

電磁気

Vol.3

磁気（磁界・磁場）のポイント

☆式の導出が、高校分野を超えるものが多いので、

覚えるべきもの

と

原理・法則から導出すべきもの

をはっきりと区別する

磁気力：磁気之力

磁極：磁石の両端など、磁氣的性質をもつもの
磁石における N 極や S 極

磁気量：磁極のはたらきの強さを表す物理量
N 極の磁気量を正、S 極の磁気量を負と決める。

量記号①[***m***] 単位：②[***Wb***] **ウェーバ**

2. 磁気力に関するクーロンの法則：2個の磁極が及ぼしあう磁気力Fは、磁極を結ぶ直線の方
向にはた
らき、それぞれの磁気量 m_1 、 m_2 の積に比例し、磁極の間の距離 r の2乗に反比例する。

磁気力に関するクーロンの法則

$$\textcircled{3} \mathbf{F} = k_m \frac{|m_1||m_2|}{r^2}$$

※電気力に関するクーロンの法則

$$F = k_0 \frac{|q_1||q_2|}{r^2}$$

k_0 と k_m は違う定数

3. 磁界・磁場：その空間（場）そのものが、磁極に力を加えているように考えるとき、その空間を磁界・磁場という。

磁界・磁場の記号④ **H** 単位⑤ [**N/Wb**]（**ニュートン毎ウェーバ**）

磁界・磁場の強さ：

1 [Wb]の磁極を置いたときに、その磁極が受ける磁気力の大きさ

磁界・磁場の向き：

1 [Wb]の磁極を置いたときに、その磁極が受ける磁気力の向き

○磁気量 m の磁極が磁場 H から受ける力 F の大きさは、

$$\textcircled{6} F = mH \quad \longleftrightarrow \quad F = qE$$

5. **磁力線**：磁場・磁界の向きに沿って、なめらかに線を引いた線。

磁力線の性質

- ・ N 極から S 極に入る
- ・ 磁力線同士は交わらない
- ・ 磁力線が密なところは磁界が強い
- ・ 磁気量の絶対値が等しい磁極に出入りする磁力線の本数は等しい

6. **地磁気**：
北極を⑦ **S** 極、南極を⑧ **N** 極とする地球の持つ磁気

§ 2 直線電流がつくる磁界

○電流による磁気の性質は、1820年デンマークのエルステッドによって発見された。

1820年フランスのアンペールは2本の電流の間にはたらく力を測定し、電流と磁気との法則を発見した（アンペールの法則⇒右ねじの法則）。

アレッサンドロ・ボルタ

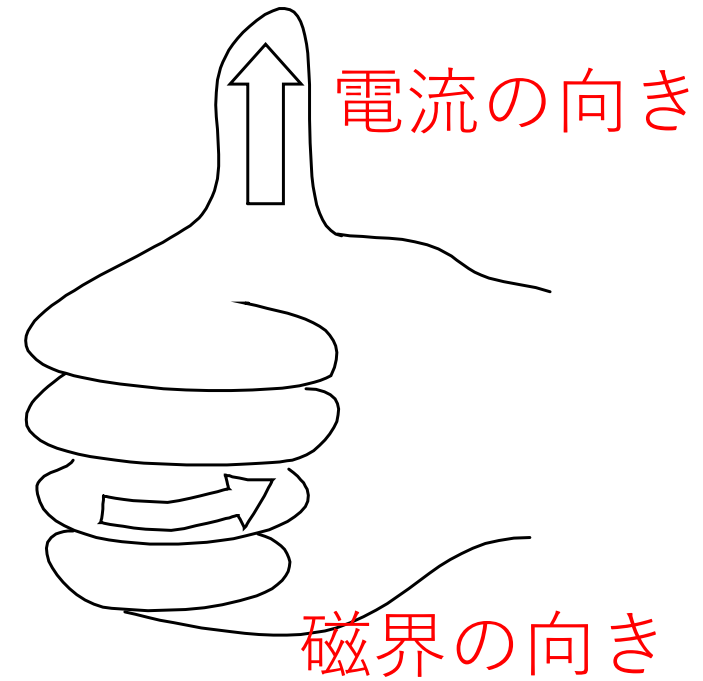
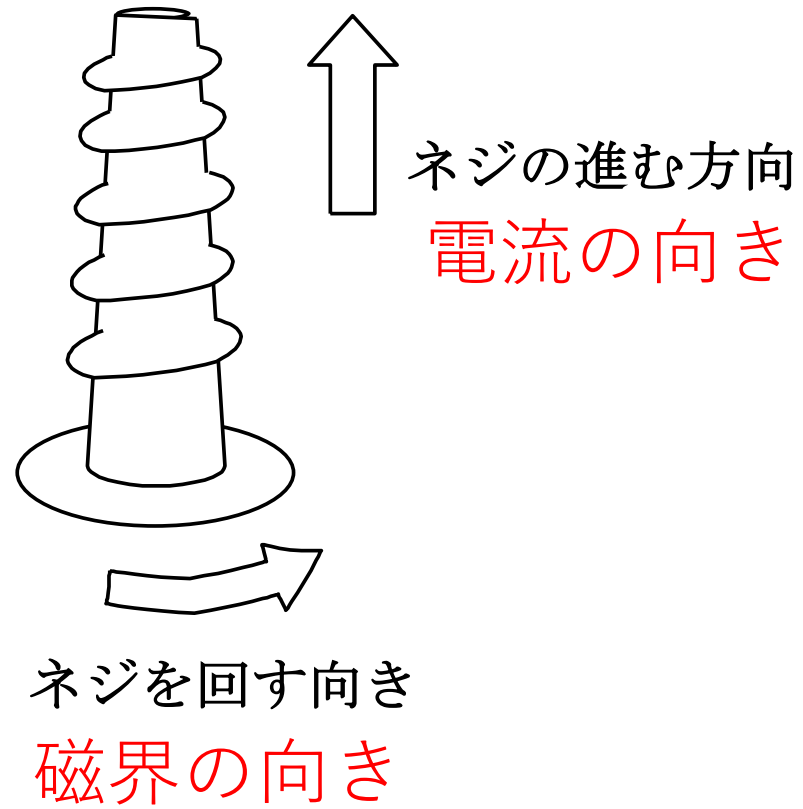
1745年- 1827年イタリア

エルステッド

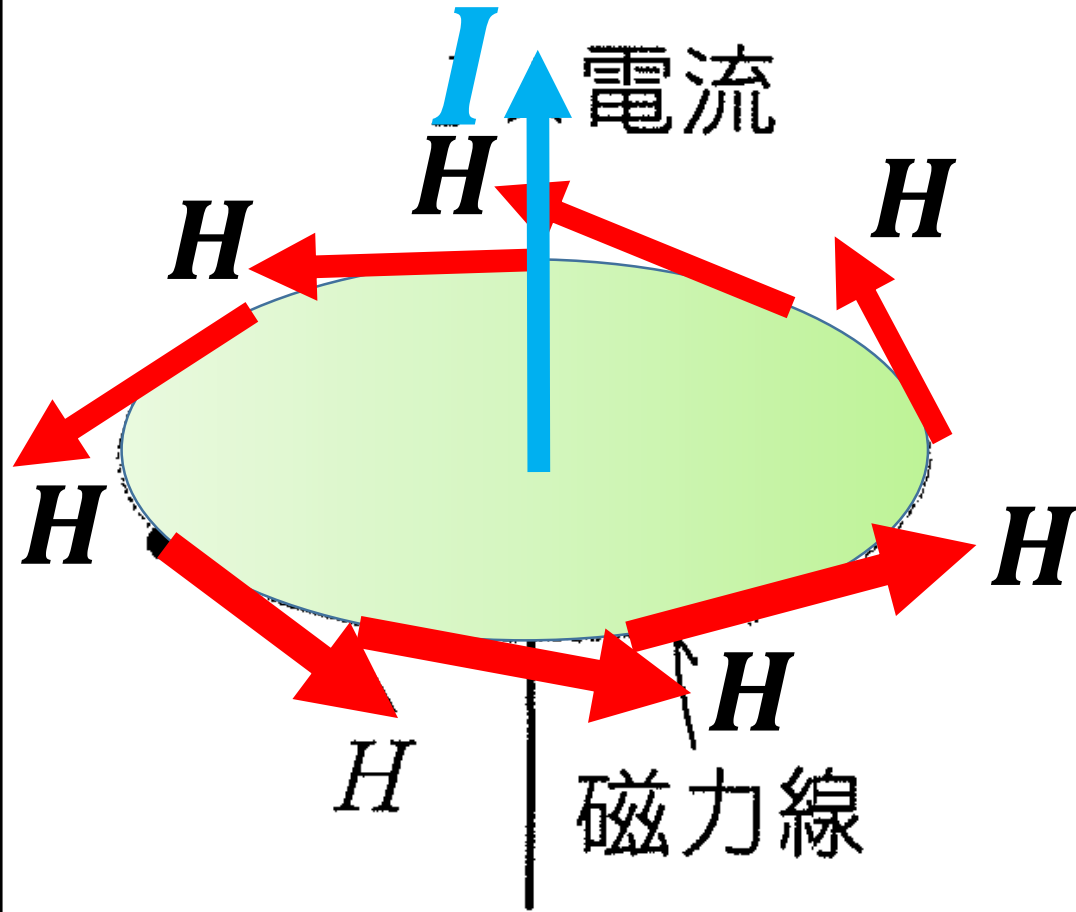
1777年 - 1851デンマーク

1820年4月21日、講義中に実験器具をいじっていたエルステッドは、電池のスイッチを入れたり切ったりするとそばに置いた方位磁針が北でない方角を指すことに気づいた。これが電気と磁気の直接的関係を示す最初の証拠となった。

右ねじの法則



直線電流がつくる磁界・磁場 H

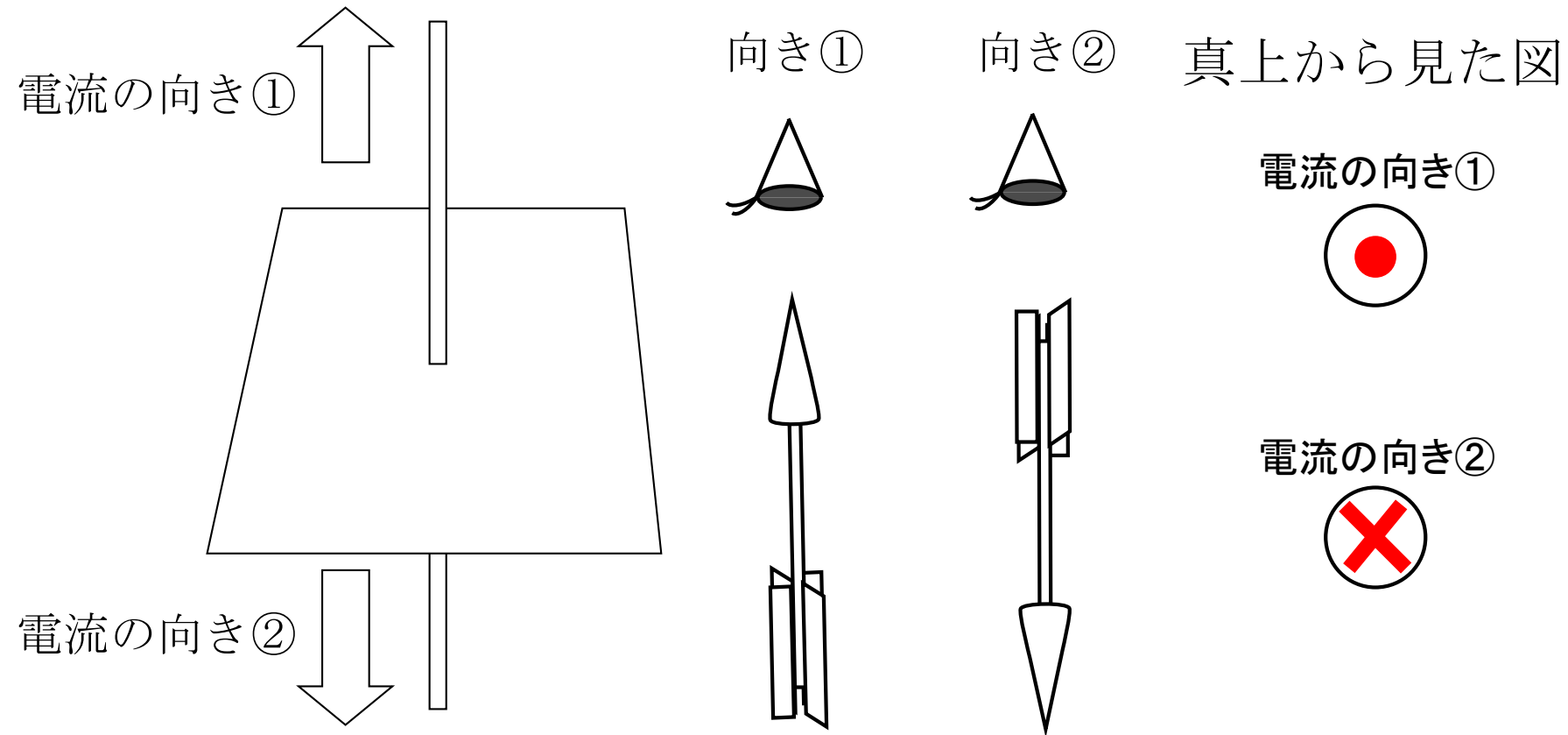


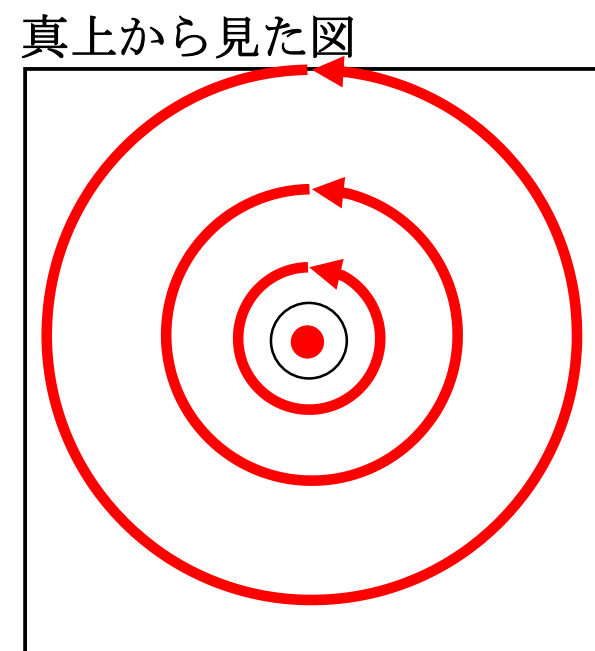
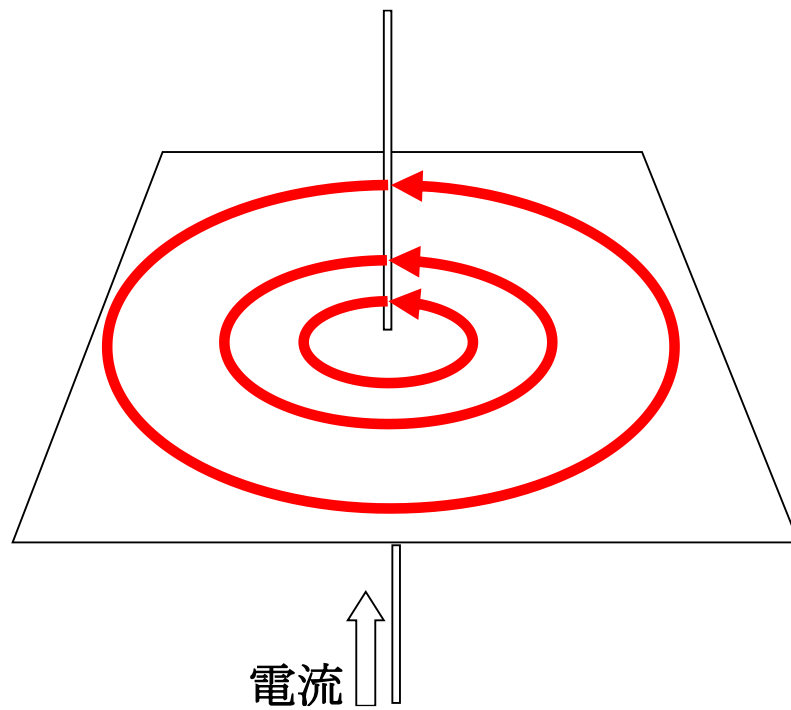
$$H = \frac{I}{2\pi r}$$

