

1 電気の科学の夜明け

[左図]

- 琥珀（こはく）は黄色の透明な樹脂で、木の樹液が固まった物であり、宝石の一種として古来から大切にみつかわれてきた。
- 古代の琥珀に昆虫が閉じ込められたものもある。
- 樹脂である琥珀を布でこすると、ものを引きつける力が宿ることを、古代の人たちがすでに経験していた。
- この「魔力」の発見が電気との出会いであった。
- 琥珀をギリシャ語でエレクトロンという。この言葉が電気（エレクトリシティ）の語源となった。現在では「エレクトロン」は電子を示す用語。

[中図]

- 江戸時代にオランダから渡来したエレキテルは、帯電体としてガラスを利用した摩擦起電機。
- 江戸中期の博物学者で発明の才にも恵まれていた平賀源内は、エレキテルを初めて模造したことで知られている。
- 残念ながら平賀源内のエレキテルは、見世物として評判をとったものの、科学的な研究としては発展しなかった。
- もし平賀源内が江戸後期に生まれていれば、科学技術の関心を多方面に広げて、さまざまな独創的な発明を成し遂げたかもしれない。

滑車を利用した簡便なエレキテルを考案して、さまざまな物理実験を試みたのは、日本の実験電気の祖といわれる橋本宗吉である。

- 当時の人々はエレキテルをからくり仕掛けの怪異な装置と考えていたが、彼はガラス棒を摩擦するだけでも電気を発生できることを実験的に示した。
- さらには『阿蘭始制エレキテル究理原』（1813年）を著し、雷も電気現象として説明している。
- 幕府で外交文書などともに百科辞書の翻訳をしていた馬場貞由も、同じころフランクリンの電気実験などを紹介している。

[右図]

- 科学館などに展示されているバンデグラーフ装置は、持続的に摩擦電気を発生させるモータ仕掛けのエレキテル。
- 合成樹脂のローラで特殊なゴムベルトを高速で摩擦させ、金属球にたえず蓄える仕組みとなっている。

2 ベンジャミン・フランクリン

国籍 アメリカ合衆国、1706年1月17日～1790年4月17日

業績 電気の研究における主業績は、電気流体説の提唱

略歴

- アメリカの政治家・科学者・作家である。
- ボストンの貧しい家に生まれる。10歳で印刷業を習い、1730年から新聞を発行する。
- ペンシルバニア大学の設立に参加する。独立戦争に参加し、アメリカ合衆国憲法制定に貢献した。
- 1785～1788年にペンシルバニア州知事を務める。
- 電気は単一の流体であると考えた。稲妻が電気と同一であるという仮説を唱え、避雷針を作る(1749)。
- 雷雨の中でタコをあげた実証した(1752)。タコ糸を絹布で絶縁して手で持っていた。オーロラが電気現象であること、竜巻、火山活動、暖炉、光の粒子説の否定、熱伝導等の研究がある。

3. 電気を溜める

[電気の種類]

- ガラスと樹脂を擦り合わせると、ガラスと樹脂は異種の電気を帯びる。
- フランクリンは、ガラス電気は電気流体が過剰で樹脂電気は電気流体が不足している状態と考え、電気は生成したり消滅したりしないと考えた。
すなわち、帯電は摩擦によって電気流体が移動し、電気流体が過剰な状態が正の電気を帯びた状態、不足した状態が負の電気を帯びた状態とした。
- フランクリンの説は、現代の我々の理解にかなり近いものである。
- 現代の理解は、最初から正の電気を帯びた物体（たとえば陽子）と負の電気を帯びた物体（たとえば電子）があり、それらは消滅・生成しない（生成・消滅のときは、かならず反粒子とペア）。
- 正負の電気がともにあれば電気の無い状態をつくる。電気の無い状態から正（負）の電気が流れ出すと、負（正）に帯電する。

[ライデン瓶]

- ライデンはオランダのアムステルダム南西 36km に位置する都市で、画家レンブラントの生地である。
- ライデン大学はオランダ最古の国立大学で 1575 年に設立された。
- ライデン瓶は、この大学の研究者が発明した電気をためる装置。
- ガラス瓶の内側と外側を金属箔を貼ったもので、内側の金属へは金属製の鎖などを通して頭部の金属球に接続される。
- そこに電圧をかけると内外の金属に正負の電気が分かれて貯まる。原理的にはコンデンサーと同じである。

