第 107 講 動く導体の誘導起電力

この講でできるようになること

- 磁場の中で動く導体棒について、電荷の移動方向と両端の電位の高低を判断できる。
- 棒の長さ・磁束密度・速さから誘導起電力を求め、開回路と閉回路の違いを説明できる。
- 閉回路を流れる電流、棒が受ける磁力、等速運動に必要な外力の向きを判断できる。
- 外力がする仕事と抵抗で発生する熱を対応づけ、エネルギーの移り変わりを説明できる。
- 棒が動いて回路の面積が変わる場合と、回路全体が移動する場合を区別できる。

1. 導体を磁場の中で動かすと何が起こるか

磁場の中では、運動する電荷が磁力を受ける。第 103 講では、この力をローレンツ力として学んだ。

それでは、自由に動ける電子を含む金属の棒そのものを磁場の中で動かすと、何が起こるだろうか。

次の図では、まっすぐな導体棒を右向きに動かしている。棒の上端を A、下端を C とし、磁場は紙面の奥向きに一様にかかっている。

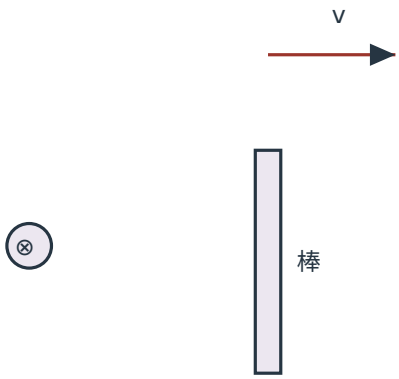

図 1　開いた導体棒：上端 A・下端 C と右向きの運動。

図中の⊗は、磁場が紙面の奥へ向かうことを示す記号である。小円は磁場の向きを示すための枠であり、別の物体ではない。矢印vは導体棒の速度を表す。

ここで、次の 2 点を考えてみよう。

- 棒の中にある正の電荷が磁力を受けるとしたら、A 側と C 側のどちらへ押されるだろうか。
- 棒はどこにも接続されていない。この状態でも、両端に電位差が生じることはあるだろうか。

この 2 つの疑問が、動く導体の誘導起電力を理解する出発点となる。

電荷が分かれていく仕組み

棒とともに右向きに動く正の電荷を考える。

右向きの速度と紙面奥向きの磁場からローレンツ力の向きを決めると、正の電荷が受ける磁力は上向きとなる。

一方、電子は負の電荷をもつため、同じ右向きの運動に対して受ける磁力は下向きである。

©ミライコーチング

そのため、棒の内部では電子が C 側へ移動し、A 側は相対的に正、C 側は相対的に負に帯電していく。

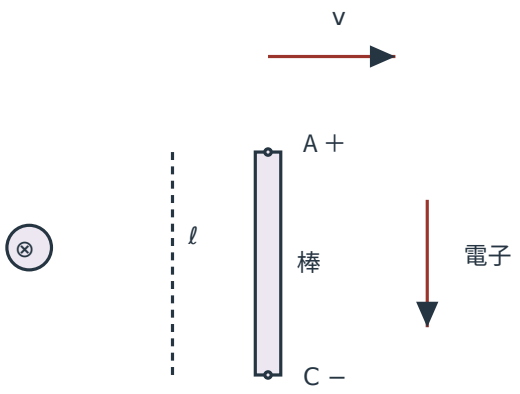

図 2　電荷分離の解説：A が高電位、C に電子が寄る。

図の A・C は導体棒の端点であり、＋と−は電荷分離によって生じる相対的な帯電を表す。ℓは棒の長さである。

右側の「電子」の下向き矢印は、**電荷分離が進む間の電子の移動方向**を示している。平衡に達した後も、電子がこの向きへ流れ続けるという意味ではない。

電荷が分離すると、棒の内部には A 側から C 側へ向かう電場が生じる。この電場による電気的な力は、電荷を分離させる磁力と反対向きに働く。

やがて両者がつり合い、それ以上の電荷分離が進まなくなる。この状態を電荷分離の平衡状態という。

電荷分離によって生じる電位差

電子が不足して相対的に正に帯電する A 側は電位が高く、電子が集まる C 側は電位が低くなる。

ここで重要なのは、棒がほかの導線につながっていなくても、端と端の間に電位差が生じることである。

このように、磁場中で導体を動かすことによって生じる起電力を、運動起電力という。

運動起電力

一様な磁場の中で、まっすぐな導体棒が動く場合を考える。

磁場、棒の長さ方向、棒の速度方向が互いに垂直であれば、運動起電力の大きさEは次の式で表される。

$$E = B\ell v$$

- E：運動起電力の大きさ（V）
- B：磁束密度の大きさ（T）
- ℓ：磁場中で動く導体棒の長さ（m）
- v：棒の速さ（m/s）

ここでEは起電力を表す記号であり、電場の強さを表す記号と混同しない。

棒の抵抗を無視でき、外部に接続されていない理想的な開回路では、電荷分離が平衡に達した後の棒の両端の電位差の大きさも$B\ell v$となる。

この式は、3 つの量を掛ければよいというだけの式ではない。磁束密度が大きいほど、棒が長いほど、また棒を速く動かすほど、電荷を分離させる働きが強くなり、起電力が大きくなることを示している。

ただし、$E = B\ell v$は、磁場・棒・速度が互いに垂直という条件の下で使う式である。棒が動いていれば、どの方向へ動いても必ずこの式を使えるわけではない。

開回路では電流が流れ続けるか

棒の両端が外部の導線でつながっていない状態を、ここでは開回路と呼ぶ。

開回路では、棒の内部で電荷分離が起こるものの、電荷が回路を一周する道筋はない。したがって、平衡後に持続する電流は流れない。

これは「起電力が 0 である」という意味ではない。

起電力や端間電位差が存在することと、持続する電流が流れることは別の判断である。

開いた棒の判断

一様な磁場が紙面奥向き、棒が右向きに動く場合は、正の電荷が受ける磁力の向きから考える。

- 正の電荷は A 側へ押される。
- 電子は電荷分離が進む間、C 側へ移動する。
- A 側が高電位、C 側が低電位となる。
- 開回路でも起電力は生じるが、平衡後の持続電流は 0 である。

電位の高低は、棒全体の運動方向と磁場の向きを固定して判断する。

2. 回路を閉じると電流が流れる

次に、動く導体棒を 2 本の静止したレールに接触させ、左側に抵抗を接続する。

棒とレールが電気的につながれば、電流が一周できる閉回路になる。

ここからは、特に断らない限り、次の理想化した条件を用いる。

- レールは静止し、右側の導体棒だけが滑らかに動く。
- 棒とレールの抵抗は無視でき、全抵抗は左側の$R > 0$で表す。

- 棒とレールの接触は保たれ、接触抵抗は無視できる。
- 電池など、ほかの電源は存在しない。
- 磁場は一様で時間的に変化せず、自己誘導などの過渡的な影響は無視する。
- 磁場、棒の長さ方向、棒の速度方向は互いに垂直である。