電流 I = 磁界磁場 H × 円周 $2\pi r$

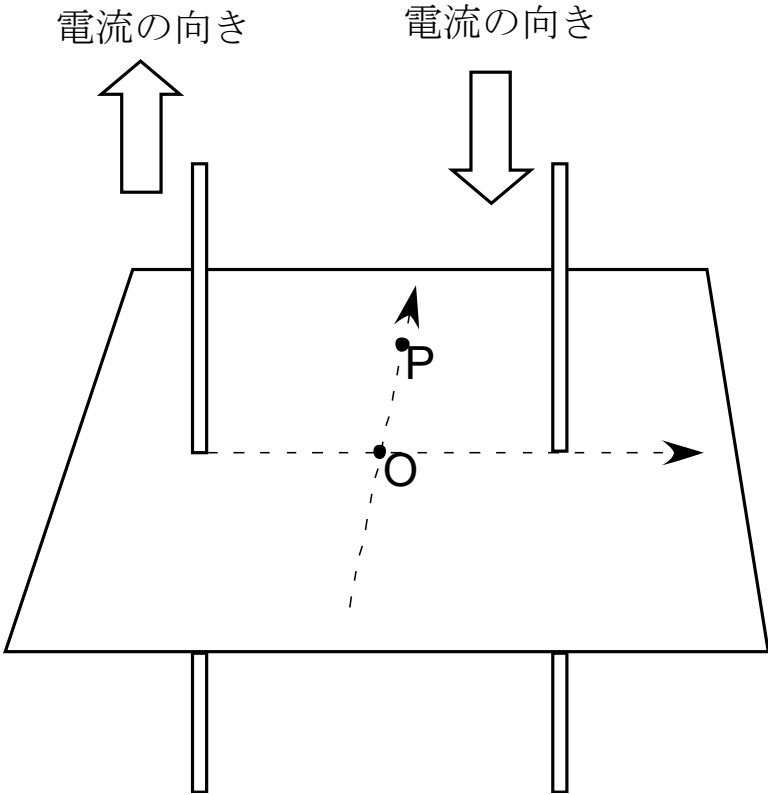
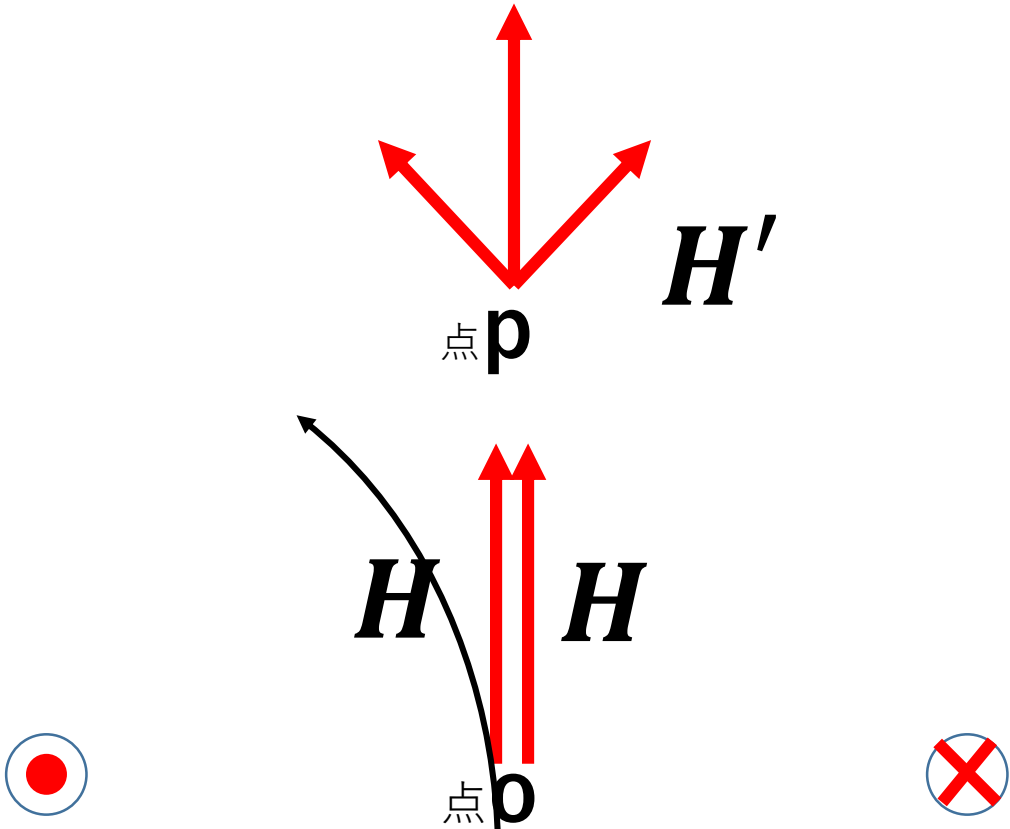
$$[A/m] = \frac{[A]}{[m]}$$

○紙面に垂直に流れる電流の表しかた



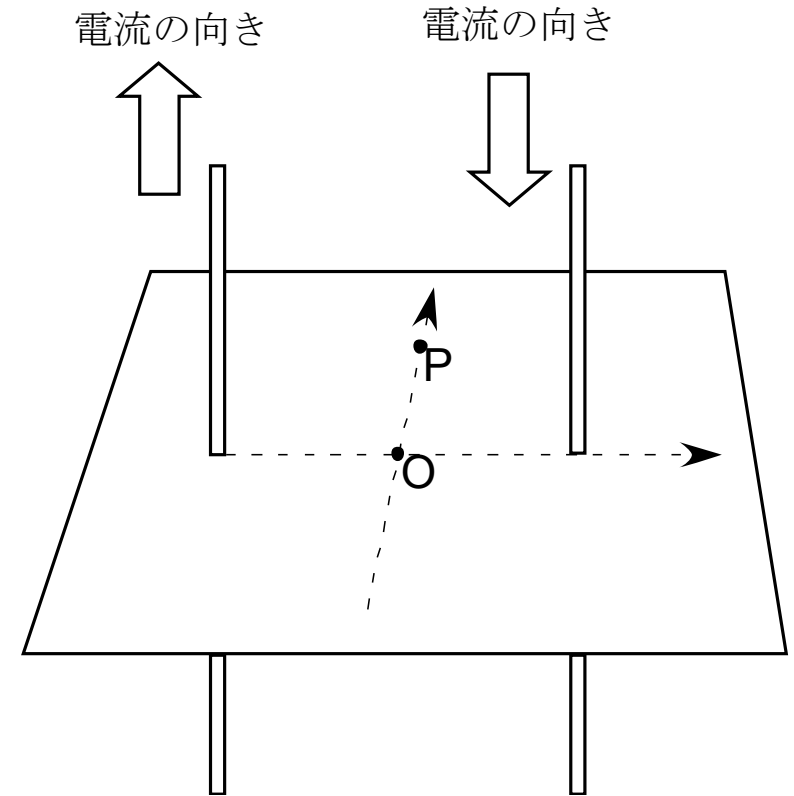
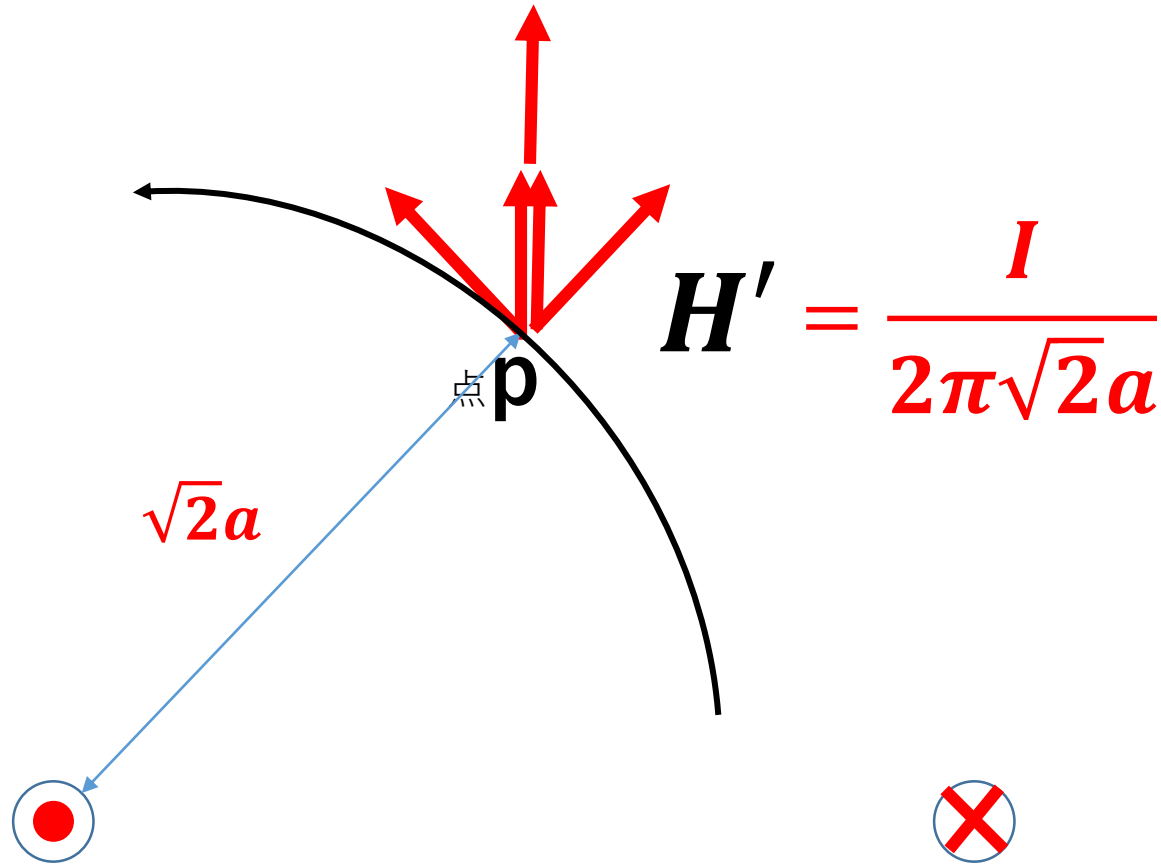


練習 x y 平面内の2点 (− a, 0)、 (a, 0) を通り、 z 軸方向に互いに逆向きに同じ強さの電流 6 A が流れている。点 O (0,0)、 点 P (0, a) の各点の磁場の強さを求めよ。ただし、 a = 3 cm とする。



$$H = \frac{I}{2\pi a} \rightarrow H_o = H \times 2 = \frac{I}{\pi a} = \frac{6}{\pi \times 0.03} = \frac{200}{\pi}$$

練習 x y 平面内の2点 $(-a, 0)$ 、 $(a, 0)$ を通り、z 軸方向に互いに逆向きに同じ強さの電流 6 A が流れている。点 O $(0,0)$ 、点 P $(0, a)$ の各点の磁場の強さを求めよ。ただし、 $a = 3\text{ cm}$ とする。



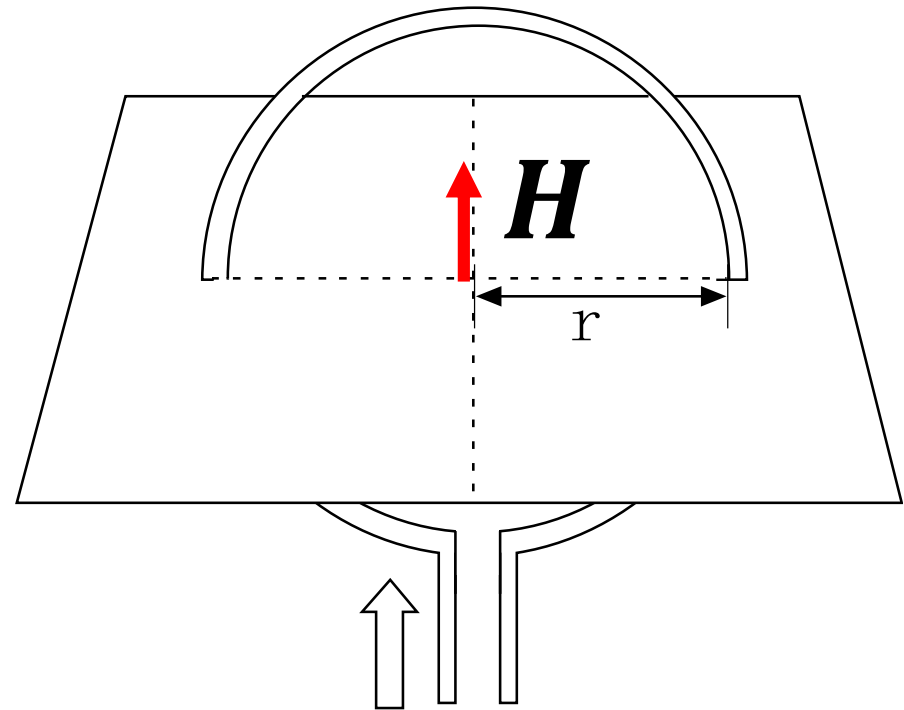
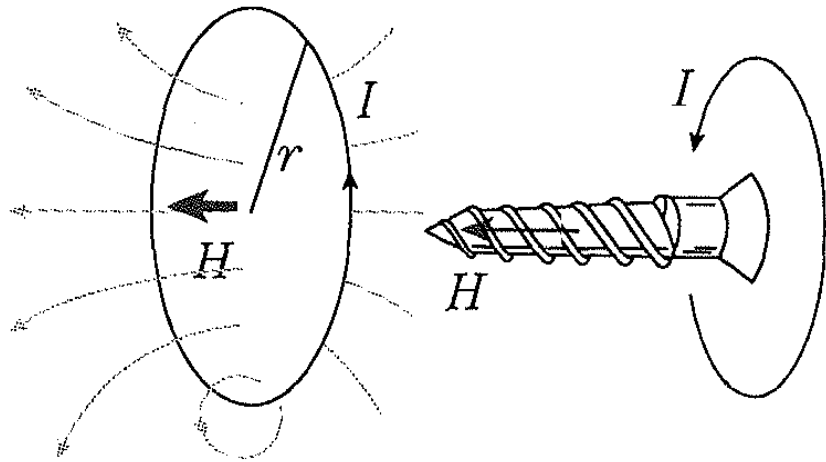
$$\frac{1}{\sqrt{2}} H' \times 2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{I}{2\pi\sqrt{2}a} \times 2 = \frac{I}{2\pi a} = \frac{6}{2\pi \times 0.03} = \frac{100}{\pi}$$

