第 106 講 ファラデーとレンツの法則

この講でできるようになること

- 磁束の変化から誘導起電力の大きさと符号を求められる。
- 磁場の向きと磁束の増減を区別し、レンツの法則から誘導電流の向きを判断できる。
- 磁束–時刻グラフの傾きから区間ごとの誘導起電力を求められる。
- 閉回路と開回路の違いを説明し、誘導起電力と誘導電流を区別できる。

1. 磁石を動かすと、なぜ電流が流れるのか

磁石を近づける場合

導線を何回か巻いたものをコイルという。コイルに棒磁石を近づけると、コイルを貫く磁束が変化する。

抵抗をもつ導線で閉じたコイルをつくり、棒磁石を近づけると、磁石が動いている間に電流が流れることがある。この現象を**電磁誘導**、それによって生じる電流を**誘導電流**という。

次の模式図では、左に棒磁石、右に固定したコイルを置く。棒磁石の N 極がコイルを向いている。

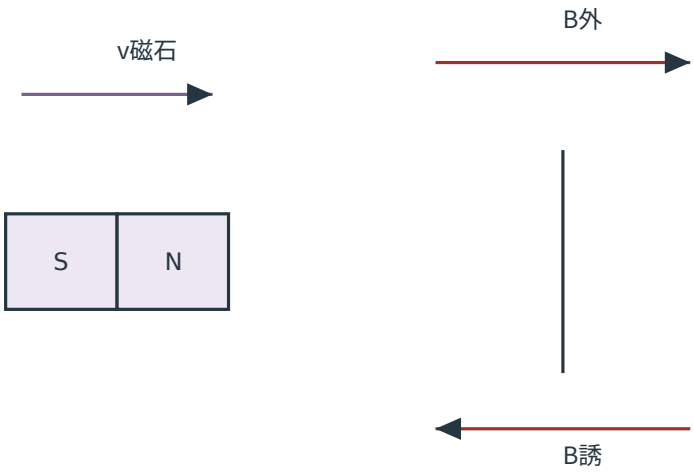

図 1　接近時はコイルの磁石側が N 極。上の矢印は磁石の速度。

図の縦線はコイルを横から見た投影であり、導線が切れていることを表していない。$B_{外}$ は棒磁石がつくる外部磁場、$B_{誘}$ は誘導電流がつくる磁場を表す。上下の矢印は、コイル内部での磁場の向きを見分けられるように位置をずらして描いたものである。

磁石が近づくと、コイルを右向きに貫く外部磁束が増える。するとコイルには、その**増加を妨げる左向きの磁場**をつくる誘導電流が流れる。

コイルの磁石側の面は N 極のように働くため、近づく磁石の N 極と反発する。

磁石を遠ざける場合

今度は、同じ棒磁石の N 極をコイルから遠ざける。

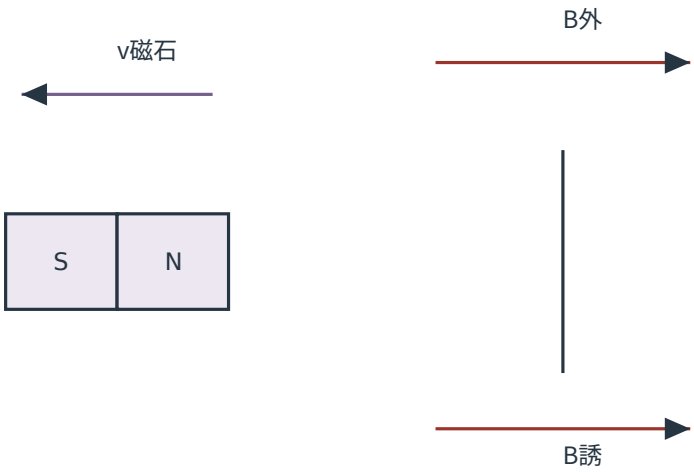

図 2　遠ざかる時はコイルの磁石側が S 極。上の矢印は磁石の速度。

外部磁場は先ほどと同じ右向きである。しかし、磁石が遠ざかるため、右向きの外部磁束は減少する。

このとき誘導電流がつくる磁場は右向きになる。減りつつある磁束を保とうとする向きである。

コイルの磁石側の面は S 極のように働き、遠ざかる N 極を引きつける。

ここで重要なのは、**磁石がつくる磁場の向きは同じでも、磁束が増えるか減るかによって誘導の向きが反転する**ことである。

ミライポイント｜誘導は変化に抵抗する

磁石が近づくと反発し、遠ざかると引きつける。

どちらの場合も、誘導によって生じる作用は磁石とコイルの相対的な運動に抵抗する。もとの磁場をいつも打ち消すのではなく、磁束の**増加または減少**を妨げるのである。

