

【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

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

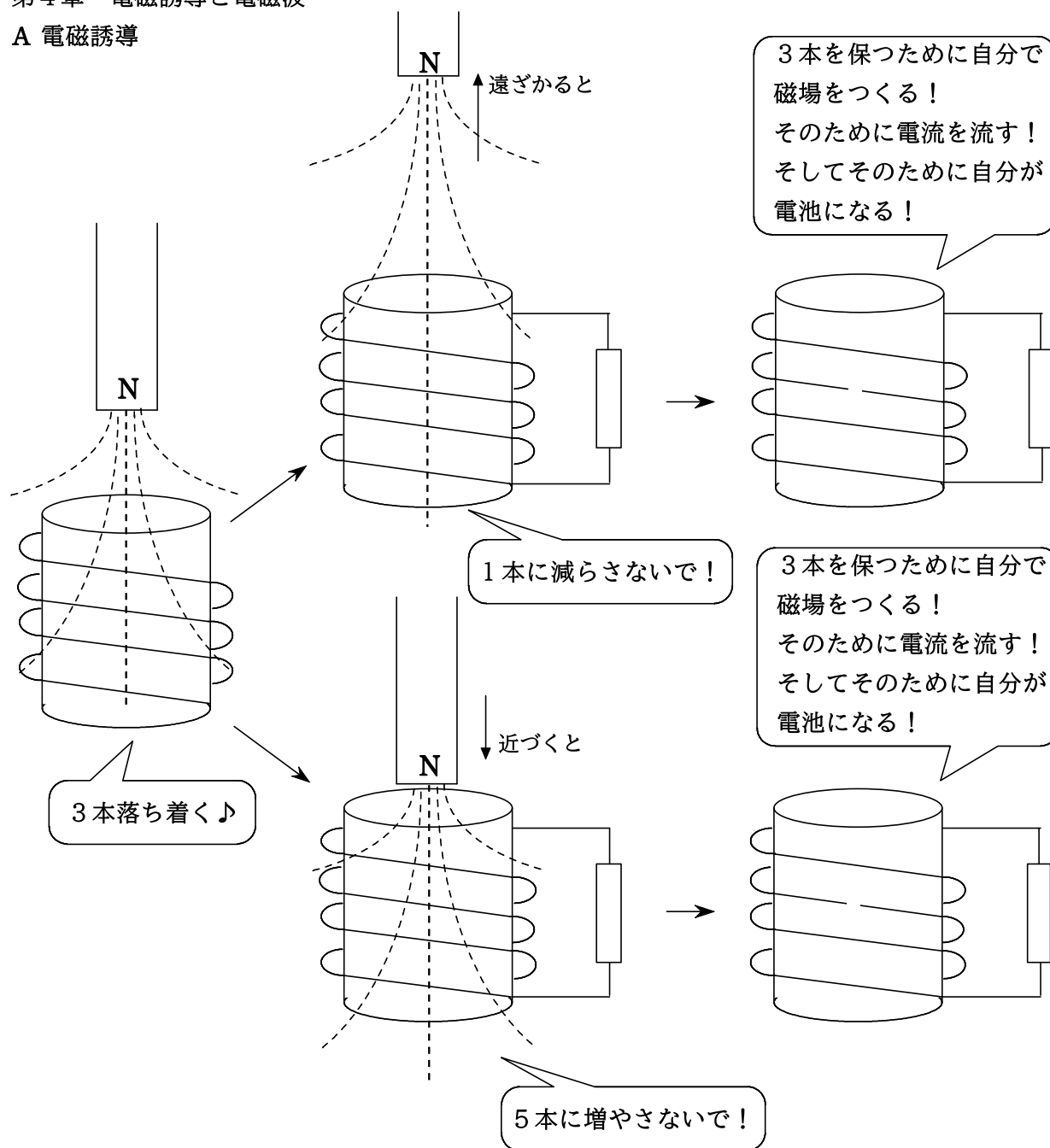
- ・コイルに蓄えられるエネルギー

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

()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】

$V =$

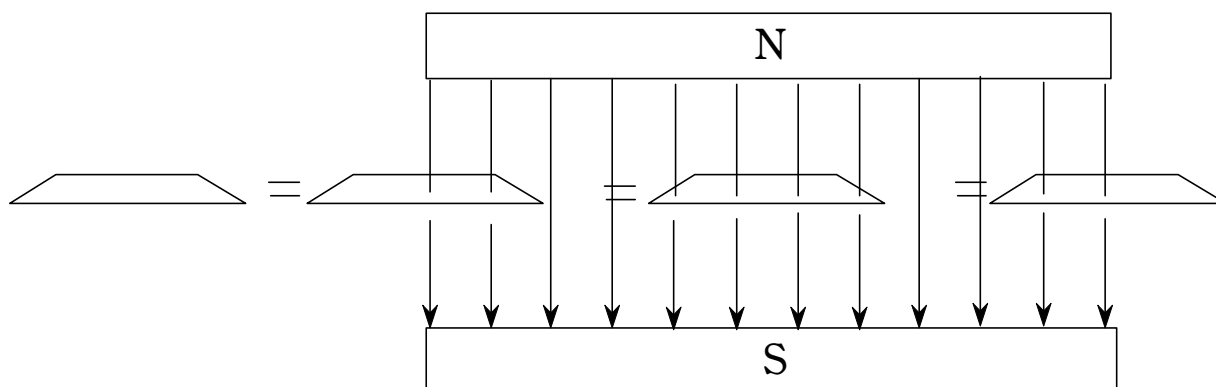
[]

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。

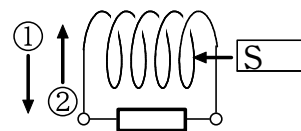
B 磁場を横切る導線に生じる誘導起電力

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。



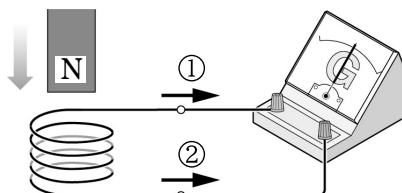
磁場が一樣なら、入るときと出るときにコイル内の磁場が変化しますよね。念を押しておきますが、コイルは磁場が嫌いなのではなく、磁場の変化が嫌いなのです。

