

1. 導体

これまでは、電場や電位という、空間の電気的な性質を学んだ。

ここでは、巨視的な物質の電気的な性質に注目する。

「巨視的」は「微視的」に対する用語で、

「微視的」が非常に小さく肉眼では識別できない原子や分子、イオンや電子を取り扱う視点であるのに対し、

「巨視的」は手にふれ、目に見える日常的なサイズの物体を扱う視点である。

もちろん、すべての物質は原子や分子から構成されるので、巨視的な性質は（個々の原子・分子の性質ではなく）原子・分子の性質を平均化したものである。

以下の考察では、物質の巨視的な性質の理解に助けとなる範囲で、微視的な見方が登場する。

【導体】

物質の電気的な性質のうち「電気の流れやすさ」に注目したとき、電気が流れやすいものを導体という。

流れにくいものが絶縁体、両者の中間が半導体である。

これらの分類は絶対的なものではないが、代表的なものとして

導体：金、銀、銅、アルミニウム、鉄などの金属、それらの合金、水銀（液体の金属）

半導体：シリコンやゲルマニウム、ガリウムやヒ素、それらの化合物

絶縁体：ガラス、セラミック、ゴム、樹脂

などを想定するのが普通である。

気体もプラズマ（イオンと電子）状態になると電流が流れるが、電離の程度により電気の流れやすさも大きく変わる。

【電流を担う粒子】

金属：

流れる電流は、電子が担う。金属を形作る原子は結晶をつくり、原子どうしの互いの位置関係が固定されている。

各原子から1~2個の電子が放出され金属全体を自由に動き回る（自由電子これを伝導電子という）。

原子が電子を失うと正電荷をもつイオンとなるので、金属のイメージは「イオンの結晶とその中を自由に動き回る電子」である。

1立方メートルの銅には 10^{29} 個の銅原子が詰まっている。原子1個から自由電子が1個供給されるとすると、銅の自由電子の密度は $10^{29}/\text{m}^3$ と、ばく大な値になる。

自由に動ける電子の数が無尽蔵といえるほど多いことが金属の電気的な性質の1つの鍵となる。

半導体：

純粋なシリコンに、**不純物**（シリコンに電子を与えやすい原子、たとえば**ホウ素**）を混入すると、

その不純物原子がイオンとなり、放出された電子が周囲のたくさんのシリコン原子に共有される。

この**電子**は、どのシリコン原子に所属するということがなく、電流を担うことができる。

この電子の数は、金属の自由電子にくらべると圧倒的に少ないので、電気はそれほど流れやすくない。

自由に動ける電子は温度がわずかに上昇しただけで急激に増加する。

このような半導体を**n型半導体**と呼ぶ。

別の種類の**不純物**（シリコンから電子をもらいやすい原子、たとえば**リン**）を混入すると、

周囲のシリコンから不純物が電子をもらって負イオンとなる。

どれか特定のシリコンが正のイオンになるわけではなく、電子が不足する場所が（水中のアブクのように）動きまわることができる。

このアブクを**正孔**（せいこう、**ホール**）と呼び、電流を担う「実体」と考える。

ホールは温度がわずかに上昇しただけで急激に増加する。

このような半導体を **p 型半導体** と呼ぶ。

p 型半導体と n 型半導体では、電流を担う電荷の符号が異なるので、同じ向きに電流を流しても電流を担う実体の移動方向が逆向きになる。この性質を用いて、半導体による整流、スイッチ、LED などの素子がつくられる。

