

# トランジスタ増幅回路設計入門

Copyright by Kimio Kosaka

2005.11.06

## 1. 等価回路について

トランジスタの動作は図2のように非線形なので、その動作を簡単な数式で表すことができない。しかし、アナログ信号を扱う回路では、特性グラフの直線部分に動作点を置くので線形のパラメータにより、その動作を簡単な数式（一次式）で表すことができる。

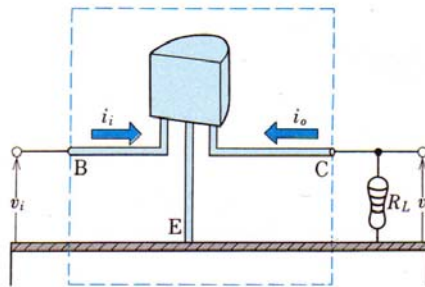


図 1

## 2. h パラメータ

トランジスタの各静特性の直線部分の傾きを数値として特性を表したものがh定数(hパラメータ)である。図2に示されている4つの特性曲線において、

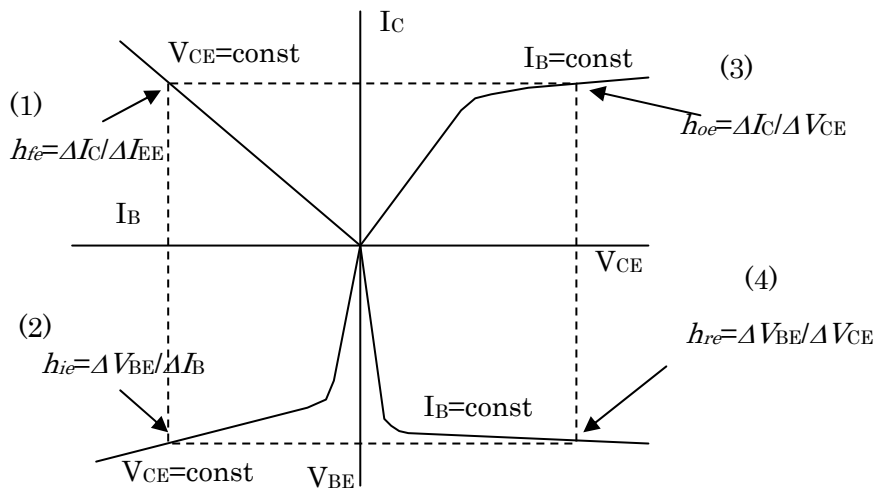


図 2

(1)  $I_B$ - $I_C$  曲線の直線部の傾きを電流増幅率  $h_{fe}$  という。添え字の f は forward(順方向)の意味, e はエミッタ接地の意味である。

(2)  $V_{BE}$ - $I_B$  特性の傾きが入力インピーダンス  $h_{ie}$  である。添え字 I は input(入力)を表す。

(3) VCE-IC 特性の傾きが出力コンダクタンス  $h_{oe}$  である。添え字 o は output (出力) を意味する。

(4) VCE-VBE 特性の傾きが電圧帰還率  $h_{re}$  である。添え字 r は reverse (逆) を表す。

$h$  定数の値は、トランジスタの種類によって異なるばかりでなく、同一のトランジスタでも、IC, VCE, 周辺温度によっても変わり、さらに製品のばらつきも見られる。

これらの  $h$  パラメータを用いると、トランジスタは、四端子回路網 (図 3-a) として表すことができる。

入力端の電圧を  $v_i$ 、電流を  $i_b$ 、出力端の電圧を  $v_o$ 、電流  $i_c$  とすると、その関係式は、

$$\begin{aligned} v_i &= h_{ie}i_b + h_{re}v_o \\ i_c &= h_{fe}i_b + h_{oe}v_o \end{aligned} \quad \text{行列を用いて表せば} \quad \begin{pmatrix} v_i \\ i_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{ie} & h_{re} \\ h_{fe} & h_{oe} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_b \\ v_o \end{pmatrix}$$