- 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。

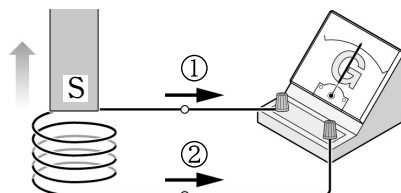


- 2 次の各場合について、誘導電流は ① と ② のどちらの向きに流れるか。

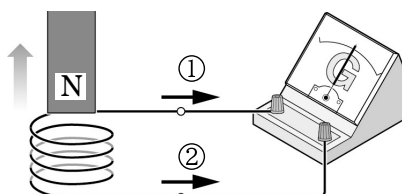
(1) N 極を近づける



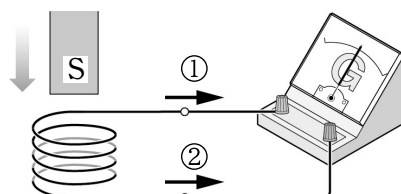
(2) S 極を遠ざける



(3) N 極を遠ざける



(4) S 極を近づける



- 3 100 回巻きのコイルを貫く磁束が 0.10 秒間に $2.5 \times 10^{-4} \text{ Wb}$ 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。

- 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。

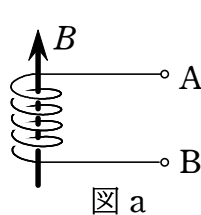


図 a

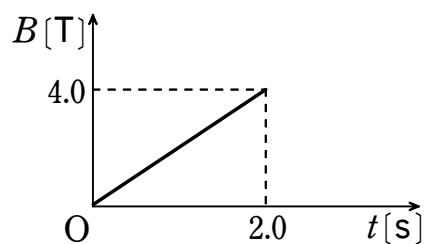
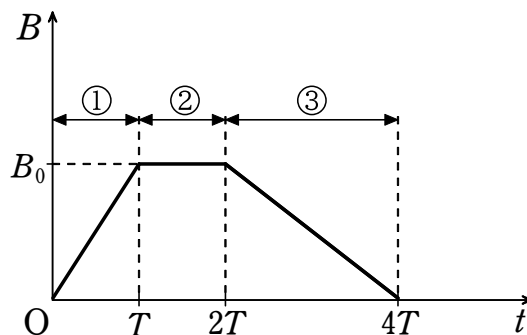