【電気伝導度】

金属の自由電子は「自由に」動けるとはいうものの、真空中のように完全に自由というわけではない。

さまざまな理由で動きには抵抗があり、抵抗の大きさは物質の種類、温度などにより異なる。

どの程度自由に動けるかを定量的に表すのが**電気伝導度**である。**抵抗率**という値を用いることもある。

【仕事関数】

金属内部を「自由に」動ける電子が、その表面から飛びだそうとするときはイオンの正電荷が見え、クーロン力で引き戻される。

自由電子が表面から飛び出すのを妨げるエネルギーの壁の高さを**仕事関数**と呼ぶ。

金属を熱すると、自由電子が表面から飛び出しやすくなる（**熱電子放出**）。

それは、熱運動で電子の運動エネルギーが増え、なかには仕事関数を越えるものが出てくからである。

直管の蛍光灯の管内の両側は、フィラメントがあり、これを熱して熱電子を放出させ加速して管内の水銀電子にぶつけ、光を出す。

金属に波長の短い光や高速の電子をあてると、自由電子がエネルギーをもらい仕事関数を超えて飛び出す（**光電効果**）。

強い電場の中に金属をおくと、自由電子はその電場に引かれて、イオンからのクーロン力をふりきって、外部に飛び出す（**電界放出**、**電場放出**）。

2種類の金属を擦り合わせると、仕事関数に差があるため、自由電子が移動することがある（**摩擦電気**）

2. 静電誘導

正の電荷をもつ物体（帯電体）を導体に近づけると、帯電体の近くに負電荷、反対側に正電荷が現れる。

この現象を**静電誘導**と呼ぶ。

この現象は次のように説明される：

1. 金属中の自由電子が外部の正電荷に引きつけられて、帯電体の近くまで寄ってくる
 2. 仕事関数のために、自由電子は金属表面まで来て留まる。（もし、帯電体がつくる電場が非常に強ければ、表面から電子が飛び出すかもしれない）
 3. 自由電子が集まったところは、イオンの正電荷を越えて負に帯電する。
 4. 自由電子が去ったところは、イオンの正電荷があらわになり、正に帯電する。
 6. 導体内部に、仮に正に帯電した部分ができるとその箇所に自由電子があつまり、負に帯電した部分があるとそこから自由電子が去る。
 7. 金属が帯電するところは表面だけになる。内部には帯電しない。
- 6, 7は、ガウスの法則（したがってクーロンの法則）と、ほとんど無尽蔵に自由電子があることから説明できる（後述）。

3. 導体内部と表面の静電場

一様な電場（外部電場と呼ぶ）の中に導体の球を入れたら、導体内部や外部は電場がどのようになるだろうか。シミュレーションの結果を図に示した。

【導体内部の電場は0】

仮に、導体内部に電場があるとしたら、その電場で自由電子が動く。

- ・ 自由電子が移動すると、あたらしい電荷分布ができて、内部の電場を小さくする。
- ・ もしも内部の電場を大きくするような電荷分布ができるなら、自由電子の動きはさらに加速され、永久機関ができたり、世界の破局が来たり・・・

短い時間の中に、自由電子は、**導体内部の電場を0にするような電荷分布を自動的に選んで分布する。**

このようにして生じた電荷分布を「静電誘導」として観察する。

【思考実験】

ここで、外部の電場も導体も存在しない空間に、導体球表面と同じ球面を想定する。その球面上に、静電誘導で生じたのと同じ電荷分布を人為的に再現する。

この電荷分布によって生じる電場は

- ・ 球内部では、先の一様な外部電場と逆向きで同じ大きさの電場が生じる。
- ・ 球外部では、電気双極子による電場に似た（少し違う）電場が生じる。

【ふたたび、現実】

一様な外部電場の中に、帯電していない導体球を挿入すると、導体内の電場が0となるように静電誘導が起きる。導体の外部の電場は、環境として与えられた外部電場と、静電誘導によって生じた電場の和となる。

導体の内部の電場も、（環境として与えられた外部電場が導体内まで侵入していると考えたら）、静電誘導によって生じた電場と和をとった結果、0となると考えてもよい。

【教訓】

電場を考察するとき、物質の影響は「物質に生じた電荷分布だけに注目」すればよい。電荷分布を知りさえすれば、物質の存在は忘れてよい。

4 導体内部は静電場 0, 帯電せず. 表面は垂直な電場, 帯電あり

導体内部・表面の電氣的な性質をまとめる

この議論は, 静的な状況 (十分に時間がたったあと, すべてが落ち着いたとき) に適用される.

● 導体内部の静電場は 0

- ・ 内部に電場があると, 自由電子が移動する.
- ・ 自由電子が移動してつくる電荷分布は, 内部の電場が弱める.
- ・ 自由電子は無尽蔵にあるので, 内部の電場は 0 になる
- ・ 導体の外部から, ある時刻に突然に電場が加わると, 自由電子の動きは少し遅れるので, 内部の電場が 0 になるまでに, わずかだが時間がかかる.

