

1 11電場と電気力線・電位［2011 早稲田大］

以下の空欄に当てはまる答えを各解答群から1つだけ選べ(必要であれば解答群の中の同じ答えを何度用いてもよい)。

原点に電気量 $Q\ (Q>0)$ の点電荷が置かれている。

(1) 原点からの距離が r の点における電場の強さ $E(r)$ は［ア］であり，電位 $V(r)$ は［イ］である。ただし，無限遠 $(r\to\infty)$ を電位の基準(0)とし，クーロンの法則における比例定数を k とする。

(1) の解答群

① kQr^2 ② $k\dfrac{Q}{r^2}$ ③ kQr ④ $k\dfrac{Q}{r}$ ⑤ kQ

⑥ $-kQr^2$ ⑦ $-k\dfrac{Q}{r^2}$ ⑧ $-kQr$ ⑨ $-k\dfrac{Q}{r}$ ⑩ $-kQ$

(2) 電場の強さが E であるときには，電場に垂直な単位面積当たり E 本の電気力線をかくことにすると，電気量 Q の点電荷に対しては総数［ウ］本の電気力線がかかれることになる。

(2) の解答群

① 0 ② kQ ③ $2kQ$ ④ $4kQ$ ⑤ $\dfrac{4}{3}kQ$

⑥ πkQ ⑦ $2\pi kQ$ ⑧ $\dfrac{4\pi}{3}kQ$ ⑨ $4\pi kQ$ ⑩ $\dfrac{8\pi}{3}kQ$

次に，点電荷のかわりに電気量 Q に帯電させた半径 a の球形の導体(導体球)を原点に置いた。球の中心を原点とする。

(3) この場合に原点から半径 $R\ (R>a)$ の球面を貫く電気力線の総数は，電気量 Q の点電荷に対してかかれる電気力線の総数の(すなわち(2)の解答の)［エ］倍となる。

(3) の解答群

① $\left(\dfrac{a}{R}\right)^3$ ② $\left(\dfrac{a}{R}\right)^2$ ③ $\dfrac{a}{R}$ ④ $\sqrt{\dfrac{a}{R}}$ ⑤ $\dfrac{1}{2}$

⑥ $\sqrt{\dfrac{R}{a}}$ ⑦ $\dfrac{R}{a}$ ⑧ $\left(\dfrac{R}{a}\right)^2$ ⑨ $\left(\dfrac{R}{a}\right)^3$ ⑩ 1

(4) 導体球の内外の電場のようすは電気力線のようすから理解することができる。原点(球の中心)からの距離を r とすると，導体球の内部 $(0\leqq r<a)$ の電場の強さ $E(r)$ は［オ］，外部 $(r>a)$ での電場の強さ $E(r)$ は［カ］となる。また，導体球の内部 $(0\leqq r<a)$ の電位 $V(r)$ は［キ］，外部 $(r>a)$ での電位 $V(r)$ は［ク］である。

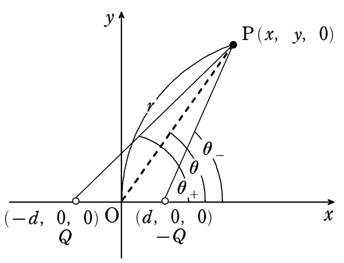
(4) の解答群

① kQr^2 ② kQr ③ kQ ④ $k\dfrac{Q}{r}$ ⑤ $k\dfrac{Q}{r^2}$

⑥ kQa^2 ⑦ kQa ⑧ 0 ⑨ $k\dfrac{Q}{a}$ ⑩ $k\dfrac{Q}{a^2}$

導体球にかえて，今度は位置 $(-d,\ 0,\ 0)$ に電気量 Q の点電荷を，位置 $(d,\ 0,\ 0)$ には電気量 $-Q$ の点電荷を置いた。

(5) y 軸上の点 $(0,\ y,\ 0)$ における電場 $\vec{E}=(E_x,\ E_y,\ E_z)$ を求めると，$E_x=$［ケ］，$E_y=$［コ］，$E_z=0$ となる。



(5) の解答群

① $\dfrac{2kQd}{(d^2+y^2)^{\frac{3}{2}}}$ ② $\dfrac{kQd}{(d^2+y^2)^{\frac{3}{2}}}$

③ $\dfrac{\sqrt{2}\,kQ}{d^2+y^2}$ ④ $\dfrac{kQ}{\sqrt{d^2+y^2}}$

⑤ 0 ⑥ $-\dfrac{kQ}{\sqrt{d^2+y^2}}$

⑦ $-\dfrac{\sqrt{2}\,kQ}{d^2+y^2}$ ⑧ $-\dfrac{kQd}{(d^2+y^2)^{\frac{3}{2}}}$

⑨ $-\dfrac{2kQd}{(d^2+y^2)^{\frac{3}{2}}}$

(6) xy 平面内で原点から十分離れた点Pにおける電位を，原点からの距離 r と x 軸からはかった角度 θ (図参照)を用いて表すと［サ］となる。

ただし，d に比べて r は十分大きいとして $\dfrac{d^2}{r^2}$ は無視するとともに，その大きさが1に比べて十分小さい数 $t\ (|t|<1)$ に対して成りたつ近似式 $(1+t)^n\fallingdotseq 1+nt$ (n は実数)を用いた。