図 b

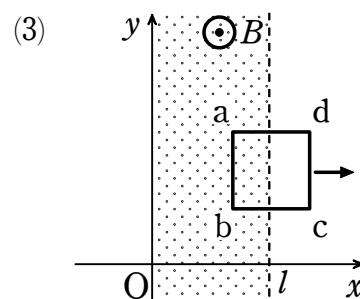
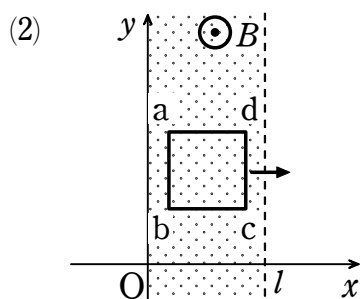
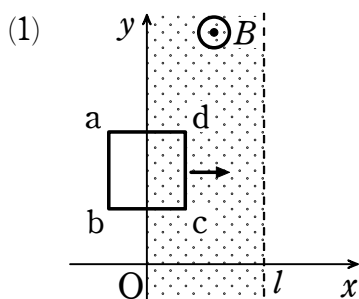
- (1) コイルの AB 間に生じる誘導起電力の大きさは何 V か。
 (2) AB 間に抵抗をつなぐと、流れる電流の向きは ① か ② のどちらか。
 ① $A \rightarrow \text{コイル} \rightarrow B$ ② $B \rightarrow \text{コイル} \rightarrow A$

- 5 断面積 S [m^2], 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。

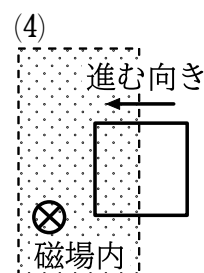
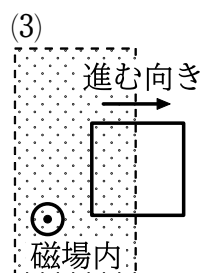
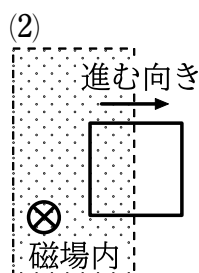
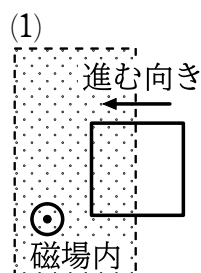


- 6 図のように, xy 平面内の $0 < x < l$ の領域に, 紙面の裏から表に向かう一様な磁場が存在している。いま, 正方形コイル $abcd$ を xy 平面内で x 軸の正の向きに一定の速さで動かした。コイルの位置が, (1)～(3) の各場合について, 誘導電流の流れる向きを次の ①～③ から選べ。

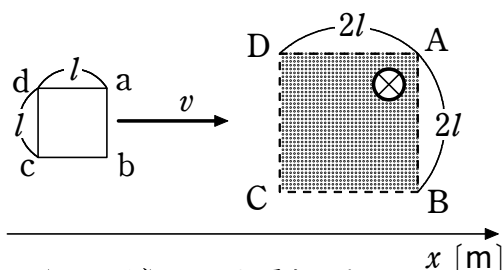
① $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$ ② $d \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow a$ ③ 誘導電流は流れない