この条件では、動く棒が回路の起電力を生み出す役割を担う。

起電力と電流の関係

運動起電力の大きさは

$$E = B\ell v$$

である。

全抵抗がRの閉回路で、ほかの電源や無視できない誘導の影響がなければ、電流の大きさIは

$$I = \frac{E}{R} = \frac{B\ell v}{R}$$

となる。

起電力は電荷を回路に沿って動かす働きを表し、抵抗は電流の流れにくさを表す。

ただし、一般に起電力と任意の 2 点間の電位差が常に等しいわけではない。この式は、いま固定した回路条件の下で使用する。

電流の向きをどう決めるか

閉回路になっても、最初に見るべきものは棒の中の正の電荷が受ける磁力である。

基準となる配置では、磁場が紙面奥向きで、棒が右へ動くので、棒の中で正電荷を押す向きは C から A への上向きである。

そのため、慣用的な電流の向きも棒の内部では C から A となる。慣用電流とは、正の電荷が移動する向きを電流の向きとする約束である。

電子の移動方向と慣用電流の向きは反対なので、混同しないことが重要である。

3. 動く棒が受ける磁力

閉回路に電流が流れると、磁場中の導体棒は磁力を受ける。

棒を流れる電流が棒に沿い、磁場と垂直である場合、棒が受ける磁力の大きさは

$$F_{\mathrm{mag}} = BI\ell$$

である。F_{mag}は棒が受ける巨視的な磁力の大きさを表す。

この磁力の向きは、棒の運動を妨げる向きになる。次の例題で、電流と磁力の向きを具体的に調べよう。

©ミライコーチング

例題 1

次の図のように、水平な 2 本の静止レールに長さ0.40 mの導体棒 AC が接触している。A は上端、C は下端である。

紙面奥向きに磁束密度0.50 Tの一様な磁場がかかっており、棒を右向きに一定の速さ3.0 m/sで動かす。左側の抵抗は2.0 Ωである。

ほかの電源はなく、棒・レール・接点の抵抗、摩擦、自己誘導の影響は無視できる。

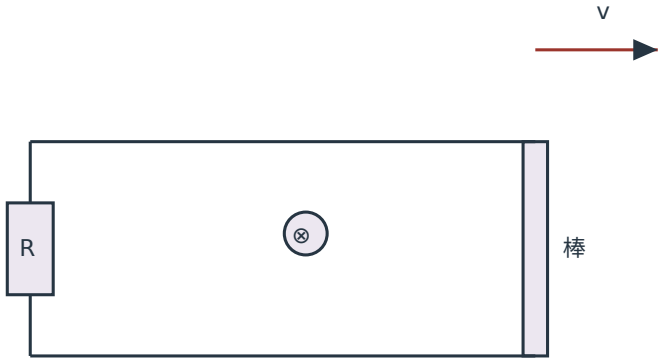

図 3　閉回路の条件図：左の矩形は抵抗 R、右の棒が滑る。

図中の横線と左側の縦線は静止したレール・導線を表し、左側の矩形Rは抵抗器である。導体棒の両端 A・C は上下のレールとそれぞれ電気的につながっている。

例題 1(1)棒に生じる運動起電力の大きさを求めよ。

例題 1(2)回路に流れる電流の大きさと向きを求めよ。向きは棒の内部と回路全体の両方について答えよ。

例題 1(3)棒が磁場から受ける力の大きさと向きを求めよ。

例題 1(4)棒を一定の速さで右へ動かすために必要な外力の大きさと向きを求めよ。

例題 1 の解答・解説

例題 1(1)起電力を求める。

磁場、棒、速度の向きは互いに垂直なので、

$$\begin{aligned} E &= B\ell v \\ &= (0.50\,\mathrm{T})(0.40\,\mathrm{m})(3.0\,\mathrm{m/s}) \\ &= 0.60\,\mathrm{V} \end{aligned}$$

したがって、運動起電力の大きさは0.60 Vである。

例題 1(2)電流の大きさと向きを求める。回路の全抵抗が2.0 Ωなので、

$$\begin{aligned} I &= \frac{E}{R} \\ &= \frac{0.60\,\mathrm{V}}{2.0\,\Omega} \\ &= 0.30\,\mathrm{A} \end{aligned}$$

向きは正の電荷に働く磁力から判断する。

棒が右へ動き、磁場が紙面奥向きなので、棒の中の正の電荷は上向きに押される。よって棒の電流は C から A へ上向きに流れる。

電流はその後、上側のレールを左へ進み、左側の抵抗を下へ通り、下側のレールを右へ進む。

したがって、**回路全体では反時計回り**となる。

例題 1(3)棒が受ける磁力を求める。

$$\begin{aligned} F_{\mathrm{mag}} &= BI\ell \\ &= (0.50\,\mathrm{T})(0.30\,\mathrm{A})(0.40\,\mathrm{m}) \\ &= 0.060\,\mathrm{N} \end{aligned}$$

