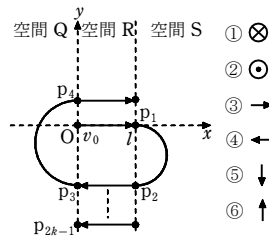


[1] 15サイクロトロン [2015 慶応義塾大]

図のような  $xy$  平面において、質量  $m$  [kg]、電気量  $q$  [C] ( $q$  は正とする) の荷電粒子の運動を考える。空間  $Q$  を  $x < 0$ 、空間  $R$  を  $0 \leq x \leq l$  [m]、空間  $S$  を  $l < x$  とする。空間  $Q$ 、 $S$  には同じ向きで磁束密度の大きさ  $B$  [T] の一様な磁場、空間  $R$  には一様な電場  $E$  [V/m] が存在し、電場の向きは空間  $R$  に粒子が入射するのと同時に、粒子の進行方向と同じ向きに切りかわる。図中の実線は粒子の軌跡を示す。



粒子が原点  $O$  から  $x$  軸上を正の向きに初速度  $v_0$  [m/s] で空間  $R$  に入射し、空間  $R$  内の電場により加速された。粒子は点  $p_1$  から空間  $S$  中に入射し、磁場中で図のような半円軌道を描き、点  $p_2$  から再び空間  $R$  に入射し、先ほどとは逆向きの電場により加速され、点  $p_3$  から空間  $Q$  に入射した。

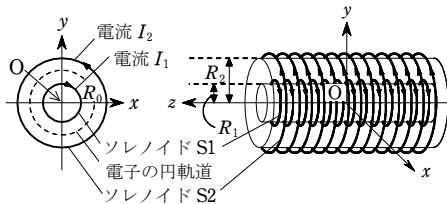
空間  $Q$  と  $R$  との境界面 ( $x=0$ ) と、空間  $R$  と  $S$  との境界面 ( $x=l$ ) との電位差を  $V$  [V] とする。粒子の大きさや重力は無視、粒子は真空中を運動し、ニュートン力学の範囲で考える。

- (1) 空間  $Q$ 、 $S$  内の磁場の向きを図中の ①~⑥ で答えよ。
- (2) この原理に基づいて荷電粒子を加速する装置 (加速器) の名称を答えよ。
- (3) 位置  $p_1$  における粒子の速さを  $v_0$ 、 $q$ 、 $V$ 、 $m$  から必要な記号を用いて答えよ。
- (4)  $p_1 p_2$  間の直線距離を  $v_0$ 、 $q$ 、 $V$ 、 $m$ 、 $B$  から必要な記号を用いて答えよ。
- (5)  $p_1$  から  $p_2$  に到達するまでの時間を  $v_0$ 、 $m$ 、 $q$ 、 $B$  から必要な記号を用いて答えよ。
- (6) 位置  $p_{2k-1}$  における粒子の運動エネルギーを  $v_0$ 、 $m$ 、 $q$ 、 $V$ 、 $k$  から必要な記号を用いて答えよ。ただし、 $k$  は正の整数とする。

[2] 03ソレノイド内で円運動する電子 [2003 大阪大]

単位長さあたりの巻き数が  $n$  の無限に長いソレノイドに強さ  $I$  の電流を流すと、ソレノイドの内側には、磁束密度  $B = \mu_0 n I$  の一様な磁場 (磁界) がソレノイドの軸に沿った方向に生じ、ソレノイドの外側には磁場は生じない。ここで、 $\mu_0$  は真空の透磁率である。以下の文中の [ ] に適切な数式を書き入れよ。ただし、**9** については、正しい語句を選び記号で答えよ。

図のように、2つの無限に長いソレノイドが、それらの軸が一致するように置かれている。内側のソレノイド  $S1$  の半径は  $R_1$ 、外側のソレノイド  $S2$  の半径は  $R_2$  であり、ソレノイドの単位長さあたりの巻き数はどちらも  $n$  である。 $S1$  に強さ  $I_1$  の電流を、 $S2$  に強さ  $I_2$  の電流を、図に示した向きに流す。図のように座標軸をとると、磁束密度の  $z$  成分は、符号を含めて、 $S2$  の外側では [1]、 $S1$  と  $S2$  の間では [2]、 $S1$  の内側では [3] となる。



