

※解答には式の導出や計算の過程を省略せずに記述すること。また、必要に応じて適切な単位をつけること。

問 1 次の文章中における(カッコ内)の語句において、動作説明として正しくなるものに○をつけなさい。

[2 点×10=20 点]

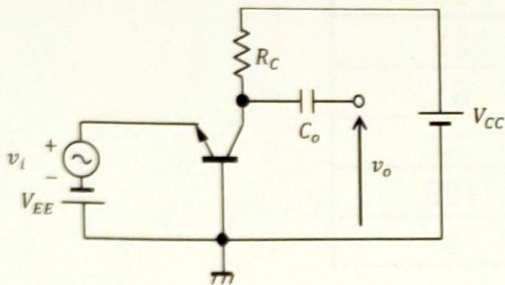


図 1

図 1 の (ベース・エミッタ・コレクタ) 接地回路における入力信号電圧 v_i が増加すると、エミッタ・ベース間のバイアス電圧を (増加・減少) させるように働く。したがって、コレクタ電流が (増加・減少) するため、負荷抵抗 R_C の電圧降下は (増加・減少) するから、コレクタ・ベース間電圧はこの変化分だけ (増加・減少) する。すなわち、入力信号電圧 v_i が増加したとき、出力信号電圧 v_o は (増加・減少) するので、この接地回路の入力波形と出力波形は (同位相・逆位相) になる。また、この接地回路の入力電流は (ベース電流・エミッタ電流・コレクタ電流) であり、出力電流は (ベース電流・エミッタ電流・コレクタ電流) であることから、電流増幅率は (非常に大きい・1 よりわずかに小さい・ほぼ 0 に等しい) という特徴をもつことがわかる。

問 2 表 2 はトランジスタを用いた各接地回路の特徴と性質をまとめたものである。表 2 に関して、以下の問いに答えよ。

[4 点×3=12 点]

表 2 各接地回路の特徴と性質

接地方式	(ベース)	(コレクタ)	(エミッタ)
動作量	接地	接地	接地
入力抵抗	最も低い	最も高い	低い
出力抵抗	最も高い	最も低い	高い
電流増幅度	ほぼ 1	大きい	大きい
電圧増幅度	大きい	ほぼ 1	大きい
電力増幅度	中くらい	最も小さい	最も大きい

(1) 各動作量の特徴に対応する接地方式の名称を表 2 の(カッコ内)に全て書き示せ。

完全正答で 4 点

(2) インピーダンス変換回路を構成する場合に最も適した接地方式の名称を答えよ。

コレクタ接地回路

(3) ベース接地方式の増幅回路は 2 段接続のような従属接続に適していない。この理由を説明せよ。

入出力抵抗比が大きいことにより、2 段接続した場合には信号を減衰させてしまうため

問 3 エミッタ接地回路の交流等価回路において、入力電圧の微小変化 dV_{BE} はエミッタ電流の微小変化 dI_E とエミッタの交流抵抗 r_e の積で表される。エミッタの交流抵抗 r_e について、次式が成り立つことを証明せよ。

$$r_e \cong \frac{26}{I_C [\text{mA}]}$$

ただし、電子 1 個の電荷量 $q = 1.6 \cdot 10^{-19} [\text{C}]$ 、ボルツマン定数 $k = 1.38 \cdot 10^{-23} [\text{J/K}]$ 、室温 $T = 300 [\text{K}]$ とし、トランジスタに流れているコレクタ電流は $I_C \cong I_S \exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right)$ として考えよ。

[8 点]

題意より、 $dV_{BE} = r_e dI_E$ であるから、

$$\begin{aligned} r_e &= \frac{1}{\frac{dI_E}{dV_{BE}}} \cong \frac{1}{\frac{dI_C}{dV_{BE}}} \\ &= \frac{1}{\frac{q}{kT} I_S \exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right)} \\ &= \frac{kT}{q} \frac{1}{I_C} \end{aligned}$$

$$\frac{kT}{q} \cong 26 \text{ mV より、} \therefore r_e \cong \frac{26}{I_C [\text{mA}]} //$$

