



小島 英夫 (静岡大学) 訳

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

1. 電流の最初の源 A. キコイン (1992, No. 1, pp. 35-36)

最も簡単な回路を流れる電流でさえ、いくつかの不思議な現象を示す。実際、電流は電荷、例えば金属導体中の電子の方向性を持った運動である。電荷の方向性を持った運動は電場によって引き起こされる。しかしよく知られているように、導体の中には電場は存在しないし、さらに閉じた経路に沿って電場がする仕事は零である(そして定常電流の流れる電流回路はつねに閉じている)。それにも拘らず、電流が回路を流れると仕事をす。その仕事の結果が、例えば導体の加熱である。

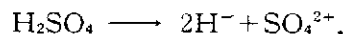
どうして回路には電流が存在し、なぜその際に仕事が行なわれるのだろうか？

これらの現象は、回路に非電気的な力が働いて、電場と零でない仕事とを回路に創り出し、維持しているときにだけ起こりうる。このような力は「外部起電力」(非電磁氣的過程による起電力)と呼ばれる。そのような起電力が生ずる回路の部分を電源という(完全に適切な言葉というわけではないが)。

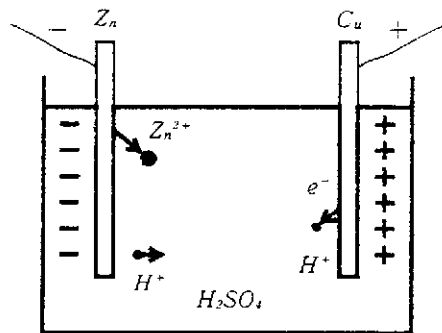
外部起電力とはどんなもので、それはどのような作用をするのだろうか？ 例として、最初の直流電流の化学的な源を取上げよう。18世紀の末にイタリアの物理学者アレクサンドロ・ボルタ (1745-1827) が発明したものである。この電源は現在「ボルタ電池」と呼ばれており、硫酸溶液に浸けられた亜鉛の電極と銅の電極とからできている。

注意すべきことは、銅と亜鉛が中性な原子から出来ているのではなく、対応する金属のイオンと、原子から離れ自由になった電子とから出来ていることである。また硫酸溶液も中性な水分子 ( $H_2O$ ) と硫酸分子 ( $H_2SO_4$ ) とから出来ているの

ではない、ということも考慮する必要がある。分子  $H_2SO_4$  のかなりの部分は、水中で2個の正に帯電した水素分子と負に帯電した2個の塩基に解離している：



このような溶液に電極を浸したときに、どのようなことが起こるかを考えてみよう(図参照)。亜鉛から始めよう。



硫酸溶液に亜鉛を浸すと、 $SO_4^{2-}$ イオンと  $Zn^{2+}$ イオンとの間の化学反応が始まり、その結果亜鉛イオンは電極を離れて溶液に入る。その際に電極には電子の過剰が生じるので、電極は負に帯電する。 $Zn^{2+}$ イオンが溶液中に貯まるにつれて、その一部は電極に引き寄せられ、逆戻りする。最後に動的な平衡に達する：亜鉛から出るイオンの数とそこへ戻るイオンの数とが等しくなる。電極は負に帯電しているが、電極の近くの溶液は(亜鉛イオンのために)過剰な正の電荷を持つ。

亜鉛電極の近くの過剰な正電荷の出現は、溶液内にすでに存在したイオンの再分配を生ずる。隣接する層の負のイオンの一部は電極の方へ移動し、正電荷の一部はより離れた層へ移る。同様な移動が、銅の電極の近くの層にいたるまでのすべ

ての層で起こる。銅の電極では全く違う過程が生ずる。

亜鉛と違って、銅は塩基中に殆ど溶けない、つまり溶液中に自分のイオンを出さない。逆に、銅の電極にぶつかった溶液中の正の水素イオンは銅の自由電子を取って中性化する。銅は正に帯電し、その近くの溶液は過剰な負電荷を持つ。

このようにして、ボルタ電池の銅電極は正極に、亜鉛電極は負極になる。その間の電位差は、約1.1Vである。

こんどは、この電極間に金属導体を接続したらどうなるかを考えよう。回路の電池の外の部分(導体内)の自由電子は、過剰に存在する亜鉛から不足している銅の方へ向かって動き始める。これが回路の外の部分に生ずる、銅から亜鉛に向かう電流である。

ボルタ電池自身では何が起きているのだろうか？ 亜鉛から電子が出して行くと、亜鉛電極と溶液の間の平衡が破れ、その結果補足的な亜鉛イオンが溶液中に流れ出て電極の負電荷を維持しようとする。一方銅電極に電子が流入すると溶液中の水素イオンは銅電極で余分に中和される。その結果、銅の正電荷量は維持される。両電極で起こるこれらの過程の結果は、次のようになる：銅電極からは電子が失われ(これが水素イオンを

