

## Electromagnetic Induction

### 電磁誘導 2016-17

12<sup>th</sup> Physics 10

#### 1. Electromagnetic Induction

Induced Current	誘導電流
Induced Electromotive Force (emf)	誘導起電力
Magnetic Flux	磁束
Faraday's Law of Induction	ファラデーの電磁誘導の法則
Lenz's Law	レンツの法則
Induced Electric Field	誘導電場
Mechanical Work and Electrical Energy	仕事と電気エネルギー
Generators and Motors	発電機とモーター
Fleming's Left-Hand Rule	フレミングの左手の法則
Fleming's Right-Hand Rule	フレミングの右手の法則
Tohei's Right-Hand IBF Rule	Tohei の右手、電磁力の法則
Tohei's Right-Hand FBI Rule	Tohei の右手、力磁電の法則

#### 2. Mutual Induction

Mutual Inductance	相互インダクタンス
Self-induction	自己誘導
Self-inductance	自己インダクタンス
Henry	ヘンリー
Back Emf	逆起電力
Energy Stored in a Magnetic Field	磁場のエネルギー

#### 3. Alternating Voltages and Currents

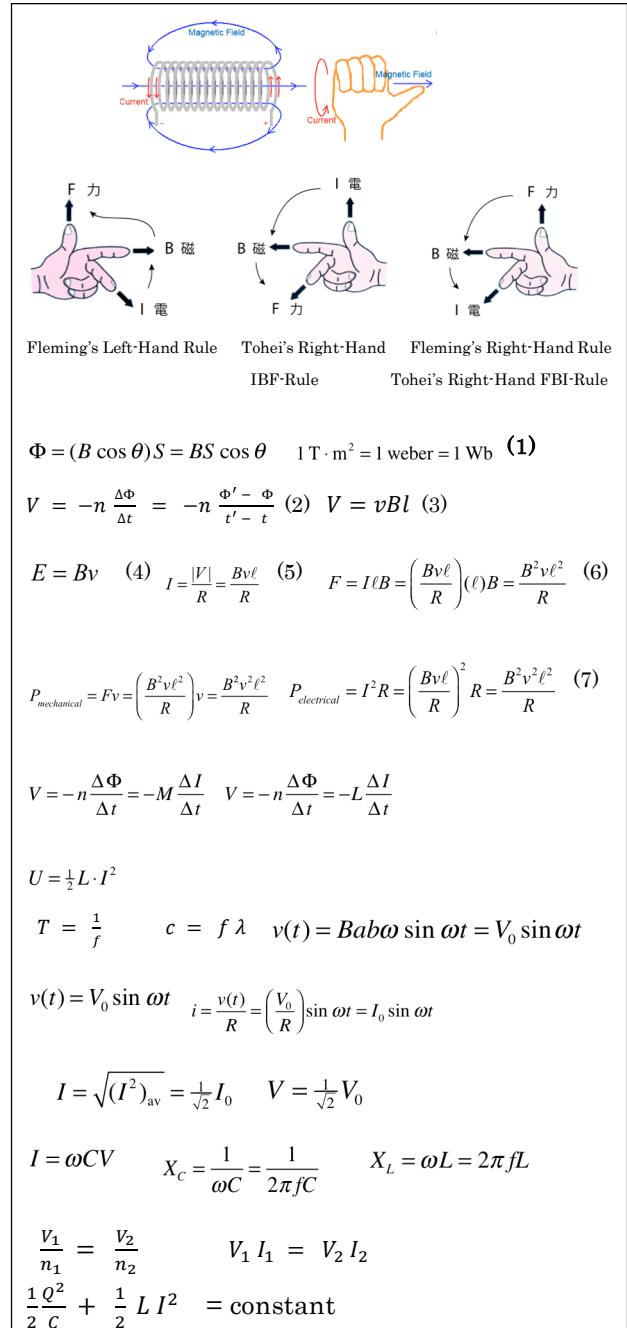
Generation of Alternating Current (AC)	交流の発電
Phasors	フェーザー
Root Mean Square (rms) Values	実効値
Average Power of AC	交流の電力
Circuit Breaker	ブレーカー、遮断機

#### 5. Capacitors in AC Circuits

Capacitive Reactance	容量リアクタンス、リアクタンス
RC Circuits	RC 回路
Impedance	インピーダンス
Inductors in AC Circuits	コイルを流れる交流
RL Circuits	RL 回路
Induced Reactance	誘導リアクタンス、リアクタンス
RLC Circuits	RLC 回路
Transformers	トランス、変圧器
Transmission	送電

#### 6. Electrical Oscillation

Oscillation Circuits	電気振動
Damped Oscillation	振動回路
Natural Frequency	減衰振動
Resonance	固有周波数
Resonant Circuits	共振、共鳴



Gravitational acceleration rate	重力加速度	$g = 9.80 \text{ m/s}^2$
Universal Gravitational Constant	万有引力定数	$G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$
Elementary Charge	電気素量	$e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$
Electron Mass	電子の質量	$m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$
Proton Mass	陽子の質量	$m_p = 1.673 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Coulomb's Law Constant	クーロンの法則の定数	$k = 8.99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$
Permittivity of free space	真空誘電率	$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2)$
Magnetic Permeability of Free Space	真空の透磁率	$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$
Speed of Light in vacuum	真空中での光速度	$c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$

## 1. Electromagnetic Induction 電磁誘導 (I25, II149)

[Q1-1] 「電流と磁場」の関係の歴史。

[Q1-2] 電磁誘導とはどのような現象か。電磁誘導を示す簡単な実験例を示せ。

## 2. Magnetic Flux 磁束

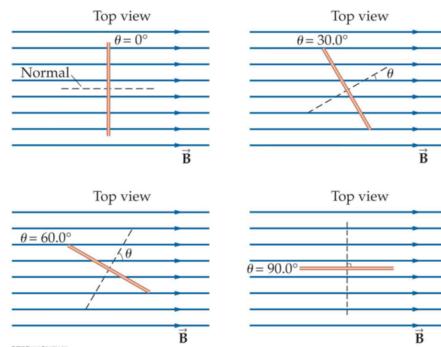
$$\Phi = (B \cos \theta)S = BS \cos \theta \quad 1 \text{ T} \cdot \text{m}^2 = 1 \text{ weber} = 1 \text{ Wb} \quad (1)$$

[Q2-1] 「磁束」の定義と単位を述べよ。

[Q2-2] 「電磁誘導」を「磁束」との関係で定性的に述べよ。

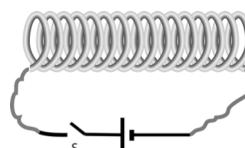
[Q2-3] Consider a rectangular coil of 6.0 cm high and 5.0 cm wide in a uniform magnetic field of  $2.0 \times 10^{-2} \text{ T}$ . Find the magnetic flux through this coil when its normal makes an angle of (a)  $0^\circ$ , (b)  $30.0^\circ$ , (c)  $60.0^\circ$ , and (d)  $90.0^\circ$  with the direction of the magnetic field  $B$ .

一辺の長さが 6.0 cm と 5.0 cm の長方形のコイルを、 $2.0 \times 10^{-2} \text{ T}$  の一様な磁束密度の中に置いた。コイル面の法線が磁場となす角度が次の場合の磁束を求めよ。(a)  $0^\circ$ 、(b)  $30.0^\circ$ 、(c)  $60.0^\circ$ 、(d)  $90.0^\circ$  (II-149)



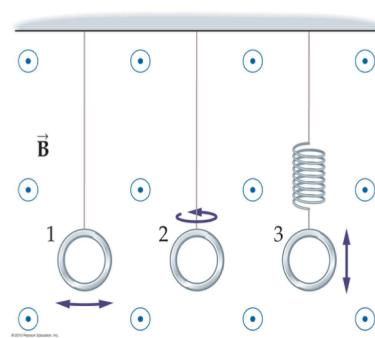
[Q2-4] Which diagram in Fig. 4 correctly shows a magnetic field configuration?

1.0 mあたり 200 回巻いた半径 10cm のソレノイドに 5.0A の大きさの電流を流すとき、このソレノイド内部を通る磁束はいくらか。(II-149)



[Q2-5] The three loops of wire shown in the figure are all in a region of space with a uniform, constant magnetic field. The three loops move in the manners shown. Which loop or loops have a magnetic flux that changes with time?

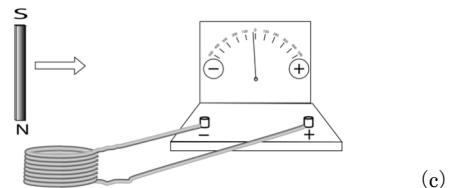
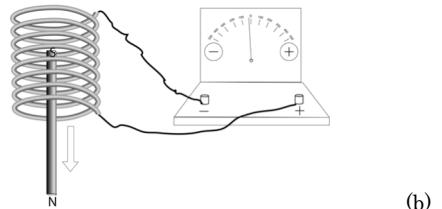
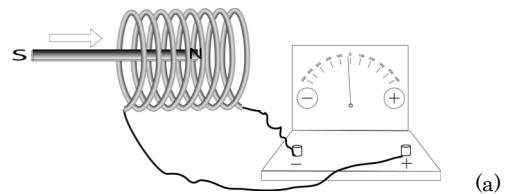
図で 3 個の輪が一様で一定強度の磁場の中で図のような動きをしている。どの輪の磁束が時間変化を示すか。(W803)



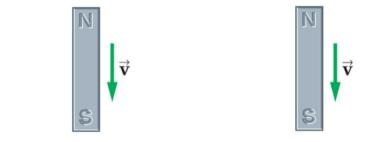
### 3. Lenz's Law レンツの法則

[Q3-1] Describe the Lenz's Law in terms of “induced emf,” “induced current” and “magnetic flux.” レンツの法則を、「誘導起電力」、「誘導電流」および「磁束」の3個の用語を用いて述べよ。

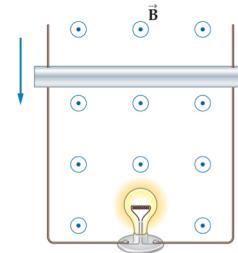
[Q3-2] When the magnet is moved as shown, does the galvanometer show a positive current or negative current? 図のように磁石が動いている。検流器の針は正に振れるか？負に振れるか？



[Q3-4] 図で、棒磁石が上方から下に置いた金属製の輪に向かって落ちている。右の輪には切れ目がある。左右どちらの磁石の落下速度が大きいか。 (W807)



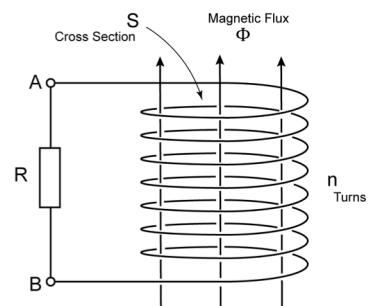
[Q3-5] 右の図で、導体棒が導体のレール上を移動すると起電力が生じる。その理由と電流の向きを述べよ。 [Motional emf] (W810)



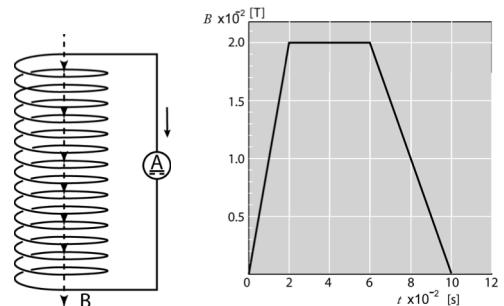
## 4. Faraday's Law of Induction ファラデーの電磁誘導の法則

$$V = -n \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -n \frac{\Phi' - \Phi}{t' - t} \quad (2)$$

[Q4-1] 右図のように、断面積  $S=4.0 \times 10^{-4} \text{m}^2$ 、巻き数  $n=1000$  のコイルが一様な磁場中にある。磁束密度  $B$  が  $7.0 \times 10^{-2} \text{T}$  から一定の割合で減少して 0.50 秒後に  $2.0 \times 10^{-2} \text{T}$  になった。この間に AB 間に生じる誘導起電力の大きさと向きを求める。(II-151)

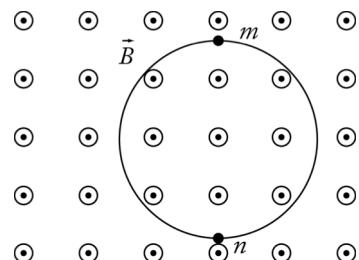


[Q4-2] 断面積  $1.0 \times 10^{-3} \text{m}^2$ 、巻き数 500 回、抵抗  $0.20 \Omega$  のコイルの断面に垂直な向きに磁場をかける。コイルの両端を短絡させ、右図のグラフのように磁束密度を変化させると、コイルに流れる電流（↓を正とする）はどのように変化するか。



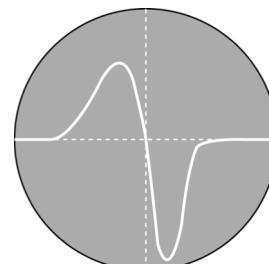
[Q4-3] The flexible wire loop in the figure has an area of  $80 \text{ cm}^2$  and is in a magnetic field of  $0.70 \text{ mT}$ . By grasping the loop at  $m$  and  $n$  and pulling radially outward, a student collapses it to a straight line in  $0.15 \text{ s}$ . Find the induced emf in the loop as is collapsed.