棒の電流は上向き、磁場は紙面奥向きなので、棒が受ける磁力は左向きである。

これは棒の右向きの運動を妨げる向きである。

例題 1(4)等速運動に必要な外力を求める。

棒は一定の速度で動いているので、棒に働く水平方向の力はつり合う必要がある。

摩擦を無視する条件では、左向きの磁力とつり合う右向きの外力が必要である。

$$F_{\mathrm{ext}} = F_{\mathrm{mag}} = 0.060\,\mathrm{N}$$

したがって、外力は右向きに0.060 Nである。

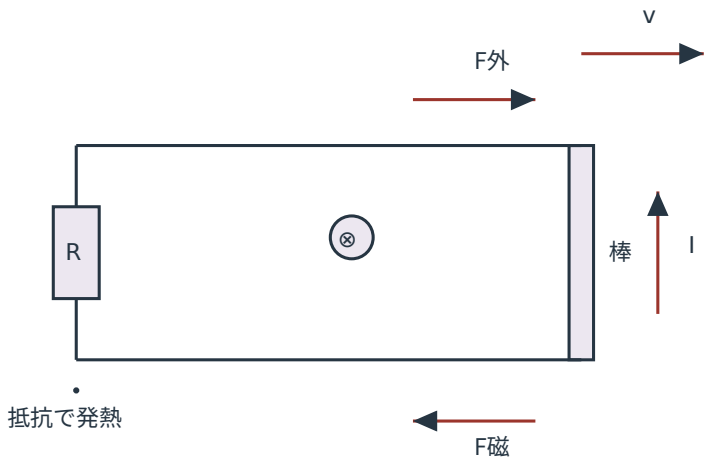

図 4　右へ動く閉回路の解説：棒の電流は上、磁力は左。

図では、速度v、電流I、磁力F_{mag}（図中の F 磁）、外力F_{ext}（図中の F 外）の矢印を、見やすくするため棒から離して表示している。

Iは実際には棒 AC を上向きに流れる電流であり、F_{mag}とF_{ext}はどちらも動く棒に作用する力である。棒とは別の位置の物体に働く力ではない。

また、速度・電流・力は異なる物理量なので、矢印の長さを比べて数値の大小を判断してはならない。

抵抗の下の小さな点は「抵抗で発熱」という注記の位置を示すもので、回路の接続点や新しい部品ではない。

図では外力が右、磁力が左である。外力によって棒を動かし続けることで回路に電流が流れ、抵抗で熱が発生する。

棒の運動を逆向きにすると

同じ磁場の中で、棒を右向きではなく左向きに動かしたらどうなるだろうか。

速度が反対になると、正の電荷に働く磁力も反対になる。そのため、電荷分離の極性と電流の向きが反転する。

一方、棒が受ける磁力は、反転後の運動方向に対しても制動する向きになる。

例題 2

例題 1 と同じ回路を考える。

磁束密度の大きさ0.50 T、棒の長さ0.40 m、全抵抗2.0 Ωは変えず、磁場を紙面奥向きのまま、棒を左向きに一定の速さ3.0 m/sで動かす。

例題 2(1)棒の A・C のどちらが高電位になるか答えよ。

例題 2(2)誘導起電力と電流の大きさを求め、電流の向きを答えよ。

例題 2(3)棒が受ける磁力と、等速運動を保つ外力の向きをそれぞれ答えよ。

©ミライコーチング

例題 2 の解答・解説

例題 2(1)正の電荷に働く磁力の向きは、右向き運動のときと反対の下向きとなる。

したがって、C が高電位、A が低電位である。

例題 2(2)速さと磁束密度の大きさは変わらないので、

$$E = (0.50\,\mathrm{T})(0.40\,\mathrm{m})(3.0\,\mathrm{m/s})$$
$$= 0.60\,\mathrm{V}$$
$$I = \frac{0.60\,\mathrm{V}}{2.0\,\Omega} = 0.30\,\mathrm{A}$$

棒の電流は A から C へ下向き、回路全体では時計回りとなる。

例題 2(3)棒の電流は下向き、磁場は紙面奥向きなので、棒が受ける磁力は右向きである。

左へ等速で動かすには、左向きの外力が必要となる。

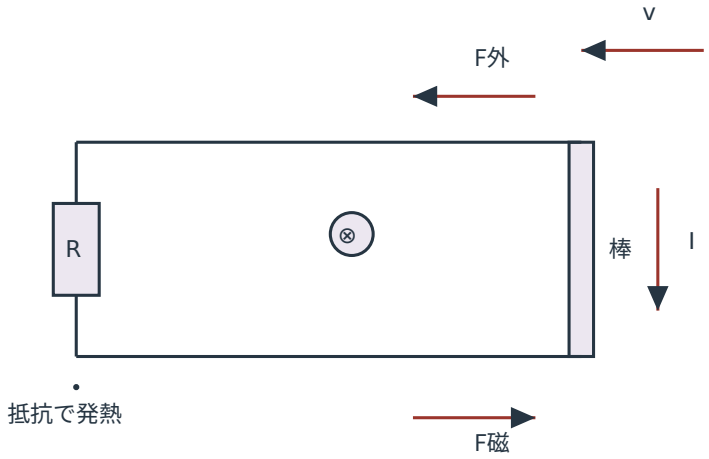

図 5　左へ動く閉回路の解説：棒の電流は下、磁力は右。

この図でも、電流Iは棒の右側へ、磁力 F 磁は棒の下側へ、等速運動に必要な外力 F 外は上側へ移動して表示している。いずれも対応する棒の電流や棒への力を表し、矢印の描画位置が作用対象を変更するわけではない。

棒を左へ動かしても、外力は運動と同じ左向きに働く。したがって、棒を動かす外力は正の仕事をし、抵抗では電流による発熱が起こる。

速度と磁場の反転を区別する

電流の向きは、磁場だけでも速度だけでも決まらない。**磁場の向きと棒の速度の向きを組み合わせて決まる。**

同じ閉回路で、棒の長さ、磁束密度の大きさ、速さ、全抵抗を固定したまま、向きだけを変えた場合を比較する。

磁場	棒の速度	高電位の端	棒の電流	棒への磁力	等速外力
紙面奥	右	A	上	左	右
紙面奥	左	C	下	右	左
紙面手前	右	C	下	左	右
紙面手前	左	A	上	右	左

紙面手前向きの磁場は⊙で表す。

たとえば、右向きの速度を変えずに磁場だけを紙面手前向きに反転すると、正電荷に働く磁力が下向きになり、棒の電流は下向きになる。

このとき、磁場と電流の両方が反転しているため、棒が受ける磁力は左向きのままである。

また、磁場を紙面手前向き、速度を左向きに同時に反転すると、電流は再び上向きとなる。ただし、棒に働く磁力は右向きとなり、左向きの運動を妨げる。

向きを反転させてもBとvの大きさが変わらなければ、誘導起電力と電流の大きさは変わらない。

向きを判断する順番

閉回路の向きの問題は、次の順番で考えると混乱しにくい。

1. 磁場と速度の向きを確認する。
2. 正の電荷が受ける磁力の向きを決める。
3. 棒の高電位側と、棒を流れる電流の向きを決める。
4. その電流と磁場から、棒が受ける磁力を決める。
5. 等速運動なら、磁力とつり合う外力を決める。

電子の移動方向と慣用電流の向きは反対である。

4. 外力の仕事はどこへ行くのか

例題 1 では、棒を右向きに動かすために右向きの外力を加え続けた。

ここで、外力によって棒へ与えたエネルギーはどうなるのだろうか。

回路には電流が流れ、抵抗器では熱が発生する。この 2 つの現象は、仕事とエネルギーの関係によって結びついている。

外力と磁力がする仕事

再び、紙面奥向きの磁場中で棒を右向きに等速で動かす場面を考える。

棒に働く力は、左向きの磁力と右向きの外力でつり合っている。

それぞれの大きさをF_{mag}、F_{ext}とすると、

$$F_{\mathrm{ext}} = F_{\mathrm{mag}} = BI\ell$$

となる。

棒が右へΔxだけ進む間、外力は棒の移動方向と同じ向きに働くため、正の仕事をする。

$$W_{\text{ext}} = F_{\text{ext}}\Delta x$$

一方、磁力は移動方向と反対なので、棒への巨視的な磁力の仕事は負となる。

$$W_{\text{mag}} = -F_{\text{mag}}\Delta x$$

棒を一定の速さで動かしているため、棒の運動エネルギーは増えない。

摩擦がなく、外力と磁力が水平方向でつり合っていれば、棒に対する 2 つの力の仕事の和は 0 となる。

ここで注意したいのは、**棒全体が受ける磁力の仕事と、個々の自由電荷に働く磁力の仕事を混同しないこと**である。

自由電荷に働く磁力は、その電荷の速度に常に垂直なので、磁力自体は電荷に仕事をしない。一方、棒全体には左向きの制動力が働き、右向きに動く棒に対して負の仕事をする。

電気エネルギーの供給源は磁場ではなく、棒を引いている人などが加える**外力の仕事**である。棒の運動による電荷分離と回路内の電気的な働きを通して、そのエネルギーが抵抗へ運ばれる。

抵抗で生じる熱との対応

全抵抗Rの回路に一定の電流Iが流れているとき、時間Δtの間に発生するジュール熱Qは

$$Q = I^2 R\Delta t$$

である。

いま、棒は一定の速さvで動いているので、

$$\Delta x = v\Delta t$$

が成り立つ。

等速運動で摩擦がなく、機械的なエネルギーの蓄積やほかの損失を無視できる理想回路では、外力の仕事と抵抗で発生する熱が等しくなる。

$$F_{\text{ext}}\Delta x = I^2 R\Delta t$$

この式の左辺は人などが棒を動かすことで与えた仕事、右辺は抵抗で発生した熱である。

1 秒あたりの仕事で考える

仕事が同じでも、それを短い時間で行うか長い時間で行うかによって、エネルギーを与える速さが異なる。

一定時間に行った仕事をその時間で割った量を、仕事率という。仕事率は、1 秒あたりにどれだけの仕事をするかを表す。

仕事率Pは

$$P = \frac{W}{\Delta t}$$

で表され、単位はワット（W）である。

ここで1 Wは、1 秒あたり1 Jの仕事をすることを意味する。

棒に加える外力が一定で、棒が等速で動く場合、

$$\begin{aligned} P_{\text{ext}} &= \frac{F_{\text{ext}}\Delta x}{\Delta t} \\ &= F_{\text{ext}}v \end{aligned}$$

