定常電流による磁場 *No. 1*

The Author

March 14, 2017

Contents

1 静磁場の概要

電場は荷電粒子により作られます。厳密に言えば、静止した荷電粒子が作る電場が静電場と呼ばれ、運動している荷電粒子が作る電場は変動電場と呼ばれます。

一方、磁場は運動する荷電粒子により作られます。ですから、静止した荷電粒子により電場は形成されますが、磁場は形成されることはありません。 磁場も電場のように分類されます。定常電流（荷電粒子の運動に時間変動がない場合）により生じる磁場を静磁場と呼び、時間変動する電流（交流電流など）から生じる磁場を変動磁場と呼びます。

例題 *1* 下表の空欄に○（作られる）、×（作られない）を書き込み、表を完成させてください。

様々な電荷が作る電場と磁場（問題）

		電場		磁場	
		静電場	変動電場	静磁場	変動磁場
電荷の状態	静止した電荷				
	定常運動電荷				
	時間変動運動電荷				

（解）磁場も、電場と同じく、電荷で作られることを確認するための問題です。さらに、電荷の運動状態により各場の特徴が決定されることを確認してください。

様々な電荷が作る電場と磁場（答え）

		電場		磁場	
		静電場	変動電場	静磁場	変動磁場
電荷の状態	静止した電荷	○	✖	✖	✖
	定常運動電荷	✖	○	○	✖
	時間変動運動電荷	✖	○	✖	○

（例題 1 終わり）

古くから、磁石は知られていましたので、鉄を動かしてくっつけるという磁力の概念はあったようです。これを磁場という言葉を用いて科学的に考察し始めたのは、電荷間に働く力；クーロン力（クーロンの法則）の発見の 1785 年から 35 年も経過してからです。

歴史的には、1820 年 7 月のエルステッドの電気回路の周りで方位磁針が動くという発見がスタートになっています。このエルステッドの発見を受け、実験により定量的に実証し考察したのが、アンペール（同年 9 月 11 日発表）とビオとサバールの（同年 10 月 30 日発表）でした。

エルステッド、アラゴ、アンペールによって示された電流によって作られる磁場の向きは“右手（ネジ）の法則”と呼ばれています[1]。これにより電流の方向と観測点が作る平面に垂直な方向に磁場が形成されていくという非常に重要な関係が得られます。“右手（ネジ）の法則”は磁気学の土台の法則です。一方、ビオとサバールの研究はビオ・サバールの法則式に帰結されますが、右手（ネジ）の法則”が大前提になり、微少定常電流が作る磁場を定量的に議論し導出しています。ビオ・サバールの法則式は電場のクーロンの法則の磁場番の法則式（定常電流による磁場 No. 2”で詳細を議論します。）です。

したがって、磁場の法則式を整理すると、最も大前提は“右手（ネジ）の法則”、そしてそれに基づき定量的に法則式化したものがビオ・サバールの法則式です。静電場で習ったガウス則と渦なしの法則と同様に、磁場はビオ・サバールの法則式からガウスの法則、渦あり法則（アンペールの法則）の特徴を持つ法則式が得られます。

“定常電流による磁場 No. 1”では、エルステッドとアンペールの実験から“右手（ネジ）の法則”を確認し、直線定常電流が作る磁場と電流が磁場から受ける力を数式化します。

“定常電流による磁場 No. 2”では、ビオ・サバールの法則について議論します。

“定常電流による磁場 No. 3”では、磁場のガウス則と渦あり則（アンペールの法則）、円電流の作る磁場と磁気モーメントについて議論する予定です。

[1] インターネットで色々と調べてみましたが、結局はこの 3 人の誰が右ネジの法則をまとめたのか不明でした。この 3 人の全てが関わっているということでしょう。

磁場を表す量の単位は、この分野で整理しなくてはならない最優先課題の一つですので、議論の必要が出てきたら、その都度、考える予定ですが[2]、本書のコラムに磁荷から考察した単位系をまとめて整理しました。

2　磁場の発見；1820年の２つの実験

2.1　実験１；定常電流が流れる１本の直線導線の周囲での方位磁針の動き

(**設定**) 一本の直線導線；導線 1 に定常電流 I_1 （ベクトル表記では、$\mathbf{I}_1$）を流します。図 1 の矢印方向に電流が流れる時は正の方向で、逆向きを負の方向とします。

(**観測 1**) この導線に垂直な平面上で、導線 1 を中心とした円（円 Γ : 中心は $\mathbf{r}_0$）の円周上に、方位磁針（位置は $\mathbf{r}_n$）を置き、磁針の動きを観測します。

(**結果 1-1**) これらの方位磁針は、円 Γ の接線方向に沿うように振れ（必ずしも完全に接線方向に向くわけではないです。)、N 針の向きは電流の進む方向に対して右ネジが回る方向です。

(**結果 1-2**) 導線に平行な方向と円の中心 $\mathbf{r}_0$ に向かう方向には磁針は動きませんでした。

(**観測 2**) 定常電流 I_1 を変化させました。その上で、方位磁針の針を結果（1-1）で観測した方向に動かす力の強さ f を測定しました。

(**結果 2**) f は、定常電流 I_1 の値に比例しました。

(**観測 3**) 定常電流 I_1 を固定し、方位磁針の導線からの距離 d[m] を変化させて針を動かす力の強さ f を測定しました。

(**結果 3**) f は、距離 d に反比例しました。

****

実験から、この導線の周りに、磁石 (磁針) を動かす場ができることが明らかになりました。

$\Longrightarrow$ 磁石をある方向に動かすので、磁石に力が働く場（力場）が形成されたことがわかります。この力場は、数学的にはベクトル場ですが、物理学的に磁場と名付け、これを記述するベクトルを位置 $\mathbf{r}$ の関数として $\mathbf{B}(\mathbf{r})$ と表すことが慣例です。本書では、$\mathbf{B}(\mathbf{r})$ を磁束密度ベクトルと呼びます。また、結果（1-1），(1-2）は、右ネジの法則と命名されています（§4 参照)。

$\mathbf{B}(\mathbf{r})$ は磁石に作用する力場として考え、磁場がこの磁石（磁針）に作用する力 $\mathbf{f}$ は、$\mathbf{B}(\mathbf{r})$ に比例するとしましょ

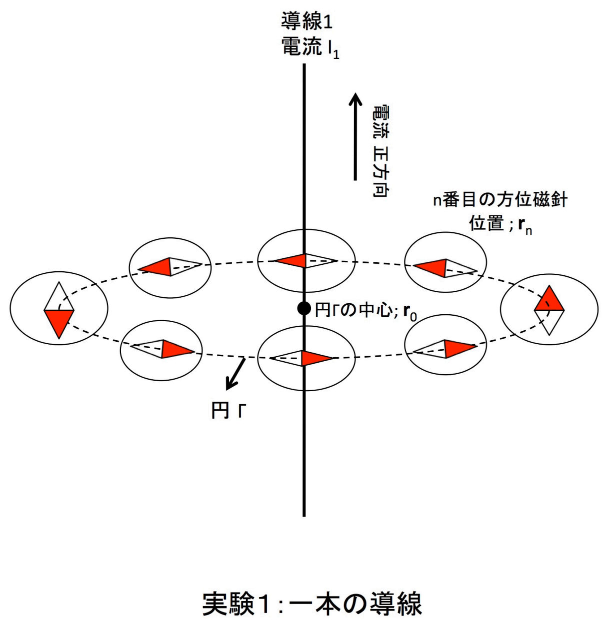

Figure 1:　1 本の平行導線の実験

[2]私自身、たくさん出てくる磁場の単位が、実際に何を測った値なのか？定義は何か？、これを記述始めた現段階では、よく理解できていません。実験で、磁場発生装置を使ったことのある私でもこんな感じですので、焦らず読み進めてください。

