

令和 5 年度

第 1 種 理 論

(第 1 時限目)

答案用紙記入上の注意事項等

1. マークシート（答案用紙）は機械で読み取りますので、**濃度HBの鉛筆又はHBの芯を用いたシャープペンシルで濃く塗りつぶしてください。**

色鉛筆やボールペンでは機械で読み取ることができません。

なお、訂正は「プラスチック消しゴム」できれいに消し、消しくずを残さないでください。

2. マークシートには、カナ氏名、受験番号、試験地が印字されています。受験票と照合の上、**氏名、生年月日を記入**してください。

マークシートに印字してある

- ・カナ氏名
- ・受験番号
- ・試験地

を受験票と照合の上、記入してください。

氏 名	
生年月日	
カナ氏名 (字数制限の省略あり)	印字あり
試験地	印字あり

受	験	番	号
印	字	あ	り

3. マークシートの余白及び裏面には、何も記入しないでください。
4. マークシートは、折り曲げたり汚したりしないでください。

5. 解答は、マークシートの間番号に対応した解答欄にマークしてください。

例えば、問 1 の

(1)

 と表示のある問に対して (イ) と解答する場合は、下の例のように問 1 の (1) の (イ) をマークします。

なお、マークは各小問につき一つだけです。二つ以上マークした場合には、採点されません。

(マークシートへの解答記入例)

問 1				
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
☒	☐	☐	☐	☐
☐	☒	☐	☐	☐
☐	☐	☒	☐	☐
☐	☐	☐	☒	☐
☐	☐	☐	☐	☒
☐	☐	☐	☐	☐
☐	☐	☐	☐	☐
☐	☐	☐	☐	☐
☐	☐	☐	☐	☐

問		
(1)	(2)	(3)
☐	☐	☐
☐	☐	☐
☐	☐	☐
☐	☐	☐
☐	☐	☐
☐	☐	☐
☐	☐	☐
☐	☐	☐
☐	☐	☐
☐	☐	☐

正解と思われるものの記号の枠内を、マークシートに印刷されているマーク記入例に従い、濃く塗りつぶす方法で示してください。

6. 問 6 と問 7 は選択問題です。どちらか 1 問を選択してください。選択問題は両方解答すると採点されません。

7. 問題文で単位を付す場合は、次のとおり表記します。

① 数字と組み合わせる場合

(例: 350 W $f=50$ Hz 670 kV·A)

② 数字以外と組み合わせる場合

(例: I [A] 抵抗 R [Ω] 面積は S [m²])

(この問題は持ち帰ってください。また、白紙部分はメモ用紙として使用できます。)

次ページ以降は試験問題になっていますので、試験開始の合図があるまで、開いてはいけません。

試験問題に関する質問にはお答えできません。

A問題(配点は1問題当たり小問各2点, 計10点)

問1 次の文章は, 平行平板コンデンサの電極に働く力に関する記述である。文中の に当てはまる最も適切なものを解答群の中から選べ。

平行平板コンデンサの2枚の電極間の距離が x のとき, 静電容量が C であるとする。このとき, 仮想変位法を用いて, 電極間の距離を dx だけ微小に広げることにより, 電極に働く力 F を求めることを考える。なお, C, F は x の関数である。

まず, 電極間の距離を dx だけ広げるためにコンデンサがした力学的仕事は, Fdx で表される。これにより, コンデンサに蓄えられた電界のエネルギー W_E が, dW_E だけ増えるとする。

ここで, 次の二つの場合について考える。

(a) 定電荷の場合

2枚の電極にそれぞれ $+Q, -Q$ ($Q>0$)の電荷を与え, 電極を電源に接続していないとする。エネルギー保存則により, dW_E と Fdx との間に $dW_E + Fdx = 0$ の