1. 円形電流がつくる磁界・磁場 H

半径 r [m] の円形電流 I [A] が円の中心につくる磁場 H は、

$$H = \frac{I}{2r}$$

$$H = N \frac{I}{2r}$$

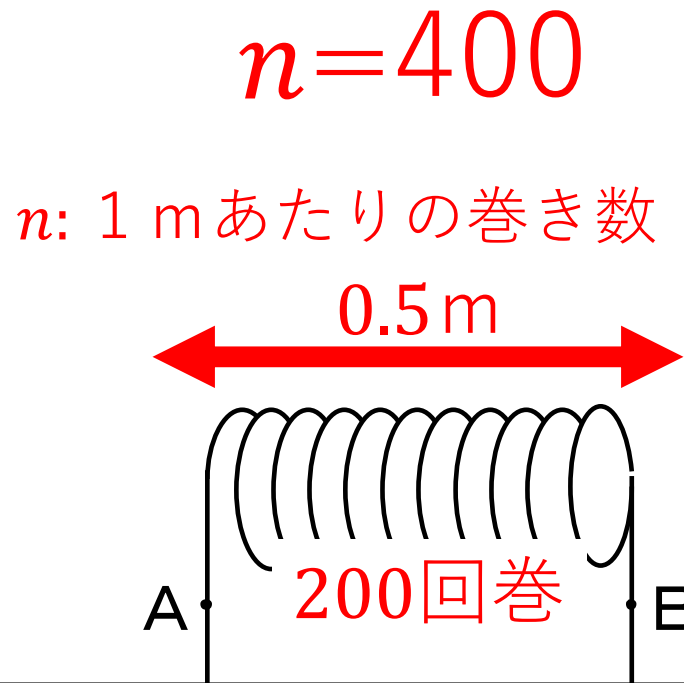
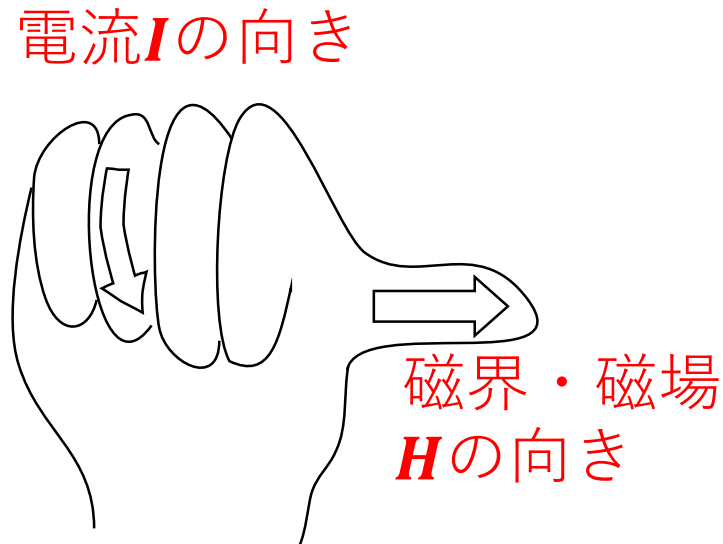
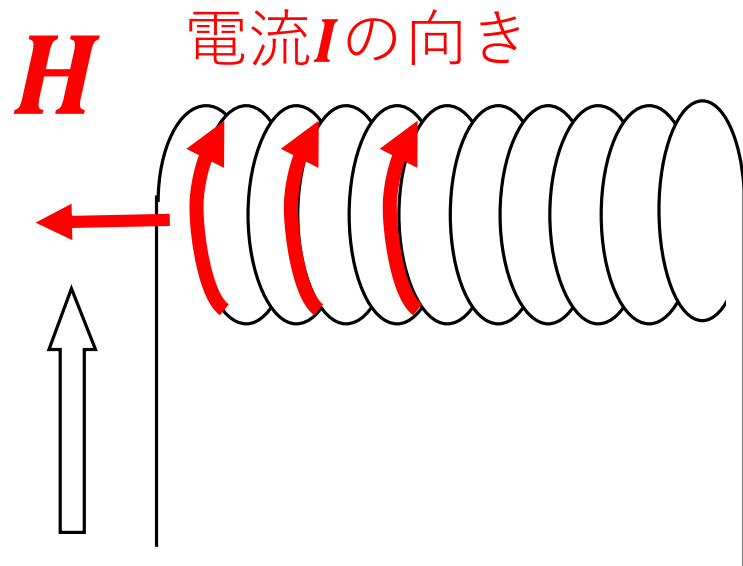


2. ソレノイドによる磁界・磁場

1 [m]あたりの導線の巻数が n である電流 I [A] のソレノイド（導線を円筒状に巻いたもの）がつくるソレノイド内部の磁場の強さ H は、

$$H = nI$$

n : 1 mあたりの巻き数



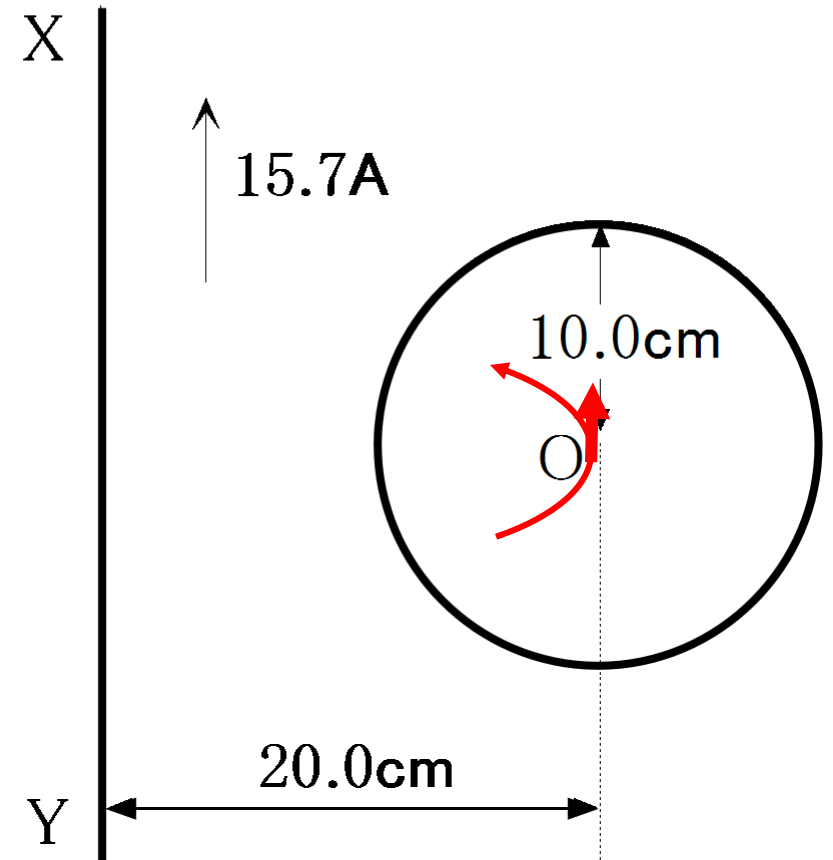
基本例題64 直線電流と円形電流がつくる磁場

図の向きに 15.7 A の電流が流れている長い直線状の導線 XY と、それから 20.0 cm の所に中心 O をもつ半径 10.0 cm の **2 回巻きの円形導線** が同一平面内にある。次の問に答えよ。

- (1) 直線電流が円の中心 O につくる磁場の強さと向きを求めよ。 **3. 1 4 を使う**
- (2) 円の中心 O の磁束密度を求めよ。ただし、空気の透磁率を $[N/A^2]$ とする。
- (3) 円形導線に電流を流して中心 O の磁場を 0 にするには円形導線に、どちら向きに、どれだけの電流を流せばよいか。

$$H = \frac{I}{2\pi r} = \frac{15.7}{2 \times 3.14 \times 0.2}$$
$$= \frac{50}{2 \times 2} = 12.5 [N/Wb]$$

紙面裏に向かう向き

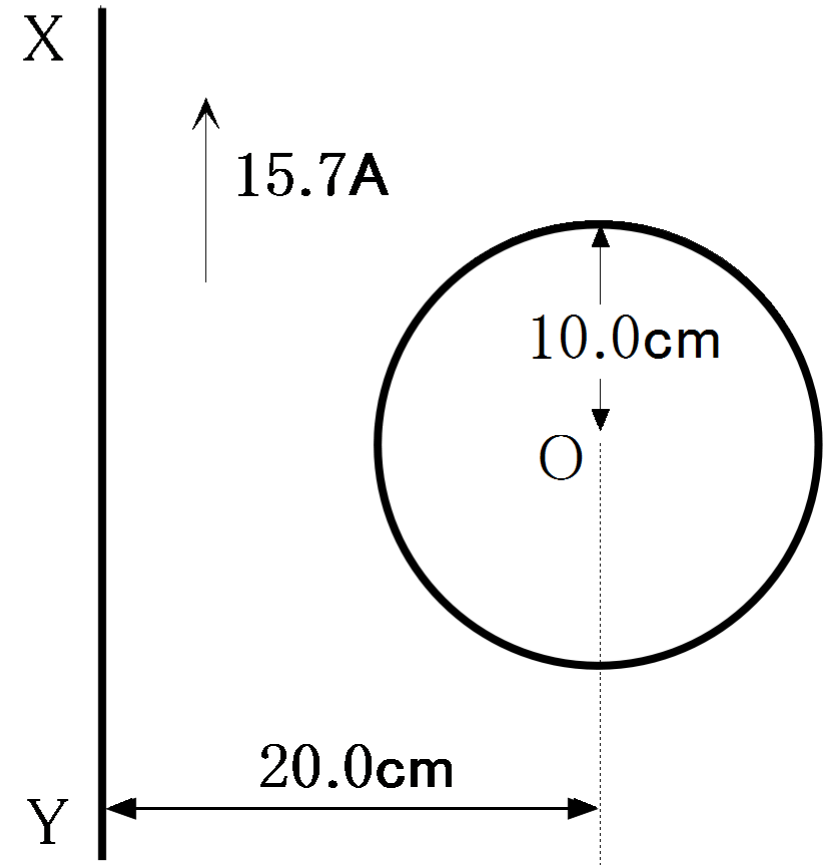


基本例題64 直線電流と円形電流がつくる磁場

図の向きに 15.7 A の電流が流れている長い直線状の導線 XY と、それから 20.0 cm の所に中心 O をもつ半径 10.0 cm の **2 回巻きの円形導線** が同一平面内にある。次の問に答えよ。

- (1) 直線電流が円の中心 O につくる磁場の強さと向きを求めよ。
- (2) 円の中心 O の磁束密度を求めよ。ただし、空気の透磁率を $[\text{N/A}^2]$ とする。
- (3) 円形導線に電流を流して中心 O の磁場を 0 にするには円形導線に、どちら向きに、どれだけの電流を流せばよいか。

(2) は飛ばし



基本例題64 直線電流と円形電流がつくる磁場

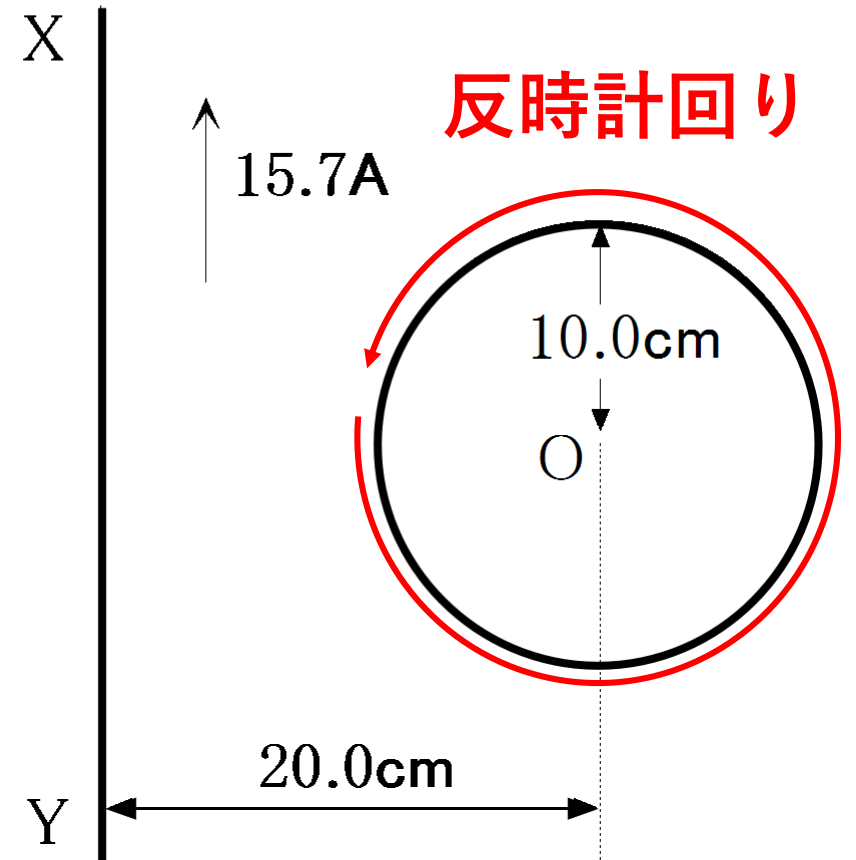
図の向きに 15.7 A の電流が流れている長い直線状の導線 XY と、それから 20.0 cm の所に中心 O をもつ半径 10.0 cm の **2 回巻きの円形導線** が同一平面内にある。次の問に答えよ。

