

I. K. ベルキン 小島 英夫 (静岡大学) 訳

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

一つの基準系で、静止しているあらゆる電荷  $q$  の周りには、よく知られているように、電場が存在する。もし、その電荷が点状であれば、それから距離  $r$  だけ離れた点における電場の強さは、次の公式で決められる：

$$E = (1/4\pi\epsilon_0)(q/r^2), \quad (\epsilon_0 \text{ は真空の誘電率}) \quad (1)$$

2 個の静止した点電荷  $q, q'$  が、距離  $r$  だけ離れてあるとき、相互に及ぼす力は、次の式で与えられる：

$$F_{ei} = (1/4\pi\epsilon_0)(qq'/r^2) \quad (2)$$

もし、電荷の量が同じであれば ( $q=q'$ )、この式は次の形になる：

$$F_{ei} = (1/4\pi\epsilon_0)(q^2/r^2) \quad (2')$$

これは、よく知られたクーロンの法則である。この法則は実験的に確立されたものであることを強調しておきたい。公式(1)と(2)に現れる量  $\epsilon_0$  は、電気的定数 (物理定数) で、次の値を持つ：

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N}\cdot\text{m}^2$$

次に、一定の速度  $v$  で運動している電荷の場合を考えよう。我々は、速度  $v$  を予め決めておいた基準系で測るものとし、とりあえずその系は静止していると考え、それを  $K$  で表す。

運動している電荷は電流であり、電流の周りには磁場が存在する。すなわち、電荷の運動は、我々が観測している基準系  $K$  における磁場の発生をもたらす。

次のことに注意しよう。もし、われわれが系  $K$  に対して電荷の速度  $v$  と同じ速度で運動している基準系  $K'$  に移ると、この系では、どんな磁場も存在しない (そこに置かれた磁針 (コンパス) はブレないだろう)。

しかし、もう一度  $K$  系に戻ろう。われわれは実

験的に、次のことを知っている：磁場は電流に作用を及ぼし、したがって、運動している電荷に作用を及ぼす。つまり、電気現象と磁気現象との間には、密接な関係がある。

簡単な例を考えよう。電荷  $q$  が速度  $v$  で運動しているとす (  $K$  系において )。すると、その周りの空間には電場と磁場が存在する。そこで、電荷  $q$  によって創られた場の中の一点に、速度  $v'$  で運動している他の電荷  $q'$  があるとしよう。明らかに、この電荷には電気力と磁気力が作用する。同じことは、電荷  $q$  についても成り立つ。

もし、二つの電荷があまり大きくない速度で運動していると (“あまり大きくない” ことの意味は、以下で明らかになる)、各瞬間におけるその電場は、實際上静止した電荷の場合と違わないだろうから、電荷の間の電気的相互作用力はクーロンの法則(2)で計算される。

ここでは、電荷があまり速くは動いていない場合に限定しよう。この時、磁気力と電気力の大きさを、容易に比較することができる。ある時刻に、2 個の電荷が、それらを結ぶ直線には垂直な、互いに平行な直線に沿って運動していたとしよう (図 1)。

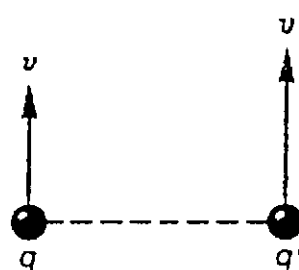


図 1

まず第一に、運動している電荷のつくる磁気誘

導  $B$  の、電荷  $q$  と速度  $v$  にたいする関係を知る必要がある。電荷  $q$  のある点から磁気誘導を計算する点に動径ベクトル  $r$  を引く (図2)。実験の結果を一般化すると、次のことが分かる。磁気誘導の大きさ  $B$  は、次の式で与えられる：

$$B = kv \sin \phi / r^2. \quad (3)$$

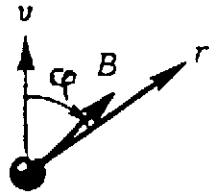


図2

ここで  $r = |r|$ ,  $\phi$  :  $v$  と  $r$  のなす角,  $k$  は実験的に決められる定数であり、次の値を持つ：

$$k = 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{s}^2 / \text{kg}^2.$$

我々の考えている状況では、 $\phi = 90^\circ$  であるから、

$$B = kvq/r^2. \quad (3')$$

ベクトル  $B$  の向きは、栓抜 (右ねじ) の法則で決められる：もしベクトル  $v$  をベクトル  $r$  の方へ、 $v$  と  $r$  を含む面内で、 $v$  と  $r$  のなす角が  $\pi$  より小さい向きに回した時、ベクトル  $B$  はその面に垂直で、栓抜の進む向きである (図2)。

公式(3)と(3')には、因数として比  $q/r^2$  が現れる。これは電荷  $q$  が電荷  $q'$  のある点につくる電場強度の式にも含まれている。この事実は、 $B$  と  $E$  の大きさの間の関係を知るのに使うことができる。式(1)を用いると、次の関係を得る：

$$B = kvq/r^2 = 4\pi\epsilon_0 kvE.$$

$4\pi k = \mu_0$  と書くと、

$$B = \epsilon_0 \mu_0 vE. \quad (4)$$

式(4)に現れる量  $\mu_0$  は、真空の透磁率と呼ばれる (誘電率  $\epsilon_0$  とのアナロジーで)。  $k$  を知ると  $\mu_0$  が計算できる：

$$\mu_0 = 1.256 \times 10^{-16} \text{ N} \cdot \text{s}^2 / \text{C}^2.$$

これから、電荷  $q'$  のある点における磁気誘導  $B$  を計算することができるので、電荷  $q'$  に作用する磁気力 (ローレンツ力) を決定することもできる。一般の場合には、ローレンツ力の大きさは、次の式で与えられる：

$$F_L = q'v'B \sin \alpha. \quad (5)$$

ここで、 $\alpha$  はベクトル  $v'$  と  $B$  の間の角である。ベクトル  $F_L$  の向きも、右ねじの法則で決められる (ベクトル  $v'$  は、 $v'$  と  $B$  を含む面内で、 $B$  との

