2.6 導体と静電場

電磁気学詳論 I (2021)

田中担当クラス
http://www-het.phys.sci.osaka-u.ac.jp/~tanaka/teaching.html

第 2 章 静電場

2.6.1 導体とは

導体

電場がかかると電流が自由に流れるような物質 (金属など)

導体中には自由な電荷が存在して，電流の担い手となっている．この電荷は物体中を自由に動けるが表面から外に出ることはない．

金属の場合: イオンは結晶格子を作っていて，一部の電子はイオンに束縛されない自由電子となっている．

cf. 絶縁体

2.6.2 導体中の静電場

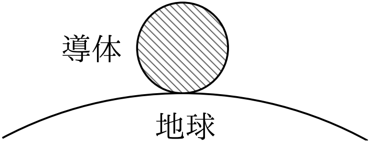
- 静的な状態では導体中で $\boxed{\boldsymbol{E}=0}$. 電場がない.
  $\because$ もし，$\boldsymbol{E}\neq 0$ なら，電荷の移動が起こり電流が流れるので，静的な状態でなくなる.

  孤立した導体であれば (外部から電流を流しつづけたりしなければ)，もし $\boldsymbol{E}\neq 0$ としても，電荷の移動によりこの電場が "中和" され，ごく短い時間で $\boldsymbol{E}=0$ となる.
- $\boldsymbol{E}=0 \quad \Rightarrow \quad \nabla\cdot\boldsymbol{E}=0$

  よって，静的な状態 (静電場) では導体内部に電荷は存在しない. $\boxed{\rho=0}$.
- $\boldsymbol{E}=0$，$\boldsymbol{E}=-\nabla\phi$ より，$\boxed{\phi=\text{const.}}$. 導体は等ポテンシャル.

地球は(あまりよい導体ではないが)導体といえる．従って，地球は等ポテンシャル．

導体を地球に接するように置けば(あるいは導体と地球を導線などでつなげば)，その導体は地球と同じポテンシャルになる．
$\Rightarrow$ 接地(アース)



通常，接地された導体について $\phi = 0$ と選ぶ．

導体中の静電場のまとめ

$\boldsymbol{E} = 0$, $\rho = 0$, $\phi = $ const.

2.6.3 帯電した導体

電荷

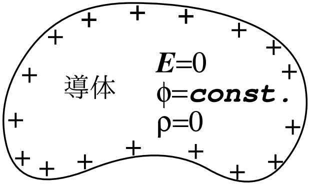
導体に電荷を与えると，内部では $\rho = 0$ ゆえ，電荷は表面に分布する．

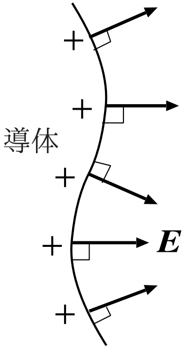
電場の向き

導体表面のすぐ外側の電場は表面に垂直．(法線成分のみ．)

$\because$ 導体表面は等電位面で，電場 (電気力線) は等電位面に垂直．(§§2. 4. 7)

もし接線成分があれば，電荷が表面に沿って移動し電流が流れる．(静的状態でなくなる．)

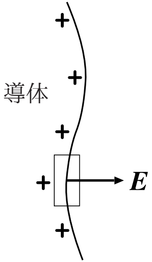




電場の大きさ

帯電した導体の表面付近の電場の大きさは,

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}, \quad \sigma = \text{表面の電荷面密度}. \tag{1}$$



証明のアイデア: 積分形のガウスの法則を用いる.

証明: 導体表面の小さな薄い円筒 (底面積 ΔS) にガウスの法則を適用すると,

$$\int_S \boldsymbol{E} \cdot d\boldsymbol{S} = \frac{\sigma \Delta S}{\varepsilon_0}, \tag{2}$$

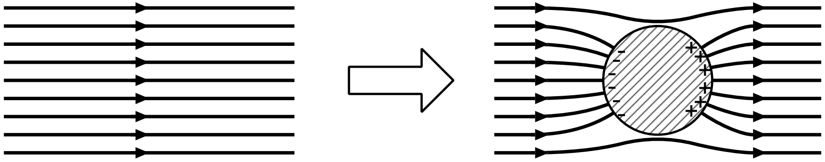
導体内部では $\boldsymbol{E} = 0$ ゆえ, 左辺は,

$$\int_S \boldsymbol{E} \cdot d\boldsymbol{S} = E \Delta S. \tag{3}$$

式 (2),(3) から式 (1) を得る. ($\sigma < 0$ のときは, 導体に入る向き.)

cf. §§2. 5. 2 例 3, 式 (2. 5. 32)

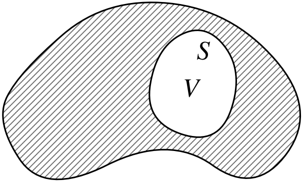
導体の全電荷がゼロでも，導体を電場中に置くと表面に電荷が現れる．$\Rightarrow$ 誘導電荷



上の議論 (式 (1) など) はそのまま使える．

2.6.4 静電遮蔽

空洞のある導体を考える．導体は等ポテンシャルゆえ，空洞 V の表面 S は等ポテンシャル面．§§2. 5. 2 のアーンショーの定理「電荷のない領域ではポテンシャルは極小値も極大値もとらない」より，



空洞内に電荷がないとすれば，S で $\phi = \text{const.}$ で，V でも $\phi = \text{const.}$ すなわち，$\boldsymbol{E} = -\boldsymbol{\nabla}\phi = 0$，空洞中の電場はゼロ．これを静電遮蔽という

静電遮蔽は導体の種類，空洞の形状，導体の電荷，導体外部の電場によらず成り立つ．逆に，例えば，導体の電荷を変化させて，空洞に電場が生じるかどうかを調べれば，ガウスの法則，つまり $1/r^2$ 則の検証ができる．この原理を用いた実験により，$E \propto 1/r^{2+\delta}$ とすれば，$\delta = (2.7 \pm 3.1) \times 10^{-16}$ (Williams et al., 1971) という制限が得られている．