※解答には式の導出や計算の過程を省略せずに記述すること。また、必要に応じて適切な単位をつけること。

問4 図4はコレクタ接地回路の交流等価回路を示している。図4から各動作量を導出する過程が正しくなるように、以下の記述のア～オにあてはまる式を解答欄に示せ。
[5点 x 6 = 30点]

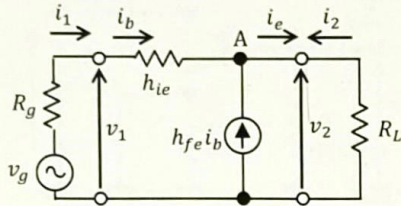


図4 コレクタ接地回路の交流等価回路

■ A_i の導出

図4のA点にKCLを適用すると、

$$i_e = i_b + h_{fe} i_b \quad (1)$$

が成り立つ。(1)の電流を i_2 と i_1 に置き換えると、 i_2 と i_1 の関係式は、

$$i_2 = \left[\text{ア} \right] i_1 \quad (2)$$

と表される。(2)より、 A_i は

$$\therefore A_i = \frac{i_2}{i_1} = \left[\text{ア} \right] \quad (3)$$

と求められる。

■ R_i の導出

図4より、

$$v_1 = \left[\text{イ} \right] + v_2 \quad (4)$$

が成り立つ。 v_2 は、

$$v_2 = -i_2 R_L \quad (5)$$

であるので、(4)に(5)および(2)を代入すると、 v_1 と i_1 の関係式は、

$$v_1 = \left[\text{ウ} \right] i_1 \quad (6)$$

と表される。(6)より、 R_i は

$$\therefore R_i = \frac{v_1}{i_1} = \left[\text{ウ} \right] \quad (7)$$

と求められる。

■ A_v の導出

(2), (5), (6)より、 A_v は

$$\therefore A_v = \frac{v_2}{v_1} = \left[\text{エ} \right] \quad (8)$$

と求められる。

■ R_o の導出

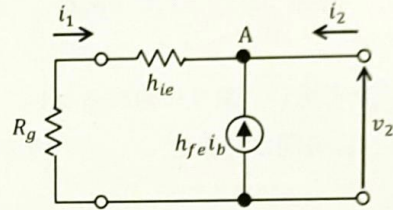


図4にて $v_g = 0$ にし、上図の状態にて、出力抵抗 R_o を求める。上図より、出力電圧 v_2 と i_1 の関係式は、

$$v_2 = \left[\text{オ} \right] i_1 \quad (9)$$

と表される。また、A点にKCLを適用し、 i_2 について整理すると、

$$i_2 = \left[\text{ア} \right] i_1 \quad (10)$$

が成り立つ。(9)および(10)より、 R_o は、

$$\therefore R_o = \frac{v_2}{i_2} = \left[\text{カ} \right] \quad (11)$$

と求められる。

解答欄

ア	$-(1 + h_{fe})$
イ	$h_{ie} i_1$
ウ	$h_{ie} + (1 + h_{fe}) R_L$
エ	$\frac{(1 + h_{fe}) R_L}{h_{ie} + (1 + h_{fe}) R_L}$
オ	$-(R_g + h_{ie})$
カ	$\frac{R_g + h_{ie}}{1 + h_{fe}}$

※解答には式の導出や計算の過程を省略せずに記述すること。また、必要に応じて適切な単位をつけること。

問 5 図 5 の回路について、以下の問いに答えよ。

[9 点 + 6 点 = 15 点]

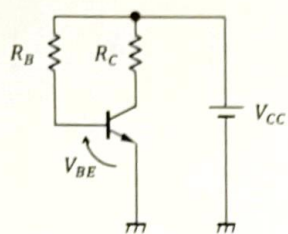


図 5 固定バイアス回路

(1) 遮断電流を考慮し、図 5 に流れるコレクタ電流 I_C の式を I_{CBO} , V_{BE} , h_{FE} の関数で表せ。 [9 点]