- ・ 十分に時間がたつと, 導体内部の電場は 0 となる (静電遮蔽)
- ・ 外部から加わる電場が時間的に変動すると, 内部の電場が完全には 0 にならない. 表面付近では外部電場の侵入が顕著となる (表皮効果).

● 導体内部には帯電しない.

- ・ 仮に内部で帯電したとすると, その周囲の空間の電場が 0 ではなくなる (ガウスの法則).
- ・ 前項により, 内部には帯電しないことがわかる.

● 導体表面で, 電場は 0 でない可能性がある. また帯電する可能性がある

- ・ 自由電子は仕事関数によって, 表面では力を受ける. 表面と垂直な電場が表面にあっても, 仕事関数による力とつり合う限り, 導体表面を電子が移動しない.
- ・ 導体表面に帯電していても, 導体内部の電場が 0 になることは可能である.

● 中空導体 (中空部分には電荷がない) の内表面で, 電場は 0, 帯電しない.

- ・ 仮に, 内表面が帯電したとすると, ガウスの法則から周囲の電場が 0 でない.
- ・ その電場は導体内部には向かわず, 中空の部分に向かうはず.
- ・ 内表面の電場は, 表面と直交する (さもないと, 内表面で電流が流れる)
- ・ 電場が中空部分の一点で終わる (始まる) とすると, 中空部分に電荷があることになり, 矛盾
- ・ 電場が, 内表面の他の部分に終わる (始まる) とすると, 内表面の上で電位差がある.
- ・ あると仮定した電場は表面と垂直だから, 内表面にそって電場を線積分しても 0, 電位差が 0 となり.

矛盾.

【静電遮蔽の応用?例】

- ・ 飛行機や自動車のボディが金属のとき, 落雷しても内部の人は帯電しない.
- ・ 金属の檻 (ファラディの檻, ファラディ・ケージ) の中にいれば, 高い電圧の装置のそばに行っても大丈夫.

5. 導体表面の電場

ここまでは、「電氣的に中性だった導体が、外部電場のもとで静電誘導を起こす」過程に注目した。つぎは、導体が帯電したときの振る舞いに注目する。

導体が帯電すると

- その電荷はすべて表面に集まる。
 - ・ 導体内部に帯電しない理由は、前スライドに詳述した。
 - ・ 内部の電場が0となるように電荷分布が決まる。
- 電場は表面から外向きに、表面と直交する方向に。
 - ・ 前スライドに詳述。

導体が帯電したときも、中性のときも、

- 導体の表面と内部の任意の点の電位が同じである
 - ・ 電位は電場の線積分で与えられるが、電場が0なの電位差が0となる
- 導体の表面は、等電位面である。

【帯電した導体の電荷分布】

- 真の球の表面に電荷が分布するとき、内部の電荷が0になる。
 - ・ ・ 球が導体であろうと、なかろうと、このことは正しい。
- どんな形であろうと、導体が帯電すると、内部の電荷が0になる。
 - ・ ・ クーロンの法則と、自由電子が無尽蔵にあるから。
- 導体表面の尖った部分は電荷密度が高く、電場がつよい。
- 等電位面がきつく曲がった部分は電場がつよい。

6. クーロン力=逆2乗則

キャベンディッシュは「静電気力（したがって電場の）逆二乗則が成り立てば、帯電した導体の内部の電荷が0になる」ことに基づいて、逆二乗則を検証した。

2重の導体球を導線で結び、外側の導体球に帯電する。

導線を外して、内部の導体球を取り出し、帯電の有無を調べる。

7. 導体表面の電場と電荷分布

導体の表面付近で電場を測定すると、表面の電荷密度を求めることができる。

導体があると、

- ・ 内部の電場が 0
- ・ 電場は表面から外側だけ、表面に直交。
- ・ 電荷は表面だけ

という事実を受け入れ、**導体の存在を忘れて**

真空中の

- ・ **導体の内部だったところの電場が 0**
- ・ **導体の表面だったところから外側に電場があり、直交**
- ・ **導体の表面だったところに電荷分布がある**

