第 102 講 磁場中の電流が受ける力

この講でできるようになること

- 電流と磁場の向きから、導線が受ける磁力の向きを判断できる。
- 磁場と電流のなす角、磁場内の導線の長さを確認し、磁力の大きさを計算できる。
- 2 本の平行な導線に電流を流したとき、引力・斥力の違いと力の大きさを説明できる。

1. 磁場の中に電流を流すと何が起こるか

磁石の間に導線を置き、その導線に電流を流すと、導線が横向きに押されることがある。電流の向きを逆にすると、押される向きも逆になる。

これは、磁場の中を流れる電流が力を受けるためである。

第 101 講では、電流が周囲に磁場をつくることを学んだ。今回は、その磁場が別の電流に力を及ぼすことを考える。

まずは、磁場の中に置かれた 1 本のまっすぐな導線を調べる。

電流・磁場・力の 3 つの向き

使用する物理量を次のように定める。

記号	物理量	単位
I	電流の大きさ	A（アンペア）
B	磁束密度の大きさ	T（テスラ）
F	導線が受ける磁力の大きさ	N（ニュートン）
l	磁場内にある直線導線の長さ	m（メートル）

磁束密度Bは、磁場の向きと強さを表す量である。磁場の向きは、磁場を表す矢印の向きで判断する。

ここでいう電流の向きは、**正の電荷が流れると約束した向き**である。金属中の電子は負の電荷をもつため、電子の移動方向は電流の向きと逆になる。

また、力を求めるときのBは、**その導線に外部から加わる磁場**である。導線自身がつくる磁場を、同じ導線への力を求める式に代入してはならない。

紙面に垂直な向きの表し方

紙面の上で左右・上下の向きは矢印で表せる。しかし、紙面の手前や奥に向かう向きもある。

本講では、紙面を正面から見て、次の記号を使う。

- **⊙：紙面の奥から観察者のいる手前へ向かう向き**
- **⊗：観察者のいる手前から紙面の奥へ向かう向き**

これらは矢印を正面または後ろから見た表現である。電流にも力にも使えるため、何の向きを表しているかは周囲の文字で判断する必要がある。

©ミライコーチング

磁力の向きを決める

一様な外部磁場Bが右向きで、まっすぐな導線に上向きの電流Iが流れる場合を考える。一様な磁場とは、ここでは磁場の向きと強さがどの位置でも同じ磁場のことである。



図 1　I は上、外部磁場 B は右、力 F は紙面奥。中央の⊗は F の方向記号。

この図では、Iは上向き、Bは右向きである。中央の⊗は導線が受ける**磁力Fが紙面の奥向き**であることを示す。電流の断面を示す記号ではない。

また、図中のI、B、Fは異なる物理量であり、矢印の長さを直接比較して大きさを判断するものではない。

磁力の向きは、**フレミングの左手の法則**で決められる。

左手の 3 本の指を互いに垂直になるように広げ、次のように対応させる。

左手の指	表す向き
人差し指	磁場B
中指	電流I
親指	磁力F

今回の配置では、人差し指を右、中指を上に向けると、親指は紙面の奥を向く。

したがって、磁力は紙面の奥向きである。

磁力の向きで確認すること

電流と磁場が垂直な場合、磁力はその両方に垂直な向きに働く。

向きを調べるときは、まず電流Iと外部磁場Bを区別してから、左手の法則を当てはめる。第 101 講で電流がつくる磁場の向きを求めた右手の法則とは、使う目的が異なる。

磁力の大きさ

電流の向きと一様な磁場の向きが垂直なとき、磁場内の直線導線が受ける力の大きさは、次の式で表される。

磁場に垂直な電流が受ける磁力

$$F = BIl$$

- F：導線が受ける磁力の大きさ [N]
- B：外部磁場の磁束密度の大きさ [T]
- I：電流の大きさ [A]
- l：磁場内にある直線導線の長さ [m]

この式は、電流と磁場が垂直で、一様な磁場内に直線導線がある場合に使用する。

この式から、ほかの条件が同じなら、B、I、lのいずれかを 2 倍にすると磁力の大きさも 2 倍になると分かる。

ただし、式が与えるのは力の**大きさ**である。向きは別に判断する。

例題 1

一様な外部磁場の磁束密度が0.20 Tである領域に、直線導線を置く。

磁場内の導線の長さは0.40 m、流れる電流の大きさは3.0 Aである。

電流は紙面の上向き、外部磁場は紙面の右向きで、互いに垂直である。

次の問いに答えよ。

例題 1(1) 導線が受ける磁力の大きさと向きを求めよ。

例題 1(2) 磁場はそのままで、電流だけを逆向きにしたときの磁力の大きさと向きを求めよ。

例題 1(3) 電流は最初の向きに戻し、磁場だけを逆向きにしたときの磁力の大きさと向きを求めよ。

例題 1(4) 最初の状態から、電流と磁場を両方とも逆向きにしたときの磁力の大きさと向きを求めよ。

©ミライコーチング

解答・解説

例題 1(1)の解答・解説 磁力は0.24 N、紙面の奥向きである。

まず、電流は上向き、磁場は右向きなので、左手の法則から力は紙面の奥向きとなる。

電流と磁場は垂直であるため、$F = BIl$を使用する。

$$F = (0.20\,\mathrm{T})(3.0\,\mathrm{A})(0.40\,\mathrm{m})$$
$$= 0.24\,\mathrm{N}$$

B、I、lはすべて正の大きさであり、結果も正の力の大きさとなっている。

例題 1(2)の解答・解説 磁力は0.24 N、紙面の手前向きである。

電流だけを上向きから下向きに変えると、左手の法則で磁力の向きが反転する。B、I、lの大きさは変わらないので、力の大きさは同じである。

例題 1(3)の解答・解説 磁力は0.24 N、紙面の手前向きである。

電流は上向きのまま、磁場だけを右向きから左向きに変える。この場合も磁力の向きは反転する。

例題 1(4)の解答・解説 磁力は0.24 N、紙面の奥向きである。

電流と磁場を両方とも反転すると、力の向きは最初の向きに戻る。電流と磁場の大きさは変わらないので、力の大きさも変わらない。

片方だけを反転すると磁力は逆向きになるが、両方を反転すると最初と同じ向きになる。

なお、電流$I = 0\,\mathrm{A}$なら$F = 0\,\mathrm{N}$であり、外部磁場$B = 0\,\mathrm{T}$でも$F = 0\,\mathrm{N}$となる。

