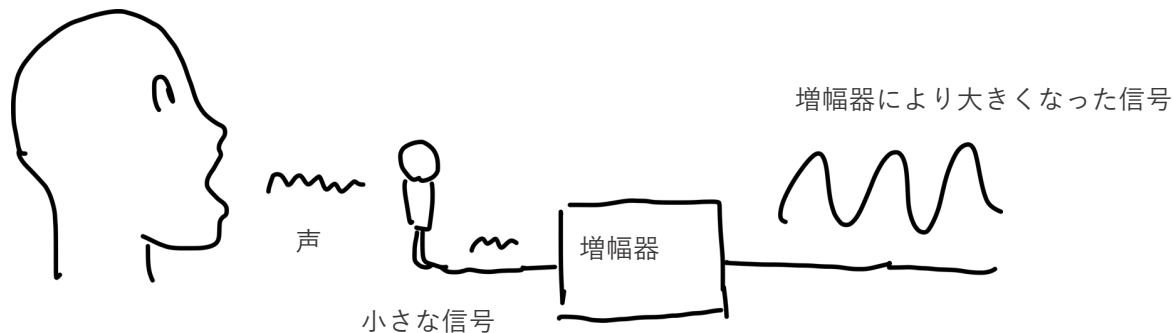


電気工学2第12回

藤田 一寿

増幅

- 入力信号の振幅を大きくした出力を得ることを増幅という。
 - 小さい波を大きい波にする.
- 増幅に用いられる増幅回路という.
- 増幅回路を持った機器を増幅器という.



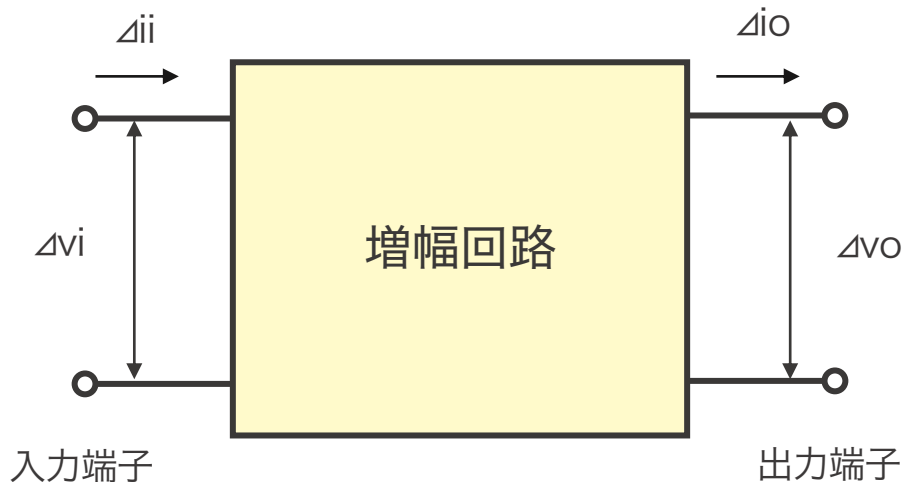
フィルタ回路は特定の周波数の信号を小さくするが、増幅回路は逆に信号を大きくする。

■ 増幅度，利得（ゲイン）

- 入力がどれほど増幅されたかを，増幅度，利得（ゲイン）で表す．

- 電圧増幅度 $A_v = \frac{\Delta v_o}{\Delta v_i}$

- 電圧利得 $G_v = 20 \log_{10} |A_v|$ [dB] デシベル



増幅度と利得は同じ意味で同じように使う場合もあれば，デシベル表示のみ利得という場合もある．文脈で判断してほしい．

■ 対数の計算

- 利得の計算をするためには対数の計算を習得する必要がある。次の公式を思い出そう。
- a を底とし、 $M > 0$, $N > 0$ とする。

$$\log_a 1 = 0$$

$$\log_a a = 1$$

$$\log_a (MN) = \log_a M + \log_a N$$

$$\log_a (M/N) = \log_a M - \log_a N$$

$$\log_a M^r = r \log_a M$$

■ 利得計算

- 電圧増幅度 $A_v=200$ のとき，電圧利得[dB]はいくらか.
- 電圧利得が20[dB]の増幅器に電圧2Vの入力を与えた．出力電圧[V]はいくらか.

■ 利得計算

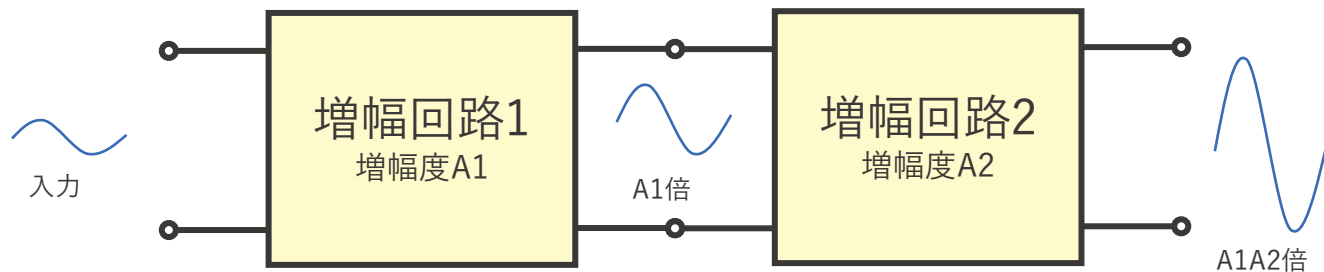
- 電圧増幅度 $A_v=200$ のとき，電圧利得 [dB] はいくらか.
 - $G_v = 20 \log_{10} A_v = 20 \log_{10} 200 = 20 \times (\log_{10} 2 + \log_{10} 100)$
 - $= 20 \times (0.3 + 2) \approx 46[\text{dB}]$
- 電圧利得が $20[\text{dB}]$ の増幅器に電圧 2V の入力を与えた．出力電圧[V]はいくらか.
 - $G_v = 20 = 20 \log_{10} A_v$
 - $\log_{10} A_v = 1$
 - $A_v = 10\text{倍}$
 - よって出力電圧は 20V