[電気を蓄える]

- 「正負の電気を分離して蓄える」という意味である。
- ふたつの物体で、一方に正電気を蓄え他方に負電気を蓄えた状態にすると、電気を蓄えたという。
- 電気を蓄えるには、外から仕事をしなければならない。

4. ライデン瓶の発明

[左図] 初期のライデン瓶

- 長いフラスコの内外を金属被膜でコーティングし、内側の金属には鎖を垂らして接続する。

[中図] ライデン瓶に電気を蓄える

- 右側の「エレキテル」で起こした摩擦電気を左にあるライデン瓶の内側に蓄える。
- このとき、ライデン瓶の外側へは、人体から電気が移動する。
- こうして、ライデン瓶の内外の金属に電気が蓄えられる。

[右図] 並列接続したライデン瓶

- ライデン瓶の「電気を蓄える能力は低く」、現代の用語で言うと「電気容量が小さい」。
- このため、少量の電気を貯めただけで、電圧が大きくなる。
- ライデン瓶からたくさんの電気を取り出したいとき、ライデン瓶をたくさん並べておくしかない。

5. 電気の正と負, 電荷

- ここで電気に正と負がある（符号付きの数, 実数で表せる）という意味を考えてみよう.
- まず, 電氣的な力に反発力と引力があることは, 電気には2種類あり, 同種の電気は反発し異種は引き合うとすれば説明できる.
- さらに, 同種の電気が集まると大きな力を及ぼし, 異種の電気が集まると力が減ってしまう(図).
- そこで, 一方の電気に正, 他方に負の値を与えると電気現象を数量的に扱えると考えたのである.
- 正負同量の電気が集まると完全に中性になり電氣的な力を外部に及ぼさないが, たとえば負電荷が流れ出せば残された部分は負が不足するので正の電気を帯び(帯電), 流れ出した先は負に帯電する. このフランクリンの説が現在に受け継がれた.
- 電気現象の原因となるものを**電荷**(electric charge), 電荷の量を**電気量**(quantity of electricity)とよぶ. たとえば“ある粒子は電荷を持ちその電気量に応じて電氣的な力を受ける”などという.
- 電気量のことを電荷と呼ぶこともあり, “2つの粒子の電荷は大きさが同じで符号が異なる”などという.

6. 電気の移動 導体, 半導体, 絶縁体

- 物体は電気が「通す」性質があることも、先人は気づいていた。
- 物体を「電気の通しやすさ」により分類する言葉が「導体」、「半導体」、「絶縁体」である。
- ある物体が電気を「よく」通すか否かは、他の物体との比較で決まり、絶対的な概念ではない。
- 過去には、（水分を含みやすい）麻縄を、（水分を含みにくい）絹で吊して、電気を通す実験が行われた。このときは、麻が導体、絹が絶縁体である。（図）
- とはいえ、さまざまな物質を比較すると、金属は非常に電気を通しやすく、ガラスやセラミックスは非常に電気を通しにくい。
- こうして、導体の代表が金属、絶縁体の代表がガラスやセラミックスというのが一般的な理解である。
- 半導体は「電気の通しやすさが絶縁体と導体の中間に位置するもの」という意味だがパソコンの CPU やメモリーに使われる半導体は、シリコン（に不純物を混入した材料）が使われる。それ以外にはゲルマニウム、ガリウムとヒ素の化合物、などなど。
- 半導体の電気の通しやすさは、温度に非常に敏感に変化し、機器の熱暴走が起きることがある。積極的な利用として簡便な温度計に用いられる。ダイヤモンドは、少し温度を上げると半導体になる。

