

# 電気工学2第13回

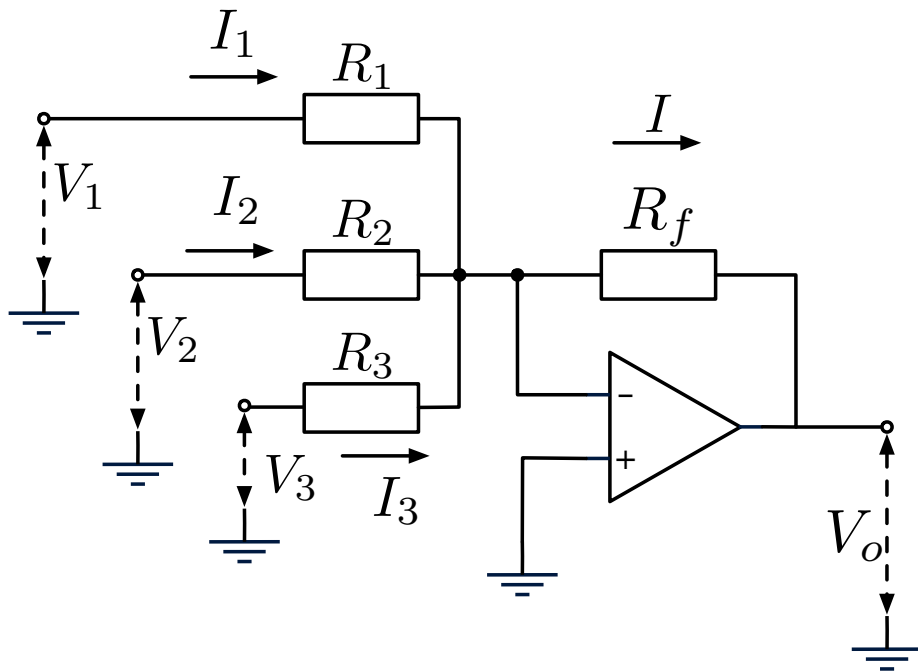
公立小松大学

藤田一寿

# 加算回路

## ■ 加算回路

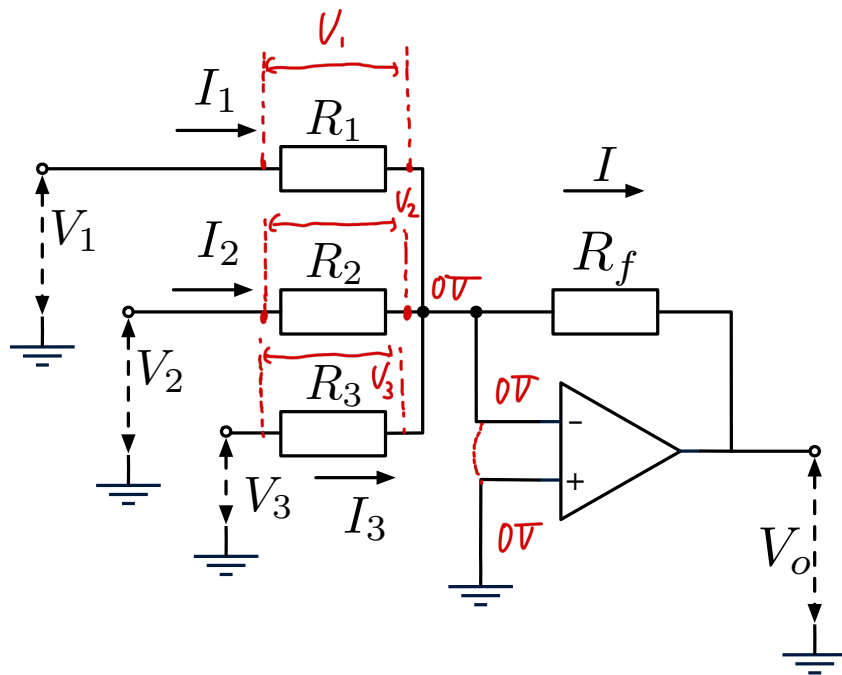
- 複数の入力の電圧を加算する回路
- 反転増幅回路に複数の入力がある回路になっている。



## ■ 加算回路の増幅度

- イマジナリショートを考えると反転入力端子は0Vと見なせるから、入力の各抵抗に流れる電流は

$$I_1 = V_1/R_1, \quad I_2 = V_2/R_2, \quad I_3 = V_3/R_3,$$



## ■ 加算回路の増幅度

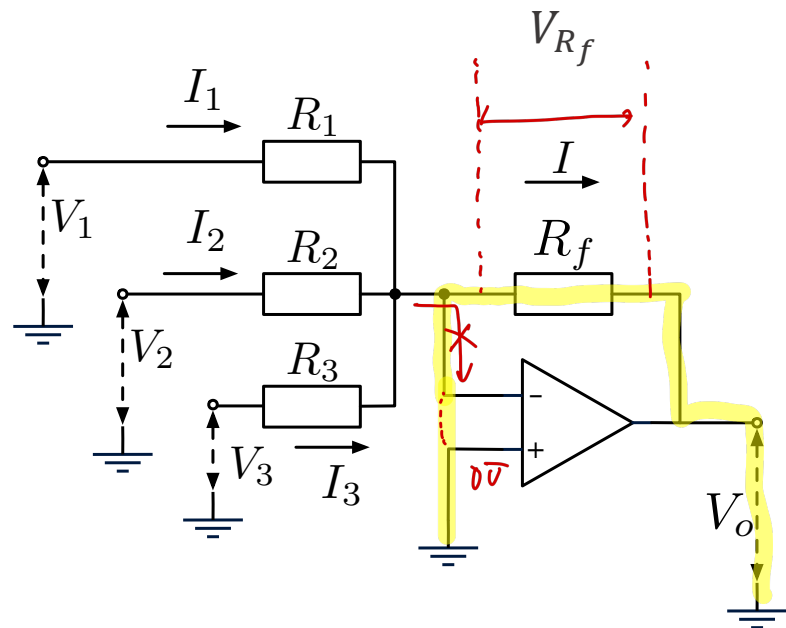
- 理想オペアンプの入力には電流は入っていないので、電流はすべて  $R_f$  に流れる（電流保存則）。

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

- よって出力電圧  $V_o$  は

$$\begin{aligned} V_o &= -R_F I = R_F (I_1 + I_2 + I_3) \\ &= -\left( \frac{R_F}{R_1} V_1 + \frac{R_F}{R_2} V_2 + \frac{R_F}{R_3} V_3 \right) \end{aligned}$$

結果を見ると、それぞれの入力のみで構成された反転増幅回路の出力を足し合わせたもの（重ね合わせたもの）が出力される。



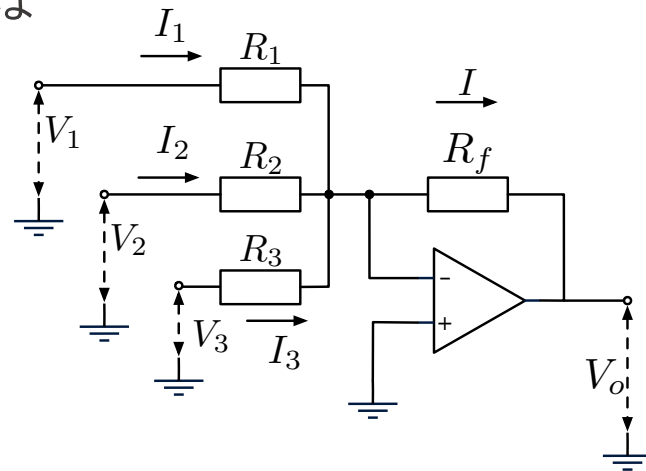
## ■ 加算回路の増幅度

- 加算回路の出力電圧は

$$V_o = -\left(\frac{R_F}{R_1}V_1 + \frac{R_F}{R_2}V_2 + \frac{R_F}{R_3}V_3\right)$$

- となる。これは、それぞれの入力電圧がそれぞれの抵抗によって異なった倍率で増幅され、それが加算されることを意味する。
- もし、 $R_1 = R_2 = R_3 = R$ とすると、出力電圧 $V_o$ は

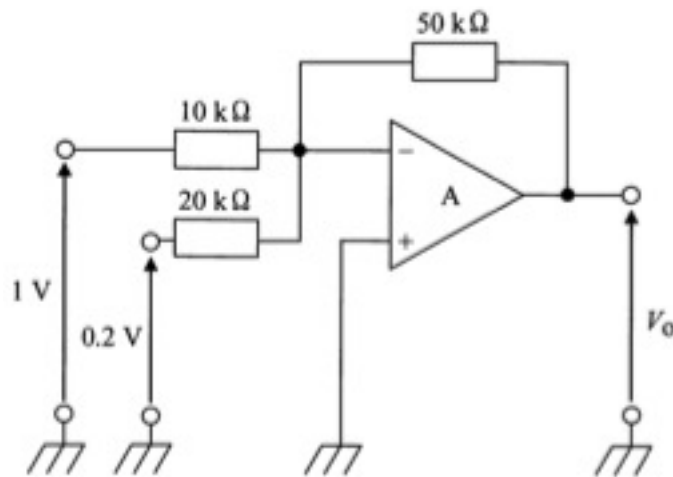
$$V_o = -\frac{R_F}{R}(V_1 + V_2 + V_3)$$



## 問題

- 図の回路の出力電圧 $V_o$ [V]はどれか。ただし、Aは理想演算増幅器とする。(第42回ME2種)

1. -5.5
2. -5.0
3. 0
4. 5.0
5. 5.5



## 問題

- 図の回路の出力電圧 $V_o$ [V]はどれか．ただし，Aは理想演算増幅器とする．（第42回ME2種）

1. -5.5

2. -5.0

3. 0

4. 5.0

5. 5.5

イマジナリショートより，各入力の抵抗に加わる電圧は入力電圧と等しい．よって，それぞれの入力の抵抗を流れる電流は

$$I_1 = 1/10k$$

$$I_2 = 0.2/20k$$

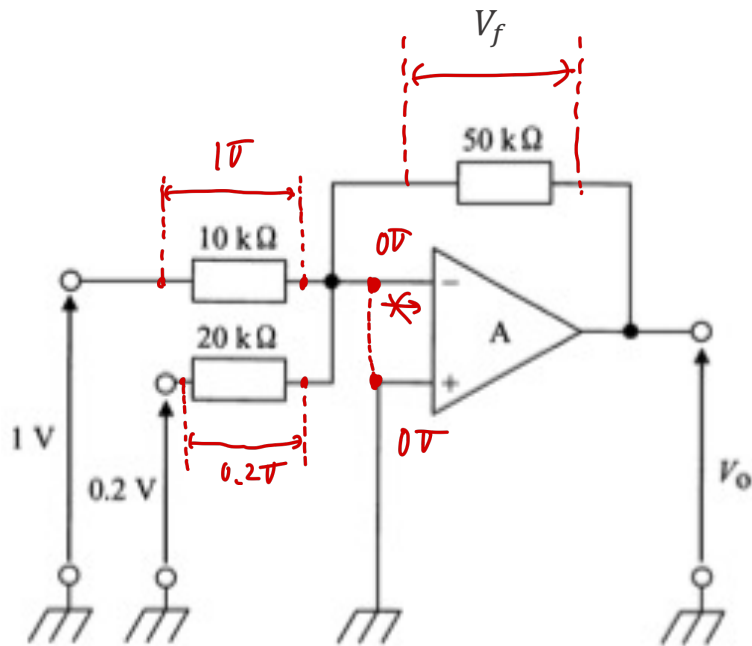
となる．オペアンプの入力インピーダンスは無限大なので，入力の抵抗を流れる電流の全てが $50k\Omega$ の抵抗に流れる．よって， $50k\Omega$ の抵抗を流れる電流は

$$I = I_1 + I_2 = \frac{1}{10k} + \frac{0.2}{20k} = \frac{2.2}{20k} = \frac{1.1}{10k}$$