2. 磁束と正方向を決める

1 巻あたりの磁束

第 105 講で扱った磁束を Φ（ファイ）と表す。単位はウェーバ Wb である。

ここでは、コイルの 1 巻が囲む面を貫く磁束を Φ とする。磁束は向きを考慮した符号付きの量である。

磁束の符号を決めるには、まず面に垂直な方向である**法線**のうち、一方を正方向と定める必要がある。

例えば、紙面に描いた円形コイルを手前から観察し、正の法線を紙面手前向きとすると、次の対応になる。

磁場の向き	記号	磁束の符号
紙面手前向き	⊙	正
紙面奥向き	⊗	負

⊙は矢印の先端を正面から見た記号、⊗は矢印の後端を見た記号である。

磁場が正の法線方向に貫くときは正の磁束、反対方向に貫くときは負の磁束として扱う。

正の周回方向と右手の関係

コイルに沿って一周する向きも、正と負を決める。

ここでは右手を使って、正の法線と正の周回方向を対応させる。

右手の親指を正の法線方向へ向けたとき、残りの 4 本の指が曲がる向きを正の周回方向とする。

したがって、正の法線が紙面手前を向く場合、紙面手前から見た正の周回方向は**反時計回り**である。

逆に、正の法線が紙面奥を向く場合、手前から見た正の周回方向は時計回りになる。

この約束は後で誘導起電力の正負と電流の向きを対応させるために必要である。

コイルの巻数と磁束

同じ形の巻線が N 巻あり、各巻を同じ磁束 Φ が貫くとする。N は巻数を表す正の整数である。

このときコイル全体の鎖交磁束は $N\Phi$ である。

表す量	記号
1 巻を貫く符号付き磁束	Φ
コイルの巻数	N
各巻に同じ磁束が鎖交するときの鎖交磁束	$N\Phi$

巻数 N と棒磁石の N 極は別の意味である。また、すでに $N\Phi$ とした量に、巻数をもう一度掛けてはならない。

3. ファラデーの法則

磁束が変わる速さと誘導起電力

磁束が変化すると、その変化によって回路に電流を流そうとする作用が生じる。

この作用の強さを電圧の単位で表したものが**誘導起電力**である。単位はボルト V である。

誘導起電力の大きさは、単に磁束が大きいかどうかではなく、磁束がどれだけの時間でどれだけ変化したかに関係する。

初めの時刻を t_1、後の時刻を t_2 とし、$t_2 > t_1$ とする。

時間の変化 Δt と 1 巻あたりの磁束の変化 $\Delta\Phi$ を次のように定める。

$$\Delta t = t_2 - t_1 > 0$$

$$\Delta\Phi = \Phi_{\text{後}} - \Phi_{\text{前}}$$

ここで、$\Delta\Phi$ は必ず**後の値から前の値を引く**。磁束が正方向へ増加すれば正、正方向へ減少すれば負になる。

ファラデーの電磁誘導の法則

巻数 N が一定で、各巻に同じ符号付き磁束 Φ が鎖交するコイルについて、時間 $\Delta t > 0$ の間の平均誘導起電力 $E_{\text{平均}}$ は次の関係を満たす。

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

この式の負号は、定めた正の周回方向に対する誘導起電力の向きを表す。

誘導起電力の大きさは次の式で求められる。

$$|\,E_{\text{平均}}\,| = N\frac{|\,\Delta\Phi\,|}{\Delta t}$$

磁束が各時間区間で一定の割合で変化する場合、その区間内の誘導起電力は一定であり、区間平均の値と一致する。

一方、初めと終わりの磁束だけが分かっていても、その途中の変わり方まで分かるとは限らない。この式から直接求められるのは、指定した時間区間についての平均誘導起電力である。

単位を確認する

磁束の単位は Wb、時間の単位は s である。

$$1\,\text{Wb/s} = 1\,\text{V}$$

また、ミリウェーバはウェーバの 1000 分の 1 である。

$$1\,\text{mWb} = 0.001\,\text{Wb}$$

したがって、mWb で与えられた磁束は Wb に直してから計算すると、単位の間違いを防げる。

誘導起電力の符号を読む

正の法線を手前、正の周回方向を手前から見て反時計回りに定める。

磁束の変化	$\Delta\Phi$	平均誘導起電力の符号
符号付き磁束が増加	正	負
符号付き磁束が減少	負	正
磁束が変化しない	0	0

誘導起電力が負であることは、電圧が常に負になるという意味ではない。定めた正方向とは逆向きの起電力が生じることを表している。

例題 1

100 巻のコイルがあり、各巻を貫く磁束が 1.0 s の間に 0 mWb から +2.0 mWb へ一定の割合で変化した。

正の法線は紙面手前向き、正の周回方向は手前から見て反時計回りとする。

コイルは他の電源を含まず、全抵抗 $R = 5.0\,\Omega$ の抵抗だけで構成された閉回路につながっている。自己誘導を無視できるものとする。

例題 1(1) この時間区間の磁束の変化 $\Delta\Phi$ を Wb で求めよ。

例題 1(2) 誘導起電力の符号付きの値と大きさを求めよ。

例題 1(3) 誘導電流の向きと大きさを求めよ。

例題 1 の解答・解説

例題 1(1)の解答・解説

初めと後の磁束を Wb に直す。

$$\Phi_{\text{前}} = 0\,\text{Wb}$$

$$\Phi_{\text{後}} = +0.0020\,\text{Wb}$$

よって、

$$\begin{aligned}\Delta\Phi &= \Phi_{\text{後}} - \Phi_{\text{前}} \\ &= (+0.0020\,\text{Wb}) - (0\,\text{Wb}) \\ &= +0.0020\,\text{Wb}\end{aligned}$$

答え：$+0.0020\,\text{Wb}$

例題 1(2)の解答・解説

ファラデーの法則に代入する。

$$\begin{aligned}E_{\text{平均}} &= -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \\ &= -100 \times \frac{+0.0020\,\text{Wb}}{1.0\,\text{s}} \\ &= -0.20\,\text{V}\end{aligned}$$

磁束は一定の割合で増加しているので、この区間内の誘導起電力は一定である。

負号は正の周回方向とは逆向きの起電力であることを表す。大きさは 0.20 V である。

答え：$-0.20\,\text{V}$、**大きさ** $0.20\,\text{V}$

例題 1(3)の解答・解説

他の電源がなく、抵抗だけで構成された閉回路なので、電流は誘導起電力と同じ符号の向きに流れる。

正の周回方向を正とした電流を I とすると、オームの法則より、

$$\begin{aligned} I &= \frac{E}{R} \\ &= \frac{-0.20\,\mathrm{V}}{5.0\,\Omega} \\ &= -0.040\,\mathrm{A} \end{aligned}$$