関係が成り立つ。 W_E を C, Q で表すと (1) であるので, $F = -\frac{dW_E}{dx}$ を計

算すれば, 力 F が (2) と求められる。

(b) 定電圧の場合

2枚の電極を電圧 V ($V>0$)の定電圧源に接続しているとする。電極間の距離を dx だけ広げることによる静電容量の変化を dC とすると, 電極に存在する電荷の大きさの変化は $dQ = VdC$ となる。また, コンデンサから電源に流入したエネルギーは, $dW_S = -VdQ = -V^2dC$ となる。

一方, コンデンサに蓄えられた電界のエネルギーを C, V で表すと, $W_E = \frac{CV^2}{2}$ であり, その変化 dW_E は (3) である。

エネルギー保存則により, dW_E , dW_S と Fdx との間には, $dW_E + dW_S + Fdx = 0$ の関係が成り立つ。よって, 力 F は (4) と求められる。

ここで, 電極間の距離が x のときに (a) の電荷 Q と (b) の電圧 V の間に $V = \frac{Q}{C}$ が成立する場合, (a) と (b) からそれぞれ求めた力 F を比較すると, (5) ことが分かる。

[問 1 の解答群]

(イ) $\frac{V^2}{3} dC$

(ロ) $\frac{Q^2}{C^2} \frac{dC}{dx}$

(ハ) $\frac{Q^2}{2C}$

(ニ) $\frac{Q^2}{C}$

(ホ) $\frac{V^2}{2} dC$

(ヘ) $V^2 \frac{dC}{dx}$

(ト) $\frac{Q^2}{2C^2} \frac{dC}{dx}$

(チ) $\frac{Q^2}{3C^2} \frac{dC}{dx}$

(リ) $\frac{V^2}{2} \frac{dC}{dx}$

(ヌ) $V^2 dC$

(ル) $\frac{V^2}{3} \frac{dC}{dx}$

(ヲ) $\frac{Q^2}{3C}$

(7) 定電圧源に接続されている方が強い力が働く

(カ) 定電圧源に接続されていない方が強い力が働く

(コ) 定電圧源に接続されているかどうかに関わらず同じ力が働く

問2 次の文章は、ポインティングベクトルに関する記述である。文中の に当てはまる最も適切なものを解答群の中から選べ。

誘電率，透磁率及び導電率がそれぞれ ε ， μ 及び σ で一様な微小領域 V を想定する。 V 内において電界及び磁界は一様であり，時刻 t における電界ベクトルが $\vec{E}$ ，磁界ベクトルが $\vec{H}$ であるとき， V 内の単位体積当たりの電磁界エネルギー u は (1) と表される。

ここで， $\sigma=0$ のとき， u の単位時間当たりの変化量 $\frac{\partial u}{\partial t}$ は，単位面積当たりのエ

ネルギーの流れ $\vec{S}$ を用いて $\frac{\partial u}{\partial t} =$ (2) と表される。 $\vec{S}$ はポインティングベクト

ルと呼ばれ， $\vec{S} =$ (3) と表される。 $\vec{E}$ 及び $\vec{H}$ が直交座標系 (x, y, z) において，それぞれ $\vec{E} = (E_x, 0, 0)$ ， $\vec{H} = (0, H_y, 0)$ と表されるとき， $\vec{S}$ は (4) 軸と平行である。

また， $\sigma \neq 0$ のときは， $\frac{\partial u}{\partial t} =$ (2) $-$ (5) と表される。

[問2の解答群]

