

【20 電磁誘導】

- ・ファラデーの電磁誘導の法則

$$V = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \text{ [V]}$$

- ・磁束

$$\Phi = BS \text{ [Wb]}$$

- ・誘導起電力

$$V = vBl \text{ [V]}$$

- ・自己誘導の起電力

$$V = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \text{ [V]}$$

- ・相互誘導の起電力

$$V = -M \frac{\Delta I}{\Delta t} \text{ [V]}$$

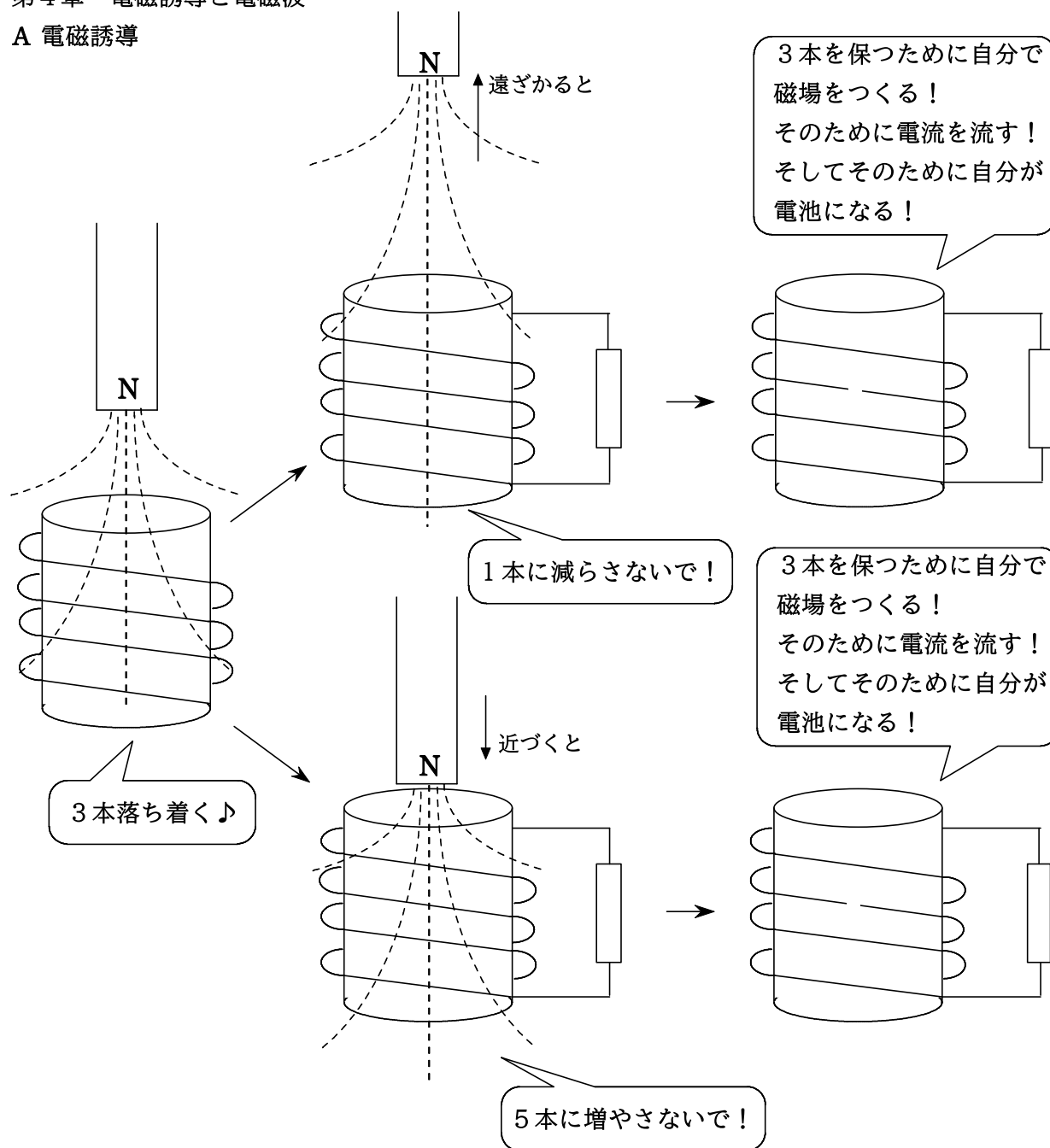
- ・コイルに蓄えられるエネルギー

$$U = \frac{1}{2}LI^2 \text{ [J]}$$

()年 ()科 ()組 ()番 名前()

第4章 電磁誘導と電磁波

A 電磁誘導



このとき生じた電圧のことを「」といい、
 このとき流れた電流のことを「」といい、
 このようにコイルが電池になる現象を「」といいます。

【レンツの法則】

誘導起電力は、それによって流れる誘導電流のつくる磁束が、外から加えられた磁束の変化を打ち消すような向きに生じる。

単純に言えば、コイルは磁場の変化が嫌いってことなんです！

ファラデーの電磁誘導の法則

誘導起電力を大きくする方法は3つあります。

- 1、強い磁石を使う
- 2、コイルの巻き数を増やす
- 3、磁場を素早く変化させる

ここで磁場の冊子のときにも説明しましたが、

磁束 = 磁束密度 × 面積 という関係式がありました。

【磁束】

[]

これをつかって、

【ファラデーの電磁誘導の法則】

$V =$

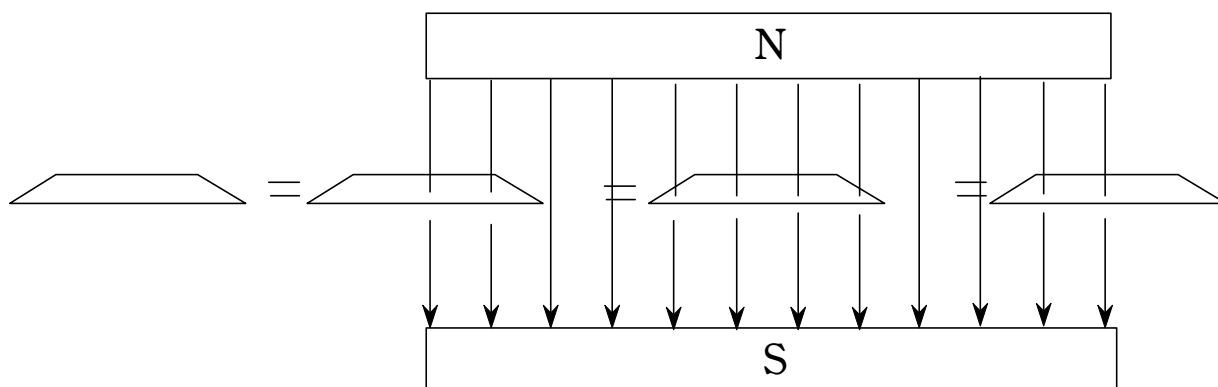
[]

N : 巻き数

この式の言うことは、「単位時間当たりの貫く磁束の変化量」が誘導起電力になるということです。さらに巻き数に比例します。また、マイナスがつくのは「変化を打ち消す」という意味なので、あまり気にしないでいいです。普段は、|絶対値|をつけて誘導起電力の大きさだけを求めます。

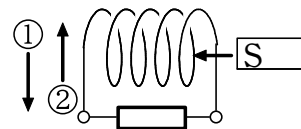
B 磁場を横切る導線に生じる誘導起電力

左から右にコイルが磁場を横切る状況を考えてみましょう。



磁場が一樣なら、入るときと出るときにコイル内の磁場が変化しますよね。念を押しておきますが、コイルは磁場が嫌いなのではなく、磁場の変化が嫌いなのです。

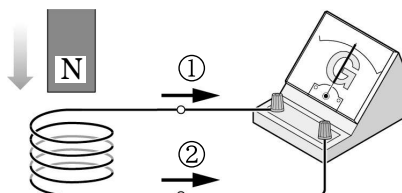
- 1 図のように、コイルに磁石の S 極を近づけると、コイルに流れる誘導電流の向きは ① か ② のどちらか。



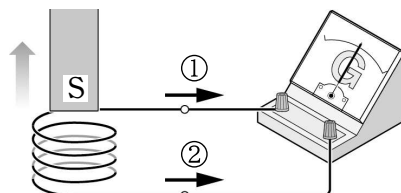
コイルに磁石の S 極を近づけると、コイルを貫く磁束が右向きに増加する。この磁束を打ち消す向きに誘導電流が流れるから、誘導電流は ② の向きに流れる。

