

«Квант» для младших школьников

クヴァント誌から

やさしい物理学

23

小島 英夫 (静岡大学) 訳

Japanese translation rights arranged with VAAP through Japan Soviet Copyright Center, Tokyo.

摩擦電気とは一体なんだろう? L. A. アシュキナジ (1985, No. 6, pp. 16-19)

また静電気だ—  
 フレィキサーから埃(ほこり)の付いたレコードを取り出しながらかくことがある。空気が乾燥しすぎていると、織機や印刷機のまわりにこぼれ散った糸屑や紙切れは静電気を持ち、感光性の合成フィルムは感光してしまう—静電気を帯びると放電が起こり、光が出る。静電気を帯びた衣類が着ている人にまとわりつく位はたいした問題では無いとしても、リノリウムの床を歩いてきて帯電した人が金属の備品に近付いたときに毛皮のコートから何センチもの火花が出るのは笑い事ではない。合成繊維のシャツを脱いだ後ではいつでも、手を金具に近づけると放電によるショックを感じる。少し感度の良い半導体装置は、設置場所の床に伝導性の塗料を塗っておかないと静電気の放電で駄目になってしまう。

より深刻な結果は、容易に推測できるだろうが、乾いた道路とタイヤの摩擦から生ずる。道路との摩擦で帯電した車から降りたり、乗ったりするときにおれわれは車に引っぱられ、ガソリンを積んだタンクローリーの近くで火花が生ずれば火事を引き起こすだろう。だから、可燃物輸送車が車体の後部にぶら下げて道路に引き摺っている鎖は、決して飾り物ではないのだ。摩擦電気は可燃性の蒸気や埃の存在する工場内部では危険である—摩擦電気が生じた放電は爆発を起こす原因になる。実際、アメリカ合衆国では、1900年から1959年までの間にそのような爆発が約20回記録されている：それらの事故で10人が死亡し、総計約200万ドルの損害があった。

それでは、摩擦電気にも何か役に立つことがあるだろうか：それは—最も簡単に高電圧を得

る方法である。電気盆を覚えているだろうか。電気盆は—未だに最も普及した高電圧発生装置(20MVまでの)であるヴァン・デ・グラーフ加速器の〈古い兄弟〉である。最後に、おそらく摩擦電気は、人類が研究した最初の電気現象である。

数千年前に、既に人々は一つの物を他の物に擦(こす)りつけたとき、今の言葉でいう帯電が起こることを知っていた。古代エジプトやギリシャの神官は、パピルスの一片を引きつける櫛を出しものにして、大衆を驚かせて居たのかもしれない。しかし、歴史がそれほど古いにもかかわらず、摩擦電気に関する問題は今までに全てが明らかになった訳ではない。かつては接触に際してある種の電気流体が一方から他方に流れ、電気流体の不足した物体が過剰な物体を引きつけるのだと考えられたこともあった。

人類が電子を発見すると、帯電した物体は電子を余分にか、不足にか含んでいるのだということを知り、摩擦によって電子が一方から他方に移動するのだと考えるようになった。しかし、そのような結論に確実な根拠がある訳ではない：誘電体の中では—誘電体の上でも—電子は自由には動けない。最近の10年間に、摩擦電気がどの様に起こるかについての理解が著しく進んだ。その結論は次の様なものである。

1969-1977年の間にレ

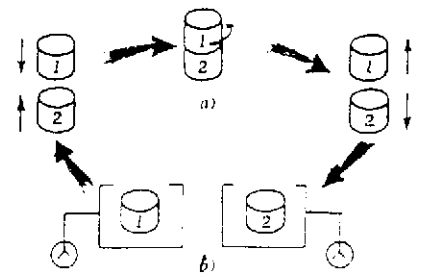


図 1



ニングラード(現サントペテルブルグ)のA.F. ヨッフエ名称物理工学研究所で、以下に紹介する実験が行われた。良質の誘電体(テフロン、琥珀、ルビー、有機ガラス)で出来た直径10mm、高さ14mmの2個の円筒の断面を接して置き、毎秒0.5回転の速さで一方を他方に対して回転させた(図1a)。3回転した後で円筒を引き離し、検電器を備えた容器に入れ、両円筒の電荷を検電器で測定した(図1b)；それから円筒を再び重ね、3回転し、電荷を測定した。この過程を何度も繰り返した。はじめ帯電してなかった試料は、摩擦によって電荷を持つことが分かった。しかし、両円筒の電荷の総量は零であった。したがって、この電荷移動の過程には「第3の物体」は関与していない。

さらに、回転速度を速めたときには、円筒の回転で生じる電荷は始め次第に増加するが(一方は負に、他方は正に)、およそ毎秒30回回転で定常状態に達する。単に円筒を重ねただけでは電荷の移動は起こらず、摩擦が本質的であることが分かる。試料を真空容器に入れておくと、蓄えられた電荷は数週間保存される。大気に触れさせておくと、電荷は一日で「逃げて」しまう——大気中に存在するイオンが試料の表面電荷に引き寄せられ、中和してしまう。(付言すれば、この効果を測定原理として、放射線量の測定をする装置を作ることができる：放射線は大気を電離し、そこで生じたイオンは予め帯電させておいた微細検電器