となる。

さらに、$F_{\text{ext}} = BI\ell$、$E = B\ell v$を使うと、

$$\begin{aligned} P_{\text{ext}} &= F_{\text{ext}}v \\ &= BI\ell v \\ &= (B\ell v)I \\ &= EI \end{aligned}$$

となる。

一方、$E = IR$なので、

$$EI = I^2R$$

である。

したがって、理想的な等速運動では

$$F_{\text{ext}}v = EI = I^2R$$

が成り立つ。

左から順に、外力による 1 秒あたりの仕事、誘導起電力が回路に供給する電気的な仕事の割合、抵抗で 1 秒あたりに発生する熱を表している。

この関係は、棒が加速して運動エネルギーを変化させる場合に、無条件でそのまま使えるわけではない。

例題 3

例題 1 と同じ回路で、導体棒を右向きに一定の速さ3.0 m/sで2.0 s間動かす。

誘導起電力は0.60 V、電流は0.30 A、棒が受ける磁力と必要な外力の大きさはともに0.060 Nである。

摩擦はなく、外力は動く棒にだけ加えるものとする。電気的なエネルギーの蓄積やほかの損失は無視できる。

例題 3(1)棒の移動距離を求めよ。

例題 3(2)外力がした仕事と、棒に働く磁力がした仕事をそれぞれ求めよ。

例題 3(3)抵抗で発生したジュール熱を求めよ。

例題 3(4)外力が 1 秒あたりにする仕事と、抵抗で 1 秒あたりに発生する熱をそれぞれ求めよ。

例題 3 の解答・解説

例題 3(1)棒は右向きに一定の速さで動くので、

$$\begin{aligned}\Delta x &= v\Delta t \\ &= (3.0\,\mathrm{m/s})(2.0\,\mathrm{s}) \\ &= 6.0\,\mathrm{m}\end{aligned}$$

となる。

例題 3(2)外力は移動方向と同じ右向きなので、

$$\begin{aligned}W_{\mathrm{ext}} &= F_{\mathrm{ext}}\Delta x \\ &= (0.060\,\mathrm{N})(6.0\,\mathrm{m}) \\ &= 0.36\,\mathrm{J}\end{aligned}$$

である。

磁力は左向きで、棒の移動方向と反対なので、

$$\begin{aligned}W_{\mathrm{mag}} &= -F_{\mathrm{mag}}\Delta x \\ &= -(0.060\,\mathrm{N})(6.0\,\mathrm{m}) \\ &= -0.36\,\mathrm{J}\end{aligned}$$

となる。

外力は正の仕事をし、磁力は負の仕事をする。

例題 3(3)抵抗は2.0 Ωなので、

$$\begin{aligned}Q &= I^2R\Delta t \\ &= (0.30\,\mathrm{A})^2(2.0\,\Omega)(2.0\,\mathrm{s}) \\ &= 0.36\,\mathrm{J}\end{aligned}$$

である。

抵抗で発生した熱は、外力がした仕事と等しい。

例題 3(4)外力の仕事を時間で割ると、

$$\begin{aligned}P_{\mathrm{ext}} &= \frac{0.36\,\mathrm{J}}{2.0\,\mathrm{s}} \\ &= 0.18\,\mathrm{W}\end{aligned}$$

である。

抵抗で 1 秒あたりに発生する熱も、

$$\begin{aligned}P_R &= I^2R \\ &= (0.30\,\mathrm{A})^2(2.0\,\Omega) \\ &= 0.18\,\mathrm{W}\end{aligned}$$

となる。

誘導起電力による電気的な仕事の割合も、

$$EI = (0.60\,\mathrm{V})(0.30\,\mathrm{A}) = 0.18\,\mathrm{W}$$

である。

したがって、3 つの量は一致する。

エネルギーの流れ

摩擦や電気的な蓄積を無視できる理想的な等速運動では、外力の仕事が回路の電気エネルギーを通して抵抗の熱へ変わる。

- 人などの外力が棒に正の仕事をする。
- 棒には運動を妨げる向きの磁力が働く。
- 棒の運動によって生じる起電力が、閉回路に電流を流す。
- 抵抗でジュール熱が発生する。

この条件で、外力による 1 秒あたりの仕事と、抵抗の発熱量の 1 秒あたりの値は等しい。

速さを 2 倍にしたらどうなるか

磁束密度B、棒の長さℓ、全抵抗Rを一定にしたまま、棒の速さvだけを 2 倍にする。

誘導起電力は$E = B\ell v$なので 2 倍になり、$I = \frac{E}{R}$から電流も 2 倍となる。

棒に働く磁力$F_{\mathrm{mag}} = BI\ell$も 2 倍である。

一方、抵抗で 1 秒あたりに発生する熱はI^2Rなので、電流が 2 倍になると 4 倍となる。

例題 1 の数値で比較すると、次のようになる。

量	速さ3.0 m/s	速さ6.0 m/s
起電力E	0.60 V	1.2 V
電流I	0.30 A	0.60 A
磁力F_{mag}	0.060 N	0.12 N
外力の仕事率	0.18 W	0.72 W

速さだけを変えた比較なので、ほかの条件は同じである。電流と磁力が 2 倍になった状態で、棒の速さも 2 倍になるため、外力による 1 秒あたりの仕事は 4 倍となる。

