の中の電荷が局在する現象を分極と呼ぶ。



分極



電場の強いところ

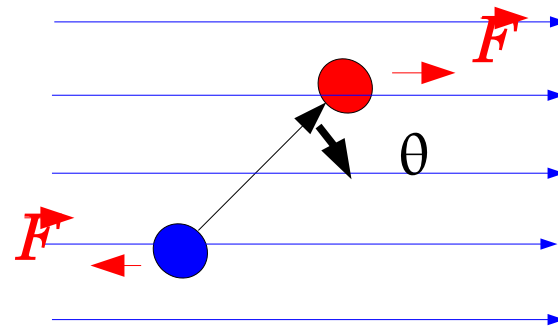


= 電気双極子

$p \equiv L \cdot Q$  : 電気双極子モーメント

$L$  を  $\vec{L}$  (負の電荷から正の電荷向かうベクトル) と置き換えることで、ベクトルとして定義することもできる。

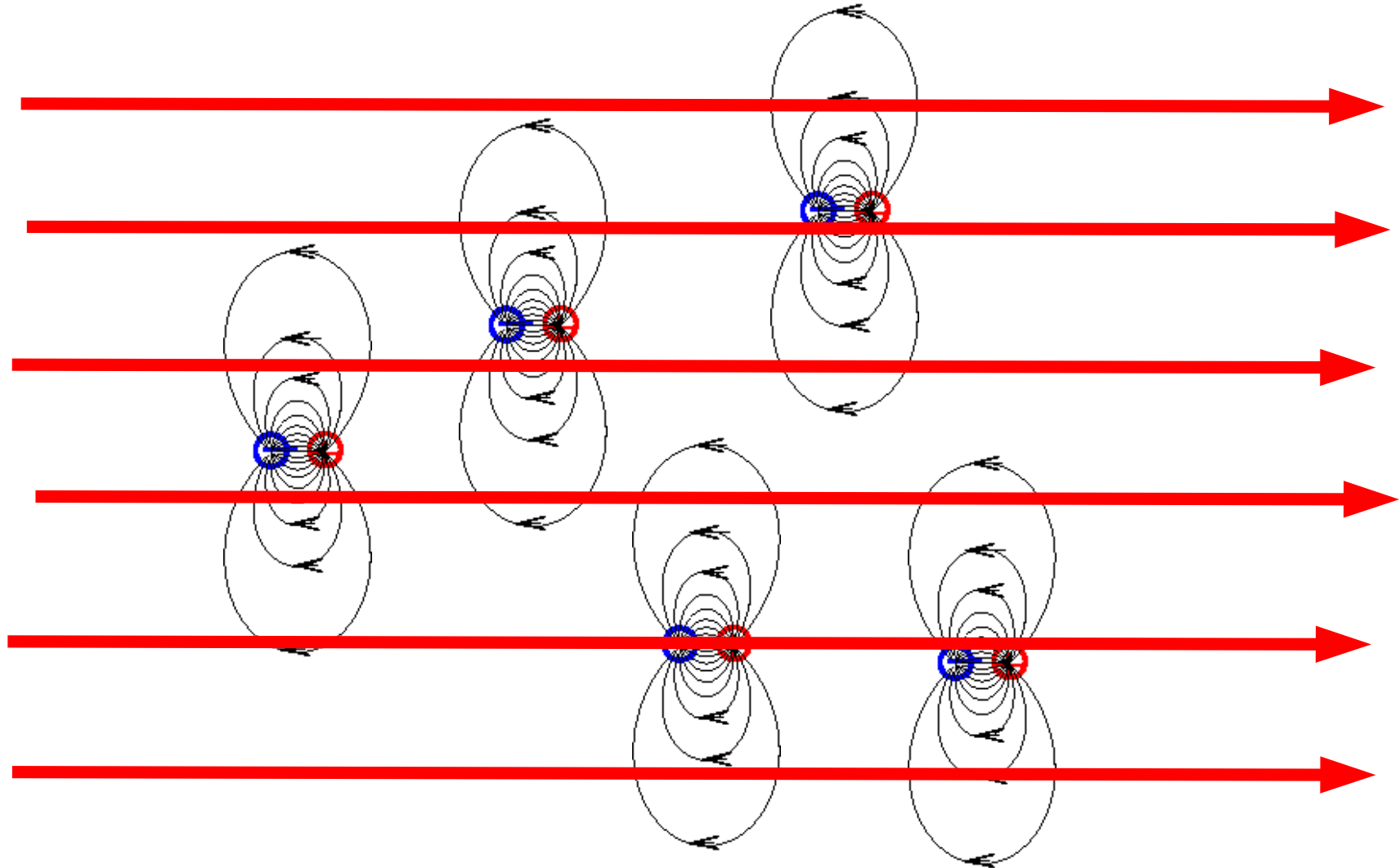
電場の中で電気双極子に働く力は、回転力



$$N = \sin \theta \cdot L \cdot F$$

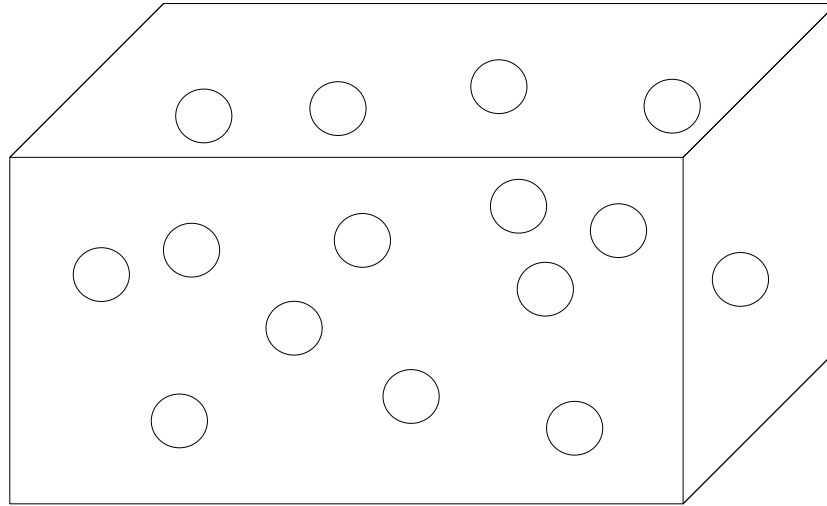