(6) の解答群

① $-\dfrac{kQ\sin\theta}{r}$ ② $-\dfrac{2kQ\sin\theta}{r}$ ③ $-\dfrac{kQd\sin\theta}{r^2}$ ④ $-\dfrac{2kQd\sin\theta}{r^2}$

⑤ $-\dfrac{kQ\cos\theta}{r}$ ⑥ $-\dfrac{2kQ\cos\theta}{r}$ ⑦ $-\dfrac{kQd\cos\theta}{r^2}$ ⑧ $-\dfrac{2kQd\cos\theta}{r^2}$

⑨ 0

(7) 点Pにおける電場を求めるためには，電気量 Q の点電荷と点Pを結ぶ線分が x 軸となす角度 θ_+，電気量 $-Q$ の点電荷と点Pを結ぶ線分が x 軸となす角度 θ_- を求める必要がある。上と同じ近似を用いると，$\cos\theta_+=$［シ］となる。$\cos\theta_-$ も同様にして求めることができる。

(7) の解答群

① $\cos\theta+\dfrac{d}{r}\cos\theta\sin\theta$ ② $\cos\theta+\dfrac{d}{r}\cos^2\theta$ ③ $\cos\theta+\dfrac{d}{r}\sin^2\theta$

④ $\cos\theta+\dfrac{d}{r}\cos^3\theta$ ⑤ $\cos\theta-\dfrac{d}{r}\cos\theta\sin\theta$ ⑥ $\cos\theta-\dfrac{d}{r}\cos^2\theta$

⑦ $\cos\theta-\dfrac{d}{r}\sin^2\theta$ ⑧ $\cos\theta-\dfrac{d}{r}\cos^3\theta$

(8) 同じ近似のもとで点Pにおける電場 $\vec{E}=(E_x,\ E_y,\ E_z)$ を求めると $E_x=$［ス］，$E_y=$［セ］，$E_z=$［ソ］となる。

(8) の解答群

① $\dfrac{2kQd}{r^3}(1-3\cos^2\theta)$ ② $\dfrac{2kQd}{r^3}(1+3\cos^2\theta)$ ③ $\dfrac{6kQd}{r^3}\sin\theta\cos\theta$

④ $-\dfrac{2kQd}{r^3}(1-3\cos^2\theta)$ ⑤ $-\dfrac{2kQd}{r^3}(1+3\cos^2\theta)$ ⑥ $-\dfrac{6kQd}{r^3}\sin\theta\cos\theta$

⑦ 0

2 17平行板コンデンサーへの導体の挿入［2017 名古屋大］

図1に示すように，幅が1 m，長さが L〔m〕の長方形の極板2枚を間隔 d〔m〕だけ離して平行に設置したコンデンサー1と，幅が1 m，長さが L〔m〕の長方形の極板2枚を間隔 $\dfrac{d}{2}$〔m〕だけ離して平行に設置したコンデンサー2が，電圧 E〔V〕の直流電源，抵抗1，スイッチ1につながれている。コンデンサー1に，幅が1 m，長さが L〔m〕，厚さが $\dfrac{3d}{4}$〔m〕の直方体の導体を，図2に示すように，両端をそろえて挿入した。図1のように，導体をコンデンサー1の中央にコンデンサー1と平行に挿入したとき，コンデンサー1の長さ方向の左端と導体の長さ方向の右端の距離を x〔m〕とし，x の範囲を $0 \leqq x \leqq L$ とする。

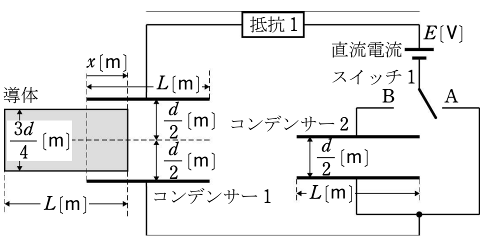


図1

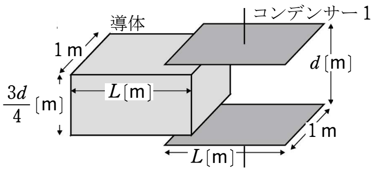


図2

導線の抵抗および直流電源の内部抵抗は無視できるものとする。抵抗以外でのエネルギーの消費は考えなくてよい。ここで，コンデンサー1とコンデンサー2の極板間はいずれも真空とみなせるとする。また，コンデンサー1とコンデンサー2における2枚の極板の間隔は常に一定とする。コンデンサー内部の電気力線の向きは極板に垂直であるものとし，極板の端での電場(電界)の乱れはないものとする。導体は帯電しておらず，外部との電荷のやりとりはないものとする。最初，コンデンサー1とコンデンサー2に電荷は蓄えられていない。