- 2 次の各場合について、誘導電流は ① と ② のどちらの向きに流れるか。

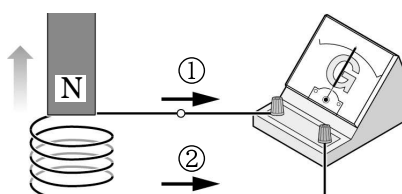
(1) N 極を近づける



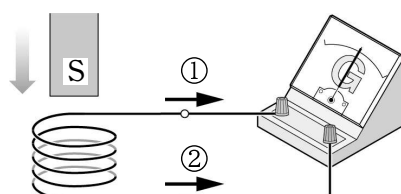
(2) S 極を遠ざける



(3) N 極を遠ざける



(4) S 極を近づける



【解答】 (1) ② (2) ② (3) ① (4) ①

- 3 100 回巻きのコイルを貫く磁束が 0.10 秒間に 2.5×10^{-4} Wb 変化した。コイルの両端に生じる誘導起電力の大きさは何 V か。

$$\left| V = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \right| \text{ より } |V| = 100 \times \frac{2.5 \times 10^{-4}}{0.10} = 0.25 \text{ V}$$

- 4 図 a のような、巻数 100、断面積 $3.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ のコイル内の磁束密度 $B[\text{T}]$ が、図 b のグラフのように変化する。磁束密度はコイル内では一様であるとし、図 a の矢印の向きを正とする。

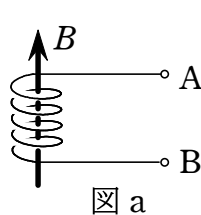


図 a

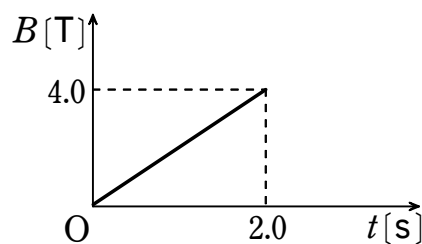


図 b

- (1) コイルの AB 間に生じる誘導起電力の大きさは何 V か。
 (2) AB 間に抵抗をつなぐと、流れる電流の向きは ① か ② のどちらか。
 ① A → コイル → B ② B → コイル → A

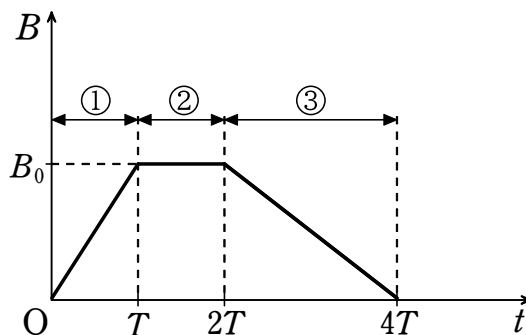
【指針】 誘導起電力の大きさは、「 $V = \left| -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \right|$ 」で求める。

【解答】 (1) $\Delta t = 2.0 \text{ s}$ の間に磁束密度は $\Delta B = 4.0 \text{ T}$ だけ増加している。「 $\Phi = BS$ 」より、磁束の変化 $\Delta \Phi$ と ΔB の間には、 $\Delta \Phi = \Delta B \cdot S$ が成り立つ。ファラデーの電磁誘導の法則より

$$V = \left| -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \right| = N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = N \frac{\Delta B \cdot S}{\Delta t} = 100 \times \frac{4.0 \times (3.0 \times 10^{-4})}{2.0} = 6.0 \times 10^{-2} \text{ V}$$

- (2) AB 間に抵抗をつなぐと、コイルには外から加えられた磁束の変化を打ち消すために、下向きに磁束を生じるような誘導電流 (B → コイル → A → 抵抗 の向き) が流れる。よって、②

- 5 断面積 S [m²], 巻数 N のコイル内の磁束密度 B [T] が, 図のように変化する。磁場はコイル内では一様であるとする。①～③ の区間について, 生じる誘導起電力の大きさをそれぞれ求めよ。



生じる誘導起電力の大きさを V [V] とすると, ファラデーの電磁誘導の法則より

$$V = \left| -N \frac{d\Phi}{dt} \right| = \left| -N \frac{dB \cdot S}{dt} \right| \text{ と表される。}$$

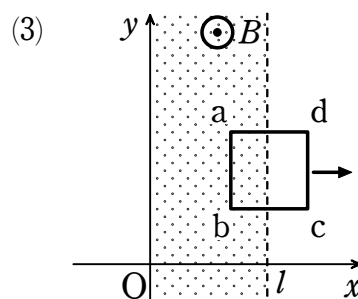
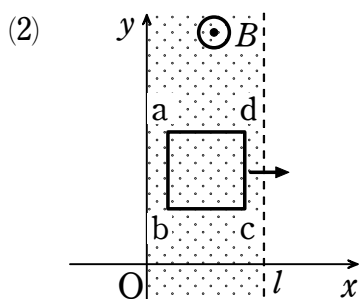
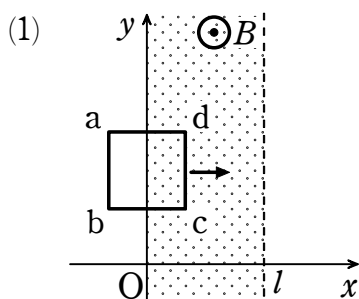
$$\textcircled{1} \quad V = \left| -N \frac{B_0 S}{T} \right| = \frac{NB_0 S}{T} \text{ [V]}$$

$$\textcircled{2} \quad 0 \text{ V}$$

$$\textcircled{3} \quad V = \left| -N \frac{(-B_0) S}{2T} \right| = \frac{NB_0 S}{2T} \text{ [V]}$$

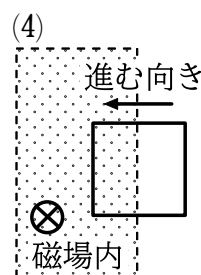
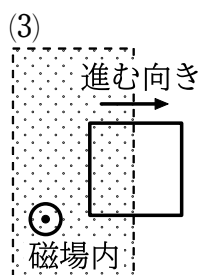
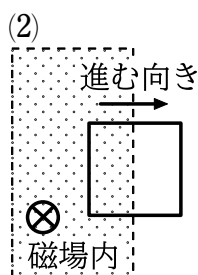
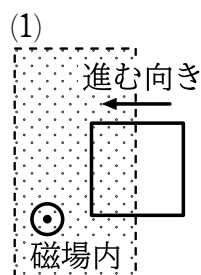
- 6 図のように, xy 平面内の $0 < x < l$ の領域に, 紙面の裏から表に向かう一様な磁場が存在している。いま, 正方形コイル $abcd$ を xy 平面内で x 軸の正の向きに一定の速さで動かした。コイルの位置が, (1)～(3) の各場合について, 誘導電流の流れる向きを次の ①～③ から選べ。

① $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$ ② $d \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow a$ ③ 誘導電流は流れない



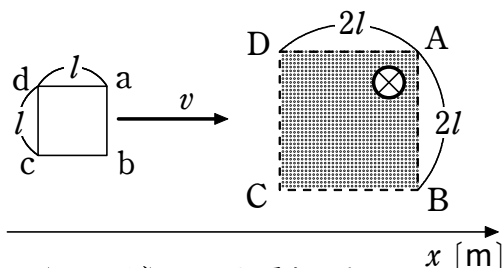
解答 (1) ② (2) ③ (3) ①

- 7 次の各場合のように, 平面上の一部(破線の内部)に紙面に垂直で一様な磁場がある(⊙は裏から表向き, ⊗は表から裏向きの磁場)。図のような向きにコイルを動かすと, 誘導電流は時計回りと反時計回りのどちらに流れるか。