図に示すように、円形で柔らかな導線の輪の面積は  $80 \text{ cm}^2$  で  $0.70 \text{ mT}$  の磁場に対して垂直に位置している。ある生徒がそれを  $m$  と  $n$  の位置で掴み外向きに引いて直線上に潰した。潰すに要した時間は  $0.15 \text{ s}$  である。この間に誘導された誘導起電力の大きさを求める。



[Q4-4] 鉛直に固定した空芯コイルをオシロスコープと接続し、その中を棒磁石を落下させたところ、プラウン管に図のような図形が得られた。この図で、横軸は時間を縦軸はコイルに生じた起電力を示している。次の現象を説明せよ。

- (1) 図形の前半の山の高さよりも後半の谷の深さの方が大きい。
- (2) 横軸と曲線で囲まれた面積は、前半と後半で等しい。
- (3) コイルの中を通過するときの棒磁石の落下運動の加速度の大きさは、重力加速度の大きさより小さい。

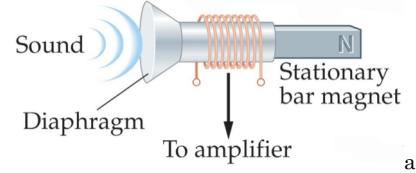


## 5. Applications of Induction 電磁誘導の利用例

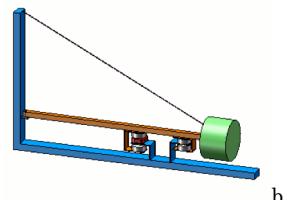
[Q4-1] ファラデーの電磁誘導の法則を応用したものとして次が挙げられる。どのような仕組みだろうか。

(a) Dynamic Microphone and Dynamic Speaker

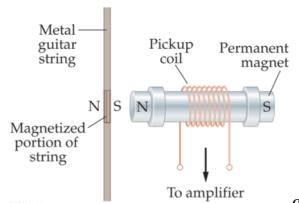
ダイナミックマイクロフォン、ダイナミックスピーカー



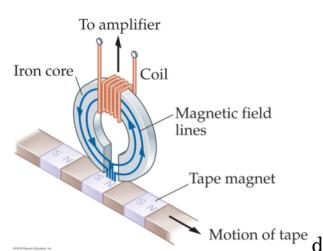
(b) Seismograph (Seismometer) 地震計



(c) Electric guitar エレキギター

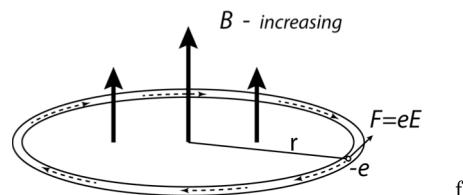


(d) Magnetic tape recording

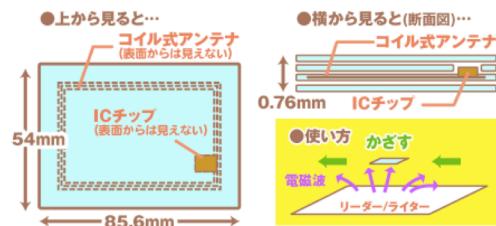


(e) Computer disk drives, credit card readers at grocery stores, audio tape players, ATM machines

(f) Betatron ベータトロン。



(g) 非接触型 IC カード Contactless IC card



## ベータトロン

円運動する電子を、軌道半径を変えないで加速する方法として、与える磁場の変化による誘導電場を用いるベータトロンと呼ばれる装置がある。この原理について考えてみよう。

図のように、電子は半径  $r$  のドーナツ状真空チューブ内を運動する。重力の影響は無視できるとする。初期の磁場の磁束密度は  $B$  [T] で、上向き ( $z$  軸の正の向き) とする。電子の回転の向きは上から見て (1.) である。また、そのときの速さは、(2.)、周期は (3.) と書ける。

(1)

(2)

(3)

この電子を加速するために磁束密度を大きくするわけだが、均一に変化させると軌道半径が変化してチューブ内に維持することができない。そのため、軌道内部の平均の磁束密度を  $B$ 、軌道上の磁束密度を  $B_r$  としてその時間変化率の関係を求めるところにする。

ファラデーの電磁誘導の法則、 $V = |\Delta\Phi/\Delta t|$  から、電子に対する電磁誘導は軌道内部の磁束の変化に対応して起こる。軌道円周内部の磁束  $\Phi$  [Wb] は (4.) であるので、円周上の誘導起電力  $V$  [V] は (5.) と書ける。軌道円周上にこれに対応する電場  $E_r$  [V/m] が生じたとみなすことができ、(5.) を用いて (6.) と表すことができる。この電場から受ける力によって電子が加速される。運動方程式から、その加速度は (7.) である。

(4)

(5)

(6)

(7)

一方、電子の速さ  $v$  [m/s] と軌道上の磁束密度  $B_r$  [Wb] は (2.) であり、電子の加速度  $a$  [m/s<sup>2</sup>] は  $B_r$  の時間変化に対して (8.) で表される必要がある。 (7.) と (8.) が一致する式から、  $B$  と  $B_r$  の時間変化について、関係式 (9.) が得られる。

(8)

(9)

つまり、電子の円周軌道上の磁束密度  $B_r$  の変化が、円軌道内の平均の磁束密度の変化の  $1/2$  のとき電子は同じ円軌道上で加速できる。こうして、ベータトロンでは、中心部の磁束変化が周辺部より速く増加するような不均一な磁場をかける。

上の間の結果をもとに、実際のベータトロンの磁極の断面形状として図 3 の (a), (b) のどちらが適当であるか選べ。図中の磁極間の矢印は磁力線の概略である。磁力線の密度は磁束密度の大きさに対応している。

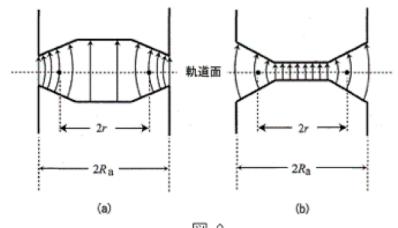
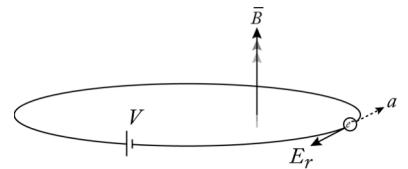
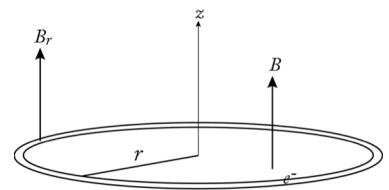
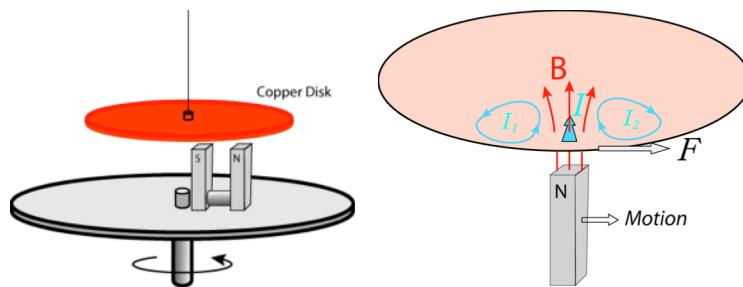


図 3

## 6. 漩電流 Eddy Current

### 1) アラゴーの円板 Arago's Disk

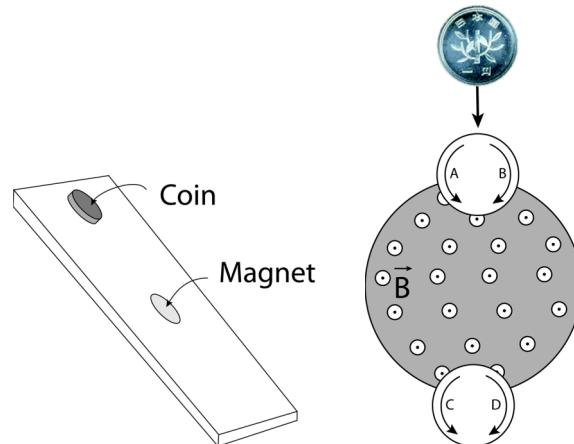
銅の円盤の下で磁石を動かすと円盤が動く理由を説明せよ。



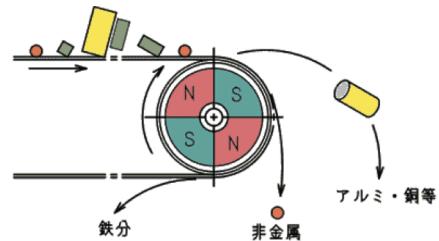
### 2) コインストッパー Coin Stopper

A one yen coin slides down onto a magnet where the N pole directs upside. When the coin passes through the upper edge and lower edge, a current flows inside the coin. Predict the directions. Answer two directions from A to D.

一円玉が斜面を磁石の上に滑り降りる。磁石のN極は紙面の上を向いている。コインが磁石の上と下の端を通過するときにコインの中に電流が流れる。その時の電流の向きを予測せよ。答えはA~D から二つを選べ。



### 3) リサイクル缶選別機

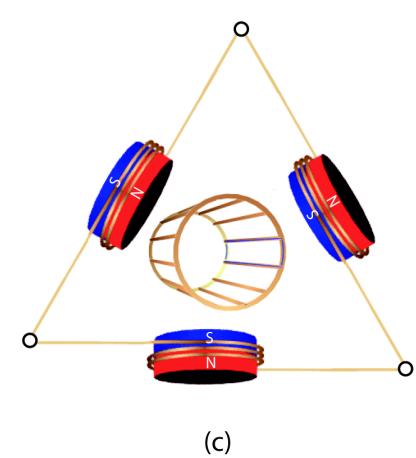
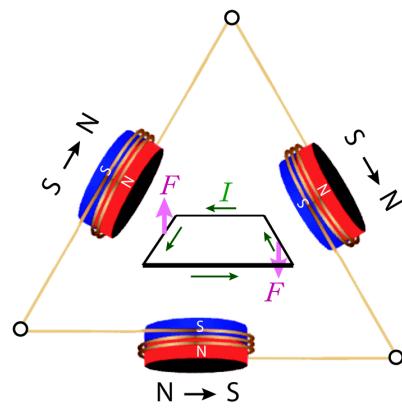
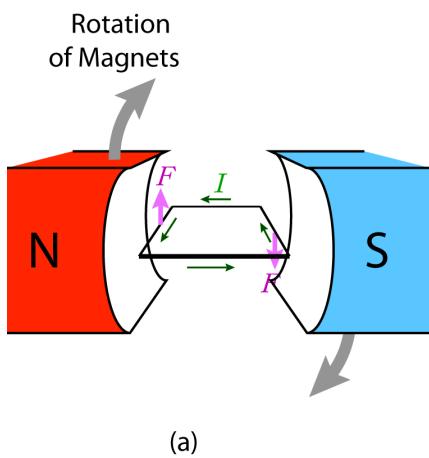


### 4) 台所の Induction Stove 電磁調理器、



## 5) 誘導モーター Induction Motor

「誘導モーター」の原理とその特徴を説明せよ。



## 6) Metal detector 金属探知機

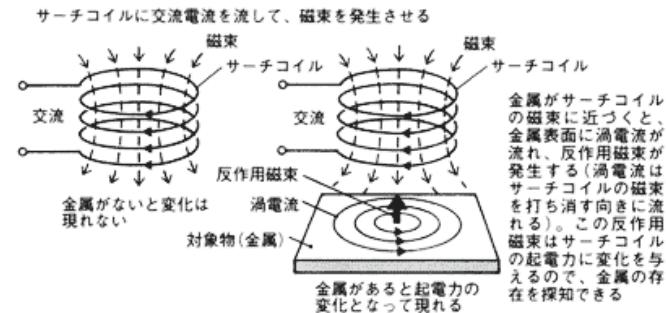
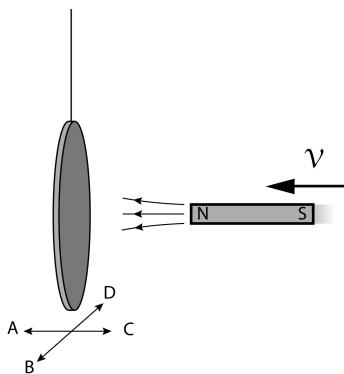