この状態で、図のように、 $z=0$  面内の  $S1$  と  $S2$  の間で、ソレノイドの軸を中心とした半径  $R_0$  の円周上を、電子が等速円運動をしている。電子の電荷を  $-e$ 、質量を  $m$  とする。電子が  $x=R_0$ 、 $y=0$ 、 $z=0$  の位置に来たときの、電子の運動量の  $x$ 、 $y$ 、 $z$  成分は、それぞれ、 $p_x =$  [4]、 $p_y =$  [5]、 $p_z = 0$  である。また、この電子の円軌道で囲まれた領域を  $z$  軸の正の向きに貫く、ソレノイドによる磁束  $\Phi$  は、 $\Phi =$  [6] で与えられる。以下では、 $z=0$  面内の電子の円運動によって生じる磁束は考えなくてよい。

次に、時間  $\Delta t$  をかけて、 $S1$  の電流値を  $I_1 - \Delta I_1$  ( $\Delta I_1 > 0$ ) にまで一定の割合で減少させ、また同時に、 $S2$  の電流値を  $I_2 + \Delta I_2$  ( $\Delta I_2 > 0$ ) にまで一定の割合で増加させた。その後、 $S1$  と  $S2$  の電流値を、それぞれ  $I_1 - \Delta I_1$  および  $I_2 + \Delta I_2$  に保った。電流が変化している間、電子の運動量は電磁誘導による力を受けて変化し、電子にはたらく遠心力は変化した。他方、電子には磁場によるローレンツ力もはたらく。ここで、 $\Delta I_1$  と  $\Delta I_2$  を調整したところ、電流を変化させている間も変化させた後も、電子は電流を変化させる前と同じ円軌道上を運動した。このときの、 $\Delta I_1$  と  $\Delta I_2$  の間の関係を求めよう。ただし、ソレノイドの自己誘導やソレノイド間の相互誘導の影響は考えなくてよい。

時間  $\Delta t$  の間の電流の変化にともなう磁束  $\Phi$  の変化  $\Delta \Phi$  を  $\Delta I_1$  および  $\Delta I_2$  を含んだ式で表すと、 $\Delta \Phi =$  [7] となる。磁束が変化している間に生じる、電子の軌道一周にわたる誘導起電力は、 $-\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$  で与えられる。この起電力に対応して、電子の軌道に沿って一定の強さの電場 (電界) が生じると考えられる。その電場の強さは、 $\Delta \Phi$  を含んだ式で、[8] と表され、電場の向きは電子の運動方向と [9] (a) 同じ向き (b) 反対向きである。この電場による力を受け、電子の運動量の大きさは、時間  $\Delta t$  の間に、 $p$  から  $p'$  に変化した。運動量の大きさの変化  $\Delta p = p' - p$  は、 $\Delta \Phi$  を含んだ式で、 $\Delta p =$  [10]

と表される。ソレノイドの電流の変化にともなう、電子の位置での磁束密度の  $z$  成分  $B_z$  は  $B_z'$  に変化した。電子が電流の変化前と同じ円軌道上を運動するためには、電流の変化後の磁束密度  $B_z'$  と電子の運動量の大きさ  $p'$  の間に  $p' =$  [11] という関係式がなりたてばよい。ところで、 $B_z'$  を  $\mu_0$ 、 $n$ 、 $I_2$ 、 $\Delta I_2$  を用いて表すと、 $B_z' =$  [12] である。以上より、 $\Delta I_1$  と  $\Delta I_2$  の間には、 $\frac{\Delta I_2}{\Delta I_1} =$  [13] という関係が必要になることがわかる。

[3] 08磁場中をらせん運動する電子 [2008 大阪大]