(イ) $\vec{E} \cdot \vec{H}$

(ロ) $\vec{H} \times \vec{E}$

(ハ) $\sigma |\vec{E}|^2$

(ニ) $-\nabla \cdot \vec{S}$

(ホ) $\vec{E} \times \vec{H}$

(ヘ) x

(ト) $\sigma \vec{E} \cdot \vec{H}$

(チ) $\nabla \cdot \vec{S}$

(リ) $\frac{1}{2} \sigma |\vec{E}|^2 + \frac{1}{2} \mu |\vec{H}|^2$

(ヌ) $\frac{1}{2} \varepsilon |\vec{E}|^2 + \frac{1}{2} \mu |\vec{H}|^2$

(ル) $\frac{1}{2} \vec{E} \cdot \vec{H}$

(ヲ) y

(ワ) $\nabla \times \vec{S}$

(カ) $\sigma |\vec{E}|$

(ヱ) z

問3 次の文章は直流回路の等価回路に関する記述である。文中の に当てはまる最も適切なものを解答群の中から選べ。

図1に示す直流電圧源と抵抗とスイッチからなる回路を考える。図2は、図1の等価回路である。

図1と図2の回路のスイッチを開いたとき、端子aの電位は等しいので電源電圧 $E = \text{(1)}$ となる。端子aと大地の間の抵抗も等しいので抵抗 $R_1 = \text{(2)}$ となる。回路の消費電力が等しいので抵抗 $R_2 = \text{(3)}$ となる。

次に、図1と図2の回路のスイッチを閉じて回路に同じ負荷抵抗 R_L を接続すると、 R_L を流れる電流 I は同じ値となる。このとき、図1の直流電圧源を流れる電流 I_1 と、図2の直流電圧源を流れる電流 I_2 を求めると、 $I_1 = \text{(4)}$, $I_2 = \text{(5)}$ となる。 I_1 と I_2 の値から、負荷抵抗 R_L が同じなら図1と図2の回路が消費する電力は等しいことが分かる。

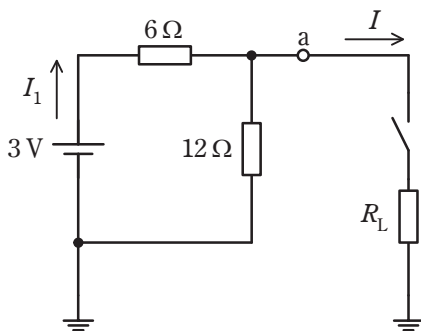


図1

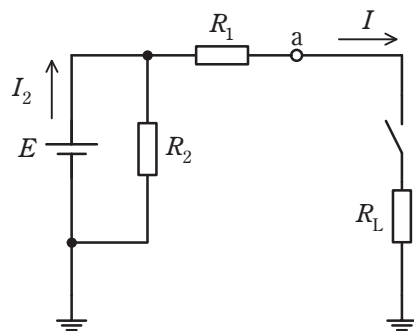


図2

〔問 3 の解答群〕

(イ) $\frac{1}{6} \times \frac{12 + R_L}{4 + R_L}$ [A]

(ロ) $\frac{7}{4} \times \frac{6 + R_L}{4 + R_L}$ [A]

(ハ) $\frac{5}{2} \times \frac{8 + R_L}{4 + R_L}$ [A]

(ニ) $\frac{5}{3} \times \frac{8 + R_L}{4 + R_L}$ [A]

(ホ) $\frac{7}{6} \times \frac{6 + R_L}{4 + R_L}$ [A]

(ヘ) $\frac{1}{4} \times \frac{12 + R_L}{4 + R_L}$ [A]

(ト) 7Ω

(チ) $2V$

(リ) 5Ω

(ヌ) 9Ω

(ル) $6V$

(ヲ) 3Ω

(ヱ) $12V$

(カ) 4Ω

(ヨ) 8Ω

問4 次の文章は、電気回路の過渡現象に関する記述である。文中の に当てはまる最も適切なものを解答群の中から選べ。

図の回路において、時刻 $t < 0$ ではスイッチ S は開いており、回路は定常状態にある。この回路において、図に示すように回路の電流を $i(t)$ とし、 $t = 0$ でスイッチ S を閉じるものとする、 $t \geq 0$ においては次式の回路方程式が成り立つ。

$$L \frac{di(t)}{dt} + R_1 i(t) = V \cdots \cdots \cdots \textcircled{1}$$

スイッチ S を閉じた直後の回路の電流を $i(0)$ とし、①式の両辺をラプラス変換すれば、次式を得る。ただし、 $i(t)$ のラプラス変換を $I(s)$ と表記する。