力が 0 のとき、磁力の向きは定まらない。 手前や奥などの向きを無理に与えてはならない。

2. 電流と磁場が斜めの場合

これまでは、電流と磁場が垂直な場合を考えた。

それでは、導線を傾けて、電流と磁場の向きが斜めに交わるようにした場合はどうなるだろうか。

このとき、磁場の向きと平行な成分は磁力に寄与しない。磁場に垂直な成分だけが寄与する。

電流の向きを 2 つの成分に分ける

磁場Bが右向き、電流Iが右上向きの場合を考える。

電流と磁場の方向のなす角をθとする。θは、両方向を同じ始点から考えたときの0°以上180°以下の角である。

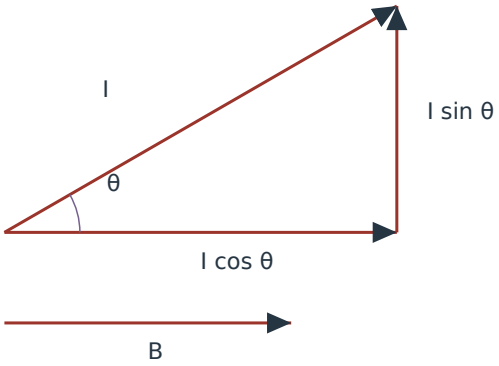

図 2　電流方向を B に平行・垂直に分ける。上向き I sin θ のみが力に寄与する。

図の斜めの矢印Iを、磁場に平行な方向と垂直な方向に分けて考える。

この図では、平行成分が$I\cos\theta$、垂直成分が$I\sin\theta$である。

これは向きと大きさを計算するための**成分分解**であり、電流が途中で 2 本の導線へ分かれるという意味ではない。

また、図は方向を理解するための模式図であり、矢印の長さや角度を実測して計算に使用するものではない。

なぜ$\sin\theta$を使うのか

直角三角形で、ある鋭角θに対する正弦（サイン）は、

$$\sin\theta = \frac{\text{角}\theta\text{ の向かい側の辺の長さ}}{\text{斜辺の長さ}}$$

という比で表される。

斜辺に相当する電流の大きさをIとすれば、磁場に垂直な成分の大きさは$I\sin\theta$となる。

特に、次の値を使う。

$$\sin 30^\circ = \frac{1}{2}, \qquad \sin 90^\circ = 1$$

角度が0°なら電流と磁場は同じ向きであり、180°なら逆向きに平行である。このどちらの場合も、磁場に垂直な成分は 0 になる。

斜めの場合の磁力の式

磁場内に長さlの直線導線があり、一様な外部磁場と電流の方向のなす角がθである場合、磁力の大きさは次のようになる。

磁場中の直線導線が受ける磁力

$$F = BIl\sin\theta$$

- θ：電流の方向と外部磁場の方向のなす角
- $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$
- B、I、lはそれぞれ 0 以上の大きさ

磁場に垂直な成分だけが力の大きさに寄与する。

$\theta = 90^\circ$では$\sin 90^\circ = 1$となり、$F = BIl$に一致する。

角度による違いを整理すると、次のようになる。

θ	電流と磁場の関係	$\sin\theta$	磁力の大きさ
0°	同じ向きに平行	0	0
30°	斜め	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}BIl$
90°	垂直	1	BIl
180°	逆向きに平行	0	0

B、I、lを固定した場合、磁力は電流と磁場が垂直なときに最大となる。

0°と180°では磁力は 0 となり、その力の向きも定まらない。

なお、上の成分図は鋭角の場合を表したものである。180°では電流が磁場と逆向きに平行になるので、垂直成分は存在しない。鋭角の成分図をそのまま当てはめるのではなく、両方向の関係から判断する。

斜めの場合に磁力の向きを求めるときも、電流の磁場に垂直な成分と磁場の向きを使う。

例えば、電流が右上向き、磁場が右向きなら、寄与する電流成分は上向きである。したがって磁力は紙面の奥向きとなる。

例題 2

一様な外部磁場の磁束密度が0.40 Tである領域に、長さ0.50 mの直線導線がすべて入っている。

導線には2.0 Aの電流が流れており、電流と磁場の方向のなす角は30°である。

次の問いに答えよ。

例題 2(1) 導線が受ける磁力の大きさを求めよ。

例題 2(2) (1)の状態から、磁場・長さ・角度は変えずに電流の大きさだけを 2 倍にした。磁力の大きさを求めよ。

例題 2(3) (1)の状態に戻し、磁場・電流・角度は変えずに、磁場内の導線の長さだけを半分にした。磁力の大きさを求めよ。

©ミライコーチング

解答・解説

例題 2(1)の解答・解説 磁力の大きさは0.20 Nである。

電流と磁場のなす角は30°なので、垂直成分の割合は$\sin 30^\circ = \frac{1}{2}$である。

$$\begin{aligned} F &= BIl\sin 30^\circ \\ &= (0.40\,\mathrm{T})(2.0\,\mathrm{A})(0.50\,\mathrm{m}) \times \frac{1}{2} \\ &= 0.20\,\mathrm{N} \end{aligned}$$

角度が90°なら0.40 Nとなる条件なので、30°でその半分になる結果は妥当である。

例題 2(2)の解答・解説 磁力の大きさは0.40 Nである。

電流のみが4.0 Aへ増加したため、

$$\begin{aligned} F &= (0.40\,\mathrm{T})(4.0\,\mathrm{A})(0.50\,\mathrm{m}) \times \frac{1}{2} \\ &= 0.40\,\mathrm{N} \end{aligned}$$

となる。電流が 2 倍で、ほかの条件が一定なので、磁力も 2 倍になる。

例題 2(3)の解答・解説 磁力の大きさは0.10 Nである。

磁場内の長さだけが0.25 mになったので、

$$\begin{aligned} F &= (0.40\,\mathrm{T})(2.0\,\mathrm{A})(0.25\,\mathrm{m}) \times \frac{1}{2} \\ &= 0.10\,\mathrm{N} \end{aligned}$$