真空中における電子の運動を考える。電子の質量を  $m$ 、電荷を  $-e$  ( $e > 0$ ) とする。重力の影響は無視できるものとする。

[A] 電子源から電子を発生させた。この電子を、電位差  $V$  ( $V > 0$ ) で加速した。ただし、電子の初速度は無視できるものとする。

- (1) 加速後の電子の速さを求めよ。

[B] 図1および図2のように、一様な磁束密度  $B$  の磁場 (磁界) が  $y > 0$  の領域にある。磁場の向きは、紙面裏から表向きである。磁場に対して垂直な  $xy$  平面内で、速さ  $v$  の電子を原点  $O$  から磁場中に入射したところ、大きさ  $evB$  のローレンツ力を受けて運動した。電子を磁場中に入射したときの時刻を  $0$  とする。

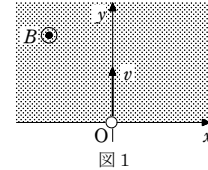


図1

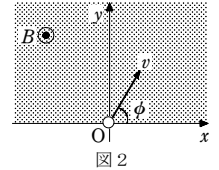


図2

- (2) 図1のように、速さ  $v$  の電子を  $x$  軸に対して垂直に入射したところ、円運動を始めたが、半円を描いたところで、磁場のある領域から外に飛び出した。電子が磁場のある領域から飛び出すときの時刻と  $x$  座標を求めよ。

- (3) 次に、図2のように、速さ  $v$  の電子を  $x$  軸に対して角度  $\phi$  [rad] ( $0 < \phi < \frac{\pi}{2}$ ) で入射した。磁場中と、磁場のある領域から飛び出した後の電子の軌跡を図示せよ。また、磁場のある領域から外に飛び出すときの時刻と  $x$  座標も求めよ。

[C] 一様な磁束密度  $B$  の磁場が全空間にある。磁場の向きは  $z$  軸の正の向きである。

- (4) 電子を原点  $O$  から磁場の向きに入射した。電子はどのような運動をするか。理由とともに述べよ。

次に、図3のように、速さ  $v_0$  の電子を磁場の向きと角度  $\theta$  [rad] ( $0 < \theta < \frac{\pi}{2}$ ) で原点  $O$  から入射した。なお、

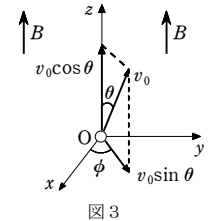


図3

電子の原点における速度ベクトルの  $xy$  平面成分は、図3のように  $x$  軸の正の向きと角度  $\phi$  [rad] ( $0 \leq \phi < 2\pi$ ) をなしている。すると、電子はらせん運動をした。つまり、電子は、 $z$  軸の方向から見たときは等速円運動、 $z$  軸方向には等速度運動をした。

- (5) この電子の等速円運動の半径と周期を求めよ。
- (6) 電子がこの等速円運動により1周する間に、 $z$  軸方向に進む距離  $L$  を求めよ。
- (7)  $z$  軸上の  $z=3L$  の位置に、大きさの無視できる電子検出器を置いた。入射角度は変えずに、入射する電子の速さを、はじめの速さ  $v_0$  から連続的に大きくしていった。すると、電子は、速さ  $v_0$  のときに検出されていたが、 $v_0$  より大きくなると検出されなくなり、ある速さでふたたび検出された。このときの電子の速さは、はじめの速さ  $v_0$  の何倍であるかを求めよ。

[D] [C] と同じ磁場中に、 $z$  軸を中心軸とし、 $z$  軸方向に十分長くのびた半径  $R$  の円筒を置いた。この円筒に電子が接触すると、電子は吸収される。また、円筒は磁場の大きさや向きに影響を与えないものとする。速さ  $v$  の電子を磁場の向きと角度  $\theta$  [rad] で原点  $O$  から入射した。