$$= E \cdot [LQ] \cdot \sin \theta$$

電気双極子の作る電場(黒)は、  
外から与えられた、電場(赤)を打ち消す方向  
==> 与えた電場が弱められる！

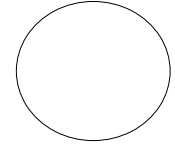


# 不導体=誘電体 (高分子化合物など)

電場が無いとき

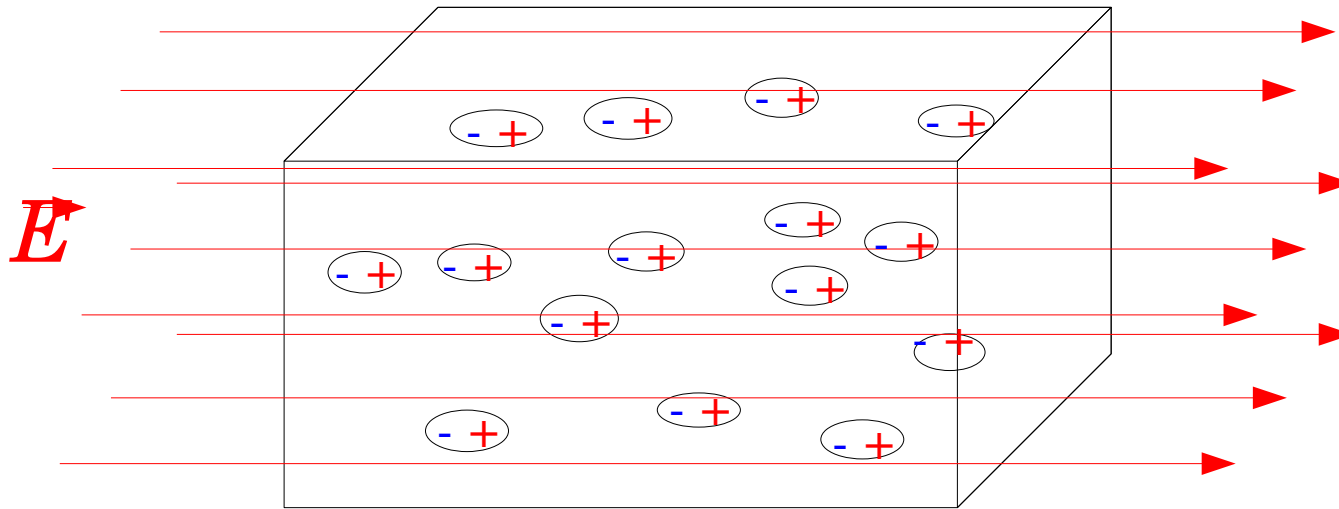


分子全体では  
常に中性

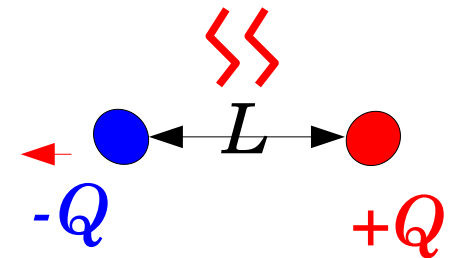
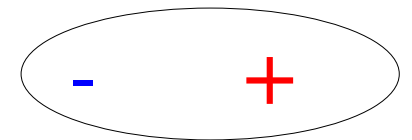