う。これを、適当な実数の定数 m を用いて、数式で表すと、

$$\mathbf{f} \propto \mathbf{B}(\mathbf{r}) \longrightarrow \mathbf{f} = m\mathbf{B}(\mathbf{r}), \tag{1}$$

となります。（観測２）に登場した f は、$\mathbf{f}$ を使って表すと、

$$f = |\mathbf{f}|, \tag{2}$$

となります。

また、(結果 1-1)、(結果 1-2)、(結果 2)、(結果 3) を、それぞれ数式を用いて表すと、次のようになります。

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) \quad // \quad \mathbf{I}_1 \times (\mathbf{r}_n - \mathbf{r}_0), \tag{3}$$

$$f \quad \propto \quad I_1, \tag{4}$$

$$f \quad \propto \quad \frac{1}{d}. \tag{5}$$

2.2 実験２；二本の平行導線間の力 by アンペール

(設定) 実験 1 の導線 1 に対して d[m] だけ離れた場所に、導線 1 に平行な導線 2 を配置します。図 2 に記した座標を用いて、導線 1 と導線 2 上の点 $\mathbf{r}_1$, $\mathbf{r}_2$ を z の関数として表記すると、

$$\mathbf{r}_1(z) \quad = \quad (0, 0, z), \tag{6}$$

$$\mathbf{r}_2(z) \quad = \quad (0, d, z), \tag{7}$$

となります。

この導線 2 にも定常電流 I_2 を流します。この 2 本の導線に働く力 $\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2$ を測定しました。

(観測 1) 二本の導線に、(ア) 同じ強さの同じ方向の定常電流 $(I_1, I_2) = (I, I)$、(イ) 同じ強さで向きが逆の定常電流 $(I_1, I_2) = (I, -I)$ を流します。

(結果 1) (ア) の場合、両導線に y 方向の引力が生じました。(イ) の場合は、両導線に y 方向の反発力が生じました。

(観測 2) I_1 は固定し、I_2 を変化させました。

(結果 2) $I_2 = 0$ の時は、$\mathbf{F}_1$, $\mathbf{F}_2$ ともに 0 となりました。それ以外の時は、常に、$\mathbf{F}_1$, $\mathbf{F}_2$ ともに y 方向の力が生じ、$\mathbf{F}_1 = -\mathbf{F}_2 // y$ 軸で、その大きさは定常電流 I_2 に比例しました。

(観測 3) 定常電流を $(I_1, I_2) = (I, I)$ で固定して、導線間距離 d を変化させました。

(結果 3) $\mathbf{F}_1 = -\mathbf{F}_2 // y$ 軸で、その大きさは d に反比例しました。

****

実験全体から、

$$\mathbf{F}_1 = -\mathbf{F}_2 \; // \; y \text{ 軸}, \tag{8}$$

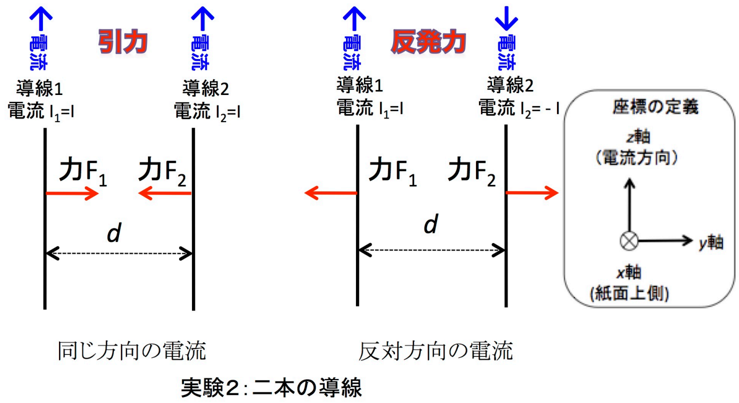

Figure 2: 2 本の平行導線の実験

（結果２）から、

$$|\mathbf{F}_1| = |\mathbf{F}_2| \propto I_2, \tag{9}$$

導線１，２は幾何学的に等価ですから、$I_1,\ I_2$ の入れ替えで系が示す物理現象は不変となり、式（9）より、

$$|\mathbf{F}_1| = |\mathbf{F}_2| \propto I_1, \tag{10}$$

を得ることができます。

（結果３）から、

$$|\mathbf{F}_1| = |\mathbf{F}_2| \propto \frac{1}{d}, \tag{11}$$

が得られます。

実験２から、距離 d 離れた平行電流と、その間に生じる力の関係を、結果式（9）、(10)、(11）より得ることができます。

$$|\mathbf{F}_2| \propto \frac{I_1 I_2}{d} \Rightarrow \mathbf{F}_2 = (0, -\alpha\frac{I_1 I_2}{d}, 0), \tag{12}$$

ただし、α は定数です。結果式（8）を上式（12）に当てはめると、

$$|\mathbf{F}_1| \propto \frac{I_1 I_2}{d} \Rightarrow \mathbf{F}_1 = (0, \alpha\frac{I_1 I_2}{d}, 0), \tag{13}$$

を得ることができます。

この（12）と（13）から、この平行な直線電流同士は“ 作用・反作用の法則 ”が成立していることが確認できます。

3 直線定常電流の作る磁場の表式

3.1 電流と電荷の量の定義

定数 α は、電流値と距離と力を測定すれば物理的に決定される定数ですが、この考察がなされた時は、電流の定義がなされる以前でした。ここで初めて電流の値を定義する必要性が生じました[3]。では、電流と電荷の定義をしましょう。

[3]そして、電流が定量化され、その電流から電荷の量を定義するという時系列で電磁気学が構成されているのです。ですから実は電気と磁気の関係が明らかにされた時点で、クーロンの法則の定量化が完成されるのです。電磁気学の学習の順序は、定性的な考察では歴史的発見に沿っていますが、定量化においては歴史的発見に対して逆転しているのです。ここが、単位などが複雑になってしまう原因の一つです。

電流の定義

同じ強さの電流を 1[m] 隔てて平行に流した時に、電流間に作用する力が、導線（電流）1[m] 当たり 2×10^{-7}[N] になる場合（表記に一般性を持たせると、2×10^{-7}[N/m]）の電流の強さを 1[A] と定義します。

電荷の定義

1[A] の電流が 1[s] 間に運ぶ電荷の量を 1[C] と定義します。

式（12）（もしくは（13））から、α を決定します。

$$-2\times10^{-7}[\mathrm{N/m}] = -\alpha\frac{1[\mathrm{A}]\cdot 1[\mathrm{A}]}{1[\mathrm{m}]}, \Rightarrow\ \alpha = 2\times10^{-7}[\mathrm{N/m^2}]. \tag{14}$$

ここで、式（14）を眺めて、重要なことを確認しましょう。電流の [A] は、力 [N] や距離 [m] で表すことができません（力 [N] や仕事 [J] などは、それぞれ [m・kg/ s^2]、[m^2・kg/ s^2] と表せるのです。）。したがって、電流の単位 [A] は、長さ・重さ・時間と同等の本質的な物理単位です。地球上の度量衡は、物理的には MKSA 単位系で記述されるということです [4]。

3.2 直線定常電流の作る磁束密度ベクトルの表式

実験 2 の結果は、導線 1 の電流 I_1 が、導線 2 の場所 $\mathbf{r}_2(z)$ に磁束密度ベクトル $\mathbf{B}_{\mathrm{I}_1}(\mathbf{r}_2(z))$ の磁場を発生させるという解釈で議論を進めましょう（後述の“ 仮定 1 ”に反映）。