$$\log_{10} 200 = \log_{10}(2 \times 100) = \log_{10} 2 + \log_{10} 100$$

$$\log_{10} 100 = \log_{10} 10^2 = 2 \log_{10} 10 = 2$$

■ 多段増幅回路

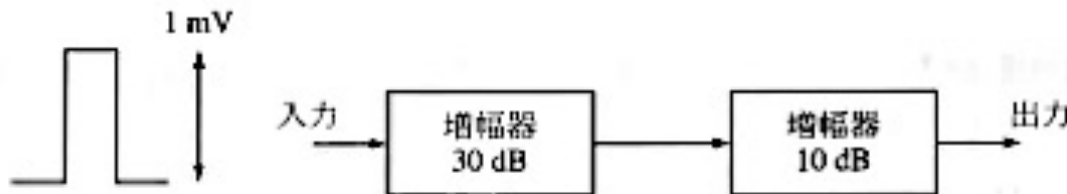
- 増幅回路を複数つなげ回路を多段増幅回路という.
- 多段増幅回路の電圧増幅度 A は各増幅回路の増幅度を書けたものになる.
 - $A = A_1 A_2 \cdots$
- 多段増幅回路 G の電圧利得は次のように計算できる.
 - $G = 20 \log_{10} A = 20 \log_{10} A_1 A_2 \cdots = 20 \log_{10} A_1 + 20 \log_{10} A_2 + \cdots$
 - $= G_1 + G_2 + \cdots$
- つまり多段増幅回路の利得は各増幅回路の利得を足したものになる.



第39回ME2種

- 図のような電圧増幅器を内蔵する医療機器に1mVを入力したときの出力の振幅[V]はどれか

1. 0.02
2. 0.04
3. 0.1
4. 0.3
5. 10



第39回ME2種

- 図のような電圧増幅器を内蔵する医療機器に1mVを入力したときの出力の振幅[V]はどれか

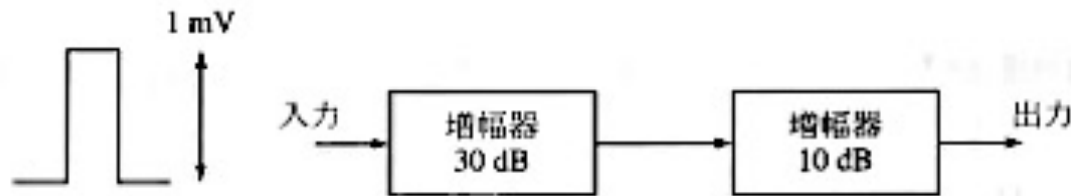
1. 0.02

2. 0.04

③ 0.1

4. 0.3

5. 10



多段増幅回路の利得は各増幅回路の利得を足し合わせたものなので、多段増幅回路の利得は、 $30+10=40\text{dB}$

よって増幅度は

$$20 \log_{10} A = 40$$

$$A = 100$$

よって、この多段増幅回路は入力電圧を100倍にするので、出力は $100\text{mV}=0.1\text{V}$ となる。

■ 第35回ME2種

• 図の回路の電圧増幅度は全体でいくらか.

1. 2倍
2. 40倍
3. 100倍
4. 399倍
5. 10000倍



■ 第35回ME2種

・ 図の回路の電圧増幅度は全体でいくらか.