の電荷を中和する；検電器の金属片が「閉じる」速さは、放射線の強さを示す尺度になる。)試料と大気の接触が断たれると、誘電体の電気伝導率が小さいので試料の内部から表面への電荷の流れは起こらず、表面電荷の中和は急激に遅くなる。

この様にして、摩擦電気によって帯電した試料が、なぜ電荷を失う(放電する)のかは理解できた。しかし、一体なぜ帯電するのだろうか？

試料の表面にたまった電荷と試料そのものを、もう少し詳しく観察しよう。イオン性の誘電体、すなわちその結晶格子が2種のイオンからできている誘電体の試料を考えよう。具体的に、例えばLiFをとろう。結晶が出来るとき、本来イオンが在るべき格子点にイオンが存在しない所——空格子点——が必ずできる(訳注：統計力学の原理により、空格子点の有る状態の方が無い状態より安定な事が分かる)。空格子点はLi<sup>+</sup>イオンの位置にも、F<sup>-</sup>イオンの位置にも出来るが、もし両空格子点の数が同じでないと、結晶は正味の電荷(固有電荷)を持つことになる。固有電荷がある場合には、大気中のイオンが試料に引き寄せられる。表面に吸着された水の分子や大気中の気体の分子は、全体として「表皮」をつくる。表皮の電荷の量は試料の固有電荷の量と厳密に等しいが、もちろん符号は逆である(つまり、試料全体は中和される)。

当然の事だが、次に問題になるのは——誘電体による違い、固有電荷の違い、および表皮電荷の

違いである。

擦り合わせるにより、表皮は混ぜ合わされ——帯電した物体片が得られる。例えば、各試料の円筒の長さが直径と同じである場合を考えよう。すると、一つの断面の面積は全表面積の  $1/6$  になる。両試料の擦(こす)る前の表皮電荷の総量を  $q_A$  および  $q_B$  とし、それぞれの表皮電荷は試料表面に様に分布しているとする。擦ったあとで、摩擦面の表皮電荷が混ぜ合わされ、それが二つの摩擦面の上に均等に分布したとして、そのときの両試料の全電荷をそれぞれ  $q_A'$ 、 $q_B'$  とする。新しい表皮電荷は前の固有電荷の  $5/6$  に  $q_A/6$  と  $q_B/6$  の和の半分  $\frac{1}{2}$  を足したものになる：

$$\begin{aligned} q_A' &= \frac{5}{6} q_A + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{6} q_A + \frac{1}{6} q_B \right) \\ &= q_A + \frac{1}{12} (q_B - q_A), \\ q_B' &= \frac{5}{6} q_B + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{6} q_A + \frac{1}{6} q_B \right) \\ &= q_B + \frac{1}{12} (q_A - q_B). \end{aligned}$$

明らかに、擦った面の表皮電荷が変化する場合には ( $q_A = q_B$  のときは常にそうなるが) 各試料の全電荷が変化する。

それでは、同じ誘電体の二つの試料は摩擦電気を帯びるだろうか？ もし、それらが同じ固有電荷を持っている場合には、擦っても帯電しない。しかし、それぞれの固有電荷は違う可能性がある。すなわち異なる量の空格子点を含むことがある。それは試料片の形成条件が違うときに起こる(例えば、一方のイオン性誘電体の試料片は結晶を作る元素の蒸気が十分に供給され、空格子点の多くが埋められるが、他方は蒸気の圧力が低く、より多数の空格子点が残るような時である)。そのような場合には、同じ、例えばルビーで出来た二つの円筒を摩擦したときにも帯電が起こる。

帯電は摩擦した時にだけ起こるのではない。ファラデーは1833年に、結晶を変形したとき、特にそれを破壊したときに帯電が起こることを観測している。しかし、この現象を研究するには時期が早すぎた。ほぼ100年後の1930年に、雲母を劈開(へきかい)したときの帯電が注目を集めたが、劈開の際の帯電の詳細な研究はさらにそれから四半世紀後に始められた。

既に述べたように、きれいな表面を持ち、表皮

の無い誘導体結晶(それ自体)は、中性ではない。結晶中には空格子点があり、通常それらは結晶の内部に不均一に分布している。試料の表面に出来る表皮電荷は、多くの場合に表面にほぼ様に分布していると考えられる。結晶を半分に分けたとき、一方は(遺産として)体積と表面の半分を、それと同時に表皮の半分を受け取る。そのとき、表皮電荷は正直に等分に分れるが、不均一に分布している体積電荷は等分には分れない。このような場合には、分割した二つの部分を得る電荷は逆符号を持ち、一方の部分は表皮電荷が固有電荷(体積電荷)より多く、他方は少ない。しかし、電荷が不平等に分けられる原因はまだ他にもある。