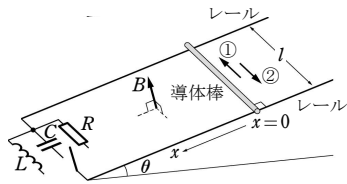
- (8) 角度  $\theta$  ( $0 < \theta < \frac{\pi}{2}$ ) で入射した電子が、円筒の壁に吸収されないための、電子の速さ  $v$  の条件を求めよ。
- (9) 円筒の半径を  $R = \frac{4\sqrt{2}mv}{3eB}$  とする。 $z$  軸上の  $z = \pi R$  の位置に、大きさの無視できる電子検出器を置き、速さ  $v$  の電子を入射した。入射角度  $\theta = 0$  のとき、電子は検出されていた。しかし、 $\theta$  が  $0$  より大きくなると電子は検出されなくなり、ある角度でふたたび検出された。さらに、 $\theta$  を大きくすると電子は検出されなくなった。このように、入射角度  $\theta$  を  $0$  から大きくするにつれて、電子は検出されたり、検出されなかったりをくり返す。電子が検出されたときの  $\cos \theta$  をすべて求めよ。

4 17傾斜したレール上をすべる導体棒 [2017 大阪大]

図に示すように、十分に長い2本の平行な導体レールが、水平な床と角度

$\theta (0 < \theta < \frac{\pi}{2})$  で固定されている。2本の

レールが含まれる面も床と角度  $\theta$  をなし、その面と垂直な方向に、磁束密度の大きさが  $B$  の一様な磁場が、下から上に向かって加えられている。レールの間隔は  $l$  であり、一端には抵抗値  $R$  の抵抗、電気容量  $C$  のコンデンサー、自己インダクタンス  $L$  のコイルが並列に配置され、各々への接続はスイッチで切りかえられるようになっている。他端は開放されている。スイッチから十分離れた位置に、質量  $m$  の導体棒がレールと直交して、初期状態では固定されている。重力加速度の大きさを  $g$  とし、レール、回路をつなぐ導線および導体棒の抵抗はないものとする。また、導体棒はレールと直交したままレールから離れることはなく、レール上を摩擦なしに動くことができる。レールにそって下向きを  $x$  軸の正の向きとし、最初に導体棒が静止している位置を  $x=0$  とする。以下の問では、スイッチを抵抗、コンデンサー、コイルに入れた3つの場合について考える。それぞれの場合で、電流によってつくられる磁場の影響はないものとする。



- [A] スwitchを抵抗側に入れて、導体棒の固定を静かに外すと、導体棒はレール上を動き始める。導体棒の速さを  $v$  とし、導体棒、2本のレール、抵抗で構成される閉回路に流れる電流を  $I$  とする。十分に時間が経過すると、 $v$  が一定の速さ  $v_0$  になった。
- 導体棒に流れる電流の向きは、図中の①、②いずれの向きか、記号で答えよ。その向きを  $I$  の正の向きとしたとき、 $v < v_0$  で、導体棒に加わる  $x$  軸と平行方向の力を  $\theta, B, l, m, g, I$  のうち必要なものを用いて表せ。ただし力の符号は、 $x$  軸の正の向きを正とせよ。
  - $v < v_0$  のとき、導体棒、2本のレール、抵抗で構成される閉回路に生じた誘導起電力の大きさを  $\theta, B, l, m, g, v$  のうち必要なものを用いて表せ。
  - $v < v_0$  のとき、閉回路に流れる電流の大きさを  $\theta, B, l, R, m, g, v$  のうち必要なものを用いて表せ。
  - $v_0$  を  $\theta, B, l, R, m, g$  のうち必要なものを用いて表せ。
- [B] スwitchをコンデンサー側に入れる場合を考える。コンデンサーに電荷が蓄えられていないことを確認してから、スwitchを入れて、導体棒の固定を静かに外すと、導体棒は等加速度運動をした。
- コンデンサーに流れる電流の大きさは、微小時間  $\Delta t$  の間にコンデンサーに蓄えられた電気量の大きさ  $\Delta Q$  を用いて、 $\frac{\Delta Q}{\Delta t}$  と表せる。 $\Delta t$  の間に導体棒の速さが  $\Delta v$  だけ変化するとき、コンデンサーに流れる電流の大きさを  $\theta, B, l, C, m, g, \Delta t, \Delta v$  のうち必要なものを用いて表せ。
  - 加速度の大きさは  $\frac{\Delta v}{\Delta t}$  と表せることに注意して、加速度の大きさを  $\theta, B, l, C, m, g$  のうち必要なものを用いて表せ。
  - $x=0$  の位置で導体棒の固定を外してから、 $t$  だけ時間が経過したときにコンデンサーに蓄えられたエネルギーを  $\theta, B, l, C, m, g, t$  のうち必要なものを用いて表せ。
- [C] スwitchをコイル側に入れる場合を考える。スwitchを入れて、コイルに流れる電流  $I$  が0であることを確認してから、導体棒の固定を静かに外すと、導体棒はレール上を動き始めた。
- 微小時間  $\Delta t$  の間に、導体棒は  $\Delta x$  だけ変位し、その際にコイルに流れる電流は  $\Delta I$  だけ変化した。このとき、 $\Delta I$  と  $\Delta x$  の関係を  $\theta, B, l, L, m, g, \Delta x, \Delta I$  のうち必要なものを用いて表せ。ただし、 $I$  の正の向きは(1)と同じとする。
  - $\frac{\Delta I}{\Delta x} = \alpha$  ( $\alpha$  は定数) と表されるとき、 $I = \alpha x + \beta$  ( $\beta$  は定数) となる。この関係式を用いて、導体棒が位置  $x$  にあるときの電流  $I$  を  $\theta, B, l, L, m, g, x$  のうち必要なものを用いて表せ。
  - $x$  軸の正の向きにそった導体棒の加速度を  $a$  としたとき、導体棒に関する運動方程式を求めよ。また、この運動の周期を求めよ。ただし解答には  $\theta, B, l, L, m, g, x$  のうち必要なものを用いよ。