遮断電流を考慮したコレクタ電流は、

$$I_C = h_{FE} I_B + (1 + h_{FE}) I_{CBO} \quad (1)$$

回路に KVL を適用すると、

$$V_{CC} = R_B I_B + V_{BE} \quad (2)$$

(2) を I_B について整理すると、

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} \quad (3)$$

(3) を (1) に代入すると、

$$\therefore I_C = h_{FE} \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} + (1 + h_{FE}) I_{CBO} \quad (4)$$

(2) 安定係数 S_1, S_2, S_3 を求めよ。

[6 点]

$$S_1 = \frac{\partial I_C}{\partial I_{CBO}} = 1 + h_{FE}$$

$$S_2 = \frac{\partial I_C}{\partial V_{BE}} = -\frac{h_{FE}}{R_B}$$

$$S_3 = \frac{\partial I_C}{\partial h_{FE}} = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} + I_{CBO}$$

問 6 図 6 の回路について、以下の問いに答えよ。

[5 点 × 3 = 15 点]

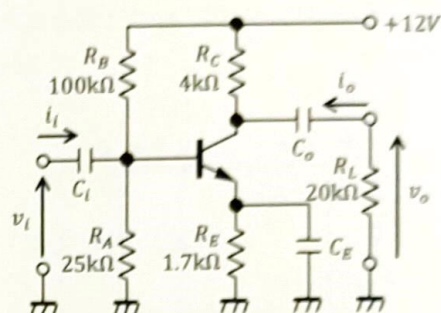
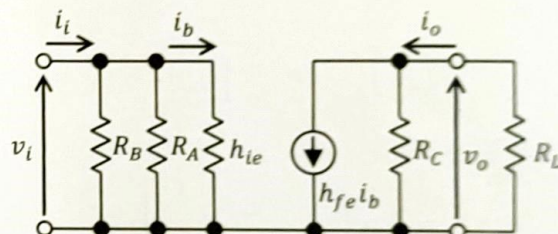


図 6 エミッタ接地増幅回路

(1) 図 6 のトランジスタを簡略化した h 定数等価回路に置き換えた交流等価回路を下図に書き足して示せ。ただし、 C_i, C_o, C_E の容量は十分大きく、入力信号周波数におけるインピーダンスは極めて小さいものとする。 [5 点]



(2) 図 6 の回路の A_v および R_i を計算せよ。ただし、 $h_{ie} = 5 \text{ k}\Omega$, $h_{fe} = 240$ とする。 [5 点 × 2 = 10 点]

$$\begin{aligned} A_v = \frac{v_o}{v_i} &= \frac{-h_{fe} i_b (R_C // R_L)}{h_{ie} i_b} = -\frac{h_{fe}}{h_{ie}} \cdot \frac{R_C R_L}{R_C + R_L} \\ &= -\frac{240}{5} \cdot \frac{4 \cdot 20}{4 + 20} \\ &= -160 \end{aligned}$$

$$R_{BB} = \frac{R_A R_B}{R_A + R_B} = \frac{100 \cdot 25}{100 + 25} \cdot 10^3 = 20 \text{ k}\Omega$$

$$\begin{aligned} R_i = \frac{v_i}{i_i} &= \frac{(R_{BB} // h_{ie}) i_i}{i_i} = \frac{R_{BB} h_{ie}}{R_{BB} + h_{ie}} \\ &= \frac{20 \cdot 5}{20 + 5} \cdot 10^3 = 4 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

※解答には式の導出や計算の過程を省略せずに記述すること。また、必要に応じて適切な単位をつけること。

問1 図1について、以下の問いに答えよ。

[5x3=15 点]

