

1. 電荷と電流

1-1. 電荷(電気量)

物質を構成している原子は、原子核(Nucleus)とその周りを回っている電子(Electron)からできている。原子核は正(+)の電気を帯びた陽子(Proton)と電気的中性である中性子(Neutron)が、それぞれ複数個結合してできている。また、通常の原子においては、陽子と電子の数は等しく、電気的に中性である。

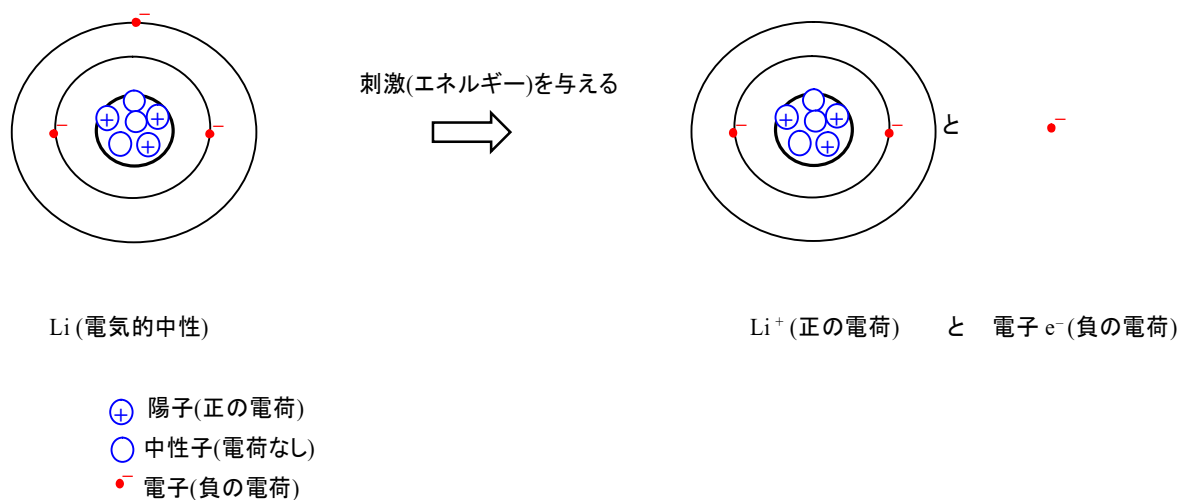
物質が電気¹を持つようになる、すなわち帯電する理由は、原子に含まれている陽子と電子の数のバランスが崩れるためである。帯電した電気の量を「電荷」または、「電気量」と呼び、電荷を持っている粒子のことを荷電粒子と呼ぶ。1個の電子が持つ電荷(電気素量) e の値は、実験によって下の式で表されることが確認されている(陽子の電荷は正で大きさは同じ)。

$$e = -1.60218 \times 10^{-19} \text{ C (クーロン)}^2 \quad (1-1-1)$$

電荷、または電気量を表す記号としては q , または Q を用いることが多い(電子の電荷の場合は、' e 'で表す)。

$$\text{電気量(電荷)} = q, \text{ または } Q \quad [\text{単位は C(クーロン)}] \quad (1-1-2)$$

物質が帯電する例として、原子番号 3、質量数³ 6 の Li(リチウム)原子を考えてみよう。Li 原子の原子核は 3 個の陽子と 3 個の中性子からなり、通常、原子核の周りを 3 個の電子が動いている。Li 原子に外から何らかの刺激(エネルギー)を加えると、電子が原子の束縛から離れることがある。1 個の電子が原子の束縛から離れると、Li は正の電気にイオン化し、 Li^+ となる。その様子を単純化して下の図に示す。



電子は、原子核の半径と比べても、遙かに遠い場所で原子核の周りをまわっている⁴

上の図のように、原子から電子が分離すると、物質は正の電気を帯びる。逆に、原子に電子が組み込まれると負の電気を帯びる。このように、物質が持つ電気量は、厳密には、電子と陽子をもつ電気量(電気素量)の整数倍となるが、莫大な数の電子や陽子が関係している場合は、電気量はほぼ連続した量として扱うことができる。

¹ 電荷を英語で'Charge (あるいは, Electric charge)'と呼ぶ。

² 電荷(電気量)の単位 C(クーロン)は、18 世紀のフランス物理学者 Charles-A. de Coulomb による。物理学では電荷の単位 C(クーロン)を基本単位として採用していない。電流の単位 A(アンペア)を基本単位としている。電荷の単位 C は、電流の単位 A と時間の単位 s(秒)を用いて、「 $C = A \cdot s$ 」と表される。→「1-3. 電流」で再度、電流を定義し、整理する。