図1 金属探知機の原理

## 6) その他

糸で吊るされている銅の円盤に磁石のN極が近づく。円盤はどのように動くか。



## 7. Mechanical Work and Electrical Energy 磁場の中を運動する導線

$$V = vBl \quad (3) \quad E = Bv \quad (4)$$

[Q5-3] 図のように長さ  $l$  の導線  $ab$  が 2 本の導線  $de$  と  $cf$  に接していて、 $abcd$  は閉じた回路を作っている。磁場  $B$  が導線に垂直にあり、この磁場と導線の両方に垂直な方向に導線を一定の速さ  $v$  で動かす。次を求めるよ。

- (1) 導体中の電子に働くローレンツ力から、導体に生じる誘導起電力。
- (2) 閉回路  $abcd$  を貫く磁束の変化から、導体に生じる誘導起電力。
- (3) 電流。
- (4) 導体棒が磁場から受ける力の大きさと向き。
- (5) 外力の大きさと向き。
- (6) 外力がする仕事率。
- (7) 抵抗が消費する仕事率（ジュール熱）。

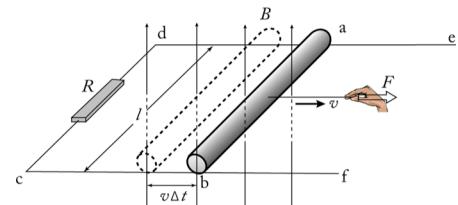


Fig. 27

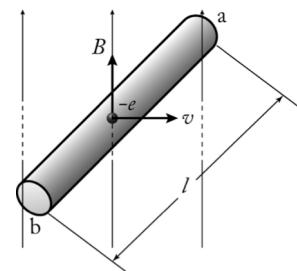
[Q5-4] Fig. 27 の導体棒が  $0.445 \text{ T}$  の磁束密度の磁場中を動くとき  $0.668 \text{ V/m}$  の誘導電場を生じた。棒の速さはいくらか。

[Q5-5] Fig. 27 の抵抗は  $12 \Omega$  の抵抗を有し、 $5.0 \text{ W}$  の電力を消費する。導体棒は長さ  $1.25 \text{ m}$  で、 $3.1 \text{ m/s}$  の速さで動いている。

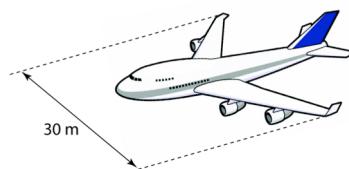
- (a) 磁束密度の大きさはいくらか。
- (b) 導体棒を一定の速さで動かす外力の大きさはいくらか。
- (c)  $0.58 \text{ s}$  間に外力のする仕事はいくらか。
- (d) この時間に抵抗が消費するエネルギーはいくらか。

[Q5-1] 磁束密度が  $B$  の磁場中で、長さ  $l$  の導線が磁場に垂直な方向に速度  $v$  で動くとき導線の両端  $ab$  に生じる起電力の大きさを以下の順序で求めよ。

- (1) 導体棒中の自由電子は、導体棒の動く向きに速さ  $v$  を持つ。自由電子の受けけるローレンツ力の大きさと向きを求めるよ。
- (2) ローレンツ力によって、 $a$  および  $b$  に現れる電荷は、どちらが正で、どちらが負か。
- (3) 自由電子の移動が止まったとき、導体中の電荷の偏りによる電場の大きさを  $E$  とし、自由電子がこの電場から受ける力とローレンツ力のつり合いの式をたてて、 $E$  を求めよ。
- (4)  $ab$  間の電位差  $V[V]$  を  $E$  と  $l$  で表し、(3)の結果を代入して  $V$  を求めよ。 (II-179)



[Q5-2] 地磁気の鉛直上向きの成分の大きさが  $4.0 \times 10^{-5} \text{ T}$  である空中を、両翼の両端の長さが  $30 \text{ m}$  のジェット機が  $900 \text{ km/h} (=250 \text{ m/s})$  で水平飛行している。このとき、両翼の両端には、どれだけの起電力が生じているか。大きさと正負の向きを求めるよ。

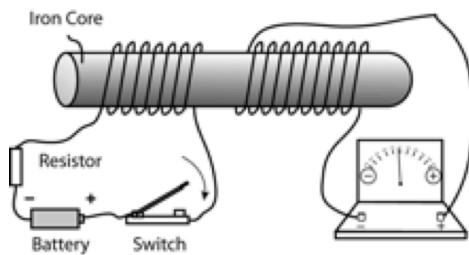


## 8. Mutual Inductance 相互誘導

$$V = -n \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -M \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad M: \text{Mutual Inductance}[H]$$

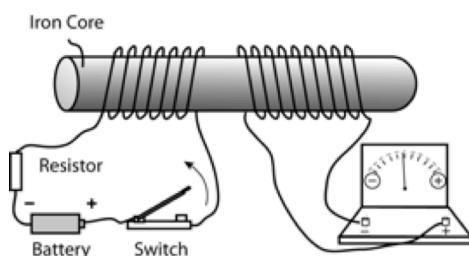
[Q8-1a] The instance the current is applied in the coil at the left, the galvanometer shows a swing to the positive or negative side. Answer "positive" (+) or "negative" (-).

左側のコイルに電流を流した瞬間に。検流器の針は正に振れるか？負に振れるか？「正」(+)か「負」(-)で答えよ。

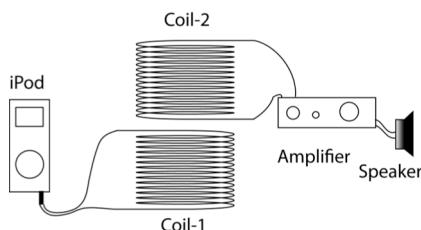


[Q8-1b] The instance the current is switched off in the coil at the left, the galvanometer shows a swing to the positive or negative side. Answer "positive" (+) or "negative" (-).

左側のコイルの電流を切った瞬間に。検流器の針は正に振れるか？負に振れるか？「正」(+)か「負」(-)で答えよ。

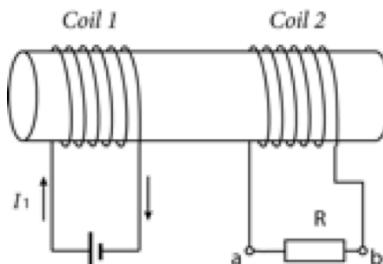


[Q8-2] 図のように2個のコイルで音声電流を受け渡すことができる。



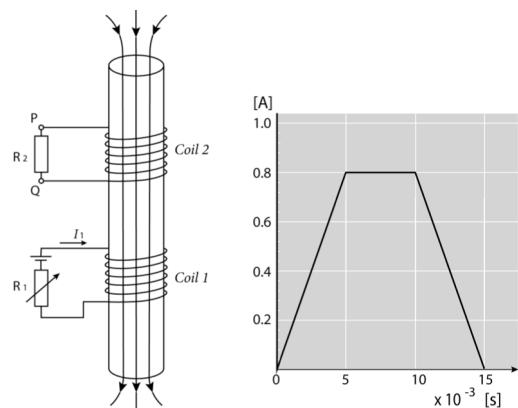
[Q8-3] 図の1次コイルを流れる電流が  $I_1$  の向きに毎秒 3.0 A の割合で増加するとき、2次コイルに 6.0 V の誘導起電力が生じた。

- (a) 相互インダクタンスはいくらか。
- (b) a,b 間でどちら向きに電流が流れるか。



[Q8-4] 鉄心にコイル1、2を巻いて図の実験を行った。軟鉄心は、1次コイルに電流が流れたときにできる磁束をほとんど逃がさず、2次コイルを貫かせる働きをする。

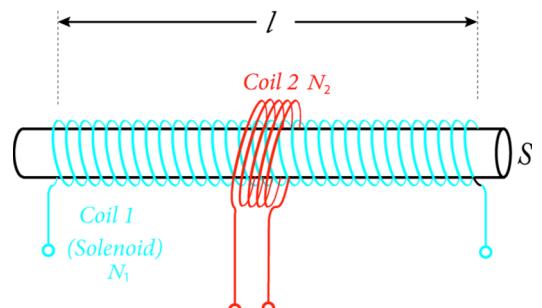
- (1) 図で抵抗  $R_1$  を変化させ、コイル1を流れる電流を増加させるとき、コイル2の両端PとQにつながれた抵抗  $R_2$  を流れる電流はどちら向きか。コイル1の電流を減少させるときはどうか。
- (2) コイル1を流れる電流  $I_1$  を図のグラフのように変化させたとき、コイル2に生じる誘導起電力はどのように変化するか。ただし、相互インダクタンスを  $M=0.10 \text{ H}$  とし、外部回路に対してP側が電源の正(+)極としてはたらくような起電力を正とする。



[Q8-5] In the figure shown, a long solenoid (Coil 1) with length  $l$  and cross-section  $S$  is closely wound with  $N_1$  turns of wire. A coil (Coil 2) with  $N_2$  turns surrounds it at its center, as shown in the figure. Find the mutual inductance.

図は、長さ  $l$ 、断面積  $S$ 、巻き数  $N_1$  のソレノイド (1次コイル) の中央に巻き数  $N_2$  の2次コイルが巻き付けてある。相互インダクタンスを求めよ。1次コイルと2次コイルを貫く磁束は等しいものとする。 (啓 317)

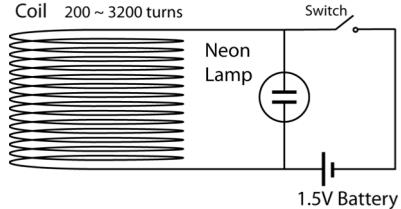
[Q8-6] 前の問題で、 $l = 0.50 \text{ m}$ 、 $S = 10 \text{ cm}^2$ 、 $N_1 = 1000$ 、 $N_2 = 10$  として相互インダクタンスを求めよ。



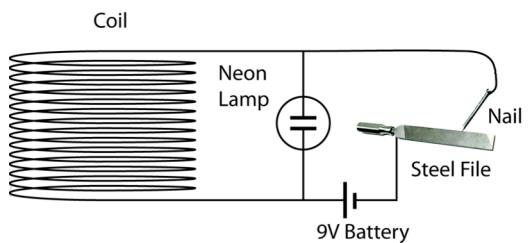
## 9. Self-inductance 自己誘導

$$V = -n \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad L: \text{Self-inductance [H]}$$

[9-1a] ネオンランプを光らせるには 80 V 以上の電圧が必要であるので、スイッチを入れたときは全く光らないが、スイッチを切った直後は一瞬明るく輝く。これはなぜか。



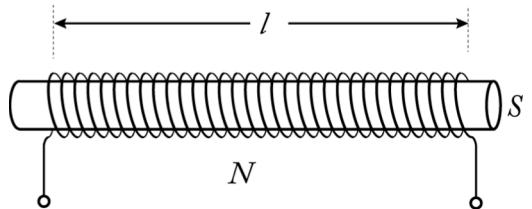
[Q9-1b] ネオンランプを光らせるには 80 V 以上の電圧が必要である。図のような組み合わせでヤスリの表面を釘でこすると 9 V 電池でネオンランプを連続的に点滅させることができる。これはなぜか。



[9-2] コイルを流れる電流が毎秒 2.0 A の割合で増加するとき、コイルに 5.0 V の逆起電力が発生した。コイルの自己インダクタンスは幾らか。 (啓 311)

[Q9-3] 導線を密に巻いた十分に長いソレノイドがある。このコイルの巻き数を N、断面積を S、長さを L とする。

- コイルに強さ I の電流が流れている時、コイルを貫く磁束  $\Phi$  を求めよ。
- コイルを流れる電流が  $\Delta t$  の間に  $\Delta I$  だけ変化した時、コイルに発生する誘導起電力 V を求めよ。
- このコイルの自己インダクタンス L を求めよ。 (啓 311)

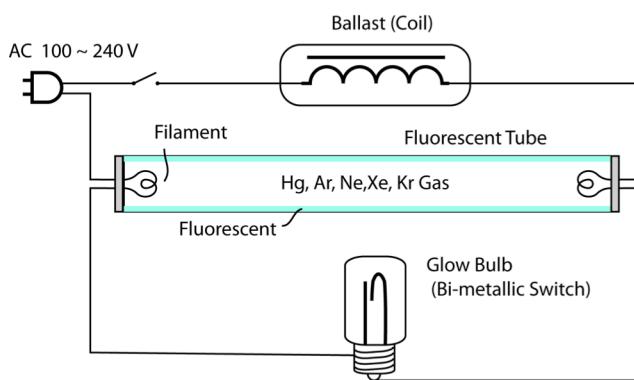


[Q9-4] 0.60 H の自己インダクタンスのコイルに流れる電流が、 $1.0 \times 10^{-2}$  秒間に一様に 5.0 A だけ増加した。増加している間、コイルに生じる誘導起電力の大きさはいくらか。 (II159)