1. 2倍
2. 40倍
- ③ 100倍
4. 399倍
5. 10000倍



多段増幅回路の利得は各増幅回路の利得を足し合わせたものなので、多段増幅回路の利得は、

$$19 + 21 = 40 \text{ dB}$$

よって増幅度は

$$20 \log_{10} A = 40$$

$$A = 100$$

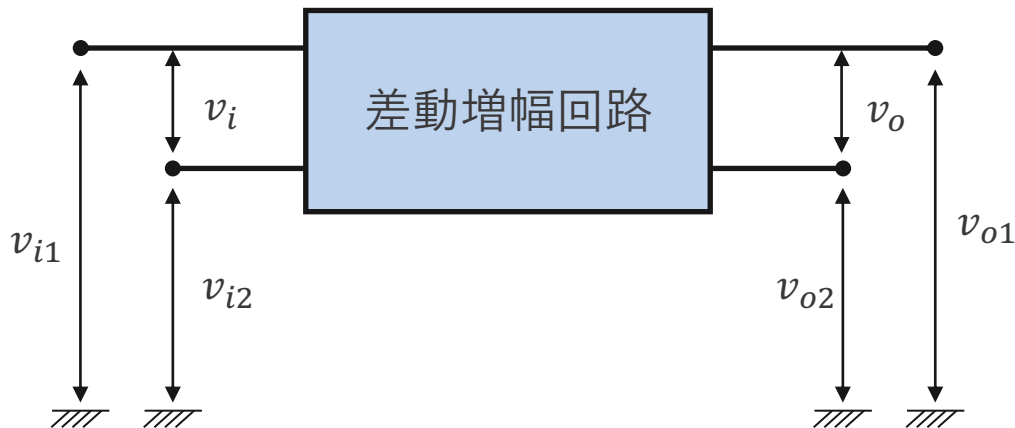
よって、この多段増幅回路は入力電圧を100倍にする。

テクニック：暗算で計算できる増幅度は10の倍数以外ありえないので答えは3か5に絞られる。

差動增幅回路

差動増幅回路

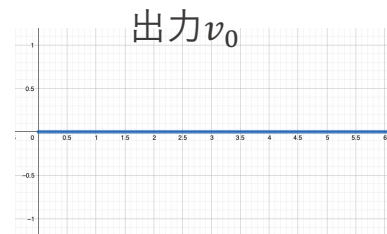
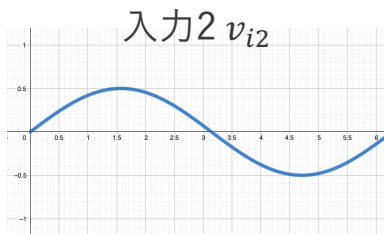
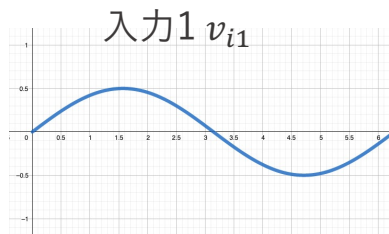
- 差動増幅回路は、2つの入力端子に加えられた信号の差 v_i を増幅して、2つの出力端子に電圧の差 v_o として出力する。
- 入力 v_{i1} 、 v_{i2} に共通に含まれる成分は出力に現れない。



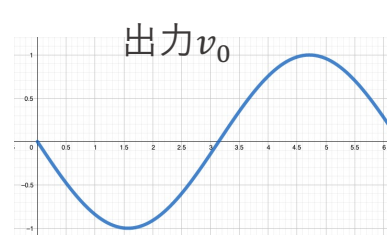
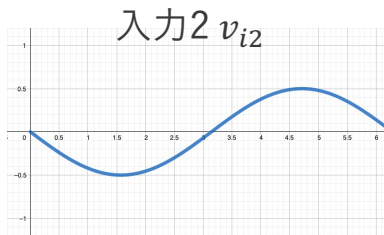
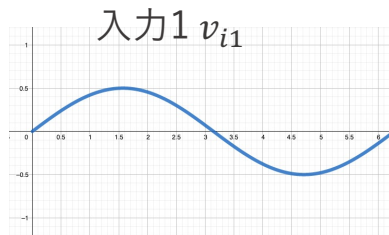
差動増幅回路の動作

- 同相の入力が入ったとき、両方の出力に差がないため、出力 v_0 は0となる。
- 逆相の入力が入ったとき、両方の出力を反転した信号が出力され、その差は $v_0 = v_{o1} - v_{o2}$ となる。

同相入力



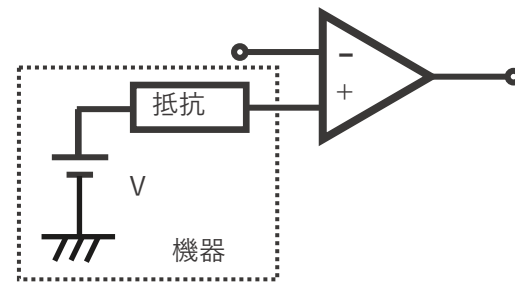
逆相入力



入力インピーダンス・出力
インピーダンス

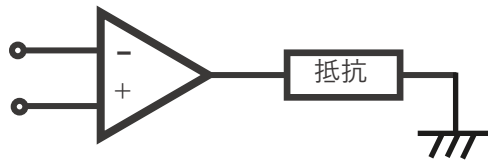
■ 入力インピーダンスについて

- 増幅器の入力抵抗（入力インピーダンス）は大きいほどよい。
 - 増幅器へ入力する機器の負荷が小さい。
 - 例えば入力インピーダンス $1\text{k}\Omega$ の増幅回路に 1V の電圧を加えるために必要な電流は 1mA である。よって電力は 1mW 必要である。しかし、入力インピーダンスが 1Ω の場合 1V の電圧を加えるためには電流は 1A である。よって電力は 1W 必要となる。
 - つまり、増幅器の入力インピーダンスは高ければ高いほど必要な電力が下がるため、それに接続する機器の負担は小さくなる。
 - 増幅器へ入力する機器の影響が少ない。
 - 図のように機器の出力に内部抵抗がある場合、機器の出力 V がその内部抵抗と入力インピーダンスで分圧される。
 - つまり、入力インピーダンスが大きければ大きいほど増幅器に加わる電圧が大きくなる。（内部抵抗の影響が少なくなる。）



出力インピーダンス

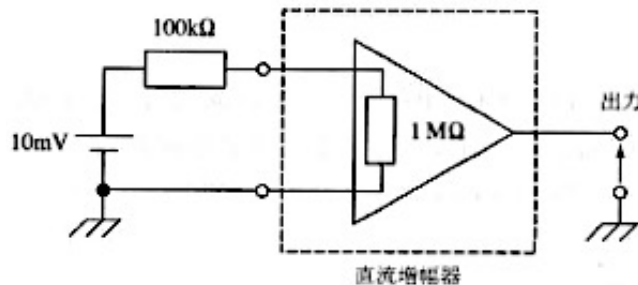
- 機器の出力できる電流は大きいほうが良い。
 - 入力インピーダンスが低い機器をつなげた場合、必要な電流（電力）は大きくなる。
 - しかし、出力電流が足りないと必要な電圧をかけられない。
 - 例えば 1Ω の機器に $1V$ の電圧をかけたい場合 $1A$ 必要だが、 $0.5A$ しか電流を流せなかったとすると、機器には $0.5V$ しかかけることが出来ない。見方を変えたと、出力した機器が $0.5V$ 電圧を加わったと考えたと、出力側の機器と入力側の機器で $1V$ を $0.5V$ ずつ分圧したことになり、見かけ上出力側の機器はインピーダンスを持つことになる。
 - この見かけ上のインピーダンスを出力インピーダンスという。
 - つまり、出力インピーダンスが低ければ低いほど電流供給力（出力できる電力）が大きい。出力インピーダンスは 0 が理想的である。