となる。長さが半分なので、力も半分になる。

比べるときは固定した条件を確認する

$F = BIl\sin\theta$で、例えば電流を 2 倍にしたとき、ほかの条件が変わらなければ力も 2 倍になる。

しかし、電流と同時に角度や磁場内の長さも変われば、力が必ず 2 倍になるとは限らない。変えた量と固定した量を分けて考えることが重要である。

3. 導線の長さはどこを使うのか

磁場の中にある直線導線が受ける力は$F = BIl\sin\theta$で求められるが、ここでのlには注意が必要である。

導線全体が磁場内に入っているとは限らない。

例えば、導線全長が0.80 mであっても、一様な磁場が存在する領域内の直線部分が0.10 mだけなら、その磁場による力の計算では$l = 0.10\,\mathrm{m}$を使用する。

磁場の外では磁束密度が 0 であると仮定しているため、その部分は磁力の計算に寄与しない。

例題 3

全長0.80 mのまっすぐな導線に、4.0 Aの電流を流す。

そのうち長さ0.10 mの部分だけが、磁束密度0.50 Tの一様な外部磁場内に入っている。磁場外では磁束密度を 0 とする。

電流と磁場は垂直である。

例題 3(1) 導線が受ける磁力の大きさを求めよ。

例題 3(2) $l = 0.80\,\mathrm{m}$として計算した答えが正しくない理由を説明せよ。

解答・解説

例題 3(1)の解答・解説 磁力の大きさは0.20 Nである。

導線の全長と、磁場内にある部分の長さを区別する。

部分	長さ	外部磁束密度
磁場内の直線部分	$0.10\,\mathrm{m}$	$0.50\,\mathrm{T}$
磁場外の部分	$0.70\,\mathrm{m}$	$0\,\mathrm{T}$

磁場内の部分に対して、

$$\begin{aligned} F &= BIl \\ &= (0.50\,\mathrm{T})(4.0\,\mathrm{A})(0.10\,\mathrm{m}) \\ &= 0.20\,\mathrm{N} \end{aligned}$$

となる。

例題 3(2)の解答・解説 磁場が存在しない部分まで、磁束密度0.50 Tの磁場を受けるものとして計算しているため、誤りである。

全長をそのまま使うと、

$$\begin{aligned} F_{\mathrm{wrong}} &= (0.50\,\mathrm{T})(4.0\,\mathrm{A})(0.80\,\mathrm{m}) \\ &= 1.60\,\mathrm{N} \end{aligned}$$

となるが、これは与えられた磁場の範囲と一致していない。

磁場外では$B = 0\,\mathrm{T}$なので、その部分に働く磁力は 0 である。

式の文字に数値を代入する前に、「何を対象とする長さなのか」を確認する必要がある。

4. 2 本の平行な導線にはどんな力が働くか

ここまでは、外から与えられた磁場の中にある 1 本の導線を考えた。

次は、電流が流れる直線導線を 2 本並べる。

第 101 講で学んだように、電流が流れる導線の周囲には磁場ができる。したがって、2 本の導線を近づけると、一方がつくった磁場がもう一方の導線に力を及ぼす。

ここで重要なのは、**磁場をつくる電流と、力を受ける電流を区別すること**である。

以下では 2 本の導線を十分長い直線導線とし、互いに平行で、一定の距離$d > 0$だけ離れているものとする。

また、真空中、または空気を真空と近似できる場合を扱い、導線の端や接続部分の影響は無視できるものとする。磁力は、両導線について同じ長さlの部分で比較する。

同じ向きの平行電流

紙面に垂直な 2 本の導線を、左に導線 1、右に導線 2 として配置する。

両方に、紙面の奥から手前へ向かう電流を流す。紙面を正面から見て、どちらの電流も⊙で表される。

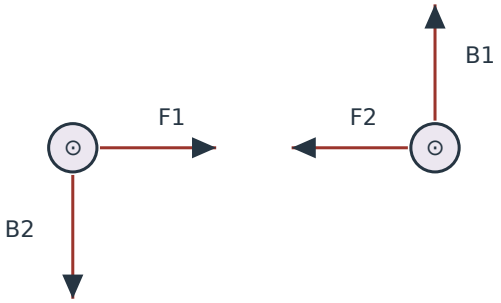

図 3　同方向電流は引き合う。左右の電流 I1 と I2 はともに⊙。B2 は右導線が左に、B1 は左導線が右につくる磁場。

図の小円は、それぞれ導線を断面から見たものである。円の中心の⊙は電流の向きであり、磁力の向きではない。

左の導線 1 がつくる磁場をB_1、右の導線 2 がつくる磁場をB_2とする。

- 導線 1 の電流I_1は紙面手前向きであり、右側にある導線 2 の位置ではB_1は上向きとなる。
- 導線 2 の電流I_2も紙面手前向きであり、左側にある導線 1 の位置ではB_2は下向きとなる。

磁場の向きは、第 101 講で扱った直線電流の周囲の磁場と右手の法則から判断できる。

ここから、それぞれの導線が受ける力を調べる。

導線 1 が受ける力F_1

導線 1 の電流I_1は紙面手前向きであり、導線 2 がつくる磁場B_2は下向きである。

フレミングの左手の法則より、導線 1 が受ける力F_1は右向きとなる。

導線 2 が受ける力F_2

導線 2 の電流I_2は紙面手前向きであり、導線 1 がつくる磁場B_1は上向きである。

したがって、導線 2 が受ける力F_2は左向きとなる。

2 本の導線は互いに近づく向きに力を受ける。

つまり、**同じ向きに流れる平行電流の間には引力が働く**。

平行電流の間に働く力の大きさ

第 101 講では、十分長い直線導線が、距離dだけ離れた位置につくる磁束密度の大きさを学んだ。

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi d}$$

ここでμ_0は真空の透磁率であり、高校物理の計算では次の近似値を用いる。

$$\mu_0 \approx 4\pi \times 10^{-7}\,\mathrm{T\,m/A}$$

導線 1 に流れる電流の大きさをI_1、導線 2 に流れる電流の大きさをI_2とする。

導線 1 が導線 2 の位置につくる磁束密度の大きさは、

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi d}$$

である。

導線 2 が受ける力を求めるには、**導線 2 の電流I_2と、導線 1 がつくる磁場B_1**を使用する。

磁場は導線の電流方向に垂直なので、比較する長さlに働く力の大きさは、

$$\begin{aligned} F_2 &= B_1 I_2 l \\ &= \frac{\mu_0 I_1}{2\pi d} I_2 l \\ &= \frac{\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi d} \end{aligned}$$