- 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。

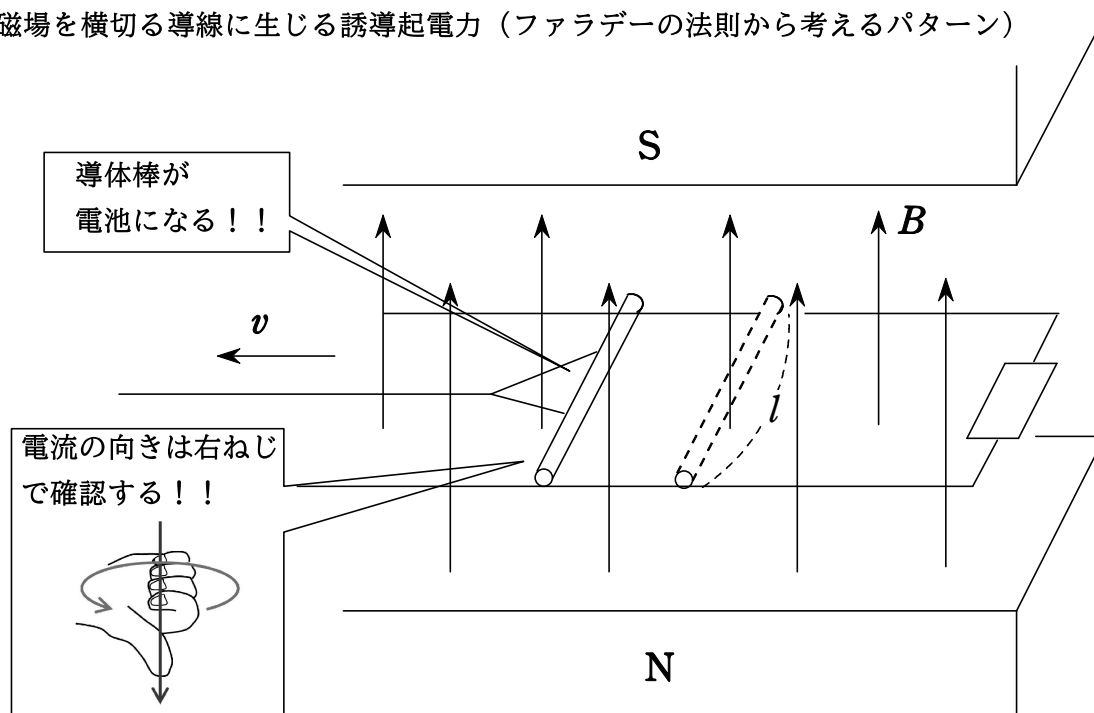


- 8 図のように、1 辺の長さ $2l$ [m] の正方形 ABCD の部分に、紙面に垂直で表から裏に向かう磁束密度 B [T] の一様な磁場がある。1 辺の長さが l [m] の 1 巻きの正方形コイル abcd を紙面上に置き、 x 軸の正の向きに一定の速さ v [m/s] で動かす。ただし、コイルの抵抗は R [Ω] とし、辺 bc および辺 BC は x 軸に平行で、辺 ab が辺 CD と重なった時刻を $t=0$ s とする。



- (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。

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、

$$\Delta \Phi =$$

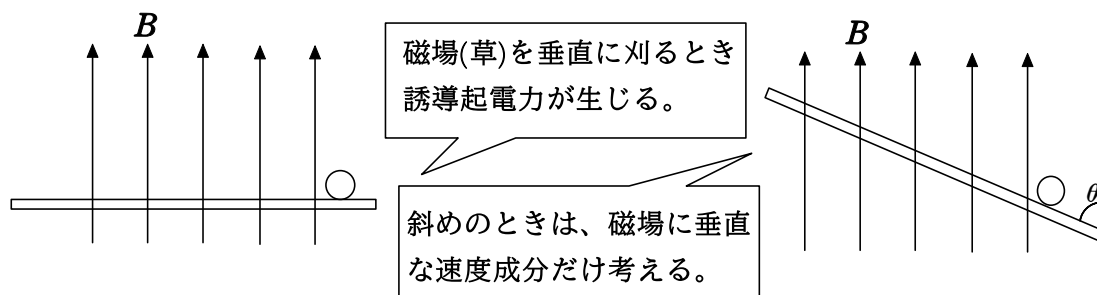
となります。するとコイルを貫く磁束が変化したため、コイルには電磁誘導が起こります。上向き磁場が増えるため、増やさないように下向き磁場を作ろうとします。そのための電流を流すために、導体棒が電池になるのです。その誘導起電力は、ファラデーの電磁誘導の法則を考えると、

$$V =$$

【導体棒に生じる誘導起電力】

$$V =$$

[]



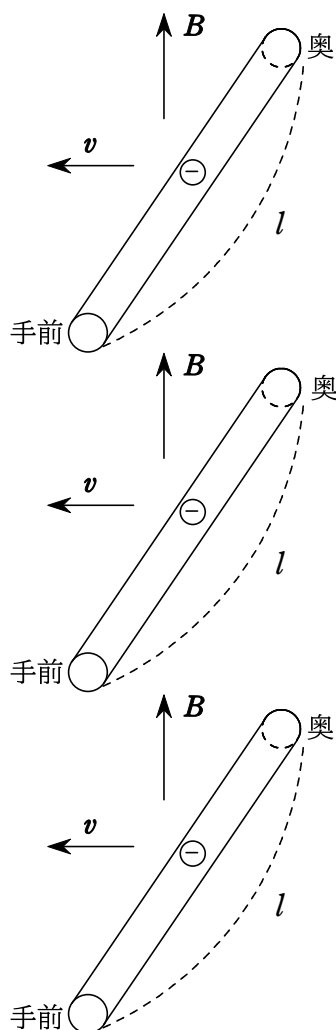
磁場を草に見立てて、導体棒がそれを垂直に刈るカマの動きをするとき、導体棒は vBl [V] の電池になります。どんなときでも個の値になるため、これは公式として使って構いません。