問題

- 入力抵抗 $1\text{M}\Omega$ ，電圧増幅率110倍の直流増幅器に，図のように直流信号を入力した．信号源の内部抵抗を $100\text{k}\Omega$ ，直流電圧を 10mV とすると，増幅器の出力[V]はいくらか．（第35回ME2種）

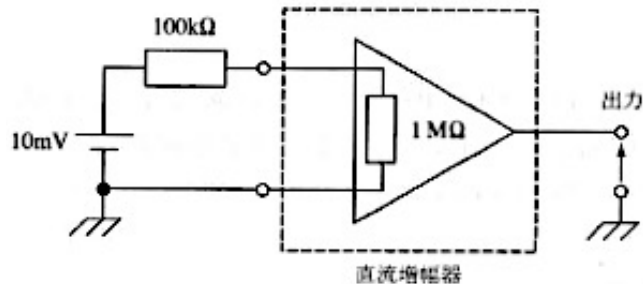
- 0.1
- 0.5
- 1.0
- 1.1
- 10.0



問題

- 入力抵抗 $1\text{M}\Omega$ 、電圧増幅率110倍の直流増幅器に、図のように直流信号を入力した。信号源の内部抵抗を $100\text{k}\Omega$ 、直流電圧を 10mV とすると、増幅器の出力[V]はいくらか。（第35回ME2種）

- 0.1
- 0.5
- ③ 1.0
- 1.1
- 10.0



入力電圧は内部抵抗と入力抵抗で分圧される。
入力抵抗に加わる電圧は、

$$10 \times \frac{1000k}{1100k} = 10/1.1\text{mV}$$

これが110倍に増幅されるので、出力電圧は

$$\frac{10}{1.1} \times 110 = 1000\text{mV} = 1\text{V}$$

■ 問題

- 脳波計の増幅器の入力インピーダンスを高くする理由はなにか。（第35回ME2種）
 1. 検出信号の起電力が小さいため.
 2. 直流を増幅するため.
 3. 電極の接触インピーダンスが高いため.
 4. 筋電図の混入を防ぐため.
 5. 電極接触電圧による飽和を防ぐため.

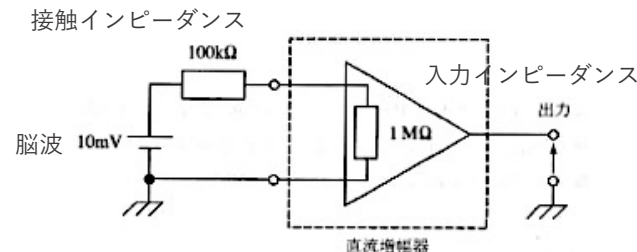
第35回ME2種

- 脳波計の増幅器の入力インピーダンスを高くする理由はなにか。 (第35回ME2種)

1. 検出信号の起電力が小さいため。
起電力が小さいから増幅器を使い大きくする。
2. 直流を増幅するため。
直流はカップリングコンデンサを使い除去する。

- ③ 電極の接触インピーダンスが高いため。
脳波は、接触インピーダンスと入力インピーダンスで分圧される。増幅器になるべく大きな電圧を加えるために、入力インピーダンスを大きくしたほうが良い。

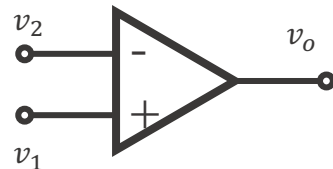
4. 筋電図の混入を防ぐため。
関係ない。
5. 電極接触電圧による飽和を防ぐため。



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
 - A_c は同相増幅度
- 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



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）

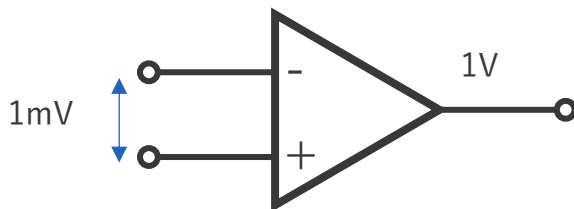
1. 0.01

② 0.1

3. 1

4. 10

5. 100



差動増幅

差動増幅度は $A_d = 1/0.001 = 1000$

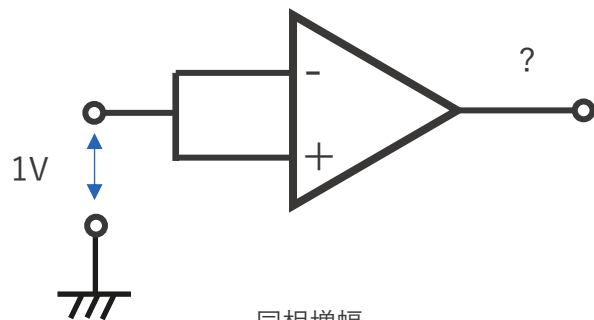
同相除去比は

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

$$1000/A_c = 10^4$$

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

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 μ 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

$$1.2 \times A_c = 1.2 \text{mV}$$

別解

増幅利得が40dBなので差動増幅度は

$$20 \log_{10} A_d = 40$$

よって $A_d=100$ である.