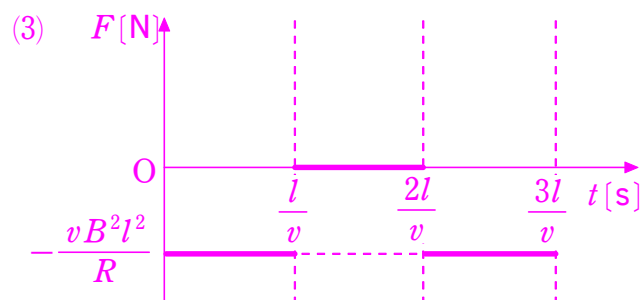
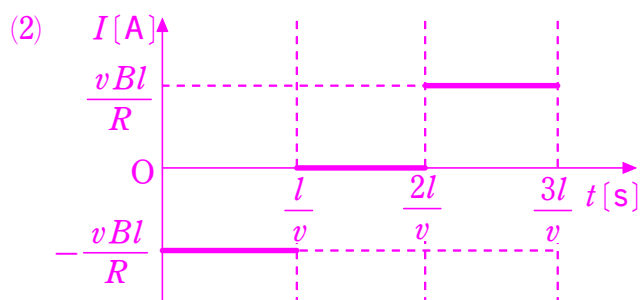
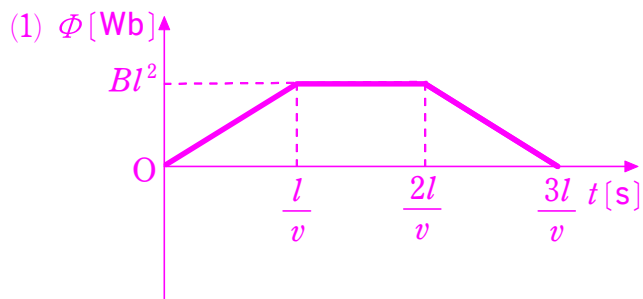
解答 (1) 時計回り (2) 時計回り (3) 反時計回り (4) 反時計回り

- 8 図のように、1 辺の長さ $2l$ [m] の正方形 ABCD の部分に、紙面に垂直で表から裏に向かう磁束密度 B [T] の一様な磁場がある。1 辺の長さが l [m] の 1 巻きの正方形コイル abcd を紙面上に置き、 x 軸の正の向きに一定の速さ v [m/s] で動かす。ただし、コイルの抵抗は R [Ω] とし、辺 bc および辺 BC は x 軸に平行で、辺 ab が辺 CD と重なった時刻を $t=0$ s とする。



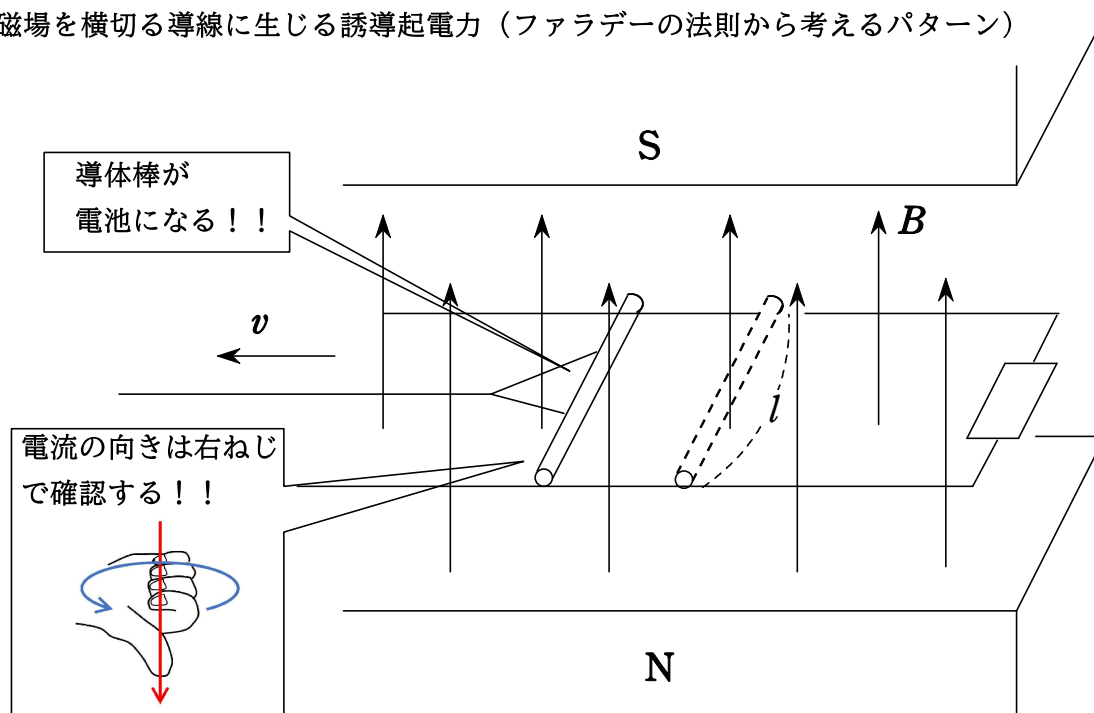
- (1) コイルを貫く磁束 Φ [Wb] の時間変化を、磁場の向きを正として、グラフに表せ。
- (2) コイルに流れる電流 I [A] の時間変化をグラフに表せ。ただし、紙面の上から見てコイルを時計回りに流れる電流の向きを正とする。
- (3) コイルが磁場から受ける力 F [N] の時間変化をグラフに表せ。ただし、 x 軸の正の向きを正とする。
- (4) コイルが磁束部分を通過し終わるまでに、コイルで生じたジュール熱を求めよ。
- (5) コイルが磁束部分を通過し終わるまでに、コイルを動かすために外力のした仕事を求めよ。

解答



(4) $\frac{2vB^2l^3}{R}$ [J] (5) $\frac{2vB^2l^3}{R}$ [J]

磁場を横切る導線に生じる誘導起電力（ファラデーの法則から考えるパターン）



磁束密度 B [T] の一様な磁場の中に、まさに電車のレールのような未完成の回路があるとします。そこに長さ l [m] の導体棒を横たわせて、速さ v [m/s] で左に動かすときを考えます。導体棒を乗せることによって回路が完成し、同時にコイルもできます。導体棒を左に動かすと、コイル自体の面積が大きくなるので、コイルを貫く磁束も変化することになります。 Δt [s] の間に変化した磁束は、

$$\Delta \Phi =$$

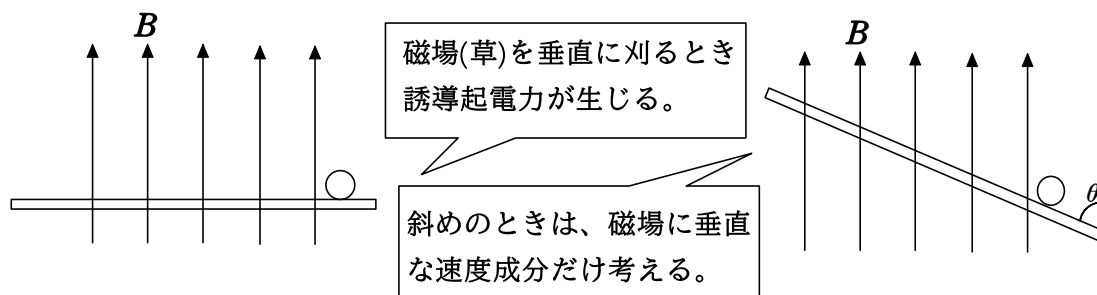
となります。するとコイルを貫く磁束が変化したため、コイルには電磁誘導が起こります。上向き磁場が増えるため、増やさないように下向き磁場を作ろうとします。そのための電流を流すために、導体棒が電池になるのです。その誘導起電力は、ファラデーの電磁誘導の法則を考えると、

$$V =$$

【導体棒に生じる誘導起電力】

$$V =$$

[]



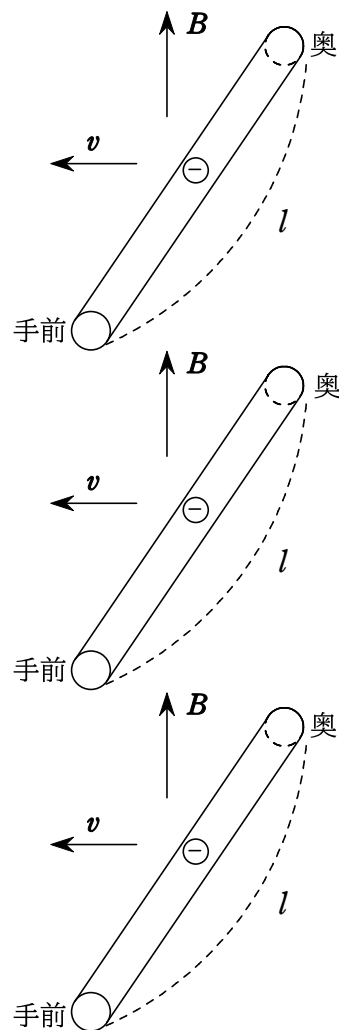
磁場を草に見立てて、導体棒がそれを垂直に刈るカマの動きをするとき、導体棒は vBl [V] の電池になります。どんなときでも個の値になるため、これは公式として使って構いません。