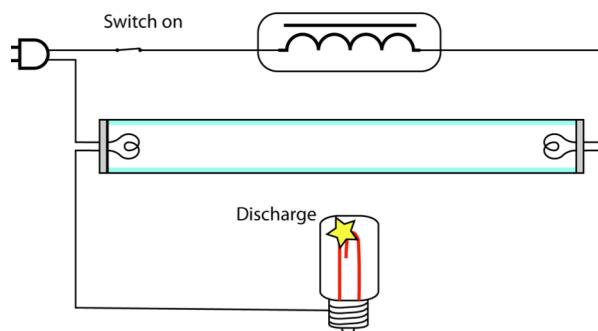
[Q9-5] 2.9 mH のインダクタンスで 5.6 A の一定電流が流れるコイルを有する電磁石がある。スイッチを急に切ったところ、短い時間  $\Delta t$  の間に電流が 0 に下がった。この時間の間の誘導起電力の平均値が 7.3 V であるとすると、 $\Delta t$  はいくらか。  
(W817)

[Q9-6] 長さ 8.0 cm で 500 巻きのソレノイドで、0.35 秒の間に電流が 0 から 2.5 A に増加し誘導起電力は 0.012 V であった。  
(a) インダクタンスを求めよ。(b) ソレノイドの断面積を求めよ。  
(W818)

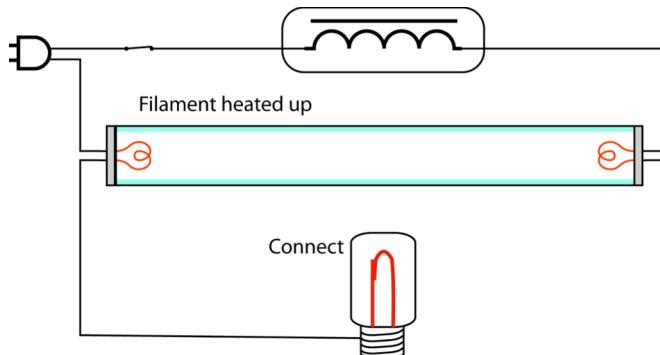
[Q9-7] 蛍光灯(スターター式)の点灯のメカニズムを説明せよ。



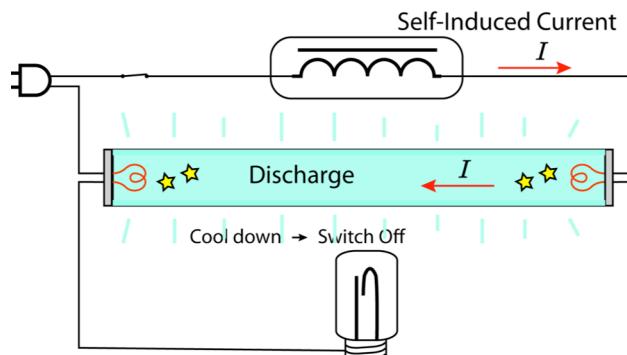
(1)



(2)

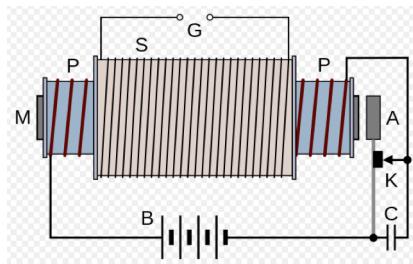


(3)



(4)

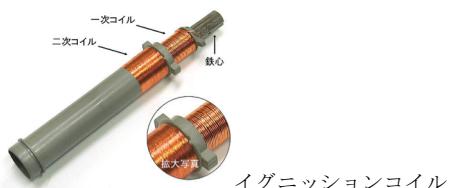
[Q9-8] インダクションコイルは、10V 程度の直流電源（小型の電池は不可）から数万Vの高圧電流を作り出す装置である。そのメカニズムを説明せよ。



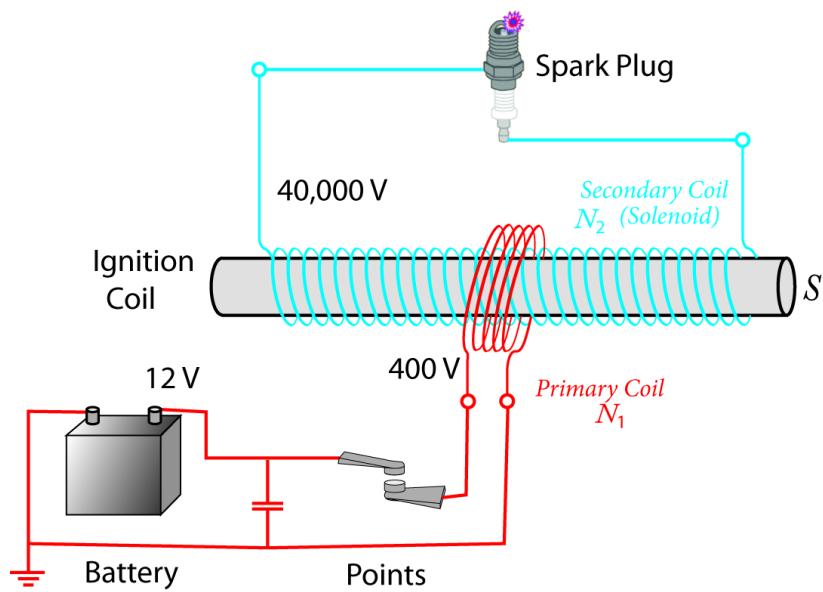
[Q9-9] ガソリンエンジンの燃料を点火するには、鉛バッテリーの12Vの電圧を数万Vまで昇圧する必要がある。この昇圧を可能にしているのがイグニッションコイルである。そのメカニズムを説明せよ。



1. スイッチングシステム / ポイント
2. イグニッションコイル
4. ディストリビュータ
5. スパークプラグ



(<http://8speed.net/ishikawa/2010/10/post-5/>)



## 9. Energy Stored in a Magnetic Field コイルが持つ磁場のエネルギー

磁場のエネルギー

$$U = \frac{1}{2} L I^2 \quad [J]$$

単位体積あたりの磁場のエネルギー

$$u_m = \frac{1}{2 \mu_0} B^2 = \frac{1}{2} \mu_0 H^2 \quad [J/m^3]$$

[Q9-1] 単純化された、

コイル、電池およびスイッチからだけからなる回路(Fig. 44)でコイルに蓄えられるエネルギーを次の順で求めよ。(II-159)

- (a) コイルのインダクタンス :  $L$ 、時間  $\Delta t = T$  [s]に電流は  $I_i \rightarrow I_f$  に増加
- (b) 誘導起電力,  $V$
- (c) 平均の電流値,  $I_{av}$
- (d) 誘導起電力によって得られる平均の電力、 $P_{av}$
- (e) 起電力による電力量 (全エネルギー),  $U$

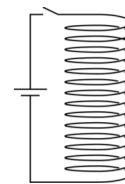


Fig. 44

[Q9-2] 自己インダクタンス  $15\text{H}$ 、抵抗  $5.0\text{ }\Omega$  のコイルに、 $2.0\text{ A}$  の安定した電流が流れている。このとき、コイルに蓄えられているエネルギーはいくらか。また、コイルの抵抗部分とコイル部分で消費されている電力はそれぞれいくらか。(II-161)

[Q9-3] コイルに  $2.5\text{ A}$  の電流が流れていって  $0.10\text{ J}$  のエネルギーを蓄えている。このコイルのインダクタンスはいくらか。(W821)

[Q9-4] 図の回路のスイッチを閉じて十分時間が経った後、コイルに蓄えられたエネルギーは  $3.11 \times 10^{-3}\text{ J}$  である。抵抗  $R$  の大きさはいくらか。(W821)

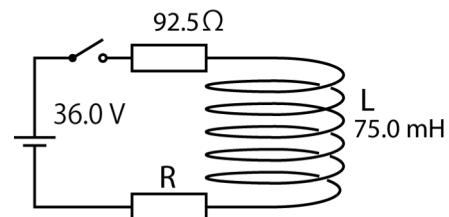


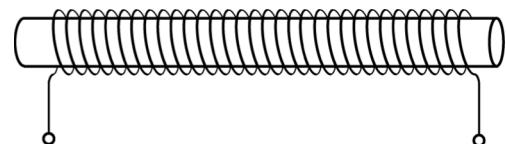
Fig. 47

[9-5] The coil of a certain solenoid is wound uniformly on a wooden rod in such a way that the interior of the solenoid has a volume of  $20\text{ cm}^3$ . When there is a current of  $0.30\text{ A}$  in the solenoid, the field within it is  $0.060\text{ T}$ . (a) Find the energy per unit volume of the magnetic field.

(b) What is the inductance of the solenoid?

あるソレノイドは均一に木製の棒に巻きつけてあり、その内容積は  $20\text{ cm}^3$  である。ソレノイドに  $0.30\text{ A}$  の電流が流れるときの磁束密度は  $0.060\text{ T}$  である。

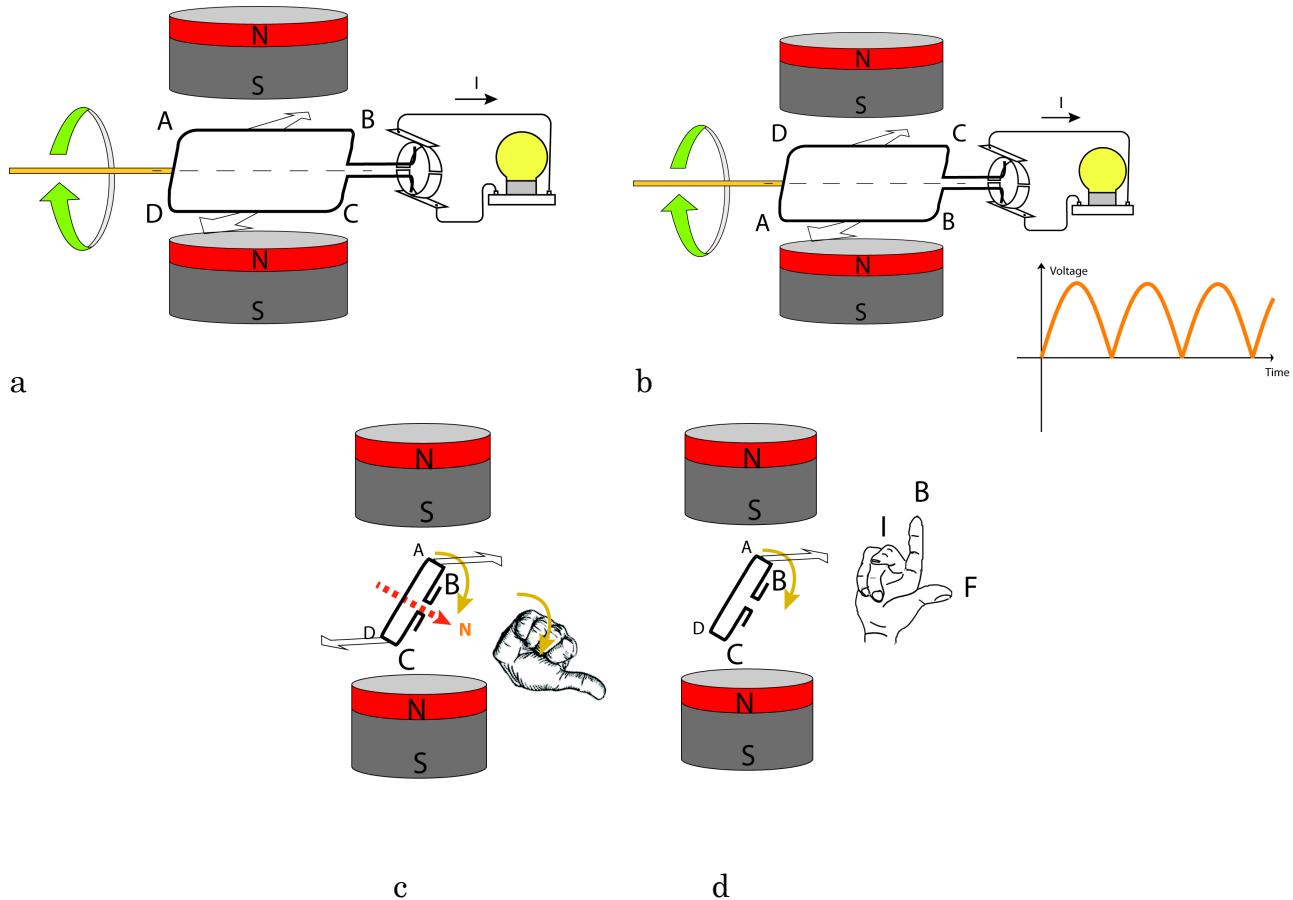
- (a) 磁場の単位体積あたりのエネルギーはいくらか。
- (b) このソレノイドのインダクタンスはいくらか。