という「電荷分布と電場だけ」を対象としてガウスの法則を適用すれば
導体表面の電場と表面電荷密度の関係を求めることが可能である。

導体表面が滑らかな曲面なら、十分近くで見たとき平面と考えて良い。

平面上に電荷密度 σ があり、平面の片側だけに、平面と直交する電場がある。

平面を挟み、平面と平行な底面 (S) をもつ円筒表面上で、電場の面積分を行う

$$\begin{aligned}\iint_{\text{円筒}} \vec{E} \cdot d\vec{S} &= \iint_{\text{上底}} \vec{E} \cdot d\vec{S} + \iint_{\text{下底}} \vec{E} \cdot d\vec{S} + \iint_{\text{側面}} \vec{E} \cdot d\vec{S} \\ &= \iint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} + 0 + 0 = ES = \frac{1}{\epsilon_0} (\sigma S) \\ &\rightarrow E = \frac{\sigma}{\epsilon}\end{aligned}$$

8. 鏡像法

外にある電荷は、静電誘導により導体表面に逆符号の電荷を誘起する。

1. 導体の外には電場ができ、その電場は表面と直交する。
2. この電場と同じ電場の作り方を発見できれば、静電誘導による電荷密度や、外の電荷が導体に引き寄せられる力などを簡単に計算できる。

導体表面が平面のとき

3. 導体を取り去り、導体表面であった面を鏡として、外の導体の像の位置に逆符号で同じ大きさの電荷を設定する（右図）。
4. 鏡面が等電位面であり、電場はこれと直交する。この条件をもつ外部電荷の側の電場は、ひとつしかない（数学の定理）。
5. 導体があっても、導体をなくして鏡像の電荷をおいても、4の電場になる。

9. 誘電体の静電誘導

導体は絶縁体と対になる概念で「電気を流しやすいか否か」という視点の分類法であった。

誘電体は、静電誘導に関して、導体と対になる概念である。

導体の静電誘導の性質（内部に帯電しない etc）は、自由に移動できる電子が無尽蔵にあるためのものだった。

誘電体は、自由に移動できる電子をもたないが、表面や内部に誘導電荷が発生する。

その原因は、誘電体を構成する分子が

- ・ ・ 水分子のように最初から（永久）電気双極子をもつ
- ・ ・ 静電場が加わるとそれにより電気双極子が生じる

ことによる。

電気双極子は電場によるトルクをうけて、どれもが同じ方向に向きをそろえて整列する。

電気双極子が均一に並ぶと

- ・ ・ 前後にとりあう分子の正と負が打ち消しあって、内部は帯電しない。
- ・ ・ 表面では打ち消す相手がいないので、電荷が誘導されたように見える。

電気双極子の並び方が一様でない場合

（たとえば、異なる物質が積み木のように重なっていて、電気双極子の生じ方が不均一だったり

物質が均一でも電場が不均一で、電気双極子の生じ方が不均一だったりして、そうなるのだが）

- ・ ・ 内部にも帯電が生じる

物質内部の電場が0でなくても

- ・ ・ 電気双極子が精一杯並んでつくる電荷分布がその電場を打ち消すに至らない場合もある

絶縁体は、程度の差はあるが、誘電体である。

誘電体に変動する電場を加えると（たとえば、電子レンジの電波）

電気双極子の向きが変動し、摩擦により発熱する。

10 配向した電気双極子

誘電体は、自由に移動できる電子をもたないが、表面や内部に誘導電荷が発生する。

その原因は、誘電体を構成する分子が

- ・ ・ 水分子のように最初から（永久）電気双極子をもつ
- ・ ・ 静電場が加わるとそれにより電気双極子が生じる

ことによる。

電気双極子は電場によるトルクをうけて、どれもが同じ方向に向きをそろえて整列する。

電気双極子が均一に並ぶと

- ・ ・ 前後にとなりあう分子の正と負が打ち消しあって、内部は帯電しない。
- ・ ・ 表面では打ち消す相手がないので、電荷が誘導されたように見える。

電気双極子の並び方が一様でない場合

（たとえば、異なる物質が積み木のように重なっていて、電気双極子の生じ方が不均一だったり物質が均一でも電場が不均一で、電気双極子の生じ方が不均一だったりして、そうなるのだが）