(3) 円形導線に電流を流して中心 O の磁場を 0 にするには円形導線に、どちら向きに、どれだけの電流を流せばよいか。

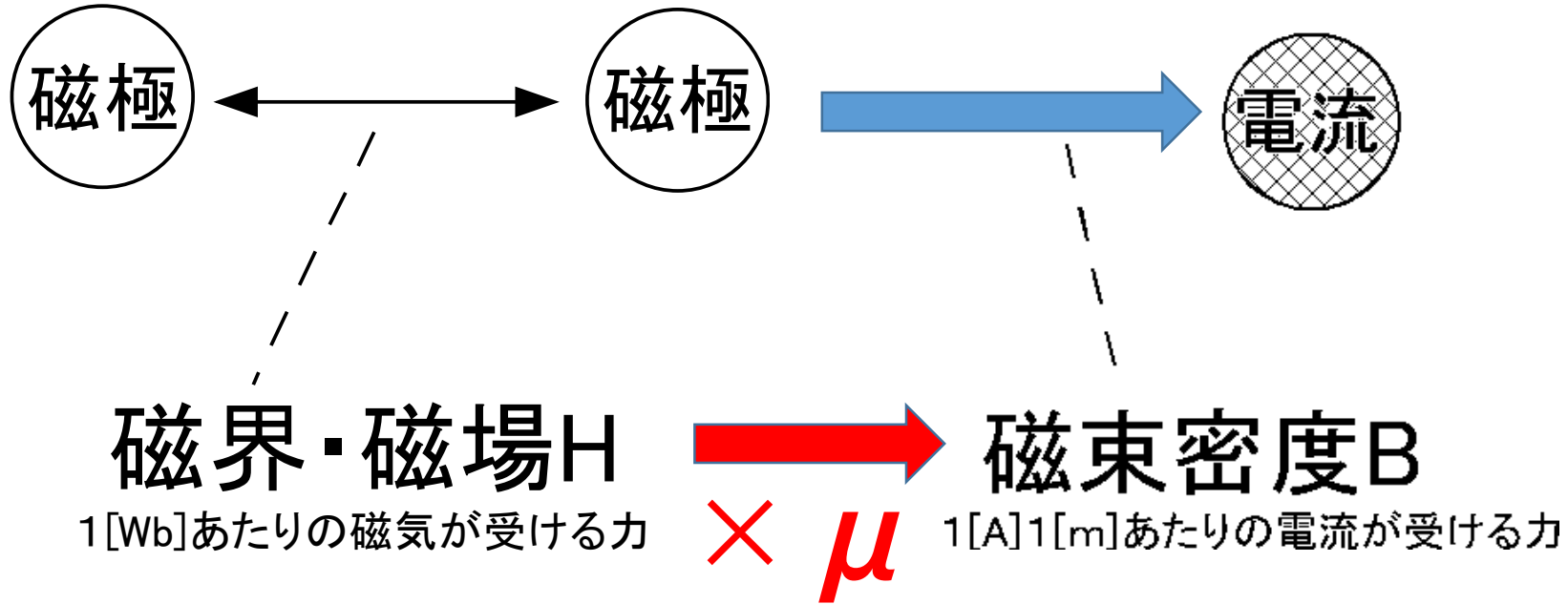
$$H = 12.5 [N/Wb]$$

$$H' = 2 \times \frac{I'}{2r'}$$

$$12.5 = 2 \times \frac{I'}{2 \times 0.1}$$
$$\rightarrow I' = 1.25 [A]$$



磁界・磁場Hと磁束密度B[T]の関係



1. 磁束密度：1 [A]の電流が流れる導線 1 [m]あたりが受ける**力の大きさ**

記号① **B** 単位②[**T**] (**テスラ**) = [N / A · m]

磁束密度 B の向き：磁場 H と同じ向き

磁束 Φ [Wb]

一様な磁束密度 B 中の面積 S [m²] に垂直に貫く磁束 Φ は、

$$\textcircled{3} \quad \Phi = BS$$

磁束の単位[Wb]ウェーバ

磁束 $\Phi = BS$

B : 磁束密度

S : 面積

磁束の単位[Wb]

磁束を生み出す
磁極の単位[Wb]

磁極

m [Wb]

$B = 2$ [T]

B本

1 [m^2]

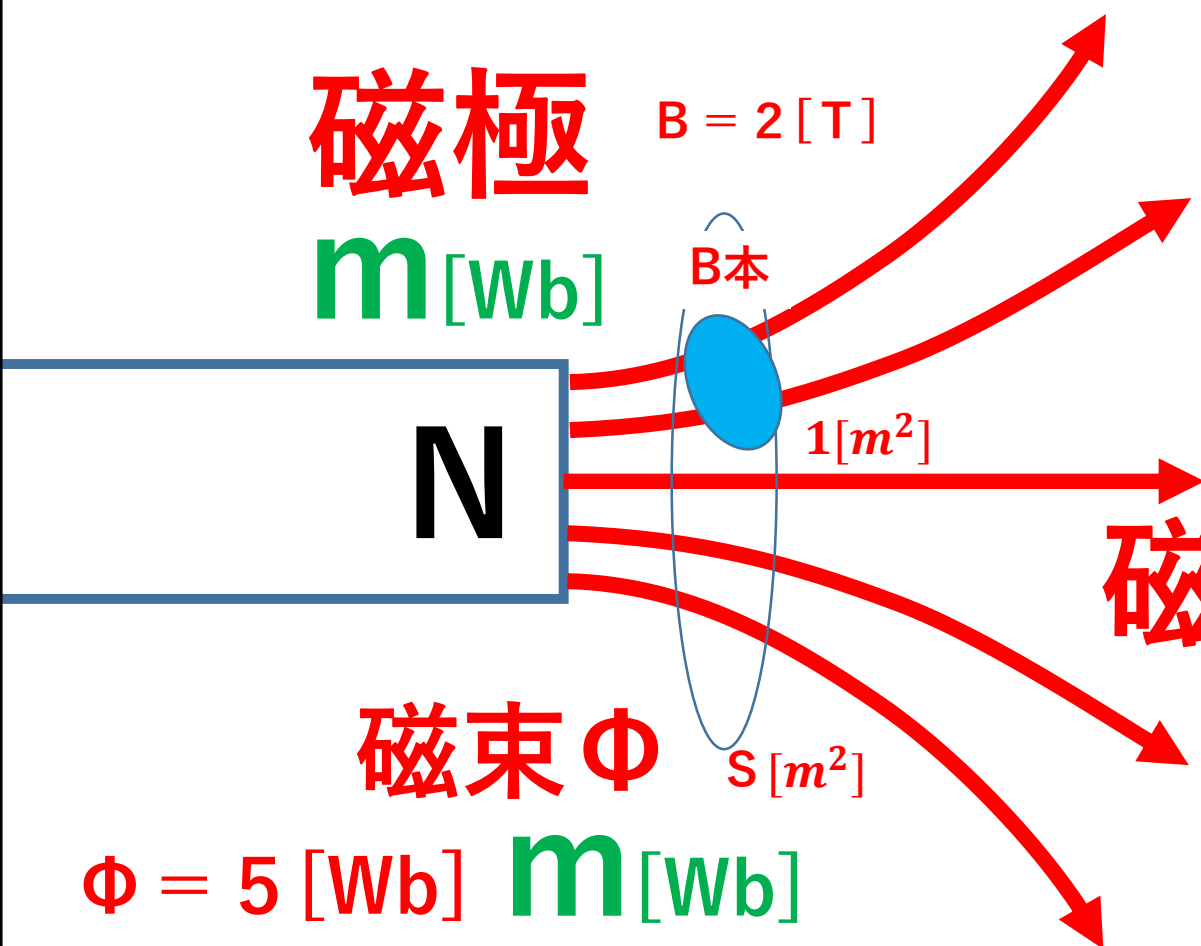
N

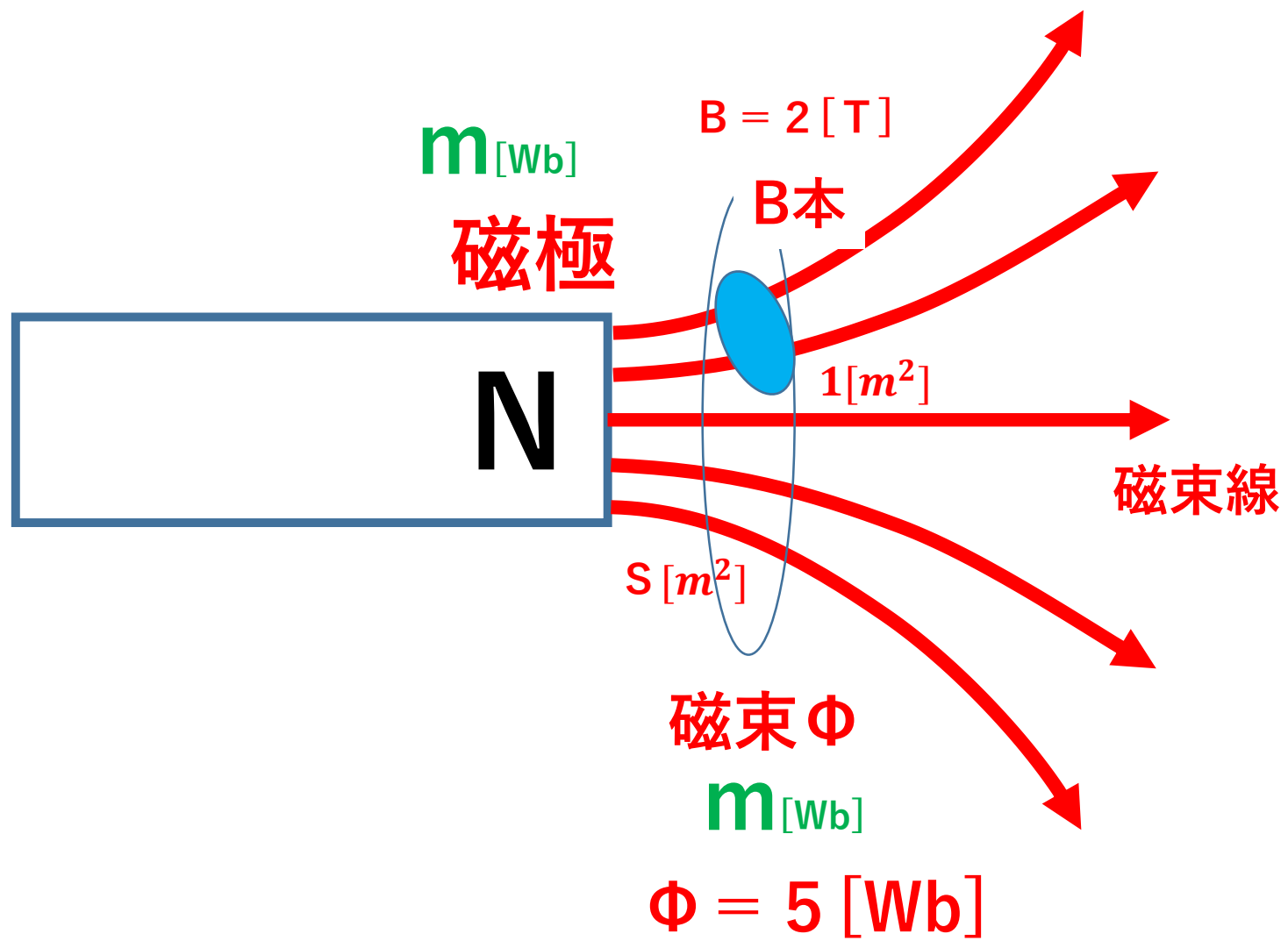
磁束線

磁束 Φ

S [m^2]

$\Phi = 5$ [Wb] m [Wb]





磁束密度は、電流 **1** [A]が流れる **1** [m]の導線が受ける
力の大きさであるから、

磁束密度 B [T]中で、 B に垂直に流れる I [A]の電
流が流れる導線 L [m]が受ける力の大きさ F は、

$$\textcircled{4} F = \mathbf{IBL} \quad (\mathbf{F = IBLsin\theta})$$

$$\textcircled{5} B = \mathbf{\mu_0 H} \quad \mu_0: \text{真空の透磁率}$$

$$\mathbf{B = \mu H} \quad \mu: \text{ある物質の透磁率}$$

2. 磁束線：磁束密度 B の向きに沿って描いた線

磁束密度 B の場所では、磁界・磁場に垂直な単位面積を貫く磁束線の本数は、磁束密度の大きさ B と等しい（ガウスの法則（磁気））。

例 1 断面 $1\text{ [m}^2\text{]}$ の四角内の磁束密度が 2 [T] であるとき、磁束線の本数は **2** 本。

例 2 半径 1 [m] の円内の磁束密度が 3 [T] であるとき、磁束線の本数は **3π** 本。

3. 磁化：外部磁界（周りの磁界）によって、ある物質が磁石になることを磁化するという。

磁化した際に、強い磁気をもつものを強磁性体（鉄・コバルト・ニッケル）という。

わずかに磁化されるものを**常磁性体**（空気・アルミニウム）という。

磁場の向きとは**逆向きにわずかに磁化されるものを反磁性体**（水・銅）という。

4. 比透磁率

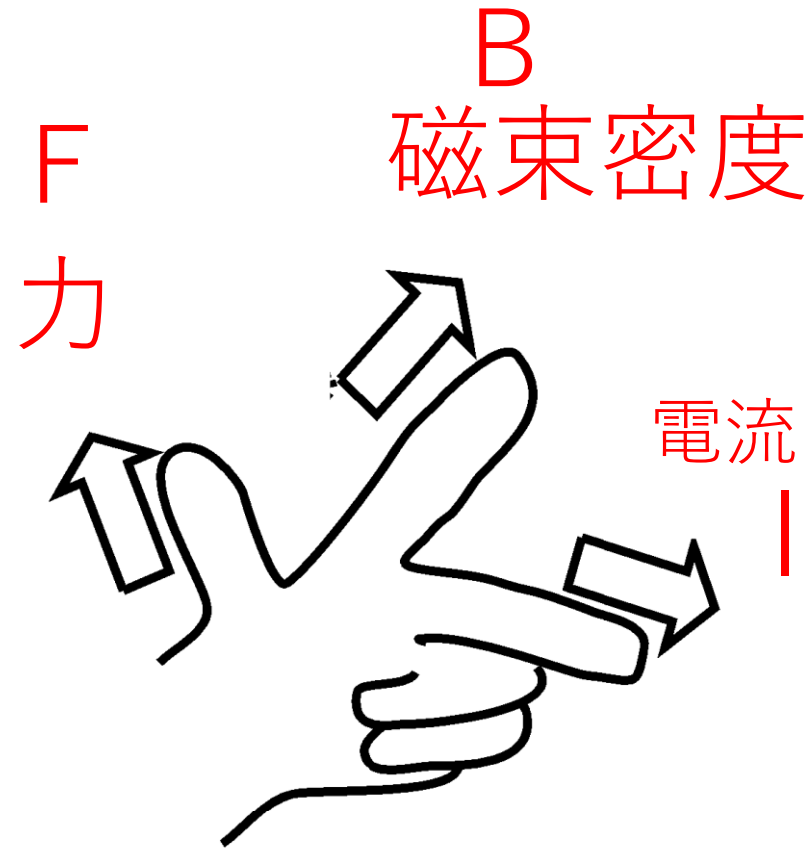
磁場 H 中においたある物質中の磁束密度の大きさ B は、物質の透磁率 μ を用いて、