5. 磁束の変化からも説明できる

第 106 講では、回路を貫く磁束が変化すると誘導起電力が生じることを学んだ。

ここまで扱った動く導体棒も、磁束の変化から考えると同じ結果を得られる。

棒が動くと回路の面積が変わる

静止した 2 本のレールの上を、導体棒が右へ動く閉回路を考える。

レールの間隔をℓ、棒が右へ進む距離をΔxとする。

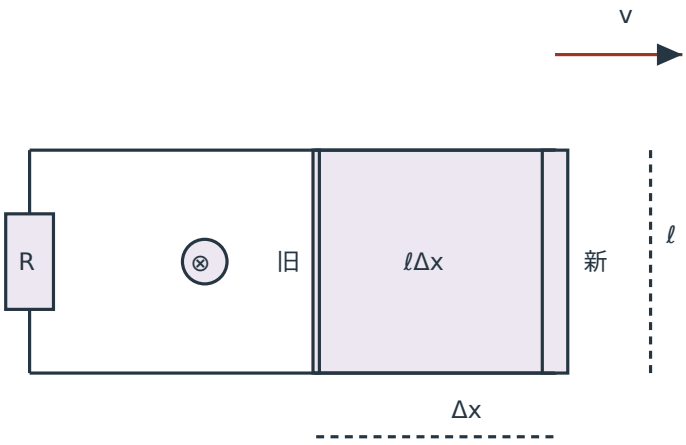

図 6　棒が右へ Δx 進むと、掃く面積はℓΔx。灰色長方形は面積で導体ではない。

図の「旧」と「新」は、同じ導体棒の移動前と移動後の位置を表している。棒が 2 本同時に存在するわけではない。

灰色の長方形は棒が移動する間に掃いた面積を示す部分であり、導体の板や回路部品ではない。右向きの速度矢印は、新しい位置にある棒の運動方向を示している。

抵抗Rは左側にあり、横線は静止したレール、縦の一部は導線を表す。

棒がΔxだけ右へ進むと、回路の面積は

$$\Delta S = \ell \Delta x$$

だけ増加する。

ここで、回路面の正の法線方向を紙面手前向き、正の周回方向を反時計回りと定める。

この 2 つの向きは右手の指の曲がる向きと親指の向きが対応する組であり、計算の途中では変えない。

磁場は紙面奥向きなので、正の法線方向に対して磁束は負となる。

一様な磁束密度Bの下で、回路の面積が$\ell \Delta x$だけ増加すると、磁束の変化は

$$\Delta \Phi = -B \ell \Delta x$$

となる。

第 106 講のファラデーの法則は、固定した正の周回方向に対して

$$E_{\text{loop}} = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

と表される。

ここでE_{loop}は、符号付きの一周の誘導起電力であり、正なら定めた反時計回りの向きに起電力が働くことを意味する。

先ほどの磁束の変化を代入すると、

$$E_{\text{loop}} = -\frac{-B\ell\Delta x}{\Delta t}$$

$$= B\ell\frac{\Delta x}{\Delta t}$$

棒が右向きに一定の速さvで動いているので、

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = v$$

である。

したがって、

$$E_{\text{loop}} = B\ell v$$

となり、運動起電力の式と一致する。

正の値なので、電流の向きは反時計回りである。これは棒の中を C から A へ流れる向きであり、電荷に働く磁力から判断した結果とも一致している。

磁束の変化と電荷に働く磁力は同じ現象を説明する

この回路の誘導起電力は、2 つの視点で理解できる。

- **導体棒の内部を見る視点**：動く自由電荷が磁力を受け、電荷分離が生じる。
- **回路全体を見る視点**：棒の移動によって回路面積が変化し、磁束が変化する。

両者は別々の起電力を加算する話ではなく、同じ誘導現象を異なる視点で説明したものである。

例題 4

紙面奥向きに磁束密度0.50 Tの一様な磁場がある。

レールの間隔は0.40 mで、右側の導体棒を0.20 sの間に0.60 mだけ右へ動かす。この間は一定の速さで動かすものとする。

回路の正の法線方向は紙面手前向き、正の周回方向は反時計回りとする。

例題 4(1)回路の面積の増加量を求めよ。

例題 4(2)磁束の変化$\Delta\Phi$を符号付きで求めよ。

例題 4(3)誘導起電力を符号付きで求め、電流の向きを答えよ。

例題 4 の解答・解説

例題 4(1)棒が掃く面積は長方形なので、

$$\begin{aligned}\Delta S &= \ell \Delta x \\ &= (0.40\,\mathrm{m})(0.60\,\mathrm{m}) \\ &= 0.24\,\mathrm{m}^2\end{aligned}$$

となる。

例題 4(2)磁場は正の法線と反対の紙面奥向きなので、

$$\begin{aligned}\Delta \Phi &= -B\Delta S \\ &= -(0.50\,\mathrm{T})\left(0.24\,\mathrm{m}^2\right) \\ &= -0.12\,\mathrm{Wb}\end{aligned}$$

である。

例題 4(3)ファラデーの法則を使うと、

$$\begin{aligned}E_{\mathrm{loop}} &= -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \\ &= -\frac{-0.12\,\mathrm{Wb}}{0.20\,\mathrm{s}} \\ &= +0.60\,\mathrm{V}\end{aligned}$$

となる。

正の起電力なので、誘導電流は正の周回方向である反時計回りに流れる。

実際に速さを求めると、

$$v = \frac{0.60\,\mathrm{m}}{0.20\,\mathrm{s}} = 3.0\,\mathrm{m/s}$$

なので、

$$E = (0.50\,\mathrm{T})(0.40\,\mathrm{m})(3.0\,\mathrm{m/s}) = 0.60\,\mathrm{V}$$

となる。

運動起電力の式から計算した大きさも一致している。

6. 回路全体が動く場合との違い

ここまでの回路では、静止したレールに対して右側の棒だけが移動していた。そのため、回路が囲む面積が変化していた。

しかし、**回路が動けば必ず誘導電流が流れるわけではない**。

たとえば、長方形の閉回路全体を、同じ形を保ったまま、完全に一様な磁場の中で平行移動させる場合を考える。

この場合、回路の面積は変化しない。磁場も一様なので、回路を貫く磁束は変化しない。

したがって、

$$\Delta\Phi = 0$$

であり、

$$E_{\text{loop}} = 0$$

となる。

ここで 0 となるのは、**回路一周についての合計の起電力**である。

回路の一部の導体では、運動する電荷が磁力を受けて電荷分離が生じ得る。しかし、長方形回路全体が同じ速度で平行移動する場合は、向かい合う辺の寄与が打ち消し合うため、一周する起電力は 0 となる。

この理想条件では、ほかの電源がなければ持続する回路電流は流れない。

比較する場面	回路面積	磁束	一周の誘導起電力
静止レール上で棒だけが右へ動く	増加する	変化する	0 ではない
一様磁場中を長方形回路全体が平行移動する	変化しない	変化しない	0