CMRRが100dBなので同相増幅度は

$$20 \log_{10} \frac{100}{A_c} = 100$$

$$\frac{100}{A_c} = 10^5$$

$$A_c = \frac{10^2}{10^5} = 10^{-3}$$

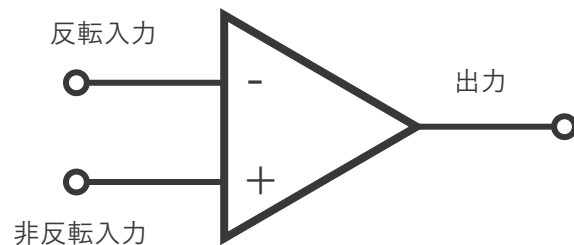
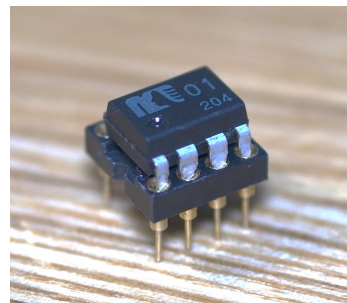
よって出力に現れる雑音は

$$1.2 \times 10^{-3} \text{V} = 1.2 \text{mV}$$

オペアンプ

■ オペアンプ

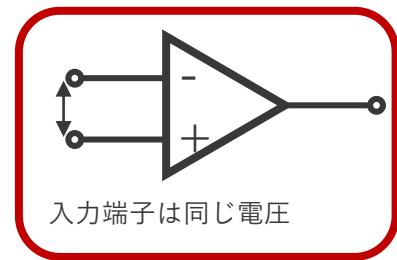
- 演算増幅器 (Operation Amplifier: オペアンプ)
 - 反転入力と非反転入力の2つの入力端子がある.
 - 正負直流電源を使う.
 - 出力が1つある.
- オペアンプの応用例
 - 増幅回路
 - 非反転増幅回路
 - 反転増幅回路
 - バッファ回路
 - ボルテージフォロア
 - 加算回路, 減算回路
 - コンパレータ



理想オペアンプ

- 増幅度は無限大
 - いくらでも増幅できる.
- 2つの入力端子の入力インピーダンスが無限大
 - 入力端子に電流は入っていない.
- 出力インピーダンスが0
 - いくらでも電流を供給できる.
- どのような周波数の信号でも同じように増幅する.
- イマジナリショート（バーチャルショート，仮想短絡）
 - 反転端子と非反転端子はショートしている（同じ電圧）と考えて良い.

重要!!



太字の2点を使いこなせればオペアンプの問題は大体解ける！！

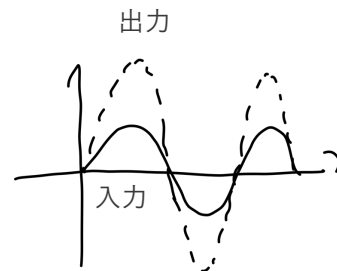
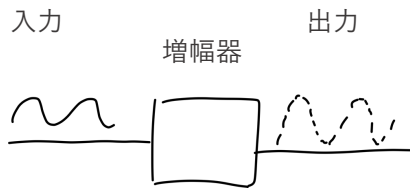
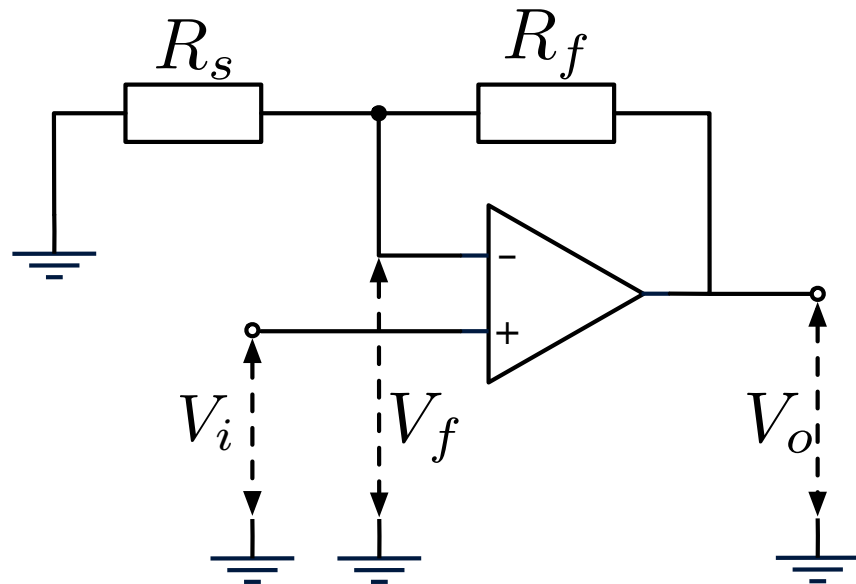
■ オペアンプを使った応用回路