導体がコンデンサー1に挿入されていないとき($x=0$ m)のコンデンサー1の電気容量を C〔F〕として，次の問いに答えよ。

(1) まず，スイッチ1を端子Aにつなぎ，その状態を保持しつつ，導体に外力を加えて，導体をコンデンサー1に $x=\dfrac{L}{4}$〔m〕まで挿入した後に，十分に長い時間が経過した。このとき，次の文章中の ア ～ ウ を C と E を用いて表せ。

コンデンサー1の電気容量は ア 〔F〕，コンデンサー1の正極板に蓄えられている電気量は イ 〔C〕，コンデンサー1に蓄えられている静電エネルギーは ウ 〔J〕である。

(2) 続いて，導体がコンデンサー1に $x=\dfrac{L}{4}$〔m〕まで挿入されている状態を保持しつつ，スイッチ1を端子Aから端子Bにつなぎかえて十分に長い時間が経過した。このとき，次の文章中の エ と オ を C と E を用いて表せ。

コンデンサー1の正極板に蓄えられている電気量は エ 〔C〕，コンデンサー1に蓄えられている静電エネルギーは オ 〔J〕である。

次に，図1と同じコンデンサー1とコンデンサー2を，電圧 E〔V〕の直流電源，抵抗1，抵抗2，スイッチ2，スイッチ3と，図3に示すようにつなぎなおした。導体はコンデンサー1に完全に挿入されており($x=L$〔m〕)，スイッチ3を開いたままスイッチ2のみを閉じてコンデンサー1が完全に充電されている。また，コンデンサー2に電荷は蓄えられていない。

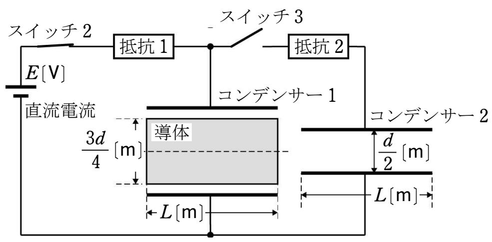


図3

まず，スイッチ2を開き，続いて導体に外力を加えて，導体をコンデンサー1から完全に引き抜いた($x=0$ m)。次の問いに答えよ。

(3) コンデンサー1の極板間の電位差を求めよ。

次に，導体がコンデンサー1から完全に引き抜かれている状態($x=0$ m)を保持しつつ，スイッチ3を閉じて十分に長い時間が経過した。次の問いに答えよ。

(4) コンデンサー1の極板間の電位差を求めよ。

次に，図4のように，スイッチ2とスイッチ3のいずれも開いた状態で，導体がコンデンサー1と平行に，$x=a$〔m〕($0<a<L$)までコンデンサー1に挿入されている場合を考える。ただし，コンデンサー1とコンデンサー2には電荷は蓄えられていないとする。また点Pと点Qは図4に示すようにコンデンサー1の2つの極板の間にあり，点Pは導体表面のある位置に，点Qは導体が挿入されていない部分のある位置にあるとする。点Pと点Qの2点は，いずれもコンデンサー1の正極板から負極板に向かって $\dfrac{7d}{8}$〔m〕離れた位置にある。次の問いに答えよ。

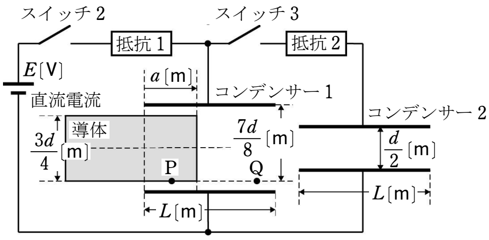


図4

(5) 次の文章中の カ ～ ク と コ ～ ス を L，a，C，E の中から適切な記号を用いて表せ。また， ケ は適切な選択肢を選べ。

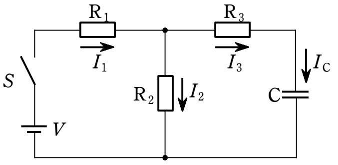
スイッチ2を閉じてコンデンサー1を完全に充電した。このとき，直流電源は カ 〔J〕の仕事をした。

続いて，導体がコンデンサー1に $x=a$〔m〕まで挿入されている状態を保持しつつ，スイッチ3を閉じて十分に長い時間が経過した。このとき，抵抗1と抵抗2において合計 キ 〔J〕のジュール熱が発生した。ここで，点Pと点Qの位置の電位を比較すると，点Pの位置のほうが点Qの位置よりも電位が ク 〔V〕だけ ケ{① 高い，② 低い}。

次に，スイッチ2とスイッチ3をいずれも開いた。その後，導体に外力を加えて，導体をコンデンサー1から完全に引き抜くと($x=0$ m)，コンデンサー1の極板間の電位差は コ 〔V〕になった。

その後，導体がコンデンサー1から完全に引き抜かれている状態($x=0$ m)を保持しつつ，スイッチ3を閉じて十分に長い時間が経過した。このとき，コンデンサー1に蓄えられている電気量は サ 〔C〕，コンデンサー2に蓄えられている電気量は シ 〔C〕となり，抵抗2でジュール熱が発生した。抵抗2で発生したジュール熱が， キ 〔J〕と等しくなるとき，a は ス 〔m〕である。