この比較で重要なのは、物体が動いているかどうかだけではなく、どの部分が動き、回路全体としてどのように磁束が変わるかということである。

式を使う前に確かめる条件

$E = B\ell v$を使う前に、磁場・棒・速度が互いに垂直かどうかを確認する。

棒が静止して$v = 0$である場合、磁場がなく$B = 0$である場合、また棒が磁場と平行な方向へ動く場合には、ここで扱う運動起電力は 0 である。

さらに、閉回路の一周起電力を判断するときは、棒 1 本に生じる起電力だけではなく、回路のほかの辺が動いているかどうかも考える必要がある。

演習問題

演習 1

長さ0.20 mのまっすぐな導体棒を、紙面奥向きに磁束密度0.80 Tの一様な磁場中で、右向きに一定の速さ2.5 m/sで動かす。

棒の上端を A、下端を C とする。磁場、棒、速度は互いに垂直であり、棒の両端はどこにも接続されていない。棒の抵抗は無視できる。

演習 1(1)棒に生じる運動起電力の大きさを求めよ。

演習 1(2)A と C のどちらが高電位になるか答えよ。

演習 1(3)電荷分離が進む間の電子の移動方向を答えよ。

演習 1(4)電荷分離が平衡に達した後、棒に持続する電流が流れるか答え、その理由を説明せよ。

対応解説：巻末「演習 1 の解答・解説」を参照。

演習 2

例題 1 の図と同じ配置の閉回路を考える。

長さ0.50 mの導体棒 AC が、紙面奥向きの一様な磁場中を右へ動く。磁束密度は0.40 T、棒の速さは2.0 m/s、全抵抗は2.0 Ωである。

上端 A と下端 C はそれぞれ静止したレールと接触している。ほかの電源はなく、棒・レール・接点の抵抗、摩擦、自己誘導は無視できる。棒は等速で動いている。

演習 2(1)誘導起電力の大きさを求めよ。

演習 2(2)回路に流れる電流の大きさを求めよ。

演習 2(3)棒の内部の電流の向きと、回路全体の電流の向きを答えよ。

演習 2(4)棒が受ける磁力の大きさと向き、および等速運動を保つための外力の大きさと向きを求めよ。

対応解説：巻末「演習 2 の解答・解説」を参照。

演習 3

演習 2 と同じ閉回路で、磁束密度の大きさ0.40 T、棒の長さ0.50 m、速さ2.0 m/s、全抵抗2.0 Ωを固定する。

元の状態は、磁場が紙面奥向き、棒の速度が右向きである。

次の各場合について、棒の高電位側、棒を流れる電流の向き、棒が受ける磁力の向き、等速運動を保つ外力の向きを答えよ。

演習 3(1)磁場はそのままで、速度だけを左向きに反転する。

演習 3(2)速度はそのままで、磁場だけを紙面手前向きに反転する。

演習 3(3)磁場を紙面手前向き、速度を左向きに同時に反転する。

演習 3(4)（1）〜（3）の各場合で、起電力と電流の大きさは元の状態から変化するか説明せよ。

いずれも、ほかの電源はなく、棒・レール・接点の抵抗、摩擦、自己誘導は無視できるものとする。

対応解説：巻末「演習 3 の解答・解説」を参照。

©ミライコーチング

演習 4

演習 2 と同じ閉回路で、棒を右向きに一定の速さ2.0 m/sで5.0 s間動かす。

この間、棒が受ける磁力と、等速運動を保つ外力の大きさはともに0.040 Nである。全抵抗は2.0 Ω、電流は0.20 Aで一定とする。

外力は棒にだけ働き、摩擦や電気的なエネルギーの蓄積、ほかの損失は無視できる。

演習 4(1)棒が移動した距離を求めよ。

演習 4(2)外力がした仕事を求めよ。

演習 4(3)棒が磁場から受けた力の仕事を、符号付きで求めよ。

演習 4(4)抵抗で発生したジュール熱を求めよ。

演習 4(5)外力が 1 秒あたりにする仕事と、抵抗で 1 秒あたりに発生する熱を求めよ。

対応解説：巻末「演習 4 の解答・解説」を参照。

演習 5

演習 2 と同じ閉回路で、磁束密度、棒の長さ、全抵抗を変えず、棒の速さだけを2.0 m/sから4.0 m/sへ変える。

新しい状態でも棒は等速で動き、摩擦やほかの損失は無視できる。

演習 5(1)新しい運動起電力と電流の大きさを求めよ。

演習 5(2)新しい磁力の大きさと、等速運動に必要な外力の大きさを求めよ。

演習 5(3)新しい外力の仕事率を求めよ。

演習 5(4)速さを 2 倍にすると、起電力、電流、磁力、外力の仕事率はそれぞれ元の何倍になるか答え、仕事率だけ倍率が異なる理由を説明せよ。

対応解説：巻末「演習 5 の解答・解説」を参照。

©ミライコーチング

演習 6

静止した 2 本のレールの間隔が0.50 mであり、右側の導体棒だけを0.40 sの間に0.80 mだけ右へ動かす。棒は一定の速さで動くものとする。

紙面奥向きに磁束密度0.60 Tの一様な磁場がかかっている。

回路の正の法線方向は紙面手前向き、正の周回方向は反時計回りとする。

回路の全抵抗は3.0 Ωで、ほかの電源や自己誘導、接触抵抗などは無視できる。

演習 6(1)棒の移動によって増加する回路の面積を求めよ。

演習 6(2)回路を貫く磁束の変化を符号付きで求めよ。

演習 6(3)ファラデーの法則を用いて誘導起電力を符号付きで求めよ。

演習 6(4)回路に流れる電流の大きさと向きを求めよ。

演習 6(5)$E = B\ell v$によって求めた起電力の大きさが、(3) と一致することを確かめよ。

対応解説：巻末「演習 6 の解答・解説」を参照。

演習 7

紙面奥向きの一様な磁場が広がる領域に、長方形の導線で作った閉回路が置かれている。

回路全体を、長方形の形と面積を変えず、同じ一定の速度で右向きに平行移動させる。移動中も回路全体が同じ一様磁場内にあり、磁場は時間的に変化しない。

回路にはほかの電源がなく、自己誘導などの過渡的な影響は無視する。

演習 7(1)回路を貫く磁束は変化するか答えよ。

演習 7(2)回路一周の誘導起電力はいくらか求めよ。

演習 7(3)この条件で、回路に持続する電流が流れるか答えよ。

演習 7(4)「右側の辺が磁場中を動くので、必ず$B\ell v$の起電力による電流が一周する」という説明が適切でない理由を答えよ。

対応解説：巻末「演習 7 の解答・解説」を参照。

©ミライコーチング

演習 8

まっすぐな導体棒を用いて、運動起電力を調べる。

棒の長さをℓ、磁束密度の大きさをB、棒の速さをvとする。

それぞれ独立した条件として、次の問いに答えよ。

演習 8(1)棒が静止しており$v=0$である場合、時間的に変化しない磁場による運動起電力はいくらか。

演習 8(2)磁場がなく$B=0$で、棒が動いている場合、運動起電力はいくらか。

演習 8(3)磁場と棒の長さ方向が互いに垂直で、棒が磁場と平行な方向に動いている場合、運動起電力はいくらか。

演習 8(4)上の結果を踏まえて、「導体棒が動いているなら、必ず$E=B\ell v$の起電力が生じる」という主張の問題点を説明せよ。

対応解説：巻末「演習 8 の解答・解説」を参照。

演習 9

磁場中の動く導体棒について、次の記述が正しいか誤りかを判断し、その理由をそれぞれ説明せよ。

演習 9(1)開回路の棒には持続する電流がないので、棒の両端に電位差も生じない。

演習 9(2)磁場中の自由電荷に働く磁力は、その電荷に直接仕事をして回路の電気エネルギーを供給する。

演習 9(3)閉回路で動く棒が磁力を受けて運動を妨げられている場合、摩擦などがない等速運動では、棒を動かす外力がエネルギーを供給している。

演習 9(4)抵抗が一定の理想的な閉回路では、磁束密度と棒の長さを固定したまま速さを 2 倍にすると、抵抗で 1 秒あたりに発生する熱は 4 倍になる。

演習 9(5)外力がした仕事が抵抗のジュール熱と等しいという関係は、棒が加速している場合にも、ほかの条件を確認せず常に適用できる。

対応解説：巻末「演習 9 の解答・解説」を参照。

©ミライコーチング

演習問題の解答・解説

演習 1 の解答・解説

演習 1(1)運動起電力の大きさは

$$\begin{aligned} E &= B\ell v \\ &= (0.80\,\mathrm{T})(0.20\,\mathrm{m})(2.5\,\mathrm{m/s}) \\ &= 0.40\,\mathrm{V} \end{aligned}$$

となる。

答え：0.40 V

演習 1(2)棒は右向き、磁場は紙面奥向きなので、正の電荷は上向きに磁力を受ける。

よって、A が相対的に正に帯電し、C が負に帯電する。

答え：A が高電位

演習 1(3)電子は負の電荷をもつので、正の電荷とは逆向きの磁力を受ける。

答え：電荷分離が進む間、電子は A 側から C 側へ向かう下向きに移動する。

演習 1(4)棒の両端は外部につながっておらず、閉回路になっていない。

電子の移動によって内部の電場が生じ、その電気的な力と磁力がつり合うと、電荷分離は平衡に達する。

答え：平衡後に持続する電流は流れない（$I = 0$）。ただし、棒の両端には電位差が残る。

演習 2 の解答・解説

演習 2(1)磁場、棒、速度は互いに垂直なので、

$$\begin{aligned} E &= B\ell v \\ &= (0.40\,\mathrm{T})(0.50\,\mathrm{m})(2.0\,\mathrm{m/s}) \\ &= 0.40\,\mathrm{V} \end{aligned}$$