$$\textcircled{(1)} = \frac{V}{s} \cdots \cdots \cdots \textcircled{2}$$

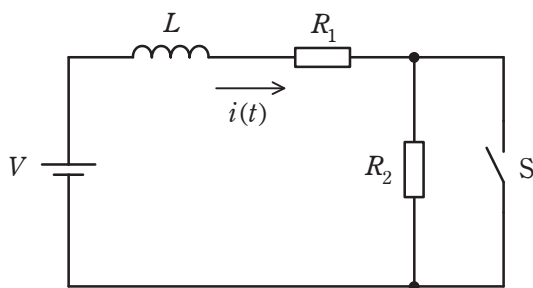
ここで、 $i(0) = \textcircled{(2)}$ であることから、ラプラス変換された回路方程式である②式より、次式を得る。

$$I(s) = \textcircled{(3)} + \frac{L}{sL + R_1} \cdot \frac{V}{R_1 + R_2} \cdots \cdots \cdots \textcircled{3}$$

③式の両辺を逆ラプラス変換すれば、 $t \geq 0$ における $i(t)$ は、次式となる。

$$i(t) = \textcircled{(4)} + \frac{V}{R_1 + R_2} e^{-\frac{t}{\tau}} \cdots \cdots \cdots \textcircled{4}$$

ただし、時定数 $\tau = \textcircled{(5)}$ である。



[問4の解答群]

$$(イ) \quad \frac{V}{R_2}$$

$$(ロ) \quad \frac{V}{R_2} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

$$(ハ) \quad \frac{V}{R_1} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

$$(ニ) \quad \frac{L}{R_1}$$

$$(ホ) \quad \frac{V}{R_1 + R_2} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

$$(ヘ) \quad \frac{L}{R_1 + R_2}$$

$$(ト) \quad \frac{V}{R_1 + R_2}$$

$$(チ) \quad \frac{R_1}{L}$$

$$(リ) \quad L[sI(s) - I(s)] + R_1 i(0)$$

$$(ヲ) \quad \frac{V}{R_1}$$

$$(ル) \quad \frac{V}{s(sL + R_2)}$$

$$(ヲ) \quad L[sI(s) + i(0)] + R_1 I(s)$$

$$(ワ) \quad \frac{V}{s(sL + R_1 + R_2)}$$

$$(ヅ) \quad \frac{V}{s(sL + R_1)}$$

$$(ヅ) \quad L[sI(s) - i(0)] + R_1 I(s)$$

B問題(配点は1問題当たり計20点)

問5 次の文章は、三相交流回路に関する記述である。文中の に当てはまる最も適切なものを解答群の中から選べ。

図のように、対称三相交流電源が、 R [Ω] 及び $2R$ [Ω] の抵抗で構成された Y 形負荷に接続されている。線間電圧は $|\dot{E}_{ab}| = |\dot{E}_{bc}| = |\dot{E}_{ca}| = E$ [V] であり、 $\dot{E}_{ab}$ を基準

フェーズとすれば、 $\dot{E}_{ab} = E$ 、 $\dot{E}_{bc} = E e^{j\frac{4}{3}\pi}$ 、 $\dot{E}_{ca} = E e^{j\frac{2}{3}\pi}$ で表される。

一般に、 n 相の多相交流回路の消費電力は、 $(n-1)$ 個の单相電力計を用いて測定できる。これは (1) の定理と呼ばれる。 W_a 及び W_c は、この定理に基づいて三相交流回路の消費電力を求める单相電力計で、内部損失や誤差が無い理想的なものである。なお、 W_a は電流 $\dot{I}_a$ が矢印の向きに流れたときに、 W_c は電流 $\dot{I}_c$ が矢印の向きに流れたときに正を指示するように接続されている。