3 06コンデンサーを含む直流回路［2006 早稲田大］



図のように，内部抵抗が無視できる起電力 V の電池，スイッチ S，抵抗 R_1 (抵抗値 R_1)，R_2 (抵抗値 R_2)，R_3 (抵抗値 R_3)，コンデンサー C (電気容量 C) からなる電気回路がある。抵抗 R_1 を流れる電流を I_1，R_2 を流れる電流を I_2，R_3 を流れる電流を I_3，コンデンサー C に流れ込む電流を I_C とし，それぞれ図の矢印の向きを正とする。最初，コンデンサーには電荷はなく，スイッチは開かれている。また，回路の自己インダクタンスはないものとする。

(1) スイッチ S を閉じた瞬間に抵抗 R_2 を流れる電流 I_2 を求め，以下の中から正しいものを1つ選べ。

① $\dfrac{V}{R_1}$　② $\dfrac{V}{R_2}$　③ $\dfrac{V}{R_1+R_2}$　④ $\dfrac{(R_2+R_3)V}{R_1R_2}$

⑤ $\dfrac{R_2V}{R_1R_2+R_2R_3+R_3R_1}$　⑥ $\dfrac{R_3V}{R_1R_2+R_2R_3+R_3R_1}$

⑦ $\dfrac{(R_2+R_3)V}{R_1R_2+R_2R_3+R_3R_1}$　⑧ $\dfrac{CV}{R_2}$　⑨ $\dfrac{R_1(R_2+R_3)V}{R_1R_2+R_2R_3+R_3R_1}$

スイッチ S を閉じてから十分時間が経って定常状態になった。以下の (2)～(4) に答えよ。

(2) 抵抗 R_2 を流れる電流 I_2 を求め，以下の中から正しいものを1つ選べ。

① 0　② $\dfrac{V}{R_2}$　③ $\dfrac{V}{R_1+R_2}$　④ $\dfrac{(R_2+R_3)V}{R_1R_2}$

⑤ $\dfrac{R_2V}{R_1R_2+R_2R_3+R_3R_1}$　⑥ $\dfrac{R_3V}{R_1R_2+R_2R_3+R_3R_1}$

⑦ $\dfrac{(R_2+R_3)V}{R_1R_2+R_2R_3+R_3R_1}$　⑧ $\dfrac{CV}{R_2}$　⑨ $\dfrac{R_1(R_2+R_3)V}{R_1R_2+R_2R_3+R_3R_1}$

(3) コンデンサー C にたくわえられた電気量を求め，以下の中から正しいものを1つ選べ。

① 0　② CV　③ $\dfrac{CR_1V}{R_1+R_2}$　④ $\dfrac{CR_2V}{R_1+R_2}$　⑤ $\dfrac{C(R_2+R_3)V}{R_3}$

⑥ $\dfrac{CR_2{}^2V}{R_1R_2+R_2R_3+R_3R_1}$　⑦ $\dfrac{CR_2R_3V}{R_1R_2+R_2R_3+R_3R_1}$

⑧ $\dfrac{CR_2(R_2+R_3)V}{R_1R_2+R_2R_3+R_3R_1}$　⑨ $\dfrac{CR_1R_2(R_2+R_3)V}{R_1R_2+R_2R_3+R_3R_1}$

(4) この定常状態において，スイッチ S を開いた。その瞬間に抵抗 R_3 を流れる電流 I_3 を求め，以下の中から正しいものを1つ選べ。

① $\dfrac{R_2V}{(R_1+R_2)(R_2+R_3)}$　② $-\dfrac{R_2V}{(R_1+R_2)(R_2+R_3)}$　③ $\dfrac{R_3V}{(R_1+R_2)(R_2+R_3)}$

④ $-\dfrac{R_3V}{(R_1+R_2)(R_2+R_3)}$　⑤ $\dfrac{V}{R_3}$　⑥ $-\dfrac{V}{R_3}$　⑦ $\dfrac{(R_2+R_3)V}{R_1R_2+R_2R_3+R_3R_1}$

⑧ $-\dfrac{(R_2+R_3)V}{R_1R_2+R_2R_3+R_3R_1}$　⑨ $-\dfrac{V}{R_2+R_3}$

スイッチ S を開いてじゅうぶん時間が経ったあと，最初の状態に戻った。この状態からスイッチ S を時刻 t_1 に閉じ，定常状態になる前の時刻 t_2 に開いた。時刻 t $(t_1<t<t_2)$ におけるコンデンサー C にたくわえられた電気量を q として，以下の (5)～(8) に答えよ。

(5) 時刻 t においてコンデンサー C にかかる電圧 V_C を求め，以下の中から正しいものを1つ選べ。

① 0　② V　③ $\dfrac{R_1V}{R_1+R_2}$　④ $\dfrac{R_2V}{R_1+R_2}$　⑤ $\dfrac{qR_2}{C(R_1+R_2)}$