よって， $50k\Omega$ の抵抗にかかる電圧は

$$V_f = 50kI = 50k \times \frac{1.1}{10k} = 5.5$$

である．出力電圧は $-V_f$ なので出力は $V_o = -5.5V$ である．





# 問題

- 図の回路の出力電圧 $V_o$ [V]はどれか。ただし、Aは理想演算増幅器とする。(第42回ME2種)

1. -5.5

2. -5.0

3. 0

4. 5.0

5. 5.5

別解：

入力側の抵抗を一つずつ考える。

$10\text{k}\Omega$ の抵抗のみがある場合を考える。

抵抗に流れる電流は、イマジナリショートから

$$I_1 = \frac{1}{10k} A$$

入力端子はインピーダンスが無大なので、これが $50\text{k}\Omega$ にも流れる。よって出力電圧は

$$v_{o1} = -5V$$

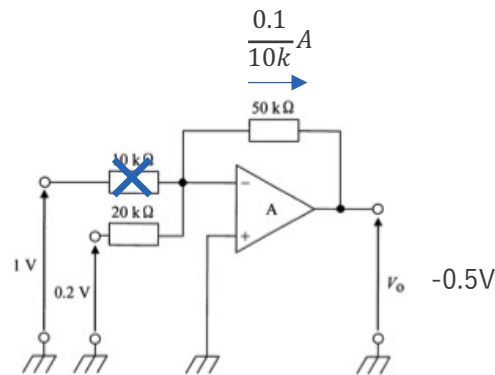
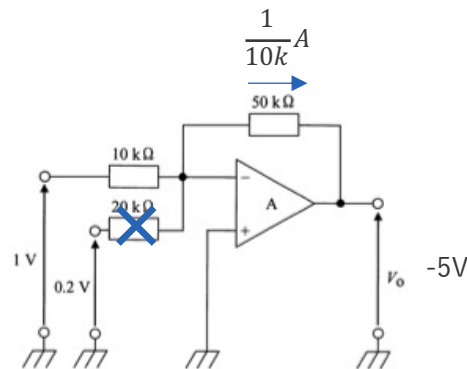
$20\text{k}\Omega$ の抵抗のみがある場合を考える。

先程と同様に計算すると出力電圧は

$$v_{o2} = -\frac{0.2}{20k} \times 50k = -0.5V$$

よって、出力電圧は

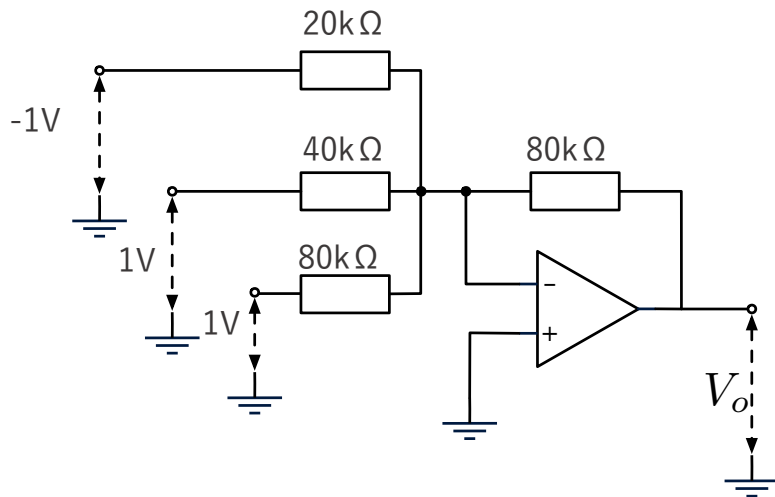
$$v_o = v_{o1} + v_{o2} = -5.5V$$



## 問題解説

- 図の回路の出力電圧 $V_o$ [V]はいくらか。(第37回ME2種)

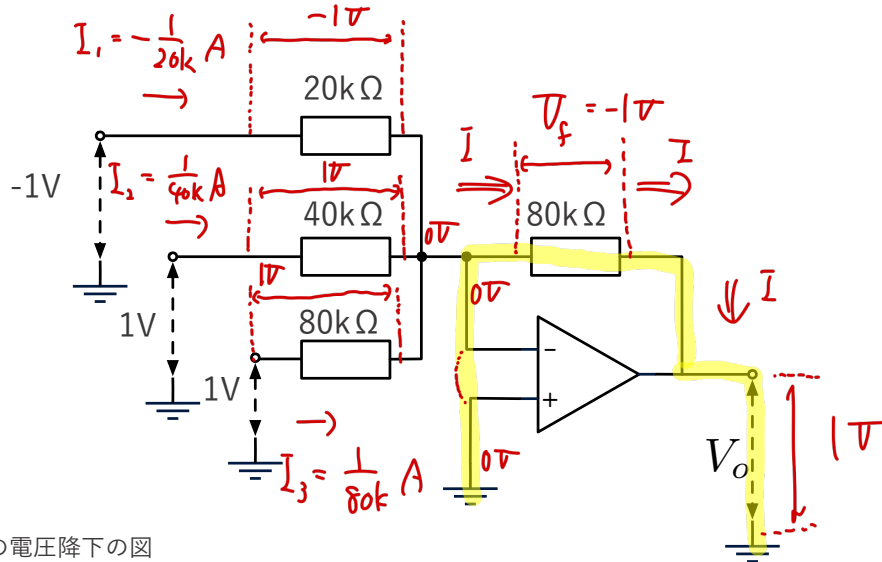
1. -4
2. -1
3. 1
4. 2
5. 4



# 問題解説

• 図の回路の出力電圧 $V_o$ [V]はいくらか。(第37回ME2種)

1. -4
2. -1
3. 1
4. 2
5. 4



黄色の回路の電圧降下の図



黄色の回路を時計回りに考えると、入力端子は0V、80kΩの抵抗で-1V下がる、最後に0Vにならないといけないので出力電圧は1Vである。  
また電流は反時計回りに回っているので、出力電圧を電池と見なすと上向きを+にしなければならない(つまり正である)。

イマジナリショートから、反転入力端子の電圧は非反転入力端子と同じなと見なせるので0Vである。つまり入力につながる各抵抗にかかる電圧は、それぞれがつながっている入力電源の電圧そのものである。

よって、20kΩ、40kΩ、80kΩの抵抗を流れる電流はオームの法則から、それぞれ  $I_1 = -\frac{1}{20k}A$ ,  $I_2 = \frac{1}{40k}A$ ,  $I_3 = \frac{1}{80k}A$  である。

オペアンプの入力インピーダンスは無限大なので、電流  $I_1, I_2, I_3$  は80kΩの電流に流れる。よって、80kΩの抵抗に流れる電流  $I$  は、 $I = I_1 + I_2 + I_3$  にかかる電圧は、

$$V_f = 80kI = 80k \times \left( -\frac{1}{20k} + \frac{1}{40k} + \frac{1}{80k} \right) = -4 + 2 + 1 = -1V$$

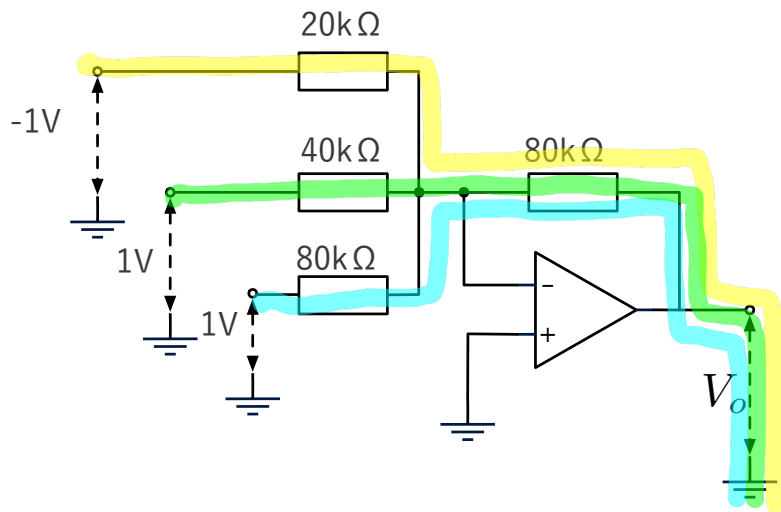
出力電圧 $V_o$ は80kΩにかかる電圧に-1かければよいから、

$$V_o = 1$$

## 問題解説

- 図の回路の出力電圧 $V_o$ [V]はいくらか。(第37回ME2種)