磁場を横切る導線に生じる誘導起電力（ローレンツ力から考えるパターン）

①導体棒が動くということは、中の電子も一緒に動くということになります。磁場中を電子が動くときある力を受けましたよね。そう、ローレンツ力です。

②ローレンツ力を受けた電子は、その向きから、手前に移動します。すると、手前が徐々に「負」に帯電し、相対的に奥の方が「正」に帯電します。すると導体棒の両端に「電位差」が生じます。さらに、電位差があることで「電場」も生じます。

③電子はローレンツ力だけでなく電場から静電気力も受けることになります。やがて、ローレンツ力と静電気力が釣りあうことで電子の移動が終わります。この釣りあいの式と、一様な電場で成り立つ式から生じた電位差の大きさを求めると、



【導体棒に生じる誘導起電力】

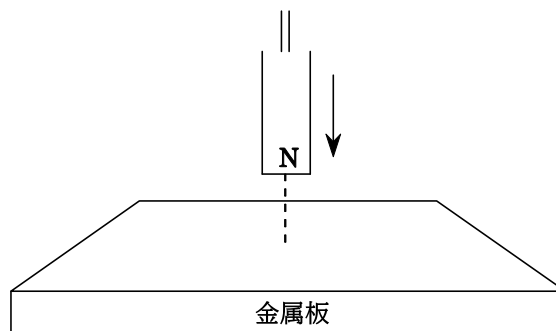
$$V =$$

[]

C 誘導起電力とエネルギー

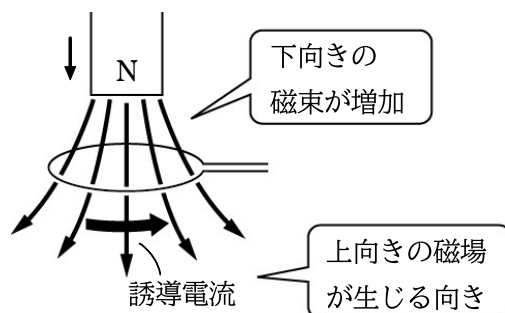
電磁誘導の問題では、エネルギーの収支（つじつま）が合うかどうか確認しましょう。

D 渦電流



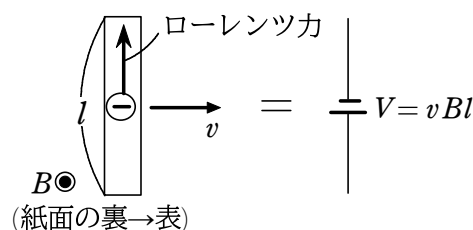
導線じゃなくても、自由電子が動けるなら電磁誘導は起こります。

- 1 (1) 電磁誘導 コイルの内側の磁場が変化すると、コイルには ア[]が生じ、イ[]が流れる。この現象をウ[]という。誘導起電力は、外から加えられた磁束の変化を打ち消すような向きに生じる。これを エ[]の法則という。



- (2) ファラデーの電磁誘導の法則 1 巻きコイルを貫く磁束が、時間 Δt の間に $\Delta \Phi$ だけ変化するとき生じる誘導起電力 V は $V = -\text{オ}[]$ となる。 N 回巻きコイルの場合には、誘導起電力は カ[] 倍となる。

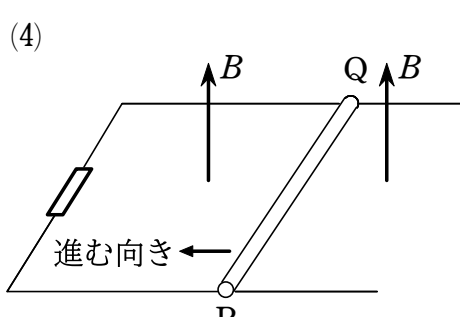
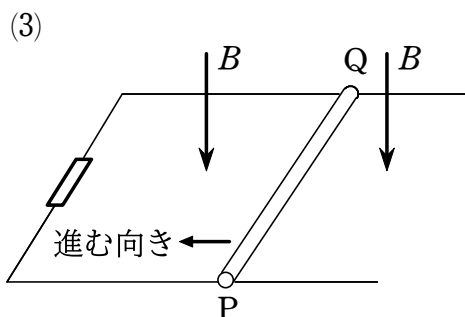
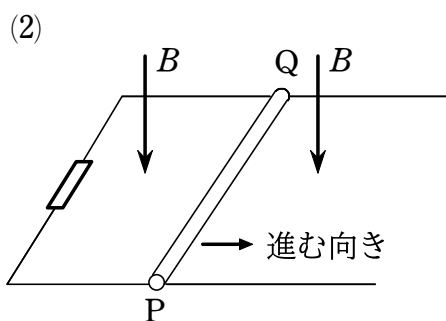
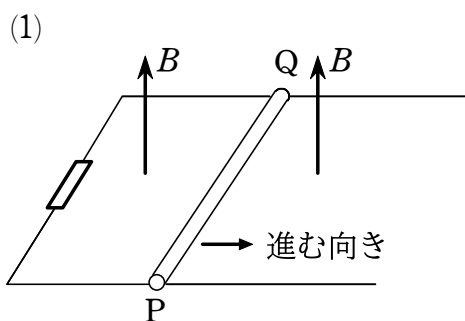
- (3) 磁場を横切る導線に生じる誘導起電力 磁束密度 B の一様な磁場中で、長さ l の導線を磁場に対して垂直に速さ v で動かすとき、導線には誘導起電力が生じる。その大きさは $V = \text{キ}[]$ となる。



【解答】 (ア) 誘導起電力 (イ) 誘導電流 (ウ) 電磁誘導 (エ) レンツ

(オ) $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ (カ) N (キ) vBl

- 2 次の各場合のように、一様な磁束密度 B [T] の磁場がある空間で、導体棒 PQ を図のような向きに動かす。誘導電流は、導体棒中を $P \rightarrow Q$ と $Q \rightarrow P$ のどちらの向きに流れるか。

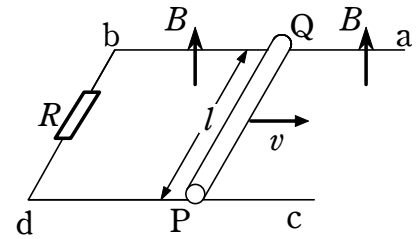


【解答】 (1) $Q \rightarrow P$ (2) $P \rightarrow Q$ (3) $Q \rightarrow P$ (4) $P \rightarrow Q$

- 3 図のように、鉛直方向の一様な磁束密度 $B[\text{T}]$ の磁場内に、 $l[\text{m}]$ の間隔で置かれた 2 本の導線のレール ab , cd がある。bd 間を $R[\Omega]$ の抵抗でつなぎ、レール上に軽くて抵抗の無視できる導体棒 PQ を置いて、レールと垂直を保ちながら外力により一定の速さ $v[\text{m/s}]$ で矢印の向きに動かす。次の値および向きを求めよ。

$$B=10 \text{ T}, l=0.20 \text{ m}, R=0.25 \Omega, v=0.50 \text{ m/s},$$

- (a) 導体棒 PQ に生じる誘導起電力の大きさ $V[\text{V}]$
 (b) 導体棒 PQ を流れる電流の大きさ $I[\text{A}]$ と向き
 (c) 導体棒 PQ が磁場から受ける力の大きさ $F[\text{N}]$ と向き



(a) $V = vBl = 0.50 \times 10 \times 0.20 = 1.0 \text{ V}$

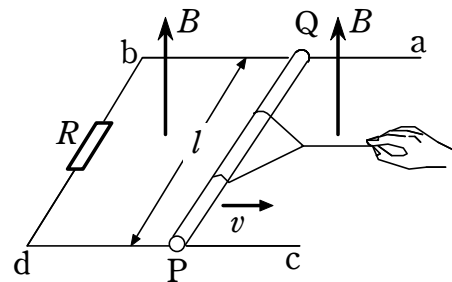
(b) $I = \frac{V}{R} = \frac{1.0}{0.25} = 4.0 \text{ A}$