中和する)、亜鉛電極では電子が生ずる(亜鉛イオンが出て行く)。したがって、電子は溶液内で銅から亜鉛に向かって運ばれる。明らかに、この過程が成立するためには、なんらかの非電氣的な力が一定の仕事をする必要がある。

このようにして、外部回路では亜鉛電極から銅電極に向かって自由電子が動くのと同時に、電源の中ではイオンが動く：正イオンが亜鉛から銅へ、負イオンが銅から亜鉛へ。したがって、閉じた回路では電荷の移動する循環過程、すなわち電流が生ずる。

どのような力が働いて、銅電極と亜鉛電極の間に一定の電位差を維持しているのだろうか？ それはボルタ電池の内部に存在する、いわゆる化学的力である。言い換えると、電流のエネルギーの源は電極と硫酸溶液の間の化学反応で発生するエネルギーであると言える。

このことから、電流の源は実際にはエネルギーの源であることが分かる。そのエネルギーを使って回路に電荷を流すための仕事もなされ、例えば導体の加熱も起こる。回路を一周する単位電荷になされる仕事を〈電源の起電力〉と言う。

電源が違えば、そこで起きている過程も違い、違う力が働くが、その役割は変わらない。ボルタ電池についてここで考えたものと同じである。

## 2. 反磁性と常磁性 I. K. ヘルキン(1985, No. 4, pp. 19-20)

よく知られているように、物質中の磁気誘導  $\bar{B}$  は真空中の値より大きくも、小さくもなりうる。前の場合には物質が常磁性体である、後の場合には物質が反磁性体であると言われる<sup>1</sup>。常磁性と反磁性の原因はなんだろうか？

常磁性体の性質は簡単に、次のように説明される。原子(あるいは分子)の中で電子は閉じた経路(軌道)に沿って運動している。この微小な電流は分子電流と呼ばれるが、磁場(固有磁場)をつくる。外部磁場がないときには、原子の熱運動のために軌道の面は無秩序に分布し、全原子のつくる固有磁場の磁気誘導は平均すると零になる。

物質が外部磁場の中に置かれると、電子の軌道(電流の枠のような)の面は部分的に回転し、それによって創られる磁場の磁気誘導が外部磁場の磁気誘導ベクトルに加えられる。その結果、全磁気誘導は外部磁場の磁気誘導より大きくなる。

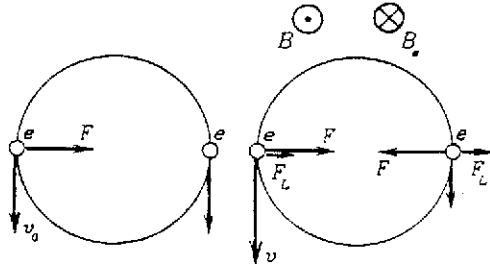
反磁性の性質はもう少し複雑である。それを理解するためには、電磁誘導現象を思い出す必要がある。電流回路の中の磁場が変化すると、そこに誘導電流が流れる。レンツの法則によって、この電流は、それがつくる磁場が磁場の変化を妨げる向きに流れる。電気抵抗のない回路、たとえば超伝導体の回路や原子の中の軌道にある電子の〈回路〉では、誘導電流は減衰しない。この電流は外部磁場がある限り持続する。誘導電流のつくる磁場の向きは外部磁場と逆向きであり、したがって物質中の全磁気誘導は小さくなる。

どの物質でも、この二つの効果が存在する。一方で、外部磁場は電子軌道を整列させ、磁気誘導を大きくする。他方で、外部磁場は軌道内の電子

<sup>1</sup> 常磁性体および反磁性体とならんで、さらに強磁性体が存在する。強磁性体は、ある温度以下で外から磁場をかけなくても物質内に磁気誘導が存在する。

の運動を変え、電磁誘導の法則に従って磁気誘導を小さくする。

磁場の減少は通常非常に小さく、したがって反磁性が現れるのは固有磁場を持たない(したがって常磁性効果がない)原子からできた物質だけである。



最も簡単な反磁性原子として、つぎの例がある：2個の電子が原子核の周りの同一の軌道を逆向きに運動している(図参照)。この場合には、2個の電子の作る磁場は互いに打ち消し合い、軌道面の回転は磁場を大きくしない。したがって、この場合には反磁性効果がそのまま現れる。この現象を詳しく考察しよう。