負号は反時計回りと逆、すなわち紙面手前から見て時計回りを表す。

答え：時計回り、大きさ $0.040\,\mathrm{A}$

ミライポイント｜符号と大きさを分ける

磁束変化の計算では、最初に正方向を決める。

その後、$\Delta\Phi = \Phi_{後} - \Phi_{前}$ から符号を決め、ファラデーの法則で誘導起電力を求める。

電流の向きまで求める場合は、回路が閉じていることや他の電源の有無も確認する。

4. レンツの法則で誘導電流の向きを決める

妨げる対象は磁束の変化

ファラデーの法則の負号が示す物理的な向きを、より直接的に説明するのがレンツの法則である。

レンツの法則

電磁誘導によって生じる誘導電流は、**その誘導電流がつくる磁場が、もとの磁束の変化を妨げる向き**に流れる。

例えば、紙面奥向きの外部磁場が強くなっている場合を考える。

奥向きの外部磁束が増加しているので、コイルは手前向きの誘導磁場をつくり、その増加を妨げる。

一方、同じ奥向きの外部磁場が弱くなっている場合、コイルは奥向きの誘導磁場をつくり、その減少を妨げる。

円形電流と右手の法則

円形の導線に電流が流れると、導線の周囲に磁場が生じる。

右手の 4 本の指を円形電流の向きに曲げると、親指の向きが円の中心付近の磁場の向きになる。

©ミライコーチング

紙面手前から観察すると、次の関係である。

誘導電流の向き	中心付近の誘導磁場
反時計回り	手前向き ⊙
時計回り	奥向き ⊗

電流の向きは、正電荷が動くとした場合の慣用的な電流の向きである。金属導線内の電子の移動方向とは逆である。

奥向きの外部磁束を増やす場合と減らす場合

次の図は、コイルの正面から見た比較である。どちらも外部磁場は紙面奥向きであり、棒磁石がつくる磁場を考える。

コイルは他の電源を含まない抵抗のみの閉回路を形成し、全抵抗は正、自己誘導は無視できるものとする。

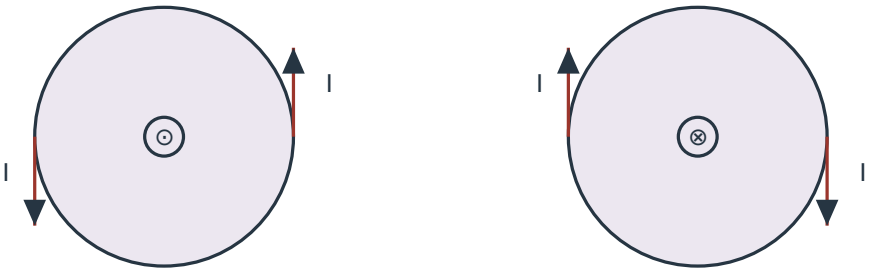

図 3　コイルを正面から見る。左は外部の奥向き磁束が増加、右は減少。円周の矢印が誘導電流。

大きな円周がコイルの導線を表し、中央の小さな円内の記号は誘導電流がつくる磁場の向きを表す。中央の記号は外部磁場を表していない。円内の灰色の塗りは図形を区別するための表示であり、導体の円板を表しているわけではない。

左側では奥向きの外部磁束が増加している。誘導磁場は手前向きとなり、誘導電流は反時計回りになる。

右側では奥向きの外部磁束が減少している。誘導磁場は奥向きとなり、誘導電流は時計回りになる。

これは最初に見た棒磁石の接近・遠去とも対応する。磁石側からコイルを見ると、N 極がつくる外部磁場はコイルを紙面奥向きに貫くからである。

方向判断の順序

電流の向きを求めるときは、次の順序で考える。

1. 外部磁場がどちらを向いているかを確認する。
2. その向きの磁束が増加しているのか、減少しているのかを判断する。
3. 変化を妨げる誘導磁場の向きを決める。
4. 右手の法則から誘導電流の向きを求める。

©ミライコーチング

方向を判断するときは、どちら側からコイルを見ているかも明記する。同じ電流でも、反対側から見れば時計回りと反時計回りの表示が逆になる。

例題 2

紙面に平行な固定された 25 巻の円形コイルがある。各巻に同じ外部磁束が鎖交するものとする。

紙面手前向きを正の法線、手前から見た反時計回りを正の周回方向とする。

外部磁場は紙面奥向きであり、各巻を貫く磁束が 0.50 s の間に $-1.0\,\mathrm{mWb}$ から $-3.0\,\mathrm{mWb}$ へ一定の割合で変化した。

コイルは他の電源を含まず、全抵抗 $R = 2.0\,\Omega$ の抵抗だけからなる閉回路である。自己誘導は無視できるものとする。

例題 2(1) 磁束の変化 $\Delta\Phi$ と、誘導起電力の符号付きの値を求めよ。

例題 2(2) 誘導電流がつくる磁場の向きと、紙面手前から見た誘導電流の向きを答えよ。

例題 2(3) 誘導電流の大きさを求めよ。

例題 2 の解答・解説

例題 2(1)の解答・解説

磁束の値は負であるが、変化を求めるときも後の値から前の値を引く。

$$\begin{aligned}\Delta\Phi &= (-0.0030\,\mathrm{Wb}) - (-0.0010\,\mathrm{Wb}) \\ &= -0.0020\,\mathrm{Wb}\end{aligned}$$

よって、

$$\begin{aligned}E_{\text{平均}} &= -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \\ &= -25 \times \frac{-0.0020\,\mathrm{Wb}}{0.50\,\mathrm{s}} \\ &= +0.10\,\mathrm{V}\end{aligned}$$

答え：$\Delta\Phi = -0.0020\,\mathrm{Wb}$、$E = +0.10\,\mathrm{V}$

例題 2(2)の解答・解説

磁束は $-1.0\,\mathrm{mWb}$ から $-3.0\,\mathrm{mWb}$ になったので、奥向きの外部磁束の大きさが増加している。

この増加を妨げるため、誘導電流は手前向きの磁場をつくる。

右手の法則から、手前向きの磁場をつくる電流は、紙面手前から見て反時計回りである。

答え：誘導磁場は手前向き、誘導電流は反時計回り

例題 2(3)の解答・解説

抵抗だけからなる閉回路なので、

$$\begin{aligned} I &= \frac{E}{R} \\ &= \frac{+0.10\,\mathrm{V}}{2.0\,\Omega} \\ &= +0.050\,\mathrm{A} \end{aligned}$$