$$B = \mu H = \mu_r \mu_0 H$$

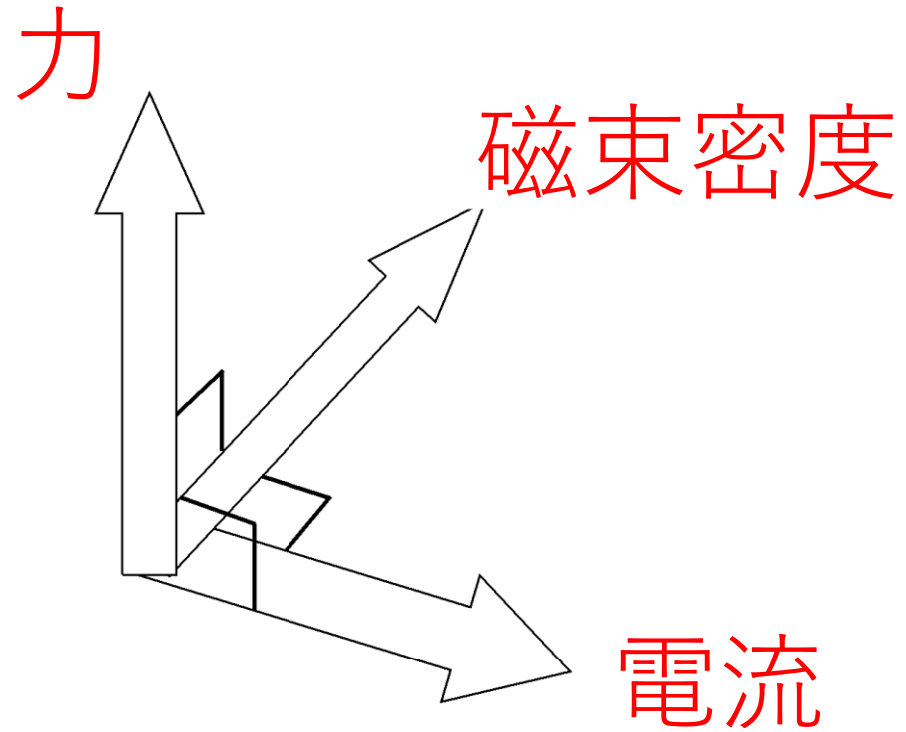
ここで、真空の透磁率と物質の透磁率との比を比透磁率 μ_r という。

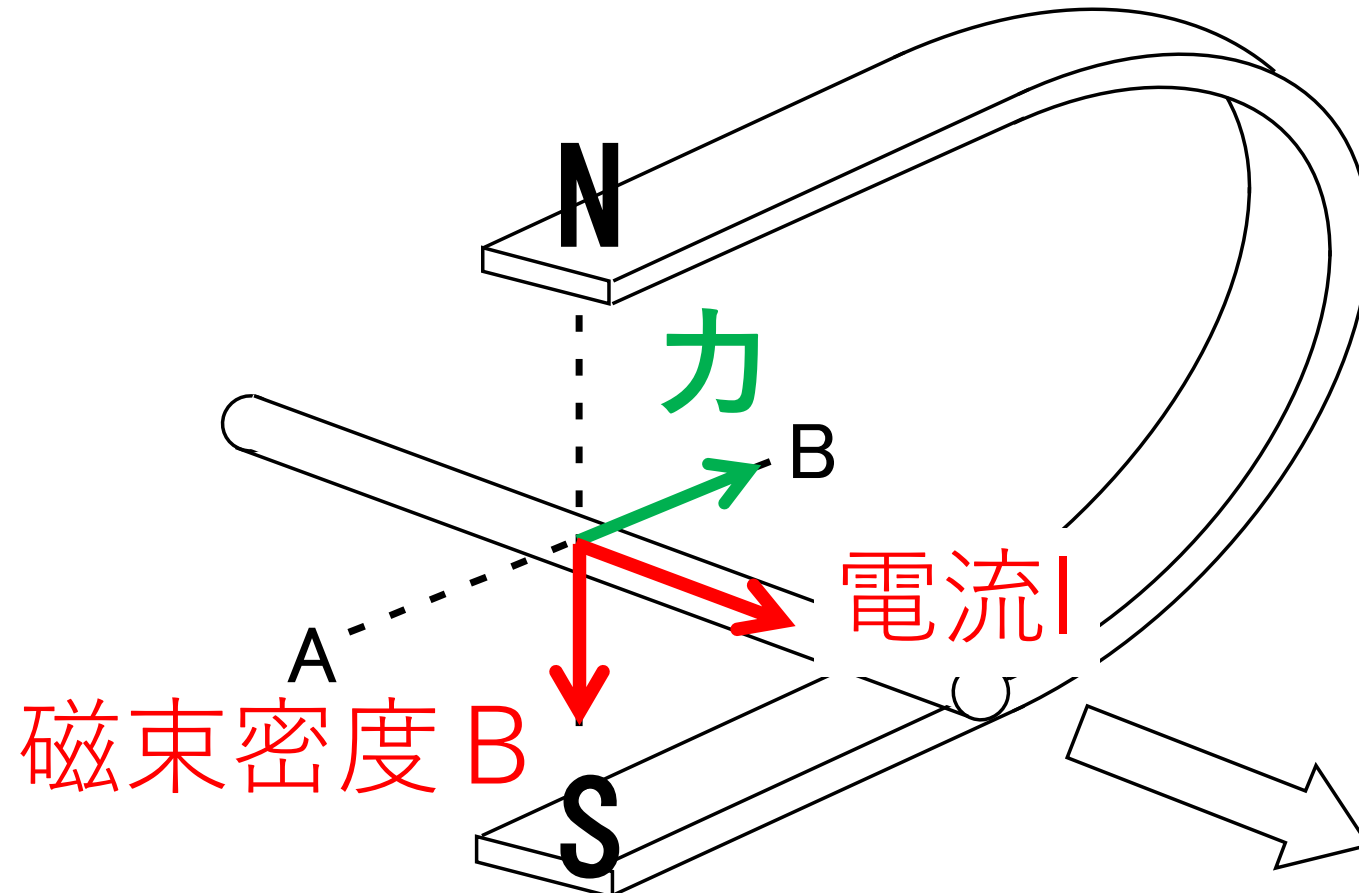
空気の透磁率は、ほぼ真空と同じ大きさである。

§ 5 フレミングの左手の法則



人差し指 電流
中指 磁束密度 磁界・磁場
親指 力





磁束密度 B

① (中指)
電流 I の向き

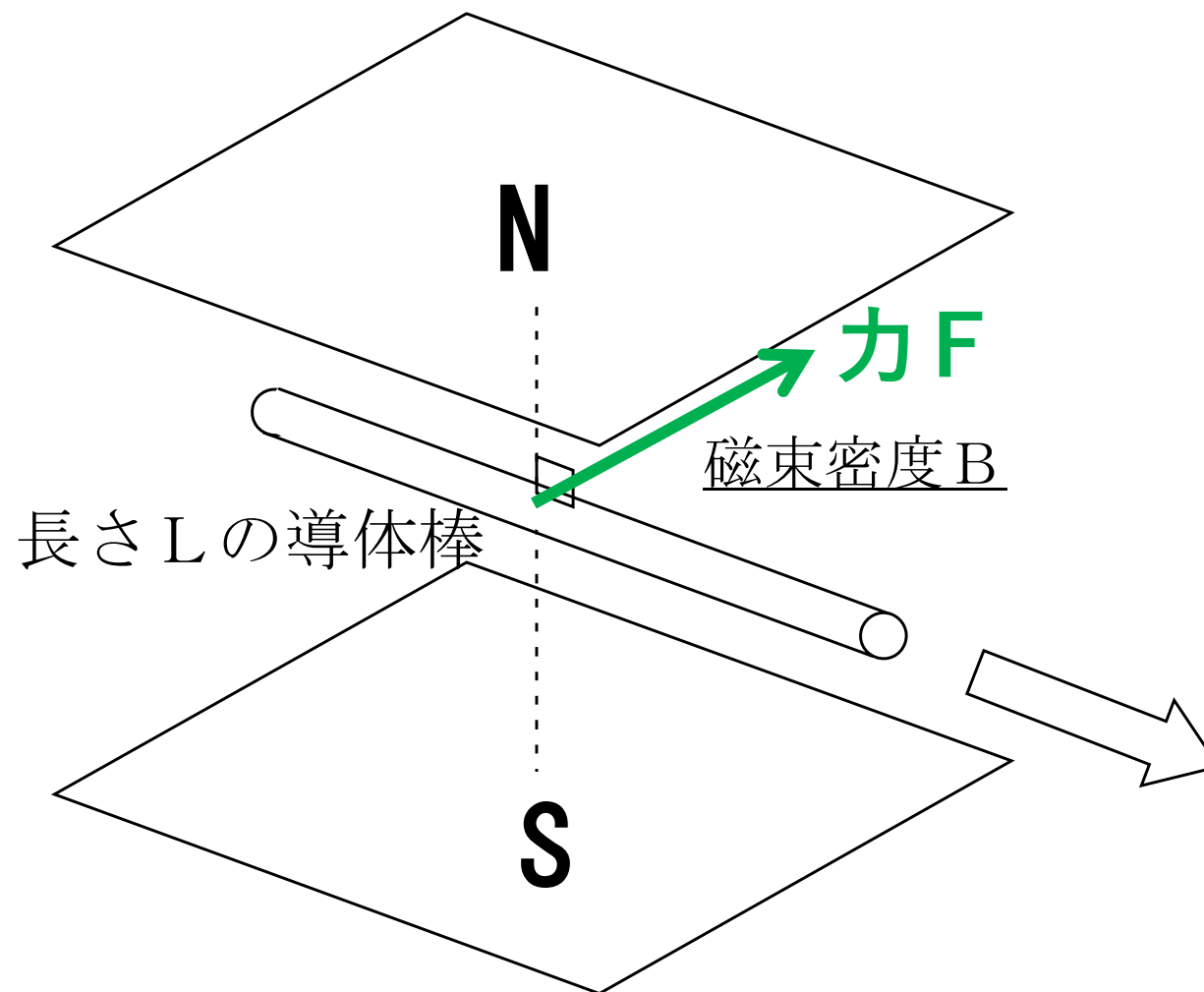
② (人差し指)
磁束密度 B の向きは、
S 極を指す向き

③ (親指)
力 F の向き

磁束密度 B 中の長さ L の電流 I が受ける力は、

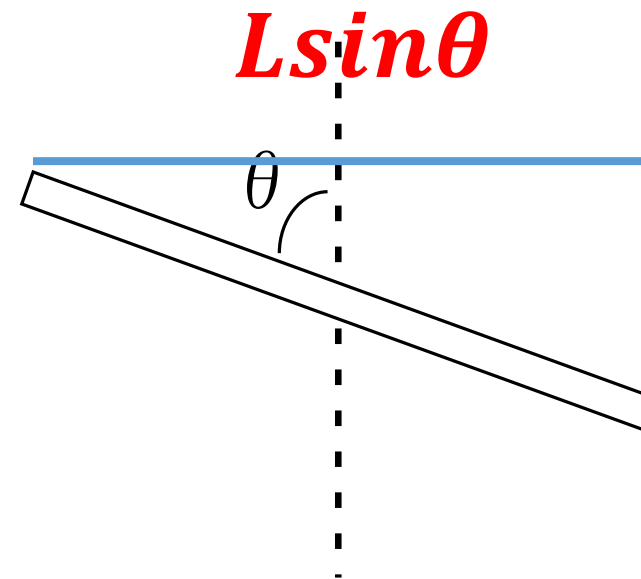
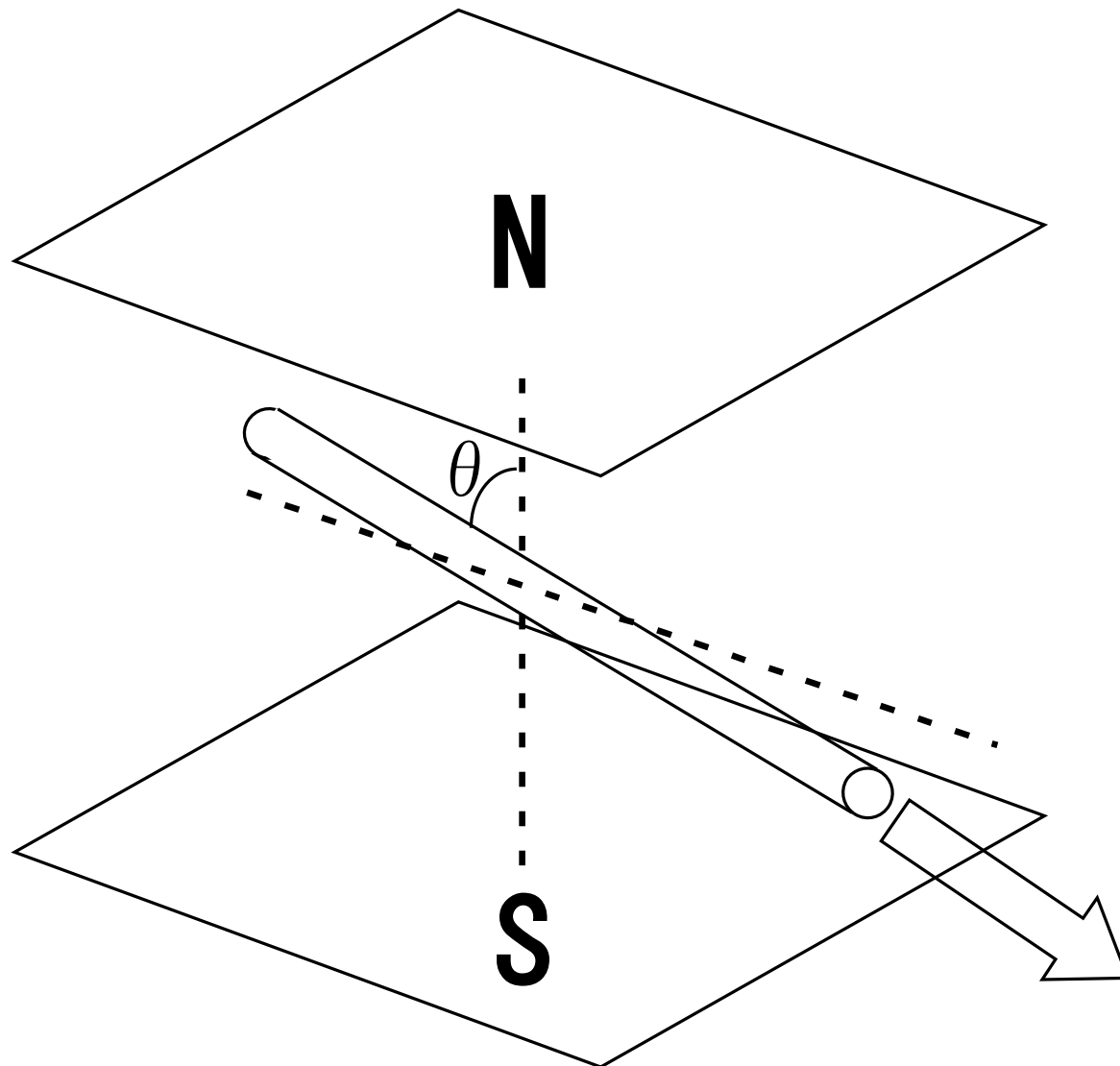
$$F = \textcolor{red}{IBL}$$