³ 質量数は原子核に含まれる陽子の数と中性子の数の和である。

⁴ 原子核の周りを回る電子軌道の半径はおおよそ、 10^{-10} m 程度で、原子核の半径はおおよそ、 10^{-15} m 程度である。

例題 1-1 ある物質に刺激を与えたら、正の電荷 $q = 2.4 \times 10^{-10} \text{ C}$ を持つようになった。刺激によって、何個の電子がこの物質から出て行ったのか求めよ。

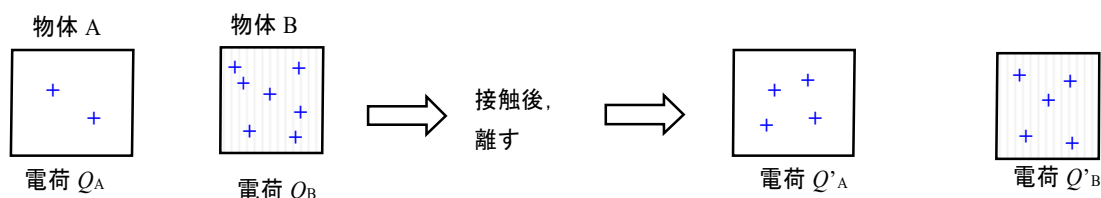
答；出て行った電子の数を N とすると、1 個の電子の電荷の大きさは、 $|e| = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ なので、下の関係が成り立つ。

$$q = N |e| \quad \text{より,} \quad 2.4 \times 10^{-10} = N \times 1.6 \times 10^{-19} \rightarrow N = (2.4 \times 10^{-10} / 1.6 \times 10^{-19}) = 1.5 \times 10^9 \text{ 個}$$

1-2. 電荷の保存

冬にセーターを脱ぐとき、「パチパチ」と音がしたり、ドアを何気なく手で触って「パチッ」と音がしたりして、セーターや人間も摩擦によって帯電することがある。また、エポナイト棒を毛皮でこする(摩擦を加える)と、負の電気を持つ電子が毛皮からエポナイト棒に移動し、毛皮は負の電気を持つ電子が少なくなるので正の電気に、エポナイト棒は負の電気に帯電する。つまり、物体が帯電するということは、電子が他の物体に移動し、電子が移動してきた物体は負に帯電する。

物体 A と物体 B があり、始めに物体 A は電荷 Q_A 、物体 B は電荷 Q_B であったとする。その後、2 つの物体を接触させて、引き離すと、物体 A は電荷 Q'_A 、物体 B は電荷 Q'_B となったとする。そのとき、接触前と接触後の電荷の総量は変わらない。



$$\text{系全体の電荷} = Q_A + Q_B = Q'_A + Q'_B = \text{一定} \quad (1-2-1)$$

上の(1-2-1)式で表されるような系全体の電荷が一定となる関係を「**電荷保存の法則**⁵⁾」と呼ぶ。物体 B から物体 A に移動した電荷を ΔQ とすると、接触後の電荷 Q'_A と Q'_B は下の式で表される。

$$Q'_A = Q_A + \Delta Q, \quad Q'_B = Q_B - \Delta Q \quad (1-2-2)$$

例題 1-2 始め、物体 A の電荷 $Q_A = 4.2 \times 10^{-7} \text{ C}$ 、物体 B の電荷 $Q_B = -8.0 \times 10^{-8} \text{ C}$ であった。2 つの物体を接触させて、離したところ、2 つの物体の電荷は一致し、 $Q'_A = Q'_B$ となった。接触させて離した後の物体 A の電荷 Q'_A を求めよ。次に、何個の電子がどちらからどちらへ移動したか？

答；電荷保存則より、 $Q_A + Q_B = Q'_A + Q'_B = 2 Q'_A$ が成立し、離した後の物体 A の電荷 Q'_A は下の式で求められる。

$$Q'_A = (Q_A + Q_B)/2 = (4.2 \times 10^{-7} + (-8.0 \times 10^{-8}))/2 = 3.4 \times 10^{-7}/2 = 1.7 \times 10^{-7} \text{ C}$$

また、物体 A は電荷が減ったので、電子は B から A に移動した。移動した電子の個数を N 、電子の電荷を e とすると、下の式が成り立つ。

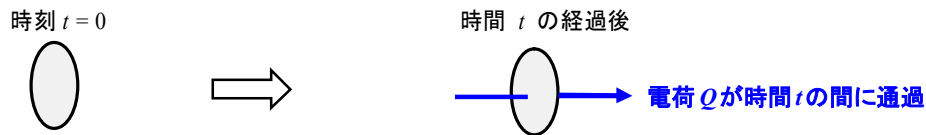
$$Q'_A = Q_A + N e \rightarrow 1.7 \times 10^{-7} = 4.2 \times 10^{-7} + N (-1.6 \times 10^{-19})$$

$$N = (1.7 \times 10^{-7} - 4.2 \times 10^{-7}) / (-1.6 \times 10^{-19}) = 1.5625 \times 10^{12} \sim 1.6 \times 10^{12} \text{ 個}$$