1. -4
2. -1
3. 1
4. 2
5. 4



別解

加算回路は重ね合わせで考えることができる。

$20k\Omega$ の入力のみにと考えると、出力は $4V$ である(黄色の回路)。

$40k\Omega$ の入力のみにと考えると、出力は $-2V$ である(緑色の回路)。

$80k\Omega$ の入力のみにと考えると、出力は $-1V$ である(水色の回路)。

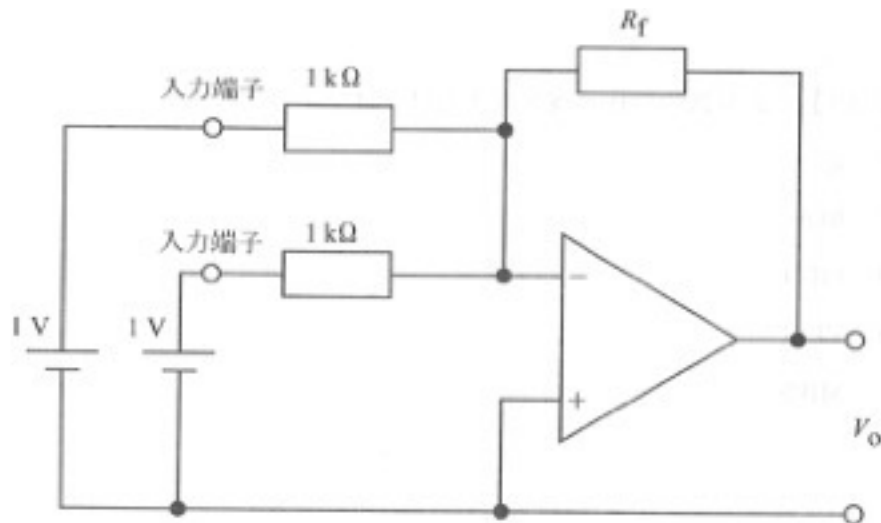
よって出力は

$$V_o = 4 - 2 - 1 = 1V$$

## 問題

- 図の電子回路の入力端子にそれぞれ1Vを印加した。出力電圧 $V_o$ が $-10V$ であった。抵抗 $R_f$ の値は何 $k\Omega$ か。

- 1
- 5
- 10
- 15
- 20



## 問題

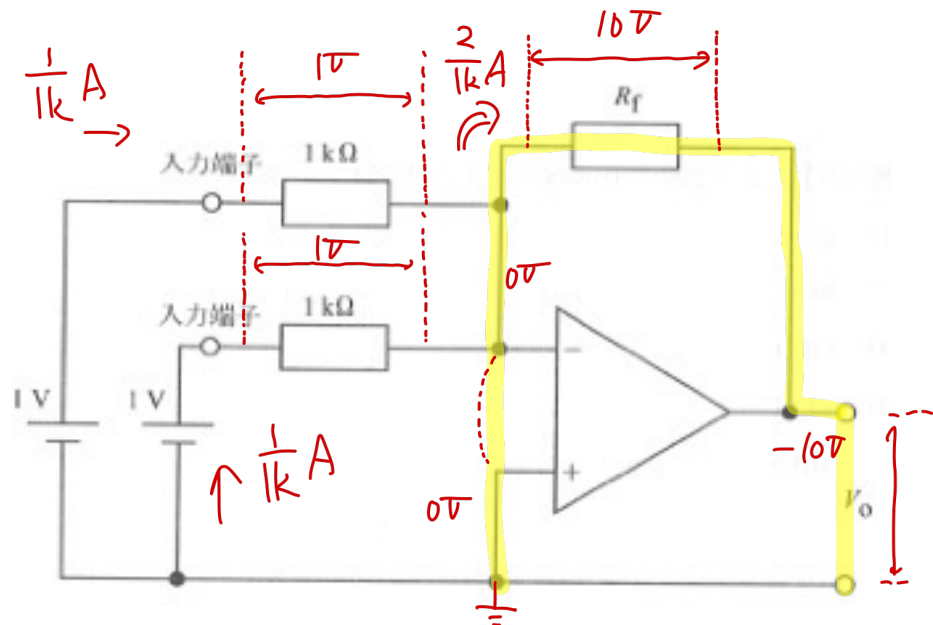
- 図の電子回路の入力端子にそれぞれ1Vを印加した。出力電圧 $V_o$ が $-10V$ であった。抵抗 $R_f$ の値は何 $k\Omega$ か。

- 1 イマジナリショートから、入力端子につながる $1k\Omega$ の抵抗にかかる電圧は
  2. 5 1Vである。抵抗に流れる電流はオームの法則から $\frac{1}{1k}A$ である。
  3. 10 入力インピーダンスは無限大なので、
  4. 15  $1k\Omega$ に流れる電流は全て $R_f$ に流れる。
  5. 20 よって、 $R_f$ に流れる電流は $\frac{2}{1k}A$ である。
- よって出力電圧は $R_f$ にかかる電圧 $V_f$ に $-1$ かければよいから

$$-V_f = -R_f \times \frac{2}{1k} = -10$$

となるので

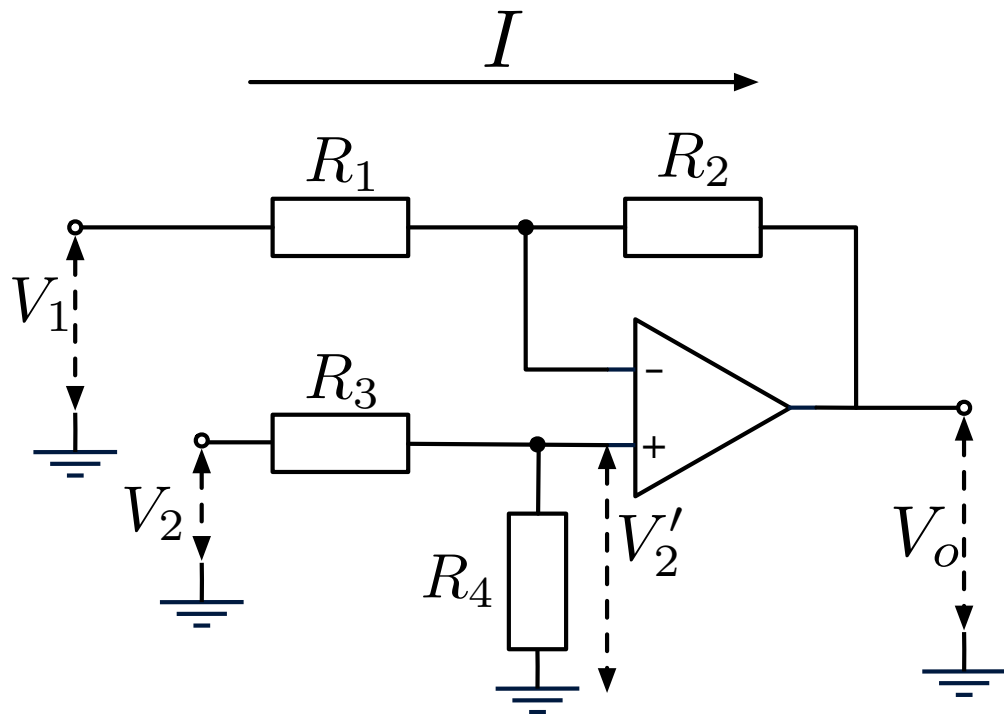
$$R_f = 5k$$



# 減算回路

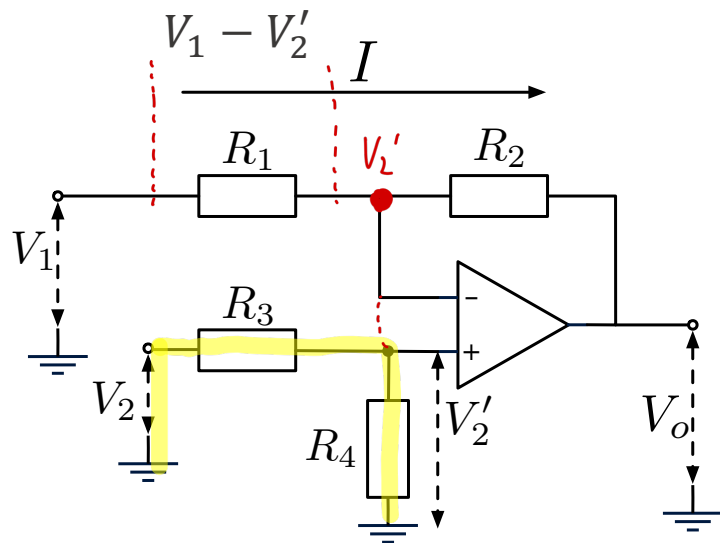
## ■ 減算回路

- 減算回路は2つの入力電圧の差に比例した電圧を出力する.





- 非反転入力端子の電圧 $V'_2$ は， $R_4$ に加わる電圧なので
- $V'_2 = \frac{R_4}{R_3+R_4} V_2$
- イマジナリーショートを考慮すると，非反転入力端子の電圧と反転入力端子の電圧は等しい． よって， $R_1$ にかかる電圧 $V'_1$ は
- $V'_1 = V_1 - V'_2$
- したがって， $R_1$ に流れる電流 $I$ は，
- $I = \frac{V_1 - V'_2}{R_1}$



# 減算回路の出力

これらの計算はおまけ、読み飛ばして良い

- 入力インピーダンスは無限大なので、 $R_2$ に流れる電流は $I$ である。
- よって出力電圧 $V_o$ は黄色の回路を考えれば、

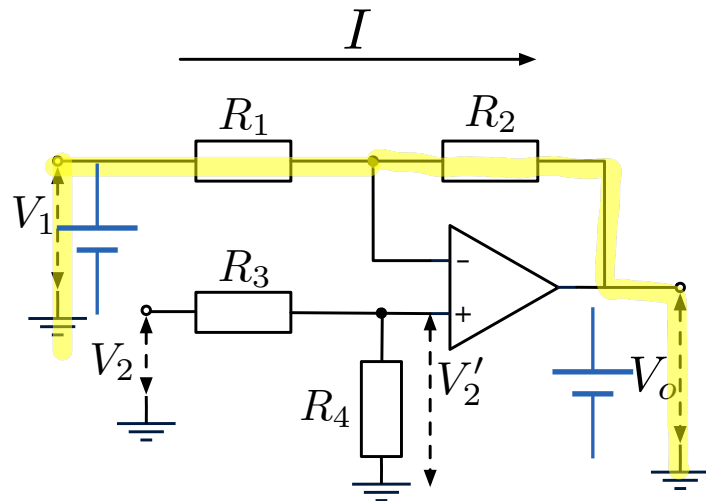
キルヒホッフの第2法則：電圧降下の総和は電源電圧の総和に等しい。

$$\bullet V_1 - V_o = IR_1 + IR_2 = \frac{V_1 - V_2'}{R_1} (R_1 + R_2) = \frac{R_1 + R_2}{R_1} (V_1 - V_2')$$

$$\bullet V_o = -\frac{R_1 + R_2}{R_1} (V_1 - V_2') + V_1 = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \left( -\frac{R_2}{R_1 + R_2} V_1 + V_2' \right)$$

$$\bullet \text{さらに、} V_2' = \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_2 \text{を代入すると}$$

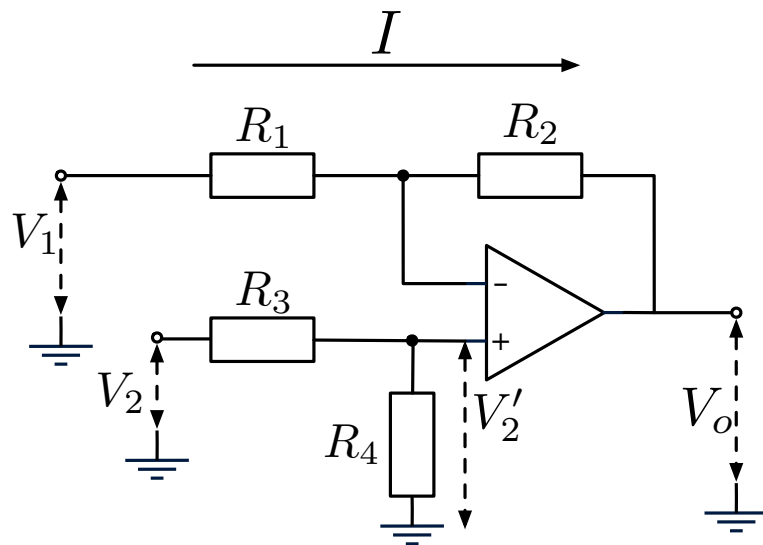
$$\bullet V_o = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \left( \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_2 - \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_1 \right)$$



- また、 $R_2/R_1 = R_4/R_3$  とすると、

$$\begin{aligned} V_o &= \frac{R_1 + R_2}{R_1} \left( \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_2 - \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_1 \right) \\ &= (1 + R_2/R_1) \left( \frac{R_4/R_3}{1 + R_4/R_3} V_2 - \frac{R_2/R_1}{1 + R_2/R_1} V_1 \right) \\ &= (1 + R_2/R_1) \left( \frac{R_2/R_1}{1 + R_2/R_1} V_2 - \frac{R_2/R_1}{1 + R_2/R_1} V_1 \right) \\ &= \frac{R_2}{R_1} (V_2 - V_1) \end{aligned}$$