- 非反転増幅回路
- 反転増幅回路
- ボルテージフォロア
- 加算回路
- 減算回路

非反轉增幅回路

■ 非反転増幅回路

- オペアンプを用いた典型的な増幅回路
- 入力是非反転入力に入る。
- 出力端子から反転入力端子へ負帰還がある。



■ 非反転増幅回路の増幅度

- V_o は R_s と R_f で分圧されるため,

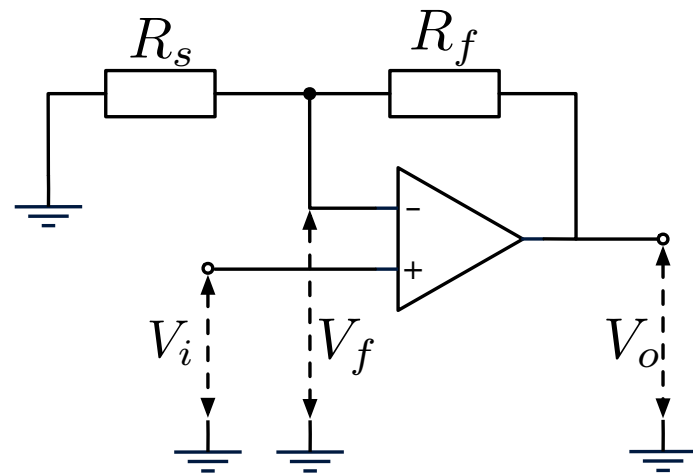
$$V_f = \frac{R_s}{R_f + R_s} V_o$$

- イマジナリショートを適用すると V_i と V_f は等しいと考えられるので

$$V_i = \frac{R_s}{R_f + R_s} V_o$$

- よって, 電圧増幅度 A_{vf} は

$$A_{V_f} = \frac{V_o}{V_i} = \frac{R_f + R_s}{R_s}$$



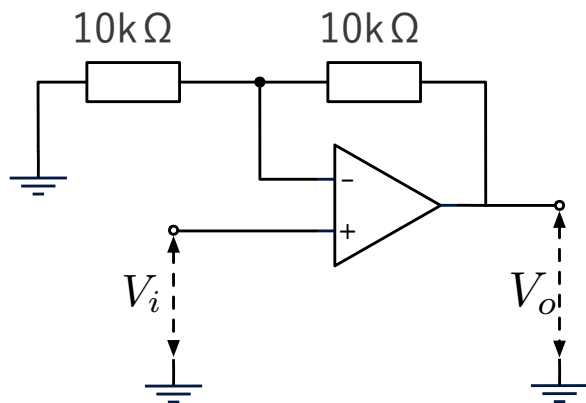
■ 非反転増幅回路の特徴

- 増幅度を1未満に出来ない.
- 入力インピーダンスを高くできる.
 - 入力インピーダンスが高くと、入力側の機器が供給する電流（電力）が少なくてすむ. 例えば1Vの電圧を入力するために必要な電流は、入力インピーダンスが10倍になれば10分の1になる. 必要な電流が少なければ入力する機器の負担は少ない.
- 信号ラインに抵抗が無いとため、抵抗の質に出力が影響されにくい.
 - オーディオ機器作成時だけ考えれば良い.

問題解説

- 図の回路において V_i に3Vの信号を入力すると V_o は何Vになるか。
(32ME)

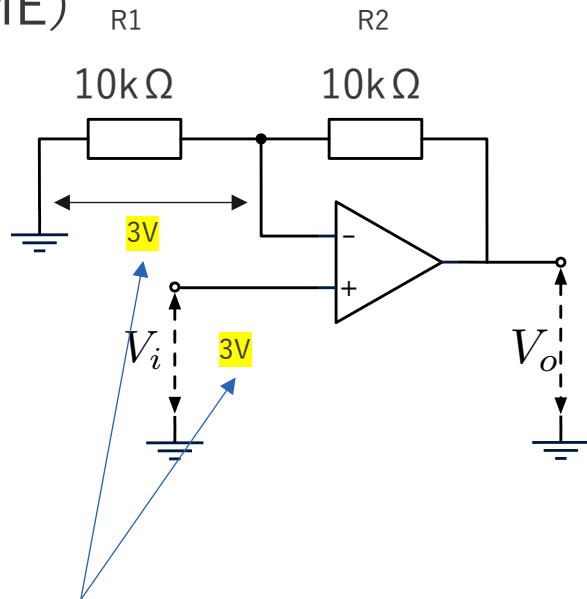
- 1
- 2
- 3
- 6
- 12



問題解説

- 図の回路において V_i に3Vの信号を入力すると V_o は何Vになるか。
(32ME)

- 1
- 2
- 3
- ④ 6
- 12



バーチャルショートだから等しい

あえて増幅度の公式を使わず解きます。

バーチャルショートを適用すると、オペアンプのそれぞれの入力端子の電圧は等しいと見なせるので、 R_1 に3Vの電圧が加わっている。

また、入力インピーダンスは無限大なので、非反転入力端子への接続は無視できる。そう考えれば、 V_o は R_1 と R_2 で分圧されている（抵抗が直列につながっている）と考えられる。よって、 R_1 に加わる電圧を V_{R1} とすると、

$$V_{R1} = R_1 / (R_1 + R_2) V_o$$

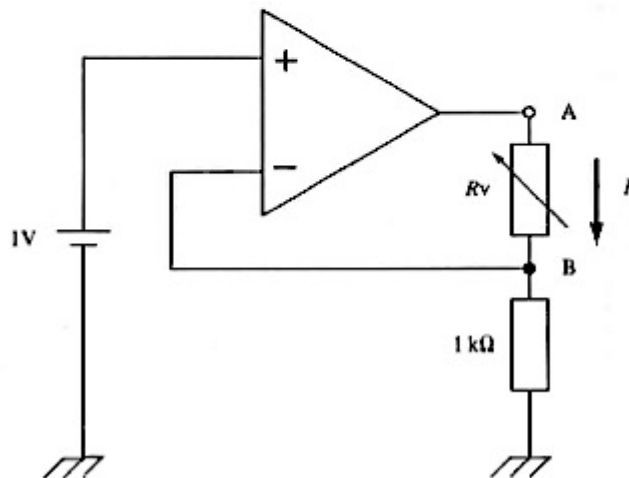
なので、 $V_o = 6V$ となる。

別解： R_1 と R_2 は等しいので、 R_2 には3Vの電圧が加わる。よって
 $V_o = V_{R1} + V_{R2} = 3 + 3 = 6V$ である。