- ・ ・ 内部にも帯電が生じる

物質内部の電場が0でなくても

- ・ ・ 電気双極子が精一杯並んでつくる電荷分布がその電場を打ち消すに至らない場合もあり、それがむしろ一般的である。

11. 真電荷の遮蔽

【真電荷と分極電荷】

導体で自由に動ける電荷は、正負に分離して蓄えることができる。

このような電荷を**真電荷**という。

誘電体の電荷は自由に動けない。

電気双極子として、かならず正負がペアになっているので、分離して蓄えることができない。

静電誘導により（誘電体表面などに）現れる電荷を**誘導電荷**という。

誘電体の静電誘導で電気双極子がたくさん生じる。単位体積当たりの電気双極子を**分極**というので、**誘導電荷を分極電荷**ともいう。

分極電荷という呼び名のほうが多く使われるように思う。

【誘電体による真電荷の遮蔽と誘電率】

1. 2枚の平行な導体板に、それぞれ正負の電荷を与え、電荷密度の大きさを同じにする。この電荷は**真電荷**である。

2. 導体板に挟まれた**空間を誘電体で満たすと**、静電誘電が起きて、正（負）の導体表面には、負（正）の**分極電荷**が現れる。

3. 真電荷と分極電荷は、逆符号で接しているため、全体として「蓄えた電荷が減った」ように見える。この状態を「**真電荷の遮蔽**」という。

<<< 導体があろうと、誘電体があろうと、電場は電荷分布だけで決まる。 >>>

4. 空間が**真空**のときに電場が E_{ext} のとき、空間を誘電体を満たすと電荷が減ったように見えるので、電場が小さくなる(E と書く)。

5. *比*

$$\kappa = E_{ext}/E$$

は、用いた物質の誘電体としての能力を表す量であり、 κ を**比誘電率**と呼ぶ。

6.

$$\varepsilon = \kappa\varepsilon_0 = \varepsilon_0 \frac{E_{ext}}{E} \quad (\varepsilon E = \varepsilon_0 E_{ext})$$

を物質の**誘電率**と呼ぶ。

【単位】

比誘電率は、電場どうしの比だから、単位が無い（無次元）。

誘電率は、真空の誘電率と同じ単位なので、 $C^2/N \cdot m^2 = (A \cdot s)^2 / ((kg \cdot m/s^2) \cdot m^2) = A^2 s^4 / kg \cdot m^3 = F/m$

最後に記した F/m は初出。F はファラドと読み、後に学ぶ電気容量の単位である。

【電束密度 D】

真電荷と分極電荷の両方が誘電体内部の電場を作り出している。

電場 E を測定して真電荷だけを見分ける方法が無いだろうか？

E を測定して E_{ext} を知ればよい

それには

$$\varepsilon E = \varepsilon_0 E_{ext}$$

が役立つ.

E を測定したら, ε 倍する

この量を面積分してガウスの法則を用いると

$$\iint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \iint_S \varepsilon \vec{E} \cdot d\vec{S} = \iint_S \varepsilon_0 \vec{E}_{ext} \cdot d\vec{S} = \varepsilon_0 \iint_S \vec{E}_{ext} \cdot d\vec{S} = \text{真電荷}$$

となる.

あらためて

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} = \varepsilon_0 \vec{E}_{ext}$$

を電束密度と呼び, 誘電体の有無あるいは誘電率によらず, 真電荷と直結する「電場」的な量となる.

真電荷と分極電荷が混在するとき, D に注目すれば, 真電荷がつくる電気力線だけが見えてくる.

【単位】

電場と電束密度の関係式 $\vec{D} = \varepsilon \vec{E}$ から, 電束密度の単位は

$$(C^2/N \cdot m^2)(N/C) = C/m^2$$

である. 電荷の面密度と同じ単位になる. 面積をかけると電荷になるのは, 電束密度にたいするガウスの法則からも理解できる.