B : 1m1Aの導線が受ける力



2. θ 傾いた導線

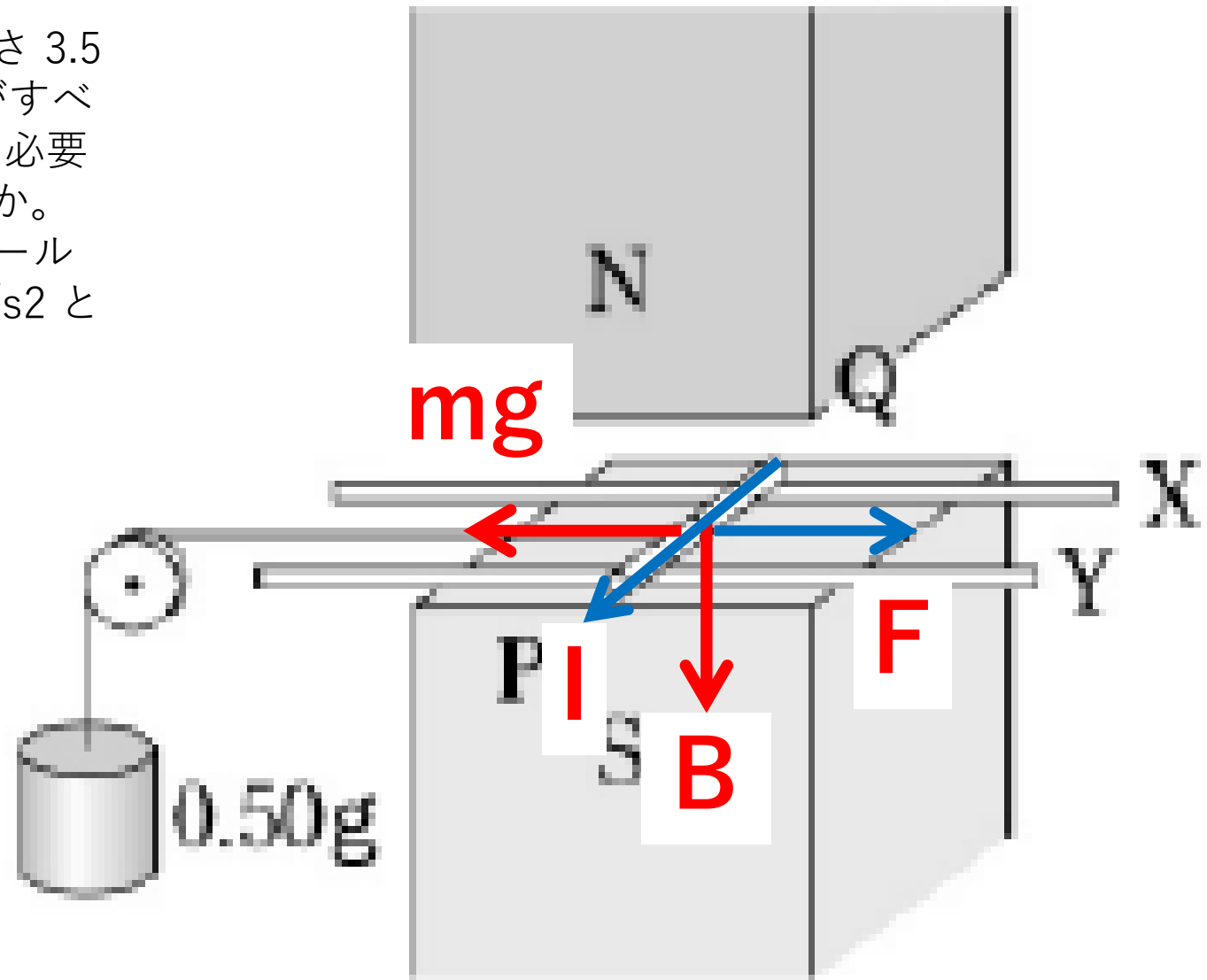
$$F = \boldsymbol{IBL\sin\theta}$$



基本例題65 磁場中の電流が受ける力

右図の装置で、なめらかなレール上に置かれた長さ 3.5 cm のアルミ棒 PQ に 4.0 A の電流を流す。棒 PQ がすべり出さないためには、おもりの質量を 0.50 g にする必要があった。電流は PQ 間をどちら向きに流れているか。また、磁極間の磁束密度はいくらか。アルミ棒はレールに垂直に置いてあり、重力加速度の大きさは 9.8 m/s^2 とする。

$$\begin{aligned} IBl - mg &= 0 \\ \rightarrow B &= \frac{mg}{Il} = \\ &= \frac{0.5 \times 10^{-3} \times 9.8}{4 \times 3.5 \times 10^{-2}} \\ &= 0.035 = 3.5 \times 10^{-2} [\text{T}] \end{aligned}$$



§ 6 平行電流間にはたらく力

1. 真空中で、じゅうぶん長い導線 P と Q に、それぞれ電流 I_1 、 I_2 が流れている。導線 P が、導線 Q の位置に作る磁界の向きは、右ねじの法則により決められる。

また、磁場の強さ H は、

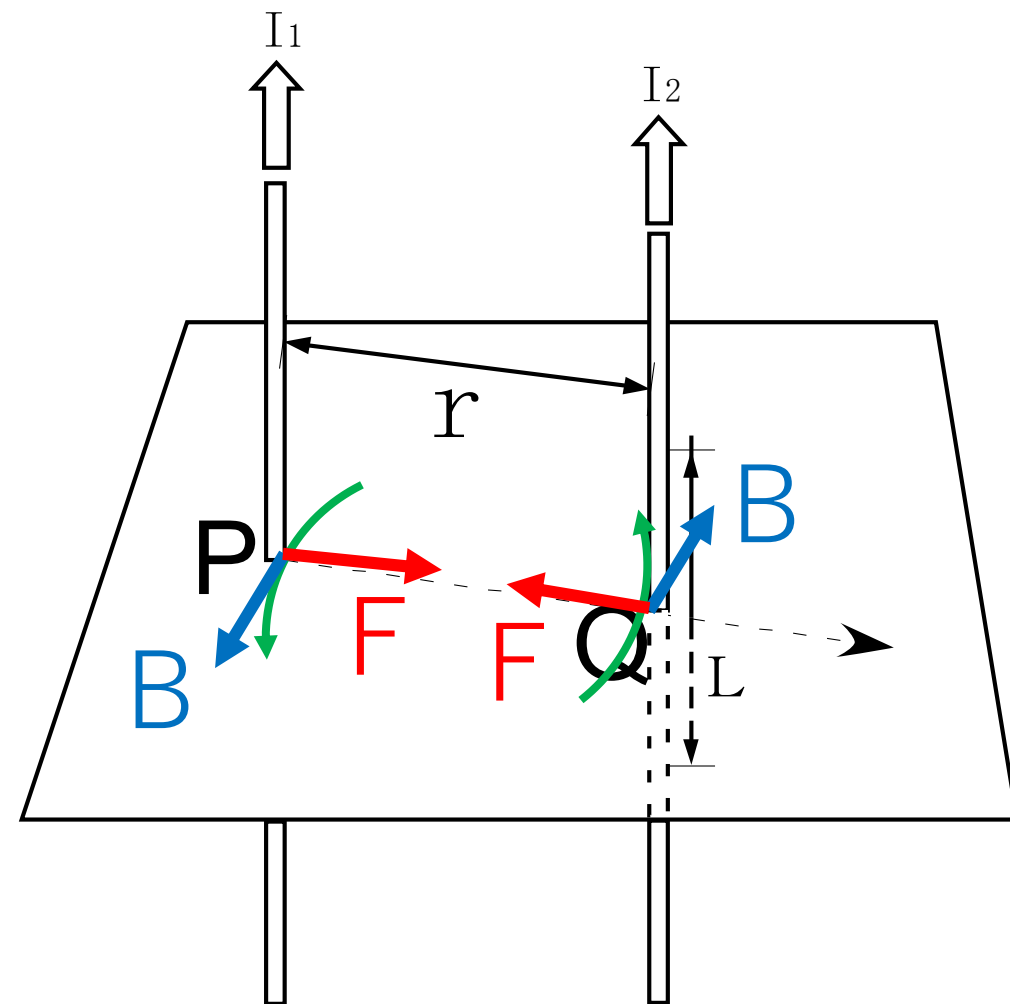
$$H = \frac{I_1}{2\pi r} \dots\dots ①$$

長さ L の電流 I_2 がこの磁場 H から受ける力は、真空中の透磁率を μ_0 として、

$$F = I_2 B L = I_2 \mu_0 H L$$

ここで、①を用いて表すと、

$$F = I_2 \mu_0 \frac{I_1}{2\pi r} L = \frac{\mu_0 I_1 I_2 L}{2\pi r} \dots\dots ②$$



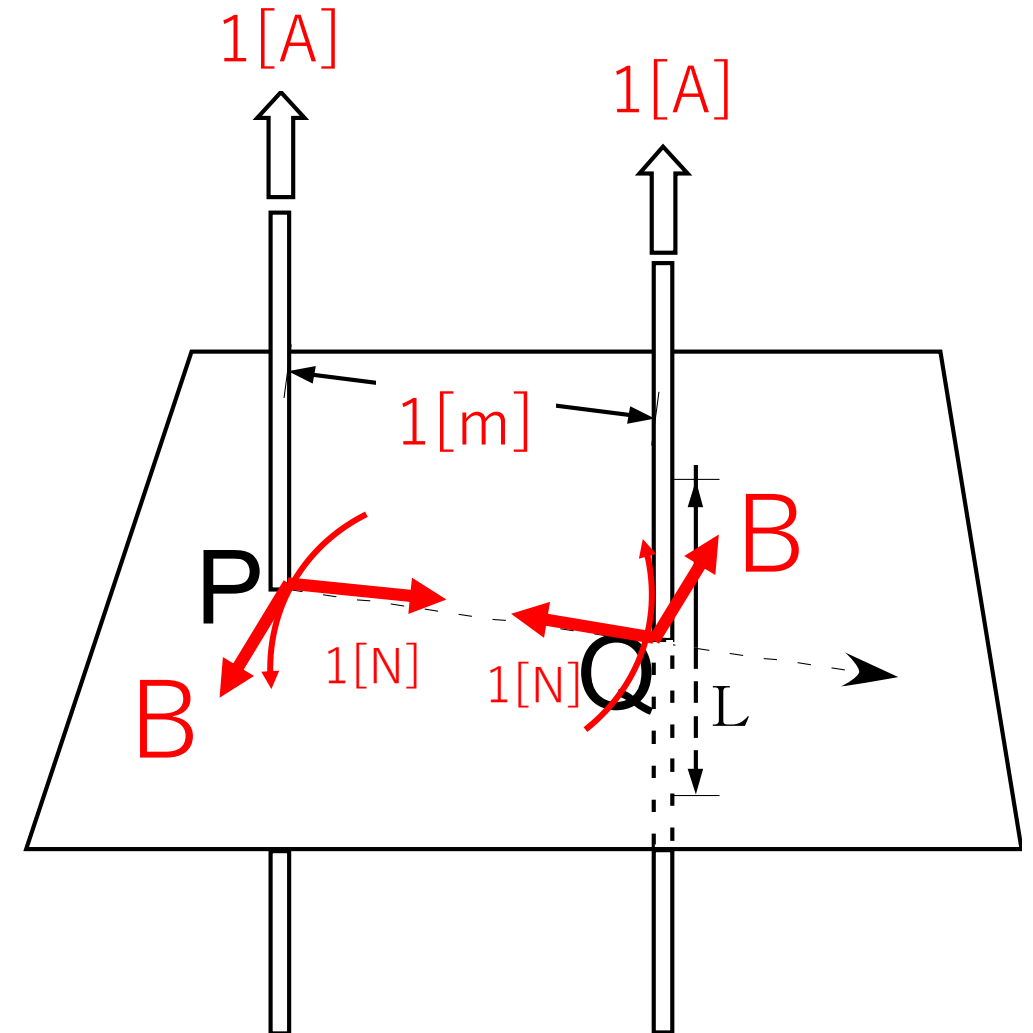
2. 電流の単位～1[A]の定義：

1[A]： 真空中で1 m隔てて、平行に置かれた2本の導線に同じ強さの電流を流したときに、導線同士におよぼし合う力が、1 mあたりちょうど 2×10^{-7} [N]であるときの大きさ

$$F = \frac{\mu_0 I_1^2 L}{2\pi r}$$

$$2 \times 10^{-7} = \frac{\mu_0 \times 1 \times 1}{2\pi \times 1}$$

$$\rightarrow \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} [\text{N/A}^2]$$