$\mathbf{B}_{\mathrm{I}_1}(\mathbf{r}_2(z))$ の強さは、実験 1 の結果式（4）、（5）より、電流 I_1 の強さに比例し、導線間距離 d に反比例するので、発生する磁束密度ベクトルの方向の単位ベクトルを $\tilde{\mathbf{B}}$ とすると、

$$\mathbf{B}_{\mathrm{I}_1}(\mathbf{r}_2(z)) = \frac{\beta I_1}{d}\tilde{\mathbf{B}}(\mathbf{r}_2(z)), \tag{15}$$

ただし、β は、式（1）で与えられた磁束密度ベクトルをどういう力場（$m, \mathbf{B}$）で定義するかで決まる定数です。

ここで、$\tilde{\mathbf{B}}(\mathbf{r}_2(z))$ は、式（3）により、$\mathbf{r}_n$ と $\mathbf{r}_0$ を、それぞれ、$\mathbf{r}_2(z) = (0, d, z)$, $\mathbf{r}_1(z) = (0, 0, z)$ とし、電流 $\mathbf{I}_1 = (0, 0, I_1)$ という条件で求めることができます。

$$\tilde{\mathbf{B}} = \frac{\mathbf{I}_1\times(\mathbf{r}_2-\mathbf{r}_1)}{|\mathbf{I}_1\times(\mathbf{r}_2-\mathbf{r}_1)|} = \frac{(0,0,I_1)\times(0,d,0)}{I_1 d} = -(1,0,0). \tag{16}$$

したがって、式（16）を式（15）に代入する事により、$\mathbf{B}_{\mathrm{I}_1}(\mathbf{r}_2(z))$ は下式（17）で与えられます。

$$\mathbf{B}_{\mathrm{I}_1}(\mathbf{r}_2(z)) = (-\frac{\beta I_1}{d}, 0, 0). \tag{17}$$

電流 $\mathbf{I}_1$ とそれが作る磁束密度ベクトル $\mathbf{B}_{\mathrm{I}_1}$ の間には式（17）の関係があります。電流 $\mathbf{I}_2$ とそれが受ける力 $\mathbf{F}_2$ の間には式（12）の関係があります。ここで、乱雑になってきたので、電流、磁場、力の三者にどのような関係があるか、図 3 を使って整理し、問題を洗い出すと、$\mathbf{B}_1$ と $\mathbf{F}_2$ の関係を探る必要があることが見えてきます。

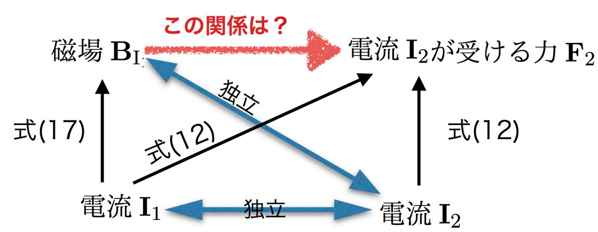

Figure 3: $\mathbf{I}$ と $\mathbf{B}$ と $\mathbf{F}$ の関係図

[4] しかし、この発見があるまでは、MKS 単位系だったのでしょう。何か、別の単位を必要とする発見が出てきたら面白いですね。

ここで、次のような仮定（仮定１）を立てて、$\mathbf{B}_1$ と $\mathbf{F}_2$ の関係式を探りましょう（この章の冒頭を参照)。

仮定１

導線１に電流 I_1 が流れることによって、導線２上 $\mathbf{r}_2(z)$ にも磁束密度ベクトル $\mathbf{B}_1(\mathbf{r}(z))$ が発生し、これによって、導線２が力 $\mathbf{F}_2$ を受けます。

その関係は、

$$\mathbf{F}_2 = \gamma \mathbf{I}_2 \times \mathbf{B}_{\mathrm{I}_1}(\mathbf{r}_2(z)) = (0, -\beta\gamma\frac{I_1 I_2}{d}, 0), \tag{18}$$

と表されます。

ここで、式（12）と（18）と（14）から、$\alpha = \beta\gamma = 2 \times 10^{-7}[\mathrm{N/A^2}]$ という関係が得られます。ここで、式（18）において、$\gamma \equiv 1$ という無次元の数で定義しましょう [5]。その結果、β は α と等しくなり、下式のような値と単位で与えられることとなります。

$$\alpha = \beta = 2 \times 10^{-7}[\mathrm{N/A^2}]. \tag{19}$$

ここで、β の単位が $[\mathrm{N/A^2}]$ と決まりましたので、式（15）から、磁束密度ベクトル $\mathbf{B}$ の単位を考えてみましょう。ここで、物理量を [　] で括ったものは、その物理量の単位を表すと決めましょう。

$$[\mathbf{B}_{\mathrm{I}_1}] = \frac{[\beta][I_1]}{[d]} = \frac{[\mathrm{N/A^2}][\mathrm{A}]}{[\mathrm{m}]} = [\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{A \cdot m}}] = [\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s^2 \cdot A}}]. \tag{20}$$

磁束密度の単位で、物理的に最も大切なものは、$[\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{A \cdot m}}]$ ですが、利便性から式（21）に定義したテスラ [T]、

$$1[\mathrm{T}] \equiv 1[\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{A \cdot m}}] = 1[\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s^2 \cdot A}}], \tag{21}$$

が使われます。また、導入した β は、下式で定義した“ 真空中の透磁率 μ_0 ”で記述するのが慣例です [6]。

$$\begin{aligned} \mu_0 &= 4\pi \times 10^{-7}[\mathrm{N/A^2}], \\ \therefore\ \beta &= \frac{\mu_0}{2\pi}[\mathrm{N/A^2}]. \end{aligned} \tag{22}$$

よって、式（15）の一般的な表記

$$\mathbf{B}_{\mathrm{I}_1}(\mathbf{r}_2(z)) = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{I_1}{d}\tilde{\mathbf{B}}(\mathbf{r}_2(z)), \tag{23}$$

を得ることになります。

さらに、式（18）の第１式と第２式が、

$$\mathbf{F}_2[\mathrm{N}] = \mathbf{I}_2[\mathrm{A}] \times \mathbf{B}_{\mathrm{I}_1}(\mathbf{r}_2(z)), \tag{24}$$

へと変形されます。これは、有名な“ 磁場の中で直線電流が受ける力 ”の関係式です。さらに、磁束密度ベクトル $\mathbf{B}_{\mathrm{I}_1}(\mathbf{r}_2(z))$ は、直線電流 I_1 によって $\mathbf{r}_2(z)$ に作られるのですが、電流が $(0, 0, I_1)$ であれば、式（17）と（19）より、

[5] そう決めただけのことのようにここでは書きますが、詳しくは、コラムの“§５−１磁荷 ”で議論しました。

[6] これは、円電流の作る磁場を考えた時に π を無くすために便宜的に取り入れた定数です。詳しくは“§５−１磁荷 ”に記しました。

$$\mathbf{B}_{\mathrm{I}_1}(\mathbf{r}_2(z)) = -2\times 10^{-7}\frac{I_1}{d}(1,0,0). \tag{25}$$

となります。

式（25）を得た手順と同様に考えれば、

$$\mathbf{F}_1 = \mathbf{I}_1 \times \mathbf{B}_{\mathrm{I}_2}(\mathbf{r}_1(z)), \tag{26}$$

