

電気と磁気のコミ

東京学芸大学 新田英雄

1. 電気のみなもと

1-1. 原子は電気のコで結合している

誰でも知っていることですが、万物は原子からできています。そして、このことが、電気に関するすべての現象を説明する基本なのです。原子は、プラスの電荷（電気）を持つ原子核と、その周りをぐるぐる回っているマイナス電荷の電子とからできています¹。原子をつくり上げているのは、電気のコです。いろいろな原子がいろいろに結合したり離れたりして、私たちの身の回りにある多様な物質や物質どうしの反応が引き起こされますが、その基本となる力は、電気力なのです。

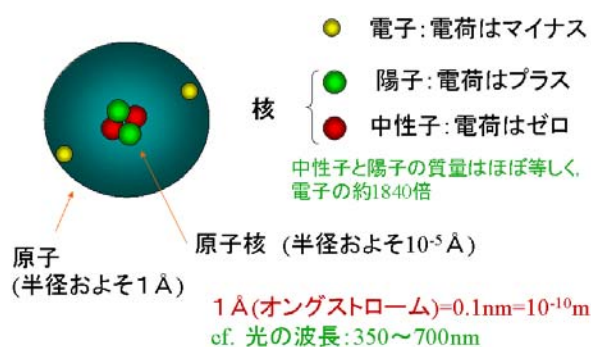


図1-1: 原子の構造.

1-2. クーロンの法則

プラスどうし、マイナスどうしの電荷は反発し、プラスとマイナスの電荷は引きつけあいます。その強さは電荷の大きさに比例し、電荷間の距離の2乗に反比例します。これを、クーロンの法則といいます。その力 F を式で表すと、電荷の大きさを q, q' 、電荷間の距離

¹ 原子の世界を説明するには、本当は量子力学が必要です。量子力学によると、原子の中の電子は、ぐるぐる回っているのとは異なった状態にあります。

を r 、比例係数を k_e として、

$$F = k_e \frac{qq'}{r^2} \quad (1-1)$$

となります。

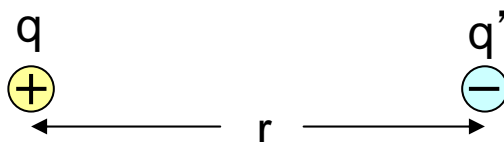


図 1-2 : 引きあう 2 つの電荷

1-3. 電場

電荷を持った物体が単独で存在していて、力を及ぼす相手がない状況を考えてみましょう。そのような場合でも、電荷からは電場というものが発生しているのです。そして、その電荷のそばに他の電荷がやってきたら、直ちに力がはたらき、引き合ったり反発したりするわけです。

つまり、ある電荷が電場 E をつくっている場所に電荷 q をおいたら、力

$$F = qE \quad (1-2)$$

がはたらきます。式(1-1)とくらべると、電荷 q' が距離 r の地点につくる電場は

$$E = k_e \frac{q'}{r^2} \quad (1-3)$$

であることがわかります。式(1-2)と式(1-3)を組み合わせると、クーロンの法則(1-1)が再現できるからです。

現実の電場は、多くの電荷がつくる電場の足し合わせからできているので、実にさまざまです。たとえば、図 1-3 のように、平行な 2 枚の板をそれぞれプラスとマイナスに帯電させた場合にできる電場は、どこでも一定な電場となります。(このことは、式(1-3)を使って計算すると、証明できます。) この場合、電場が電荷に及ぼす力は一定となります。