外部磁場が無い場合に、原子中の2個の電子が半径Rの円軌道を、速さ $v_0$ で互いに逆向きに運動していると(図参照)。磁場が加わるとらせん状の電場が生じ、電子の運動速度が変わる。変化後の電子の速さを $v$ とする。磁気誘導ベクトル $\vec{B}$ が軌道面に垂直であるとすると、電子には大きさが $F_L = evB$ のローレンツ力が働く。

磁場をかける前と後の、軌道に沿った2個の電子の運動にたいするニュートンの第二法則を書こう(図参照)：

### 3. オーロラ A. キコイン(1989, No. 5, pp. 58-60)



オーロラ (19世紀末の木版画)

北極圏(北極に隣接する地域)と南極圏(南極に隣接する地域)で見られる、色とりどりの、幻想的な「炎」はオーロラと呼ばれる。

北極光(文献ではこう呼ばれることもある)は、非常に古くから知られていた。古代の著作家がそれに注意しており、中世の年代記作者は北極光についての記録を残している。1716年にイギリスで見られた北極光はガレによって記録された。ロモノソフは幼時と青年期を北方で過ごしたことがあり、北極光(ロシアの白海とバレンツ海沿岸の住民はスパローハとかパソールと呼ぶ)をしばしば見ているが、この現象が電氣的な原因で起

$$\frac{mv_0^2}{R} = F, \quad \frac{mv^2}{R} = F \pm evB.$$

ここで、 $F$ は核から電子に働く静電引力の大きさであり、 $\pm$ は電子の回転の向きに対応して取ることにする。この二つの式の差をとると、それぞれの電子の速さの変化を与える式が求まる：

$$v^2 - v_0^2 = \pm \frac{R}{m} evB.$$

外部磁場が弱いときには、電子の速さの変化 $\Delta v = v - v_0$ は小さいから、近似的に次の式が成り立つ：

$$v^2 - v_0^2 = (v + v_0)(v - v_0) \sim 2v\Delta v.$$

したがって、次の式を得る：

$$\Delta v = \pm \frac{eBR}{2m}.$$

この式から分かるように、いま考えている2電子原子の中の電子は、磁場の中で一方が少し早く、他方が少し遅く回転し、外部磁場を弱めるようにはたらく。

量 $\omega_L = \Delta v/R = eB/(2m)$ は、振動数の次元を持ち、イギリスの物理学者ラーマー J. Larmor に因んでラーマー振動数と呼ばれる。ここでは特別な場合を考えたが、一般的な定理を導くことができる(ラーマーの定理)：磁気誘導 $\vec{B}$ の磁場中の電子の運動は、磁場の無い場合の運動に磁場 $\vec{B}$ の周りの、振動数 $\omega_L$ の回転を加えたものになる。

この定理と $\omega_L$ にたいする表式は、電子の運動に量子力学を用いた場合にも正しいことは重要である。

こると考えた最初の学者の一人である。

研究者は何を見たか？ オーロラ（北極と南極の）は非常に多様である。それは、一様に広がった緑—黄色の帯であったり、下端が尖り、上に行くにしたがってぼやけた円弧状であったりする。高さは下端が100km位で、上端は1000kmにも達する。その形は、独特の光を放つ、地表面に垂直な円弧状か帯状かである。時間的に脈動する円弧や帯を見ることもある。いわゆる灼熱のオーロラは、上方へ動いていく光の波の形をしており、見る人に強い印象を与える。それは風に翻り、消えてゆく炎を思い出させる。

最も頻繁に見られるのは、黄色い斑点を散りばめた緑色である。赤い色もよく現れるが、青や紫もそれほど珍しくはない。

オーロラはどこで見えるか？ オーロラ、とくに北極光は極の近くだけで見られる訳ではない。それは黒海沿岸でも、さらにローマでさえ見られる。しかし北極に近付くにつれ、現れる頻度は著しく大きくなる。

多年の観測の結果、オーロラの現れる頻度が同じ地点を結ぶ曲線が地図上に描かれるようになった（その線を等頻度線という）。それを見ると、例えば黒海沿岸では10年に一度（一夜）オーロラが見られ、イギリスの北部やコラ半島（ロシアの北西部）では一年に100夜、殆どの北極海の沿岸では事実上毎夜見られる。この頻度は一年にオーロラが見られる夜の数を示す。それはしかし、オーロラが見られるのが夜に限られることを意味する訳ではない。オーロラは昼間も現れるが、空が明るいのでオーロラを観察するのは非常に難しい。オーロラはどのようにまたなぜ生ずるのか？