⑥ $\dfrac{R_2V}{R_1+R_2}-\dfrac{q}{C}$　⑦ $\dfrac{qR_2}{C(R_1R_2+R_2R_3+R_3R_1)}$　⑧ $\dfrac{qR_3}{C(R_1R_2+R_2R_3+R_3R_1)}$

⑨ $\dfrac{q}{C}$

(6) 時刻 t から，微小な時間 Δt が経過した。コンデンサー C にたくわえられている電荷が Δt の間に変化した量を Δq とすると，$\Delta q=I_C\Delta t$ である。ここで，I_C の Δt の間の変化は無視できるとする。以下の中から，Δq としてもっともふさわしいものを1つ選べ。

① $\dfrac{R_1+R_2}{R_1R_2+R_2R_3+R_3R_1}\left(\dfrac{R_1V}{R_1+R_2}-V_C\right)\Delta t$

② $\dfrac{R_1+R_2}{R_1R_2+R_2R_3+R_3R_1}\left(\dfrac{R_2V}{R_1+R_2}-V_C\right)\Delta t$

③ $\dfrac{R_2+R_3}{R_1R_2+R_2R_3+R_3R_1}\left(\dfrac{R_1V}{R_2+R_3}-V_C\right)\Delta t$

④ $\left(\dfrac{R_2V}{R_1R_2+R_2R_3+R_3R_1}-\dfrac{V_C}{R_3}\right)\Delta t$

⑤ $\left(\dfrac{R_2{}^2V}{R_1R_2+R_2R_3+R_3R_1}-\dfrac{V_C}{R_3}\right)\Delta t$　⑥ $\left(\dfrac{R_2(R_2+R_3)V}{R_1R_2+R_2R_3+R_3R_1}-\dfrac{V_C}{R_3}\right)\Delta t$

⑦ $\left(\dfrac{R_2V}{R_3(R_1+R_2)}-\dfrac{V_C}{R_3}\right)\Delta t$　⑧ $\left(\dfrac{2V}{R_1+2R_2}\right)\Delta t$

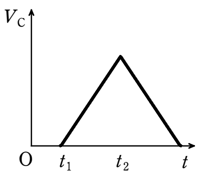
(7) コンデンサー C にかかる電圧 V_C が Δt の間に変化した量を ΔV_C とする。V_C の時間変化率 $\dfrac{\Delta V_C}{\Delta t}$ を求め，以下の中からもっともふさわしいものを1つ選べ。

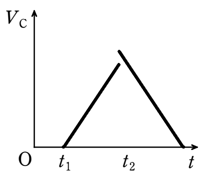
① $\dfrac{I_C}{C}$　② CI_C　③ $\dfrac{q}{C\Delta t}$　④ $\dfrac{R_2V}{(R_1+R_2)\Delta t}$　⑤ $\dfrac{qR_2}{C(R_1+R_2)\Delta t}$

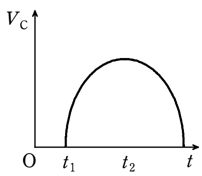
⑥ $\left(\dfrac{R_2V}{R_1+R_2}-V_C\right)\dfrac{1}{\Delta t}$　⑦ $\dfrac{R_1+R_3}{C(R_1R_2+R_2R_3+R_3R_1)}\left(\dfrac{R_2V}{R_1+R_2}-V_C\right)$

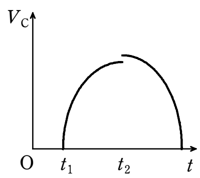
⑧ $\left(\dfrac{R_2{}^2V}{R_1R_2+R_2R_3+R_3R_1}-\dfrac{V_C}{R_3}\right)\dfrac{1}{C}$

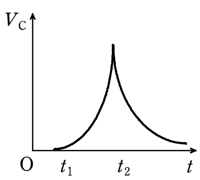
(8) 以上の結果を参考にして，以下の中から，V_C の時間変化を表すグラフとしてもっともふさわしいものを1つ選べ。

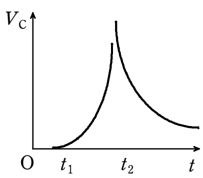
①


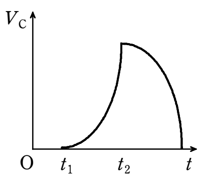
②


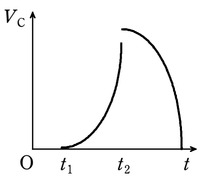
③


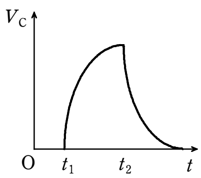
④


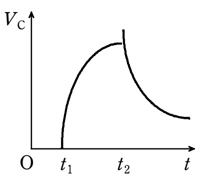
⑤


⑥


⑦


⑧


⑨


⑩


4 17コンデンサーのつなぎかえと発光素子［2017 北海道大］

以下の文中の $\boxed{\text{ア}}$～$\boxed{\text{サ}}$ に適切な数式あるいは数値を入れよ。また $\boxed{\text{a}}$ には，選択肢中の適切なものを選べ。