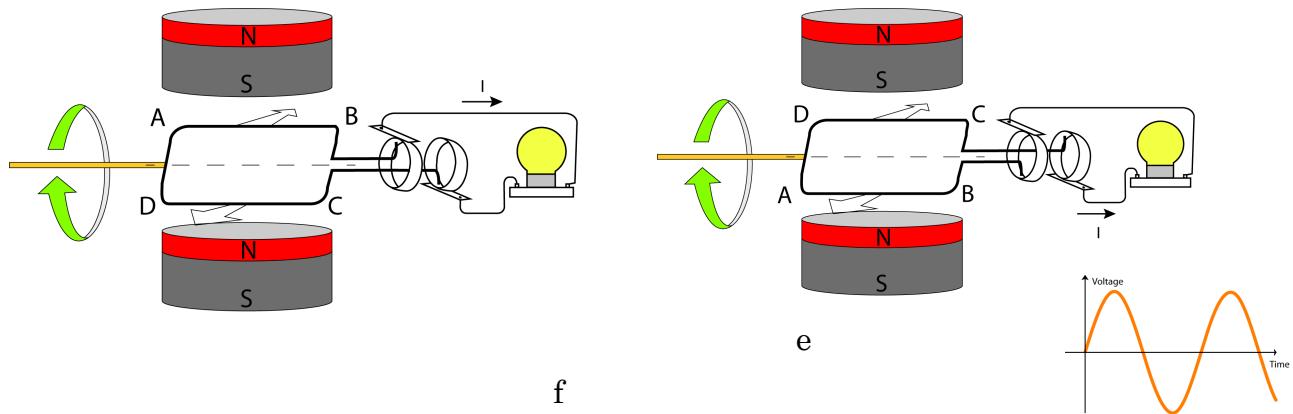
## 10. Generating Alternating Current 交流の発電

[Q10-1] The Figures show the principle of a DC and AC generators. Explain. 図は直流および交流発電機の原理を示している。説明せよ。

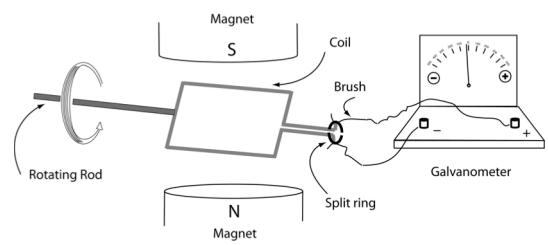
## DC Generator



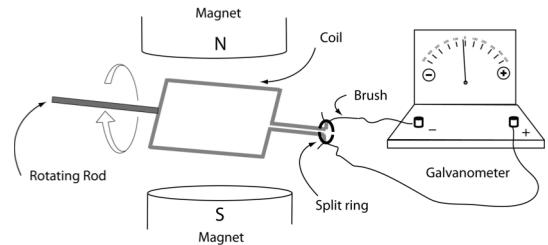
## AC Generator



[Q10-2] The figures show generators. The coil rotates around the rotating rod in the direction shown. Does the galvanometer show a positive current or negative current? 図は発電機を示している。コイルは回転軸の周りを示された方向に回っている。検流器の針は正に振れるか？負に振れるか？

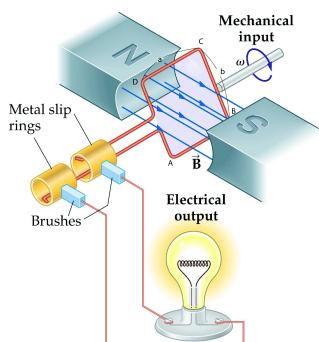


(a)

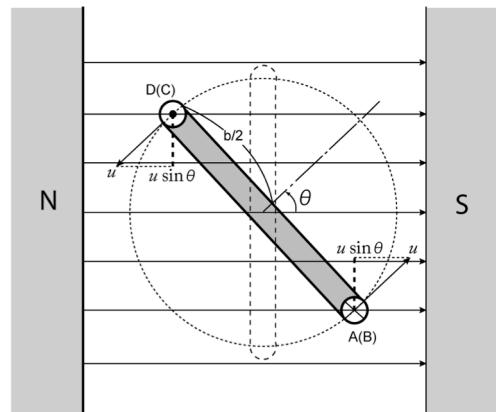


(b)

[Q10-3] 図 a と b は交流発電機の原理を示す。出力電圧を時間の関数として表す式を求めよ。

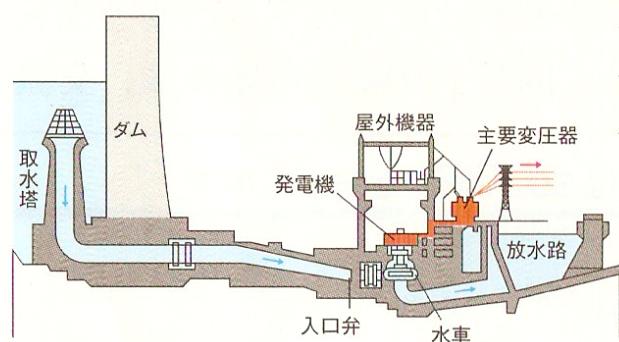


a

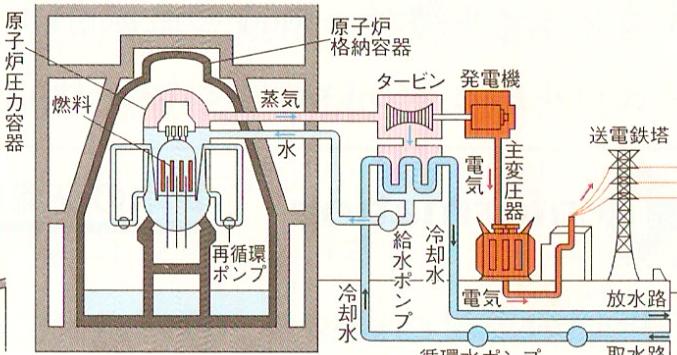


b

[Q10-4] 前の問題で、磁場の磁束密度が一様で  $B$ [T]、コイルの面積を  $S$  [m<sup>2</sup>] とする。この一巻きのコイルを毎秒回で回転させたとき、発生する交流電圧の最大値  $V$ [V]を表せ。

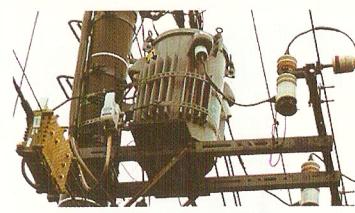
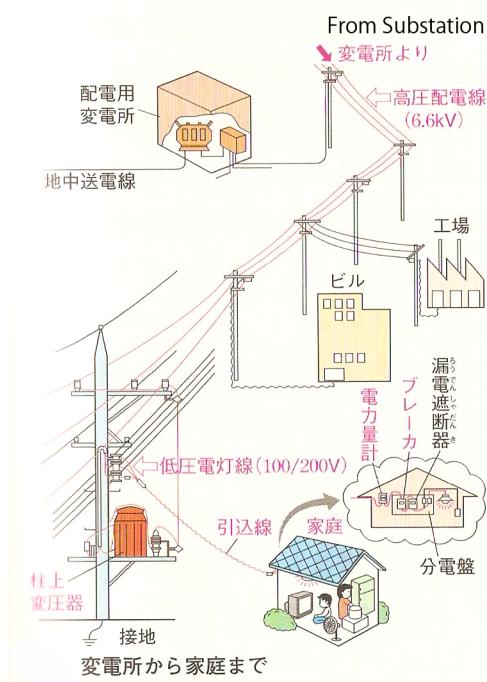
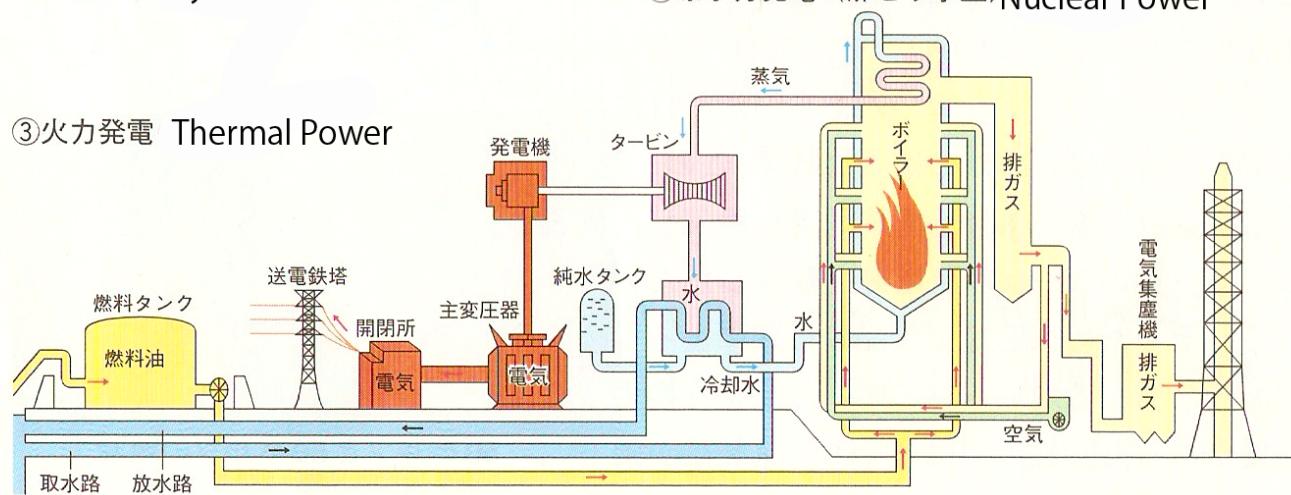