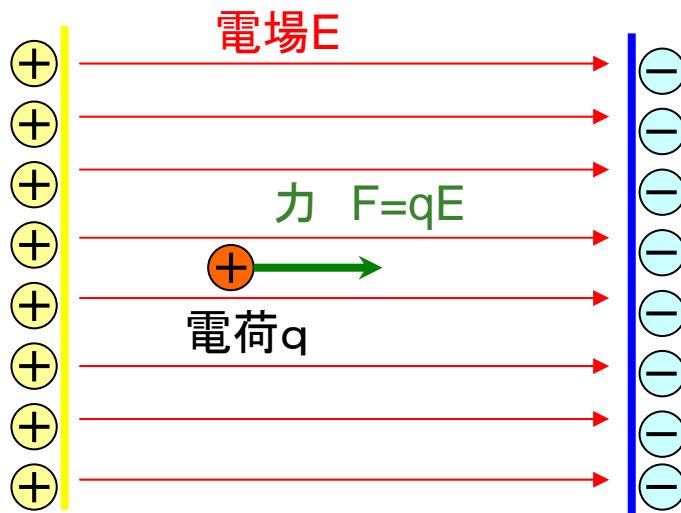


図 1-3：帯電した平行な板のつくる電場と、その間にある電荷の受ける力。

2. 電流と電圧

2-1. 電流とは

電流は、よく水流にたとえられます。導線の中で流れているのは電子ですが、水溶液やプラズマなどでは、電子だけでなくイオンも流れています。電流は、

$$\text{ある断面を流れる電流} = \text{単位時間にその断面を通過する電荷量} \quad (2-1)$$

のように定義されます。要するに、おなじ速さの電荷を考えれば、電荷がたくさん流れるほど電流は大きくなります。一方、電荷の密度が同じでも、電荷の速さが速いほど、電流は大きくなることに注意してください。川の流れてたとえるならば、川の幅が広いほど、流れる量が大きくなります。一方、同じ幅の川でも、流れが速い方が、1秒間に川の断面を通過する水量は多くなります。これは、電荷の速さが速いほど、電流が大きくなることに対応しています。

2-2. 電圧とは

川は高いところから低いところに流れていきます。同じ高さだと、ポンプなどで無理やり流れを作ってやらない限り、水は流れません。それと同じように、電流も、高いところから低いところに流れます。ただし、ここでいう「高いところから低いところ」とは、電圧（電位差）の高いところから低いところへ、という意味です。

電圧の意味を考えてみましょう。そのためには、なぜ水は高いところから低いところへ流れるのかを理解するのが近道です。

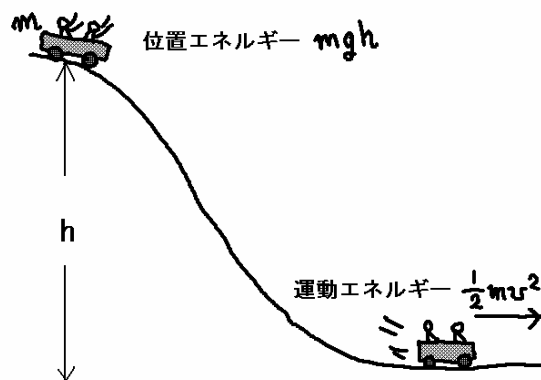


図 2-1：位置エネルギーと運動エネルギー

水に限らず，すべての物は，重力によって地球に引きつけられています。物を落下させると落下している間中，重力から力を受けて加速し続けるので，高いところから落とせば落とすほど，地面に着いたときの速さは大きくなります。このことをエネルギーの観点から見ると，高いところほど位置エネルギーが大きいので，地面での物体の運動エネルギーを大きくすることができる，ということになります。図 2-1 では，位置エネルギーが運動エネルギーに移り変わるとして，

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2-2)$$

の関係があるから， h が大きいほど， v も大きくなるわけです。なお，重力は mg ですから位置エネルギー mgh は，「重力×高さ」を表している。つまり，重力のする仕事に等しいのです。

上の話で，重力を電場からの力に，位置エネルギーを電圧に置き換えると，電圧の意味が理解できます。簡単のため，図 1-3 と同じような，一定の電場を考えます。この電場の中にある電荷は，重力と同じように一定の力を受けて加速されていきます。したがって，加速される区間が長いほど，大きな運動エネルギーを持つことになります。その長さを d とすると，先ほどの重力の位置エネルギーが「重力×高さ」だったことから想像されるように，「電場×長さ」が位置エネルギーの役割を果たします。これを電圧（電位差）と呼ぶのです。電圧を V で表すと，

$$V = Ed \quad (2-3)$$

となるわけです。ちなみに，電荷 q に対する位置エネルギーは，力が $F=qE$ ですから， qV となります。図 2-2 に，一様な電場 E と電位差の関係を模式的に表してあります。プラスの電荷はマイナスの電極に引き付けられて加速され，速さがどんどん大きくなっていきます。それはちょうど，高さ d の坂道を転がっていく物体の速度が大きくなっていくのと同じですね。