7 原子, 電子, 原子核, 素電荷

- われわれが見たり触れたりする物質, たとえば金属, プラスチック, 木材, 水, 空気などは連続的で切れ目がないように見えるが, どのような物質も**原子(atom)**という“ひとまとまりの構造”をもつものから構成されている.
- 原子は大小さまざまな**分子(molecule)**をかたちづくり, われわれの体も膨大な数の分子からなる. 原子1個の大きさは nm (ナノメートル)程度である.
- 物質が原子や分子という粒子すなわち個数を数えられるものからつくられるという知識は, 20 世紀の科学の重要な成果である.
- 原子にはさらに内部構造がある.
 - 水素原子の中心には**陽子(proton)**という粒子があり, そのまわりを**電子(electron)**がまわっている(図).
 - 電子の運動範囲が原子の大きさとなる.
 - 水素以外の原子も同じような内部構造をもち, 中心には陽子と電荷をもたない**中性子(neutron)**が密集する**原子核(nucleus)**があり,
 - そのまわりにはいくつもの電子がまわっている.
- 電子と陽子の電荷は大きさが同じで符号が異なり, 互いに電気的な引力をおよぼしあう.
- 陽子は電子より約 2000 倍も重いので原子核のまわりを電子がまわっていると考えてよい.
- 1 個の原子に含まれる電子の数と, その原子核に含まれる陽子の数は同じで, 原子は全体として電氣的に中性である.
- 物体に含まれる陽子と電子の個数に差が生じると電気を帯びた状態になる.
- 物体の電気量は, 電子の電荷あるいは陽子の電荷の整数倍で変化する.
- 電子の電荷の絶対値を**電気素量**あるいは**素電荷(elementary electric charge)**という.
- 素電荷の大きさ 約 1.6×10^{-19} C (クーロン) という値は重要である.

8. 電池の発明

電気の研究には（何の研究にも）道具が必要であった。その発展の過程を見ると、

1. エレキテルで摩擦電気を起こせるようになった。しかし摩擦をしている間だけしか実験できない。
2. ライデン瓶に電気を蓄えることができるようになった。しかし電気を流し続けることはできない。
3. 電池により、電気を流しつづけることができるようになった。

こう考えると、電池の発明は偉大である。

電池が発明されるきっかけは、1780年にガリバーニに「動物電気」の発見である。

ガリバーニはカエルの解剖中に鉄と黄銅で筋肉がけいれんすることを発見した。

ガリバーニは、この電気が生物の組織から発生すると考えた。

一方、アレッサンドロ・ボルタは、2種の金属をカエルに接触させたときに金属から電気が起こると考え

電池を発明した。電池の分極作用⁺の防止には30年ほど要した。

ボルタは、電気盆（平行板コンデンサーの始祖）を用いた研究で、電気容量の概念を導いた。

これを記念して、電位差の単位をボルト(V)とすることになった。

ボルタ (Volta, Alessandro)

国籍

イタリア

生没年

1745年～1827年

主業績

ボルタの電堆

略歴

コモで生まれた物理学者である。1774年コモ大学、1779年パヴィア大学、1814年パドバ大学の教授を勤める。

業績

気体の性質に関する研究を行った。その後電気の研究に専心した。電気盆、検電器を発明した。

1797年に接触電気を発見し、種々の金属について調査し、ボルタ列を発見した。ボルタの電堆(1799)、ボルタの電池を発明した。

影響

ボルタの電池により定常電流が得られるようになった。

⁺電池の分極作用

ボルタの電池では、時間とともに電池の起電力が低下する。電極表面に水素の泡が生じるのが原因である。

発生した水素ガスを水にして分極を起こさない目的で加えられる酸化剤を減極剤という。

9. 電流と電荷

「電荷の流れ」が電流である。

[電流の向き、電流の場所の電荷]

たとえば、放射性物質から出る α 線（ α 粒子：ヘリウムの原子核で正電荷をもつ）は電流である。

正電荷の移動の向きが、電流の向きであると約束するので、 α 線の向きに電流が流れる。

電流が流れている場所には正電荷がある。

たとえば、内部を真空にしたガラス管の中の電子ビーム（電子の流れ）は電流である。

電子の運動方向と逆向きの電流が流れる。

電流が流れている場所には負電荷がある。

たとえば、金属中を電流が流れるとき、原子を構成する原子核（正電荷をもつ）は動かず、

原子を構成する電子の一部が（原子から離脱して）自由に動き回る。

電流は電子の運動によるから、電流の流れの向きと、電子の移動方向は逆である。

電流が流れる場所には、「原子核と原子から離れていない電子」「自由に動き電流を担う電子」があるので

電荷は正負が相殺して 0 となり、電氣的に中性である。

[電流の定義]