電荷の局在は無い

電場があると



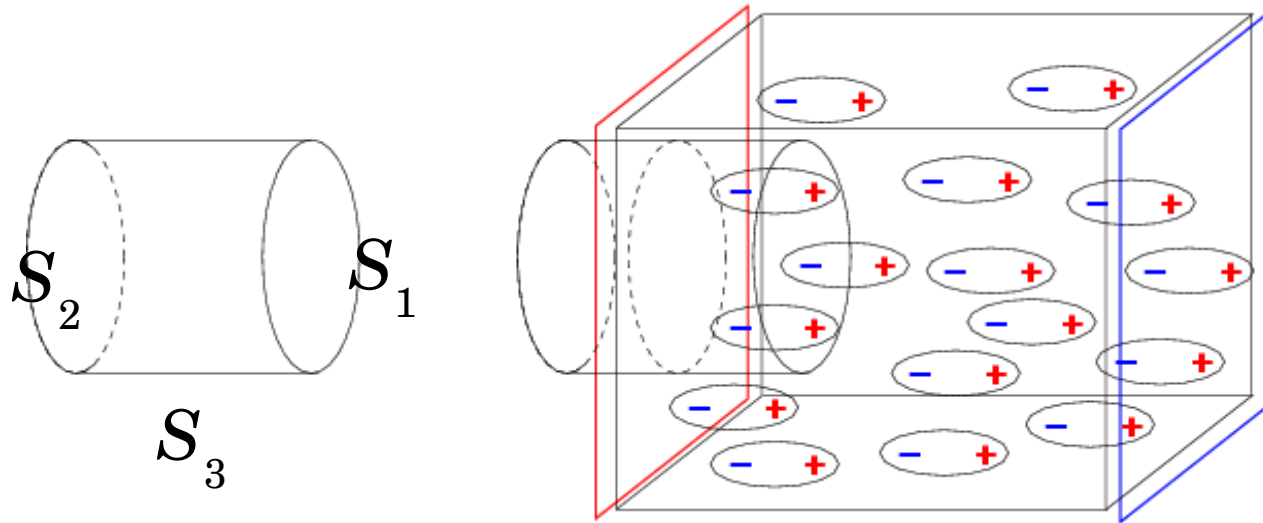
電場により分極



電気双極子

分極による電気双極子は外場と反対方向に電場をつくる。

誘電体を挟んだコンデンサーにおいて、  
ガウスの法則を考える。

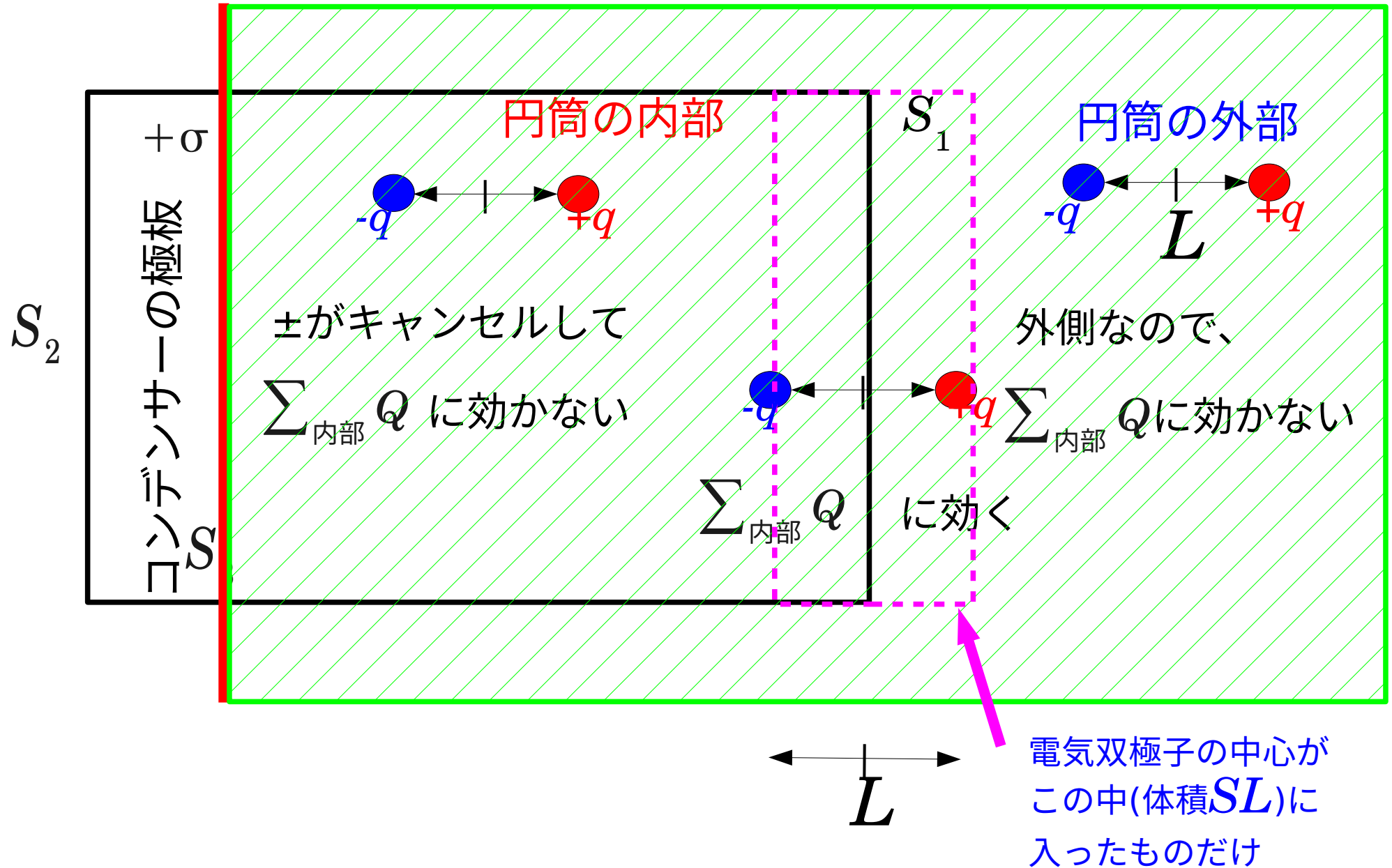


$$\int_{S_1} \hat{n} \cdot \vec{E} dS + \int_{S_2} \hat{n} \cdot \vec{E} dS + \int_{S_3} \hat{n} \cdot \vec{E} dS = \frac{\sum_{\text{内部}} Q}{\epsilon_0}$$

$$\sum_{\text{内部}} Q = \sum_{\text{内部}} Q_{\text{極版上}} + \sum_{\text{内部}} Q_{\text{分極電荷}}$$