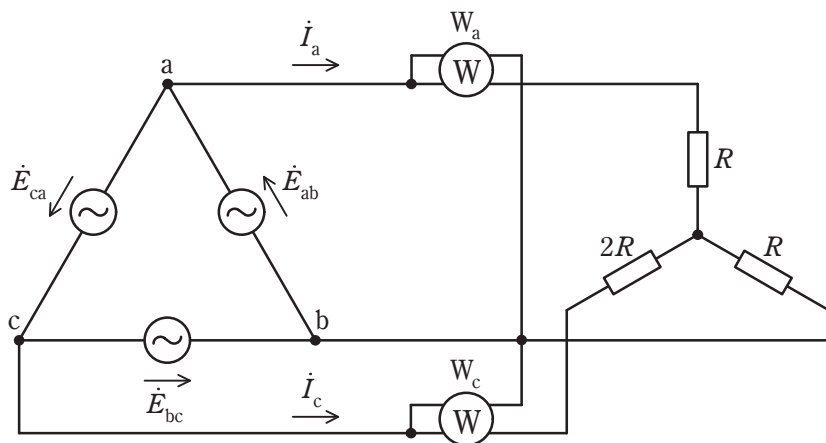
まず、 $\dot{I}_a$ の実効値 $|\dot{I}_a|$ を求めると (2) [A] が得られる。また、 W_a の指示値は、 $\dot{E}_{ab}$ に $\dot{I}_a$ の共役複素数を乗じた複素電力の実部を求めることで得られ、(3) [W] となる。

同様に、 $\dot{I}_c$ の実効値 $|\dot{I}_c|$ 及び W_c の指示値は、それぞれ、(4) [A] 及び

(5) [W] となる。

以上から、図の三相交流回路で消費する電力は、(1) の定理より、

(3) + (5) [W] となる。



[問 5 の解答群]

(イ) $\frac{\sqrt{7}E}{5R}$

(ロ) $\frac{E^2}{2R}$

(ハ) $\frac{\sqrt{7}E^2}{5R}$

(ニ) $-\frac{E^2}{2R}$

(ホ) ブロンデル

(ヘ) $\frac{3E^2}{2R}$

(ト) $\frac{3E^2}{10R}$

(チ) $\frac{\sqrt{7}E}{2R}$

(リ) $\frac{\sqrt{3}E}{2R}$

(ヌ) $\frac{3E}{10R}$

(ル) $\frac{\sqrt{3}E}{5R}$

(ヲ) $\frac{\sqrt{3}E^2}{5R}$

(リ) ノー トン

(カ) $\frac{E}{2R}$

(ヨ) テブナン

問6及び問7は選択問題であり、問6又は問7のどちらかを選んで解答すること。
両方解答すると採点されません。

(選択問題)

問6 次の文章は、半導体の熱電効果に関する記述である。文中の に当てはまる最も適切なものを解答群の中から選べ。

図のように、両端に電極を取り付けた長さ L の p 型半導体を考える。電極端子は開放とする。ここで、左端の電極を加熱したところ、 $x=0$ における半導体の温度が $T+\Delta T$ ($\Delta T>0$) に上昇し、右端 ($x=L$) における温度は T で定常状態になった。左端の温度上昇に伴い、 $x=0$ における正孔濃度が増大することで濃度勾配が生じ、正孔が x 軸の正の方向に拡散する。その結果、右端電極の電位が左端電極に対して ΔV だけ上昇する。このように温度差 ΔT が生じることによって電位差 ΔV が発生する現象を (1) 効果と呼び、 $\frac{\Delta V}{\Delta T}$ は (1) 係数と呼ばれる。以下でこの係数を求めよう。