となります。“ 仮定１ ”から導き出された式（24）と（26）は、実験１と２の実験結果に矛盾しません。つまり、実験１と２の結果から、**“ 仮定１ ”は真であると言えるのです。**

3.3　磁場とは

磁場と電流と力は互いに独立ではなく、式（18）の相関を持って存在しているということです。分かりやすく言えば、電荷が動くことにより、その周りの空間に磁場という場を生み出すという解釈を提案をしているのです。実験１のエルステッドの発見時点では、磁気現象と電気現象は別物として扱われていたようですから、当時の科学者はとても驚き、強い興味を持ったに違いありません。まして、場という概念すらない時代のことですから、この描像を生み出すまでに相当な時間を要したことでしょう。

重力に感応するものは質量のある物質、そして重力という場を作るのも質量ある物質でした。電場に感応するものは電気を帯びた物質、そして電場を作る物質は電荷を帯びた物質でした。

では、

磁場に感応する物質は何でしょうか？

それは、実験１と２の結果から、

電流

という答えが導き出せます。なぜならば、

- 実験１では、導線の電流値が０ならば、$\mathbf{f} = 0$
- 実験２では、片方の導線に電流を流さなければ、もう片方の導線には力が働かない

という結果があるからです。

したがって、静止している荷電粒子は磁場を感じないのです。実験１と２の結果からは、

磁場に感応するものは、運動している電荷、そして、磁場を作るのは運動している電荷

で、重力と電場と同じような対応が取れるのです。

しかし、ここで磁石の現象に目を向けましょう。実験１では、実験２の $\mathbf{F}_2$ とは方向が異なりますが（$\mathbf{f}\perp\mathbf{F}_2$）、磁針が動きましたよね。磁針ということは磁石です。もちろん、磁石にはＮ極とＳ極があって、それらが独立した反物質というイメージを描きがちです。しかし、磁石は半分に割ってＮ極側を取ったとしても、必ずＮ極とＳ極が現れるのです。ということは、Ｎ極とＳ極が分離不可な一つのものと考えらなくてはなりませんし、このことは現代の物理で裏付けされています。

では、一体、磁場に反応する磁石の中には何があるのでしょうか？

① 磁石（磁針）の中では動く荷電粒子がある。

② 動く荷電粒子以外に磁場に感応する物質がある。

という可能性が導き出せます。

現在のところ、①が磁石の元だと考えられています。磁石を構成する元素の軌道電子が動く荷電粒子になっていて、この軌道電子運動が何らかの原因で揃っている物質が磁石となるのです[7]。②で想定した磁場に反応する物質は磁荷と名付けられていますが、現在のところ発見されていません。ですから、

A が感応する B 場を作るものが A

$$(\mathrm{A},\mathrm{B}) = \begin{cases} (\text{質量}, \text{重力}), \\ (\text{電荷}, \text{電場}), \\ (\text{動く電荷}, \text{磁場}). \end{cases}$$

という非常にすっきりした対応が、重力・電場・磁場において崩されていません。

3.4 電磁気学の各量の単位について

前述の磁場に感応する物質というものを仮想的に定義したものが磁荷ですが、N 極の磁荷は正、S 極は負と定義されています。

もう、文中に磁荷を想定した変数が出ているのが解りますか？実は、式（1）で m と置いた量がそれに対応します。磁荷については、「§5.1 磁荷について」で、定義を含め詳細に記しましたので、この場で必ず読んで理解してください。本書では、なるべく磁束密度ベクトルを使って話を進めたいので、別途に記しましたが、とても大切な部分です。

ここまでの議論は、磁場の湧出し源は動く荷電粒子であり磁荷ではないので、磁場の概念・磁束密度ベクトルの単位はあくまでも 2 本の電流が相互に及ぼす力から考え出すのが本流であることを示しています。

また、磁荷の単位；式（36）から、磁場は電場と異なりトルクを発生させる、すなわち回転力を発生させる場であることがわかりました。ということは、磁場は電場と異なり、保存力場ではないのです。でも、これも単位磁荷が存在すればの事です。

すでに記述したように、N 極と S 極の対としてのみの磁荷しか存在しないので、N 極と反対方向に対の S 極がトルクを受けるため、全体としてはトルクが生じません。よって、磁場には回転運動を生じさせる特徴があっても、逆に回転を生じさせる磁荷が存在しないのです。これは、電場に回転を起こさせる性質がないのとは大きく異なる磁場の性質です。

[7] だいたいのものは、軌道電子運動が揃っていませんので、磁石となるものが特殊なのです。しかし、余談ですが、一つの結晶を構成する原子間には、何かしらの相互作用があり全くランダムな軌道電子ではなく、多少の秩序があります。ですから、完全に磁化 0 というものは意外に少ないようです。

例題２
磁束密度 **B** の大きさが、1[T],2[T],3[T],5[T],10[T] の時、磁場ベクトル（磁場の強さ）の大きさを求めてください。

（解）

$H = B/\mu_0$[N/A^2] で、$1/\mu_0 \approx 796,178$ ≈80 万 [A^2/N] なので、

磁束密度 [T]	1	2	3	5	10
磁場ベクトル　[A/m]	80 万	160 万	240 万	400 万	800 万

という、10^6 という大きな磁場ベクトルの大きさが与えられます。

例題２終了

4　数式のまとめと重要事項の確認

磁場, 電場の変数のまとめ

まず、下表に磁場の変数 **B** と **H** の一般名称、本書で使用する名称、単位をまとめます。そして電場を記述する電束密度と電場ベクトルの単位も載せます。

Table 1: 磁場の変数；重要

変数	名称	本書での名称	SI 単位	電場変数との対応
B	磁束密度	磁束密度ベクトル	[N/Am]	**D** [J/As] 電束密度
H	磁場の強さ	磁場ベクトル	[A/m]	**E** [V/m] 電場ベクトル

よく、$\mathbf{E}-\mathbf{H}$ 対応、$\mathbf{E}-\mathbf{B}$ 対応という設定で、同じ物理量が違う次元の単位で表されます。でも、磁場ベクトル（磁場の強さ）**H** は、仮想量に関わる単位であるので、主軸として扱うのは不適切です。一方、磁場を表す量として実態があるのが磁束密度ベクトル（磁束密度）**B** です。

また、静電場の電荷 q が電場から受ける力は $q\mathbf{E}$ としているところから考えると、電場を表すベクトルとして電場ベクトル **E** の方がわかりやすいでしょう。

したがって、実態のつかみ易い $\mathbf{E}-\mathbf{B}$ 対応で電磁気学の議論を進めていく方が、本流に沿って議論ができ、複雑な議論を回避できるので賢明でしょう。現象を説明しやすい単位定義が大切で、物理の本質が云々と言い出すと、議論の方向は一部の知識人に簡単に扇動されてしまいます [8]。

[8] 基礎物理の重要な第一歩は用語と単位の見直しと再定義です。

単位の定義においては、電荷にも大きな落とし穴があります。本当の電荷媒体の電子を負で定義したということです。電磁気学黎明期であれば、いくらでも変える時間はあったのですが、そのまま突き進んでしまいました。これは、電流の流れが、本当の荷電粒子の流れと逆という点で、無意識ではあるのですが、とても人間の頭の中が混乱する元になっています。しかし、今から変えると、今度は既存の研究者に混乱を与えそうですが、人間が今後も長い研究を続けるのであれば、電位・電荷の正負の定義を変えたほうが良いかもしれません。