(1) 図1のように，内部抵抗が無視できる起電力 E［V］の直流電源，R_1［Ω］と R_2［Ω］の抵抗，電気容量 C_1［F］と C_2［F］のコンデンサー，およびスイッチSを接続した。初めスイッチSはb側に入れられていて，また2つのコンデンサーには電荷が蓄えられていなかった。この状態でスイッチSをa側に切りかえると，C_1 の充電が始まる。コンデンサー C_1 に加わる電圧が V［V］になったとき，抵抗 R_1 に流れる電流は $\boxed{\text{ア}}$［A］である。

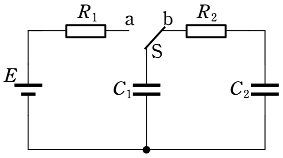
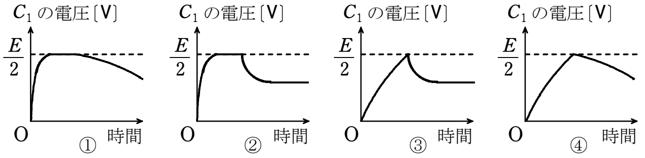


図1

次に，コンデンサー C_1 に加わる電圧が $\dfrac{E}{2}$［V］に達した瞬間にスイッチSをb側にもどした。その後，十分時間がたつと，コンデンサー C_2 に加わる電圧は $\boxed{\text{イ}}$［V］となった。また，抵抗 R_2 によって消費されたエネルギーは $\boxed{\text{ウ}}$［J］となる。

上記の過程におけるコンデンサー C_1 に加わる電圧の時間変化について最も適したグラフは $\boxed{\text{a}}$ となる。

$\boxed{\text{a}}$ の選択肢



(2) 図2に示すように，加えられた電圧と流れる電流の関係が発光時と消光時で変わる発光素子を考えよう。この発光素子は，両端の間に加えられた電圧が V_{on}［V］に達すると点灯し，電流が流れるようになる。一度点灯すると，電圧が V_{on} を下回っても発光を続けるが，V_{off}［V］まで下がると消灯する。なお，消光状態では電流が流れないとする。また，この発光素子の電気容量はないものとする。

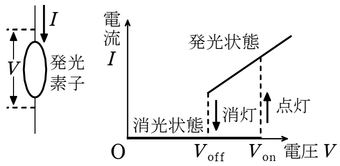


図2

この発光素子と，起電力 E［V］の直流電源，抵抗R，2つのコンデンサーAとB，およびスイッチSを図3のように接続した。なお，コンデンサーAとBの電気容量は両方とも C［F］であり，E は V_{on} に比べて十分大きい。また，コンデンサーAとBは，初めは電荷が蓄えられていなかったとする。

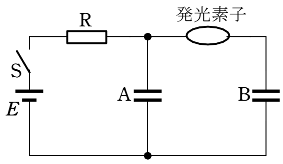


図3

スイッチSが閉じられた直後は，2つのコンデンサーに加わる電圧はいずれも0Vであるため，発光素子は消光状態である。このため最初は，コンデンサーAのみが充電される。コンデンサーAの電圧が $\boxed{\text{エ}}$［V］に達すると，発光素子が発光状態になり，コンデンサーBにも電流が流れるようになる。ここで，抵抗Rの値が十分大きく，発光している間に発光素子に流れる電流は，すべてがコンデンサーAの放電によるものと考える。この放電によってコンデンサーAに加わる電圧が下がり，発光素子に加わる電圧が V_{off} になると再び消灯する。消灯する直前にコンデンサーAとBに加わっていた電圧は，V_{on} と V_{off} を用いるとそれぞれ $\boxed{\text{オ}}$［V］および $\boxed{\text{カ}}$［V］と表される。

発光素子が消灯した後は，コンデンサーAの充電が再び始まる。このため，以降は点灯と消灯のサイクルをくり返す。ここで，コンデンサーAの m 回目の充電が始まったときにコンデンサーBにすでに蓄えられていた電気量を Q_m［C］としよう。コンデンサーAのこの回の充電の間は，コンデンサーBに加わる電圧は $\boxed{\text{キ}}$［V］で変化しない。このため，発光素子が m 回目に点灯するとき，コンデンサーAに加わる電圧は $\boxed{\text{ク}}$［V］になっている。このことから，$Q_{m+1}=\boxed{\text{ケ}}\times Q_m+\boxed{\text{コ}}$［C］であることがわかる。これより，$Q_4=\boxed{\text{サ}}$［C］と求められる。

5 04コンデンサーの充放電［2004 東北大］

図1のように，2個の平行板コンデンサー $\mathrm{C_X}$ と $\mathrm{C_Y}$，2個の電気抵抗 $\mathrm{R_X}$ と $\mathrm{R_Y}$，電池B，および3個のスイッチ $\mathrm{S_0}$，$\mathrm{S_1}$，$\mathrm{S_2}$ からなる回路を作った。この回路では，スイッチ操作によって $\mathrm{C_Y}$ の極板間の電圧 V_{Y} をさまざまな値に設定できる。