となる。

同様に、導線 1 が受ける力の大きさは、

$$\begin{aligned} F_1 &= B_2 I_1 l \\ &= \frac{\mu_0 I_2}{2\pi d} I_1 l \\ &= \frac{\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi d} \end{aligned}$$

となる。

したがって、同じ長さlの部分について、両導線が受ける力の大きさは等しい。

平行電流の間に働く単位長さあたりの力

$$\frac{F}{l} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d}$$

- I_1、I_2：2 本の導線に流れる電流の大きさ [A]
- d：導線間の距離 [m]
- μ_0：真空の透磁率
- $\frac{F}{l}$：導線の単位長さあたりに働く磁力の大きさ [N/m]

同じ比較長lに働く力は、

$$F = \frac{\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi d}$$

である。

十分長い平行直線導線について、端や接続部分の影響を無視できる場合に用いる。

$\frac{F}{l}$の単位はN/mであり、磁束密度Bの単位Tとは異なる。

この式から、ほかの条件が同じなら、電流の大きさが増すと力は大きくなり、導線間の距離が増すと力は小さくなると分かる。

また、I_1とI_2が異なる場合でも、**同じ長さに働く互いの力の大きさは等しい**。

例題 4

真空中に、十分長い 2 本の平行な直線導線がある。

紙面に垂直な 2 本の導線を正面から見て、左を導線 1、右を導線 2 とする。

導線 1 には3.0 A、導線 2 には5.0 Aの電流が流れ、どちらも紙面手前向きである。

導線間の距離は0.10 mであり、両導線について長さ0.40 mの部分に働く力を考える。

真空の透磁率は$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\ \mathrm{T\,m/A}$として計算せよ。端や接続部分の影響は無視できるものとする。

例題 4(1) 導線 1 が導線 2 の位置につくる磁束密度B_1の大きさと向きを求めよ。

例題 4(2) 導線 2 が導線 1 の位置につくる磁束密度B_2の大きさと向きを求めよ。

例題 4(3) 各導線が受ける磁力の向きを求め、引力と斥力のどちらが働くか答えよ。

例題 4(4) 単位長さあたりの磁力の大きさと、それぞれの導線の長さ0.40 mに働く力の大きさを求めよ。

解答・解説

例題 4(1)の解答・解説 $B_1 = 6.0 \times 10^{-6}\ \mathrm{T}$、上向きである。

導線 1 の電流は紙面手前向きである。右手の法則から、導線 1 の右側にある導線 2 の位置では、磁場は上向きとなる。

$$\begin{aligned} B_1 &= \frac{\mu_0 I_1}{2\pi d} \\ &= \frac{(4\pi \times 10^{-7}\,\mathrm{T\,m/A})(3.0\,\mathrm{A})}{2\pi(0.10\,\mathrm{m})} \\ &= 6.0 \times 10^{-6}\,\mathrm{T} \end{aligned}$$

例題 4(2)の解答・解説 $B_2 = 1.0 \times 10^{-5}\,\mathrm{T}$、下向きである。

導線 2 も紙面手前向きの電流である。その左側にある導線 1 の位置では、磁場は下向きとなる。

$$\begin{aligned} B_2 &= \frac{\mu_0 I_2}{2\pi d} \\ &= \frac{(4\pi \times 10^{-7}\,\mathrm{T\,m/A})(5.0\,\mathrm{A})}{2\pi(0.10\,\mathrm{m})} \\ &= 1.0 \times 10^{-5}\,\mathrm{T} \end{aligned}$$

例題 4(3)の解答・解説 導線 1 は右向き、導線 2 は左向きに力を受け、互いに引き合う。

導線 1 の電流は紙面手前向きで、外部磁場として受けるB_2は下向きである。左手の法則より、F_1は右向きとなる。

一方、導線 2 の電流は紙面手前向きで、受けるB_1は上向きである。したがって、F_2は左向きとなる。

例題 4(4)の解答・解説 単位長さあたりの力は$3.0 \times 10^{-5}\,\mathrm{N/m}$、各導線の長さ$0.40\,\mathrm{m}$に働く力は$1.2 \times 10^{-5}\,\mathrm{N}$である。

まず、単位長さあたりの力を求める。

$$\begin{aligned} \frac{F}{l} &= \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d} \\ &= \frac{(4\pi \times 10^{-7}\,\mathrm{T\,m/A})(3.0\,\mathrm{A})(5.0\,\mathrm{A})}{2\pi(0.10\,\mathrm{m})} \\ &= 3.0 \times 10^{-5}\,\mathrm{N/m} \end{aligned}$$

比較する長さは$0.40\,\mathrm{m}$なので、

$$\begin{aligned} F &= (3.0 \times 10^{-5}\,\mathrm{N/m})(0.40\,\mathrm{m}) \\ &= 1.2 \times 10^{-5}\,\mathrm{N} \end{aligned}$$

となる。

それぞれの導線について、相手がつくる磁場を使って確かめると、

$$
\begin{aligned}
F_1 &= B_2 I_1 l \\
&= (1.0 \times 10^{-5}\,\mathrm{T})(3.0\,\mathrm{A})(0.40\,\mathrm{m}) \\
&= 1.2 \times 10^{-5}\,\mathrm{N} \\
F_2 &= B_1 I_2 l \\
&= (6.0 \times 10^{-6}\,\mathrm{T})(5.0\,\mathrm{A})(0.40\,\mathrm{m}) \\
&= 1.2 \times 10^{-5}\,\mathrm{N}
\end{aligned}
$$

となり、同じ大きさになる。

B_1とB_2は異なる大きさだが、力の計算ではそれぞれ相手側の電流を掛けるため、結果は等しくなる。

逆向きの平行電流

次に、導線 1 の電流は紙面手前向きのまま、右側の導線 2 の電流だけを紙面奥向きに変える。

紙面を正面から見て、左の電流I_1は⊙、右の電流I_2は⊗で表される。



図 4　逆方向電流は反発。左 I1 は⊙、右 I2 は⊗。B2 は右導線が左に、B1 は左導線が右につくる磁場。

この図の小円中心の⊙と⊗は、それぞれの導線を流れる電流の方向である。F_1、F_2の矢印は、各導線が受ける磁力を表す。

右側の導線 2 の電流を逆向きにすると、導線 2 がつくる磁場B_2の向きも反転する。

- 導線 1 の位置でのB_2は上向きとなり、導線 1 が受けるF_1は左向きになる。
- 導線 2 の位置でのB_1は上向きのままだが、導線 2 自身の電流が逆向きになったので、F_2は右向きになる。