上向きの磁束が増加するので、これを打ち消す下向きに磁束が生じるよう、時計回りに誘導電流が流れる。Q → P の向き

(c) $F = IBl = 4.0 \times 10 \times 0.20 = 8.0 \text{ N}$

フレミングの左手の法則より電流の向きが Q → P なので力の向きは左向き

- 4 図のように、鉛直上向きの一様な磁束密度 $B[\text{T}]$ の磁場内に、 $l[\text{m}]$ の間隔で水平に置かれた 2 本の導線レール ab , cd がある。bd 間を $R[\Omega]$ の抵抗でつなぎ、レール上に軽くて抵抗の無視できる導体棒 PQ を置く。これにひもをつけて引き、右向きに一定の速さ $v[\text{m/s}]$ で動かす。導体棒はレールと垂直を保ちながら、なめらかに動くものとする。



- (1) 導体棒 PQ 間に流れる電流の大きさ $I[\text{A}]$ と向きを求めよ。
 (2) 時間 $t[\text{s}]$ の間に抵抗で発生するジュール熱 $Q[\text{J}]$ を求めよ。
 (3) 導体棒 PQ をひもで $t[\text{s}]$ 間引くときの、ひもを引く力のする仕事 $W[\text{J}]$ を求めよ。

- (1) 導体棒 PQ 間には、Q → P の向きの誘導起電力が生じる。よって、電流の向きは Q → P である。誘導起電力の大きさは $V = vBl [\text{V}]$ であるから、電流の大きさは

$$I = \frac{V}{R} = \frac{vBl}{R} [\text{A}]$$

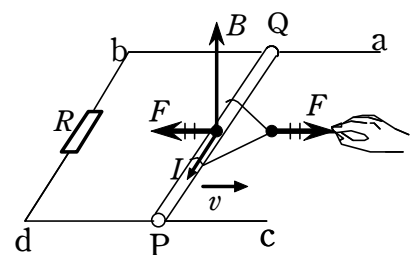
(2) 抵抗で発生するジュール熱は $Q = I^2 R t = \frac{v^2 B^2 l^2 t}{R} [\text{J}]$

(3) 導体棒が磁場から受ける力の大きさ $F[\text{N}]$ は

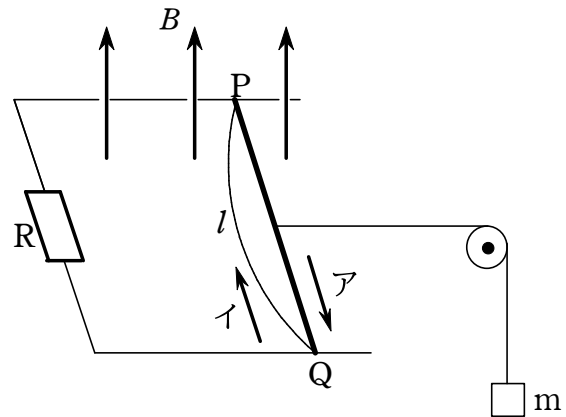
$$F = IBl = \frac{vBl}{R} \cdot Bl = \frac{vB^2 l^2}{R} [\text{N}]$$

速さを一定に保つには、この F と同じ大きさで逆向きに引き続けなければならない。 $t[\text{s}]$ 間

の導体棒の移動距離は $x = vt [\text{m}]$ より $W = Fx = \frac{vB^2 l^2}{R} \cdot vt = \frac{v^2 B^2 l^2 t}{R} [\text{J}]$



- 5 鉛直上向きの一様な磁束密度 B [T] の磁場中に、水平に置かれた図のような回路がある。R は R [Ω] の抵抗、 m は質量 m [kg] のおもり、PQ はコの字形の導線上を長方形を描きながらなめらかに動く長さ l [m] の軽い導線である。鉛直につるされたおもり m は、なめらかに動く軽い滑車を通して、PQ に軽いひもでつながれている。なお、重力加速度の大きさを g [m/s²] とする。



- (1) おもりの速さが v [m/s] のとき、導線 PQ を流れる電流の大きさは何 A か。その向きは図のアとイのどちらか。
- (2) (1) のとき、導線 PQ が磁場から受ける力の大きさは何 N か。
- (3) (1) のとき、おもりの加速度の大きさは何 m/s² か。
- (4) やがておもりは一定の速さで落下する。このときの速さは何 m/s か。
- (5) (4) のとき、おもりに作用する重力が 1 秒間にする仕事は何 J か。
- (6) (4) のとき、抵抗 R で 1 秒間に発生するジュール熱は何 J か。

- (1) おもりの速さ (=導線 PQ の速さ) が v [m/s] のとき、回路に生じる誘導起電力の大きさ V [V] は、 $V = vBl$ であるから、電流の大きさ I [A] は、オームの法則

$$\text{より } I = \frac{V}{R} = \frac{vBl}{R} \text{ [A]}$$

電流 I の向きは、下向きの磁束を生じる向き (レンツの法則) で、右ねじの法則より、アの向き。

- (2) 導線 PQ が磁場から受ける力の大きさを F [N] とする (右図)。電流が磁場から受ける力の式「 $F = IBl$ 」より

$$F = IBl = \frac{vB^2l^2}{R} \text{ [N]}$$

- (3) (2) の力 F の向きは、フレミングの左手の法則より、PQ の運動を妨げる向き (図の左向き) となる。おもりの加速度 (下向き) を a [m/s²] とすると、おもりは、重力とひもの張力 ((2) の力 F と同じ大きさ) の合力 (差になる) によって加速されるので、運動方程式は

$$ma = mg - F \quad \text{ゆえに} \quad a = g - \frac{F}{m} = g - \frac{vB^2l^2}{mR} \text{ [m/s}^2\text{]}$$

- (4) (3) の加速度 a の式より、 a は v の増加とともに減少していくので、 $a = 0$ になる速さに達すると、以後、この一定の速さで降下するようになる。この速さを v_0 [m/s] とすると、(3) の a の式より

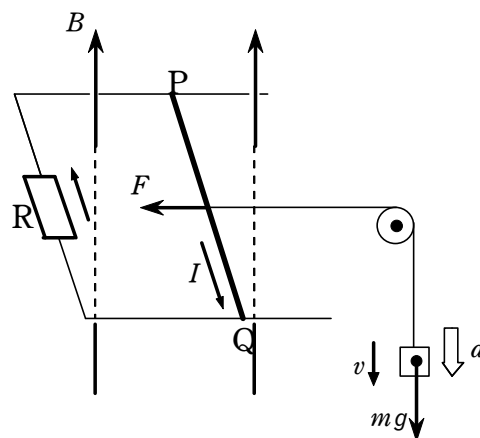
$$0 = g - \frac{v_0B^2l^2}{mR} \quad \text{ゆえに} \quad v_0 = \frac{mgR}{B^2l^2} \text{ [m/s]}$$

- (5) このとき、おもりは 1 秒間に $h = v_0 \times 1$ [m] だけ降下するので、重力が 1 秒間にする仕事 W [J] は $W = mgh = mgv_0 = \left(\frac{mg}{Bl}\right)^2 R$ [J]^[1]←

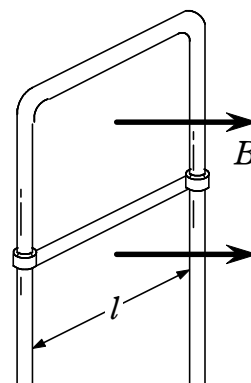
- (6) このとき、抵抗 R で 1 秒間に発生する熱量を Q [J] とすると、ジュール熱の式「 $Q = IVt = \frac{V^2}{R}t$ 」より、 v_0 の値を用いて

$$\begin{aligned} Q &= \frac{V^2}{R}t = \frac{(v_0Bl)^2}{R} \times 1 = \frac{1}{R} \times \left(\frac{mgR}{B^2l^2}\right)^2 B^2l^2 \\ &= \left(\frac{mg}{Bl}\right)^2 R \text{ [J]}^{\text{[1]}} \leftarrow \end{aligned}$$