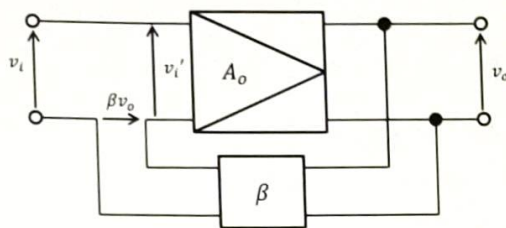


図1 負帰還増幅回路

(1) 負帰還回路としての増幅度 A_f を求めよ。

$$v_o = A_o v_i' = A_o (v_i - \beta v_o)$$

$$(1 + A_o \beta) v_o = A_o v_i$$

$$\therefore A_f = \frac{v_o}{v_i} = \frac{A_o}{1 + A_o \beta} //$$

(2) 図1の負帰還増幅回路が持続発振(不安定)になる条件とその理由を答えよ。

条件

$$A_o \beta = -1 \text{ のとき}$$

理由

$$A_f \rightarrow \infty \text{ となり増幅度が発散してしまうため}$$

(3) 図1のような負帰還増幅回路の安定性を定量的に評価する指標の名称を2つ答えよ。

位相余裕, 利得余裕

問2 図2は負帰還のかかっていない増幅回路の周波数特性を示している。この増幅回路に帰還率 $\beta = 0.0009$ の負帰還をかけたときについて、以下の問いに答えよ。

[5x3=15 点]

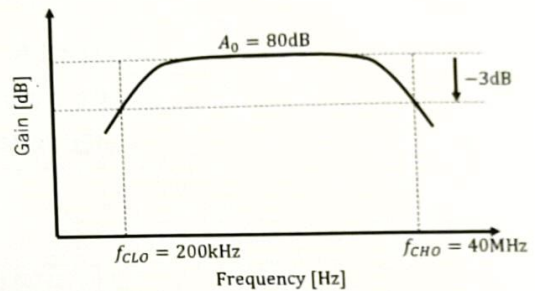


図2 増幅回路の周波数特性(負帰還なし)

(1) 増幅度 A_f [dB] を求めよ。

$$\begin{aligned} A_f &= \frac{A_o}{1 + A_o \beta} = \frac{10000}{1 + 10000 \cdot 0.0009} \\ &= \frac{10000}{1 + 9} \\ &= 1000 \text{ [倍]} \\ &= 60 \text{ [dB]} \end{aligned}$$

(2) 帰還量 F [dB] を求めよ。

$$\begin{aligned} F &= 20 \log_{10} |1 + A_o \beta| \\ &= 20 \log_{10} |10| \\ &= 20 \text{ [dB]} \end{aligned}$$

(3) 低域遮断周波数 f_{CLF} を求めよ。

$$f_{CLF} = \frac{f_{cLO}}{F} = \frac{200 \text{ k}}{10} = 20 \text{ kHz}$$

※解答には式の導出や計算の過程を省略せずに記述すること。また、必要に応じて適切な単位をつけること。

問3 図3は低域周波数領域におけるCR結合増幅回路の小信号等価回路である。図3について、以下の問いに答えよ。

[7×3=21 点]

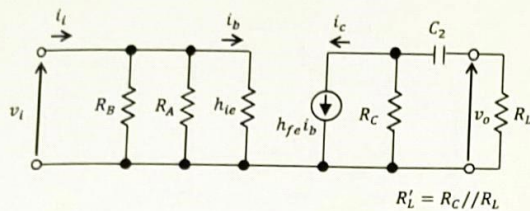


図3 低域周波数領域における小信号等価回路

(1) C_2 を短絡した場合の増幅度 $A_v = v_o/v_i$ を求めよ。

$$v_o = -h_{fe}i_b R'_L,$$

$$v_i = h_{ie}i_b \text{ より,}$$

$$\therefore A_v = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{h_{fe}}{h_{ie}} R'_L$$

(2) C_2 を考慮した増幅度 $A_{v2} = v_o/v_i$ を求めよ。

$$v_o = -\frac{R_C}{R_C + R_L + \frac{1}{j\omega C_2}} i_c R_L$$

$$= -\frac{1}{1 + \frac{1}{j\omega C_2(R_C + R_L)}} i_c \frac{R_C R_L}{R_C + R_L}$$

$$= -\frac{1}{1 + \frac{1}{j\omega C_2(R_C + R_L)}} h_{fe}i_b R'_L,$$

$$v_i = h_{ie}i_b \text{ より,}$$

$$\therefore A_{v2} = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-\frac{h_{fe}}{h_{ie}} R'_L}{1 + \frac{1}{j\omega C_2(R_C + R_L)}} = \frac{A_v}{1 + \frac{1}{j\omega C_2(R_C + R_L)}}$$