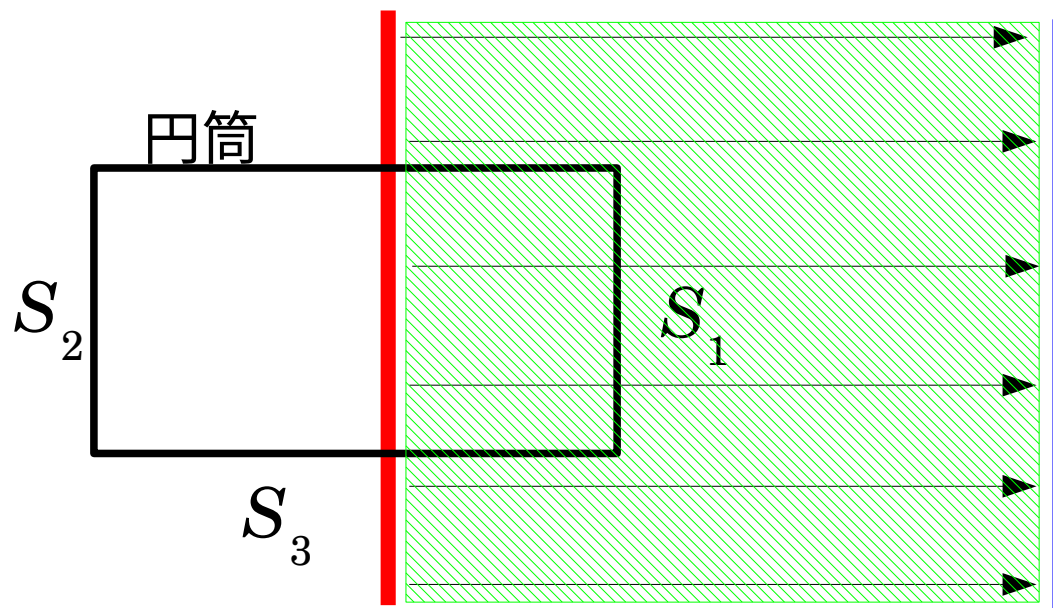
(右辺)

$$\sum_{\text{内部}} Q = \sum_{\text{内部}} Q_{\text{極版上}} + \sum_{\text{内部}} Q_{\text{分極電荷}}$$





# 面積分(ガウスの法則の左辺)の評価



$\vec{E}$  も分極の方向も  $\hat{n}_1$  に平行

$$\int_{S_1} \hat{n}_1 \cdot \vec{E} dS = \langle E \rangle \cdot S_1,$$

コンデンサーの外側なので、

$$\int_{S_2} \hat{n}_2 \cdot \vec{E} dS = 0,$$

左辺はこれだけが生き残る

$\vec{E}$  も分極の方向も  $\hat{n}_3$  に垂直

$$\int_{S_3} \hat{n}_3 \cdot \vec{E} dS = 0$$

(右辺の続き)

$$\sum_{\text{内部}} Q_{\text{分極電荷}} = - [\text{体積 } S_1 \cdot L \text{ 中の分極の数}] \cdot q = -\rho_d \cdot S_1 \cdot L \cdot q$$