となる。

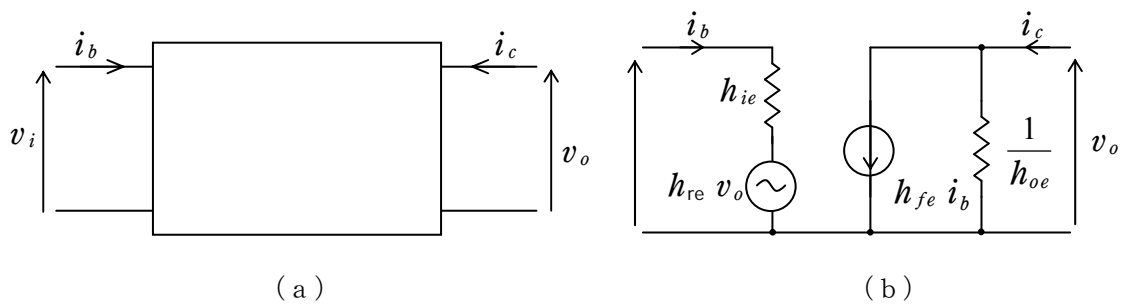


図 3

これを回路で表すと、図 3-b のようになる。これを等価回路という。

しかし、実際には、エミッタ接地トランジスタ回路は、電圧帰還率  $h_{re}$ 、出力コンダクタンス  $h_{oe}$  は、ほとんど 0 となるので、図 4 のような等価回路を用いてもよい。

$$\begin{aligned} v_i &= h_{ie}i_b + 0v_o && \rightarrow && v_i = h_{ie}i_b && \dots \dots \dots \textcircled{1} \\ i_c &= h_{fe}i_b + 0v_o && && i_c = h_{fe}i_b && \end{aligned}$$

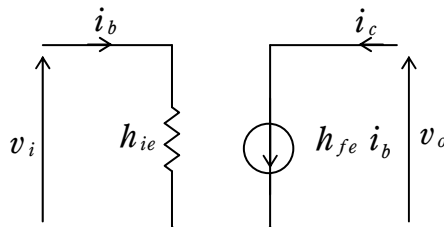


図 4

3. 電圧増幅回路

電圧増幅回路とは、入力に与えられた電圧  $v_i$  の  $A_v$  倍の電圧  $v_o$  を出力する回路である。

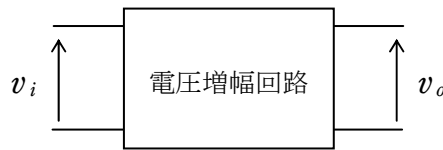


図 5

この  $A_v$  を電圧増幅度という。

$$A_v = \frac{v_o}{v_i}$$

増幅度は  $v_i$  と  $v_o$  の対数比を用いた値 dB (デシベル) で扱うことが多い。  $A_v$  をデシベルで表す場合は、

$$A_v = 20 \log_{10} \frac{v_o}{v_i} \text{ [dB]}$$

となる。

増幅度 10 倍は何デシベルか

$$\frac{v_o}{v_i} = 10$$

$$A_v = 20 \log_{10} 10$$

$$= 20 \times 1$$

$$= 20 \text{ [dB]}$$

増幅度 6 [dB]は何倍か

$$6 = 20 \log_{10} \frac{v_o}{v_i}$$

$$\log_{10} \frac{v_o}{v_i} = \frac{6}{20} = 0.3$$

$$\frac{v_o}{v_i} = 10^{0.3}$$

$$= 2 \text{ [倍]}$$

4. 電流増幅回路, 電力増幅回路



図 6

電流を増幅する回路を電流増幅回路という。電流増幅度  $A_i$  [dB] は次式となる。

$$A_i = 20 \log_{10} \frac{i_o}{i_i} \text{ [dB]}$$

電流増幅回路のうち、特に大電流を取り出し負荷 (スピーカなど) に電力を供給するものを電力増幅回路という。電力増幅度  $A_p$  [dB] は次式となる。

$$A_p = 10 \log_{10} \frac{p_o}{p_i} = 10 \log_{10} \frac{v_o i_o}{v_i i_i} = 10 \left( \log_{10} \frac{v_o}{v_i} + \log_{10} \frac{i_o}{i_i} \right) \text{ [dB]}$$