ここで、私は次の非科学的な経験論に行き着くのです。「人間の頭は、実像を直感としてかなり正しく捉えていて、その実像と定義が逆転すると、頭が非常に混乱する。」

それだけ、感覚で正しい実情を掴んでいるという点は素晴らしいのですが、故意的に逆転を施された場合、なかなかその混乱から抜け出せないという欠点もあるようです。機械ではないので、どうしても定義よりも実像として捉えた感覚が優先されるのが人間なのでしょう。

定常電流の作る磁場と 2 本の平行定常電流間の力

直線導線に定常電流 I_0 を流します。この直線導線を導線 0 とし、導線 0 を z 軸に規定します。これらにより、導線 0 を流れる電流は $\mathbf{I}_0 = (0,0,I_1)$ と書くことができます。図 4 の様に、z 軸に垂直な任意の面を一つ取り、xy 面を定義し左手系で x,y,z 軸を定義します。

電流 $\mathbf{I}_0$ が $\mathbf{r} = (x,y,0) = (d\cos\theta, d\sin\theta, 0)$ に作る磁束密度ベクトル $\mathbf{B}_0(\mathbf{r})$ は、

$$\mathbf{B}_0(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{1}{|\mathbf{r}|}\mathbf{I}_0 \times \frac{\mathbf{r}}{|\mathbf{r}|} = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{I_0}{|\mathbf{r}|^2}(-y,x,0) \leftarrow \boxed{\text{参照式 (23) 右ネジの法則（方法）}} \tag{27}$$

$$= \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{I_0}{d}(-\sin\theta, \cos\theta, 0). \tag{28}$$

直線電流と (それが作る) 磁場の関係は、右ネジの法則と呼ばれていますが、法則というよりは方法的に軽く扱われがちです。しかし、実は右ネジの法則は磁場を規定する上で最も基本となる法則なのです。図 4 で記したように、右手の親指が電流の方向で、残りの 4 本の指先が向いている方が電流によって作られる磁場（磁束密度ベクトル）の向きであることが直ちにわかるという点ではとても便利な判別方法です。ちなみに、英語では right hand law と呼ばれているそうです。

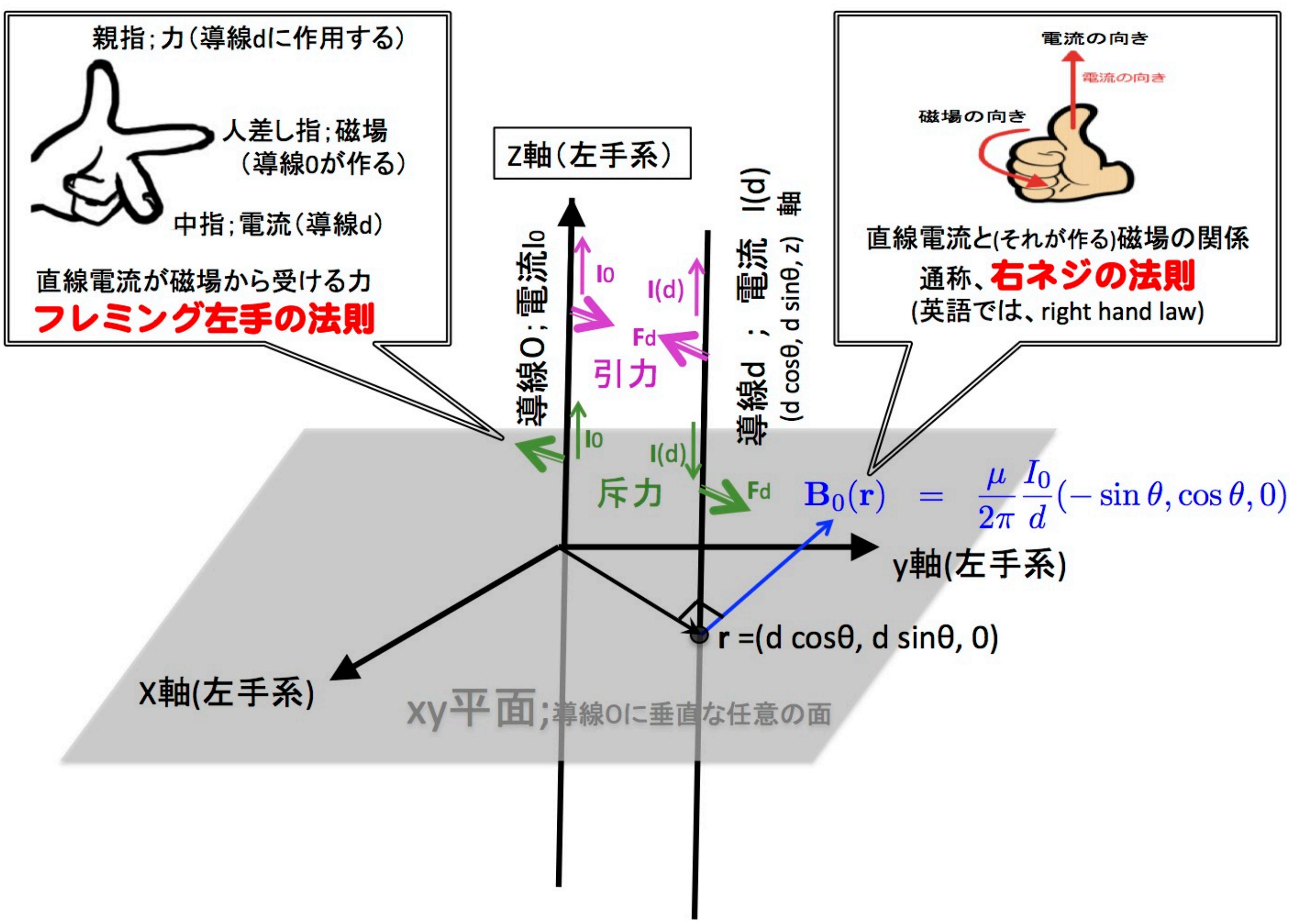

Figure 4: 直線電流の作る磁場と作用する力；右ネジの法則（方法）とフレミング左手の法則（方法）

では、位置 $\mathbf{r}$ を通り、導線 0 に平行な導線 d に定常電流 I[A] を流しましょう。この電流は $\mathbf{I} = (0, 0, I)$ と表記できます。この時、導線 d の 1 [m] あたりに磁束密度ベクトル $\mathbf{B}_0(d\cos\theta, d\sin\theta, z)$[T] により作用する力 $\mathbf{F}_d$[N] は、

$$\begin{aligned}
\mathbf{F}_d(\mathbf{r})[\mathrm{N}] &= \mathbf{I}[\mathrm{A}] \times \mathbf{B}_0(d\cos\theta, d\sin\theta, z)[\mathrm{T}] \leftarrow \boxed{\text{参照式 (26)}} \\
&= (0, 0, I) \times \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{I_0}{d}(-\sin\theta, \cos\theta, 0) \\
&= -\frac{\mu_0}{2\pi}\frac{I_0 I}{d}(\cos\theta, \sin\theta, 0), \quad \text{ここで、} \tilde{\mathbf{r}} = (\cos\theta, \sin\theta, 0) \text{ とすると、} \\
&= -\frac{\mu_0}{2\pi}\frac{I_0 I}{d}\tilde{\mathbf{r}}. \leftarrow \text{フレミング左手の法則}
\end{aligned} \tag{29}$$

$\mathbf{I}_0$ と $\mathbf{I}$ が同じ方向に流れれば（平行： 図 4 のピンク部分）、$I_0 I > 0$ となり、$\mathbf{F}_d$ は導線 0 の方向に働きます。作用反作用の法則が働き、導線 0 に作用する力 $\mathbf{F}_0$ は、導線 d の方向になります。したがって、この時は、両導線間に引力が発生します。