正の電流は反時計回りであり、例題 2(2)の結果と一致する。

答え：0.050 A

磁場の向きだけで電流は決まらない

同じ奥向きの外部磁場であっても、それが増加する場合と減少する場合では、誘導電流の向きが反対になる。

レンツの法則は、磁場そのものの向きを反対にするという法則ではない。磁束の変化を妨げる向きを決める法則である。

5. 磁束–時刻グラフから起電力を読む

グラフの傾きが表すもの

磁束の変化を時間に沿って表すと、誘導起電力の判断がしやすくなる。

横軸を時刻 t、縦軸を 1 巻あたりの磁束 Φ とする。指定した区間について、

$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

は、磁束–時刻グラフの傾きである。

ファラデーの法則より、巻数が一定で各巻に同じ磁束が鎖交する場合、誘導起電力の区間平均はグラフの傾きに $-N$ を掛けた値になる。

グラフの形	磁束の変化	平均誘導起電力の符号
右上がり	増加	負
水平	変化なし	0
右下がり	減少	正

同じ時間幅であれば、傾きが急なほど平均誘導起電力の大きさが大きくなる。

ただし、ある区間の初めと終わりの値が同じだからといって、その途中でも磁束が一定であったとは限らない。

折れ線グラフの読み取り

折れ線が直線となっている各区間では、磁束の変化する割合が一定であり、誘導起電力も一定である。

一方、折れ曲がる点では、前後の直線区間の傾きが異なる。ここでは折れ曲がる瞬間の起電力は求めず、各直線区間の値を扱う。

例題 3

100 巻のコイルがあり、各巻に同じ磁束が鎖交する。正の法線は紙面手前向き、正の周回方向は手前から見て反時計回りである。

次のグラフは、各巻を貫く符号付き磁束 Φ の時間変化を表す。各点の間は直線的に変化し、横軸の等しい間隔はそれぞれ 1.0 s を表す。

グラフは各時刻を等間隔のカテゴリとして配置したものであり、時間の原点は横軸左端ではなく「0 s」のデータ点である。縦の数値は mWb 単位である。

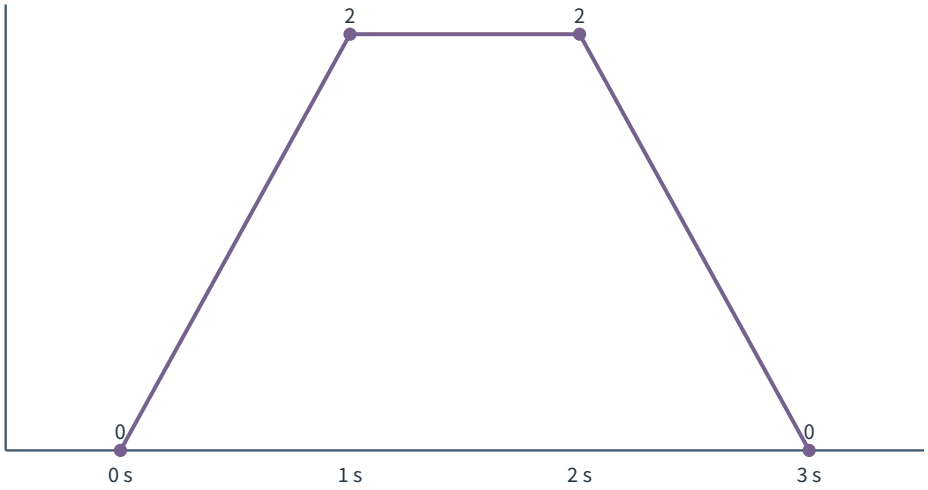

図 4　1 巻あたり磁束 Φ（縦の数値、mWb）の時間変化。横の等間隔は各 1 s、点間は直線。

例題 3(1) 0 s から 1 s の区間について、磁束の変化率と誘導起電力を求めよ。

例題 3(2) 1 s から 2 s、2 s から 3 s の各区間の誘導起電力を求めよ。

例題 3(3) 0 s から 3 s の全区間の平均誘導起電力を求めよ。

例題 3(4) 全区間の平均誘導起電力が 0 であることから、全過程で誘導起電力が 0 であるといえるか。理由とともに答えよ。

例題 3 の解答・解説

例題 3(1)の解答・解説

0 s から 1 s の間に、磁束は 0 mWb から +2.0 mWb に増加する。

傾きは、

$$\begin{aligned}\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} &= \frac{(+2.0-0)\,\mathrm{mWb}}{1.0\,\mathrm{s}} \\ &= +2.0\,\mathrm{mWb/s}\end{aligned}$$

これを Wb/s に直すと、+0.0020 Wb/s である。

$$\begin{aligned}E &= -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \\ &= -100\times(+0.0020\,\mathrm{Wb/s}) \\ &= -0.20\,\mathrm{V}\end{aligned}$$

答え：傾き +2.0 mWb/s**、起電力** −0.20 V

例題 3(2)の解答・解説

1 s から 2 s の区間では磁束が一定なので、

$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = 0\,\mathrm{Wb/s}$$

したがって、

$$E = 0\,\mathrm{V}$$

次に、2 s から 3 s の区間では、磁束が +2.0 mWb から 0 mWb へ減少する。

$$\begin{aligned}\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} &= \frac{(0-2.0)\,\mathrm{mWb}}{1.0\,\mathrm{s}} \\ &= -2.0\,\mathrm{mWb/s} \\ &= -0.0020\,\mathrm{Wb/s}\end{aligned}$$