§ 7 ローレンツ力

1. ローレンツ力：導線が磁場から力を受けるのは、導線に流れている荷電粒子が磁場から力を受けるためである。荷電粒子が磁場から受ける力をローレンツ力という。

荷電粒子の電荷（電気量）を q 、導線の断面積を S 、荷電粒子の速さを v 、単位体積中の荷電粒子の個数を n とすると、電流 I は、

$$I = qnvS \quad \dots \textcircled{1}$$

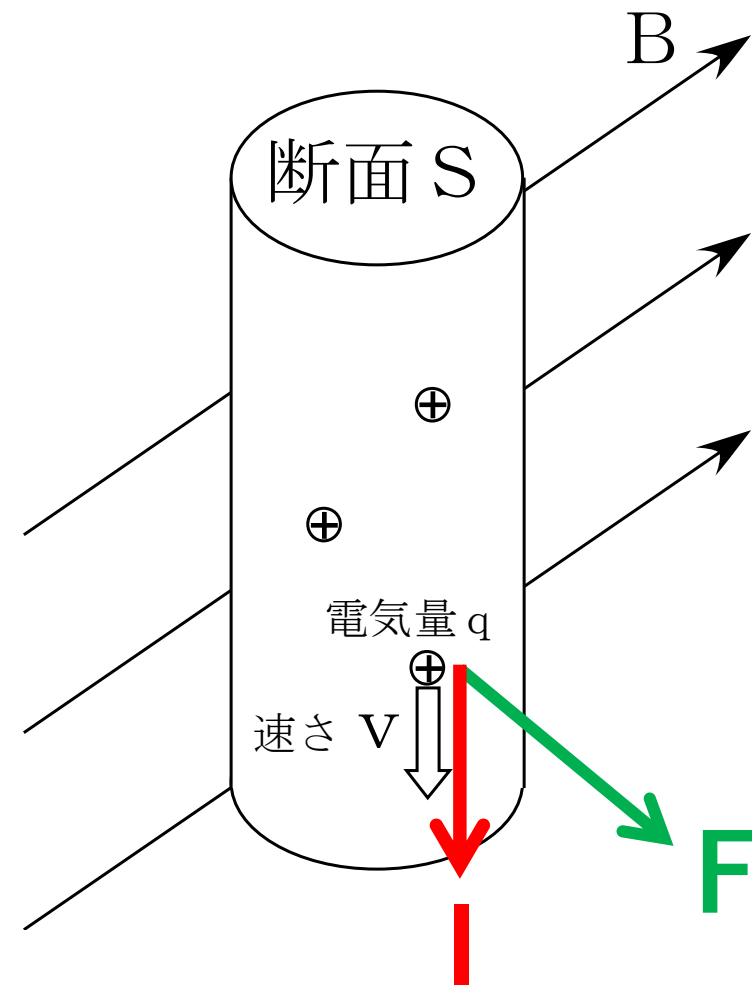
磁束密度 B 中の長さ L の電流 I が受ける力は、

$$F = IBL \quad \dots \textcircled{2}$$

であるから、①を②に代入し、長さ L 中に含まれる荷電粒子の個数（ nLS ）で割れば、1個あたりの荷電粒子が受ける力が求められる。

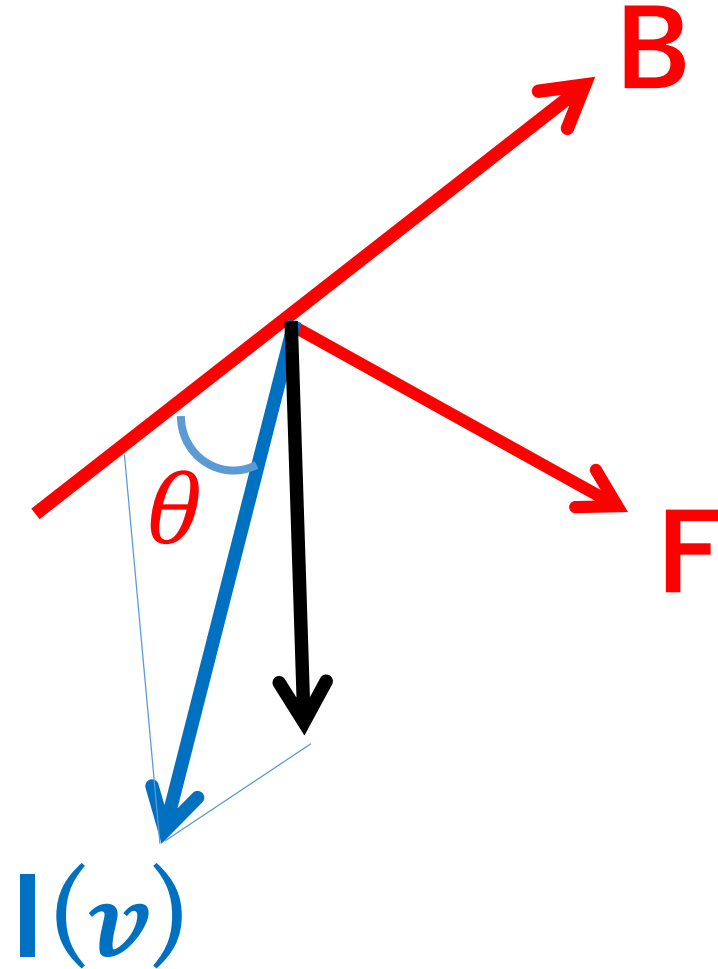
$$F = (qnvS)BL \div nLS$$

$$\Rightarrow F = qvB \quad \dots \textcircled{3}$$



2. 磁界が導線に対して θ 傾いている場合（荷電粒子の速度の向きと磁界が θ の角をなすとき）

$$F = qvB\sin\theta$$



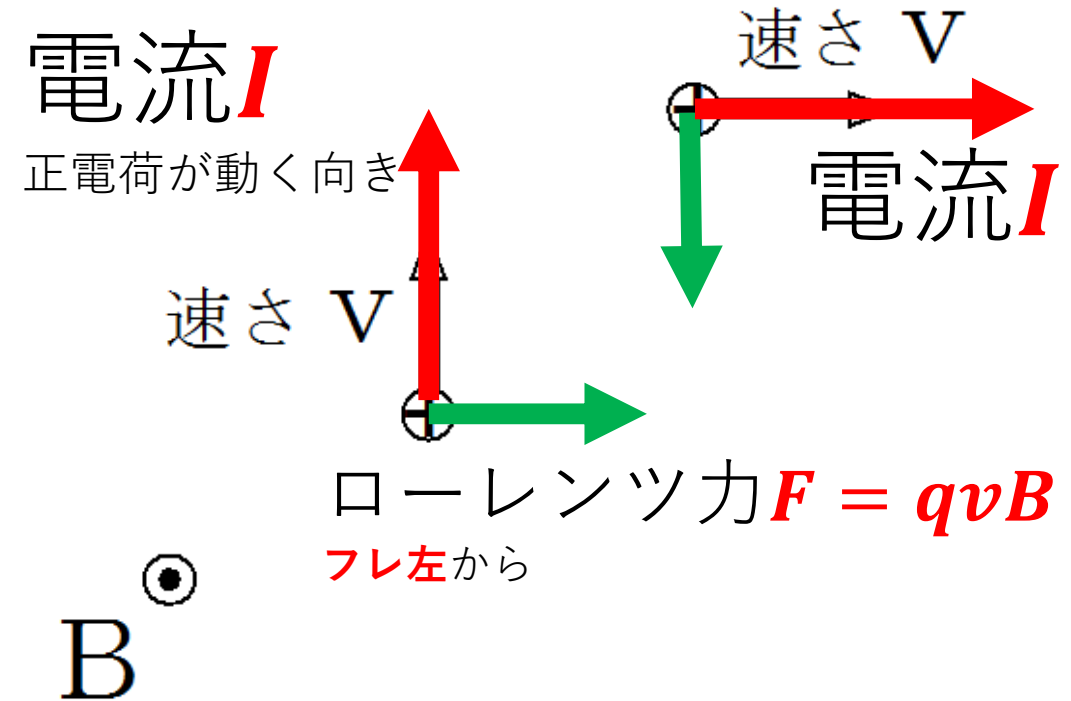
3. 一様な磁束密度 B 中の荷電粒子の運動

v を用いた運動方程式 $qvB = m \frac{v^2}{r}$ より

$$r = \frac{mv}{qB}$$

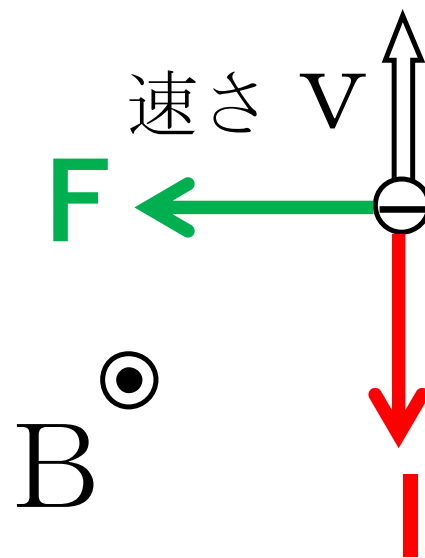
また、周期 $T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{qB}$ となる。

周期 T は、粒子の速さ v や半径 r によらず一定であることがわかる。



(参考)

負電荷の場合は、運動方向と逆向きの電流と考える



磁束密度 B

電流 I
速さ v

v'



ローレンツ力

$$F = qvB$$

磁極の正負と
電荷の正負は、
直接相互作用をしない

電荷が動いている場合
(電流) の場合だけ、
力がはたらく

横から
見た図

磁束密度 B

S 極 (-)



N 極 (+)



ローレンツ力



§ 8 電磁誘導とレンツの法則

1. **電磁誘導**：コイル内の磁場を変化させると、コイルに電流が発生する。この現象を電磁誘導という。

誘導起電力：電磁誘導によりコイルに発生する起電力

誘導電流：電磁誘導によりコイルに発生する電流

2. 磁束と磁束密度

磁束密度の向きをつなげて滑らかにつなげた線を磁束線という。
磁束密度が B であるとき、この磁束線が、単位面積に垂直に貫く本数は、 B 本と決める。

磁束線の総数を磁束という。

磁束 Φ （ファイ）：単位[Wb]ウェーバ

一様な磁束密度 B 中の面積 S [m^2] に垂直に貫く磁束 Φ は、

$$\Phi = \textcolor{red}{BS}$$

このことから、磁束密度の単位は、 $[\text{T}] = [\text{Wb} / \text{m}^2]$ とも書ける。

発電を説明する法則は2つ。

①誘導電流の向きを説明

レンツの法則

②誘導電流の大きさを説明

ファラデーの電磁誘導の法則

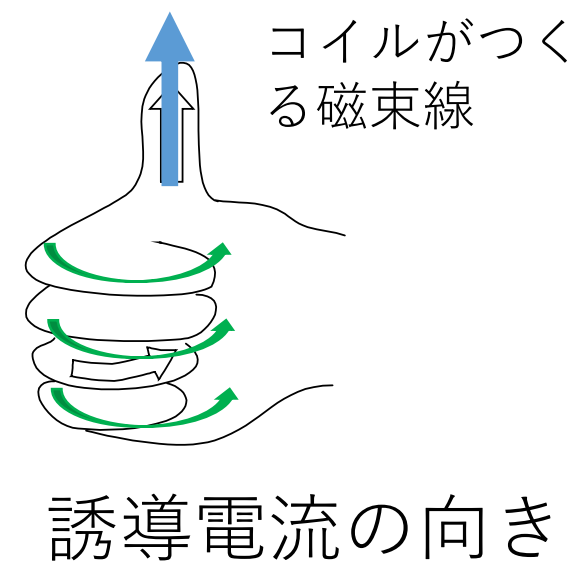
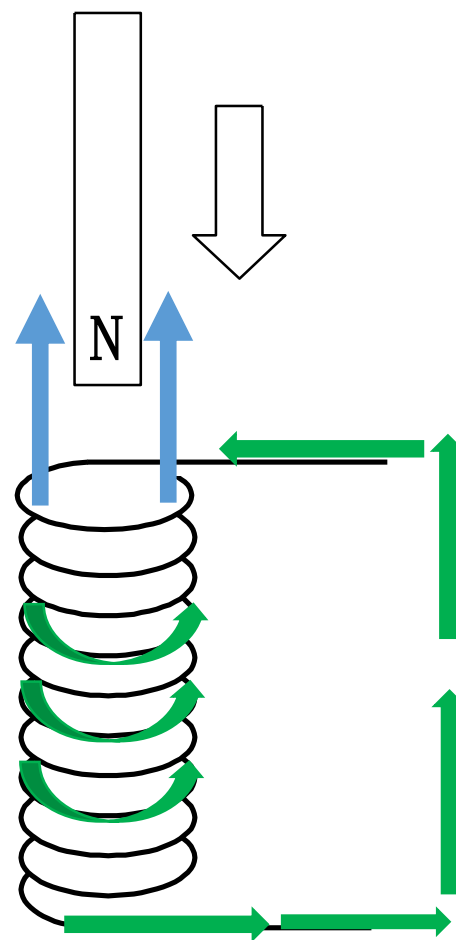
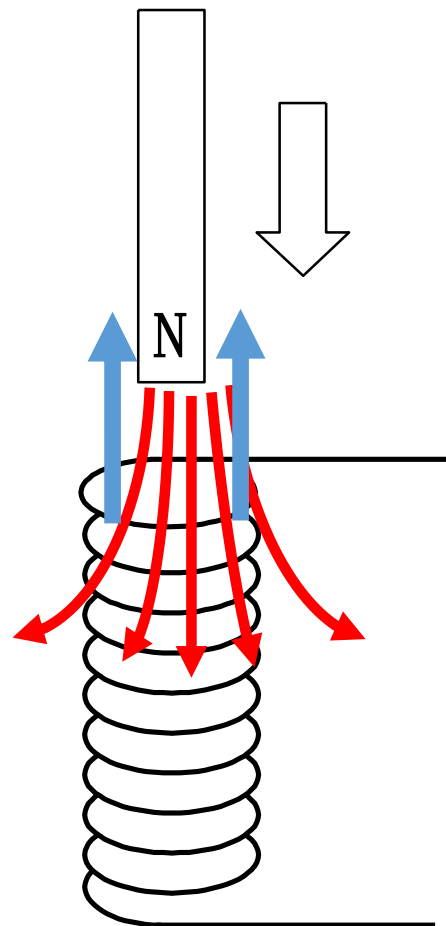
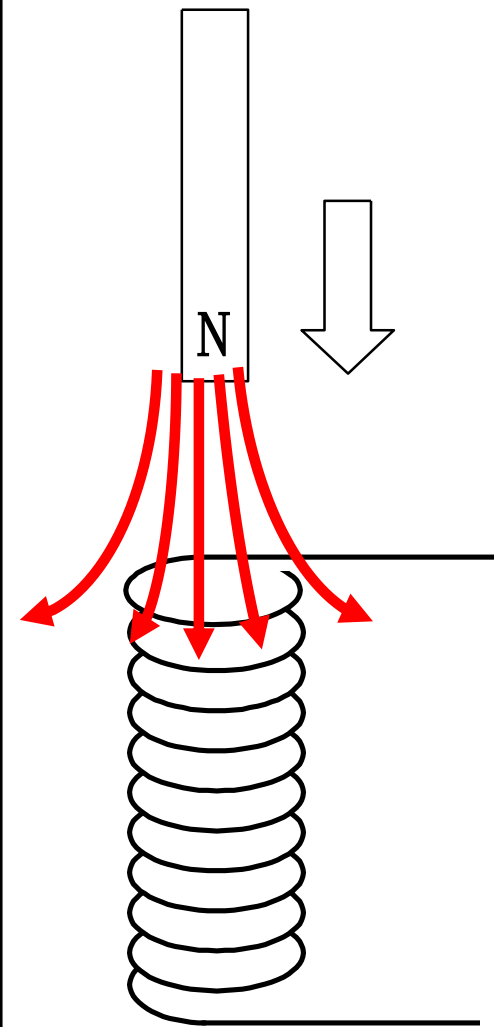
◎誘導電流の向きを決める法則