←[1] 参考 $Q = W$ の関係が成りたち、エネルギーが保存されていることがわかる。



- 6 図のように、水平で一様な磁束密度 B [T] の磁場内で、コの字形に曲げた金属柱を磁場に垂直な面内で鉛直に立てる。この金属柱に長さ l [m]、質量 m [kg] の導体棒を常に水平に保ち、両端が金属柱に接してなめらかに動けるようにはめた。導体棒の抵抗値は R [Ω] であり、コの字形の金属柱の抵抗は無視できる。この導体棒を落下させたところ、やがて導体棒の速さが一定となった。自己誘導は無視でき、重力加速度の大きさを g [m/s^2] とする。



- (1) 導体棒の速さが一定のとき、導体棒にはたらく力は何つある。導体棒を流れる電流の大きさ I [A] を求めよ。
- (2) 導体棒に生じる誘導起電力を考えることにより、導体棒の速さ v [m/s] を求めよ。

- (1) 導体棒には図のような力がはたらき、これらがつりあっている。

よって $IBl - mg = 0$ より $I = \frac{mg}{Bl}$ [A]

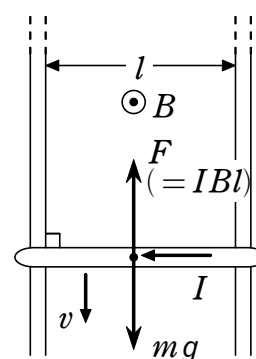
- (2) 導体棒の両端に生じる誘導起電力の大きさは $V = vBl$ [V] で

あるので $I = \frac{V}{R} = \frac{vBl}{R}$

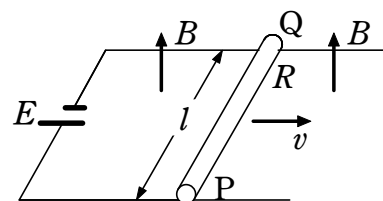
これと (1) の結果より

$$\frac{vBl}{R} = \frac{mg}{Bl}$$

よって $v = \frac{mgR}{B^2 l^2}$ [m/s]



- 7 図のように、鉛直上向きの一様な磁束密度 B [T] の磁場内に、間隔 l [m] の2本の平行な導線レールを水平に置く。レールの端を起電力 E [V] の電池でつなぎ、レール上に抵抗値 R [Ω] の導体棒 PQ を置くと、導体棒は動きだした。導体棒はレールと垂直を保ちながら、なめらかに動くものとする。その後、導体棒が図の向きに速さ v [m/s] で動いているとき、次の問いに答えよ。



- (1) 導体棒 PQ 間に生じる誘導起電力の大きさ V [V] を求めよ。
- (2) 導体棒 PQ 間に流れる電流の大きさ I [A] と向きを求めよ。
- (3) 導体棒が磁場から受ける力の大きさ F [N] を求めよ。

(1) $V = vBl$ [V]

- (2) 導体棒 PQ 間には、 $Q \rightarrow P$ の向きの誘導起電力が生じる。キルヒホッフの法則Ⅱより

$$E - vBl = RI$$

よって $I = \frac{E - vBl}{R}$ [A] 向きは $P \rightarrow Q$ の向き

- (3) 「 $F = IBl$ 」より

$$F = \frac{E - vBl}{R} \cdot Bl = \frac{(E - vBl)Bl}{R} \text{ [N]}$$

- 8 図1のように、真空中に金属レールが水平に置かれ、その上を金属棒がなめらかに移動できるようになっている。金属棒の長さは l [m] で、レールの間隔に等しい。またレール面と垂直に、磁束密度 B [T] の磁場が加えられている。レールの方向を x 軸、金属棒の方向を y 軸とする。磁場の向きは z 軸の正の向き (紙面裏から表の向き) である。

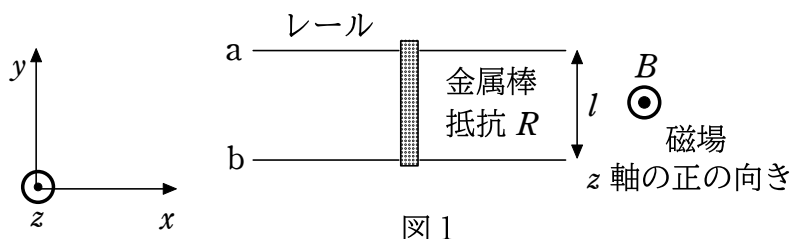


図 1

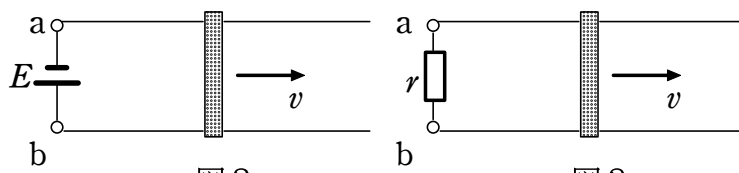


図 2

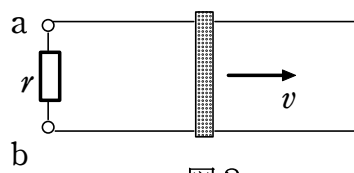


図 3

また、金属棒の抵抗は R [Ω] である。

- [A] 図2のように、端子 a, b 間に起電力 E [V] の電池 (内部抵抗 0) を接続したところ、金属棒は動き始めた。金属棒が x 軸の正の向きに速さ v [m/s] で動いているとき

- (1) 金属棒の両端に発生する誘導起電力の大きさ V [V] を求めよ。
- (2) 金属棒に流れる電流の大きさ I [A] と向きを求めよ。
- (3) 金属棒に加わる力の大きさ F [N] を求めよ。

十分長い時間が経過し、金属棒の速さは一定になった。このとき

- (4) 金属棒の速さ v_0 [m/s] を求めよ。

- [B] 図3のように、端子 a, b 間に固定抵抗 r [Ω] を接続し、金属棒に外部から力を加えて動かした。金属棒が x 軸の正の向きに速さ v [m/s] で動いているとき

- (5) 金属棒に流れる電流の大きさ I' [A] と向きを求めよ。

- [A] z 軸の負の向きの磁場をつくる向きに誘導起電力 V が発生 (レンツの法則)。

V の向きは E の向きと反対になる (右ねじの法則)。

$$(1) \quad V = vBl \text{ [V]} \quad \dots\dots ①$$

- (2) キルヒホッフの法則Ⅱより

$$E - V = RI \quad \dots\dots ②$$

$$\text{よって } I = \frac{E - vBl}{R} \text{ [A], } y \text{ 軸の正の向き}$$

$$(3) \quad F = IBl = \left(\frac{E - vBl}{R} \right) Bl \text{ [N]} \quad \dots\dots ③$$

- (4) 力 F は x 軸の正の向きにはたらき (フレミングの左手の法則)、棒は加速され、 v の増加とともに V も増す。 V が E に達すると、②、③ 式より $I = 0$, $F = 0$ となり、以後、速さは v_0 で一定になる。

- ③ 式で、 $v = v_0$ のとき $F = 0$ より

$$E - v_0Bl = 0$$

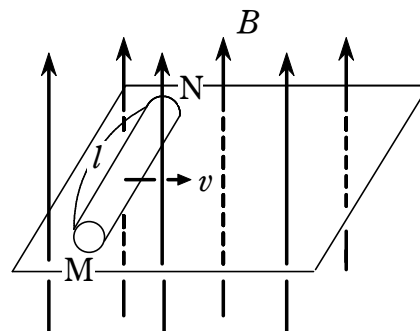
$$\text{よって } v_0 = \frac{E}{Bl} \text{ [m/s]}$$

- [B] (5) 誘導起電力の向きと大きさは [A] と同じなので $V = vBl$ [V]

$$I' = \frac{vBl}{R + r} \text{ [A], } y \text{ 軸の負の向き}$$

- 9 次の文の を埋めよ。また、{ } の中からは適当なものを選べ。

図のように、鉛直上向きに一樣な磁束密度 B の磁場中の水平面上で、長さ l の導体棒 MN を速さ v で移動させる。移動の向きは MN に垂直である。棒中の 1 個の電子 (電気量 $-e$) にはたらくローレンツ力の大きさは である。その力を受けて電子が移動するため、棒の { (2) (ア) M (イ) N } 側の端は正、もう一方の端は負に帯電する。これによって棒中に電場 E が発生する。この電場によって、1 個の電子にはたらく力の大きさは である。この力がローレンツ力とつりあうと、電子の移動は止まり、このとき $E = \text{}$ となることから、棒の両端 MN 間に発生する電位差は となる。