したがって、2 本の導線は互いに離れる向きに力を受ける。

つまり、**逆向きに流れる平行電流の間には斥力が働く**。

電流の大きさと距離をそのままにして向きだけを変えた場合、磁力の大きさは変わらない。

例題 5

例題 4 と同じく、十分長い 2 本の平行直線導線を考える。

最初は、左の導線 1 に3.0 A、右の導線 2 に5.0 Aの電流がともに紙面手前向きに流れている。導線間の距離は0.10 m、比較する長さは0.40 mである。

真空の透磁率を$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\,\mathrm{T\,m/A}$とし、導線端や接続部分の影響は無視できるものとする。

例題 5(1) 右側の導線 2 の電流だけを紙面奥向きに反転する。各導線が受ける磁力の向きと大きさを求めよ。

例題 5(2) (1)のとき、導線 1 がつくるB_1と導線 2 がつくるB_2は、最初の状態からそれぞれどう変わるか答えよ。

例題 5(3) 最初の同方向電流の状態に戻し、I_1と導線間の距離dを同時に 2 倍にする。I_2と比較する長さlは変えない。各導線が受ける磁力の向きと大きさを求めよ。

解答・解説

例題 5(1)の解答・解説 導線 1 は左向き、導線 2 は右向きで、それぞれ$1.2 \times 10^{-5}\,\mathrm{N}$の力を受ける。

右の電流だけを反転したので、2 本の電流は逆方向となり、斥力が働く。

電流の大きさ、導線間の距離、比較する長さは変わらない。したがって、力の大きさも変わらない。

$$F = 1.2 \times 10^{-5}\,\mathrm{N}$$

例題 5(2)の解答・解説 B_1は上向きのままで大きさも変わらず、B_2は下向きから上向きに反転し、大きさは変わらない。

導線 1 の電流I_1は変えていないため、導線 1 がつくる磁場B_1も変わらない。

一方、導線 2 の電流I_2だけを反転したため、導線 2 がつくる磁場B_2は逆向きになる。

各磁束密度の大きさはそれぞれ、

$$B_1 = 6.0 \times 10^{-6}\,\mathrm{T}, \qquad B_2 = 1.0 \times 10^{-5}\,\mathrm{T}$$

のままである。

例題 5(3)の解答・解説 導線 1 は右向き、導線 2 は左向きで、それぞれ$1.2 \times 10^{-5}\,\mathrm{N}$の力を受ける。

新しい条件は、

$$I_1' = 6.0\,\mathrm{A}, \qquad d' = 0.20\,\mathrm{m}$$

である。

$I_2 = 5.0\,\mathrm{A}$と$l = 0.40\,\mathrm{m}$は固定されている。

単位長さあたりの力は、

$$\begin{aligned}\frac{F'}{l} &= \frac{\mu_0 {I_1}' I_2}{2\pi d'} \\ &= \frac{(4\pi \times 10^{-7}\,\mathrm{T\,m/A})(6.0\,\mathrm{A})(5.0\,\mathrm{A})}{2\pi(0.20\,\mathrm{m})} \\ &= 3.0 \times 10^{-5}\,\mathrm{N/m}\end{aligned}$$

となる。

したがって、

$$\begin{aligned}F' &= (3.0 \times 10^{-5}\,\mathrm{N/m})(0.40\,\mathrm{m}) \\ &= 1.2 \times 10^{-5}\,\mathrm{N}\end{aligned}$$

である。

電流I_1が 2 倍になる効果と、導線間の距離dが 2 倍になる効果が打ち消し合っている。

実際、導線 1 が導線 2 の位置につくる磁場は、

$${B_1}' = 6.0 \times 10^{-6}\,\mathrm{T}$$

のままだが、導線 2 が導線 1 の位置につくる磁場は距離が 2 倍になったため、

$${B_2}' = 5.0 \times 10^{-6}\,\mathrm{T}$$

となる。

導線 1 側ではB_2が半分、I_1が 2 倍となるため、受ける力は変わらない。導線 2 側でもB_1が変わらないので、受ける力は同じである。

電流の向きは両方とも最初と同じであるため、引力のままとなる。

等しい大きさの力は打ち消し合うのか

平行な 2 本の導線は、同じ比較長について、大きさが等しく逆向きの力を受ける。

ここで、力が打ち消し合って両方とも動かない、と考えてはいけない。

F_1は**導線 1 に働く力**であり、F_2は**導線 2 に働く力**である。

2 つの力は別々の物体に働いている。1 本の導線に働く力を調べるとき、もう一方の導線に働く力を足して相殺することはできない。

このように、対象とする物体を分けて考えることは、力の問題全体で重要である。

また、どちらか一方の電流が 0 なら、2 本の導線の間に働くこの相互磁力も 0 となる。片方に電流があって磁場をつくっていても、もう片方に電流が流れていなければ、その磁場による電流への力は生じない。

2 本の導線では相手の磁場を見る

平行電流の問題では、次の対応を守る。

- 導線 1 の力F_1：導線 1 の電流I_1と、導線 2 がつくる磁場B_2
- 導線 2 の力F_2：導線 2 の電流I_2と、導線 1 がつくる磁場B_1