よって、

$$\begin{aligned}E &= -100\times(-0.0020\,\mathrm{Wb/s}) \\ &= +0.20\,\mathrm{V}\end{aligned}$$

答え：1〜2 s **は** 0 V**、**2〜3 s **は** +0.20 V

例題 3(3)の解答・解説

全区間の最初と最後では、どちらも磁束が 0 mWb である。

$$\Delta\Phi = (0-0)\,\mathrm{Wb}$$
$$= 0\,\mathrm{Wb}$$

したがって、

$$E_{\text{平均}} = -100 \times \frac{0\,\mathrm{Wb}}{3.0\,\mathrm{s}} = 0\,\mathrm{V}$$

答え：0 V

例題 3(4)の解答・解説

全過程で 0 であるとはいえない。

実際には、0〜1 s で −0.20 V、2〜3 s で +0.20 V の起電力が生じている。

全区間の磁束変化が 0 ということは、最終的に磁束が元に戻ったことを表すだけであり、途中で変化しなかったことまでは意味しない。

答え：いえない。途中では正負の誘導起電力が生じているため。

ミライポイント｜グラフは区間ごとに読む

磁束–時刻グラフでは、磁束の値そのものと傾きを区別する。

磁束が正であっても、傾きは正、0、負のいずれにもなり得る。誘導起電力を求めるときは、指定された区間の傾きを使う。

6. 回路が開いている場合と閉じている場合

誘導起電力と誘導電流は別の量

電磁誘導では、磁束が変化することによって誘導起電力が生じる。

しかし、誘導起電力が生じることと、実際に閉回路を一周する電流が流れることは同じではない。

例えば、磁束が変化しているコイルについて、導線をつないで閉回路をつくる場合と、導線に切れ目を入れて開回路にする場合を比べる。

回路の状態	誘導起電力	持続する周回電流
抵抗だけの閉回路	磁束変化によって生じる	流れ得る
切れ目のある開回路	磁束変化によって生じる	流れない

開回路で周回電流が流れないことは、誘導起電力の原因となる磁束変化が消えたことを意味しない。

閉回路であっても、電流を求めるには回路の条件が必要である。

他の電源がなく、全抵抗が $R > 0$ の抵抗だけで構成され、自己誘導を無視できる閉回路では、正方向に対する符号付き誘導起電力 E と電流 I の間に、

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

の関係が成り立つ。

磁束変化が一定の割合である区間では、この式をその区間の一定誘導起電力に適用できる。

磁束が一定ならどうなるか

磁場が存在していても、コイルを貫く磁束が変化しなければ、

$$\Delta\Phi = 0\,\mathrm{Wb}$$

である。

その区間で磁束が一定なら、磁束変化による誘導起電力は 0 となる。

ここで、磁束が 0 であることと、磁束の**変化が 0 であること**を混同してはならない。

磁束が $+2.0\,\mathrm{mWb}$ のまま一定でも、誘導起電力は 0 である。

エネルギーはどこから来るのか

磁石をコイルへ近づけると、誘導による反発を受ける。この反発に逆らって磁石を動かし続けるには、外部から仕事をする必要がある。

抵抗をもつ閉回路に誘導電流が流れると、電気エネルギーが抵抗で熱に変わる。

外部から磁石を動かすためにした仕事は、このような電気エネルギーや熱などの供給源になる。

磁石を動かすだけで、外部からエネルギーを与えずに電気エネルギーを取り出し続けられるわけではない。

棒磁石の磁場について

棒磁石がつくる磁場は、一般には場所によって大きさや向きが異なる。

そのため、磁石とコイルの距離が与えられただけで、磁場が一様な場合の $\Phi = BS$ を無条件に使うことはできない。

棒磁石を使う場面では磁束の増減を定性的に判断し、数値計算では 1 巻あたりの磁束が与えられているなど、計算に必要な条件がそろっている場合を扱う。

演習問題

演習 1

50 巻の固定コイルがあり、各巻に同じ磁束が鎖交する。正の法線は紙面手前向き、正の周回方向は手前から見て反時計回りである。

各巻を貫く磁束が 0 Wb から +0.0040 Wb へ一定の割合で変化する。

演習 1(1) この変化が 0.20 s で起こる場合、誘導起電力の符号付きの値と大きさを求めよ。

演習 1(2) 磁束の変化量と巻数を変えず、変化にかかる時間だけを 0.10 s にした場合、誘導起電力の符号付きの値と大きさを求めよ。

演習 1(3) 変化にかかる時間を 0.20 s に戻し、巻数だけを 100 巻にした場合、誘導起電力の符号付きの値と大きさを求めよ。

演習 1(4) 演習 1(1)と比べ、演習 1(2)および演習 1(3)で誘導起電力の大きさが変わる理由を説明せよ。

各小問の解説は、末尾の演習 1(1)〜演習 1(4)の解答・解説を参照する。

演習 2

紙面に平行な 100 巻の円形コイルがある。正の法線は紙面手前向き、正の周回方向は手前から見て反時計回りである。

各巻を貫く外部磁束は、1.0 s の間に +2.0 mWb から 0 mWb へ一定の割合で減少した。