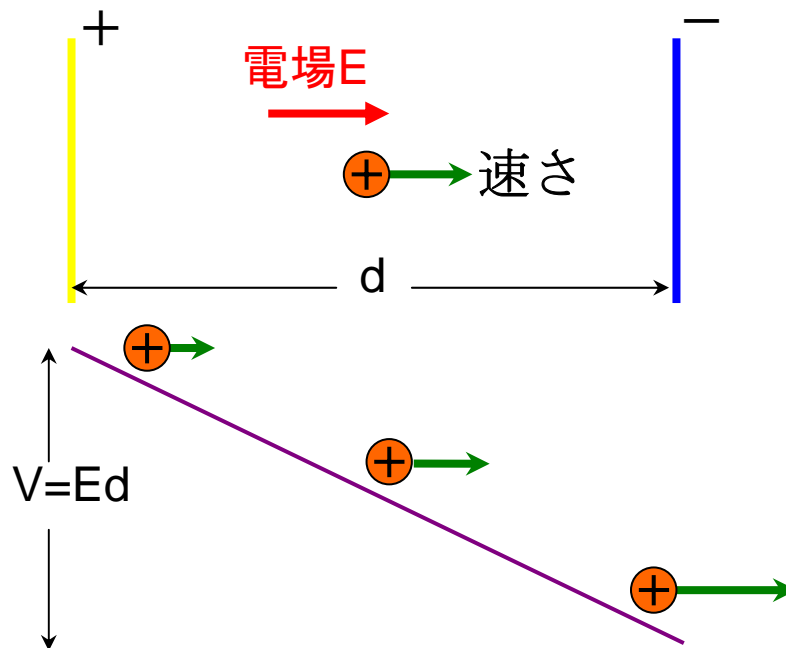


図 2-2 : 電場と電圧 (電位差) の関係

3. 電気抵抗とオームの法則

3-1. 導線の中の電子

豆電球に電池をつなぎ、電流を流したとします。そのとき、電池の電圧により、導線や豆電球の中の電子がマイナスからプラスへと運動します。しかし、その運動は、図 2-2 のような、何も邪魔するものの無い空間で加速されていく電荷とは、ずいぶん様子が異なります。1-1 節で述べたように、全ての物質は原子からできていますが、物質中の電子は原子と衝突しながら進みます。その衝突は原子の熱振動が大きければ大きいほど激しくなり、とても真っ直ぐには進めません。図 3-1 は、その様子をコンピュータでシミュレーションしたものです。(電子はマイナスの電荷を持っていますから、 $-E$ の向きに加速されています。また、図では原子は規則的に並んでいますが、計算では原子が熱振動によってずれていることが考慮されています。)

電子は電場によって加速されますが、すぐ原子と衝突して向きが変わってしまいます。その後また電場によって加速されますが、またすぐ衝突して向きが変わる。電子の速さが大きいほど衝突する頻度も大きくなるので、結局加速と衝突による速度のひっくり返しがつきあった状態になり、平均的にみると、電子はあたかも一定の速さで進んでいるように

なります。このことは、ピンポン玉をそっと落とすと最初は重力で加速されるが、すぐに空気抵抗によって一定の速さで落ちるようになるのと似ています。

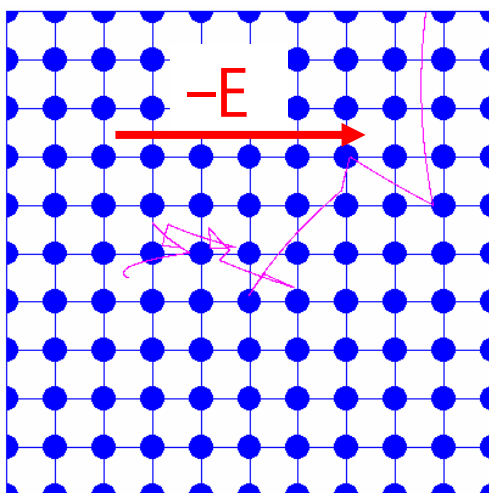


図 3-1：結晶中の電子の運動のシミュレーション。

もう少し詳しく見てみましょう。電子には電場による力 qE と、速度に比例した抵抗力 $-kv$ がはたらくとすると、電子にはたらく合力は、

$$F = qE - kv \quad (3-1)$$

となります。電子の最初の速さを 0 とすると、最初は抵抗力がはたらかないので電子は電場による力によって加速されますが、速さが大きくなるにつれて抵抗力も大きくなるので、力 F はどんどん減少していきます。そして、 $F=0$ となる速さに達すると、電子は加速されること無く一定の速さで進むこととなります。その速さを \bar{v} （平均と言う意味で—（バー）がついています）とすると、式(3-1)で $F=0$ とした式

$$qE - k\bar{v} = 0 \quad (3-2)$$

から

$$\bar{v} = \frac{qE}{k} \quad (3-3)$$

と求まります。平均の速さは、電場が大きいほど大きく、抵抗力が大きいほど小さいことがわかります。当たり前ですね。

3-2. 電気抵抗とオームの法則

オームの法則は、中学校の生徒を理科嫌いにさせるといわれる、悪名高き法則です。しかし、その意味を理解できれば、むしろ物理の面白さを伝えることのできる良い教材なのです。

実をいうと、オームの法則の本質は、式(3-3)によって表されているのです。「えっ、オームの法則は、電気抵抗を R 、電流を I 、電圧を V として、

$$V = IR \quad (3-4)$$

じゃないの？」と思う人も多いでしょう。もちろん、その通りです。電子の速さが平均として一定となることを表す式(3-3)から、オームの法則(3-4)が導かれるのです。そのことを示しましょう。