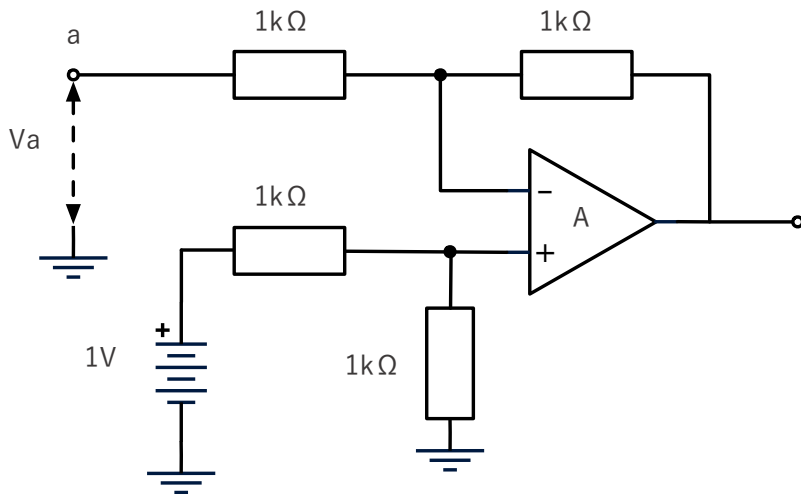
- となり、 $V_1$  と  $V_2$  の差が求められる。



## 問題解説

- 図の回路の入力端子aが開放状態であるとき $V_a$ は何Vか。ただし、Aは理想演算増幅器である。(第40回ME2種)

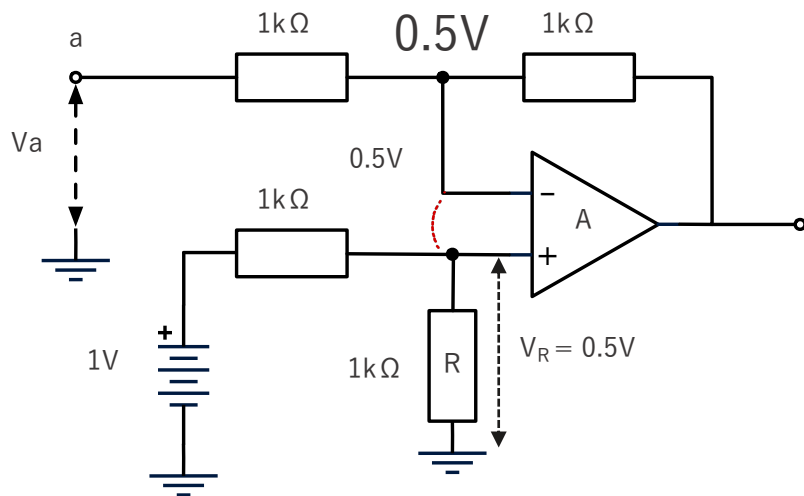
- 0
- 0.5
- 1
- 2
- 5



## 問題解説

- 図の回路の入力端子aが開放状態であるとき $V_a$ は何Vか。ただし、Aは理想演算増幅器である。(第40回ME2種)

- 0
- 0.5**
- 1
- 2
- 5



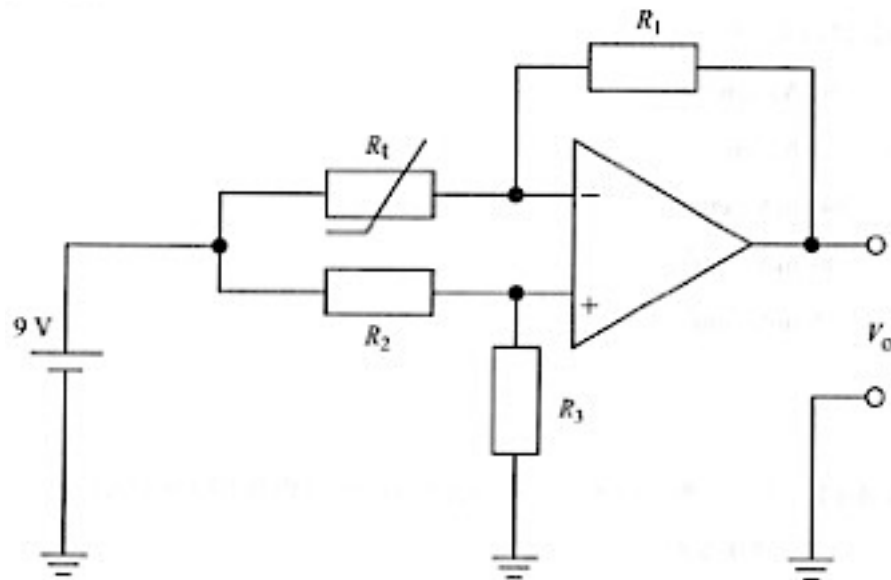
イマジナリショートを適用すると、非反転入力端子につながる抵抗 $R$ に加わる電圧 $V_R$ と反転入力端子の電圧は等しいと見なせる。また、 $V_R$ は1Vが2つの $1k\Omega$ の抵抗で分圧であるので、 $0.5V$ である。

$V_a$ は、 $1k\Omega$ の抵抗とaとGND間の抵抗で分圧すれば求まる。aとGNDの間は開放な抵抗値は無限大である。よって、aとGND間にすべての電圧が加わるので $V_a$ は $0.5V$ である。

## 問題

- 図のオペアンプ回路で、 $R_t$ はサーミスタである．抵抗 $R_1$ から $R_3$ はすべて $10\text{k}\Omega$ である． $R_t$ が $10\text{k}\Omega$ のとき出力 $V_o$ はゼロであった．温度が上昇し $R_t$ が $9\text{k}\Omega$ に変化したとすると，出力電圧 $V_o$ は何Vになるか．ただし，オペアンプは理想的とする．（第34回ME2種）

1. 10
2. 4.5
3.  $-0.5$
4.  $-4.5$
5.  $-10$



# 問題

- 図のオペアンプ回路で、 $R_t$ はサーミスタである。抵抗 $R_1$ から $R_3$ はすべて $10k\Omega$ である。 $R_t$ が $10k\Omega$ のとき出力 $V_o$ はゼロであった。温度が上昇し $R_t$ が $9k\Omega$ に変化したとすると、出力電圧 $V_o$ は何Vになるか。ただし、オペアンプは理想的とする。(第34回ME2種)

1. 10

$R_t = 10k\Omega$ の時 $V_o = 0$ か確認する。

2. 4.5

イマジナリショートから $R_3$ にかかる電圧が反転入力端子にかかることになる。 $R_3$ にかかる電圧

3. -0.5

は $V_{R_3} = \frac{R_3}{R_2 + R_3} \times 9 = \frac{10k}{10k + 10k} \times 9 = \frac{9}{2}V$

4. -4.5

よって $R_t$ にかかる電圧は

5. -10

$$9 - \frac{9}{2} = \frac{9}{2}V$$

$R_t$ を流れる電流 $I$ は

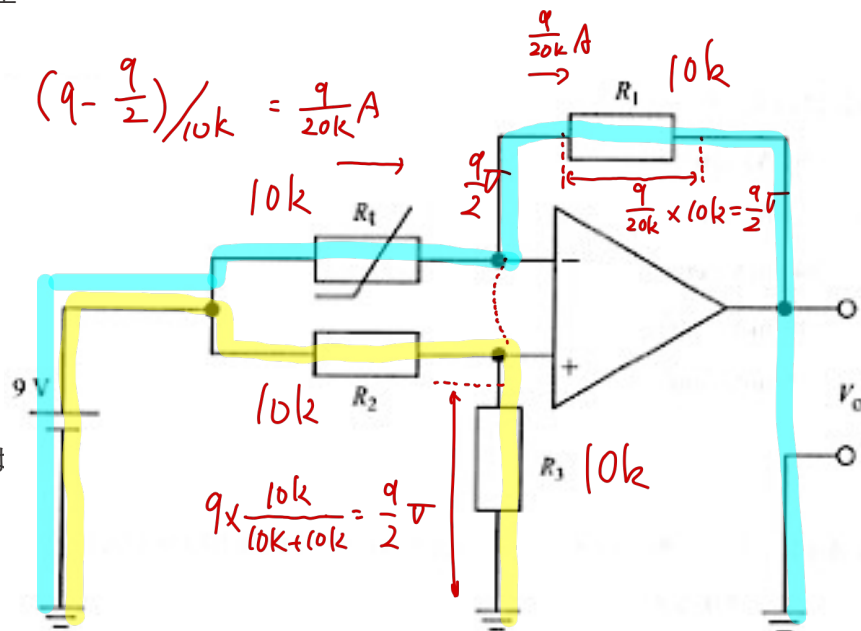
$$I = \frac{9}{2 \times 10k} A$$

$R_1$ にも同じ電流が流れるので $R_1$ に掛かる電圧は

$$\frac{9}{2 \times 10k} \times 10k = \frac{9}{2}V$$

水色の回路の電圧降下を考えると出力電圧 $V_o$ は

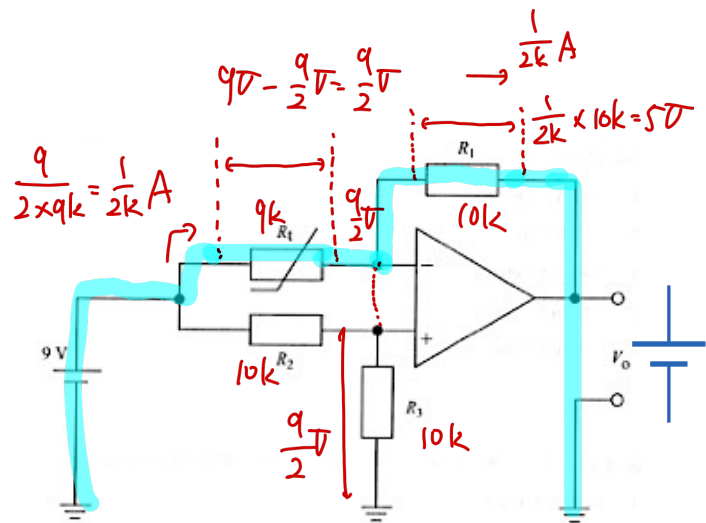
$$9 - V_o = \frac{9}{2} + \frac{9}{2}$$
$$V_o = 0$$



## 問題

- 図のオペアンプ回路で、 $R_t$ はサーミスタである。抵抗 $R_1$ から $R_3$ はすべて $10\text{k}\Omega$ である。 $R_t$ が $10\text{k}\Omega$ のとき出力 $V_o$ はゼロであった。温度が上昇し $R_t$ が $9\text{k}\Omega$ に変化したとすると、出力電圧 $V_o$ は何Vになるか。ただし、オペアンプは理想的とする。(第34回ME2種)

- 10
  - 4.5
  - 0.5**
  - 4.5
  - 10
- $R_3$ にかかる電圧は $9/2=4.5\text{V}$ である。  
イマジナリショートから抵抗 $R_t$ にかかる電圧は、 $9 - 4.5 = 4.5\text{V}$ である。  
よって抵抗 $R_t$ を流れる電流は
- $$I_{R_t} = \frac{4.5}{9\text{k}} \text{ A}$$
- である。この電流が抵抗 $R_1$ に流れるので、抵抗 $R_1$ にかかる電圧 $V_{R_1}$ は
- $$V_{R_1} = \frac{4.5}{9\text{k}} \times 10\text{k} = 5\text{V}$$
- である。水色の回路の電圧降下を考えると
- $$9 - V_o = 4.5 + 5$$
- $$V_o = 9 - 9.5 = -0.5\text{V}$$