$\mathbf{I}_0$ と $\mathbf{I}$ が反対方向に流れれば（反平行： 図 4 の緑部分）、$I_0 I < 0$ となり、$\mathbf{F}_d$ は導線 0 の逆方向に働きます。作用反作用の法則が働き、導線 0 に作用する力 $\mathbf{F}_0$ は、導線 d の逆方向になります。したがって、この時、両導線間に斥力が発生します。

これについても、この 3 者の方向を即座に判断するために使われる手段があります。それがフレミング左手の法則（図 4 参照）と呼ばれるものです。こちらは法則というより方法という表現の方が無難で、式（27）の $\mathbf{I} - \mathbf{B} - \mathbf{F}$ を認識する非常に有効な方法です。左手で三次元直交空間を作った時に、中指（x 軸）の指先に向かう方向が着目している導線の電流の向きで、人差し指（y 軸）の指先に向かう方向が磁場の向きで、親指（z 軸）の指先に向かう方向が作用する力の向きです。

5 コラム

5.1 磁荷について

“ 磁荷 ” がある想定で作られた論理と、“ 動く電荷が磁場を作り、磁場を感知するのも動く電荷 ” という想定で作られた論理では、その場を記述する主役が異なり、前者では磁場の強さ（磁場ベクトル）$\mathbf{H}$、後者では磁束密度ベクトル $\mathbf{B}$ が主役となるのでしょう。後者の論理組み立てでは、磁荷、磁場ベクトルの存在は必要ありません。

しかし、磁針が動くという実験 1 の結果を目の当たりにすると、磁荷を導入したくなるのは人情でしょう。そこで、磁場ベクトル $\mathbf{H}$ を導入したと思われる経緯について考えてみます。

まず、式（1）において磁束密度ベクトル $\mathbf{B}$ と磁荷 $\mathfrak{m}$[9] の積が右辺であるとして、磁荷 $\mathfrak{m}$ の単位を考えていきましょう。各物理量を［　］で括った場合は、その物理量の単位を表しています。

式（20）の磁束密度ベクトル単位 $[\mathbf{B}] = [\mathrm{N/Am}]$ を使って、式（1）より磁荷の単位 $[\mathfrak{m}]$ を逆算すると、

$$\text{式（1）} \Rightarrow \mathbf{f}[\mathrm{N}] = \mathfrak{m}[\mathrm{Am}] \cdot \mathbf{B}[\mathrm{N/Am}], \tag{30}$$

[9] 磁荷は現状から考えれば、あくまでも仮想量で、正負の等量のペアで一つの存在と扱いますが、それでは合計が 0 の磁荷となってしまい、物理的考察ができませんので、単位磁荷があるとして考察しましょう。

です。

$[\mathfrak{m}] = [\mathrm{Am}]$ の単位をよく見ると、電流と導線からの距離の積です。この場合の磁荷はどんな量なのか、あえてその得られた単位から言葉で表現すると、“磁荷 1[Am] が存在するとは、その位置に、1[m]，1[A] の定常電流が存在する。”ということになります。

一方、磁束密度ベクトル $\mathbf{B}$[N/Am] もその単位から言葉で表現すると、“単位磁束密度ベクトル $\vec{e}$ [N/Am] は、1[Am] の磁荷に、$\vec{e}$ の方向に 1[N] の力を及ぼす力場を表すベクトル量である。”ということです。

まるで、磁束密度ベクトルは磁荷を元に定義されているようですが、磁束密度ベクトルから磁荷が定義されていることに注意しましょう。また、磁荷は仮想量なのです。これだけの議論では、磁場の単位の議論は不完全で勘違いのループができてしまいます。ここで、仮想量の磁荷 m を考えるためには、磁場を表現する“磁場の強さ（磁場ベクトル）$\mathbf{H}$”という補助量が導入されるのです。実は、この単位系の方が、歴史的には $\mathbf{B}$ よりも先に導入されたのです。その定義は、

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu_0}\mathbf{B}, \tag{31}$$

ですが、いきなりこの定義を見ても、理解できるはずはありません。一つずつ考えていき、不完全な箇所を洗いだして単位系を整理しましょう。

まず、実験１、２の解釈から始めます。磁荷 $\mathfrak{m}_2$ は、1[m] あたりの電流 1 が作る磁場から常にトルク（力×基準点からの距離）T_2 を受けると、実験 1 より考えます[10]。この時の T_2 の単位は、$\mathfrak{m}_2$ が受ける力は電流１の単位長さ当たりなので、[N・m/m]=>[N] となります。トルクの基準点を磁荷から電流導線へ下ろした垂線の交点とし、$I_1 = I_1$[A] の電流を流した時のトルクを $T_2(I_1)$[N] とします。

ここで、I_1 が作る環境を外要因とし、磁荷が外要因を感じる力を潜在力とします。

磁針を動かすトルク $T_2(I_1)$ は、力 f の考察式（4）と式（5）より、I_1 の電流値（外要因）に比例し、導線からの距離 d（外要因）[11] に反比例しますから、比例定数 k を用いると、

$$T_2(I_1)\ [\mathrm{N}] = k\frac{I_1\ [\mathrm{A}]}{d\ [\mathrm{m}]} = kH(I_1)\ [\mathrm{N}], \tag{32}$$

となります。

ここで、磁場の強さ

$$H(I_1) = \frac{1}{2\pi}\frac{I_1}{d}\ [\mathrm{A/m}], \tag{33}$$

を定義します。

また、ここで、力 f は 1[m] の電流 1（$\mathbf{I}_1$）による力として、f[N/m] とすれば[12]、$T_2(I_1)$[N] は、f[N/m] と d[m] を使って、

$$T_2(I_1)[\mathrm{N}] = f\ [\mathrm{N/m}] \times d\ [\mathrm{m}], \tag{34}$$

[10]磁針の動きを見て、磁荷は常に、電流導線に向かう方向に垂直な力を受けるという印象を受けたため、トルクの導入に至ったのは、当然の成り行きでしょう。

[11]これは、$\mathbf{I}_1, \mathbf{I}_2$ の両者に起因する量なのですが、外要因とします。

[12]電流 1 も電流 2 も無限（と近似できる）の長さを持つ直線定常電流なのですから、単位長さ当たりの力 f しか定義できないのです。

となります。

§3.1 の電流の定義は、「$I_1 = 1$[A]（外要因）、$I_2 = 1$[A]、$d = 1$[m]（外要因）の時、$f = 2 \times 10^{-7}$[N/m] の力が生じる」と言い換えることができます。

式（32）と式（34）に電流の定義の I_1, d, f を代入し、定数 k[N・m/A] を算出すると、

$$k = \frac{T_2(I_1)\ [\mathrm{N}]}{H\ [\mathrm{A/m}]} = 2 \cdot 10^{-7}[\mathrm{N}] \div 1[\mathrm{m}] \times 1[\mathrm{m}] \div (\frac{1}{2\pi} 1\ [\mathrm{A}] \div 1\ [\mathrm{m}]) = 2\pi \cdot 2 \cdot 10^{-7}[\mathrm{N} \cdot \mathrm{m/A}] = \mu_0\ [\mathrm{N} \cdot \mathrm{m/A}], \quad (35)$$