$\rho_d$ : 分極による電気双極子の密度

結局、ガウスの法則は

$$\langle E \rangle \cdot S_1 = \frac{\sum_{\text{内部}} Q_{\text{極板}} + \sum_{\text{内部}} Q_{\text{分極}}}{\epsilon_0}$$

$$\langle E \rangle \cdot S_1 = \frac{(\sigma \cdot S_1 - \rho_d \cdot S_1 \cdot L \cdot q)}{\epsilon_0}$$

$$\langle E \rangle = \frac{(\sigma - \rho_d \cdot L \cdot q)}{\epsilon_0}$$

← 電気双極子モーメント

## 得られた結果の解釈

$$P \equiv \rho_d \cdot L \cdot q$$

電気双極子モーメント

を分極(ここでは、現象ではなく物理量)と呼ぶ。  
すなわち分極現象による、電気双極子モーメント  
の密度の事

$$E_0 = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

は、誘電体の無いときの(つまり真空での)  
電場の強さであることに注意する。

通常、平均された電場  $\langle E \rangle$  を、ただ  $E$  と書くので、

$$E = E_0 - \frac{P}{\epsilon_0}$$

ベクトルの関係として

$$\vec{E} = \vec{E}_0 - \frac{\vec{P}}{\epsilon_0}$$

すなわち、電場の中に誘電体が置かれたとき、分極(現象)により、  
誘電体内部では(物理量の)分極だけ、電場が弱められる。

さらに、

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \chi_e \vec{E} \quad (\chi_e \text{を分極率と呼び、実験で求める})$$

つまり、分極が物質の中の電場に比例すると仮定すると、物質がなかったとき(真空)の電場と、物質中の電場は、

$$\vec{E}_0 = \vec{E} + \frac{\vec{P}}{\varepsilon_0} = (1 + \chi_e) \vec{E}$$

と関係が付けられる。

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E}_0 = \varepsilon_0 (1 + \chi_e) \vec{E} = \varepsilon \vec{E}$$

と、新しい場、 $D$ (電束密度)を定義しておく。 $D$ は、真空の電場  $E_0$  に  $\varepsilon_0$  を掛けたもの。ここで、 $\varepsilon$  は物質の誘電率と呼ばれるが、こう呼ぶ事が、 $\varepsilon_0$  を真空中の誘電率と呼ぶ理由になっている。さらに、

$$E_0 \cdot S_1 = \frac{\sum_{\text{内部}} Q_{\text{極板}}}{\varepsilon_0} \quad \text{だから、} \quad D \cdot S_1 = \sum_{\text{内部}} Q_{\text{極板}}$$

と、 $D$ は極板上の電荷だけに関係する。

結局、誘電体があることにより、何がかわるか。

1, 公式は真空中のものと同じで、真空の誘電率が、物質の誘電率で、置き換わる。(物質の誘電率は、実験で求める)

$$\epsilon_0 \rightarrow \epsilon$$

2, ガウスの法則は、電場( $E$ )よりも、電束密度( $D$ )に対して簡単に書ける。(分極電荷を無視して良いため)

$$\int_{[\text{閉曲面}]} \vec{E} \cdot \hat{n} dS = \frac{\sum_{[\text{内部}]} Q_{\text{極板上}} + \sum_{[\text{内部}]} Q_{\text{分極}}}{\epsilon_0}$$

$$\rightarrow \int_{[\text{閉曲面}]} \vec{D} \cdot \hat{n} dS = \sum_{[\text{内部}]} Q_{\text{極板上}}$$

3, 力、電位差を計算する時は、物質中の(平均)電場  $E$  を用いる。  
電束密度( $D$ )は**仮想的**な場である。

## 今日の問題

1、コンデンサーにおいて、極板間が真空である場合と、物質（誘電体）が満たされている場合の、電気容量と、エネルギーの計算式を示せ。

2、一般に真空の誘電率 $\epsilon_0$ と、物質の誘電率 $\epsilon$ の大きさは $\epsilon > \epsilon_0$ である。極板に蓄えられた電荷が同じとして、極板間が真空の場合と誘電体が満たされているコンデンサーの、どちらの蓄えられたエネルギーが大きいか？

3、極板間の電位差（電圧）が同じであれば、極板間が真空の場合と誘電体が満たされているコンデンサーの、どちらの蓄えられたエネルギーが大きいか？

2と3については、根拠となる数式を示すこと。