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】

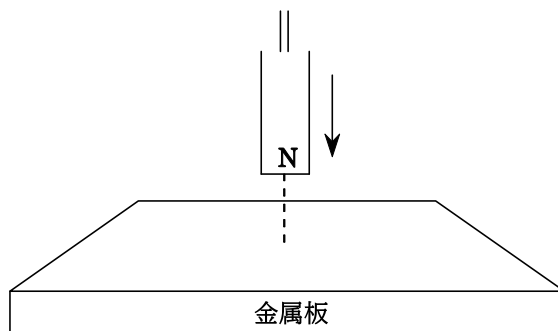
$$V =$$

[]

C 誘導起電力とエネルギー

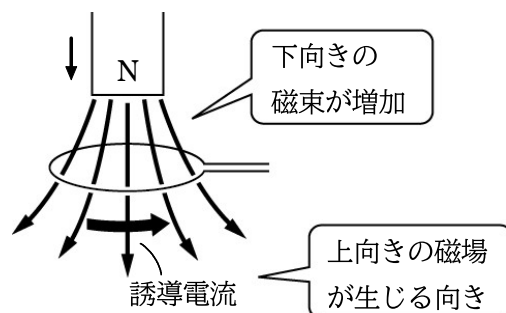
電磁誘導の問題では、エネルギーの収支（つじつま）が合うかどうか確認しましょう。

D 渦電流



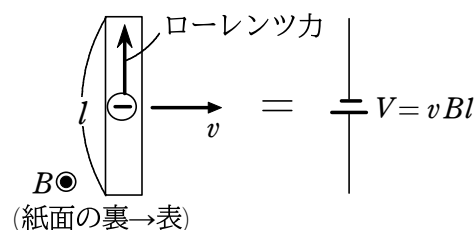
導線じゃなくても、自由電子が動けるなら電磁誘導は起こります。

- 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 $\mathcal{E}$ [] が生じ、 I [] が流れる。この現象を $\mathcal{E}$ [] 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 $\mathcal{E}$ [] の法則という。

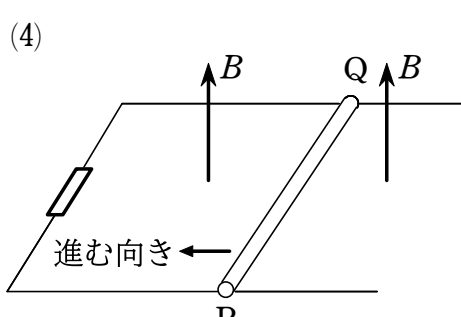
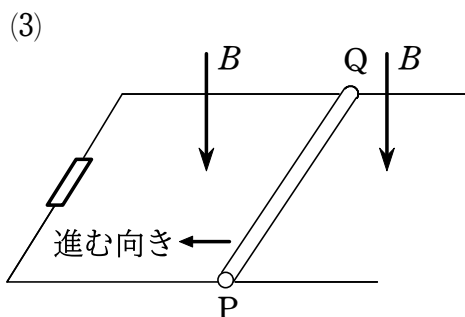
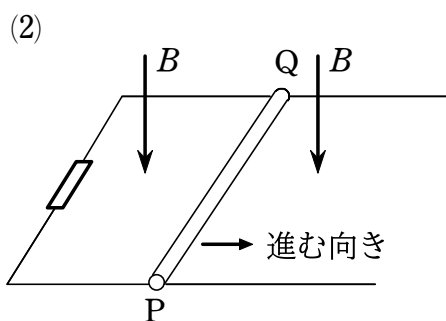
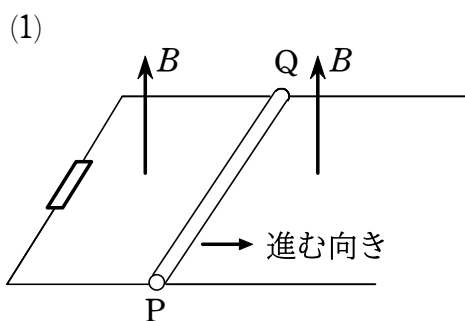