5 09自己誘導と相互誘導 [2009 大阪大]

口の字型の鉄しんに導線を巻きつけたコイルに関して考察しよう。

[A] 図1に示すような電気回路を考える。

コイル1は鉄しんに導線を  $n_1$  回巻きつけて製作されている。コイル1の内部抵抗を  $r$  とし、図1の電気回路ではわかりやすいようにコイル1の隣に分けてかいてある。電池の起電力を  $E$ 、コイル1と並列に接続した抵抗の抵抗値を  $R$  とする。

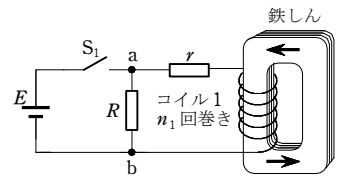


図1

磁束が鉄しんの外にもれることはないとする。この場合、鉄しん中を貫く磁束は鉄しんに巻かれたすべてのコイルからの寄与の総和となる。磁場(磁界)は図1の矢印の向きを正とする。また、正の向きに磁場を発生させるためにコイルに流す電流の向きを正とする。

図1と同じ鉄しんにコイルを1回だけ巻いて電流  $I_0$  を流すと、鉄しん中に  $L_0 I_0$  の磁束が生じた。ここで、 $L_0$  はこの1巻きコイルの自己インダクタンスである。また、鉄しん中の磁束が、時間  $\Delta t$  の間に  $\Delta \Phi$  だけ変化したときに、この1巻きコイルに生じる誘導起電力は  $-\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$  であった。