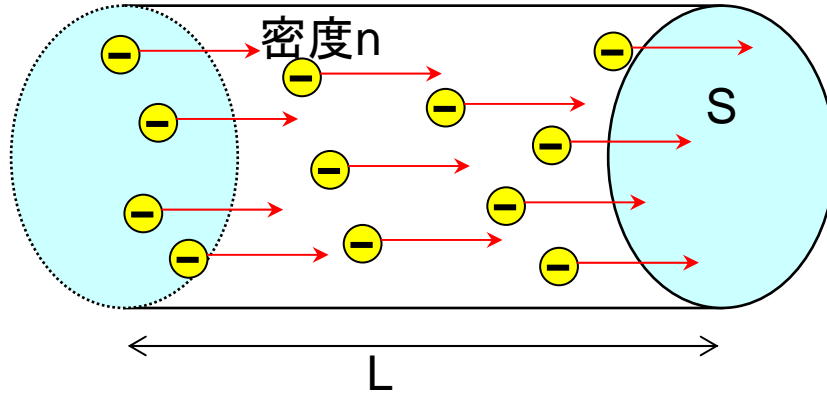


図 3-2 : 導線の断面と電流.

まず、電流は平均速度と結びつくことを示します。電流の定義は、「単位時間当たりにある面を通過する電荷量」でしたね。図 3-2 のように、導線の断面積を S 、電荷 q （最初から電子を考えてもよいのですが、符号がわかりにくいので、ここではあえて一般の電荷としておきます）の数密度を n とすると、時間 Δt の間に断面を通過する電荷の総量 ΔQ は、長さ $L = \bar{v}\Delta t$ の中にある電荷ですから

$$\begin{aligned} \Delta Q &= qnLS \\ &= qn\bar{v}\Delta tS \end{aligned} \quad (3-5)$$

です。したがって、電流は、

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = qn\bar{v}S \quad (3-6)$$

となります。式(3-6)と、電圧と電場の関係式(2-3)を、式(3-3)に代入して整理すると、

$$V = I \left(\frac{kd}{q^2 nS} \right) \quad (3-7)$$

となります。電荷を電子の電荷 $q = -e$ として、電気抵抗を

$$R = \frac{kd}{e^2 nS} \quad (3-8)$$

で定義すると、式(3-7)は、オームの法則(3-4)となります。

式(3-8)の意味を考えて見ましょう。まず、電気抵抗は、「衝突による抵抗力」に現れた係数 k に比例しています。衝突の頻度が大きいほど電子は進み難くなるから、これは当然ですね。また、線の長さ d に比例し、断面積 S に反比例します。このことから、抵抗の直列接続の公式

$$R = R_1 + R_2 \quad (3-9)$$

と並列接続の公式

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (3-10)$$

が理解できます。太さが同じ導線の長さを $d=d_1+d_2$ として2つにわけで考えると

$$\begin{aligned} R &= \frac{k(d_1 + d_2)}{e^2 n S} = \frac{k d_1}{e^2 n S} + \frac{k d_2}{e^2 n S} \\ &= R_1 + R_2 \end{aligned} \quad (3-11)$$

のように、2つの抵抗の和で表せます。一方、長さが同じ導線の断面を $S=S_1+S_2$ と分けて考えると、

$$\begin{aligned} \frac{1}{R} &= \frac{e^2 n (S_1 + S_2)}{k d} = \frac{e^2 n S_1}{k d} + \frac{e^2 n S_2}{k d} \\ &= \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \end{aligned} \quad (3-12)$$

となって、式(3-10)の形になります。

以上のように、ミクロな立場から考えると、オームの法則と同時に電気抵抗の意味や合成抵抗の公式の意味が、いっぺんに理解できるのです。

3-3. 電気抵抗と熱と光 —豆電球はなぜ光るのか—

どんな物体でも、多かれ少なかれ電気抵抗を持っています。(ただし、低温で実現する超伝導状態は別です。)したがって、ある電圧を加えて電流を流すと、その電流はオームの法則にしたがって流れるわけです。前節で説明したように、オームの法則は、電子が原子と衝突しながら平均的に一定の速さで進むことがマクロに現れた法則です。このことを衝突される原子の側から見ると、電子との衝突によって原子のエネルギーは増加し、熱振動が増大することになります。原子の熱振動が大きくなることは、その物体の温度が上昇したことに他なりません。そのため、物質に電流を流すと、温度が上昇するのです。つまり、電気抵抗によって、電気エネルギーは熱エネルギーに変換されるわけです。