自分自身がつくる磁場を、自分が受ける力の式に代入しない。

同方向の平行電流は引力、逆方向の平行電流は斥力となる。

演習問題

ここからは、磁力の向きと大きさを自分で判断する。

計算問題では、与えられた電流・磁場・長さ・角度を確認してから式を選ぶこと。平行電流の問題では、磁場をつくる導線と力を受ける導線を区別すること。

各演習の解答・解説は、すべての問題の後にまとめてある。

演習 1

磁束密度$B = 0.20\,\mathrm{T}$の一様な外部磁場内に、長さ$l = 0.40\,\mathrm{m}$の直線導線がすべて入っている。

導線には、大きさ$I = 3.0\,\mathrm{A}$の電流が流れている。

磁場の向きは紙面の右向きとし、電流と磁場の方向のなす角θだけを変化させる。B、I、lの大きさは一定とする。

演習 1(1) $\theta = 0^\circ$、30°、90°、180°のそれぞれについて、磁力の大きさを求めよ。

演習 1(2) $\theta = 30^\circ$で、電流が紙面内の右上向きに流れる場合、磁力は紙面の手前・奥のどちらを向くか答えよ。

演習 1(3) $\theta = 90^\circ$で、電流が紙面の上向きに流れる場合、磁力は紙面の手前・奥のどちらを向くか答えよ。

演習 1(4) $\theta = 0^\circ$と$\theta = 180^\circ$の場合に、磁力の向きを指定できない理由を説明せよ。

解答・解説は末尾の「演習 1 の解答・解説」を参照。

演習 2

磁束密度0.15 Tの一様な外部磁場が紙面の右向きに存在する。

磁場内の直線導線の長さは0.60 m、流れる電流の大きさは2.0 Aで、最初は電流が紙面の下向きに流れている。電流と磁場は垂直である。

次の各場合について答えよ。変更の指示がない量は最初の状態のままとする。

演習 2(1) 最初の状態で、磁力の大きさと向きを求めよ。

演習 2(2) 電流の向きは変えず、磁場だけを逆向きにした場合の磁力の大きさと向きを求めよ。

演習 2(3) 最初の状態から、電流と磁場を両方とも逆向きにした場合の磁力の大きさと向きを求めよ。

演習 2(4) 電流を0 Aにした場合、磁力の大きさと向きを答えよ。

演習 2(5) 最初の状態から外部磁場だけを0 Tにした場合、磁力の大きさと向きを答えよ。

解答・解説は末尾の「演習 2 の解答・解説」を参照。

演習 3

一様な外部磁場の磁束密度が0.60 Tである領域に、長さ0.80 mの直線導線がすべて入っている。

導線には1.5 Aの電流が流れ、電流と磁場の方向のなす角は30°である。

次の各場合について、磁力の大きさを求めよ。

演習 3(1) 最初の状態での磁力の大きさを求めよ。

演習 3(2) 最初の状態から、電流だけを 2 倍にした場合の磁力の大きさを求めよ。

演習 3(3) 最初の状態から、磁場内の導線の長さだけを半分にした場合の磁力の大きさを求めよ。

演習 3(4) 最初の状態から、電流を 2 倍にし、磁場内の導線の長さを半分にした場合の磁力の大きさを求めよ。

いずれの場合も、磁束密度と角度は変えず、(2)〜(4)はそれぞれ最初の状態から独立に変更するものとする。

解答・解説は末尾の「演習 3 の解答・解説」を参照。

©ミライコーチング

演習 4

全長0.60 mのまっすぐな導線に、5.0 Aの電流を流す。

導線のうち0.20 mだけが磁束密度0.25 Tの一様な外部磁場内にあり、残りの部分では外部磁場は0 である。

電流と磁場の方向は垂直である。

演習 4(1) この導線が受ける磁力の大きさを求めよ。

演習 4(2) ある生徒は、導線全長0.60 mを用いて0.75 Nと計算した。この計算の誤りを説明せよ。

演習 4(3) 電流、磁束密度、導線全長を変えず、磁場内にある直線部分の長さだけを0.40 mに増やした。磁力の大きさを求めよ。磁場外では引き続き外部磁場は 0 とする。

解答・解説は末尾の「演習 4 の解答・解説」を参照。

演習 5

真空中に十分長い 2 本の平行直線導線を置く。

紙面に垂直な 2 本の導線を正面から見て、左を導線 1、右を導線 2 とする。

導線 1 には2.0 Aの紙面手前向きの電流、導線 2 には4.0 Aの紙面奥向きの電流が流れている。

導線間の距離は0.20 mであり、両導線について同じ長さ0.50 mの部分に働く力を調べる。

真空の透磁率を$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\ \mathrm{T\,m/A}$とし、端や接続部分の影響は無視できるものとする。

演習 5(1) 導線 1 が導線 2 の位置につくる磁束密度B_1、および導線 2 が導線 1 の位置につくる磁束密度B_2の大きさと向きをそれぞれ求めよ。

演習 5(2) 各導線が受ける力の向きを求め、引力と斥力のどちらが働くか答えよ。

演習 5(3) 単位長さあたりに働く磁力の大きさと、各導線の長さ0.50 mに働く磁力の大きさを求めよ。

演習 5(4) 最初の状態から、導線 1 の電流の大きさと導線間の距離を同時に 2 倍にした。電流の向き、導線 2 の電流の大きさ、比較する長さは変えない。磁力の向きと大きさがどう変わるか答えよ。

演習 5(5) 最初の状態に戻し、導線 2 の電流だけを0 Aにした。2 本の導線の間に働く相互磁力の大きさを求めよ。

解答・解説は末尾の「演習 5 の解答・解説」を参照。

©ミライコーチング

演習 6

磁場中の電流が受ける力について、次の問いに答えよ。

演習 6(1) 次のア〜エのうち、正しいものを 1 つ選べ。

- ア．金属導線中の電子の移動方向は、電流の向きと常に同じである。
- イ．一様な外部磁場と電流の向きが平行な場合、導線がその磁場から受ける磁力は 0 である。
- ウ．導線の一部だけが一様な磁場内にある場合も、$F = BIl\sin\theta$のlには必ず導線全長を使用する。
- エ．導線に働く磁力を求めるときは、その導線自身がつくる磁場だけをBに代入する。

演習 6(2) 同じ向きの電流が流れる 2 本の十分長い平行直線導線について、同じ長さの部分に働く互いの力は大きさが等しく、逆向きとなる。それにもかかわらず、一方の導線上でその 2 つの力が打ち消し合わない理由を説明せよ。

解答・解説は末尾の「演習 6 の解答・解説」を参照。

演習問題の解答・解説

演習 1 の解答・解説

演習 1(1) 磁力の大きさは、0°で0 N、30°で0.12 N、90°で0.24 N、180°で0 Nとなる。

まず、電流と磁場が垂直なときの値を計算する。

$$\begin{aligned} BIl &= (0.20\,\mathrm{T})(3.0\,\mathrm{A})(0.40\,\mathrm{m}) \\ &= 0.24\,\mathrm{N} \end{aligned}$$