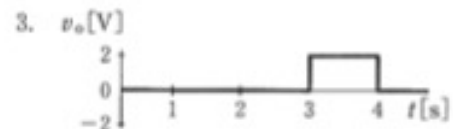
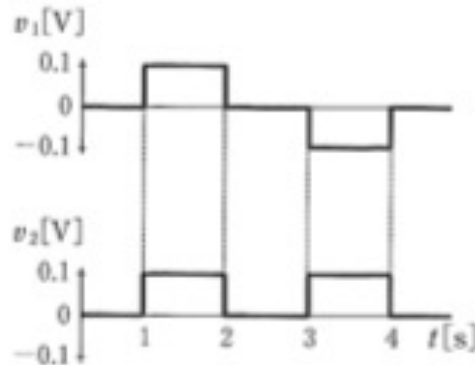
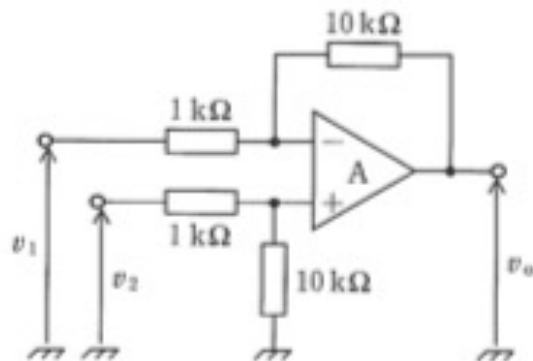


キルヒホッフの第2法則：電圧降下の総和は電源電圧の総和に等しい。



## 問題

- 図1の回路において図2に示す電圧 $v_1$ と $v_2$ を入力した場合，出力電圧 $v_o$ の波形で正しいのはどれか．ただし，Aは理想演算増幅器である．（国家試験26）



# 問題

- 図1の回路において図2に示す電圧 $v_1$ と $v_2$ を入力した場合，出力電圧 $v_o$ の波形で正しいのはどれか．ただし，Aは理想演算増幅器である．（国家試験26）

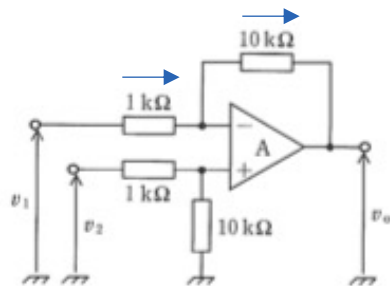


図1

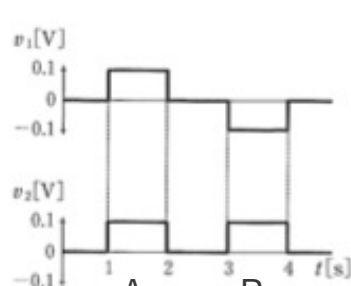
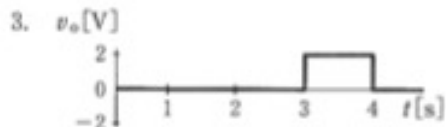


図2



Aのとき

非反転入力にかかる電圧は

$$V_+ = v_2 \times \frac{10k}{11k}$$

反転入力の1kΩの抵抗を流れる電流は

$$I = \left( v_1 - v_2 \times \frac{10}{11} \right) / 1k$$

$v_1 = v_2$  なら

$$I = v_1 \frac{1}{11} / 1k$$

反転入力の10kΩの抵抗にかかる電圧は

$$V = v_1 \frac{1}{11} \frac{1}{1k} \times 10k = v_1 \frac{10}{11}$$

よって $v_o$ は

$$v_o = v_1 - \frac{1}{11} v_1 - \frac{10}{11} v_1 = 0$$

# 問題

- 図1の回路において図2に示す電圧 $v_1$ と $v_2$ を入力した場合，出力電圧 $v_o$ の波形で正しいのはどれか．ただし，Aは理想演算増幅器である．（国家試験26）

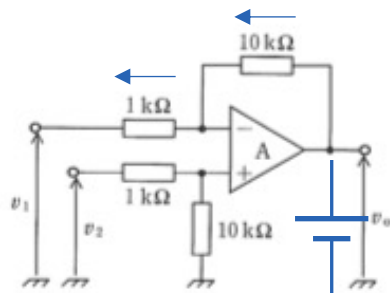


図1

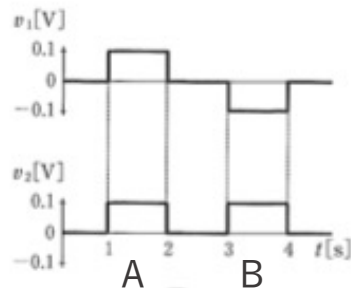


図2

Bのとき

非反転入力にかかる電圧は

$$V_+ = v_2 \times \frac{10k}{11k}$$

反転入力の1kΩの抵抗を流れる電流は

$$I = \left( v_1 - v_2 \times \frac{10}{11} \right) / 1k$$

$$v_1 = -v_2 \text{ なら}$$

$$I = v_1 \frac{21}{11} / 1k$$

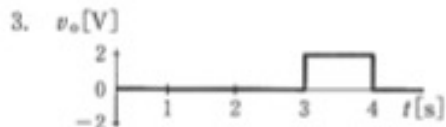
反転入力の10kΩの抵抗にかかる電圧は

$$V = v_1 \frac{21}{11} \frac{1}{1k} \times 10k = v_1 \frac{210}{11}$$

よって $v_o$ は

$$\begin{aligned} v_o &= v_1 - v_1 \frac{21}{11} + v_1 \frac{210}{11} \\ &= -v_1 \frac{10}{11} + v_1 \frac{210}{11} = \frac{220}{11} v_1 = 20v_1 \end{aligned}$$

よってA区間では $v_o = 0$ ，B区間では $v_o = 2.0V$ なので3が答え．

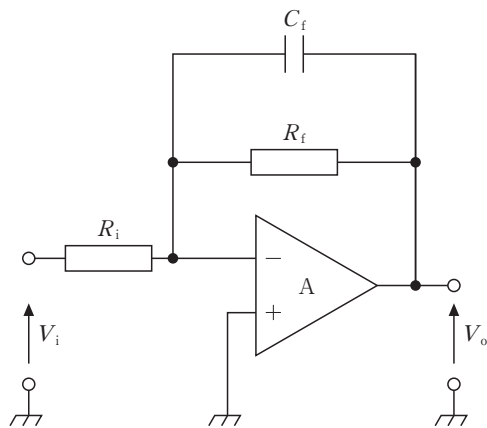


# アクティブフィルタ

余裕がない人は、カットオフ  
周波数は  $f_c = \frac{1}{2\pi CR}$  と覚える.

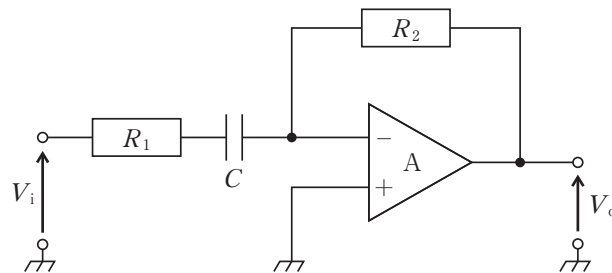
# ■ アクティブフィルタとは

- オペアンプのような能動素子を用いたフィルタ



ローパスフィルタ

カットオフ周波数  $\frac{1}{2\pi R_f C_f}$

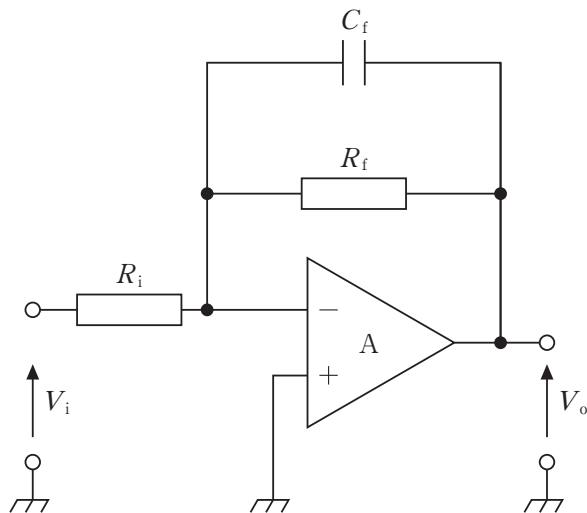


ハイパスフィルタ

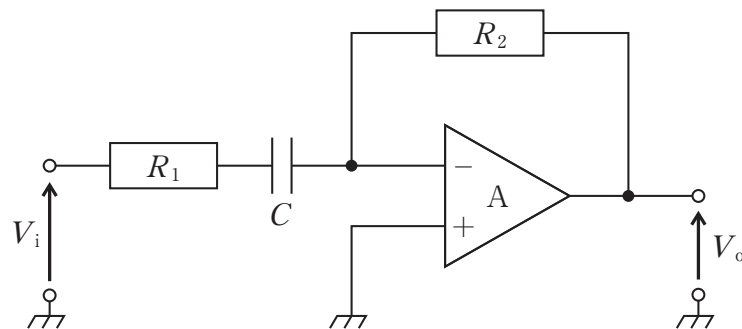
カットオフ周波数  $\frac{1}{2\pi R_1 C}$

## ■ 反転増幅回路を元にしたアクティブフィルタ

- 図は反転増幅回路を元にしたアクティブフィルタである。
- このフィルタの周波数特性も、反転増幅回路と同様に、イマジナリショートを使い求められる。



ローパスフィルタ

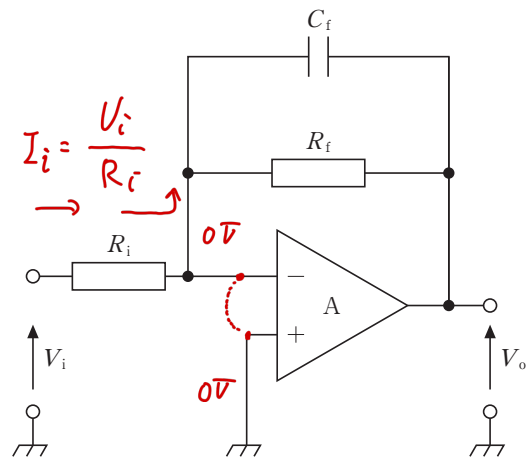


ハイパスフィルタ

ローパスフィルタ

## ローパスフィルタ

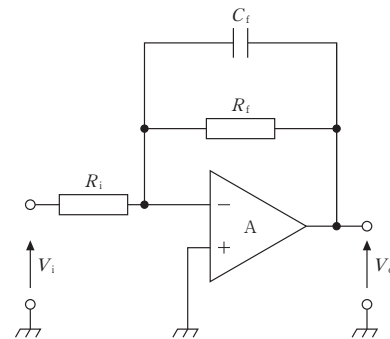
- イマジナリショートより，入力端子はそれぞれ短絡しているとみなせる． よって抵抗 $R_i$ にかかる電圧は $V_{R_i} = V_i$ である．
- つまり $R_i$ に流れる電流 $I_i$ は  $I_i = \frac{V_i}{R}$ である．
- 入力端子のインピーダンスは無限大とみなせるので，  $R_i$ に流れる電流  $I_i$  はすべて $R_f$ と $C_f$ からなる並列回路に流れる．
- また，この並列回路のインピーダンス $Z$ は
- $\frac{1}{Z} = \frac{1}{R_f} + j\omega C_f, Z = \frac{R_f}{1+j\omega R_f C_f}$
- この回路は反転増幅回路なので $V_o$ は
- $V_o = -Zi = -\frac{R_f}{R_i(1+j\omega R_f C_f)} V_i$