となる。

答え：0.40 V

演習 2(2)全抵抗が2.0 Ωなので、

$$\begin{aligned} I &= \frac{E}{R} \\ &= \frac{0.40\,\mathrm{V}}{2.0\,\Omega} \\ &= 0.20\,\mathrm{A} \end{aligned}$$

である。

答え：0.20 A

演習 2(3)棒は右へ動き、磁場は紙面奥向きなので、正の電荷は棒の上端 A へ押される。

よって、棒の中の慣用電流は C から A へ流れる。そこから上側のレールを左へ進み、抵抗を下へ通り、下側のレールを右へ進む。

答え：棒の内部では上向き（C から A）、回路全体では反時計回り。

演習 2(4)棒が受ける磁力の大きさは、

$$\begin{aligned} F_{\text{mag}} &= BI\ell \\ &= (0.40\,\text{T})(0.20\,\text{A})(0.50\,\text{m}) \\ &= 0.040\,\text{N} \end{aligned}$$

である。

電流は上向きで磁場は紙面奥向きなので、棒への磁力は左向きとなる。

棒を右向きの等速運動に保つため、外力は磁力と反対の右向きで、同じ大きさが必要である。

答え：磁力は左向き0.040 N**、外力は右向き**0.040 N。

演習 3 の解答・解説

元の状態では磁場が紙面奥向き、速度が右向きなので、A が高電位、棒の電流は上向き、棒が受ける磁力は左向きである。

向きを変えた場合も、正の電荷が受ける磁力から順に判断する。

演習 3(1)速度だけを左へ反転する。

磁場は紙面奥向きのままなので、正の電荷が受ける磁力は下向きとなる。

したがって、C が高電位となり、棒の電流は下向きになる。

下向き電流と紙面奥向き磁場から、棒が受ける磁力は右向きとなる。

答え：C が高電位、棒の電流は下向き、磁力は右向き、等速外力は左向き。

演習 3(2)磁場だけを紙面手前向きに反転する。

速度は右向きのままなので、正の電荷が受ける磁力は下向きとなる。

よって、C が高電位、棒の電流は下向きとなる。

下向き電流と紙面手前向き磁場から、棒が受ける磁力は左向きである。

答え：C が高電位、棒の電流は下向き、磁力は左向き、等速外力は右向き。

演習 3(3)磁場と速度を同時に反転する。

磁場は紙面手前向き、速度は左向きなので、正の電荷が受ける磁力は上向きとなる。

そのため、A が高電位となり、棒の電流は上向きになる。

上向き電流と紙面手前向き磁場から、棒が受ける磁力は右向きとなる。

答え：A が高電位、棒の電流は上向き、磁力は右向き、等速外力は左向き。

演習 3(4)磁束密度の大きさ、棒の長さ、速さ、抵抗はいずれも変わっていない。

そのため、

$$E = B\ell v = 0.40\,\mathrm{V}$$

および

$$I = \frac{E}{R} = 0.20\,\mathrm{A}$$

の大きさは、どの場合も元と同じである。

答え：(1) 〜 (3) のいずれも、起電力は$0.40\,\mathrm{V}$、電流は$0.20\,\mathrm{A}$のままで、大きさは変わらない。

向きが反転することと、大きさが変化することは別の判断である。

演習 4 の解答・解説

演習 4(1)棒の移動距離は、

$$\begin{aligned}\Delta x &= v\Delta t \\ &= (2.0\,\mathrm{m/s})(5.0\,\mathrm{s}) \\ &= 10\,\mathrm{m}\end{aligned}$$

となる。

答え：$10\,\mathrm{m}$

演習 4(2)外力は棒の運動と同じ右向きなので、正の仕事をする。

$$\begin{aligned}W_{\mathrm{ext}} &= F_{\mathrm{ext}}\Delta x \\ &= (0.040\,\mathrm{N})(10\,\mathrm{m}) \\ &= 0.40\,\mathrm{J}\end{aligned}$$

答え：$+0.40\,\mathrm{J}$

演習 4(3)磁力は棒の運動と反対の左向きなので、棒への巨視的な磁力の仕事は負である。

$$\begin{aligned}W_{\mathrm{mag}} &= -F_{\mathrm{mag}}\Delta x \\ &= -(0.040\,\mathrm{N})(10\,\mathrm{m}) \\ &= -0.40\,\mathrm{J}\end{aligned}$$

答え：$-0.40\,\mathrm{J}$

演習 4(4)ジュール熱は、

$$\begin{aligned}Q &= I^2R\Delta t \\ &= (0.20\,\mathrm{A})^2(2.0\,\Omega)(5.0\,\mathrm{s}) \\ &= 0.40\,\mathrm{J}\end{aligned}$$

である。

答え：0.40 J

演習 4(5)外力による 1 秒あたりの仕事は、

$$\begin{aligned} P_{\text{ext}} &= F_{\text{ext}} v \\ &= (0.040\,\text{N})(2.0\,\text{m/s}) \\ &= 0.080\,\text{W} \end{aligned}$$

となる。

抵抗で 1 秒あたりに発生する熱は、

$$\begin{aligned} P_R &= I^2 R \\ &= (0.20\,\text{A})^2(2.0\,\Omega) \\ &= 0.080\,\text{W} \end{aligned}$$

である。

答え：外力の仕事率も、抵抗の 1 秒あたりの発熱量も0.080 W**である。**

外力がした仕事0.40 Jと、抵抗で発生した熱0.40 Jが一致していることも確認できる。

演習 5 の解答・解説

演習 5(1)速さを4.0 m/sにすると、

$$\begin{aligned} E &= B\ell v \\ &= (0.40\,\text{T})(0.50\,\text{m})(4.0\,\text{m/s}) \\ &= 0.80\,\text{V} \end{aligned}$$

となる。

電流は、

$$I = \frac{0.80\,\text{V}}{2.0\,\Omega} = 0.40\,\text{A}$$

である。

答え：起電力0.80 V**、電流**0.40 A**。**

演習 5(2)棒が受ける磁力は、

$$\begin{aligned} F_{\text{mag}} &= BI\ell \\ &= (0.40\,\text{T})(0.40\,\text{A})(0.50\,\text{m}) \\ &= 0.080\,\text{N} \end{aligned}$$

である。

等速運動で摩擦がないため、外力の大きさもこれと等しい。

答え：磁力と外力の大きさはいずれも$0.080\,\mathrm{N}$。

演習 5(3)外力の仕事率は、

$$\begin{aligned} P_{\text{ext}} &= F_{\text{ext}} v \\ &= (0.080\,\mathrm{N})(4.0\,\mathrm{m/s}) \\ &= 0.32\,\mathrm{W} \end{aligned}$$