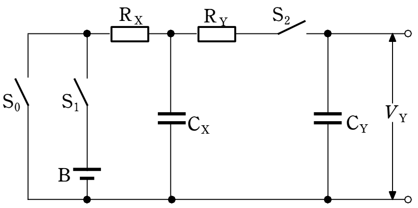


図1

いま，$\mathrm{C_X}$ と $\mathrm{C_Y}$ はいずれも，電気容量が C，極板間の距離が d であり，極板間は誘電率 ε の空気で満たされている。$\mathrm{R_X}$ と $\mathrm{R_Y}$ の抵抗値はいずれも R であり，Bの起電力は V_1 である。最初の状態では，$\mathrm{C_X}$ と $\mathrm{C_Y}$ に電荷がたくわえられておらず，すべてのスイッチが開いている。電池の内部抵抗は無視できるものとして，以下の問いに答えよ。

(1) $\mathrm{S_1}$ を閉じ，十分長い時間が経過してから $\mathrm{S_1}$ を開いた。このときの次の値を求めよ。

(a) $\mathrm{S_1}$ が閉じている間に電池がした仕事 W_{X}

(b) $\mathrm{C_X}$ にたくわえられている静電エネルギー U_{X}

(c) $\mathrm{C_X}$ の極板にはたらいている単位面積当たりの静電引力 F_{X}

(2) 次に，$\mathrm{S_2}$ を閉じ，十分長い時間が経過してから $\mathrm{S_2}$ を開いた。このときの次の値を求めよ。

(a) $\mathrm{C_Y}$ の極板間の電界（電場）の強さ E_{Y}

(b) $\mathrm{S_2}$ が閉じている間に $\mathrm{R_Y}$ で発生したジュール熱 J_{Y}

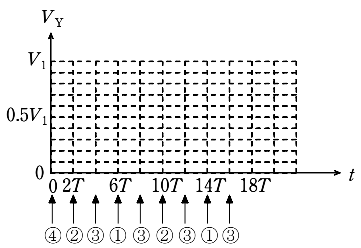
(c) $\mathrm{S_2}$ が閉じている間に $\mathrm{R_Y}$ を流れた電流の大きさの最大値 I_{Y}

(3) 次に，表に示す基本操作を，時刻 $t=0$ から④②③①③②③①③の順に行った。以下の問いに答えよ。ただし，それぞれの基本操作を開始する間隔は，時間 $2T$ とした。

基本操作名	操作の内容
①	$\mathrm{S_0}$ を閉じ，十分長い時間 T が経過してから $\mathrm{S_0}$ を開く。
②	$\mathrm{S_1}$ を閉じ，十分長い時間 T が経過してから $\mathrm{S_1}$ を開く。((1)に対応)
③	$\mathrm{S_2}$ を閉じ，十分長い時間 T が経過してから $\mathrm{S_2}$ を開く。((2)に対応)
④	$\mathrm{S_0}$ と $\mathrm{S_2}$ を閉じ，十分長い時間 T が経過してから $\mathrm{S_0}$ と $\mathrm{S_2}$ を開く。

(a) この一連のスイッチ操作の間に V_{Y} が時間的にどのように変化したか，その概略を図2にかけ。図中の矢印と丸数字は各基本操作を開始した時刻を意味する。

(b) 時刻 $t=2T$，$6T$，$10T$，$14T$，$18T$ における V_{Y} の値を求めよ。



(矢印と丸数字は各基本操作を開始した時刻を意味する)
図2

(4) いま，V_{Y} を $\dfrac{3}{32}V_1$ にしたい。このためには，基本操作④の放電を行って $\mathrm{C_X}$ と $\mathrm{C_Y}$ に電荷がたくわえられていない状態にしたあと，基本操作①～③をどのような順序で行えばよいか，その一例を示せ。ただし，一連の操作の中で基本操作を何回行ってもよい。

6 07ダイオードと豆電球を含む回路［2007 東北大］

　オームの法則が成りたたない部品にダイオードや豆電球がある。ダイオードを流れる電流は，電圧とともに急激に増大する。一方，豆電球では，電圧の上昇とともに流れる電流の増え方がにぶる。いずれも加える電圧によって抵抗値（電圧と流れる電流の比）が変化するので，非オーム性抵抗（非直線抵抗）ともよばれる。これらの部品を含む図1の回路を考えよう。ダイオード，特性の等しい2つの豆電球，および抵抗値 R の抵抗が，起電力 V_0 で内部抵抗が無視できる直流電源と接続されている。直流電源の負電極側は接地してあり，電位は 0 V である。