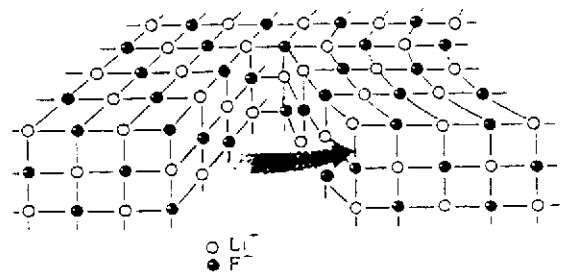


図2

LiF 結晶は、最も簡単な構造をもつ結晶の一つである：立方格子の任意の軸に沿って Li-イオンと F-イオンが交互に並んでいる。衝撃を与えたとき、結晶は多くの場合に結晶格子の軸に垂直な面に沿って劈開する(図2)。しかし、時には割れ目が変わって、対角線に沿った、同じ種類のイオンが並んだ面内に劈開面ができることがある(図3)。

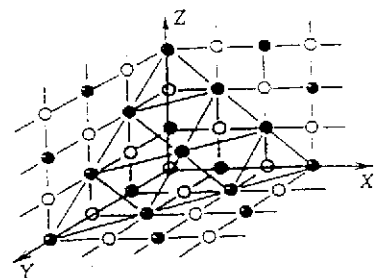


図3

このとき、劈開した直後の割れ目の一方の表面には1種類の符号のイオンが、他の表面には反対符号のイオンが現れる。実際、検電器の探針を劈開面に沿って動かすと、それぞれの領域が見つかる。

## 第13回 日本数学会市民講演会

平成7年3月27日(月)-30日(木)に立命館大学びわこ・草津キャンパスにおいて日本数学会の年會が開催されます。そのとき主に高校生、大学生、中学・高校の教員、一般の研究者、社会人の方々を対象に公開講演会を次のように行います。

**会場** 立命館大学びわこ・草津キャンパス プリズムハウス101教室  
**日時** 1995年3月30日

1:30~2:30

**講師** 河野俊文(東大数理)  
**題目** 組ひもをめぐる幾何学と数理物理の展開

2:45~3:45

**講師** 梅村 浩(名大理)  
**題目** 代数方程式、微分方程式、ガロア理論 一古典解析学と代数幾何学一

### プロフィール

河野俊文さん

専門は位相幾何学、特に結び目、3次元多様体の位相的場の理論の観点からの研究に興味をもっている。解説書「組ひもの数理」(遊星社)

梅村 浩さん

専門は代数幾何学であるが、古典解析学に新しい観点を導入してその本格的な再生を目指して、古典数の概念を提唱した。

## 日本数学会主催

なお、日本数学会への入会の方法等については  
〒113 東京都文京区本郷4-25-9-203  
社団法人 日本数学会 事務局  
電話 03-3816-5961  
にお問い合わせ下さい。

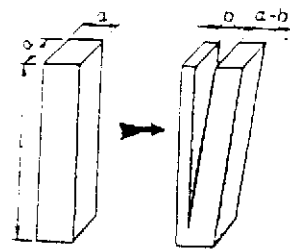


図4

しかし、分離した二つの断片が著しく異なる電荷を持つ例は、試料を不等分割したときに生ずる。ここで一辺が  $a$  の正方形の断面を持つ、長さ  $l$  ( $\gg a$ ) の長い結晶を、厚さが  $b$  と  $a-b$  の二つの部分に分ける場合を考えよう(図4)。もし、全結晶の固相体積電荷 ( $Q_{vol}$ ) の平均密度が  $\rho$  であるとすると、表皮の表面電荷 ( $Q_{sur}$ ) の密度  $\sigma$  は、全電荷の和が零になるという条件から求まる:

$$Q_{vol} + Q_{sur} = 0.$$

断面の面積が小さく、その上の表皮電荷を考えなくてよい場合を考察しよう。すると、上の式は次のように書ける:

$$4alb\sigma + \rho la^2 = 0.$$

これから表皮電荷密度が求まる:

$$\sigma = -\frac{a\rho}{4}.$$

分割した左と右の部分の体積電荷密度が等しい ( $\rho$  である) とすると、左側の部分の全電荷は体積電荷と表面電荷の和で与えられる:

$$\rho abl + \frac{\rho al}{4}(a+2b) = \frac{\rho al}{2}\left(b - \frac{a}{2}\right) < 0.$$

この結論も実験によって確かめることができる。もちろん、帯電の機構について分かっていることはもっと一杯ある。多くの興味ある問題がある: 結晶を分割した瞬間の割れ目について(電子は一方の壁から他方へ「ジャンプ」することができる)、サファイアの〈斧〉の先端について(電子はその上を移動できる)、さらに、誘電体を金属に擦りつけたときの帯電の機構について、結晶を圧縮した時の帯電の機構について、などなど。これらの問題のあるものは既に解決している。残りのものは——解決されるのを待っている。それを解決するのは、君かもしれない。

(訳 こじま ひでお)