⁵⁾ 「電荷保存の法則」は、物理学において重要な法則である。

1-3. 電流

「電荷が動く(移動する)と、電流⁶が発生する。」電流が時間によって変化せず、一定(定常電流)となる場合、ある断面を時間 t の間に電荷 Q が通過したとすると、その断面を流れる**電流 I** として、下の式で定義⁷する。



$$I := \frac{Q}{t} \quad (1-3-1)$$

* 注意 移動する電荷 Q が時間変化する場合、電流 I は、微小時間 dt の間に通過する微小電荷 dQ を用いて下の式(通過する電荷に対する時間微分)で定義する。

$$I := \frac{dQ}{dt} \quad (1-3-2)$$

・電流の単位

1 秒間の時間に、1 C(クーロン)の電荷が通過したとき、その電流を 1 A(アンペア)と定義する。したがって、(1-3-1)式より、下の関係式が成り立つ。

$$1 \text{ A} := \frac{1 \text{ C}}{1 \text{ s}} = 1 \frac{\text{C}}{\text{s}} = 1 \text{ C/s} \quad (1-3-3)$$

さらに、下の関係式も成り立つ。

$$1 \text{ C} = 1 \text{ A s} \quad (1-3-4)$$

電子は負の電荷を持っているので、電子の流れが電流となる場合は、電流の向きと電子が動く向きは逆向きになる。また、正の電荷を持つ荷電粒子が動く場合は、電流と荷電粒子が動く向きは同じである。

「物理学・自然科学において、基本単位は、電荷の単位 C(クーロン)ではなく、電流の単位 A(アンペア)を採用している。」

例題 1-3 ある断面を 0.4 秒間に $2.0 \times 10^{-4} \text{ C}$ の電荷が通過したとする。この断面を通過する電流 I を求めよ。

答; 電流の定義式(1-3-1)式より、電流 I は下の式のように求めることができる。

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{2.0 \times 10^{-4} \text{ C}}{0.4 \text{ s}} = 5.0 \times 10^{-4} [\text{C/s} = \text{A}]$$

例題 1-4 電流 $I = 0.4 \text{ A}$ が流れている導線がある。この導線の断面を電子がアボガドロ数 $N_{\text{av}} = 6.023 \times 10^{23}$ 個通過するときを要

⁶ 電流を英語で'Current'と呼ぶ。

⁷ これ以後、式の左辺で表される量を式の右辺の量として、定義するとき用いる記号として ' $:=$ ' を使う。

する時間 t は何時間か?

答; 電流の定義式(1-3-1)式を用いて, 要する時間 t は下のよう求めることができる.

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{N_{\text{av}}|e|}{t} \rightarrow t = \frac{N_{\text{av}}|e|}{I} = \frac{6.023 \times 10^{23} \times 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}}{0.4 \text{ A}} \sim \frac{9.649 \times 10^4 \text{ C}}{0.4 \text{ A}} = 2.412 \times 10^5 \text{ s} \\ = 6.7 \times 10 \text{ h}$$

例題 1-5 ある導線の断面を時刻 t [s] で, 通過する電荷 Q が時刻 t の関数として, $Q = 2t + 0.5t^2$ [C] と表されるとき, 時刻 t において通過する電流 I を求めよ.

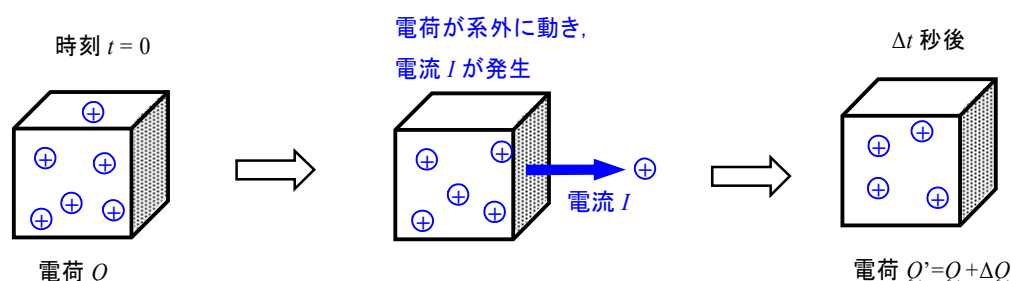
答; 電流の定義式(1-3-2)式より, 電流 I は下の式のように求めることができる.

$$I = \frac{dQ}{dt} = \frac{d}{dt} (2t + 0.5t^2) = 2 + t \text{ [A]}$$

・電荷と電流に関する連続の法則

「1-2 電荷保存則」では, 「系全体では, 全電荷は保存する(一定となる)」ということを示したが, 物質内のある領域の中で, 電荷が変化する場合を考えてみよう.