- (2) ファラデーの電磁誘導の法則 1 巻きコイルを貫く磁束が、時間 Δt の間に $\Delta \Phi$ だけ変化するとき生じる誘導起電力 V は $V = -\mathcal{E}$ [] となる。 N 回巻きコイルの場合には、誘導起電力は $\mathcal{E}$ [] 倍となる。

- (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 $V = \mathcal{E}$ [] となる。



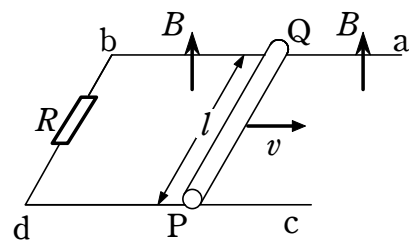
- 2 次の各場合のように、一様な磁束密度 B [T] の磁場がある空間で、導体棒 PQ を図のような向きに動かす。誘導電流は、導体棒中を $P \rightarrow Q$ と $Q \rightarrow P$ のどちらの向きに流れるか。



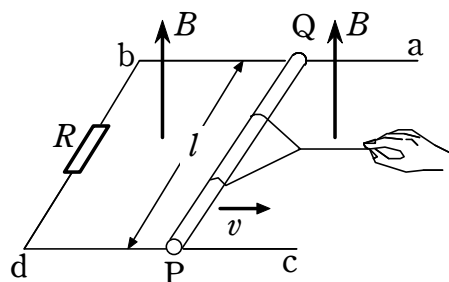
- 3 図のように、鉛直方向の一様な磁束密度 B [T] の磁場内に、 l [m] の間隔で置かれた 2 本の導線のレール ab , cd がある。bd 間を R [Ω] の抵抗でつなぎ、レール上に軽くて抵抗の無視できる導体棒 PQ を置いて、レールと垂直を保ちながら外力により一定の速さ v [m/s] で矢印の向きに動かす。次の値および向きを求めよ。

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

- 導体棒 PQ に生じる誘導起電力の大きさ V [V]
- 導体棒 PQ を流れる電流の大きさ I [A] と向き
- 導体棒 PQ が磁場から受ける力の大きさ F [N] と向き

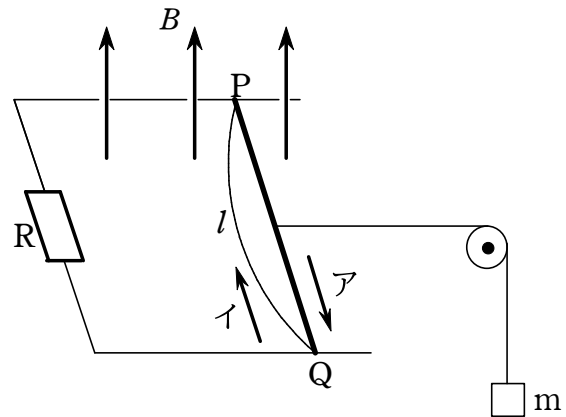


- 4 図のように、鉛直上向きの一様な磁束密度 B [T] の磁場内に、 l [m] の間隔で水平に置かれた 2 本の導線レール ab , cd がある。bd 間を R [Ω] の抵抗でつなぎ、レール上に軽くて抵抗の無視できる導体棒 PQ を置く。これにひもをつけて引き、右向きに一定の速さ v [m/s] で動かす。導体棒はレールと垂直を保ちながら、なめらかに動くものとする。



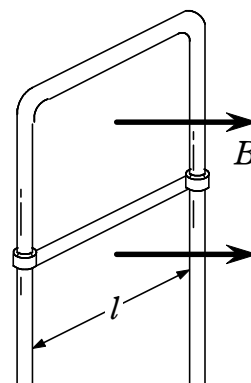
- 導体棒 PQ 間に流れる電流の大きさ I [A] と向きを求めよ。
- 時間 t [s] の間に抵抗で発生するジュール熱 Q [J] を求めよ。
- 導体棒 PQ をひもで t [s] 間引くときの、ひもを引く力のする仕事 W [J] を求めよ。