①水力発電 Hydroelectric

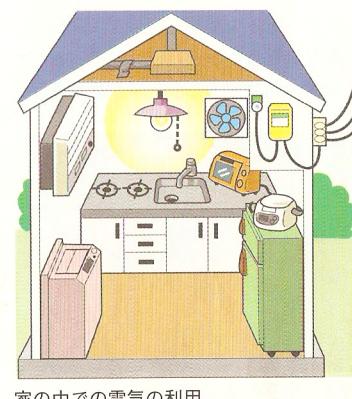


②原子力発電 (沸とう水型) Nuclear Power

③火力発電 Thermal Power

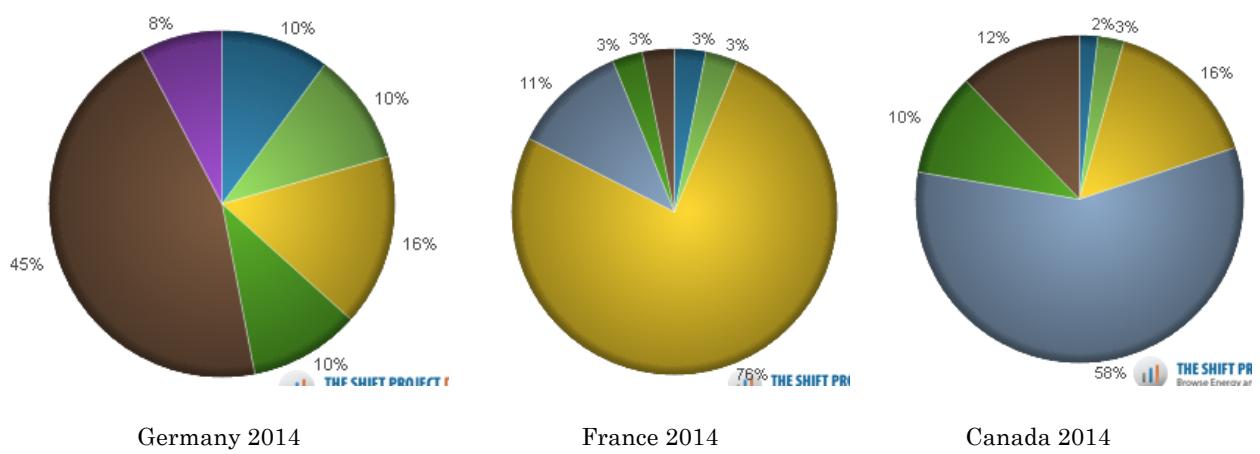
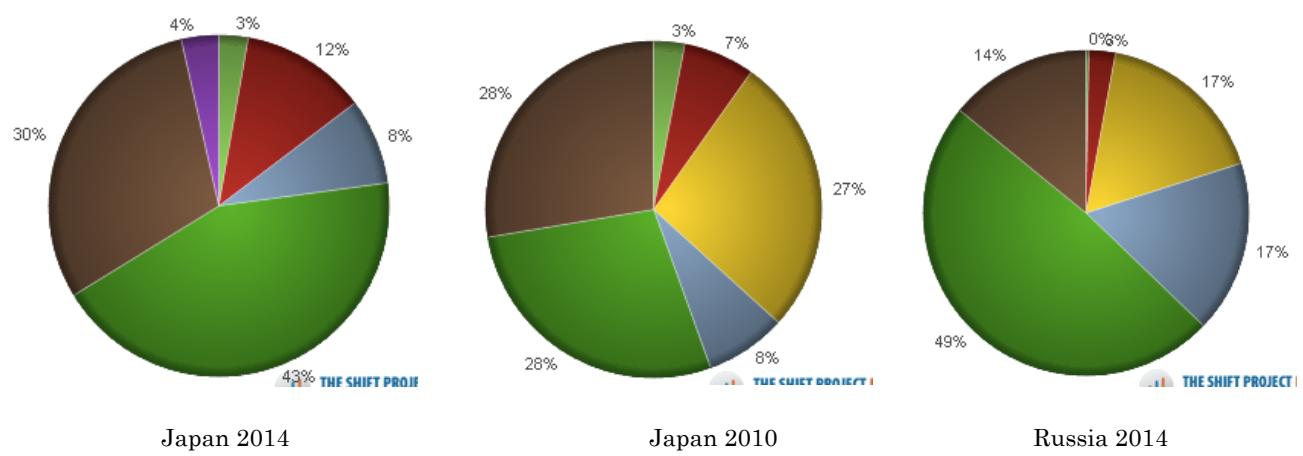
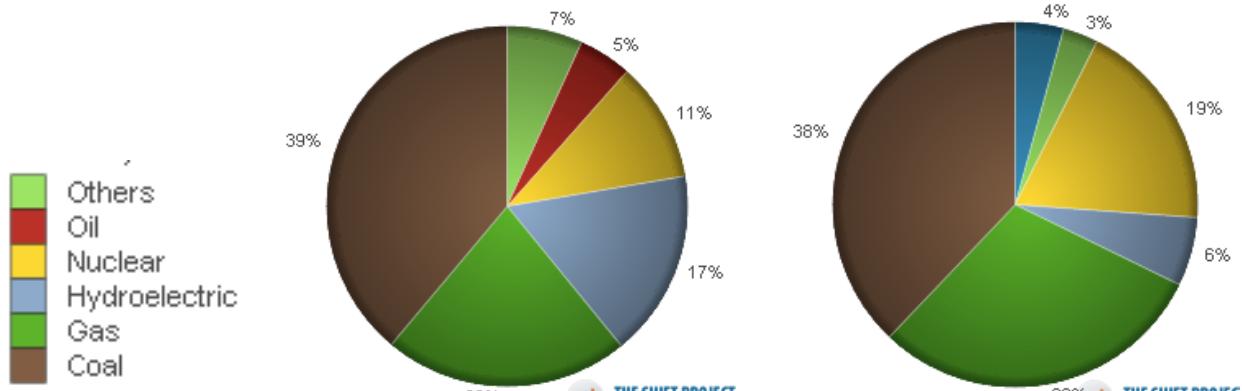


柱上変圧器 Transformer



家の中での電気の利用

## Breakdown of Electricity Generation by Energy Source

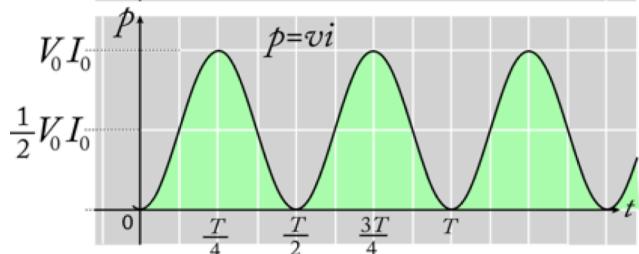
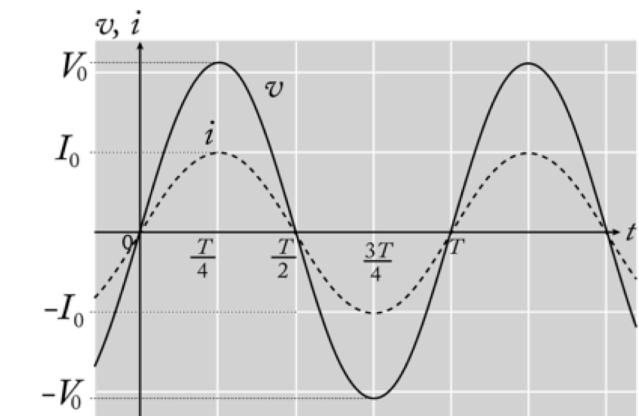
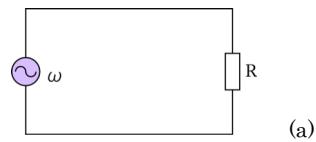


## 11. Resistance in AC Circuits

[Q11-1] 交流電源と抵抗からなる回路(a)で、抵抗にかかる電圧  $v$ 、抵抗を流れる電流  $i$  および抵抗で消費される電力  $p$  の時間変化を(b)に示した。

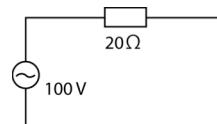
交流電圧の実効値と交流電流の実効値について説明せよ。

## 抵抗を流れる交流



(b)

[Q11-2]  $20\Omega$  の抵抗に実効値  $100\text{ V}$  の交流電圧を加えた。この抵抗における平均の消費電力はいくらか。また、抵抗にかかる電圧および流れる電流の最大値はいくらか。(II165)

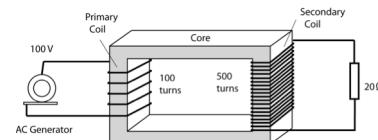


## 12. Transformers and Transmission 変圧器と送電

[Q12-1] A neon sign that requires a voltage of 11,000 V is plugged into a 120-V wall outlet. What turn ratio (secondary / primary) must a transformer have to power up the sign.

11,000 V の電圧を要するネオンサインがあり家庭用の 120-V で使用したい。  
使用する変圧器の巻き数の比（2次／1次）を求めよ。

[Q12-2] 1次コイルの巻き数が 100 回、2次コイルの巻き数が 500 回の変圧器の1次側に 100 V の交流電源をつないだとき、2次側に現れる電圧はいくらか。また。2次コイルに  $20\Omega$  の抵抗をつなぐと、1次コイルに流れる電流はいくらか。ただし、変圧器の電力損失はないものとする。(II-172)



[Q12-3] An alternating EMF of 240 V is applied to a transformer having 3000 turns on its primary and 750 turns on its secondary. On the secondary side, a heater for 120V and 800W is connected. Find the followings assuming no losses.

変圧器（トランス）の1次コイルが 3000巻き、2次コイルが 750巻きで、一次コイルに 240V の交流起電力が接続されている。2次コイル側に 120V 用 800W の電熱器を接続した。トランスに損失はないものとして次に答えよ。

- (1) What is the resistance of the heater? 電熱器の抵抗値はいくらか?
- (2) What is the voltage of the secondary part? 2次側の電圧はいくらか?
- (3) What is the secondary current? 2次側の電流はいくらか?
- (4) What is the primary current? 1次側の電流はいくらか?
- (5) What is the power consumed by the heater? 電熱器で消費する電力はいくらか。

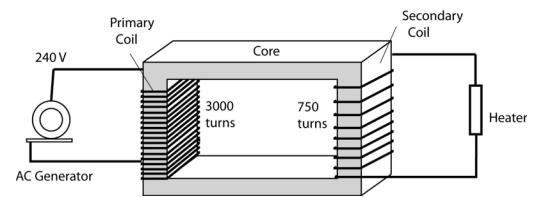


Fig. 49

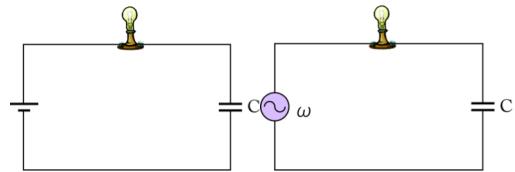
[Q12-4] There are two kinds of currents, direct current and alternative, and the former is commonly used for most electrical tools at home. In spite of that, alternating current is broadly produced in electric plants. Explain why?

電流には直流と交流があって普通の家庭用電気機器は主に直流が使われている。  
それにもかかわらず交流電気が発電されているのはなぜか？ 説明せよ。

### 13. Capacitance in AC Circuits

#### コンデンサーを流れる電流

[Q13-1] 図(a)では直流電源に、図(b)では交流電源に、コンデンサーと電球を直列に接続した。電球は点灯する様子はどのように違うか。



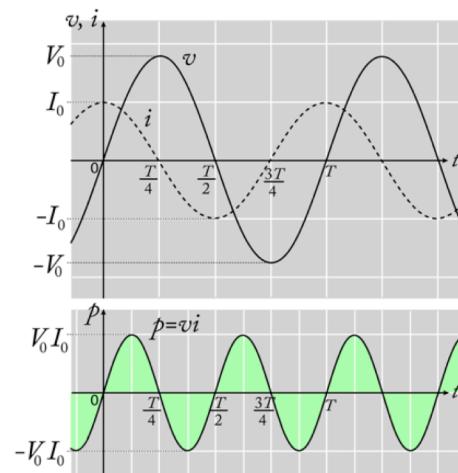
(a) DC - Capacitor

(b) AC - Capacitor

[Q13-2] 交流電源とコンデンサーからなる回路で、コンデンサーにかかる電圧  $v$ 、コンデンサーを流れる電流  $i$  およびコンデンサーで消費される電力  $p$  の時間変化をグラフに示した。  
 $v, i, p$  がこのような関係になることを示せ。



[Q13-3] コンデンサーの電圧と電流の実効値の関係を示せ。



[Q13-4] コンデンサーのリアクタンスとは何か。容量と周波数に対してどのような依存性があるか。

[Q13-5]  $50 \mu F$  のコンデンサーを  $50 \text{ Hz}$  と  $60 \text{ Hz}$  の交流で用いる場合の容量リアクタンスはそれぞれいくらか。(II-168)

[Q12-6]  $50 \mu F$  のコンデンサーに、実効値  $100 \text{ V}$  の  $50 \text{ Hz}$  の交流を流すとき、流れる電流の実効値はいくらか。実効値  $100 \text{ V}$  の  $60 \text{ Hz}$  の交流ではどうか。(II-168)

[Q12-7] Suppose that an AC voltmeter across the voltage source in the figure reads  $80.0 \text{ V}$  and that the frequency of the AC voltage is  $2.0 \times 10^6 \text{ Hz}$ . The capacitance of the capacitor is  $C = 0.40 \mu \text{F}$ .

(13) Find the rms current in the circuit.

(14) What is the equation for the voltage furnished by the source?

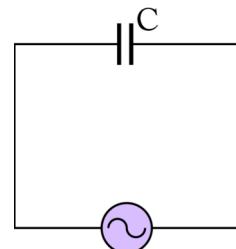
(15) What is the equation for the voltage across the capacitor?

周波数  $2.0 \times 10^6 \text{ Hz}$  の電圧電源に交流電圧計をつなぐと  $80.0 \text{ V}$  を示し、コンデンサーの容量は  $C = 0.40 \mu \text{F}$  である。

(13) 回路を流れる電流の実効値はいくらか。

(14) 電源から供給される電圧変化を示す式を書け。

(15) コンデンサーの両端の電圧変化を示す式を書け



$$V = V_0 \sin 2\pi ft$$

## 14. Coils (Inductors) in AC Circuits

### コイルを流れる電流

[Q14-1] 図(a)では直流電源に、図(b)では交流電源に、コイルと電球を直列に接続した。電球は点灯する様子はどのように違うか。

[Q14-2] 交流電源とコイルからなる回路で、コイルにかかる電圧  $v$ 、コイルを流れる電流  $i$  およびコイルで消費される電力  $p$  の時間変化をグラフに示した。

$v, i, p$  がこのような関係になることを示せ。

[Q14-3] コイルの電圧と電流の実効値の関係を示せ。

[Q14-4] コイルのリアクタンスとは何か。インダクタンスと周波数に対してどのような依存性があるか。

[Q14-5] 自己インダクタンス 200 mH のコイルを 50 Hz と 60 Hz の交流電源につないで使用するとき、コイルのリアクタンスはそれぞれいくらか。(II-171)

[Q14-6] 自己インダクタンス 200 mH のコイルを、実効値 100 V、50 Hz の交流電源につないで使用するとき、コイルに流れる電流の実効値はいくらか。また、実効値 100 V、60 Hz の交流電源のときはいくらか。(II-171)

[14-7] Suppose that an AC voltmeter across the voltage source in the figure reads 80.0 V and that the frequency of the AC voltage is  $2.0 \times 10^6$  Hz. The inductance of the inductor is  $L = 15$  mH.

(13) Find the rms current in the circuit.

(14) What is the equation for the voltage furnished by the source?