第35回ME2種

- 理想オペアンプの回路で、可変抵抗 R_v が $1\text{k}\Omega$ のとき、端子AB間を流れる電流が I_0 であった。可変抵抗を $2\text{k}\Omega$ に変化させたとき、端子AB間を流れる電流 I は I_0 の何倍か。(第35回ME2種)

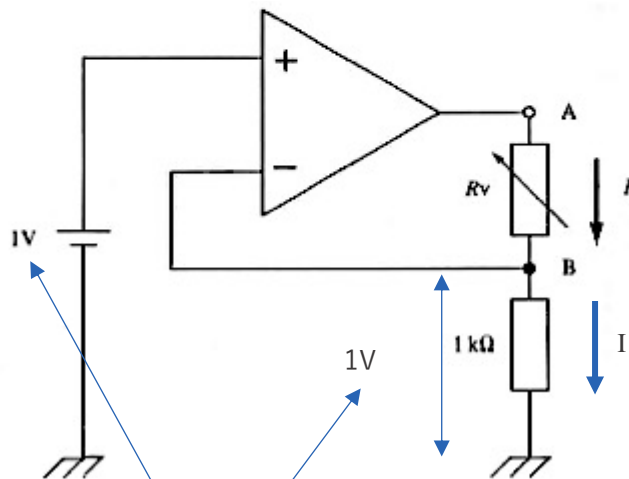
1. $\frac{1}{4}$
2. $\frac{1}{2}$
3. 1
4. 2
5. 4



第35回ME2種

- 理想オペアンプの回路で、可変抵抗 R_v が $1\text{k}\Omega$ のとき、端子AB間を流れる電流が I_0 であった。可変抵抗を $2\text{k}\Omega$ に変化させたとき、端子AB間を流れる電流 I は I_0 の何倍か。(第35回ME2種)

1. $\frac{1}{4}$
2. $\frac{1}{2}$
- ③ 1
4. 2
5. 4



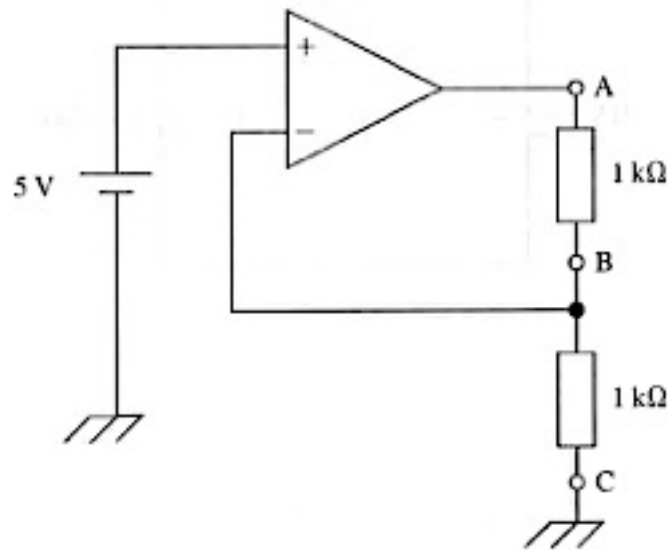
バーチャルショートだから等しい

入力インピーダンスは無限大なので、反転入力端子には電流が流れ込まない。
つまり、出力端子から流れ出す電流のすべてが $1\text{k}\Omega$ の抵抗に流れる。よって、AB間に流れる電流 I と $1\text{k}\Omega$ の抵抗に流れる電流は等しい。
また、バーチャルショートより、 $1\text{k}\Omega$ の抵抗に加わる電圧は R_v の値によらず 1V である。つまり、 R_v が変化しても、 $1\text{k}\Omega$ の抵抗に流れる電流は変化しない。
よって、AB間に流れる電流 I は R_v によって変化しないから、 I は I_0 の1倍である。

問題

- 図の理想オペアンプ回路で、端子AB間に $1\text{k}\Omega$ の抵抗を接続した。出力端子Aと端子Cの間の電位差は何Vか。(第34回ME2種)

- 1
- 5
- 7
- 10
- 12



問題

- 図の理想オペアンプ回路で、端子AB間に $1\text{k}\Omega$ の抵抗を接続した。出力端子Aと端子Cの間の電位差は何Vか。(第34回ME2種)