- 5 鉛直上向きの一様な磁束密度 $B[\text{T}]$ の磁場中に、水平に置かれた図のような回路がある。R は $R[\Omega]$ の抵抗、m は質量 $m[\text{kg}]$ 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 $l[\text{m}]$ 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 $g[\text{m/s}^2]$ とする。



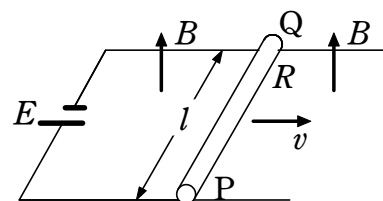
- (1) おもりの速さが $v[\text{m/s}]$ のとき、導線 PQ を流れる電流の大きさは何 A か。その向きは図のアとイのどちらか。
- (2) (1) のとき、導線 PQ が磁場から受ける力の大きさは何 N か。
- (3) (1) のとき、おもりの加速度の大きさは何 m/s^2 か。
- (4) やがておもりは一定の速さで落下する。このときの速さは何 m/s か。
- (5) (4) のとき、おもりに作用する重力が 1 秒間にする仕事は何 J か。
- (6) (4) のとき、抵抗 R で 1 秒間に発生するジュール熱は何 J か。

- 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。

- 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。

- 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。

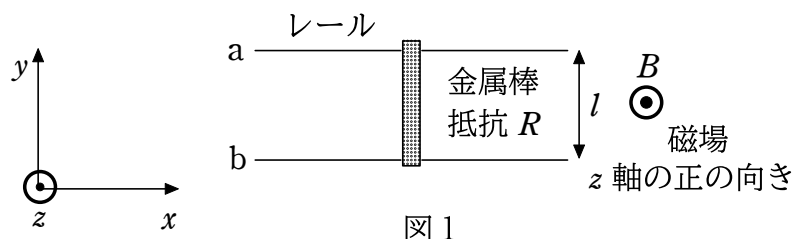


図 1

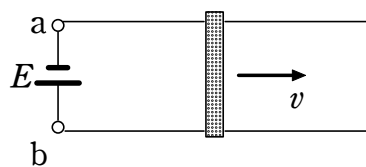


図 2

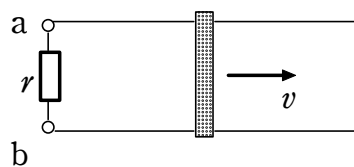


図 3

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

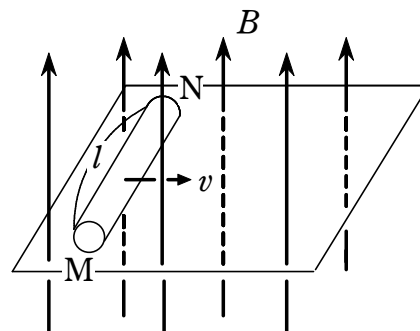
- (4) 金属棒の速さ v_0 [m/s] を求めよ。

- [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。

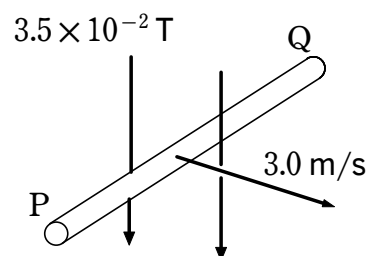
- 9 次の文の を埋めよ。また、{ } の中からは適当なものを選べ。

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。



- 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。



- 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。



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、スイッチいれた直後 → 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りますのでご注意ください。