5. バイアス回路

増幅回路を構成する場合、トランジスタの特性の直線部分に動作点を置く。この動作点を決定するのがバイアス回路である。エミッタ接地増幅回路ではバイアス回路には次の3つがある。

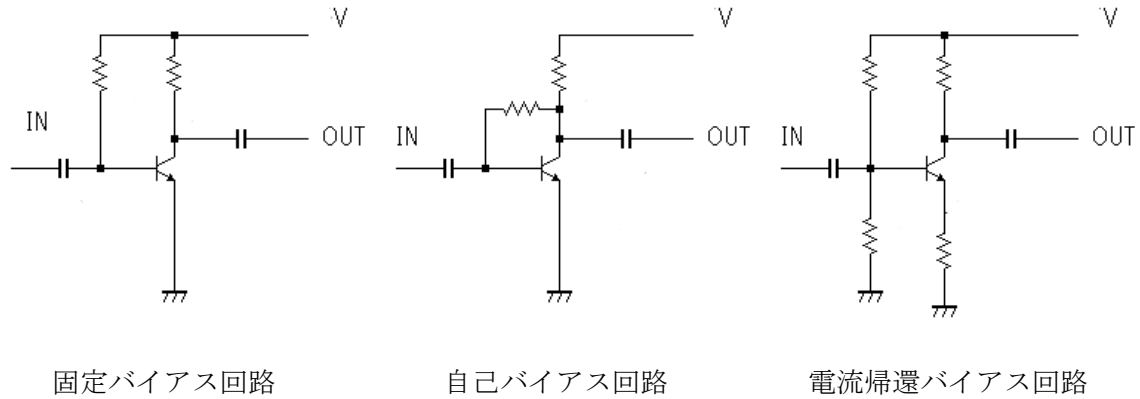


図 7

実用機器において、最も多用されるのが電流帰還バイアス回路である。流帰還バイアス回路は、他の回路に比べて「動作が安定している」「トランジスタの特性のバラツキの影響が小さい」という利点がある。

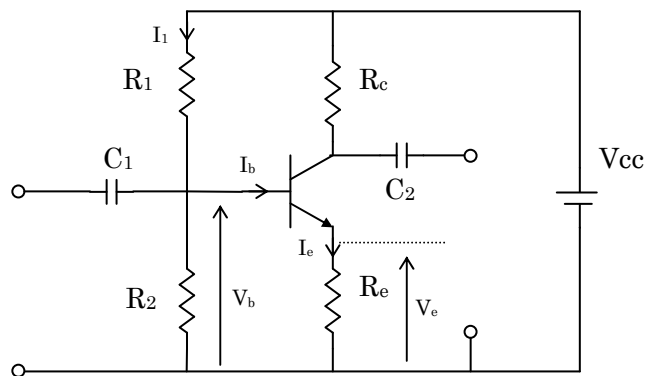


図 8

図 8 において、トランジスタの動作点を決めるのはベースの直流電流  $I_b$  である。この電流  $I_b$  をバイアス電流という。  $I_b$  はベースの電位  $V_b$  とエミッタの電位  $V_e$  の差（電位差  $V_{be}$ ）で決まる。適切な  $V_b$  を与えるため設けられた抵抗  $R_1$  ,  $R_2$  をバイアス抵抗という。