右図のように、導線から注目する部分に電流が流れ込むとしよう。

電流が流れ込むとは、電荷が流れ込むことに他ならない。

注目部分の電荷は、時刻 t において $Q(t)$ である。

時刻 t_A から t_B の間の $Q(t)$ の変化 $Q(t_B) - Q(t_A)$ を、経過時間 $t_B - t_A$ で割った量を、この時間の平均電流という。

$$\text{平均電流 } I = \frac{Q(t_B) - Q(t_A)}{t_B - t_A}$$

ある時刻における電流の瞬時値は

$$I(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{Q(t + \Delta t) - Q(t)}{\Delta t}$$

となり、これを、ふつうは電流と言っている。

[重要な仮定]

ある場所で電荷が変かしたら、それはすべて電流のせいである：電荷は不生不滅である。

もしそうでなく、電流と関係無しに $Q(t)$ の値が変動するのなら、この電流の定義は無意味である。

[定義の拡張]

導線を通る電流：導線のある位置を通る電流は、その位置で電荷が一定の時、時間 Δt 内に、その位置の導線の断面を通過した電荷 ΔQ を、 Δt で割ったものに等しい。

10. 電流の向き

電流の向きは、正電荷が移動する方向とする。

負電荷が移動して電流を担うときは、負電荷の移動と逆向きを電流の向きとする。

図は、金属を流れる電流のイメージである。

- ・ 正に帯電したイオンコア（原子からいくつかの電子が離れ去ったもの）が結晶格子をなし、互いにある距離を保って固体となっている。
- ・ 原子から離れて自由に動ける電子（自由電子ともいう）が電流をになう。電導電子ともいう。
- ・ 自由電子が赤い矢印の向きに動く。
- ・ 熱運動のため、各自由電子の速度ベクトルはランダムだが、全体を平均すると電流と逆向きの速度となる。

金属に電流が流れていても、帯電していない。

11. 電流の定義

ここまでは、電荷をもとにして電流を定義した。

電荷を別途定義しておけば、それでもかまわないのだが、現代は、電流をもとにして電荷を定義する。

2本の電流が流れる導線の間には（磁場を介して力が働く）という事実がある。導線に働く力の大きさを測ることは、常に可能である。

[電流の定義]

ある設定で2本の電線に同じ電流を流したとき働く力がある値の時、その電流を基準とする、と決める。

設定： 1mの間隔で平行に張った導線の長さ1mに加わる力

力： $F = 2 \times 10^{-7} \text{ N}$

電流の基準： 1A

12. 電荷の単位

1 A(アンペア) の電流が流れる導線の断面を 1s の間に通過する電荷を 1C (クーロン) という。

時間的に変動する電流から電荷を求める：

$$Q(t_A) - Q(t_B) = \int_{t_a}^{t_b} I(t) dt$$

この定義は、先に学んだ

$$I(t) = \frac{dQ}{dt}$$

と等価である。

13 空間に広がった電荷

電荷は、陽子や電子がもっている。

日常的な目で見ると、どちらの粒子も大きさのない点のように見える。

こうして、質点と同じように「点電荷」というモデルを考えるのは、正当である。

日常的な状況では、非常に多くの点電荷が、ある大きさの空間に散らばっている。

1個の素電荷の値が非常に小さく、個数が非常に多いので

あたかも連続に分布しているように見える。

連続的に変化する量は、実数の連続な関数を用いて表せる。

点電荷を非常にたくさん集めるときに和だったものが、連続関数の積分になる。

[連続分布の密度]

小さな体積 ΔV の中に電荷 ΔQ が含まれるとき平均の電荷密度 $\bar{\rho}$ は

$$\bar{\rho} = \frac{\Delta Q}{\Delta V}$$

と定義される。単位は[C/m³].

体積を無限小にすると、空間のある位置における電荷密度となる：

$$\rho = \frac{dQ}{dV}$$

逆に、密度が一定なら体積 V に含まれる電荷 Q は

$$Q = \bar{\rho}V$$

密度が場所ごとに変化するなら

$$Q = \iiint_{V\text{内部}} dQ = \iiint_V \rho(\vec{r})dV = \iiint_V \rho(x, y, z) dx dy dz$$

となる。最後の式は3次元空間内の3重積分である： $dQ = \rho(\vec{r})dV$ を全域にわたって寄せ集める。

[1次元と2次元の密度]

直線上に電荷が分布するとき、単位長さあたりの電荷を定義できる：電荷の線密度という。

平面上に " " , 単位面積あたり " " : " " 面密度