半導体内の位置 x における正孔濃度を p 、拡散定数を D_h 、正孔の電荷量を $e(>0)$ とすると、正孔による拡散電流密度は、

$$-eD_h \frac{dp}{dx} \dots\dots\dots \textcircled{1}$$

と表される。また、半導体内の電界を E 、正孔の移動度を μ_h とすると、正孔によるドリフト電流密度は、

$$ep\mu_h E \dots\dots\dots \textcircled{2}$$

と表される。ただし E は、 x 軸の正方向を正にとるものとする。p 型半導体では電子濃度は小さいので電子電流の寄与は無視し、電界 E は半導体内で一定と仮定する。この場合 E は、 ΔV と L を用いて、 $E = -$ (2) と表される。両端子が開放されている場合、①式と②式で表される電流密度の総和は0となることから、

$$\frac{dp}{dx} = -$$
 (3) $p \dots\dots\dots \textcircled{3}$

が得られる。ただしアインシュタインの関係式 $D_h = \frac{k_B T}{e} \mu_h$ と (2) を用いて、(3) を D_h 、 μ_h 、 E を用いずに表した。なお k_B はボルツマン定数を表す。

一方、 p は温度 T の関数でもあるから、 $\frac{dp}{dx} = \frac{dp}{dT} \frac{dT}{dx}$ と表される。 ΔT を十分小さ

いと仮定して $\frac{dT}{dx} \approx -\frac{\Delta T}{L}$ を代入すると、

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{dp}{dT} \frac{\Delta T}{L} \dots\dots\dots ④$$

③式と④式の右辺が等しいとおいた式から、 $\frac{\Delta V}{\Delta T}$ を求めると、

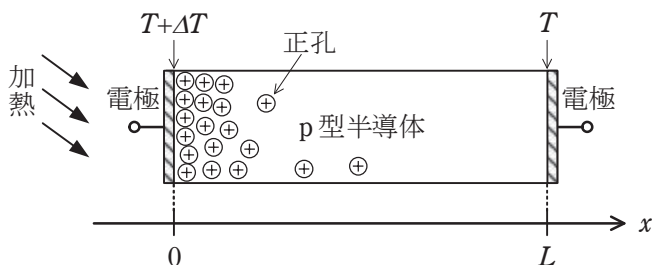
$$\frac{\Delta V}{\Delta T} = \boxed{(4)} \frac{1}{p} \frac{dp}{dT} \dots\dots\dots ⑤$$

正孔濃度 p と温度 T の関係は、次のように与えられる。

$$p = UT^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{eV_F}{k_B T}\right) \dots\dots\dots ⑥$$

ただし、 U 、 V_F は定数と仮定する。⑥式を⑤式に代入すると、

$$\frac{\Delta V}{\Delta T} = \boxed{(5)} + \frac{V_F}{T} \text{ が得られる。}$$



[問6の解答群]

- | | | |
|--|--|--------------------------|
| (イ) $\frac{k_B T}{e} \frac{L}{\Delta V}$ | (ロ) $\frac{2}{3} \frac{e}{k_B}$ | (ハ) $\frac{L}{\Delta V}$ |
| (ニ) $\frac{e}{k_B T}$ | (ホ) $\frac{3}{2} \frac{k_B}{e}$ | (ヘ) ゼーベック |
| (ト) $\frac{e}{k_B T} \frac{\Delta V}{L}$ | (チ) トムソン | (リ) $ek_B T$ |
| (ヌ) $L \cdot \Delta V$ | (ル) ペルチエ | (ヲ) $\frac{\Delta V}{L}$ |
| (リ) $\frac{2}{3} \frac{k_B}{e}$ | (カ) $\frac{k_B T}{e} \frac{\Delta V}{L}$ | (コ) $\frac{k_B T}{e}$ |

問 6 及び問 7 は選択問題であり、問 6 又は問 7 のどちらかを選んで解答すること。
両方解答すると採点されません。

(選択問題)

問 7 次の文章は、演算増幅器を用いた回路に関する記述である。文中の に当てはまる最も適切なものを解答群の中から選べ。ただし、演算増幅器は理想的な特性であるとし、入力電圧の角周波数は ω とする。