ところで、豆電球は、なぜ光るのでしょうか。電流を流すことにより豆電球のフィラメントの原子は激しく熱振動を行い、温度が2000度以上になっています。一般に温度が数千度に達した物体は、太陽をはじめとして可視光を発生します。なぜか？それは、振動する電荷はすべて電磁波を発生するという、電磁気学から示される基本的性質のためです。原子は電子と原子核からできていますが、それらは電荷を持つので、原子が熱振動すると、その振動にともなった電磁波を、軽い電子は放射するのです。電磁波の振動数分布は温度で決まります。可視光を発生するには、数千度の温度が必要です。

人間は37度程度の体温を持っているので、私たちの体の原子からも、体温に応じた電磁波が発生しています。しかし、温度が低いため、その主成分は赤外線となり、目では見え

ません。

3-4. 電気はなぜ一瞬で灯くのか

「回路を流れる電流は、電子の流れである」と、よく言われます。しかし、この意味を正しく理解している人は少ないようです。電子がぐるぐると何度も回路を回っていると誤解している人が多いのです。まず、電子の平均速さ \bar{v} がどれくらいなのかを求めてみましょう。式(3-6)より、

$$\bar{v} = \frac{I}{enS} \quad (3-13)$$

ですから、断面積 10mm^2 の銅の線を 10A の電流が流れたとし、銅の密度が約 8×10^{28} 個/ m^3 であること、 $e=1.6 \times 10^{-19}\text{C}$ であることを用いて概算すると

$$\bar{v} \approx \frac{10}{10^{-19} \times 10^{29} \times 10^{-5}} = 10^{-4} \text{m/s} \quad (3-14)$$

となります。つまり、電子は、なんと1秒間に0.1mm程度しか進まないのです。これでは、豆電球のスイッチを入れてから電子が電池から豆電球に達するまでに、何十分もかかってしまいます。もちろん、実際には電球はスイッチを入れた瞬間に点灯します。また、停電したとき、はるか遠くの発電所が復旧したとたんに電気は回復します。これらのことは、電子が回路をぐるぐる回っていると考えたのでは、とても説明できません。

実際には、回路のスイッチを入れると、瞬間的に電場の影響が導線の中に伝わり、電子が \bar{v} で一斉に運動し始めるのです。(電場の伝わる速さは、実際には光の速さです。)このことは、水道の蛇口をひねって水を流すと、水道管の中の水が一斉に流れ始めることにたとえることができます。

4. 磁場と磁石

4-1. 電流と磁場

電池につないだ豆電球のコードを方位磁石にまきつけて、スイッチを入れると、方位磁石が動くことが実験で観察できます。このことから、電流は、磁石を動かす力を発生させることがわかります。この、磁石を動かす力の源を、磁場(磁界)と呼びます。

まっすぐに電流が流れているときに生じる磁場は、電流の強さ I に比例し、直線からの距離 R に反比例します。つまり、比例係数を k_m とすると

$$B = k_m \frac{I}{R} \quad (4-1)$$

のように表されます。磁場の様子を電流の垂直方向から眺めた場合、磁場は図4-1のよう

な、直線を中心とした渦巻き状の構造となります。

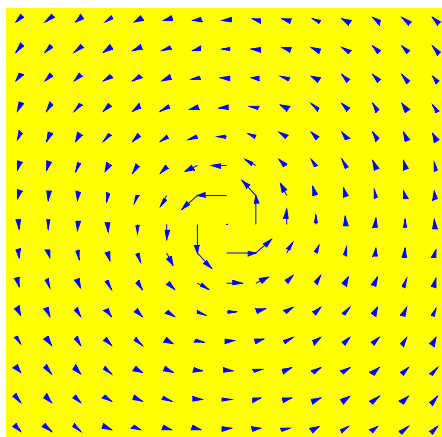
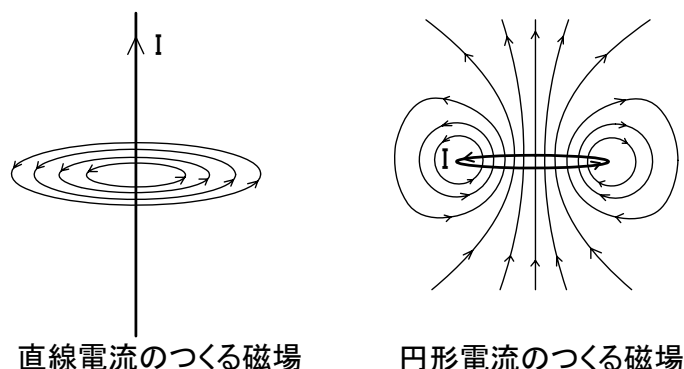