## ローパスフィルタ

- ローパスフィルタの出力 $V_o$ は
- $$V_o = -Z_i = -\frac{R_f}{R_i(1+j\omega R_f C_f)} V_i$$
- $$\frac{|V_o|}{|V_i|} = \left| \frac{R_f}{R_i(1+j\omega R_f C_f)} \right| = \frac{R_f}{R_i \sqrt{1+(\omega R_f C_f)^2}} = \frac{R_f}{R_i} \frac{1}{\sqrt{1+(\omega R_f C_f)^2}}$$
- この結果から、このフィルタはローパスフィルタである事がわかる。
- 入力が十分低い周波数の場合、 $\frac{1}{\sqrt{1+(\omega R_f C_f)^2}}$  がほぼ1となるので、反転増幅回路と同じと考えることができる。



# ■ カットオフ周波数

- $\frac{|V_o|}{|V_i|} = \frac{R_f}{R_i} \frac{1}{\sqrt{1+(\omega R_f C_f)^2}}$

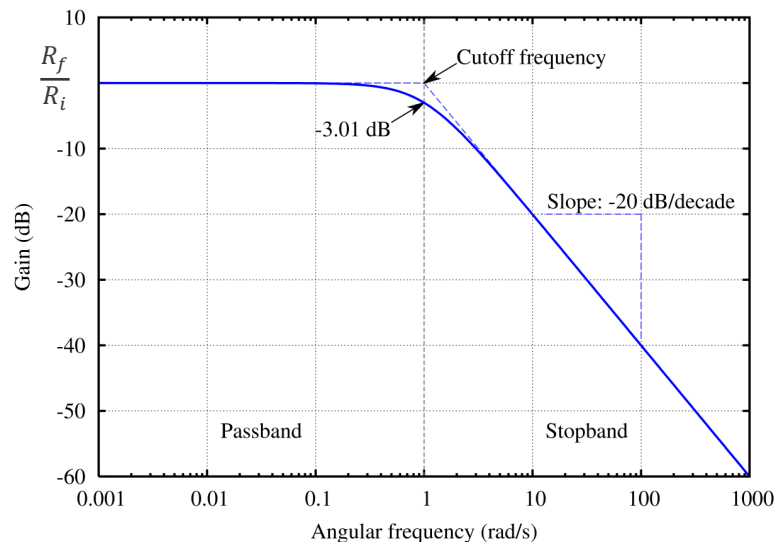
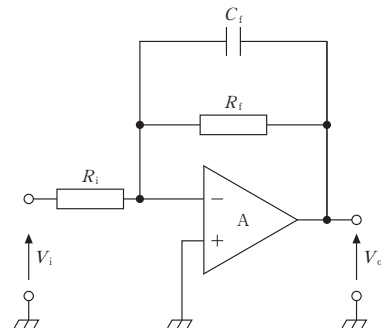
- アクティブフィルタのカットオフ周波数は

$$\frac{1}{\sqrt{1+(\omega R_f C_f)^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

となる周波数である。

- よって、カットオフ周波数 $f_c$ は

- $f_c = \frac{1}{2\pi C_f R_f}$



ハイパスフィルタ

## ■ 反転増幅回路を元にしたハイパスフィルタ

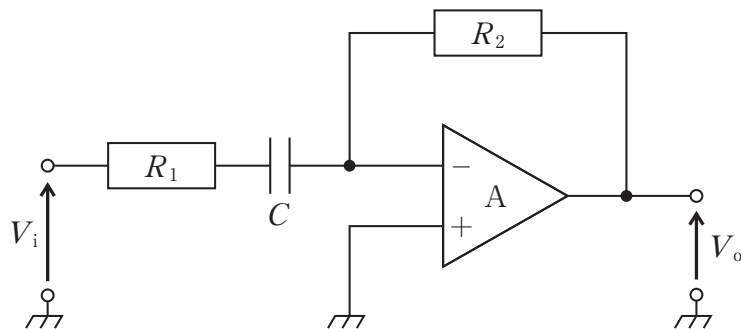
- イマジナリショートより，入力端子はそれぞれ短絡しているとみなせる．
- よって抵抗 $R_1$ とコンデンサ $C$ にかかる電圧は $V_i$ である．
- つまり抵抗 $R_1$ とコンデンサ $C$ に流れる電流

$$i = \frac{V_i}{R_1 + 1/j\omega C}$$

- 入力端子のインピーダンスは無限大とみなせるので， $R_2$ に流れる電流は $i$ である．

- よって， $V_o$ は

$$V_o = -\frac{R_2}{R_1 + 1/j\omega C} V_i$$



# ■ ハイパスフィルタ

- ハイパスフィルタの出力 $V_o$ は

$$V_o = -\frac{R_2}{R_1 + \frac{1}{j\omega C}} V_i = -\frac{j\omega CR_2}{1 + j\omega CR_1} V_i$$

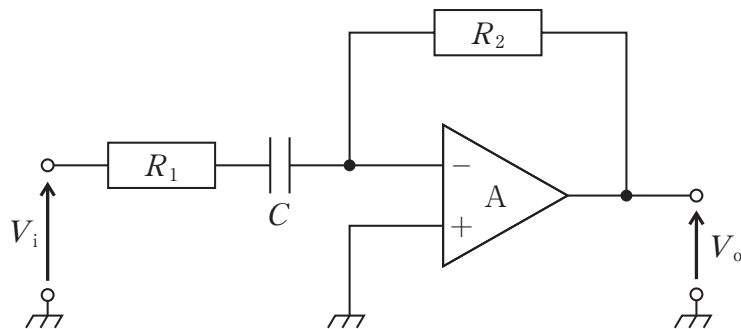
- よって増幅度は

$$g = \frac{|V_o|}{|V_i|} = \left| \frac{j\omega CR_2}{1 + j\omega CR_1} \right| = \frac{\omega CR_2}{\sqrt{1 + \omega^2 C^2 R_1^2}}$$

- 分母分子を $\omega$ で割ると

$$g = \frac{CR_2}{\sqrt{\frac{1}{\omega^2} + C^2 R_1^2}}$$

- $\omega$ が大きくなればなるほど分母が小さくなるので、この回路はハイパスフィルタであることがわかる。
- 入力の周波数が十分高い場合、 $\frac{1}{\omega^2}$ がほぼ0となるので、ゲイン $g$ は $R_2/R_1$ とみなせる。つまり、反転増幅回路とみなせる。



## ■ ハイパスフィルタのカットオフ周波数

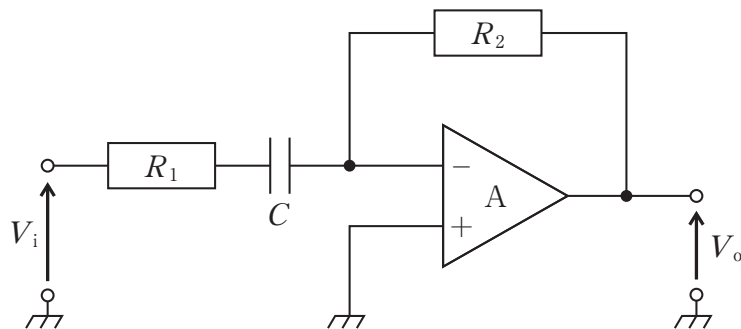
- カットオフ周波数は

- $\frac{CR_2}{\sqrt{\frac{1}{\omega^2} + C^2 R_1^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}$

- $2C^2 R_2^2 = \frac{1}{\omega^2} + C^2 R_1^2$

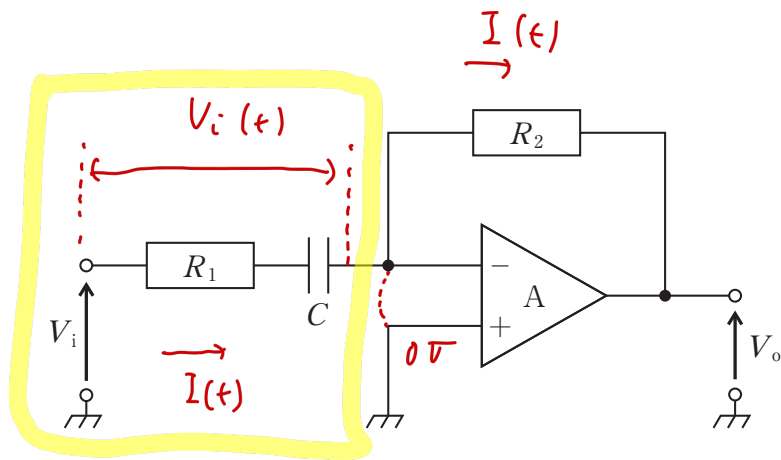
- $\omega^2 = \frac{1}{C^2 R_1^2}$

- $\omega = \frac{1}{CR_1}, f = \frac{1}{2\pi CR_1}$



## ■ ハイパスフィルタの時定数

- 反転増幅回路なので、抵抗 $R_1$ とコンデンサ $C$ を流れる電流に $R_2$ をかけたものが出力となるので、その電流の時間変化がそのまま出力の時間変化に現れる。
- つまり、抵抗 $R_1$ とコンデンサ $C$ の直列回路を流れる電流がわかれば良い。
- RC直列回路の時定数は $CR_1$ なので、このアクティブフィルタの時定数 $CR_1$ である。

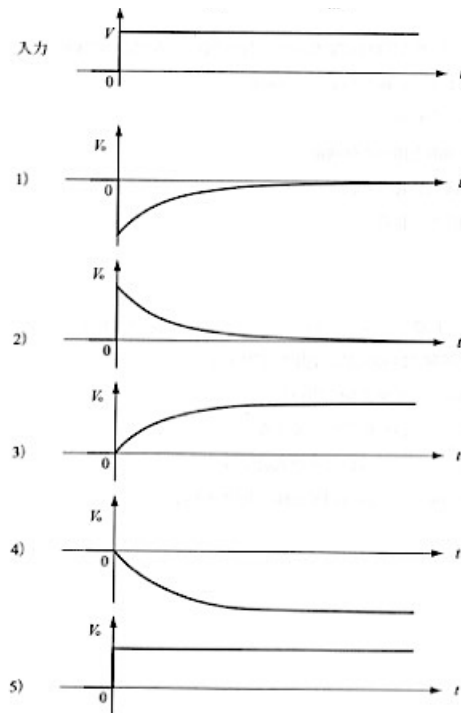
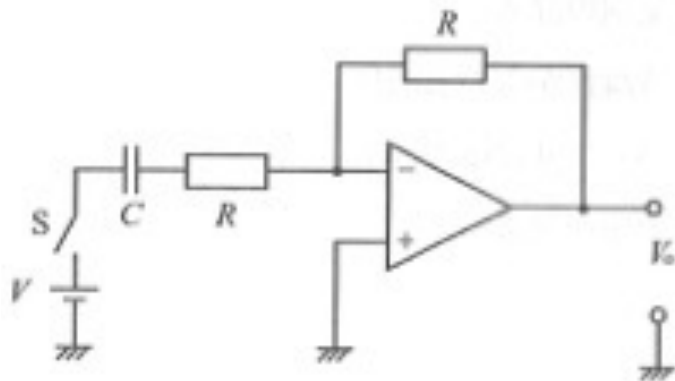


問題



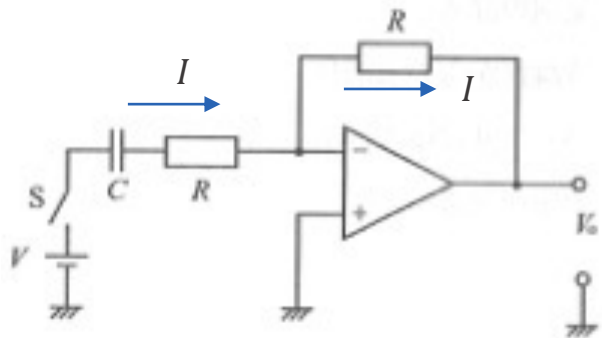
## 問題

- 図のように反転増幅器にステップ電圧を入力した ( $t = 0$ でスイッチを入れる)。出力電圧 $V_o$ はどれか。ただしコンデンサ $C$ の電荷の初期値は0とする。(第32回ME2種)