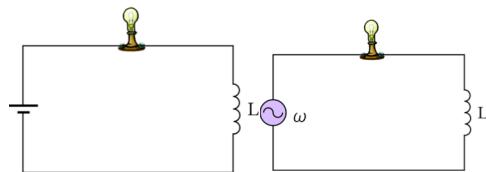
(15) What is the equation for the voltage across the inductor?

周波数  $2.0 \times 10^6$  Hz の電圧電源に交流電圧計をつなぐと 80.0 V を示し、インダクターのインダクタンスは 15 mH である。

(13) 回路を流れる電流の実効値はいくらか。

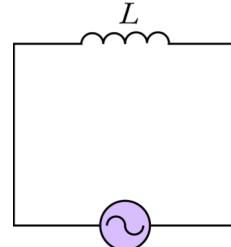
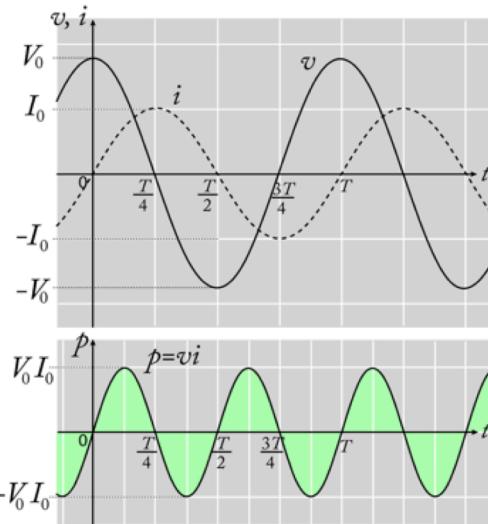
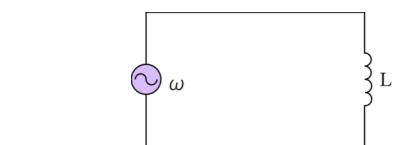
(14) 電源から供給される電圧変化を示す式を書け。

(15) インダクターの両端の電圧変化を示す式を書け



(a) DC - Coil

(b) AC - Coil

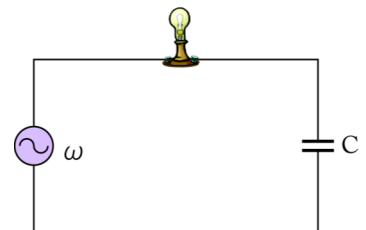


$$V = V_0 \sin 2\pi ft$$

## 実験 — コンデンサーを流れる交流、コイル（インダクタ）を流れる交流

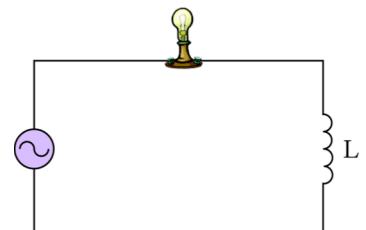
## 1) コンデンサーを流れる交流

Frequency [Hz]	Capacitance [ $\mu$ F]					
	$10^4$	$10^3$	$10^2$	10	2.2	0.1
10						
50						
100						
500						
1k						
5k						
10k						
50k						
100k						



## 2) インダクタを流れる交流

Frequency [Hz]	Inductance [H]					
	$2\text{m}$	$10\text{m}$	$1\text{m}$	$100\mu$	$100\mu$	$1\mu$
10						
50						
100						
500						
1k						
5k						
10k						
50k						
100k						

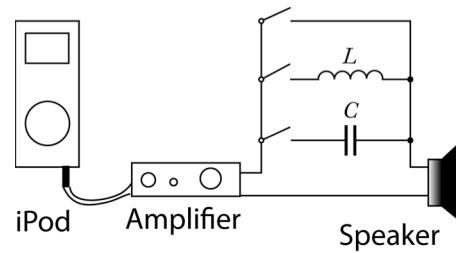


## 3) コイルを流れる交流

Frequency [Hz]	Turns									
	200	200 core	400	400 core	800	800 core	1600	1600 core	3200	3200 core
10										
50										
100										
500										
1k										
5k										
10k										
50k										
100k										

[Q14-7] (a) What kind of effect is expected on iPod music when a capacitor is connected between an amplifier and an audio speaker? Explain the reason. (b) How about when using a coil instead of the capacitor?

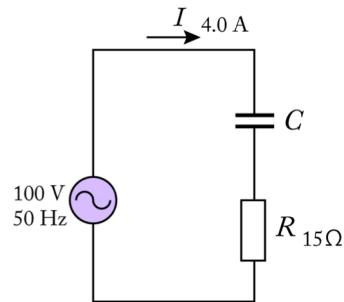
(a) iPod とアンプ、スピーカーを用いて音楽を鳴らすときアンプとスピーカーの間にコンデンサーを直列につないだときどのような効果があるか。その理由は何か。(b) コンデンサーに替えてコイルを接続したときはどうか。



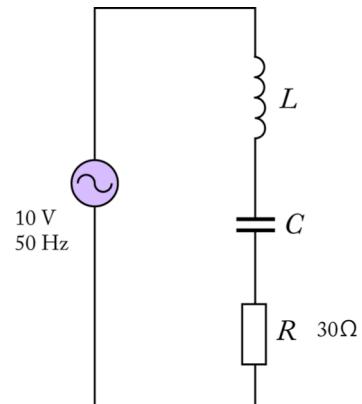
## 15. RLC Circuits RLC 回路

[Q15-1] 図の回路で次を求めるよ。

- 回路のインピーダンス
- コンデンサーのリアクタンスと電気容量
- 回路の消費電力

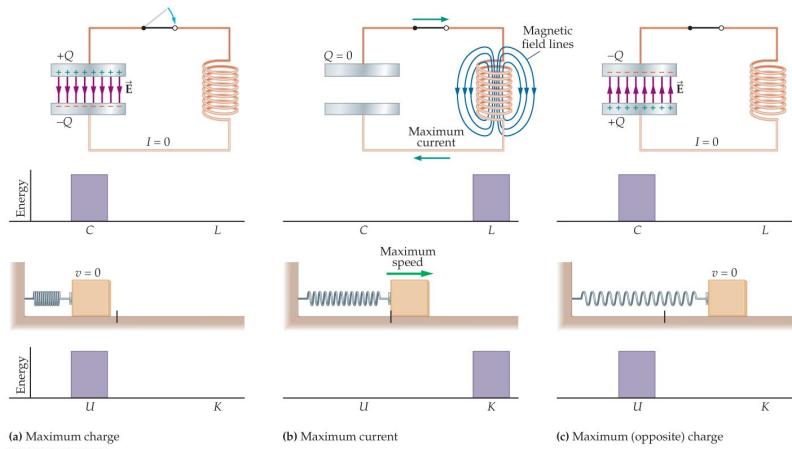
[Q15-2] 図の回路で、コイル L は 50 Hz の交流に対するリアクタンスが  $120\Omega$  、コンデンサー C は 50 Hz の交流に対するリアクタンスが  $80\Omega$  である。

- コイルの自己インダクタンス、コンデンサーの電気容量をそれぞれ求めよ。
- 回路全体のインピーダンスと、電源を流れる電流の実効値を求めよ。
- 抵抗、コイル、コンデンサーにかかる電圧の実効値をそれぞれ求めよ。
- 回路で消費される電力を求めよ。(K347)

[Q15-3] FM 放送の 88.5 MHz の選局に適した共振回路 (LC 回路) を作りたい。1.50  $\mu$  H のコイルを使用する場合、コンデンサーの容量はいくらにしたら良いか。(W861)

## 16. Vibration in LC Circuits 振動回路

[Q16-1] 右のような回路で、コンデンサーを充電後にスイッチを開じると回路内で周期的に向きを変えるような振動する電流が生じる。この現象は電気振動と呼ばれ、回路に生じる電流を振動電流という。この現象はばねの振動とよく似ている。説明せよ。



[Q16-2] Fig. 2 で、スイッチを 1 の状態にして直流電源 100 V でコンデンサーを充電する。次いで、スイッチを 2 の状態にすると電気振動を起こす。そのときの周波数はいくらか。また、初めに回路に蓄えられたエネルギーはいくらか。(II-175)

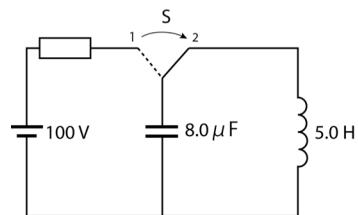


Fig. 2

[Q16-3] 自己インダクタンスが 1.0 H のコイルとコンデンサーを使った振動回路で、400 Hz の電気振動を起こさせたい。コンデンサーの電気容量をいくらにしたらよいか。

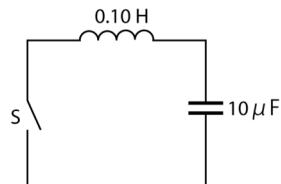
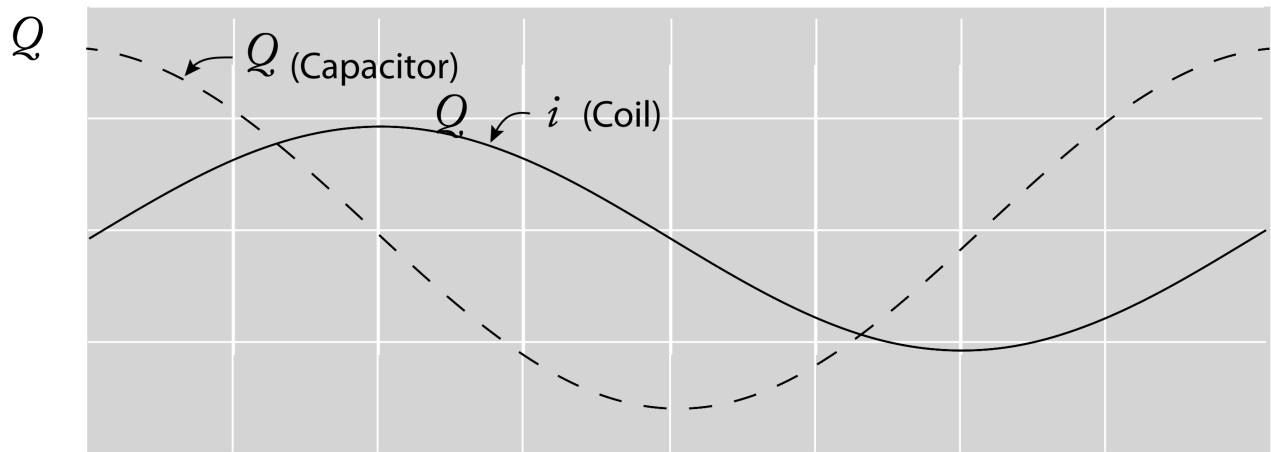
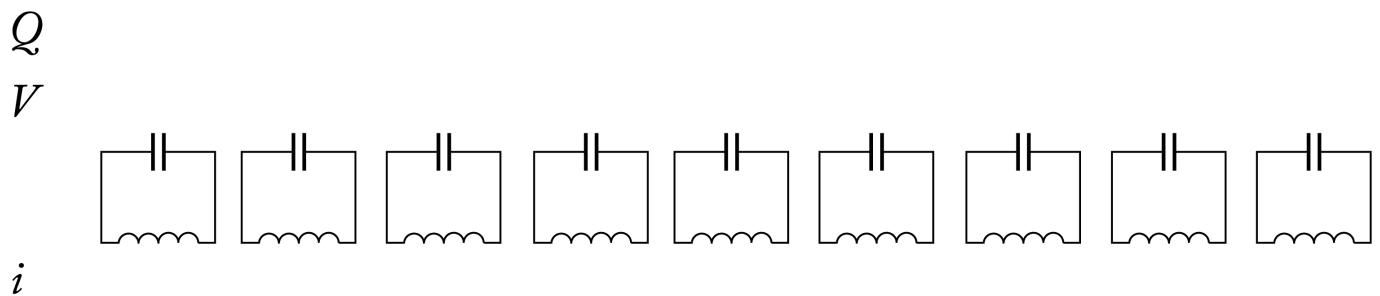


Fig. 4

[Q16-4] Fig. 4 のコンデンサーは最初に 10 V の電圧で充電されている。スイッチを開じると電気振動が起きる。(a) コイルに流れる電流 I の時間変化を示すグラフを書け。(b) 振動数はいくらか。(c) 振動電流の最大値を求めよ。(II-180)



---

 $U_C$ 

---

---

 $U_L$ 

---

## 1. Production of Electromagnetic Waves 電磁波の発生

### [Q1-1] 電磁波の歴史

1864 James Clerk Maxwell (Scotland)

1887 Heinrich Hertz (Germany) Hertz の実験

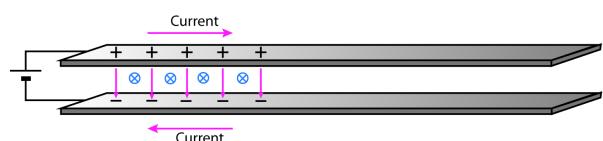
1896 Guglielmo Marconi (Italy)