図 4-1：直線電流のつくる磁場。紙面上向きに電流が流れている。

余談ですが、電流が磁力を発生させることを発見したのはエルステッドで、1820 年のことでした。それまで、電気と磁気は、無関係の現象であると考えられていました。エルステッドがこのことを発見できた背後には、電池の発明があります。安定して電流を発生させる技術があつて、はじめて電流の磁気作用が発見できたわけです。このように、科学の発達は技術の発達と平行して進んでいくことが多いのです。

4-2. すべての磁石は電磁石

まっすぐに流れる電流が作る磁場を、くるりと丸めて円をつくったら、どのような磁場ができるかを考えましょう。（もちろん、実際には電池とつなぐ必要があるので、閉じた円にはなりません。ここでは単純化して考えます。）すると、磁場は図 4-2 のようになることが想像できます。



直線電流のつくる磁場

円形電流のつくる磁場

図 4-2：直線電流と円形電流のつくる磁場の比較。

なぜなら、直線の周囲には図左側のような磁場が一様に生じていますが、直線を丸める

と、円の外側では無限に広がっていけますが、内側では円の中心のところまでしか磁場は広がることのできないので、内側では磁力線が混み、外側ではゆるく広がっていくはずで、特に、円の中心軸上では、すべての電流が等しく寄与する磁場が垂直にできるはずで（図4-2右参照）。

円形電流のつくる磁場は、棒磁石のつくる磁場に似ていると言えます。特に、導線をぐるぐる巻いて細長い電磁石をつくと、図4-2右の磁場をずらして重ね合わせたような磁場ができるので、ますます棒磁石の磁場に似てきます。

この類似性は、偶然ではありません。実は、磁石の磁力は、原子が一種の磁石であることから生じているのです。電子は電荷を持っているので、原子核の周りをぐるぐると回る電子は、電流をつくっていることになります²。すると、電子のつくる電流によって、図4-3のように、磁場が発生します。

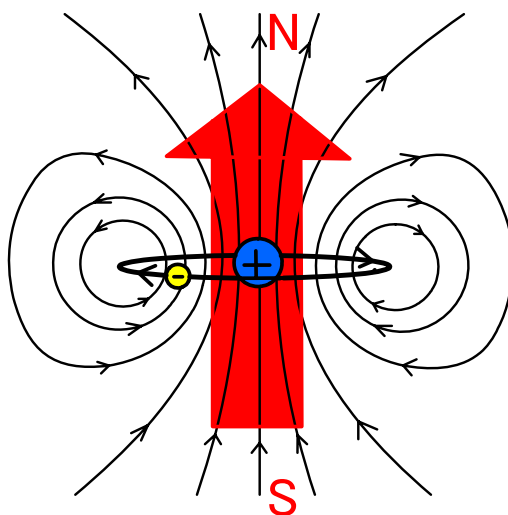


図4-3：円軌道を描く電子のつくる磁場。

すべての物質は、原子からできています。したがって、原子自体が磁石とみなせるなら、すべての物質は磁石となるのではないかと考えられます。実際は、多くの物質ではちょうど磁場を打ち消すように分子が結合しているので、磁性が生じません。しかし、一部の物質では原子磁石の向きが揃いやすくなっています。それらが、永久磁石になったり（強磁性体）、磁場が加わったときだけ磁性を示したり（常磁性体、反磁性体）するのです。

磁石の本質は、原子レベルで生じている、ミクロな電流だということがわかりました。この意味で「すべての磁石は電磁石」と言うことができるでしょう。

実を言うと、電磁気学の基本の式（マクスウェル方程式と言います）には、「磁場は電

² 実際の原子は、量子力学を使わないと表せません。そのため、原子や物質の構造と深く結びついている磁性は、残念ながら、量子力学でないと、正確な表現はできないのです。特に、電子のスピン（自転に似ている）に、磁性は大きく左右されます。

流によって生じる」ことを表すものがあります。その一方、「磁力線は閉じている」ということを表す式もあります。このことは、磁力線を生み出す源が存在しないことを表しています。つまり、N極から磁力線が出てS極に入るように見えますが、それらの極は単独では存在しないのです。このことは、電場の場合はプラスやマイナスの電荷（これらは電気力線の源となります）が単独で存在することと、根本的に異なっていることに注意してください。

4-3. 磁石の構造

磁石は、電子が原子レベルでつくる「磁石」でできていることを、前節で説明しました。鉄のような磁石になる物質（強磁性体といいます）は、その「原子磁石」の向きが揃いやすく、結晶の中で磁区というものを構成してミクロな磁石となっています。しかし、すべての磁区がひとつの向きに揃うと、磁場のエネルギーが大きくなりすぎるので、安定な状態ではありません。そこで、互いに逆向きになった磁区が並んでエネルギーを下げています。これは、棒磁石を横に並べると、互いに逆向きになろうとするのと同じことです。