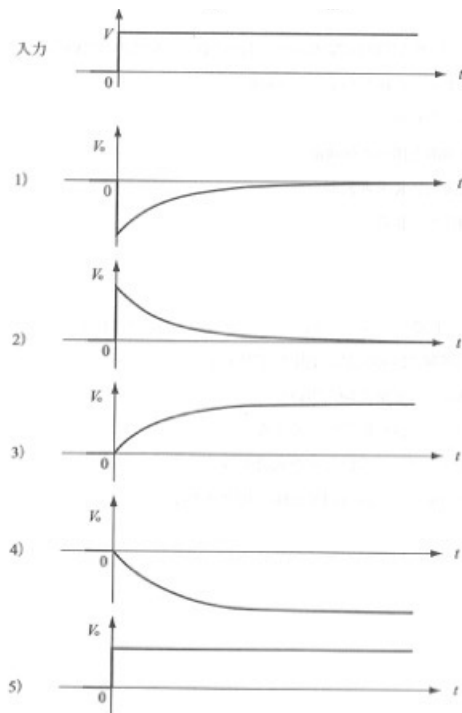
## 問題

- 図のように反転増幅器にステップ電圧を入力した ( $t = 0$ でスイッチを入れる)。出力電圧 $V_o$ はどれか。ただしコンデンサ $C$ の電荷の初期値は0とする。(第32回ME2種)



スイッチがオンになった瞬間からコンデンサに電荷がたまり始めるため、電流 $I$ が流れる。十分時間がたつと、コンデンサに十分電荷がたまり電流 $I$ が流れなくなる。この電流 $I$ とフィードバックの抵抗 $R$ の積 $-IR$ が出力電圧 $V_o$ となる。よって答えは1となる。

電流の変化と合致する選択肢は、1か2である。この回路は反転増幅回路なので入力と出力の符号は逆である。出力が負となっている選択肢は、1か4である。2つの条件を満たすのは1である。



## 問題

- 図の回路の入力インピーダンスはどれか．ただし， $A$ は理想演算増幅器とし，角周波数を $\omega$ ，虚数単位を $j$ とする．（33回）

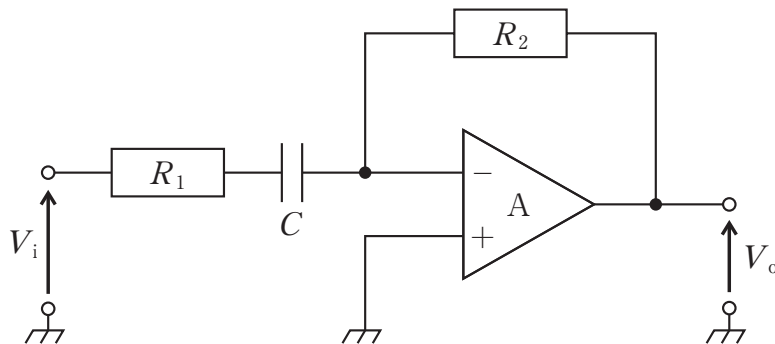
1.  $R_1$

2.  $R_1 + R_2$

3.  $\frac{1}{j\omega C}$

4.  $R_1 + \frac{1}{j\omega C}$

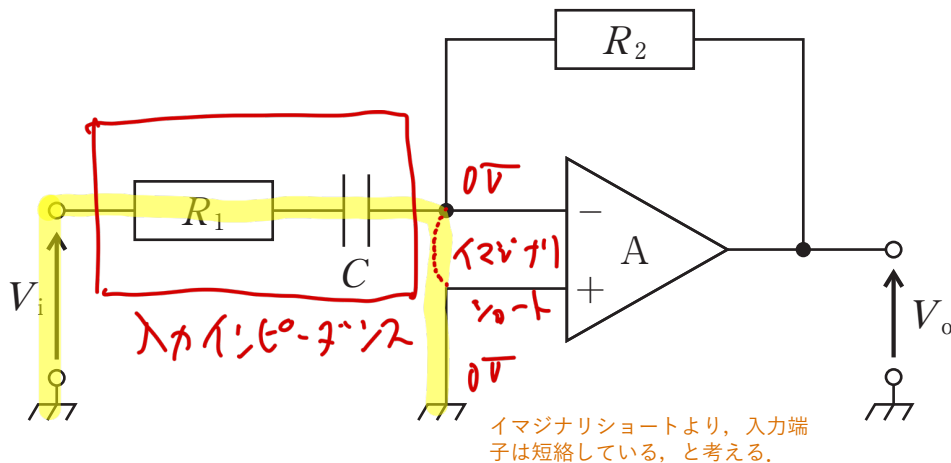
5.  $R_1 + R_2 + \frac{1}{j\omega C}$



## 問題

- 図の回路の入力インピーダンスはどれか。ただし、Aは理想演算増幅器とし、角周波数を $\omega$ 、虚数単位を $j$ とする。(33回)

1.  $R_1$
2.  $R_1 + R_2$
3.  $\frac{1}{j\omega C}$
4.  $R_1 + \frac{1}{j\omega C}$
5.  $R_1 + R_2 + \frac{1}{j\omega C}$

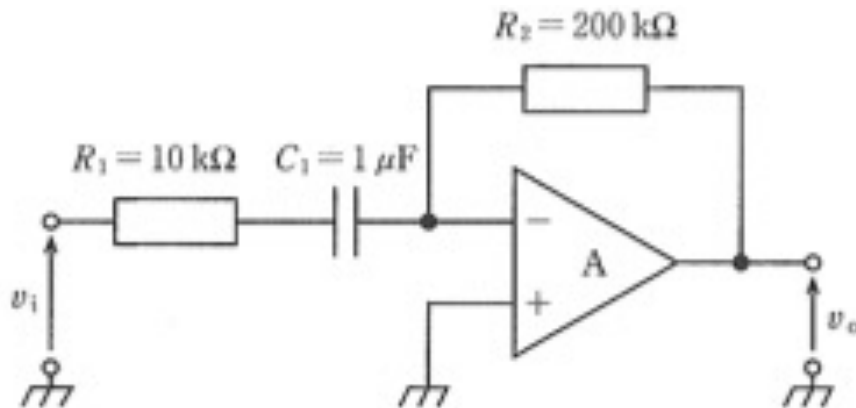


イマジナリショートを考えれば、オペアンプの入力端子はそれぞれ接地していると考えられる。つまり、入力から見れば、この回路は $R_1$ と  $C$ の直列回路に見える。よって、入力インピーダンスは

$$R_1 + \frac{1}{j\omega C}$$

## 問題

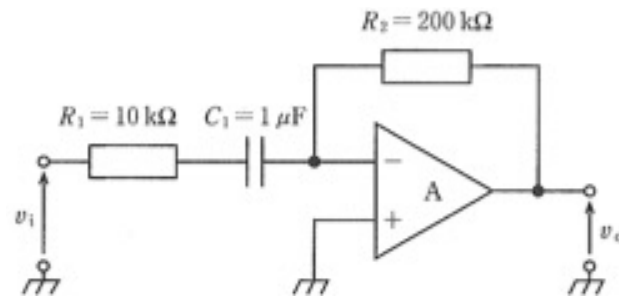
- 図の回路について，正しいのはどれか．Aは理想演算増幅器とする．（国家試験27）
  - 時定数は20msである．
  - 通過域での増幅度は20dBである．
  - 直流成分はカットされる．
  - コンデンサ $C_1$ と抵抗 $R_2$ に流れる電流は等しい．
  - 入力インピーダンスは抵抗 $R_1$ と $R_2$ で決まる．



## 問題

- 図の回路について，正しいのはどれか．Aは理想演算増幅器とする．（国家試験27）

- a. 時定数は20msである．
- b. 通過域での増幅度は20dBである．
- c. 直流成分はカットされる．
- d. コンデンサ $C_1$ と抵抗 $R_2$ に流れる電流は等しい．
- e. 入力インピーダンスは抵抗 $R_1$ と $R_2$ で決まる．

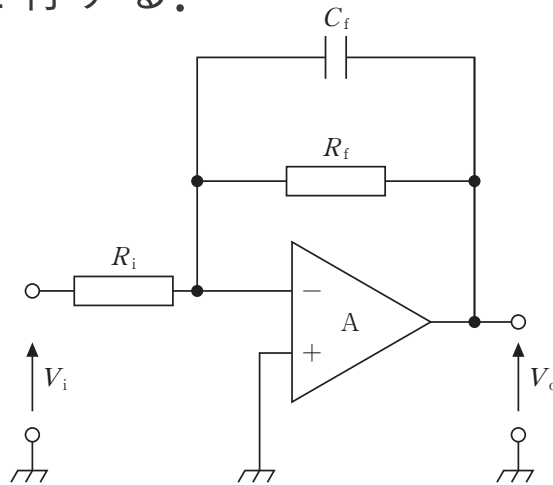


- a. 時定数は $10 \times 10^3 \times 1 \times 10^{-6} = 1 \times 10^{-2} \text{ s} = 10 \text{ ms}$ なので間違い．
- b. 通過域ではコンデンサは無視できる．反転増幅回路の増幅度は $20 \log_{10} \frac{200 \text{ k}}{10 \text{ k}} = 20 \log_{10} 20$ である．よって間違い．
- c. コンデンサは直流を通さないで直流はカットされる．よって正しい．
- d. 入力インピーダンスは無限大なので，コンデンサに流れる電流が $R_2$ にも流れる．よって正しい．
- e. 入力インピーダンスは $R_1$ と $C_1$ で決まるので間違い．

## 問題

• 図の回路について正しいのはどれか．ただし， $A$ は理想演算増幅器とする．（34回）

1. 遮断周波数より十分低い帯域では  $V_o = -\frac{R_f}{R_i} V_i$  である．
2. 遮断周波数より十分低い帯域では微分特性を有する．
3. 遮断周波数は  $\frac{1}{2\pi R_i C_f}$  である．
4. 入力インピーダンスは無限大である．
5. 出力インピーダンスは無限大である．



# 問題

• 図の回路について正しいのはどれか。ただし、Aは理想演算増幅器とする。（34回）

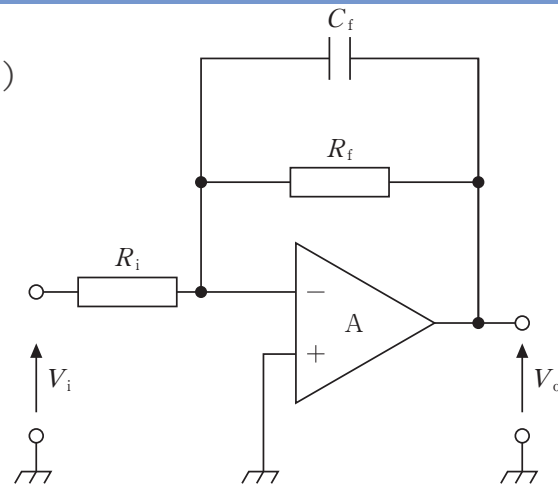
1. 遮断周波数より十分低い帯域では  $V_o = -\frac{R_f}{R_i} V_i$  である。