角が  $\pi$  より小さい方へ、 $B$  に向かって回さなければならぬ。ベクトル  $F_L$  はその面に垂直である)。

我々の場合には、角  $\alpha$  も  $90^\circ$  に等しいので、電荷  $q'$  には次の力が作用する：

$$F_{\text{mag}} = q'v'B.$$

式(3)から  $B$  を代入し、次式を得る：

$$\begin{aligned} F_{\text{mag}} &= kqq'vv'/r^2 \\ &= (\mu_0/4\pi)(qq'vv'/r^2). \end{aligned} \quad (6)$$

$q$  と  $q'$  の間にはたらく電気力は、式(2)で与えられる。ここでさらに、 $q = q'$ ,  $v = v'$  と仮定しよう。すると、二つの力の比は、

$$F_{\text{mag}}/F_{\text{el}} = \epsilon_0 \mu_0 v^2.$$

実験的に知られた定数  $\epsilon_0$  と  $\mu_0$  の値から、

$$1/\epsilon_0 \mu_0 = c^2 \quad (7)$$

および

$$F_{\text{mag}}/F_{\text{el}} = (v/c)^2 \quad (8)$$

これらは、非常に重要な公式である。式(7)は再び電気現象と磁気現象の間に深い関連があることを示している。式(8)からは、次の結論が得られる：磁気力と電気力の比は、多くの実際的に興味のある場合には小さな量である。例えば、電流が流れる金属中で通常実現される電子の速さは、 $0.1 \text{ mm/s}$  の程度である。このような場合には、電子の磁氣的相互作用は電氣的相互作用に較べて、約  $10^{24}$  倍小さい。一般に、運動している電荷の磁氣的相互作用について、これは正しいのだろうか？なぜ、そうなるのかを示そう。

すべての伝導体は、符号の異なる荷電粒子を同数含んでいる。それゆえ、電流の流れている伝導体は実際上中性である。伝導体の中の電気力は非常に正確に補償 (相殺) されており、それゆえ電気力のないときには非常に小さな磁気力でも重要になる。電動モーターでは、コイルを流れる電子はまさに磁気力で相互作用する。磁気力こそがモーターを回すのである。

ここで、以上の考察において“あまり大きくない速度”を仮定していたことを思いだそう。これは、粒子の速度が光の速さに較べて小さい、ことを意味していたのだということが、いまや明らかである。これは、より複雑な (相対論的) 公式を使わなくても良いために、必要なのである。たとえば、光速に近い速度をもつ荷電粒子にたいしては、電場を与える式は(1)式の形にはならな

い。

他の物理量、たとえば粒子の速度と加速度、それに働く力、電場強度と磁気誘導も、我々がそれらをもどのような基準系で考察するか（測定するか）に依存する。われわれは既に上の考察で、もし磁場が系 $K$ で存在したとしても、系 $K'$ では磁場がどうなるかは分らないことを述べた。系 $K'$ が電荷の速度 $v'$ と同じ速度で運動しているとすると、系 $K'$ では磁場は存在しなかった。一般に、ベクトル $E$ もベクトル $B$ も相対的であり、それを測定する観測者がどのような基準系にいるのかに依存する。

我々にとって重要なのは、光速度に較べて小さい速度の場合には、電場の変化が小さいということである。この小ささの定量的な特性を、まさに比 $(v/c)^2$ が表している。

それにも拘らず、式(8)は光速度に近い速度でも成り立つことを注意しよう。したがって、光速度よりほんの少し小さいだけの速度で運動する、相対論的粒子に対しては、磁気力と電気力の大きさは、あまり違わない。

これまでの考察の結果をまとめるにあたって、もう一度つぎのことを強調しておきたい。磁氣的相互作用は電気的相互作用に較べて小さいとは言え、多くの問題でそれは重要な役割を果たす。

磁場と電場（静電場）の間のその他の違いを、ごく簡単に述べておこう。そのうちの一つは、電気力の作用線（電気力線、電場の力線）が、始点と終点を持つことである。それは正の電荷から出発

し、負の電荷で終わる。電場中の2点間で電荷を移動させるために必要な仕事は、移動経路の形にも、長さにも関係なく、また閉じた経路に沿って電荷を移動させた時の仕事はゼロになる。電場のこの性質のために、電場の各点は、電場強度で特徴付けられるだけでなく、ポテンシャルによっても特徴付けられる。

磁気誘導の力線（磁力線）は、電場の力線と違って、始点も終点も持たない。それは閉じており、その中に電流を含んでいる。磁場の各点は、磁気誘導の大きさと向きで特徴付けられ、ポテンシャルによっても特徴付けることはできない。

電場の中に存在する電荷に働く力は、つねに力線の接線の方向と平行に働く。それに対して、電流の流れている導体の一部、あるいは運動している荷電粒子が磁場の中にある場合を考えると、それらに作用する力は、磁気誘導の力線の接線方向ではなく、それに垂直にはたらく（ローレンツ力、アンペールの法則）。磁場中の力は、並進運動を引き起こすことはできず、回転だけを生ずる（一様な磁場中にある、電流の流れているコイル；一様な磁場に垂直な平面内で円運動する荷電体）。

上に述べたすべての事は、電場が多くの場合に磁場とは似ていないことを示している。電場と磁場が関係していることは、それらの間に差異が存在しないことを意味するのではない。

(訳 こじま ひでお)