実際の鉄などの強磁性体は、通常、図4-4左のような小さな結晶の集まりとなっています。その小さな結晶ごとに磁区が形成されていますが、ミクロな磁石の向き（図の矢印）はデタラメになっていて、全体としては磁石になりません。しかし、図4-4右のように、大きな矢印の向きに強い磁場をかけると、磁場方向の磁区をもった小結晶のミクロ磁石の向きが揃い、全体として磁石となります。これが、磁石に鉄がくっつく理由です。

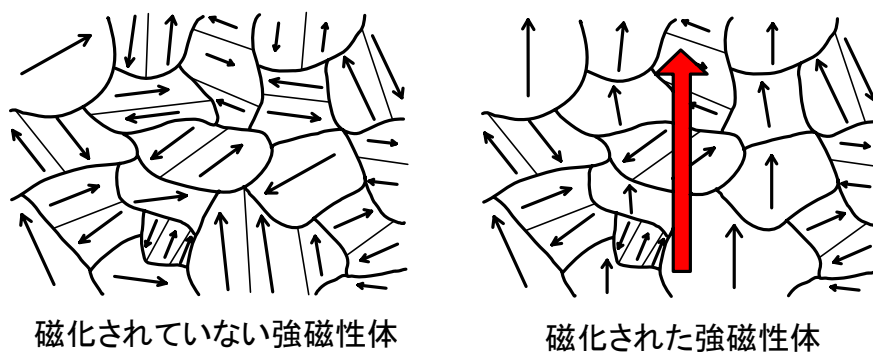


図4-4：磁石になる物質の構造。矢印は「ミクロな磁石」の方向を表す。

では、永久磁石とはどのようなものかという点、強い磁場をかけられた強磁性体は、磁場を除いた後も、完全にはもとのデタラメな状態に戻らない性質によるものなのです。「こなごな磁石」は、その様子確かめるのに大変良い教材です。「こなごな磁石」を強い磁石につけると、粉々になった磁石の向きが揃い、磁力を持つことが分かります。外部からの磁場を除いても、図4-4右の状態を保ち、全体として磁石となっているわけです。一方、「こなごな磁石」を振って再び粉々の磁石の向きをデタラメにすると、磁力が失われます。これは、図4-4左の状態になったからです。

なお、どんな磁石でも、温度が高くなるにつれて、向きが揃った状態を保てなくなりま
す。それは、「温度が高いほど、デタラメな状態でなければならない」という熱力学第2法
則（エントロピー増大の法則）のためです。もちろん、「温度が高くなると熱振動が活発に
なるので、ミクロな磁石の向きはデタラメになりやすくなる」と考えても結構です。

磁石が磁力を完全に失う温度を、キュリー温度といいます。付録の表にあるように、ネ
オジム磁石は 300 度ほどで完全に磁力を失います。あの強力なネオジム磁石が、全く磁力
を失った姿には、ちょっと驚かされますね。

4-4. 電磁誘導と IH 調理器

世の中では、逆転の発想というものがしばしば大発見につながるものがしばしばありま
す。エルステッドの発見以来、「電流が磁場をつくるなら、磁場が電流をつくってもいいじ
ゃないか」と多くの科学者が考えて、実験的に見出そうとしたそうです。そして、そのこ
とに成功したのはファラデーでした。ファラデーは、磁場が時間的に変動するときに限り、
電流が発生することを発見しました。永久磁石のような変動しない磁場は、電流を発生さ
せないのです。この、ファラデーの電磁誘導の法則は、発電機の原理にもなっていること
をご存知の人も多いでしょう。