(3) $|A_{v2}| = |A_v|/\sqrt{2}$ となる低域遮断周波数 f_{CL} を求めよ。

$$A_{v2} = \frac{A_v}{1 + \frac{1}{j\omega C_2(R_C + R_L)}} = \frac{A_v}{1 - j\frac{\omega_{CL}}{\omega}} \text{ より,}$$

$$\omega = \omega_{CL} = \frac{1}{C_2(R_C + R_L)} \text{ のときに } |A_{v2}| = \frac{|A_v|}{\sqrt{2}} \text{ となる.}$$

$$\therefore f_{CL} = \frac{1}{2\pi C_2(R_C + R_L)}$$

問4 図4は高域周波数領域におけるCR結合増幅回路の小信号等価回路である。図4について、以下の問いに答えよ。

[7×2=14 点]

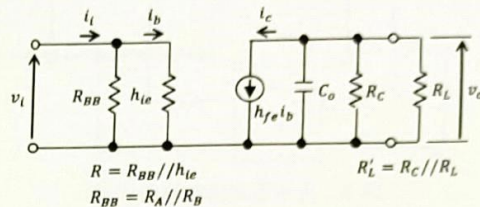


図4 高域周波数領域における小信号等価回路

(1) 増幅度 $A_{vh} = v_o/v_i$ を求めよ。なお、中域周波数領域の増幅度 A_v は C_o を開放した場合の増幅度と等しいものと考えよ。

C_o を開放した場合の回路は問1(1)と等価である。

したがって、 C_o を考慮した増幅度は、

$$v_o = -h_{fe}i_b \frac{R'_L \cdot \frac{1}{j\omega C_o}}{\frac{1}{j\omega C_o} + R'_L}$$

$$= -h_{fe}i_b \frac{R'_L}{1 + j\omega C_o R'_L}$$

$$v_i = h_{ie}i_b \text{ より,}$$

$$\therefore A_{vh} = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{h_{fe}}{h_{ie}} R'_L \frac{1}{1 + j\omega C_o R'_L}$$

$$= \frac{A_v}{1 + j\omega C_o R'_L}$$

(2) $|A_{vh}| = |A_v|/\sqrt{2}$ となる高域遮断周波数 f_{CH} を求めよ。

$$A_{vh} = \frac{A_v}{1 + j\omega C_o R'_L} = \frac{A_v}{1 + j\frac{\omega}{\omega_{CH}}} \text{ より,}$$

$$\omega = \omega_{CH} = \frac{1}{C_o R'_L} \text{ のときに } |A_{vh}| = \frac{|A_v|}{\sqrt{2}} \text{ となる.}$$

$$\therefore f_{CH} = \frac{1}{2\pi C_o R'_L}$$

※解答には式の導出や計算の過程を省略せずに記述すること。また、必要に応じて適切な単位をつけること。

問5 図5について、以下の問いに答えよ。 [7x3=21点]

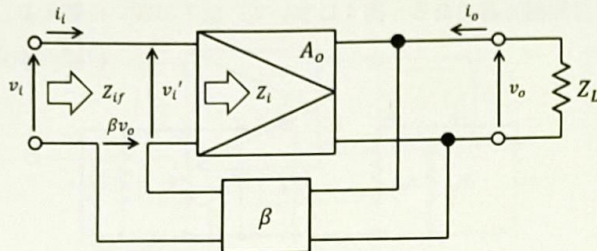


図5 負帰還増幅回路の原理

(1) A_f の変化の割合 dA_f/A_f を求め、負帰還によって増幅度 A_o の変化の割合がどれくらい減少するかを式で示せ。

$$A_f = \frac{A_o}{1 + A_o\beta} \text{ より, } A_f \text{ を } A_o \text{ の変数と考えると,}$$

$$\frac{dA_f}{dA_o} = \frac{1}{(1 + A_o\beta)^2} = \frac{1}{1 + A_o\beta} \cdot \frac{A_f}{A_o} \text{ である.}$$

$$\therefore \frac{dA_f}{A_f} = \frac{1}{1 + A_o\beta} \cdot \frac{dA_o}{A_o} \quad //$$