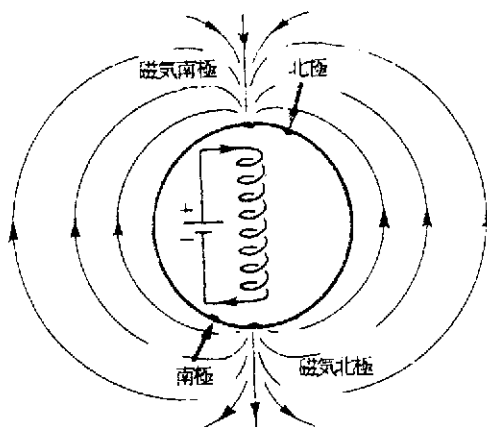


図1

ロモノソフがオーロラを電気的な性質を持つと考えたのは根拠がない訳ではなかった。しかし、現在明らかになっているように、オーロラの発生に関連した複雑な過程には磁気的な現象も重要な役割をする。それは当然である。

地球は巨大な天然の磁石であり、したがって地球は磁場で囲まれている。この磁場は磁化した棒か定常電流の流れているソレノイドの周りの磁場に似ている。図1には地球磁場の磁気誘導線（磁力線）が描かれている。またこの図には、ソレノイドとそれに電流を供給する電源が描かれている。地球内部にはこのような電源はないが、地磁気の〈犯人〉である電流は、地球内部に実際に存在する（地球の核の液体部分に）。図から分かるように、南北の磁極は地理上の極と一致せず、約11°だけずれている。地球磁場は地球半径のほぼ3倍も外へ広がっている（地球中心から）。地表における磁気誘導の大きさは約 $5 \times 10^{-5} \text{T}$ （テスラ）である。

我々の考えている過程の第二の、だからと言って重要度が落ちる訳ではない〈登場人物〉は、太陽である。可視光線や不可視光線（紫外線や赤外線など）の他に、太陽（のコロナ）はプラズマを絶えず放射している。そのプラズマは高速の陽子と電子の集まりである。そのような粒子の流れ——太陽風——が地球に〈吹いて〉くる。

オーロラの現象を理解するためには、この二つの要素が必要である。

太陽風と地球磁場 地球磁場は一様ではない；同じ磁力線の上の磁気誘導の大きさは、極の近くでは赤道上の約2倍である。磁場のこの不均一性が、現在は良く知られていることだが、そこに入ってくる荷電粒子にたいする一種の罠（トラップ）になる。そのような磁場に当たった粒子は、磁力線に沿って（磁力線を包むらせん状に）磁力線が収束する点まで、すなわち磁極の近くまで運動する。そこで粒子は反射されるかのように反対側の極に向かって運動し、そこでまた同じように反射される。粒子は、いわゆる二つの〈栓〉を持った磁気の〈瓶〉に閉じ込められる。栓の役割を果たすのが極における磁力線の収束した場所である。地球は極に近い地域を除いて放射帯と呼ばれる領域で周りを包まれている（その様子を図2に模型的に示した）。放射帯は便宜的に二つの部

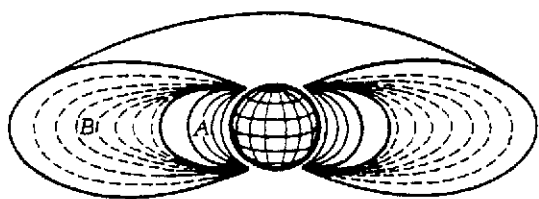


図2

分に分けることができる。内部放射帯(A)と外部放射帯(B)である。内部放射帯の下端は高さ約500kmにあり、その〈厚さ〉は数千 km である。外部放射帯は高さは1万-1万5千 km にある。

興味深いことに、地球の放射帯はオーロラと直接関係している。その訳は、プラズマの特性(放射帯がプラズマで満ちている)とそこで起こる現象のために、〈栓〉が完全に締っておらず、幾らかの粒子が〈瓶〉から〈洩れ出す〉。すると次のような現象が起こる。〈瓶〉から〈洩れ出す〉高速の荷電粒子が大気原子や分子(窒素、酸素)と衝突して、それを励起する、すなわちそれらを高いエネルギー状態へ移す。それに引続いて分子(原子)が始めの状態へ戻るときに、余分のエネルギーを対応する分量(量子)の放射エネルギーを持つ光として放射する。それがオーロラである。

この光の組成(スペクトル)を解析することによって、黄色い光(時には赤い色)は酸素原子が励起されたときに生ずることが分かった。赤色、暗紅色、薄い青色および紫色は窒素分子の励起に関連している。ここで酸素分子ではなく原子について話したことは、奇妙に思われたかもしれない。しかし、大気の上層では、太陽の紫外線によって酸素分子が原子に解離しているのである。

オーロラは地上の実験室内で、あるいは宇宙の人工衛星を使って精力的に研究されている。それらの研究は地球磁場について、地球に近い宇宙空間における種々の物理現象について、貴重な情報をもたらしている。

(訳 こじま ひでお)