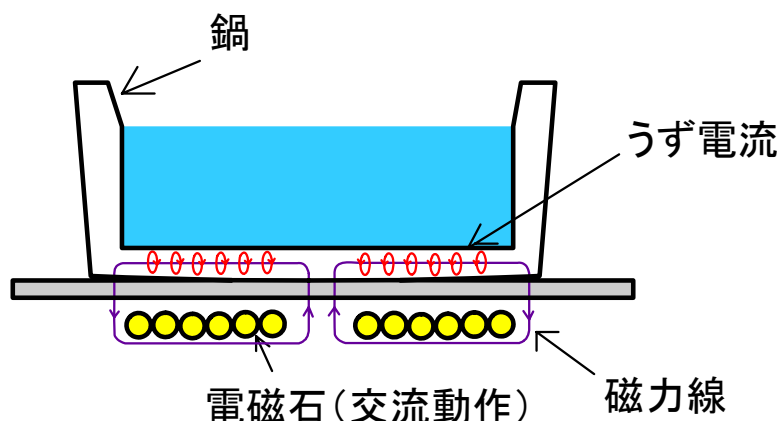


図 4-5 : IH 調理器のしくみ

最近、電磁誘導の新たな応用機器が、家庭に普及してきました。IH (Induction Heating)
調理器です。図 4-5 に、そのしくみを示します。鍋をのせる台の下には電磁石コイルがあ
り、それに 20~50kHz の高周波交流を流します。すると、磁場の向きが時間的に変化するの
で、それを打ち消すように鍋の中にはうず形の電流が磁場の変化に合わせて流れます。(電
磁誘導の法則とレンツの法則ですね。)すると、その鍋の電気抵抗によって、うず電流によ
るジュール熱が発生し、鍋自体が加熱されるのです。普通のアルミ鍋の場合、鉄鍋よりも
電気抵抗がずっと小さいので、IHには使えません³。IHは、ガスコンロのように炎の熱が周

³ ひとくちに鉄と呼びますが、身のまわりの鉄は完全結晶の純粋な鉄とは様々な形で異なってい
ます。電気抵抗は、純粋な鉄を 1 とすると铸铁は 5~10 倍、鋼鉄は 1~2 倍程度です。それに対

りの空気に逃げていくことがないので、熱効率自体は大変よい調理器です。もっとも、電気のエネルギーは磁場を発生させるためにかなり逃げていきます。熱効率の比較とエネルギー効率の比較とは、異なる概念であることに注意してください。

最後に、うず電流について付け加えておきましょう。ネオジム磁石があると、うず電流が存在することを簡単に確かめることができます。1円玉はアルミニウムでできているので、磁石につきません。しかし、机の上に置いた1円玉に乗せたネオジム磁石を急にどけようとすると、1円玉は、ネオジム磁石についていこうとします。これは、1円玉の中で磁場が急に減少することを防ごうとして、うず電流が生じるためです。うず電流によって発生した磁場の向きが、見かけ上、ネオジム磁石から引力を受ける向きになるのです。

次に、机の上に置かれたネオジム磁石のちょっと上から、そっと1円玉を落としてみましょう。1円玉はネオジム磁石から反発力を感じているようにフワリと落ちます。これは先ほどの場合と逆で、急激に磁場が増加するのを防ぐ向きに、1円玉内部にうず電流が生じるからです。

5. おわりに

これまでに説明したことは、電磁気学の基本法則に直接関連する、大切な基本事項ばかりです。電磁気学の基本法則は、マクスウェル方程式と呼ばれる、4つの式で表されます。マクスウェル方程式を本当に理解するには、ベクトル解析という大学レベルの数学が必要になります。しかし、その意味を言葉で表すことは、ある程度可能です。

マクスウェル方程式は、次の1から4を表しています。

1. 電荷は電場の源である。
2. N極だけ、S極だけ（単磁極）は存在しない。
3. 磁場が時間的に変動すると、渦巻き型の電場が発生する。
4. 電流が流れると、渦巻き型の磁場が発生する。

それから、電荷が電場や磁場からどのような力を受けるかを与える式が、電荷の運動を表すために必要です。それは、ローレンツ力と呼ばれ、言葉で表すと、次のようになります。

1. 電荷は電場に平行に力を受ける。
2. 動いている電荷は、磁場から仕事をしない方向に力を受ける

この2は分かりにくい表現ですが、特に磁場に垂直に運動している電荷の場合は、磁場と自分の速度の両方に垂直な力を受けます。したがって、磁場に垂直な面で円を描く運動をします。（これを、サイクロトロン運動とよびます。）

どちらも大雑把な表現ですが、「電磁気学の基本とは、簡単なものだな」と感じていただけたと思います。

し、アルミは、1/3程度しかありません。

簡単な言葉で表現できるなら、なぜ、わざわざ複雑な式で法則を表さなければならないのでしょうか。それは、正確に数値を表すためだけでなく、隠れている法則を見出すことにも役立つからなのです。実際、マックスウェルは、上の4つを式で表したことにより、電磁波の存在を予言しました。しかも、電磁波の早さが光速であることを見出し、光の正体は電磁波であることを発見したのです。このような発見は、数学的に電磁気の法則を整理してはじめて可能となったといえるでしょう。

付録

磁石の物性

(http://www.neomag.jp/magprops/magpro_physics.htmlより転載)

項目 (単位)	フェライト 磁石	ネオジム磁 石 NdFeB	サマコバ磁 石 SmCo	アルニコ磁 石 AlNiCo
温度係数 (%/°C)	-0.18	-0.13	-0.03	-0.02
キュリー点 (°C)	>450	320-340	700-850	>850
密度 (g/cm ³)	4.6-5	7.4-7.5	8.3-8.5	7.3
硬度 (Hv)	480-580	600	500-600	650
電気抵抗 (Ω・cm)		130x10 ⁻⁶	86x10 ⁻⁶	