2. 遮断周波数より十分高い帯域では微分特性を有する。

3. 遮断周波数は  $\frac{1}{2\pi R_i C_f}$  である。

4. 入力インピーダンスは無限大である。

5. 出力インピーダンスは無限大である。



1. 十分低い周波数の波の場合、 $C_f$ は開放とみなせるので、この回路は反転増幅回路とみなせる。つまり、出力電圧は  $V_o = -\frac{R_f}{R_i} V_i$  となる。よって正しい。

2. イマジナリショートから、 $V_o$ は $C_f$ に加わる電圧とみなすことができる。コンデンサは電荷を蓄えながら徐々に電圧を上げていく。つまり、積分しているとみなせる。よって間違い。（ローパスフィルタなので積分）

3. 遮断周波数は、 $\frac{1}{2\pi R_f C_f}$  である。よって間違い。

4. イマジナリショートを考えれば、オペアンプの入力端子はそれぞれグランドに接続しているとみなせる。つまり、入力から見れば、抵抗 $R_i$ のみ負荷がかかっている。よって、入力インピーダンスは $R_i$ である。よって間違い。

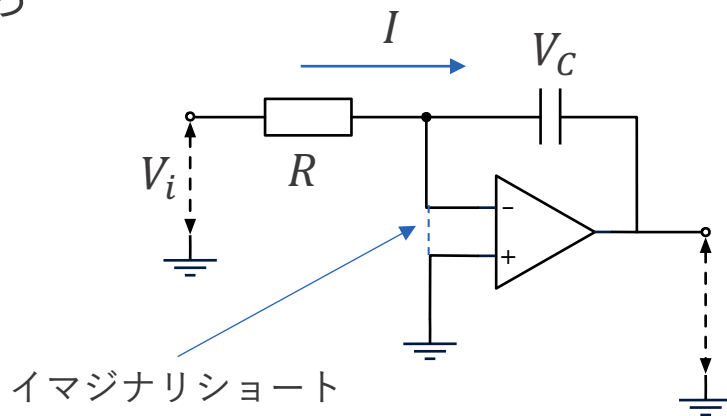
5. 出力インピーダンスはオペアンプの出力インピーダンスと同じなので、0である。よって間違い。



# 積分回路

## ■ オペアンプを用いた積分回路

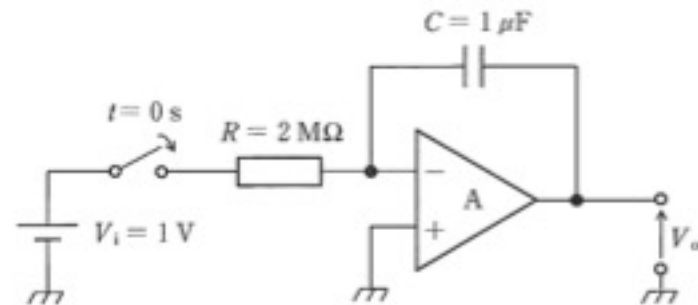
- イマジナリショートを考慮すると、抵抗かかる電圧は $V_i$ だから抵抗を流れる電流は
- $I = \frac{V_i}{R}$
- 入力インピーダンスが無限大なので、コンデンサに流れる電流は抵抗に流れる電流 $I$ と同じである。また電流は定義から
- $I = \frac{dQ}{dt}$
- $Q = CV_C$ より
- $C \frac{dV_C}{dt} = \frac{V_i}{R}$
- 両辺積分すると
- $V_C = \frac{1}{CR} \int V_i dt$
- よって  $V_C$  は  $V_i$  を積分したものである。このため、この回路を積分回路という。



## 問題

- 図の回路において時刻 $t = 0\text{s}$ でスイッチを閉じた。出力電圧 $V_o$ の経過を表す式はどれか。ただし、コンデンサの初期電荷はゼロとし、Aは理想演算増幅器とする。(国家試験26)

1.  $V_o = 2t$
2.  $V_o = -2t$
3.  $V_o = 0$
4.  $V_o = \frac{1}{2}t$
5.  $V_o = -\frac{1}{2}t$



## 問題

- 図の回路において時刻 $t = 0\text{s}$ でスイッチを閉じた。出力電圧 $V_o$ の経過を表す式はどれか。ただし、コンデンサの初期電荷はゼロとし、Aは理想演算増幅器とする。(国家試験26)

1.  $V_o = 2t$

入力インピーダンスが無限大なので、コンデンサに流れる電流は抵抗に流れる電流と同じである。

2.  $V_o = -2t$

抵抗に流れる電流は

$$I = \frac{V_i}{R} = \frac{1}{2M} = \frac{1}{2} \times 10^{-6}$$

3.  $V_o = 0$

また電流は定義から

4.  $V_o = \frac{1}{2}t$

$$I = \frac{dQ}{dt} = \frac{1}{2} \times 10^{-6}$$

$Q = CV$ より

5.  $V_o = -\frac{1}{2}t$

$$C \times \frac{dV}{dt} = \frac{1}{2} \times 10^{-6}$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{2}$$

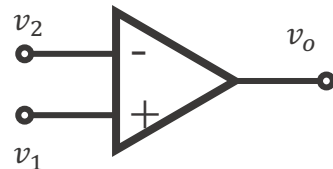
よって電流の向きを考慮すると

$$V = -\frac{1}{2}t$$

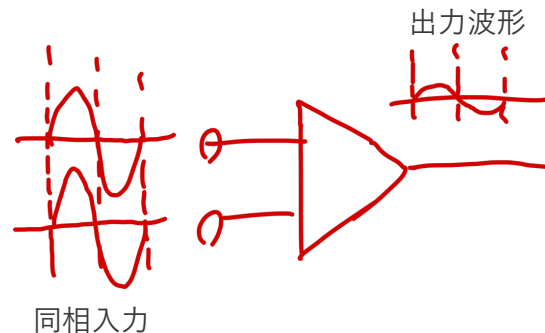
同相除去比

# 同相除去比

- **差動**増幅回路の各入力端子に入力 $v_1$ ,  $v_2$ を与えたとき出力が $v_o$ だとする。  
 $v_o$ ,  $v_1$ ,  $v_2$ の関係は次のように書ける。
- $v_o = A_d(v_1 - v_2) + \frac{1}{2}A_c(v_1 + v_2)$ 
  - $A_d$ は差動増幅度（波形の差分を増幅）
  - $A_c$ は同相増幅度（同位相の波形を増幅）
- 差動増幅度と同相増幅度の比を同相除去比CMRRという。
  - $CMRR = \frac{A_d}{A_c}$
- 同相除去比をdBで表すと
  - $CMRR = 20 \log_{10} \left| \frac{A_d}{A_c} \right|$
- 同相除去比が大きいほど良い差動増幅回路である。
- 理想オペアンプの場合
  - 差動利得は無限大
  - 同相除去比も無限大



理想的には差動増幅回路に同相の波を入力したら出力が無いはずが、現実には少し波が出力される。



## 問題

- 同相利得が0.10倍，差動利得が200倍の差動増幅器がある。この増幅器のCMRR（同相弁別比）は何dBか。ただし， $\log_{10}2 = 0.30$ とする。（第41回ME2種）

1. 6
2. 40
3. 46
4. 60
5. 66

## 問題

- 同相利得が0.10倍，差動利得が200倍の差動増幅器がある。この増幅器のCMRR（同相弁別比）は何dBか。ただし， $\log_{10} 2 = 0.30$ とする。（第41回ME2種）

- 6
- 40
- 46
- 60
- 66

定義通りに計算する

$$\begin{aligned} CMRR &= 20 \log_{10} A_d/A_c = 20 \log_{10} \frac{200}{0.1} \\ &= 20 \log_{10} 2 \times 1000 = 20(3 + 0.3) = 66 \end{aligned}$$



## ■ 問題

- 同相除去比100dBの差動増幅器で、差動利得は60dBであった。同相利得はいくらか。（第42回ME2種）

1. 60dB
2. 40dB
3. 20dB
4. -20dB
5. -40dB

## ■ 問題

- 同相除去比100dBの差動増幅器で、差動利得は60dBであった。同相利得はいくらか。(第42回ME2種)

1. 60dB
2. 40dB
3. 20dB
4. -20dB
5. -40dB

同相除去比の定義から

$$\begin{aligned} CMRR &= 20 \log_{10} \frac{A_d}{A_c} = 20 \log_{10} A_d - 20 \log_{10} A_c \\ &= 60 - 20 \log_{10} A_c = 100 \end{aligned}$$

よって

$$20 \log_{10} A_c = -(100 - 60) = -40$$

## 問題

- CMRR（同相除去比）が80dBの差動増幅器がある．差動増幅器の入力端子間に1mVを入力すると1Vが出力された．差動増幅器の2つの入力端子を短絡し，アースとの間に1Vを入力すると出力電圧は何Vになるか．（第37回ME2種）

1. 0.01
2. 0.1
3. 1
4. 10
5. 100

## 問題

- CMRR（同相除去比）が80dBの差動増幅器がある．差動増幅器の入力端子間に1mVを入力すると1Vが出力された．差動増幅器の2つの入力端子を短絡し，アースとの間に1Vを入力すると出力電圧は何Vになるか．（第37回ME2種）

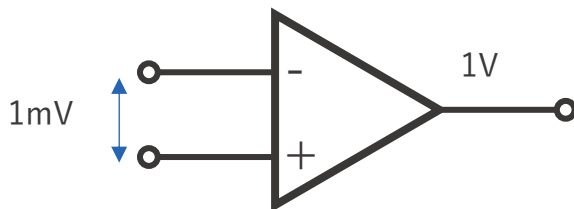
1. 0.01

② 0.1

3. 1

4. 10

5. 100



差動増幅

差動増幅度は  $A_d = 1/0.001 = 1000$

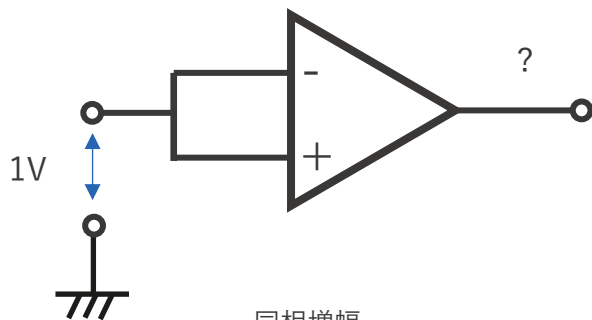
同相除去比は

$$\text{CMRR} = 20 \log_{10} \frac{A_d}{A_c} = 20 \log_{10} 1000/A_c = 80$$

$$1000/A_c = 10^4$$

$$\text{同相増幅度は } A_c = \frac{1000}{10000} = 0.1$$

よって出力電圧は0.1V



同相増幅

## ■ 問題

- 増幅率40dB, CMRR100dBの増幅器に, 1.2Vの雑音(同相信号)が入力された. 出力に現れる雑音の大きさはどれか. (第36回ME2種)

1. 48V
2. 30mV
3. 12mV
4. 1.2mV
5.  $12\mu\text{V}$

## ■ 第36回ME2種

- 増幅率40dB, CMRR100dBの増幅器に, 1.2Vの雑音(同相信号)が入力された. 出力に現れる雑音の大きさはどれか. (第36回ME2種)

- 48V

- 30mV

- 12mV

- ☒ 1.2mV

- 12  $\mu$ V

増幅率40dB, CMRR100dBなので

$$100 = 40 + 20 \log_{10} A_c$$

$$20 \log_{10} A_c = -60$$

$$A_c = 10^{-3}$$

よって出力は

$$1.2 \times A_c = 1.2mV$$