指針 導体棒中の電子が受けるローレンツ力 (evB) をもとに、誘導起電力の向きと大きさを導く (右図)。

解説 (1) evB

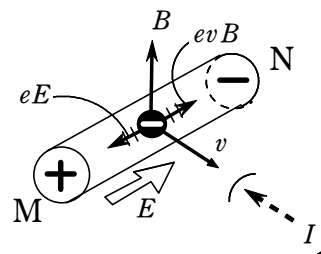
(2) 電子が N 側に移動するため、正に帯電するのは

(ア) M 側

(3) eE

(4) 力のつりあい $eE = evB$ より $E = vB$

(5) MN 間の電位差 $V = El = vBl$



- 10 図のように、磁束密度が $3.5 \times 10^{-2} \text{ T}$ の一樣な磁場内を、長さ $8.0 \times 10^{-2} \text{ m}$ の導線 PQ が磁場に垂直に 3.0 m/s の速さで動いている。

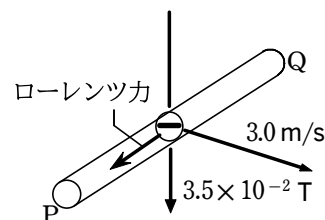
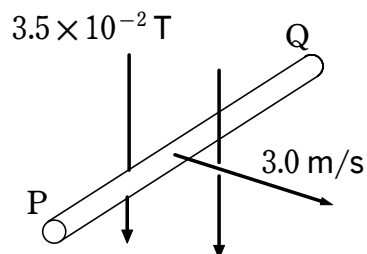
(1) PQ 間の誘導起電力の大きさは何 V か。

(2) 負の電荷が現れるのは、P、Q 端のどちらか。

(1) 「 $V = vBl$ 」より

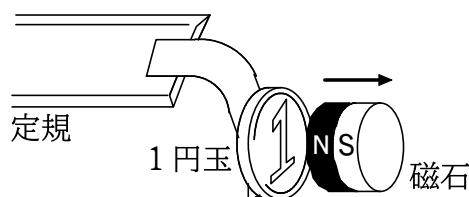
$$V = 3.0 \times (3.5 \times 10^{-2}) \times (8.0 \times 10^{-2}) = 8.4 \times 10^{-3} \text{ V}$$

(2) 図のように、導線中の自由電子は $Q \rightarrow P$ の向きにローレンツ力を受けるので、負の電荷が現れるのは P 端である。



- 11 図のように、水平に固定したプラスチック定規の端に 1 円玉 (アルミニウム製) を貼りつけた付せん紙をとりつける。磁石の N 極を、1 円玉に近づけた位置からすばやく遠ざけたとき、1 円玉に生じる渦電流の向きは、図の右側から見て時計回りか反時計回りのどちらか。

解答 時計回り



C コイルと抵抗を含む回路

コイルはタイミングによって直流回路での振る舞いが変わります。

- 1、スイッチ入れた直後 → 断線として扱う（ツン）
- 2、十分に時間が経った後 → 導線として扱う（デレ）

コンデンサーでも似たような扱いを学びましたね。

また、自己誘導による誘導起電力は電流の変化を妨げる向きに生じるため、「逆起電力」とも呼ばれます。断線と言っても起電力はあるのでご注意ください。

D コイルに蓄えられるエネルギー

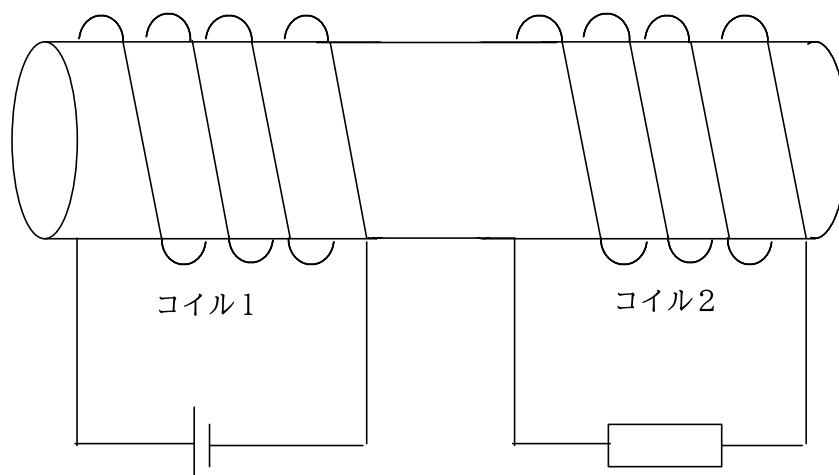
コイルはツンデレなので、電流の変化が嫌いなのでした。それは、
スイッチを入れた瞬間に「0[A] からいきなり電流を流せない」という意味だけでなく、
スイッチを切った瞬間も「流れていた電流をいきなり0[A]にはできない」という意味でもあります。
 この場合、スイッチを切って電池もないのに、一瞬だけコイルが電流を流し続けようとします。それはまさにコイルがエネルギーを持っていることを意味します。

【コイルに蓄えられるエネルギー】

$$U = \quad [\quad]$$

※ 導出には積分を考える必要があるため、覚えた方が早いです。

E 相互誘導



コイル1で磁場をつくると、コイル2を貫く磁場が変化し、コイル2で電磁誘導が起こり、コイル2に電流が流れます。これを「相互誘導」といいます。

【相互誘導による誘導起電力】

$$V = \quad [\quad]$$

M [H] : 相互インダクタンス

- 1 (1) 自己誘導 コイルには、電流の変化を打ち消す向きに誘導起電力が生じる。この現象を ア[] という。時間 Δt の間に電流が ΔI だけ変化するときコイルに生じる誘導起電力 V は、コイルの自己インダクタンスを L として $V = -\text{イ}[]$ となる。コイルに電流 I が流れているとき、コイルに蓄えられているエネルギー U は $U = \text{ウ}[]$ となる。
- (2) 相互誘導 コイル 1 に流れる電流が変化することによって、近くに置かれた別のコイル 2 にも誘導起電力が生じる現象を エ[] という。時間 Δt の間にコイル 1 を流れる電流が ΔI_1 だけ変化するとき、コイル 2 に生じる誘導起電力 V_2 は、2 つのコイル間の相互インダクタンスを M とすると $V_2 = -\text{オ}[]$ となる。

【解答】 (ア) 自己誘導 (イ) $L \frac{\Delta I}{\Delta t}$ (ウ) $\frac{1}{2} LI^2$ (エ) 相互誘導 (オ) $M \frac{\Delta I_1}{\Delta t}$

- 2 自己インダクタンス 0.10 H のコイルに流れる電流が 5.0×10^{-3} 秒間に一様に 75 mA 減少した。このとき生じる誘導起電力の大きさは何 V か。

$$\left| V = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \right| \text{ より } |V| = 0.10 \times \frac{75 \times 10^{-3}}{5.0 \times 10^{-3}} = 1.5 \text{ V}$$

- 3 断面積 S 、長さ l 、巻数 N のソレノイドコイルに I の電流を流す。透磁率を μ_0 とし、コイルの内部には一様な磁場が生じるものとする。

- (1) コイルを貫く磁束 Φ を、 S 、 l 、 N 、 I 、 μ_0 を用いて表せ。
- (2) コイルを流れる電流が Δt の間に ΔI 変化するとき、コイルに生じる誘導起電力の大きさ V を、 S 、 l 、 N 、 μ_0 、 Δt 、 ΔI を用いて表せ。
- (3) このコイルの自己インダクタンス L を、 S 、 l 、 N 、 μ_0 を用いて表せ。