となります。ここで算出された定数 k が、磁荷 $\mathfrak{m}_2$（点）なのです。では、ここで磁荷 $\mathfrak{m}_2$ は一体何なの？と考えてみましょう。定数 k の算出で使用していない量は電流 2 の I_2[A] であることに気づきましたか？そうなのです、磁荷 $\mathfrak{m}_2$ は電流 2 に対応する量、つまり電流 2 が作るのです。力を受けると考える対象は、本当は長さのある電流なのですが、あくまでも、集約した点（磁荷）と考えるのです[13]。そして、長さ 1[m] の 1[A] の定常電流（今の場合は電流２）を集約した磁荷量が、実はなんと、真空中の透磁率 μ_0 [N· m/A] になるのです。I_2 を 2[A] にすれば、$\mathbf{I}_2$ の磁荷は $2\mu_0$ [N · m/A] となります。

式（32）から $\mathfrak{m}$ を使用すべきところなのですが、定数の意味がわからない状態から議論をしたかったので、あえて文字 k を使用しました。磁荷 $\mathfrak{m}$ の単位 [$\mathfrak{m}$] は、

$$[\mathfrak{m}] = [\frac{\mathrm{N} \cdot \mathrm{m}}{\mathrm{A}}] \equiv [\mathrm{Wb}], \quad (36)$$

となります。[Wb] は、磁荷の単位を簡単に記す表記で、ウェ-バー（命名者の名前）と言います。ここで、1[Wb] の磁荷を作りたいとすれば、I_2 =5 メガアンペア（500 万アンペア）の電流を流さないといけないことになります。

ちなみに、磁束密度ベクトルの単位は [Wb] を使って書き直すと、[Wb/m^2] となります。この結果から、磁荷のことを磁束と呼んだりします。

例題

例題４
式（35）の第 3 式の各因子は、電流値 I_1[A]，I_1 の単位長さ ([m])，電流値 I_2[A]，I_2 の単位長さ ([m])，電流間距離 d[m]，1[A] を定義する力のうち、どの変数から起因しているのか、下線に書き込んでください。

$$k = \frac{T_2(I_1)\ [\mathrm{N}]}{H\ [\mathrm{A/m}]} = \underline{2 \cdot 10^{-7}[\mathrm{N}]} \div \underline{1[\mathrm{m}]} \times \underline{1[\mathrm{m}]} \div (\frac{1}{2\pi} \underline{1\ [\mathrm{A}]} \div \underline{1\ [\mathrm{m}]}) = 2\pi \cdot 2 \cdot 10^{-7}[\mathrm{N} \cdot \mathrm{m/A}] = 4\pi \cdot 10^{-7}[\mathrm{N} \cdot \mathrm{m/A}], \quad (35)$$

（解）

$$k = \frac{T_2(I_1)\ [\mathrm{N}]}{H\ [\mathrm{A/m}]} = \overbrace{\underbrace{2 \cdot 10^{-7}[\mathrm{N}]}_{1[\mathrm{A}]\text{ を定義する力}} \div \underbrace{1[\mathrm{m}]}_{I_1\text{ の単位長さ}}}^{f} \times \underbrace{1[\mathrm{m}]}_{d[\mathrm{m}]} \div (\frac{1}{2\pi} \underbrace{1\ [\mathrm{A}]}_{\text{電流値 } I_1[\mathrm{A}]} \div \underbrace{1\ [\mathrm{m}]}_{d[\mathrm{m}]}) = 2\pi \cdot 2 \cdot 10^{-7}[\mathrm{N} \cdot \mathrm{m/A}] = 4\pi \cdot 10^{-7}[\mathrm{N} \cdot \mathrm{m/A}], \quad (35)$$

これから、電流 2 の潜在力は“ 1[A] を定義する力 ”に組み込まれていることがはっきりするでしょう。電流 2 の潜在力は、電流値だけでなく長さもですが、元は、無限長電流であることが前提でしたので、単位長さ当たりの潜在力を定義せざるおえないのです。ですから、丁寧に言い直せば、電流がその単位長さあたりの磁場を感知する能力を点に集約したのが磁荷なのです。電流 $\mathbf{I}_2$ の磁荷は、自分の電流 I_2 に比例するのです。

[13] 長さのある電流を点である磁荷に置き換えるのはどうやっても不自然ですが、電流が磁荷の元と知らなかった時代の人たちは何とか定量化したかったのでしょう。

（例題４終わり）

次に、ベクトル表示の磁荷の運動方程式を考えます。式（32）は、スカラー表示の式ですが、ベクトルの方向は、常に導線１を中心にした円周の接線方向（電流１に対して右ネジの回る方向）と決まっており、その他の変数は $d, I_1, \mathfrak{m}$ なのですから、$\mathbf{H}(I_1, d)$ は右ねじの法則に従う方向と定義すれば、ベクトルへと拡大した式、

$$\mathbf{F}_2(I_1)\ [\mathrm{N}] = \mathfrak{m}_2\ [\mathrm{N \cdot m/A}] \cdot \mathbf{H}(I_1, d)\ [\mathrm{A/m}], \tag{37}$$

ただし、電流 I_1 に対して右ネジ則を満たす方向の単位ベクトルを $\tilde{\mathbf{H}}$ として、

$$\mathbf{H}(I_1, d)\ [\mathrm{A/m}] = \frac{1}{2\pi}\frac{I_1}{d}\tilde{\mathbf{H}}, \tag{38}$$

が、簡単に得られます[14]。これが、磁場は磁荷に作用すると想定した場合の磁場の基本の運動方程式です。磁場が動く電荷によって作られ、動く電荷に作用するという想定の基本の運動方程式は、式（18）です。

$\mathbf{B}$ と $\mathbf{H}$ の入り乱れは、歴史的には、実験２の２本の導線から実験が始められたわけではないのが原因でしょう。一本の導線の周りの磁場から考察が始められたのですから、トルクを導入し、式を組み立てていく手法がとられたのは自然なことです。トルクはスカラー量ですから、磁場ベクトル $\mathbf{H}$ の名前に“磁場の強さ”というものが残った原因は、始めはスカラーで式を組み立てて考えていったということの名残でしょう。本書では、時系列に沿うと思われる順序で独自に基本式から考えて両者を整理しましたが、この迷路のような入り乱れがなかなか除去できないというのが正直な感想です。今後も、必要が生じた時に議論しましょう。また、今回の議論の訂正も入ることがあるかもしれません。

次に、$\mathbf{F}, \mathbf{I}, \mathbf{B}$ の三者を関係付ける式（18）から、$\mathbf{B}$ と $\mathbf{H}$ を考えてみます。この式で、定数 β, γ を導入し、磁束密度ベクトルを定義するにあたって、 $\gamma = 1$ とし、$\beta = 2 \times 10^{-7}[\mathrm{N/A^2}]$ としました（式（19）参照）。これが、$\mathbf{B}$ の単位系です。

しかし、$\mathbf{H}$ の単位系では、$\gamma = 4\pi \times 10^{-7}[\mathrm{N/A^2}]$ とし、$\beta = 1$ とし、磁場ベクトル（磁場の強さ）に $1/2\pi$ の係数を組み込むのです。

その結果、$\mathbf{B}$ と $\mathbf{H}$ の関係が、式（31）となるのです。

よって、$\mathbf{B}$ と $\mathbf{H}$ の違いの数学的描像は、電流値の定義して得られた定数 $2 \times 10^{-7}[\mathrm{N/A^2}] = \beta \times \gamma$ のこの２変数への振り分けの方の違いだけなのです。