電池の内部抵抗は無視できるとして、次の問に答えよ。

- コイル1に電流  $I_1$  を流したときに鉄しん中に生じる磁束を、 $L_0, n_1, I_1$  を用いて表せ。
- コイル1の自己インダクタンスを、 $L_0, n_1$  を用いて表せ。
- 最初スwitch  $S_1$  を開いておき、時刻  $T_0$  で  $S_1$  を閉じた。  $S_1$  を閉じた直後にコイル1に生じる誘導起電力を、 $E, r, R, L_0, n_1$  のうち必要なものを用いて表せ。
- 時刻  $T_0$  から十分時間が経過したあとに鉄しん中を貫いている磁束を、 $E, r, R, L_0, n_1$  のうち必要なものを用いて表せ。
- 時刻  $T_0$  から十分時間が経過した時刻  $T_1$  に  $S_1$  をふたたび開いた。  $S_1$  を開いた直後の、図中  $b$  を基準にした  $a$  の電位を、 $E, r, R, L_0, n_1$  のうち必要なものを用いて表せ。
- 図中  $b$  を基準にした  $a$  の電位の時間変化のおおよそのようすを図2にかけ。ただし  $R=3r$  とせよ。図2のグラフの横軸にはあらかじめ時刻  $T_0$  と  $T_1$  を示してある。また、時刻  $T_2$  は十分大きく、この時刻では電圧はほぼ一定値に落ち着いているとせよ。

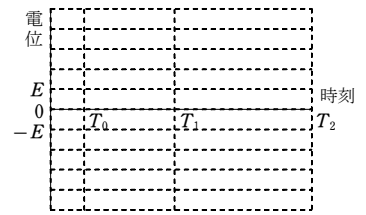


図2

[B] 次に図3に示すように、

図1の回路に加えて鉄しんに導線を  $n_2$  回巻きつけたコイル2と電流計、スwitch  $S_2$  を接続した。コイル2の導線や電流計の内部抵抗は無視できるほど小さいので以下では

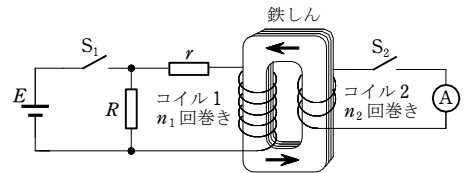


図3

0 とする。次の文章中の空欄に、各空欄中に指示した記号の中から必要なものを用いた適切な数式または数字を書き入れよ。

コイル1の電流が時間  $\Delta t$  の間に  $\Delta I_1$  だけ変化すると、それに伴って鉄しん中の磁束が時間変化するためコイル2には誘導起電力  $(7) [L_0, n_1, n_2, \Delta I_1, \Delta t]$  が発生する。

ところで、鉄しん中を貫く磁束は鉄しんに巻かれたすべてのコイルからの寄与の総和なので、コイル1に流れる電流  $I_1$  とコイル2に流れる電流  $I_2$  がともに変化する場合には、鉄しん中の全磁束の変化量  $\Delta \Phi$  はコイル1に流れる電流  $I_1$  の変化による磁束の変化量とコイル2に流れる電流  $I_2$  の変化 ( $\Delta I_2$ ) による磁束の変化量の和となる。このことから、コイル1に流れる電流  $I_1$  とコイル2に流れる電流  $I_2$  がともに変化する場合にコイル2に生じる誘導起電力は、 $(8) [L_0, n_1, n_2, \Delta I_1, \Delta I_2, \Delta t]$  と表すことができる。同様にして、 $\Delta I_1$  と  $\Delta I_2$  によってコイル1に生じる誘導起電力は、

$(9) [L_0, n_1, n_2, \Delta I_1, \Delta I_2, \Delta t]$  と表すことができる。

さてここで、スwitch  $S_2$  を閉じた状態を考察してみよう。コイル2の回路の抵抗は0なので、キルヒホッフの第二法則よりコイル2に生じる誘導起電力は0でなければならない。このことと、(8)、(9)式を用いると、コイル1の誘導起電力は

$(10) [L_0, n_1, n_2, \Delta I_1, \Delta t]$  となる。このときの磁束の変化は、

$\Delta \Phi = (11) [L_0, n_1, n_2, \Delta I_1]$  となっている。

したがって、スwitch  $S_2$  を閉じた状態で、最初開いていたスwitch  $S_1$  を閉じた直後にコイル1に流れる電流は、 $I_1 = (12) [E, r, R, L_0, n_1, n_2]$  となる。このとき、コイル2を流れる電流を電流計で測定すると、 $I_2 = (13) [n_1, n_2] \times I_1$  となっている。ただし、スwitch  $S_1$  を閉じる直前のコイル2には電流は流れていなかったとする。