コイルは他の電源を含まず、全抵抗 $R = 10\,\Omega$ の抵抗だけからなる閉回路である。自己誘導は無視できるものとする。

演習 2(1) 誘導起電力の符号付きの値を求めよ。

演習 2(2) 誘導磁場の向きと、紙面手前から見た誘導電流の向きを答えよ。

演習 2(3) 誘導電流の大きさを求めよ。

各小問の解説は、末尾の演習 2(1)〜演習 2(3)の解答・解説を参照する。

©ミライコーチング

演習 3

固定した円形コイルの左側に棒磁石を置き、N 極をコイルへ向けている。

磁石以外の外部磁場はなく、コイルは他の電源を含まない抵抗のみの閉回路を形成している。回路の全抵抗は正で、自己誘導は無視できるものとする。

磁石側からコイルを観察する。磁石がつくる外部磁場は、コイルを紙面奥向きに貫くものとする。

演習 3(1) 棒磁石の N 極をコイルに近づけるとき、誘導電流がつくる磁場の向きと、誘導電流の向きを答えよ。

演習 3(2) 棒磁石の N 極をコイルから遠ざけるとき、誘導電流がつくる磁場の向きと、誘導電流の向きを答えよ。

演習 3(3) 接近時と遠去時で、コイルの磁石側がそれぞれ何極のように働くか答えよ。また、その作用が磁石の運動とどのような関係にあるか説明せよ。

演習 3(4) 棒磁石とコイルを相対的に静止させ、ほかに磁束を変える原因がない場合、十分に時間が経った後の誘導起電力と周回電流を答えよ。

各小問の解説は、末尾の演習 3(1)〜演習 3(4)の解答・解説を参照する。

©ミライコーチング

演習 4

80 巻のコイルがあり、各巻に同じ磁束が鎖交する。正の法線は紙面手前向き、正の周回方向は手前から見て反時計回りとする。

次のグラフは、1 巻あたりの符号付き磁束 Φ の時間変化を表す。各点の間は直線であり、横の等しい間隔はそれぞれ 1.0 s である。

横の時間原点は「0 s」のデータ点、縦の数値は mWb 単位である。

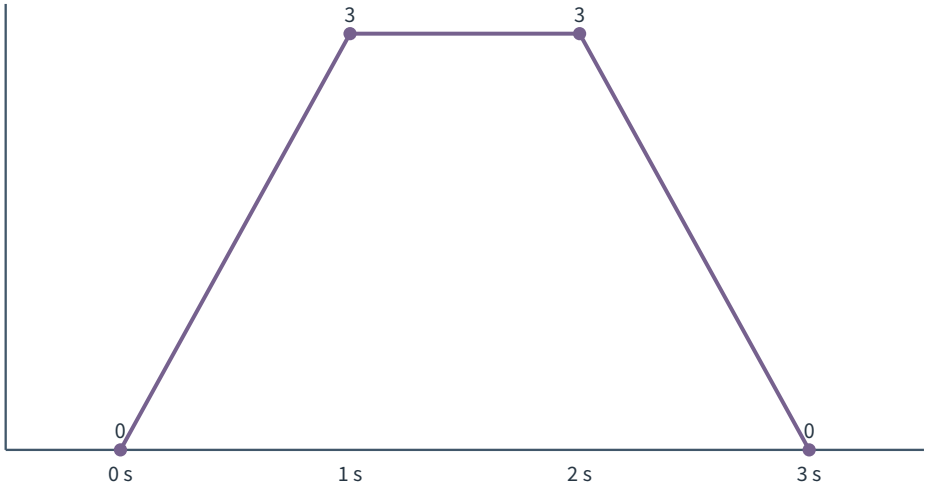

図 5　1 巻あたり磁束 Φ（mWb）の時間変化。横の等間隔は各 1 s で、点間は直線。

演習 4(1) 0〜1 s、1〜2 s、2〜3 s の各区間について、磁束–時刻グラフの傾きを求めよ。

演習 4(2) それぞれの区間の誘導起電力の符号付きの値を求めよ。

演習 4(3) 0〜3 s 全体の平均誘導起電力を求め、その結果だけから途中の誘導起電力がすべて 0 と判断できるか説明せよ。

各小問の解説は、末尾の演習 4(1)〜演習 4(3)の解答・解説を参照する。

演習 5

100 巻のコイルがあり、各巻に同じ磁束が鎖交している。正の法線は紙面手前向き、正の周回方向は手前から見て反時計回りである。

各巻を貫く磁束が 1.0 s の間に 0 mWb から +2.0 mWb へ一定の割合で変化する。

最初は他の電源を含まず、全抵抗 $R = 5.0\,\Omega$ の抵抗だけからなる閉回路とし、自己誘導は無視できるものとする。

演習 5(1) 閉回路の場合の誘導起電力の符号付きの値と、紙面手前から見た電流の向き、大きさを求めよ。

演習 5(2) 同じ外部磁束変化が続くまま、コイルの導線に切れ目を入れて開回路にした。持続する周回電流は流れるか答えよ。

演習 5(3) 開回路にしたことで、誘導起電力の原因である外部磁束の変化がなくなるといえるか。理由とともに答えよ。

各小問の解説は、末尾の演習 5(1)〜演習 5(3)の解答・解説を参照する。

演習 6

固定した 20 巻のコイルがあり、各巻に同じ磁束が鎖交する。紙面手前向きを正の法線とし、手前から見た反時計回りを正の周回方向とする。

最初の条件では、各巻の磁束は 1.0 s の間に +0.0020 Wb から +0.0040 Wb へ一定の割合で変化した。

演習 6(1) この条件での誘導起電力の符号付きの値を求めよ。

演習 6(2) 正の法線を紙面奥向き、正の周回方向を手前から見て時計回りに変更する。物理的な磁束変化は演習 6(1)と同じである。新しい符号規約での誘導起電力の値を求めよ。また、実際の誘導電流の向きが符号規約の変更だけで変わるか説明せよ。電流については、他の電源がなく、全抵抗が正の抵抗のみの閉回路で、自己誘導を無視できるものとする。

演習 6(3) 別の条件として、同じ 20 巻のコイルで各巻の磁束が +0.0015 Wb のまま 3.0 s 間一定であった。この区間の平均誘導起電力を求めよ。磁束が 0 でないことと関連づけて説明せよ。

各小問の解説は、末尾の演習 6(1)〜演習 6(3)の解答・解説を参照する。

©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)の解答・解説

磁束の変化は、

$$\Delta\Phi = (+0.0040 - 0)\,\mathrm{Wb} = +0.0040\,\mathrm{Wb}$$

である。

$$\begin{aligned} E &= -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \\ &= -50 \times \frac{+0.0040\,\mathrm{Wb}}{0.20\,\mathrm{s}} \\ &= -1.0\,\mathrm{V} \end{aligned}$$