磁束密度ベクトル $\mathbf{B}$ と磁場ベクトル $\mathbf{H}$ の違いを表 5.1 に書き出しましたので、参考にしてください。

Table 2: 磁束密度ベクトル $\mathbf{B}$ と磁場ベクトル $\mathbf{H}$ の違い

	単位	β	γ	大きさ	主たる運動方程式	$\mathbf{F} =$ 式 (18)
$\mathbf{B}$	[N/Am]	$2 \times 10^{-7}(\frac{\mu_0}{2\pi})[\mathrm{N/A^2}]$	1	$-\beta(I/d)$	$\mathbf{F}_2 = \mathbf{I}_2 \times \mathbf{B}(I_1)$	$\mathbf{I}_2 \times \mathbf{B}(I_1)$
$\mathbf{H}$	[A/m]	1	$4\pi \times 10^{-7}(\mu_0)[\mathrm{N/A^2}]$	$I_1/2\pi d$	$\mathbf{F}_2 = \mathfrak{m}\mathbf{H}(I_1)$	$-\gamma \mathbf{I}_2 \times \mathbf{H}(I_1)$

繰り返しますが、“動く電荷が磁場を作り、磁場を感知するのも動く電荷”が、観測事実であることから、磁場を表すベクトル場は磁束密度ベクトル $\mathbf{B}$ を使用するのが本流です。磁気学黎明期に使用した磁荷とセット

[14] 磁場の強さを、$\frac{1}{2\pi}\frac{I_1}{d}$ [A/m] と定義したのは、電流１に垂直な面内にある、電流１を中心とした半径 d の円に沿って磁場の強さを積分した時に、積分値 I を得るためです。この積分値と磁荷 $\mathfrak{m}$ の積 $\mathfrak{m}I$ は、定常電流 I による磁場が、磁荷がこの経路に沿って一周する時になす仕事です。

になっている磁場ベクトル（磁場の強さ）**H** は過去の遺産として残る単位と言えますが、細部が実に工夫されている単位系です。**H** と **B** の関係が明確に記されていない現実は、そのような工夫が現代の物理にうまく踏襲されていないことを示しているのでしょう。

5.2 電荷の定義より前に、クーロン則の発見！

クーロンの法則は、クーロンによって 1785 年に発見されています。しかし、電流・電荷の量を定義したのは、このアンペールの発見の 1820 年以降です。その間、35 年の年月が経過していることになります。

そもそも、クーロンはどうやって金属を帯電させたのでしょう？という 疑問を抱くことになり調べてみると、ライデン瓶という静電気を貯める装置（コンデンサーと同じ原理）があり、それを使って帯電させていたようです。次の話は有名ですが、紹介しましょう。クーロンの実験は誤差が大きく、距離の二乗に反比例するという断定は下せない精度であったことは有名です。相当な創意工夫によって、２つの物質の帯電量を制御したと思いますが、なんせ、電気量の定義すらない時代ですから厳密な実験ができるはずがないのです。そういう状況の中で、“ 本当に世界はかくありき ”というクーロン自身の科学的信念で、「電荷間に働く力は、距離の二乗に反比例する」というクーロンの法則が打ち立てられました。もちろん、きっと、万有引力の法則から行き着いたのでしょうが、そいいう強い信念がなければ、電磁気学の大きな一歩は踏み出せていなかったことでしょう。さらにこのような壮大な実験に、一介の役人のクーロンが挑んだことには心から感服いたします。

現代の科学界は、一人一人（教授にいたるまで）が組織の歯車に過ぎない極めて深刻な状況です。クーロンのような信念や考案の元で、皆平等に研究が出来る状況は皆無でしょう（もちろん、クーロンも戦ったことでしょうが。)。みんなが好きな発想をできる、好きな実験をできる、それを助けることのできる指導者、自分の意思で共同して研究できる環境など、変化した後のビジョンは容易に想像できます。しかし、その速度は、部外者の我々ではなく、当事者である研究者が握っています。これらの変化が遅れる原因は取り除かて行くので、大幅な遅れはないでしょうが、現職の研究者の意思によりある程度の変化の速度が決定されるのでしょう。このような状況下では研究者の各人が、トラブルを避けつつも、これまでの研究姿勢を反省し日々の研究生活に生かすように心がけることが、変化に取り残されずに済む方法でしょう。

電磁気学で素晴らしいビジョンを描いた人として、ファラデーを“ 静電場 ”でご紹介しましたが、もう一人、ヨハン・ヴィルヘルム・リッターについて述べましょう。この方は３０代前半で亡くなっているので、活躍期間が少ないためか、あまり有名ではないのですが、かなりすごい方です。

その前に、エルステッドに実験から始まる磁場の物理的理解の歴史を、啓林館のホームページ

http://www.keirinkan.com/kori/kori_physics/kori_physics_2_kaitei/contents/ph-2/2-bu/2-3-2.htm

を引用し、振り返ります。

-引用始まり-

「電流の磁気作用の発見の意義

1785 年のクーロンの法則の発見以来，磁気に関するみるべき発見はしばらくなかった。1799 年にボルタの電池が発明され，電池が両極を持っている装置であることから，電池と磁石の類似を考えて，1800 年代の初期に電池をつり下げて磁石のように両極が南北を指すかどうかを調べたり，電池に磁石を近づけて力がはた

らくかどうかを調べた実験がある。1820 年，エルステッド (H.C.Oersted，1777-1851) は，磁針に平行に導線を張って電流を流すと磁針がふれ，電流を反対向きに流すと磁針のふれも反対になることを発見した。この直線電流による磁界の発見について，エルステッドは「電流は針金の中に閉じ込められていないで，同時に周りの空間に広がる」と述べている。エルステッドの発見は，電磁気学の歴史にとって画期的なことであった。それまで電気と磁気とはよく似ているが，あくまでも別々の現象であると考えられてきたのに対し，両者の間に密接な関係のあることを初めて明らかにしたからである。エルステッドの発表は，1820 年 7 月 21 日であったが，それがデンマークからパリに伝えられたのが同年 9 月 11 日であったから，当時としては異例の速さである。エルステッドの発見の報は，アラゴー (F.Arago，1786-1853) らによって，各国でただちに追試された。同年 9 月 18 日には，アンペールが電流相互間の力を明らかにし，10 月 30 日には，ビオ・サバールの法則が発表された。」

-引用終わり-

26 歳の若き日のエルステッドが、ドイツの科学者“ヨハン・ヴィルヘルム・リッター（エルステッドより 1 歳年上；wiki ヨハン・ヴィルヘルム・リッター参照）のもとにおもむき（1803 年から 1805 年の間のどこか)、リッターの描いた「電気と磁気に関連がある。」というビジョンについて意見を交わしていたようです (wiki ハンス・クリスティアン・エルステッドより)。ですから、1820 年のエルステッドの発見に始まる一連の電磁気学の歴史にとって画期的な出来事の影の立役者はドイツの科学者“ヨハン・ヴィルヘルム・リッター”ではないか？という推測も出てきます。きっと、そうなんでしょう。なぜならば、電気と磁気に関連があるというリッターの発案が確かめられていくのがこの短期間の重要な時期に展開された物理で、その発端がエルステッドの実験なのですから。時間を超えてこの時期を鳥観した時、これらの筋書きは何ら無理がありませんが、リッターという研究者については文献を探すことが困難で、推測の域を出ないのが現実です。リッターが電気と磁気の関係をどのように捉えていたのか興味深いところではあります。

しかし、場という概念まではたどり着いていなかったと思います。1830 年にファラデーにより“電場”という概念が導入されたのですが、その時リッターが生きていれば（６０歳前後)、その研究はリッターが行っていたことでしょう。リッターは早く亡くなったので残念ですが、バトンはリッターからファラデーに繋がれたことでしょう。そこからマックスウェルの方程式による電場と磁場の相関のストーリーは物理学の醍醐味です。

“定常電流による磁場 *No. 2*”に続く