である。

答え：$0.32\,\mathrm{W}$

演習 5(4)元の値と新しい値を比較する。

量	元の値	新しい値	倍率
起電力	$0.40\,\mathrm{V}$	$0.80\,\mathrm{V}$	2 倍
電流	$0.20\,\mathrm{A}$	$0.40\,\mathrm{A}$	2 倍
磁力	$0.040\,\mathrm{N}$	$0.080\,\mathrm{N}$	2 倍
外力の仕事率	$0.080\,\mathrm{W}$	$0.32\,\mathrm{W}$	4 倍

起電力は速さに比例し、抵抗一定なら電流も速さに比例する。磁力も電流に比例するため 2 倍となる。

一方、外力の仕事率は$F_{\text{ext}} v$である。速さを 2 倍にすると外力も 2 倍になるため、その積は 4 倍となる。

また、抵抗で 1 秒あたりに発生する熱は$I^2 R$なので、電流 2 倍に対して 4 倍となる。

答え：起電力・電流・磁力は 2 倍、外力の仕事率は 4 倍である。仕事率は力と速さの両方に比例し、この場合は両方が 2 倍になるためである。

演習 6 の解答・解説

演習 6(1)棒が掃く面積は、

$$\begin{aligned} \Delta S &= \ell \Delta x \\ &= (0.50\,\mathrm{m})(0.80\,\mathrm{m}) \\ &= 0.40\,\mathrm{m}^2 \end{aligned}$$

となる。

答え：$0.40\,\mathrm{m}^2$

演習 6(2)正の法線方向は紙面手前で、磁場はその反対の紙面奥向きである。

したがって、増加する面積に対応する磁束は負となる。

$$\begin{aligned} \Delta \Phi &= -B \Delta S \\ &= -(0.60\,\mathrm{T})\left(0.40\,\mathrm{m}^2\right) \\ &= -0.24\,\mathrm{Wb} \end{aligned}$$

答え：$-0.24\,\mathrm{Wb}$

演習 6(3)ファラデーの法則に代入する。

$$\begin{aligned} E_{\mathrm{loop}} &= -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \\ &= -\frac{-0.24\,\mathrm{Wb}}{0.40\,\mathrm{s}} \\ &= +0.60\,\mathrm{V} \end{aligned}$$

答え：$+0.60\,\mathrm{V}$

演習 6(4)全抵抗は$3.0\,\Omega$なので、

$$I = \frac{0.60\,\mathrm{V}}{3.0\,\Omega} = 0.20\,\mathrm{A}$$

である。

起電力が正なので、電流は定めた正の周回方向である反時計回りに流れる。

答え：$0.20\,\mathrm{A}$**、反時計回り**。

演習 6(5)棒の速さは、

$$\begin{aligned} v &= \frac{\Delta x}{\Delta t} \\ &= \frac{0.80\,\mathrm{m}}{0.40\,\mathrm{s}} \\ &= 2.0\,\mathrm{m/s} \end{aligned}$$

である。

したがって、

$$\begin{aligned} E &= B\ell v \\ &= (0.60\,\mathrm{T})(0.50\,\mathrm{m})(2.0\,\mathrm{m/s}) \\ &= 0.60\,\mathrm{V} \end{aligned}$$

となる。

答え：運動起電力の大きさは$0.60\,\mathrm{V}$**であり、（3）の符号付き起電力の大きさと一致する。**

正の周回方向を固定すると、電流の向きも矛盾なく説明できる。

演習 7 の解答・解説

演習 7(1)回路全体が同じ一様な磁場の中で、形と面積を保ったまま平行移動する。

磁場の大きさと向き、回路の面積と向きが変わらないため、回路を貫く磁束も変化しない。

答え：磁束は変化しない。

演習 7(2)磁束の変化が 0 なので、

$$E_{\text{loop}} = -\frac{0\,\text{Wb}}{\Delta t} = 0\,\text{V}$$

となる。

答え：$0\,\text{V}$

演習 7(3)回路一周の起電力が 0 であり、ほかの電源もない。

したがって、与えられた理想条件では持続する回路電流は流れない。

答え：持続する電流は流れない。

演習 7(4)回路全体が動いているため、右側の辺だけでなく、左側の辺やほかの部分も動いている。

右側の辺に対応する運動起電力だけを取り出して、回路一周の起電力とすることはできない。

一様な磁場の中で長方形全体が同じ速度で平行移動する場合、向かい合う辺の起電力の寄与は打ち消し合う。

答え：右側の辺だけでなく回路全体を考える必要がある。形と面積を保って一様磁場中を平行移動するため磁束は変わらず、一周の起電力は 0 となる。

演習 8 の解答・解説

演習 8(1)棒が静止しているので、棒とともに動く電荷の速度も 0 である。

時間的に変化しない磁場から、棒の運動による起電力は生じない。

答え：$0\,\text{V}$

演習 8(2)磁場が 0 であれば、電荷に働く磁力も 0 となる。

したがって、棒が動いていても磁場による電荷分離は生じない。

答え：$0\,\text{V}$

演習 8(3)棒の速度が磁場と平行な場合、電荷の運動に対して磁力は働かない。

そのため、棒の端と端を分けるような運動起電力も生じない。

答え：$0\,\text{V}$

演習 8(4)$E = B\ell v$は、磁場・棒の長さ方向・速度方向が互いに垂直という条件で使う式である。

単に棒が動いているだけでは、その条件を満たすとは限らない。

答え：磁場や速度の向きを確認せずに$E = B\ell v$**を適用している点が誤りである。運動起電力は、運動方向と磁場の向きなどの条件によって 0 になる場合もある。**

演習 9 の解答・解説

演習 9(1)**誤り**。

開回路では電荷が回路を一周する経路がなく、平衡後の持続電流は流れない。

しかし、棒を磁場中で動かすと自由電荷が磁力を受けて分離するため、両端に電位差が生じ得る。

したがって、電流が 0 であることから電位差も 0 だとは結論できない。

演習 9(2)**誤り**。

自由電荷に働く磁力は、その電荷の速度と垂直なので、磁力自体は電荷に仕事をしない。

回路に供給されるエネルギーの源は、導体棒を動かしている人などがする外力の仕事である。

磁場は電荷の運動方向を変える働きをするが、磁力が電荷に直接仕事をしてエネルギーを生み出すわけではない。

演習 9(3)**正しい**。

閉回路に電流が流れると、棒はその運動を妨げる向きの磁力を受ける。

摩擦などを無視した等速運動では、磁力とつり合う外力が必要であり、その外力は棒に正の仕事をする。

与えられた理想条件では、この外力の仕事が電気的なエネルギーを通して抵抗の熱へ変わる。

演習 9(4)**正しい**。

磁束密度、棒の長さ、抵抗が一定なら、

$$E = B\ell v$$

より起電力は速さに比例する。

また、

$$I = \frac{E}{R}$$

より電流も速さに比例する。

速さを 2 倍にすると電流も 2 倍になるため、抵抗で 1 秒あたりに発生する熱I^2Rは 4 倍となる。

演習 9(5)**誤り**。

等速運動では棒の運動エネルギーが変化しないが、加速する場合は運動エネルギーが変化する。

そのため、外力の仕事がすべて抵抗の熱になるとは限らない。

摩擦、ほかのエネルギーの蓄積、運動エネルギーの変化などを考慮せずに、

$$F_{\text{ext}}\Delta x = I^2R\Delta t$$

を無条件に使用することはできない。

この関係は、等速運動で摩擦やほかの損失・エネルギー蓄積を無視できる条件の下で成り立つ。