1901

### [Q1-2] 電磁波の発生-1 電気回路による電磁波の発生と受信

1) 一対の細長い極板からなるコンデンサーに直流電源をつなぐと、電流が流れ、電場が増加する。電流が流れている間は磁場が発生する。磁場の向きは「右手親指則」。

Fig.1



2) 静電容量  $C$  のコンデンサーを、起電力  $V = V_0 \sin \omega t$  の交流電源に接続すると、 $Q = CV$  であるから、

$$I = \frac{dQ}{dt} = C \frac{dV}{dt} = \omega C V_0 \cos \omega t$$

の電流が流れ続ける。

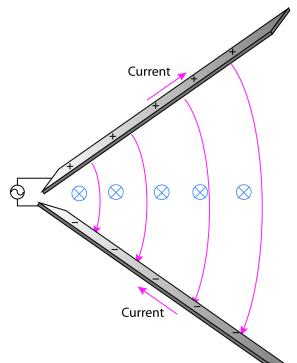
Fig.2



3) 極板を開いて縦に立てたものがアンテナである。

右図のようにアンテナ電流が上に流れると電場の向き（電気力線の向き）は下を向き、磁場は紙面の向こう側  $\otimes$  を向く。

Fig.3



4) 交流電源に接続したアンテナの電場は振動して空間を波となって伝わる。

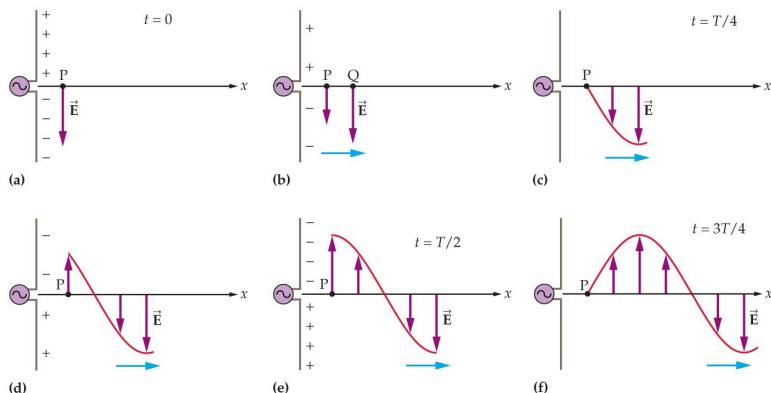


Fig.4

## 5) 送信アンテナの向きに振動方向を持つ電場の波

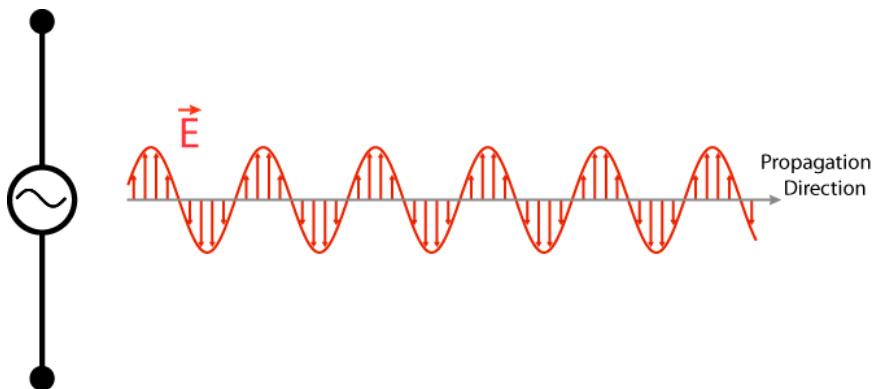


Fig.5

## 6) 送信アンテナに垂直な向きに振動方向を持つ磁場の波

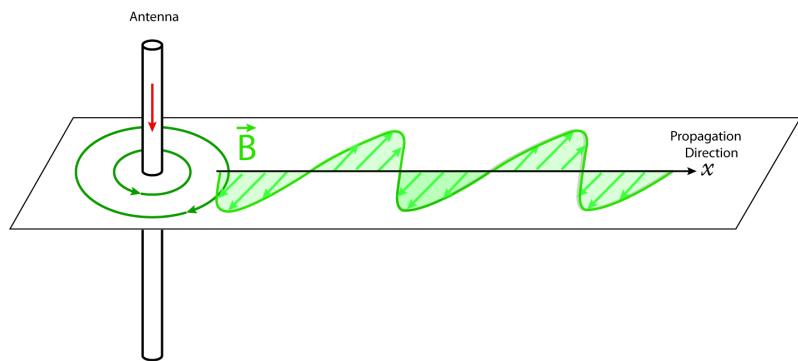


Fig.6

7) このように、電場と磁場が同時に波動として伝わるのが電磁波 Electromagnetic Waves である。  
電場  $E$ 、磁場  $B$ 、進行方向の向きは互いに垂直で「右手親指則」で決められる。電磁波は横波 Transverse Waves である。

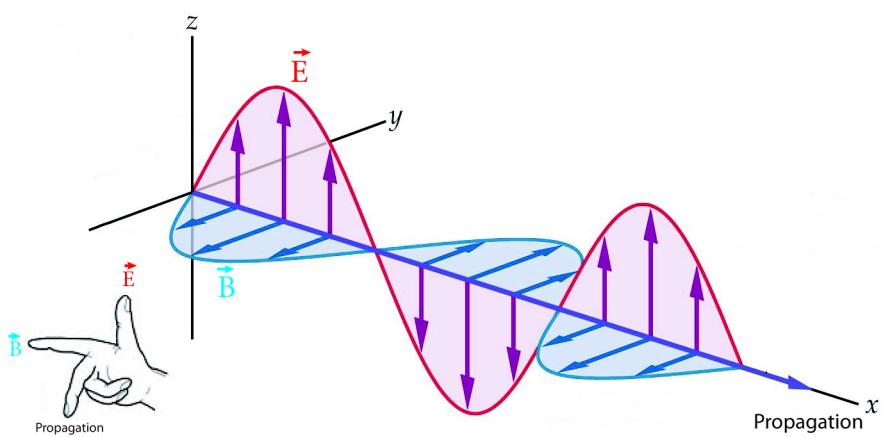


Fig. 7

8) 電磁波の受信系は電磁波の発振器と同じ構造をしている。電磁波の電場の振動は、受信機のアンテナ中の電子に力を及ぼし、交流が生じる。アンテナに LC 回路を接続して電磁波の周波数に共鳴させるとより大きい電流が生じる。これがラジオやテレビの同調 Tuning の原理である。

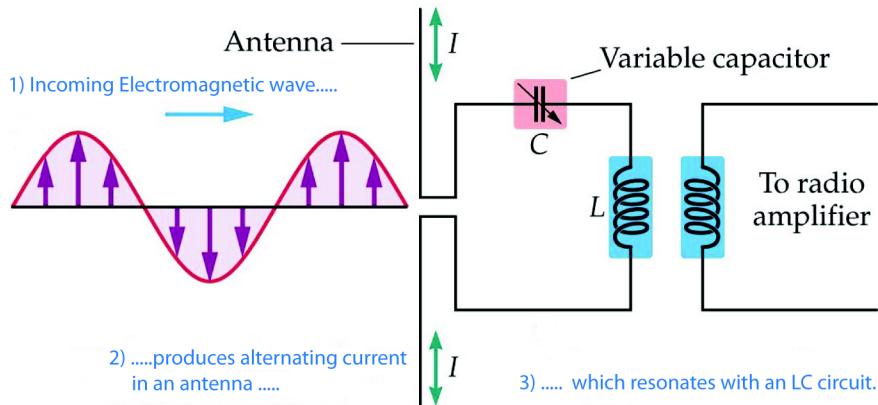


Fig. 8

[Q1-3] 電磁波の発生-2 以上はアンテナによる電磁波の発生を説明したが、一般には次のように言える。

----- 荷電粒子が加速すると電磁波が発生する。----- **Accelerated charges radiate electromagnetic waves.**

荷電粒子が加速されると、

- ・ 振動する電場が発生。振動電場は振動磁場を誘起
- ・ 振動磁場は電磁誘導により振動電場を誘起
- ・ 振動する電場と磁場が互いを誘発し空間を伝搬していく。これが電磁波である。

放射された電磁波の強さは、荷電粒子の加速方向と垂直な向きで最大で、加速方向と同じ向きではゼロである。

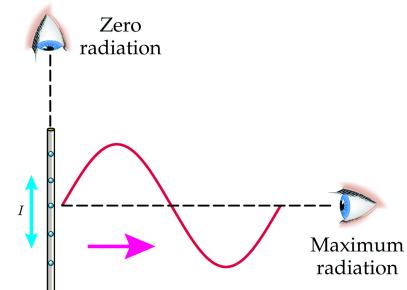


Fig. 9

## 2. Speed of Electromagnetic Waves 電磁波の速さ（光速度）

[Q2-1] 電磁波と媒体 電磁波は真空中を伝搬する。音波やひもの波が伝搬するには媒体が必要なのと対照的である。

[Q2-2] 電磁波の速さ すべての電磁波が真空中を進む速さは同一で  $c$  である。

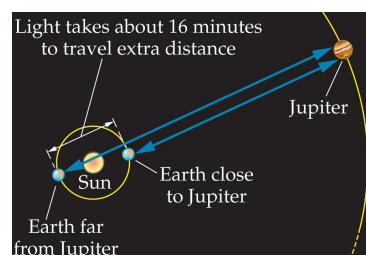
$$\text{Speed of Light in a Vacuum } c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$$

[Q2-3] 地球と太陽の距離は  $1.50 \times 10^{11} \text{ m}$  である。この距離を光が進む時間求めよ。

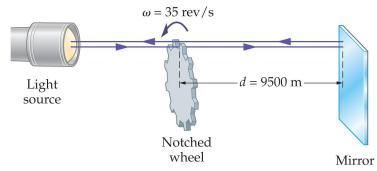
[Q2-4] 光速度測定の歴史

- (1) Galileo Galilei (1564-1642、伊) 二個の灯火を使用。光速はきわめて大。
- (2) Ole Romer (1644-1710、デ) 木星 Jupiter の衛星が木星に隠れている時間が地球の位置によって 16 分異なることから測定。 $2.25 \times 10^8 \text{ m/s}$

Fig.10



- (3) Armand Fizeau (1819-1896、仏)  
 $3.13 \times 10^8 \text{ m/s}$



- (4) James Clerk Maxwell (1831-1879、スコ) 理論的に光速度がそれまでに知られていた物理量から求められることを示した。

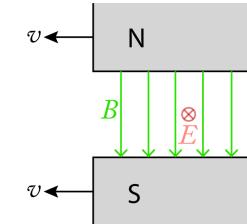
$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{(8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2)(4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m}/\text{A})}}} = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$$

[Q2-5] 電磁波の速さについて

- (i) 磁場  $B$  中に磁場に垂直に速さ  $v$  で動く電荷  $q$  にはたらく力  $F = q v B$   
 これは、 $v$  で動く磁場に静止している電荷  $q$  にはたらく力、とも言える。

電場

$$E = F/q \quad (2)$$



- (ii) (1)と(2)より、

$$E = vB \quad (3)$$

(3) の意味 「磁場  $B$  が磁力線に垂直に速さ  $v$  で動くとき、それが通過する領域に  $E = vB$  の電場を生成する。」

アンテナから出た動く磁場はそこに  $E = vB$  の電場を生成する。

- (iv) 動く電場 (非常に長く、均一に帯電した導線が右に  $v$  で動いている)

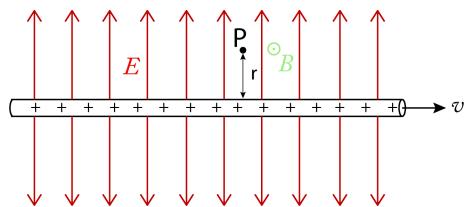
電気力線は、点  $P$  を速さ  $v$  で通過する。

- (v) 電荷と電流

$\rho$  : 単位長さあたりの電荷

$$I = \rho v \quad (4)$$

- (vi) 電流は磁場を生成する  $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} = \frac{\mu_0 \rho v}{2\pi r} \quad (5)$



- (vii) 長い導線が作る電場

$$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0 r} \rho \quad (6)$$

- (viii) (4)と(5)より  $\rho$  を消去

$$B = \epsilon_0 \mu_0 v E \quad (7)$$

- (ix) (3)と(7)より

$$\epsilon_0 \mu_0 v = \frac{1}{v}$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (8)$$

$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \quad \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  を用いて

$$v = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$$

### 3. The EM Spectrum 電磁波の分類