- (1) ソレノイドコイルの単位長さ当たりの巻数は $n = \frac{N}{l}$ であるから、コイル内の磁

$$\text{場は「} H = nI \text{」より } H = \frac{N}{l} I$$

よって、磁場と磁束密度の関係「 $B = \mu H$ 」より

$$\Phi = BS = \mu_0 HS = \frac{\mu_0 NSI}{l} \quad \dots\dots \textcircled{1}$$

- (2) 電流が $I + \Delta I$ のときの磁束を $\Phi + \Delta \Phi$ とすると、(1) と同様に

$$\Phi + \Delta \Phi = \frac{\mu_0 NS}{l} (I + \Delta I) \quad \dots\dots \textcircled{2}$$

$$\textcircled{1}, \textcircled{2} \text{ 式より } \Delta \Phi = \frac{\mu_0 NS}{l} \Delta I$$

$$\left| V = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \right| \text{ より } V = \left| -N \cdot \frac{\mu_0 NS}{l} \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} \right| = \frac{\mu_0 N^2 S}{l} \cdot \left| \frac{\Delta I}{\Delta t} \right| \quad \dots\dots \textcircled{3}$$

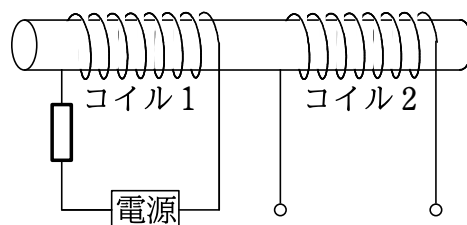
- (3) 自己誘導の式「 $V = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$ 」より $V = \left| -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \right| = L \left| \frac{\Delta I}{\Delta t} \right|$

$$\text{これと } \textcircled{3} \text{ 式を比較して } L = \frac{\mu_0 N^2 S}{l}$$

- 4 自己インダクタンスが 0.10 H のコイルに 0.20 A の電流が流れているとき、このコイルが蓄えているエネルギーは何 J か。

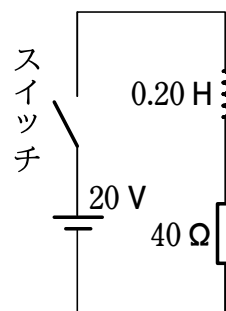
$$\begin{aligned} \text{「} U = \frac{1}{2} LI^2 \text{」より } U &= \frac{1}{2} \times 0.10 \times 0.20^2 \\ &= 2.0 \times 10^{-3} \text{ J} \end{aligned}$$

- 5 図のように、コイル1とコイル2を共通の鉄心に取りつける。このときの、コイル間の相互インダクタンスを 0.15 H とする。コイル1に流れる電流を1秒当たり 0.30 A の割合で増加させた。コイル2に生じる誘導起電力の大きさは何 V か。



$$\begin{aligned} \text{「} V_2 = -M \frac{dI_1}{dt} \text{」より } |V_2| &= 0.15 \times \frac{0.30}{1} \\ &= 4.5 \times 10^{-2} \text{ V} \end{aligned}$$

- 6 図のような、自己インダクタンス 0.20 H のコイル、抵抗値 40Ω の抵抗、起電力 20 V の電源、スイッチが接続された回路がある。
- スイッチを閉じた直後に、回路に流れる電流 I_0 は何 A か。
 - スイッチを閉じてから十分に時間が経過したとき、回路に流れる電流 I は何 A か。
 - (2) のとき、コイルが蓄えているエネルギーは何 J か。



【指針】 スwitchを閉じた直後は、コイルの自己誘導によって、コイルに流れる電流が増加するのを妨げる向きの誘導起電力が生じるため、電流は瞬時には変化しない。

【解答】 (1) スwitchを閉じた直後は、コイルに流れる電流が増加するのを妨げる向きの誘導起電力が生じるため、回路を流れる電流は瞬時には変化しない。よって

$$I_0 = 0 \text{ A}$$

- (2) スwitchを閉じてから十分に時間が経過すると、コイルに流れる電流は一定になるため、コイルには誘導起電力が生じなくなる。よって、オームの法則「 $V = RI$ 」より

$$I = \frac{20}{40} = 0.50 \text{ A}$$

- (3) コイルに蓄えられるエネルギーの式「 $U = \frac{1}{2} LI^2$ 」より

$$U = \frac{1}{2} \times 0.20 \times 0.50^2 = 2.5 \times 10^{-2} \text{ J}$$

- 7 図のように、抵抗値 R_1 , R_2 [Ω] の抵抗, コイル, 起電力 E [V] の電池, スイッチが接続された回路がある。次の各場合について, R_1 [Ω] の抵抗を流れる電流 I [A] とコイルに生じる誘導起電力の大きさ V [V] を求めよ。

- (1) スイッチを閉じた直後。
- (2) スイッチを閉じてから十分に時間が経過したとき。

- (1) スイッチを閉じた直後は, コイルには電流が流れるのを妨げるように誘導起電力が生じるため, 電流は R_2 の抵抗側に流れる。キルヒホッフの法則Ⅱより

$$E = R_1 I + R_2 I$$

$$\text{よって } I = \frac{E}{R_1 + R_2} \text{ [A]}$$

コイルに生じる誘導起電力の大きさ V は, R_2 の抵抗の両端の電圧に等しいので

$$V = R_2 I = \frac{R_2 E}{R_1 + R_2} \text{ [V]}$$

- (2) 十分に時間が経過したとき, 電流はコイル側のみに流れる。

$$\text{よって } E = R_1 I \text{ より } I = \frac{E}{R_1} \text{ [A]}$$

このとき, コイルには誘導起電力は生じていない。

$$V = 0 \text{ V}$$

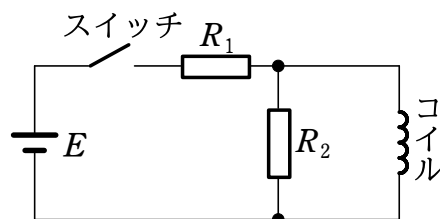
- 8 図のように, コイル1とコイル2が鉄心に巻いてある。コイル間の相互インダクタンスが 0.50 H のとき, コイル1を矢印の向きに流れる電流 I_1 [A] をグラフのように変化させる。コイル2の端子電圧 V_2 [V] の時間変化をグラフで示せ。ただし, 端子電圧は, 図の矢印の向きに電流が流れるときを正とする。

相互誘導の式「 $V_2 = -M \frac{\Delta I_1}{\Delta t}$ 」より

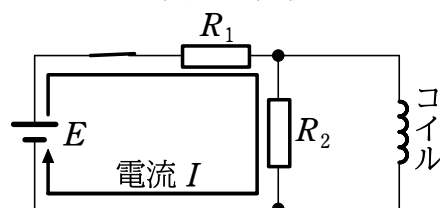
$$\text{時刻 } 0 \sim 1.0 \text{ s} : V_2 = -0.50 \times \frac{3.0 - 0}{1.0 - 0} = -1.5 \text{ V}$$

$$1.0 \sim 3.0 \text{ s} : V_2 = -0.50 \times \frac{3.0 - 3.0}{3.0 - 1.0} = 0 \text{ V}$$

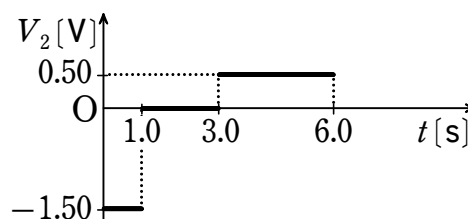
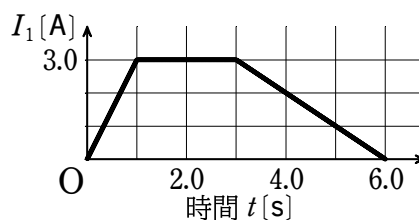
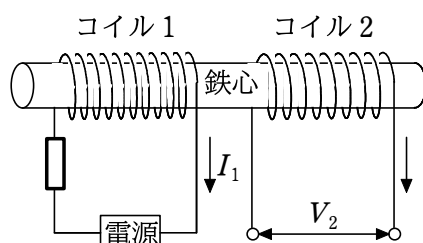
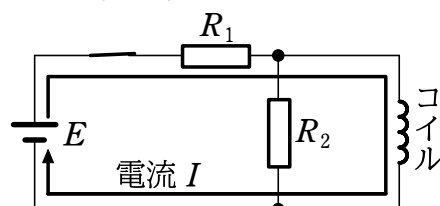
$$3.0 \sim 6.0 \text{ s} : V_2 = -0.50 \times \frac{0 - 3.0}{6.0 - 3.0} = 0.50 \text{ V}$$



スイッチを閉じた直後



十分時間が経過したとき





「不屈不撓の物理ホームページリンク」

パスワード ○○○○