まず、図の回路の電圧増幅度 $\frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}}$ を求める。図中の I_1 、 I_2 、 I_3 は入力電圧 V_{in} 、出力電圧 V_{out} 、節点 a の電位 V_a を用いてそれぞれ、

$$I_1 = \frac{V_{\text{in}} - V_a}{R} \dots\dots\dots \text{①}$$

$$I_2 = \frac{V_{\text{out}} - V_a}{\text{①}} \dots\dots\dots \text{②}$$

$$I_3 = \text{②} \times V_{\text{out}} \dots\dots\dots \text{③}$$

と表せる。一方、 I_3 は V_a を用いると、

$$I_3 = \frac{V_a}{R + \frac{1}{j\omega C_2}} \dots\dots\dots \text{④}$$

と表されるから、③式と④式より V_a と V_{out} の関係が得られる。この関係を用いると①式及び②式から V_a が消去できる。 $I_3 = I_1 + I_2$ であることを考慮すると、①式、②

式及び③式より回路の電圧増幅度 $\frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}}$ は、 $j\omega$ を変数として、

$$\frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} = \text{③} \dots\dots\dots \text{⑤}$$

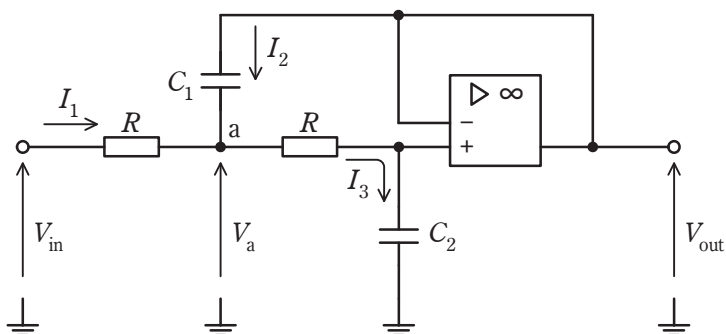
と書ける。

一般に、2 次の低域通過フィルタの $\frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}}$ は、回路のよさ Q と遮断角周波数 ω_c を用いて、

$$\frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} = \frac{\omega_c^2}{(j\omega)^2 + \frac{\omega_c}{Q}(j\omega) + \omega_c^2} \dots\dots\dots \text{⑥}$$

の形で表される。⑤式と⑥式の比較より、図の回路は、 Q と遮断周波数 f_c がそれぞれ $Q = \boxed{(4)}$ と $f_c = \frac{\omega_c}{2\pi} = \frac{1}{2\pi R\sqrt{C_1 C_2}}$ で表される 2 次の低域通過フィルタであることが分かる。

$R=10\text{ k}\Omega$ のとき、図の回路を $Q = \frac{1}{\sqrt{2}}$, $f_c = 1\text{ kHz}$ の低域通過フィルタとするためには、 C_1 は $\boxed{(5)}$ F とすれば良い。



〔問 7 の解答群〕

- | | | |
|--|--|--|
| (イ) $j\omega C_1$ | (ロ) $\frac{1}{j\omega C_1}$ | (ハ) R |
| (ニ) $\frac{1}{R}$ | (ホ) 11.2×10^{-9} | (ヘ) $\frac{1}{2} \sqrt{\frac{C_2}{C_1}}$ |
| (ト) $\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{C_1 C_2}}$ | (チ) $\frac{1}{j\omega C_2}$ | (リ) 22.5×10^{-6} |
| (ヌ) 22.5×10^{-9} | (ル) $\frac{1}{2} \sqrt{\frac{C_1}{C_2}}$ | (レ) $j\omega C_2$ |
| (ヲ) $\frac{1}{(j\omega)^2 + \frac{2}{C_1 R}(j\omega) + \frac{1}{C_1 C_2 R^2}}$ | | |
| (カ) $\frac{1}{C_1 C_2 R^2 (j\omega)^2 + 2C_1 R(j\omega) + 1}$ | | |
| (コ) $\frac{1}{C_1 C_2 R^2 (j\omega)^2 + 2C_2 R(j\omega) + 1}$ | | |