レンツの法則

誘導電流は、
コイルを貫く **磁束の変化を妨げる向き**
に流れる。

赤：磁石の磁束線

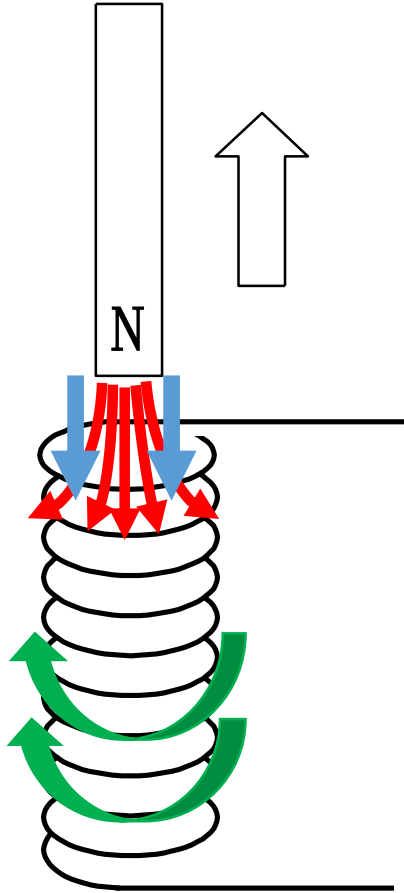
青：コイルの誘導電流が
つくる磁束線



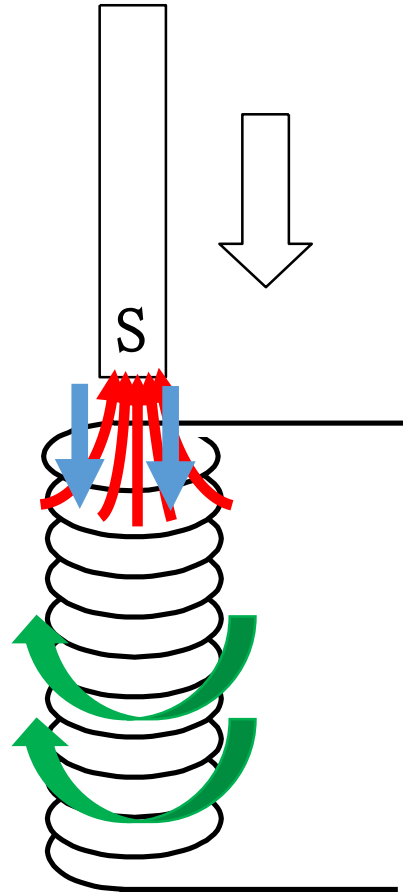
練習問題

コイルに流れる誘導電流の向きを決めなさい。

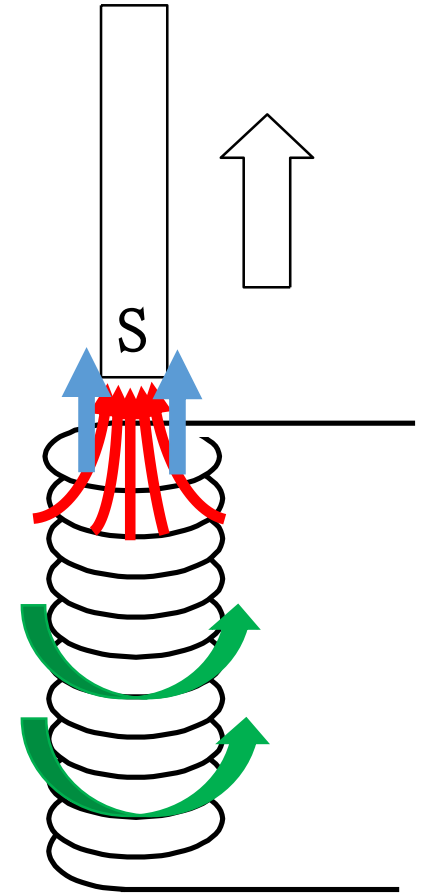
①



②



③



§ 9 ファラデーの法則

1. ファラデーの法則

誘導起電力の大きさは、コイルを貫く磁束の単位時間あたりの変化に比例する。

2. 誘導起電力の大きさ

1 巻きコイルに発生する誘導起電力の大きさを V 、時間 Δt 内の磁束の変化を $\Delta \Phi$ とするとき、誘導起電力の大きさは、

$$|V| = \left| \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \right| \quad \left(V = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \right)$$

n 巻きコイルでは、誘導起電力の大きさは、 n 倍になるので、

$$|V| = n \left| \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \right| \quad \left(V = -n \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \right)$$

練習 断面積 $S [\text{m}^2]$ の N 回巻きのコイルに $R [\Omega]$ の抵抗をつなぎ、コイルの面と垂直に一様な磁界をかける。磁束や起電力の向きは、図1のように約束する。

(1) 磁界の磁束密度を $B [\text{T}]$ とする。コイルの1巻きを貫いている磁束はいくらか。

$$\Phi = BS$$

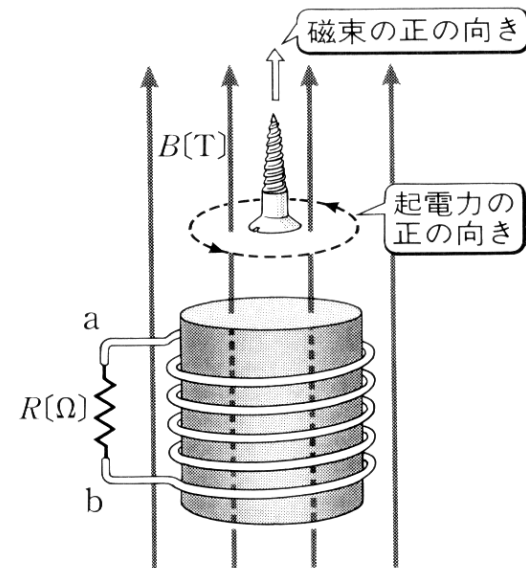


図1

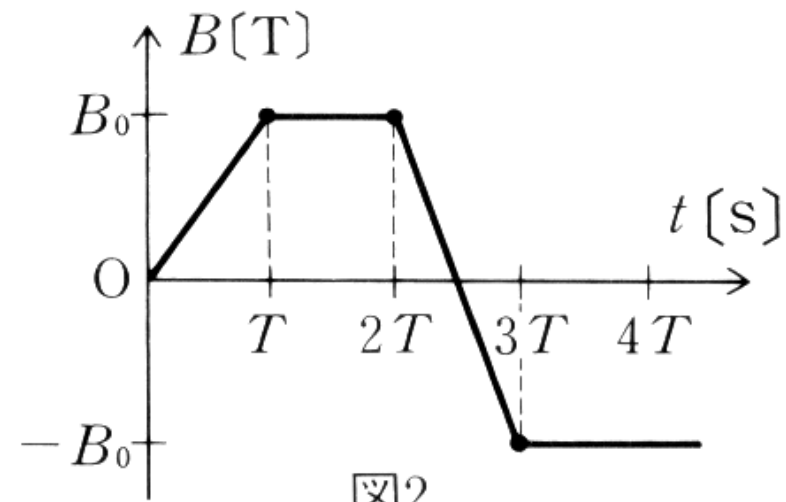


図2

(2) 磁束密度 B を図 2 のように変化した。電流が抵抗を a から b の向きに流れるのはどの時刻か。また、そのときの電流の強さを表しなさい。ただし、巻き線の抵抗は無視できるものとする。

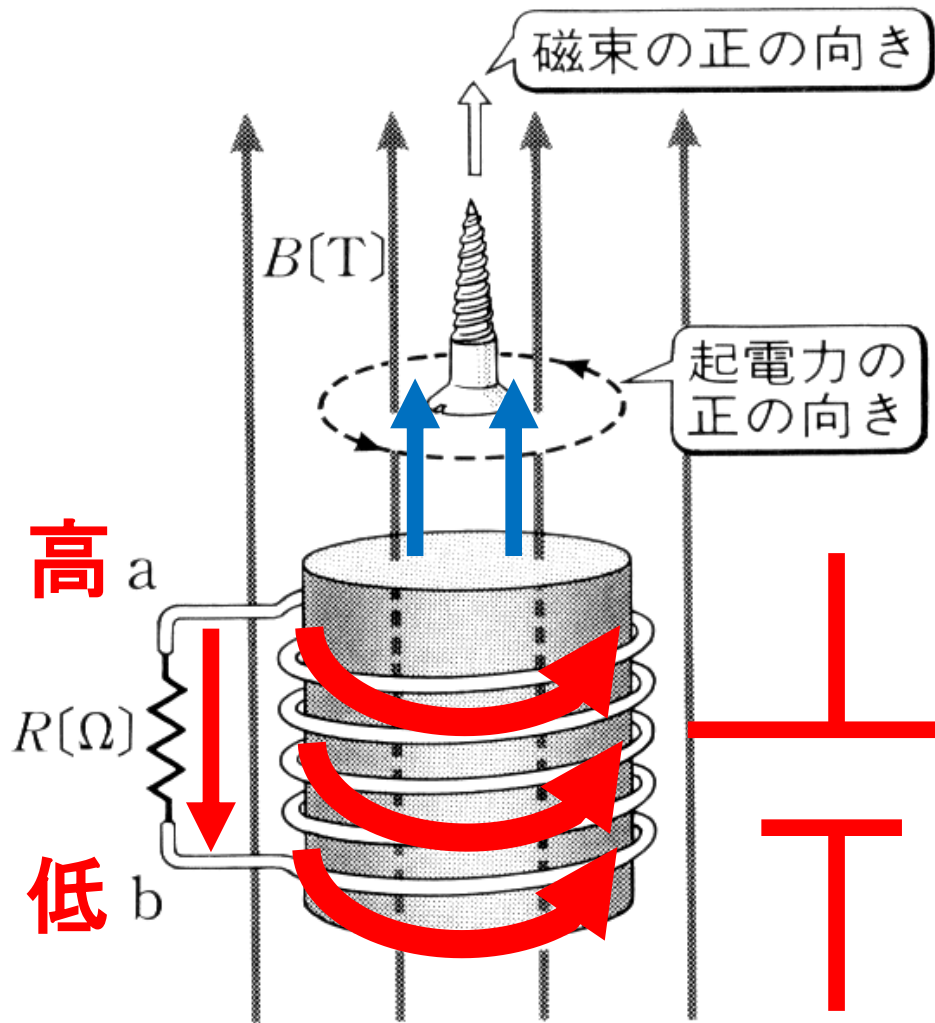


図1

磁束の変化 誘導起電力

$0 \sim T$	増	負 (減らす向き)
$T \sim 2T$	無	無
$2T \sim 3T$	減	正 (増やす向き)
$3T \sim 4T$	無	無

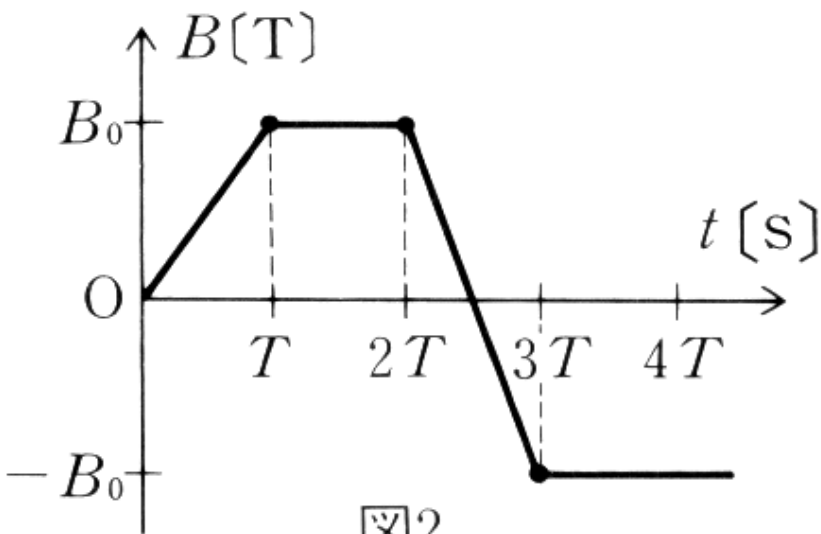


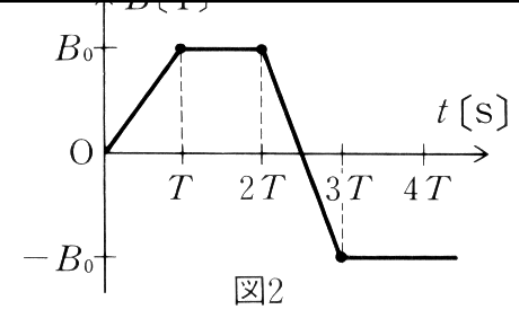
図2

ファラデーの法則より

$$\begin{aligned} |V| &= N \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right| \\ &= N \left| \frac{\Delta(BS)}{\Delta t} \right| = NS \left| \frac{\Delta B}{\Delta t} \right| \\ &= NS \left| \frac{-B_0 - B_0}{3T - 2T} \right| = \frac{2NB_0S}{T} \end{aligned}$$

オームの法則より

$$|V| = RI \rightarrow I = \frac{2NB_0S}{RT}$$



①磁束密度 B が変化する

$$|V| = \left| \frac{\Delta B}{\Delta t} \right| S$$

②面積 S が変化する問題

$$|V| = B \left| \frac{\Delta S}{\Delta t} \right|$$

(3) 磁束密度 B を図 2 のように変化させたとき、時刻 $T/2$ の、 a 端と b 端の電位は、どちらがどれだけ高いか。

0 ～ T の磁束密度の変化は一定だから、誘導起電力も一定

$$|V| = NS \left| \frac{\Delta B}{\Delta t} \right| = NS \left| \frac{B_0 - 0}{T - 0} \right| = \frac{NB_0S}{T}$$

磁束の変化 誘導起電力

0 ～ T : 増 負 (減らす向き)

b が $\frac{NB_0S}{T} [V]$ 高い

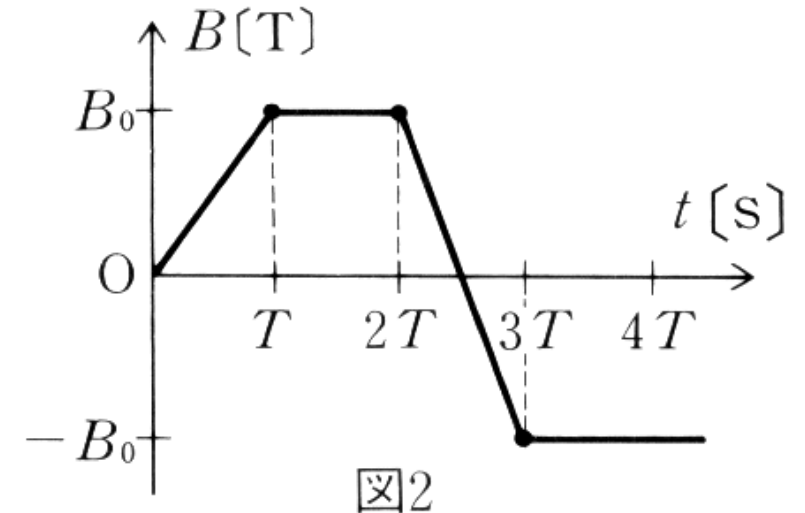
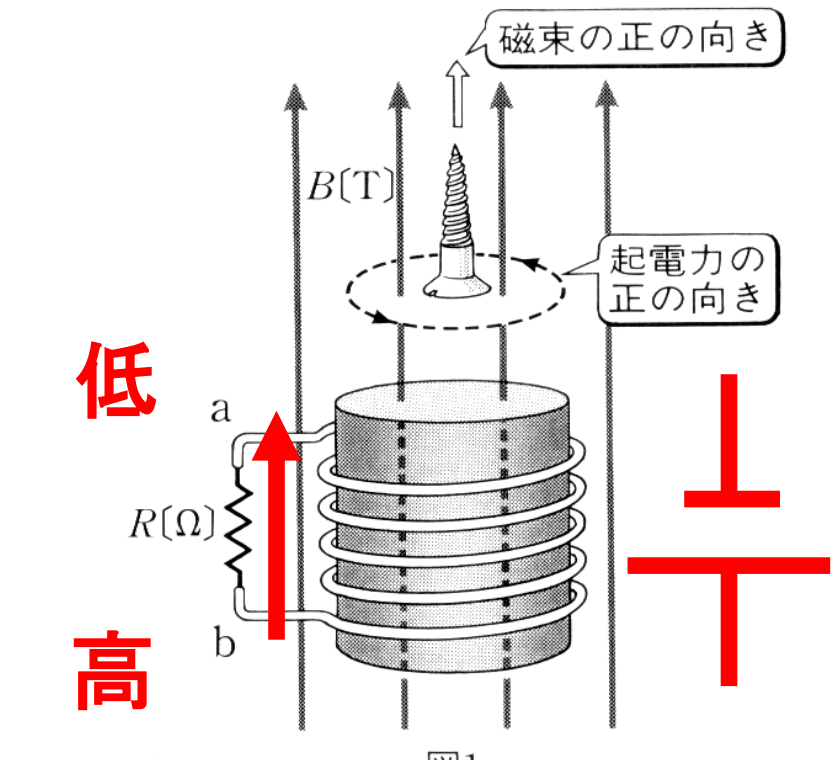


図2