D コイルに蓄えられるエネルギー

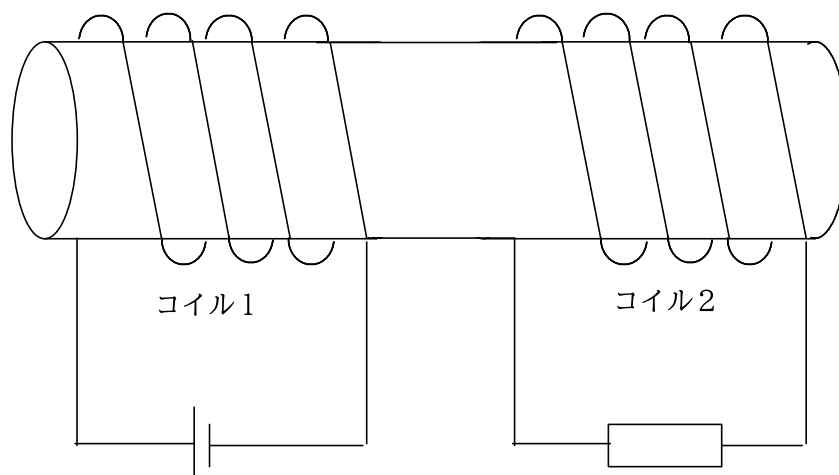
コイルはツンデレなので、電流の変化が嫌いなのです。それは、
スイッチを入れた瞬間に「0 [A] からいきなり電流を流せない」という意味だけでなく、
スイッチを切った瞬間も「流れていた電流をいきなり0 [A] にはできない」という意味でもあります。
 この場合、スイッチを切って電池もないのに、一瞬だけコイルが電流を流し続けようとします。それはまさにコイルがエネルギーを持っていることを意味します。

【コイルに蓄えられるエネルギー】

$$U = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$$

※ 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「電磁誘導」といいます。

【相互誘導による誘導起電力】

$$V = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

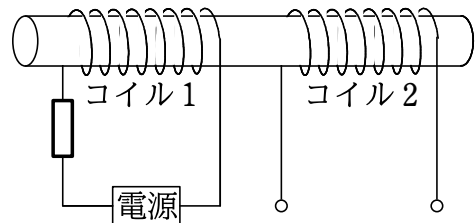
$M[H]$: 相互インダクタンス

- 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「 $\quad\quad\quad$ 」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 $V = -\frac{1}{\Delta t}[\quad\quad\quad]$ 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 $U = \frac{1}{2}[\quad\quad\quad]$ 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「 $\quad\quad\quad$ 」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 $V_2 = -\frac{1}{\Delta t}[\quad\quad\quad]$ となる。
- 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。
- 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。

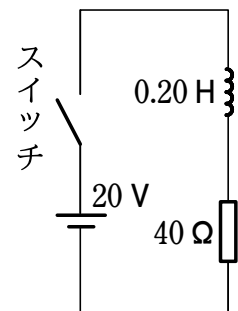
問題演習(アウトプット) シャベる、質問する、説明する、動く、他者と協力する

- 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。

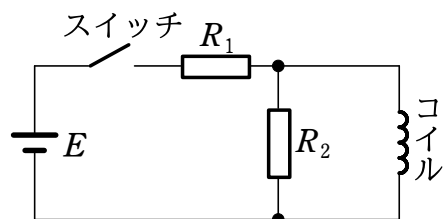
- 5 図のように、コイル1とコイル2を共通の鉄心に取りつける。このときの、コイル間の相互インダクタンスを 0.15 H とする。コイル1に流れる電流を1秒当たり 0.30 A の割合で増加させた。コイル2に生じる誘導起電力の大きさは何 V か。



- 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。
- (1) 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。
 - (2) 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。
 - (3) (2) のとき，コイルが蓄えているエネルギーは何 J か。

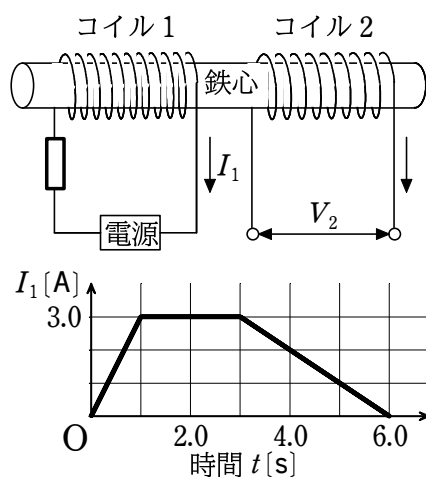


- 7 図のように、抵抗値 R_1 , R_2 [Ω] の抵抗, コイル, 起電力 E [V] の電池, スイッチが接続された回路がある。次の各場合について, R_1 [Ω] の抵抗を流れる電流 I [A] とコイルに生じる誘導起電力の大きさ V [V] を求めよ。



- (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。

- 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。





「不屈不撓の物理ホームページリンク」

パスワード ○○○○