時刻 $t = 0$ において, ある領域の中に電荷 Q があったとしよう. その後, この領域から電荷が移動し, 時間 Δt 秒後は電荷 $Q' = Q + \Delta Q$ (下の図では ΔQ は負) となったとする. この領域から領域外に電荷が移動し, 電流 I が生じるので, 領域内の単位時間当たりの電荷の変化量は, 系の外へ流れた電流に等しい.



$$\text{領域内にある電荷の時間変化の割合} = \frac{Q' - Q}{\Delta t} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = -I = -(\text{領域外に流れた電流}) \quad (1-3-5)$$

上の関係式を, 「電荷と電流に関する連続の法則」と呼ぶ.

1-4. 電磁気学の構成 (後ほど, 再び, まとめるので省略してよい)

電磁気学を学び始めると, 他の分野と比べても法則(式)の数がとても多いことに気がつく. そのため, 電磁気学を学ぼうとする初心者は戸惑ってしまう. しかし, 電磁気学において最も重要な法則は 5 つで, その他の法則(式)はこれを補完する式だったり, 表現の形式を変えたり, 発展させたりした式である. この 5 つの最も重要な法則は 8 章の「8-2. マクスウェル方程式」で再び, 説明し, まとめるが, この節では, 電磁気学を構成している 5 つの最も重要な法則について概観しよう.

その 5 つの重要な法則のなかで, 4 つはマクスウェルという物理学者がまとめたので, マクスウェル方程式と呼ばれている. マクスウェル方程式は, 電氣的な性質を表す電場(Electric field) \vec{E} と磁氣的な性質を表す磁場(Magnetic field) \vec{H} , あるいは磁束密度

(Magnetic flux density) \vec{B} が時間・空間の関数として、どのように発生するのか、また、それらの間の関係性を示している。もう1つはローレンツ力⁸で、発生した電場・磁束密度(磁場)が荷電粒子に及ぼす力について示している。下にそれらの法則が表す物理的意味を簡単に示す。

① 静電場(時間変化しない電場)に関するガウスの法則

正の点電荷が空間のある位置に置かれたとき、その点電荷を中心として、**四方八方に拡がるような電場**が発生する(点電荷からの距離が大きくなると電場は小さくなる)。すなわち、「**電荷は電場を発生させる原因**」となる。このとき発生する電場は時間変化のない電場で静電場と呼ばれる。電荷によって発生した静電場の空間的な配置を表したのが「**静電場に関するガウスの法則**」である。

② 静磁場(時間変化しない磁場)に関するガウスの法則

電荷とは異なり、磁荷は磁石のようにN極とS極が必ず対をなして存在する(N極を持つ単独の粒子は発見されていない)。このため、N極で発生した磁場は、必ずS極に入り消滅する。このような空間的な性質を表したのが「**静磁場に関するガウスの法則**」である。

③ 磁場に関するアンペールの法則

電流は電荷が移動することで発生する。定常電流のまわりには**渦を巻くような回転する磁場**が発生する(渦の中心に電流があり、電流からの距離が大きくなると磁場は小さくなる)。すなわち、「**電流は磁場を発生させる原因**」となる。

さらに、時間変化する電場が存在する場合は、(電場に関するガウスの法則より)電荷が時間変化する。電荷が時間変化して生じる電流(変位電流)によっても渦巻くような磁場が発生する。この変位電流の存在はマクスウェルが予言した。通常の電流と変位電流(時間変化する電場)が原因となり、渦巻く磁場が発生することを表したのが「**(変位電流を含む)磁場に関するアンペールの法則⁹**」である。

④ ファラデーの電磁誘導の法則

磁束密度(磁場)が時間変化すると、その磁束密度のまわりに**渦を巻くような回転する電場**が発生する。この渦巻く電場によって起電力が誘導される。磁場の時間変化と誘導された電場の空間的な性質を表したのが「**ファラデーの電磁誘導の法則**」である。

⑤ ローレンツ力

電場が存在する空間に電荷が存在するとき、電荷は電場から力を受ける。また、磁束密度(磁場)が存在する空間に電流(あるいは、運動している電荷)が存在するとき、電流(または動いている電荷)は磁束密度から力を受ける。この2つの力に対し、その合力を表したのが、「**ローレンツ力⁹**」である。ローレンツ力が、**電磁場と力学を結び付け**、力学で導入したエネルギーなどが電磁場に適用することが可能となった。

⁸ この法則は「**アンペール・マクスウェルの法則**」と呼ばれる。8章では「変位電流を加えたアンペールの法則」と呼んでいる。

⁹ 通常、「**ローレンツ力**」は動いている電荷が磁束密度から受ける力のみを表すが、ここでは、電荷が電場から受ける力もあわせて「**ローレンツ力**」と呼ぶ。