角度を考慮すると、

$$F = (0.24\,\mathrm{N})\sin\theta$$

である。

それぞれの角度について、

$$F_{0^\circ} = (0.24\,\mathrm{N}) \times 0 = 0\,\mathrm{N}$$

$$F_{30^\circ} = (0.24\,\mathrm{N}) \times \frac{1}{2} = 0.12\,\mathrm{N}$$

$$F_{90^\circ} = (0.24\,\mathrm{N}) \times 1 = 0.24\,\mathrm{N}$$

$$F_{180^\circ} = (0.24\,\mathrm{N}) \times 0 = 0\,\mathrm{N}$$

となる。

演習 1(2) 磁力は紙面の奥向きである。

磁場は右向きで、電流は右上向きである。磁場に垂直な電流成分は上向きなので、左手の法則から力は紙面の奥向きとなる。

演習 1(3) 磁力は紙面の奥向きである。

電流が上向き、磁場が右向きなので、左手の法則より紙面の奥向きとなる。

演習 1(4) 磁力の大きさが 0 であり、磁力の向きが定まらないためである。

0°では電流と磁場が同方向、180°では逆方向に平行である。どちらの場合も磁場に垂直な成分が 0 なので、磁力は働かない。

磁力が 0 なのに、力が手前や奥を向くと判断するのは適切ではない。

演習 2 の解答・解説

演習 2(1) 磁力は0.18 N、紙面の手前向きである。

電流は下向き、磁場は右向きで、互いに垂直である。

$$\begin{aligned} F &= BIl \\ &= (0.15\,\mathrm{T})(2.0\,\mathrm{A})(0.60\,\mathrm{m}) \\ &= 0.18\,\mathrm{N} \end{aligned}$$

左手の法則から、下向き電流と右向き磁場による力は紙面手前向きとなる。

演習 2(2) 磁力は0.18 N、紙面の奥向きである。

磁場だけを右向きから左向きに反転したため、磁力の向きも反転する。磁束密度の大きさは同じなので、力の大きさは変わらない。

演習 2(3) 磁力は0.18 N、紙面の手前向きである。

電流は上向き、磁場は左向きとなる。電流と磁場を両方とも反転したため、磁力は最初と同じ向きになる。

演習 2(4) 磁力は0 Nであり、向きは定まらない。

$I = 0\,\mathrm{A}$なので、

$$F = (0.15\,\mathrm{T})(0\,\mathrm{A})(0.60\,\mathrm{m}) = 0\,\mathrm{N}$$

である。

演習 2(5) 磁力は0 Nであり、向きは定まらない。

外部磁場が$B = 0\,\mathrm{T}$なので、

$$F = (0\,\mathrm{T})(2.0\,\mathrm{A})(0.60\,\mathrm{m}) = 0\,\mathrm{N}$$

となる。電流が流れていても、外部磁場がなければ、その磁場から受ける磁力は 0 である。

演習 3 の解答・解説

演習 3(1) 磁力の大きさは0.36 Nである。

電流と磁場のなす角は30°なので、

$$\begin{aligned} F &= BIl\sin 30^\circ \\ &= (0.60\,\mathrm{T})(1.5\,\mathrm{A})(0.80\,\mathrm{m}) \times \frac{1}{2} \\ &= 0.36\,\mathrm{N} \end{aligned}$$

となる。

演習 3(2) 磁力の大きさは0.72 Nである。

電流だけを 2 倍にすると$I = 3.0\,\mathrm{A}$になる。

$$\begin{aligned} F &= (0.60\,\mathrm{T})(3.0\,\mathrm{A})(0.80\,\mathrm{m}) \times \frac{1}{2} \\ &= 0.72\,\mathrm{N} \end{aligned}$$

ほかの条件が変わらないため、(1)の 2 倍になる。

演習 3(3) 磁力の大きさは0.18 Nである。

磁場内の長さだけを半分にすると$l = 0.40\,\mathrm{m}$になる。

$$\begin{aligned} F &= (0.60\,\mathrm{T})(1.5\,\mathrm{A})(0.40\,\mathrm{m}) \times \frac{1}{2} \\ &= 0.18\,\mathrm{N} \end{aligned}$$

(1)の半分になる。

演習 3(4) 磁力の大きさは0.36 Nである。

電流は3.0 A、磁場内の長さは0.40 mとなる。

$$\begin{aligned} F &= (0.60\,\mathrm{T})(3.0\,\mathrm{A})(0.40\,\mathrm{m}) \times \frac{1}{2} \\ &= 0.36\,\mathrm{N} \end{aligned}$$

電流を 2 倍、長さを半分にしたため、積Ilは最初と同じになる。

磁束密度と角度も固定されているので、磁力の大きさは変わらない。

演習 4 の解答・解説

演習 4(1) 磁力の大きさは0.25 Nである。

外部磁場が存在するのは導線のうち0.20 mだけなので、この長さを使用する。

$$\begin{aligned} F &= BIl \\ &= (0.25\,\mathrm{T})(5.0\,\mathrm{A})(0.20\,\mathrm{m}) \\ &= 0.25\,\mathrm{N} \end{aligned}$$

演習 4(2) 磁場の存在しない部分まで、磁束密度0.25 Tの磁場内にあるものとして扱っている点が誤りである。

導線全長0.60 mのうち、0.40 mは外部磁場が 0 の領域にある。その部分は、この外部磁場による磁力に寄与しない。

したがって、全長を用いて得られた0.75 Nではなく、磁場内の長さ0.20 mを使用した0.25 Nが正しい。

演習 4(3) 磁力の大きさは0.50 Nである。

新しく磁場内に入る長さは0.40 mなので、

$$\begin{aligned} F &= (0.25\,\mathrm{T})(5.0\,\mathrm{A})(0.40\,\mathrm{m}) \\ &= 0.50\,\mathrm{N} \end{aligned}$$

となる。

電流・磁束密度・角度は同じで、磁場内の長さだけが 2 倍になったため、磁力も 2 倍になっている。

演習 5 の解答・解説

演習 5(1) $B_1 = 2.0 \times 10^{-6}\,\mathrm{T}$で上向き、$B_2 = 4.0 \times 10^{-6}\,\mathrm{T}$で上向きである。

導線 1 の電流は紙面手前向きなので、右側にある導線 2 の位置での磁場B_1は上向きとなる。

$$\begin{aligned} B_1 &= \frac{\mu_0 I_1}{2\pi d} \\ &= \frac{(4\pi \times 10^{-7}\,\mathrm{T\,m/A})(2.0\,\mathrm{A})}{2\pi(0.20\,\mathrm{m})} \\ &= 2.0 \times 10^{-6}\,\mathrm{T} \end{aligned}$$