負号は正の周回方向と逆向きであることを表す。

答え：$-1.0\,\mathrm{V}$**、大きさ** $1.0\,\mathrm{V}$

演習 1(2)の解答・解説

磁束変化量と巻数は変えず、時間だけを半分にする。

$$\begin{aligned} E &= -50 \times \frac{+0.0040\,\mathrm{Wb}}{0.10\,\mathrm{s}} \\ &= -2.0\,\mathrm{V} \end{aligned}$$

答え：$-2.0\,\mathrm{V}$**、大きさ** $2.0\,\mathrm{V}$

演習 1(3)の解答・解説

時間と 1 巻あたりの磁束変化量は演習 1(1)と同じで、巻数を 100 巻にする。

$$\begin{aligned} E &= -100 \times \frac{+0.0040\,\mathrm{Wb}}{0.20\,\mathrm{s}} \\ &= -2.0\,\mathrm{V} \end{aligned}$$

答え：$-2.0\,\mathrm{V}$**、大きさ** $2.0\,\mathrm{V}$

演習 1(4)の解答・解説

ファラデーの法則から、1 巻あたりの磁束変化量を一定にしたとき、誘導起電力の大きさは巻数に比例し、変化にかかる時間に反比例する。

演習 1(2)では同じ磁束変化が半分の時間で起こるため、大きさが 2 倍になる。

演習 1(3)では巻数が 2 倍になるため、大きさが 2 倍になる。

どちらも磁束の変化する符号は同じであるため、起電力の符号は変わらない。

答え：時間を半分にすることも、巻数を 2 倍にすることも、誘導起電力の大きさを 2 倍にするため。

演習 2 の解答・解説

演習 2(1)の解答・解説

磁束の変化は、

$$\begin{aligned}\Delta\Phi &= (0-2.0)\,\mathrm{mWb}\\ &= -2.0\,\mathrm{mWb}\\ &= -0.0020\,\mathrm{Wb}\end{aligned}$$

である。

$$\begin{aligned}E &= -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}\\ &= -100\times\frac{-0.0020\,\mathrm{Wb}}{1.0\,\mathrm{s}}\\ &= +0.20\,\mathrm{V}\end{aligned}$$

答え：$+0.20\,\mathrm{V}$

演習 2(2)の解答・解説

正の磁束が減少しているため、その減少を妨げる向きの誘導磁場が生じる。

正の法線は手前向きなので、誘導磁場も紙面手前向きである。

右手の法則から、手前向きの磁場をつくる電流は手前から見て反時計回りになる。

答え：誘導磁場は紙面手前向き、誘導電流は反時計回り

演習 2(3)の解答・解説

他の電源がない抵抗のみの閉回路なので、

$$\begin{aligned}I &= \frac{E}{R}\\ &= \frac{+0.20\,\mathrm{V}}{10\,\Omega}\\ &= +0.020\,\mathrm{A}\end{aligned}$$

である。

正の電流は反時計回りに対応する。

答え：$0.020\,\mathrm{A}$

演習 3 の解答・解説

演習 3(1)の解答・解説

N 極をコイルへ近づけると、コイルを紙面奥向きに貫く外部磁束の大きさが増加する。

この増加を妨げるため、誘導電流は紙面手前向きの磁場をつくる。

磁石側から見て手前向きの磁場をつくる電流は、反時計回りである。

答え：誘導磁場は紙面手前向き、電流は磁石側から見て反時計回り

演習 3(2)の解答・解説

N 極を遠ざけると、紙面奥向きの外部磁束が減少する。

誘導電流はその減少を妨げるため、紙面奥向きの磁場をつくる。

紙面奥向きの磁場をつくる電流は、磁石側から見て時計回りである。

答え：誘導磁場は紙面奥向き、電流は磁石側から見て時計回り

演習 3(3)の解答・解説

接近時には、コイルの磁石側の面が N 極のように働く。棒磁石の N 極との間に反発が生じ、接近する運動に抵抗する。

遠去時には、コイルの磁石側の面が S 極のように働く。棒磁石の N 極との間に引力が生じ、遠ざかる運動に抵抗する。

どちらの場合も、磁束の変化を妨げるように誘導電流が流れるというレンツの法則に対応する。

答え：接近時は磁石側が N 極となって反発し、遠去時は S 極となって引きつける。いずれも相対運動に抵抗する。

演習 3(4)の解答・解説

磁石とコイルが相対的に静止し、ほかに磁束を変える原因がなければ、各巻を貫く外部磁束は一定となる。

したがって、磁束変化による誘導起電力は 0 である。

抵抗のみの閉回路で、自己誘導を無視できるという条件では、誘導による周回電流も 0 となる。

答え：誘導起電力 0 V、周回電流 0 A

演習 4 の解答・解説

演習 4(1)の解答・解説

各区間の磁束変化量を、それぞれの経過時間で割る。

0〜1 s では、

$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{(+3.0 - 0)\,\mathrm{mWb}}{1.0\,\mathrm{s}} = +3.0\,\mathrm{mWb/s}$$

1〜2 s では、

$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{(+3.0 - 3.0)\,\mathrm{mWb}}{1.0\,\mathrm{s}} = 0\,\mathrm{mWb/s}$$

2〜3 s では、

$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{(0 - 3.0)\,\mathrm{mWb}}{1.0\,\mathrm{s}} = -3.0\,\mathrm{mWb/s}$$

となる。

答え：順に $+3.0\,\mathrm{mWb/s}$、$0\,\mathrm{mWb/s}$、$-3.0\,\mathrm{mWb/s}$

演習 4(2)の解答・解説

巻数は 80 巻である。各区間の傾きを Wb/s に直してから、-80 を掛ける。

0〜1 s では、

$$\begin{aligned} E &= -80 \times (+0.0030\,\mathrm{Wb/s}) \\ &= -0.24\,\mathrm{V} \end{aligned}$$