〔6〕J08交流電流とリアクタンス〔東京医科歯科大〕

図1のような電圧と角周波数を設定できる交流電源を用意した。AB間には、抵抗、コンデンサー、コイルなどを接続する。交流電源の電圧を  $V(t) = V_0 \sin \omega t$ 、抵抗の抵抗値を  $R$ 、コンデンサーの電気容量を  $C$ 、コイルの自己インダクタンスを  $L$  として次の各問いに答えよ。

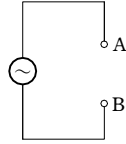


図1 交流電源

ただし、 $t$ を時刻、 $\omega$ を角周波数とし、導線の抵抗やコイルの内部抵抗は無視できるものとする。作図は、(2)~(4)について角周波数とリアクタンスの定性的な関係がわかるように、1つの図(図3)の中に表せ。なお、 $n$ を整数とすると、 $\sin(n\omega t)$  および  $\cos(n\omega t)$  の1周期にわたる時間平均は0である。

(1) AB間に抵抗をつないだとき、回路に流れた電流は  $I(t) = I_1 \sin \omega t$  であった。

(a)  $I_1$  を  $V_0$  と  $R$  で表せ。

(b) 電源のする仕事率(電力)の、1周期にわたる時間平均を求めよ。

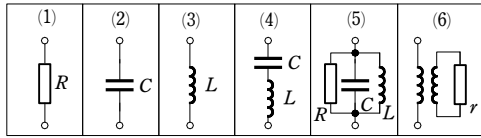


図2 AB間に接続する素子など(1)~(6)

(2) AB間にコンデンサーをつないだとき、回路に流れた電流は

$I(t) = I_2 \sin(\omega t + \phi_2)$  であった。

(a)  $I_2$  を  $V_0$ 、 $C$ 、 $\omega$  で表し、 $\phi_2$  の値を求めよ。

(b) コンデンサーのリアクタンス  $X_2$  を求め、リアクタンスと角周波数  $\omega$  の関係を実線で図示せよ。

(c) 電源のする仕事率の、1周期にわたる時間平均を求めよ。また、その値の物理的意味を述べよ。

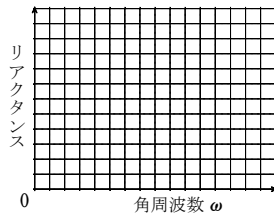


図3

(3) AB間にコイルをつないだとき、回路に流れた電流は  $I(t) = I_3 \sin(\omega t + \phi_3)$  であった。

(a)  $I_3$  を  $V_0$ 、 $L$ 、 $\omega$  で表し、 $\phi_3$  の値を求めよ。

(b) コイルのリアクタンス  $X_3$  を求め、リアクタンスと角周波数  $\omega$  の関係を破線で図示せよ。

(4) AB間にコンデンサーとコイルを直列につないだ。

(a) リアクタンスの大きさ  $|X_4|$  と角周波数  $\omega$  の関係を太い実線で図示せよ。

(b) リアクタンスの大きさが最小値をとる角周波数  $\omega_4$  を求めよ。

(5) AB間に抵抗とコンデンサーとコイルを並列につないだとき、回路に流れた全電流は  $I(t) = I_5 \sin(\omega t + \phi_5)$  となった。 $I_5$  と  $\tan \phi_5$  をそれぞれ  $V_0$ 、 $R$ 、 $C$ 、 $L$ 、 $\omega$  のうち必要なものを使って表せ。

(6) 一次コイルの巻数が  $N_p$ 、二次コイルの巻数が  $N_s$  である変圧器の一次側を AB間につなぎ、二次側に抵抗値  $r$  の抵抗をつないだ。このとき、一次コイルに流れた電流は  $I(t) = I_6 \sin(\omega t + \phi_6)$  であった。 $I_6$  を  $V_0$ 、 $r$ 、 $N_p$ 、 $N_s$ 、 $\phi_6$  で表せ。ただし、変圧器は理想的であるととし、コイルの抵抗は無視でき、磁束は鉄心の外にもれないものとする。