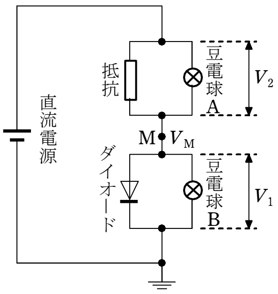


図1

　いま，ダイオード，豆電球，および抵抗の電流－電圧の関係が，それぞれ図2の曲線 a，曲線 b，曲線 c で表される場合について考えよう。非オーム性抵抗を含む回路でも，グラフを用いることによって，電流と電圧の関係を求めることができる。

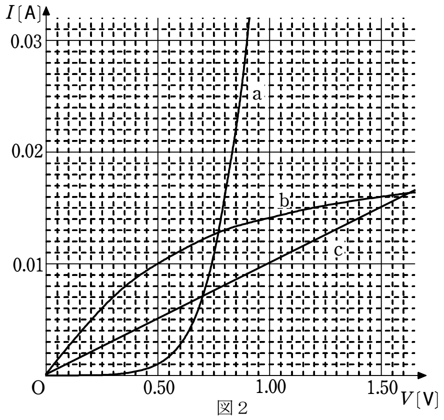


図2

　次の問いに答えよ。なお，数値は単位とともに記せ。

(1)　ダイオードと豆電球 B の並列回路に着目し，次の問いに答えよ。

(a)　直流電源の負極は接地されているから，点 M の電位 V_M は，ダイオードと豆電球 B の両端に加わる電圧に等しい。電位 V_M が $V_M = V_1$ のとき，ダイオードおよび豆電球 B の抵抗値をそれぞれ R_D，R_B として，点 M に流れる電流 I_1 を，V_1，R_D，R_B を用いて表せ。

(b)　点 M の電位 V_M が 0.50 V のとき，および 0.80 V のとき，点 M に流れる電流 I_1 と電位 V_M を表す点を図3に●（黒丸印）で記せ。また，$V_M = 0.80$ V のときの電流 I_1 の値を，有効数字2桁で記せ。

(c)　ダイオードと豆電球 B の両端に加わる電圧を 0 V から上昇させた場合について，点 M に流れる電流 I_1 と点 M の電位 V_M との関係を，$0 \leqq V_M \leqq 0.8$ V の範囲内で図3に実線でかけ。

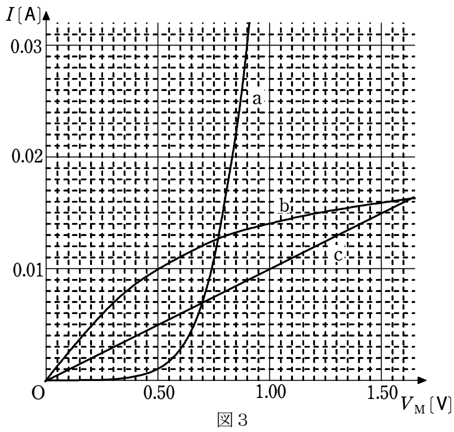


図3

(2)　次に，抵抗と豆電球 A の並列回路に着目し，次の問いに答えよ。

(a)　抵抗の抵抗値 R を図2より読み取り，有効数字2桁で答えよ。

(b)　抵抗と豆電球 A の両端の電圧が V_2 のとき，豆電球 A の抵抗値を R_A として，点 M に流れる電流 I_2 を，V_2，R，R_A を用いて表し，I_2 と V_2 の関係を，図4に実線でかけ。

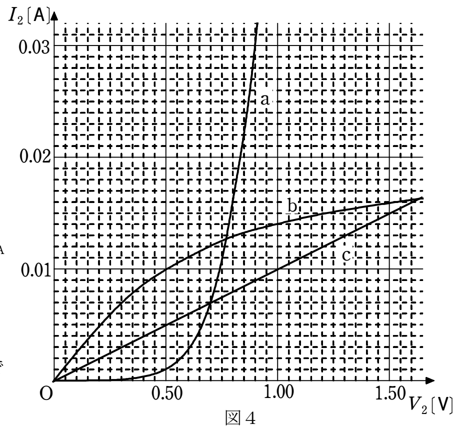


図4

(c)　起電力 V_0 が 1.50 V のとき，(2)(b) で求めた電流 I_2 と電位 V_M の関係を，図3に破線でかけ。

(3)　回路全体の動作について考える。起電力 V_0 が 1.50 V のとき，点 M に流れる電流と電位 V_M は，(1)(c) と (2)(c) で求めた関係をともに満たす。点 M の電流と電位 V_M を表す点を図3に＋印で記し，V_M の値を有効数字1桁で答えよ。

(4)　直流電源の起電力 V_0 を変化させると，豆電球 A と B の明るさは異なった変化をする。V_0 に対する豆電球の明るさの変化について，次の問いに答えよ。ただし，豆電球の明るさは，電圧とともに増加するものとする。

(a)　$V_0 = 1.0$ V のとき，豆電球 A と豆電球 B はどちらが明るいか，理由とともに述べよ。

(b)　V_0 を 1.5 V よりもさらに上昇させると，豆電球 A と豆電球 B の明るさの増え方にはどのような違いがあるか，簡潔に述べよ。