負帰還によって dA_o/A_o が $1/(1 + A_o\beta)$ に減少する

(2) 入力インピーダンス Z_{if} を求め、負帰還によって増幅器の入力インピーダンス Z_i がどれくらい変化するかを式で示せ。

$$v_i' = v_i - \beta \cdot \frac{A_o}{1 + A_o\beta} \cdot v_i \text{ より,}$$

$$v_i = (1 + A_o\beta)v_i'$$

$$\therefore Z_{if} = \frac{v_i}{i_i} = \frac{(1 + A_o\beta)v_i'}{i_i} = (1 + A_o\beta)Z_i$$

負帰還によって Z_i が $(1 + A_o\beta)$ 倍に増加

(3) 増幅器の出力に雑音電圧 v_n が $v_o = A_o v_i' + v_n$ として混入する場合の出力電圧 v_o を求め、負帰還によって雑音電圧 v_n がどれくらい変化するかを式で示せ。

$$v_o = A_o v_i' + v_n \text{ に } v_i' = v_i - \beta v_o \text{ を代入すると,}$$

$$v_o = A_o(v_i - \beta v_o) + v_n$$

$$\therefore v_o = \frac{A_o}{1 + A_o\beta} v_i + \frac{1}{1 + A_o\beta} v_n \quad //$$

負帰還によって v_n が $1/(1 + A_o\beta)$ に低減

問6 図6の回路について、以下の問いに答えよ。

[7x2=14点]

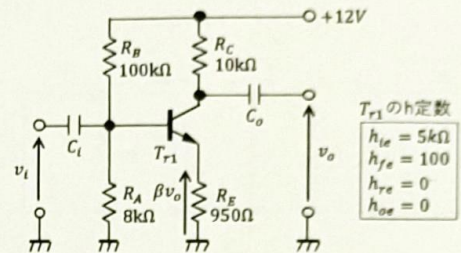
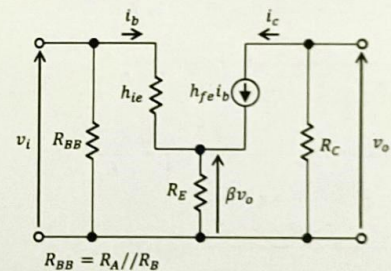


図6 エミッタ接地増幅回路(直列帰還直列注入形)

(1) 負帰還をかけないときの増幅度 A_o および帰還率 β を計算せよ。なお、位相反転を意味するマイナス符号を考慮して計算すること。ただし、結合コンデンサのインピーダンスは無視してよい。

図6より、簡略化したh定数等価回路を求める。



A_o は $R_E = 0$ における増幅度であるので、

$$\therefore A_o = -\frac{h_{fe}}{h_{ie}} R_C = -\frac{100}{5} \cdot 10 = -200$$

帰還率 β は、

$$\therefore \beta = \frac{\beta v_o}{v_o} = \frac{(1 + h_{fe})i_b R_E}{-h_{fe} i_b R_C} = -\frac{R_E}{R_C} = -\frac{0.95}{10} = -0.095$$

(2) A_o と β を用いて A_f を計算せよ。なお、位相反転を意味するマイナス符号を考慮して計算すること。

$$\begin{aligned} \therefore A_f &= \frac{A_o}{1 + A_o\beta} \\ &= \frac{-200}{1 + (-200) \cdot (-0.095)} \\ &= \frac{-200}{1 + 19} \\ &= -10 \end{aligned}$$