一方、導線 2 の電流は紙面奥向きである。右手の法則から、その左側にある導線 1 の位置での磁場B_2は上向きとなる。

$$\begin{aligned} B_2 &= \frac{\mu_0 I_2}{2\pi d} \\ &= \frac{(4\pi \times 10^{-7}\,\mathrm{T\,m/A})(4.0\,\mathrm{A})}{2\pi(0.20\,\mathrm{m})} \\ &= 4.0 \times 10^{-6}\,\mathrm{T} \end{aligned}$$

演習 5(2) 導線 1 は左向き、導線 2 は右向きに力を受ける。したがって斥力が働く。

導線 1 は紙面手前向きの電流I_1と、上向きの外部磁場B_2を受けるため、左向きの力を受ける。

導線 2 は紙面奥向きの電流I_2と、上向きの外部磁場B_1を受けるため、右向きの力を受ける。

互いに離れる向きなので、斥力である。

演習 5(3) 単位長さあたりの力は$8.0 \times 10^{-6}\,\mathrm{N/m}$、各導線の比較長$0.50\,\mathrm{m}$に働く力は$4.0 \times 10^{-6}\,\mathrm{N}$である。

まず、

$$\begin{aligned}\frac{F}{l} &= \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d} \\ &= \frac{(4\pi \times 10^{-7}\,\mathrm{T\,m/A})(2.0\,\mathrm{A})(4.0\,\mathrm{A})}{2\pi(0.20\,\mathrm{m})} \\ &= 8.0 \times 10^{-6}\,\mathrm{N/m}\end{aligned}$$

となる。

長さ$0.50\,\mathrm{m}$に働く力は、

$$\begin{aligned}F &= (8.0 \times 10^{-6}\,\mathrm{N/m})(0.50\,\mathrm{m}) \\ &= 4.0 \times 10^{-6}\,\mathrm{N}\end{aligned}$$

である。

各導線について別々に求めても、

$$\begin{aligned}F_1 &= B_2 I_1 l \\ &= (4.0 \times 10^{-6}\,\mathrm{T})(2.0\,\mathrm{A})(0.50\,\mathrm{m}) \\ &= 4.0 \times 10^{-6}\,\mathrm{N} \\ F_2 &= B_1 I_2 l \\ &= (2.0 \times 10^{-6}\,\mathrm{T})(4.0\,\mathrm{A})(0.50\,\mathrm{m}) \\ &= 4.0 \times 10^{-6}\,\mathrm{N}\end{aligned}$$

となる。

電流の大きさが違っていても、同じ比較長に働く力の大きさは等しい。

演習 5(4) 磁力の向きは変わらず、導線 1 は左向き、導線 2 は右向きである。各導線に働く力の大きさも$4.0 \times 10^{-6}\,\mathrm{N}$のままである。

変更後の条件は、

$$I_1{}' = 4.0\,\mathrm{A}, \qquad d' = 0.40\,\mathrm{m}$$

であり、$I_2 = 4.0\,\mathrm{A}$と$l = 0.50\,\mathrm{m}$は変わらない。

新しい単位長さあたりの力は、

$$\begin{aligned}\frac{F'}{l} &= \frac{\mu_0 {I_1}' I_2}{2\pi d'} \\ &= \frac{(4\pi \times 10^{-7}\,\mathrm{T\,m/A})(4.0\,\mathrm{A})(4.0\,\mathrm{A})}{2\pi(0.40\,\mathrm{m})} \\ &= 8.0 \times 10^{-6}\,\mathrm{N/m}\end{aligned}$$

となる。

$$\begin{aligned}F' &= (8.0 \times 10^{-6}\,\mathrm{N/m})(0.50\,\mathrm{m}) \\ &= 4.0 \times 10^{-6}\,\mathrm{N}\end{aligned}$$

電流I_1が 2 倍になって力を大きくする効果と、距離dが 2 倍になって力を小さくする効果が打ち消し合っている。

電流の方向は変わらないため、斥力のままである。

演習 5(5) 2 本の導線の間に働く相互磁力の大きさは0 Nである。

$I_2 = 0\,\mathrm{A}$なので、

$$\begin{aligned}\frac{F}{l} &= \frac{\mu_0 I_1 (0\,\mathrm{A})}{2\pi d} \\ &= 0\,\mathrm{N/m}\end{aligned}$$

となり、比較長に働く力も0 Nである。

導線 1 には電流が流れ続けていて磁場をつくるが、導線 2 には電流が流れていないため、その磁場から導線 2 が受ける電流の磁力は 0 である。また、導線 2 がつくる磁場も 0 なので、導線 1 が導線 2 から受ける磁力も 0 である。

力が 0 であるため、相互磁力の向きは定まらない。

演習 6 の解答・解説

演習 6(1) 正しい選択肢は**イ**である。

各選択肢の理由を確認する。

ア：誤り。

金属導線中では、電子の移動方向は電流の向きと逆である。電流の向きは正の電荷が流れる向きとして定義されている。

イ：正しい。

電流と外部磁場の方向が平行なら、なす角は0°または180°である。

どちらの場合も、

$$F = BIl\sin\theta = 0\,\mathrm{N}$$

となる。

ウ：誤り。

lは磁場内にある直線部分の長さである。磁場外では$B=0$であるという条件なら、磁場外の部分まで同じ磁束密度を受けるものとして計算してはならない。

エ：誤り。

導線に働く磁力を求めるときは、その導線に外部から加わる磁場を用いる。

平行電流の問題では、導線 1 が受ける力には導線 2 がつくるB_2を、導線 2 が受ける力には導線 1 がつくるB_1を使う。自分自身の磁場を自分への力の式に代入するのは誤りである。

演習 6(2) 2 つの力が別々の導線に働いているため、一方の導線の上では打ち消し合わない。

左の導線 1 が受ける力F_1は導線 1 に働き、右の導線 2 が受ける力F_2は導線 2 に働く。

両者の大きさが等しく逆向きであっても、1 つの物体に働く 2 つの力ではない。

したがって、導線 1 に働く力を調べるときに、導線 2 に働くF_2を足して相殺することはできない。

2 本の導線を区別して力を考える必要がある。