1〜2 s では、

$$E = -80 \times (0\,\mathrm{Wb/s}) = 0\,\mathrm{V}$$

2〜3 s では、

$$\begin{aligned} E &= -80 \times (-0.0030\,\mathrm{Wb/s}) \\ &= +0.24\,\mathrm{V} \end{aligned}$$

である。

答え：順に $-0.24\,\mathrm{V}$、$0\,\mathrm{V}$、$+0.24\,\mathrm{V}$

演習 4(3)の解答・解説

全区間の初めと終わりの磁束は、ともに 0 mWb である。

$$\begin{aligned} \Delta\Phi &= (0-0)\,\mathrm{Wb} \\ &= 0\,\mathrm{Wb} \end{aligned}$$

したがって、

$$\begin{aligned} E_{\text{平均}} &= -80 \times \frac{0\,\mathrm{Wb}}{3.0\,\mathrm{s}} \\ &= 0\,\mathrm{V} \end{aligned}$$

しかし、演習 4(2)で求めたように、途中では負の起電力も正の起電力も生じている。

全区間の平均値が 0 であっても、各区間の起電力が 0 とは限らない。

答え：全区間の平均は $0\,\mathrm{V}$**。途中の起電力がすべて 0 とは判断できない。**

演習 5 の解答・解説

演習 5(1)の解答・解説

各巻の磁束変化量は、

$$\begin{aligned}\Delta\Phi &= (+2.0 - 0)\,\mathrm{mWb} \\ &= +0.0020\,\mathrm{Wb}\end{aligned}$$

である。

誘導起電力は、

$$\begin{aligned}E &= -100 \times \frac{+0.0020\,\mathrm{Wb}}{1.0\,\mathrm{s}} \\ &= -0.20\,\mathrm{V}\end{aligned}$$

となる。

閉回路の電流は、

$$\begin{aligned}I &= \frac{E}{R} \\ &= \frac{-0.20\,\mathrm{V}}{5.0\,\Omega} \\ &= -0.040\,\mathrm{A}\end{aligned}$$

である。

負号は手前から見て時計回りを表す。

答え：誘導起電力 $-0.20\,\mathrm{V}$、電流は時計回り、大きさ $0.040\,\mathrm{A}$

演習 5(2)の解答・解説

開回路では導線に切れ目があるため、コイルを一周する閉じた電流の経路が存在しない。

したがって、持続する周回電流は流れない。

答え：流れない。周回電流は $0\,\mathrm{A}$ である。

演習 5(3)の解答・解説

開回路にしても、問題で指定した外部磁束の変化はそのまま続いている。

誘導起電力の原因は磁束の変化であり、回路に切れ目があるかどうかだけで磁束変化がなくなるわけではない。

したがって、この問題の条件では、開回路でも磁束変化による誘導起電力は生じる。ただし、持続する周回電流は流れない。

答え：いえない。外部磁束は変化し続けるため、誘導起電力の原因は残る。

演習 6 の解答・解説

演習 6(1)の解答・解説

磁束変化量は、

$$\begin{aligned}\Delta\Phi &= (+0.0040\,\mathrm{Wb}) - (+0.0020\,\mathrm{Wb}) \\ &= +0.0020\,\mathrm{Wb}\end{aligned}$$

である。

巻数は 20 巻なので、

$$\begin{aligned}E &= -20 \times \frac{+0.0020\,\mathrm{Wb}}{1.0\,\mathrm{s}} \\ &= -0.040\,\mathrm{V}\end{aligned}$$

となる。

答え：$-0.040\,\mathrm{V}$

演習 6(2)の解答・解説

正の法線を反転すると、同じ物理的な磁束であっても符号が反転する。

新しい符号規約では、

$$\Phi_{\text{前}} = -0.0020\,\mathrm{Wb}$$

$$\Phi_{\text{後}} = -0.0040\,\mathrm{Wb}$$

となる。

したがって、

$$\begin{aligned}\Delta\Phi &= (-0.0040\,\mathrm{Wb}) - (-0.0020\,\mathrm{Wb}) \\ &= -0.0020\,\mathrm{Wb}\end{aligned}$$

である。

誘導起電力は、

$$\begin{aligned}E &= -20 \times \frac{-0.0020\,\mathrm{Wb}}{1.0\,\mathrm{s}} \\ &= +0.040\,\mathrm{V}\end{aligned}$$

となる。

新しい正の周回方向は、紙面手前から見て時計回りである。

この正の向きに起電力が生じるので、抵抗のみの閉回路に流れる誘導電流も時計回りとなる。これは演習 6(1)の物理的な誘導方向と同じである。

符号規約を変更しても、実際の物理現象は変化しない。

答え：$+0.040\,\mathrm{V}$。**実際の誘導電流の向きは変わらず、手前から見て時計回りである。**

演習 6(3)の解答・解説

この区間では、各巻の磁束は $+0.0015\,\mathrm{Wb}$ のまま一定である。

よって、

$$\begin{aligned}\Delta\Phi &= (+0.0015\,\mathrm{Wb}) - (+0.0015\,\mathrm{Wb}) \\ &= 0\,\mathrm{Wb}\end{aligned}$$

である。

ファラデーの法則より、

$$\begin{aligned}E_{\text{平均}} &= -20 \times \frac{0\,\mathrm{Wb}}{3.0\,\mathrm{s}} \\ &= 0\,\mathrm{V}\end{aligned}$$

となる。

磁束そのものは 0 ではないが、磁束の変化量が 0 であるため、磁束変化による誘導起電力は生じない。

答え：$0\,\mathrm{V}$**。磁束が 0 でなくても、一定なら磁束変化による起電力は 0 である。**