1. 1

2. 5

3. 7

4. 10

5. 12

イマジナリショートから、BC間の電位差は5Vである。

BC間に流れる電流は

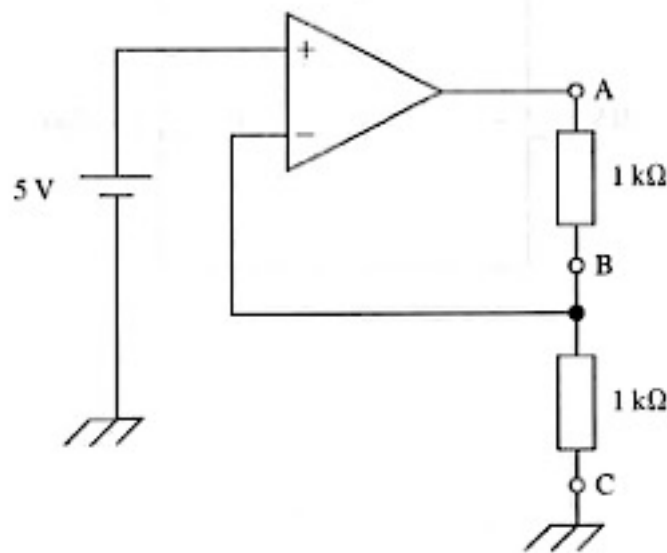
$$I_{BC} = \frac{5}{1k} A$$

入力端子はインピーダンス無限大なので電流は流れ込まない。よって、電流のすべてがAB間に流れる。よってAB間の電位差は

$$V_{AB} = I_{BC} \times 1k = 5V$$

よってAC間の電位差は

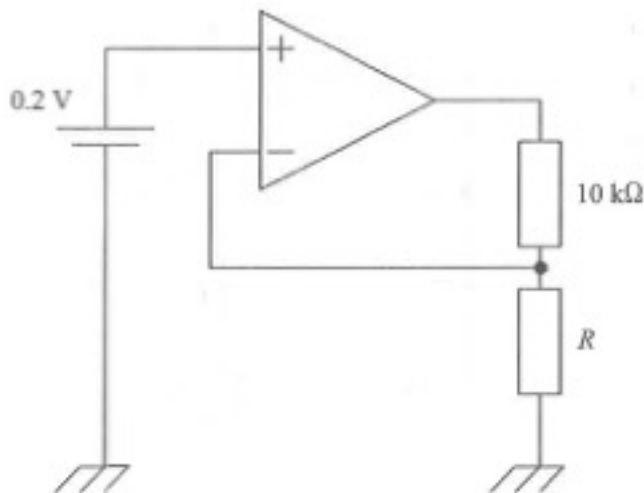
$$V_{AC} = 5 + 5 = 10V$$



問題

- 図の回路で $10\text{k}\Omega$ の抵抗に流れる電流が 0.2mA のとき、抵抗 R の大きさは何 $\text{k}\Omega$ か。ただし、オペアンプは理想オペアンプとする。（第38回ME2種）

- 1
- 2
- 4
- 5
- 10



問題

- 図の回路で $10\text{k}\Omega$ の抵抗に流れる電流が 0.2mA のとき、抵抗 R の大きさは何 $\text{k}\Omega$ か。ただし、オペアンプは理想オペアンプとする。（第38回ME2種）

1. 1

2. 2

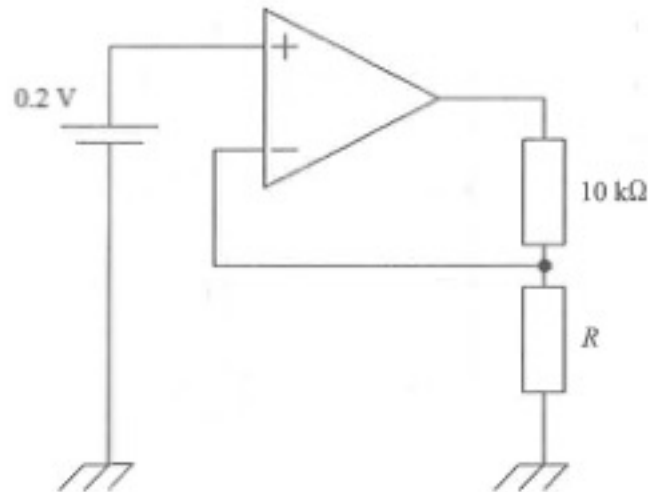
3. 4

4. 5

5. 10

入力インピーダンスは無限大なので、 0.2mA の電流すべてが抵抗 R に流れる。
また、イマジナリショートから、抵抗 R にかかる電圧は 0.2V である。
よって

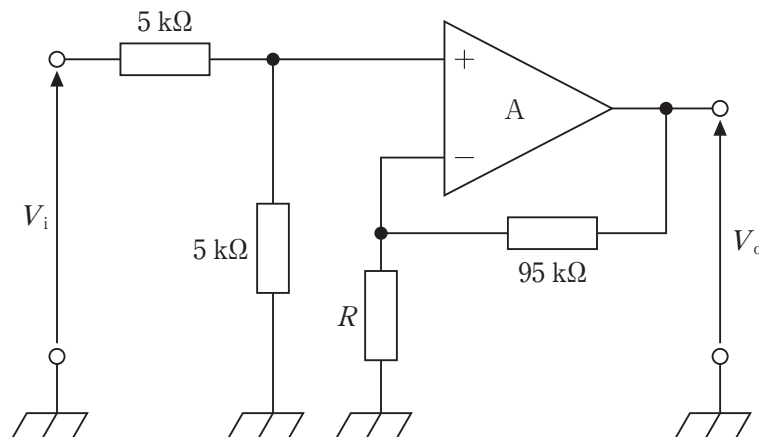
$$R = \frac{0.2}{0.2} \times 10^3 = 1\text{k}\Omega$$



問題

- 図の回路の電圧利得が20dBであるとき、 $R[\text{k}\Omega]$ はどれか。ただし、 A は理想演算増幅器とする。（臨床工学技士国家試験34）

- 1
- 2
- 5
- 7
- 10



問題

- 図の回路の電圧利得が20dBであるとき、 $R[k\Omega]$ はどれか。ただし、 A は理想演算増幅器とする。（臨床工学技士国家試験34）

1. 1

2. 2

3. 5

4. 7

5. 10

この増幅回路の増幅度は $20 = 20 \log_{10} A$ より10倍である。

非反転増幅回路への入力はGNDに接続している $5k\Omega$ にかかる電圧である。 $5k\Omega$ にかかる電圧は $V_i/2$ である。よって、入力につながっている抵抗の直列回路で入力は $1/2$ 倍される事がわかる。

$1/2$ 倍されるので、非反転増幅回路は20倍でなければならない。よって

$$\begin{aligned} V_i + \frac{V_i}{R} \times 95k &= 20V_i \\ 19R &= 95k \\ R &= 5k\Omega \end{aligned}$$