## トランジスタ増幅回路の設計

一般に、電子回路等の教科書では、トランジスタの特性曲線にロードライン（負荷線）を描いて動作点を決めた後、回路の各定数を求める方法が掲載されているが、ここでは、特性曲線やロードラインなどを用いずに設計する方法を習得する。図9が今回設計する回路である。

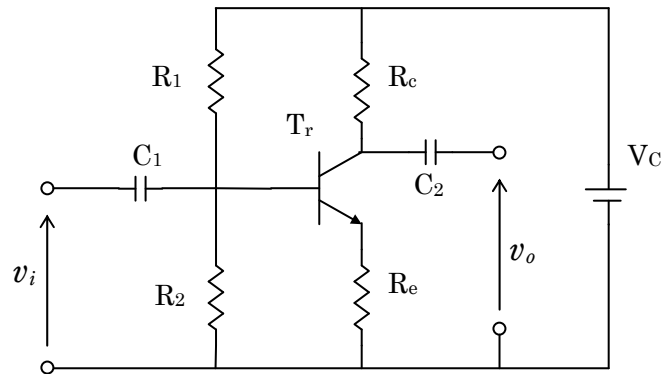


図9

## 1. 交流等価回路

設計に先だて、この回路の増幅度がどのような要素によって決定されるか考察する。交流信号に対して回路がどうふるまうかを表したものが交流等価回路である。

交流等価回路を考えたときの原則

- (1) 直流電源は短絡する。
- (2) コンデンサは短絡する。
- (3) バイアス回路は無視する。

(1)～(3)を適用すると交流等価回路は図10-aとなる。

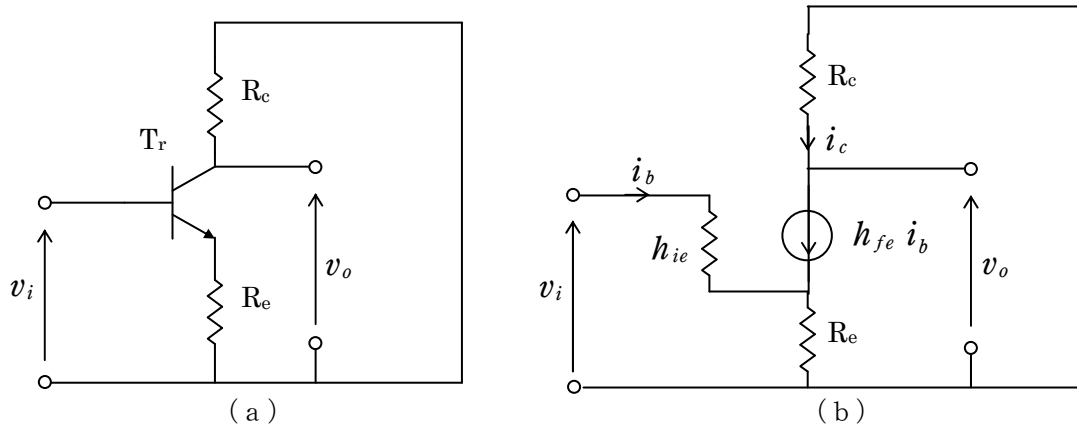


図10

さらに、トランジスタの部分に2ページの図4を適用すると図10-bとなる。この回路を用いて交流信号に対する動作を考察する。

## 2. 電圧増幅度

図10-bより、入力電圧 $v_i$ は

$$\begin{aligned} v_i &= h_{ie} i_b + R_e i_e \\ i_e &= i_b + i_c \end{aligned}$$

$i_c \gg i_b$ であるから、 $i_e = i_c$ と考えてよい。したがって、

$$v_i = h_{ie} i_b + R_e i_c \quad \dots \dots \dots \textcircled{2}$$

2ページ式①  $i_c = h_{fe} i_b$  を代入すると

$$\begin{aligned} v_i &= h_{ie} i_b + R_e h_{fe} i_b \\ &= i_b (h_{ie} + R_e h_{fe}) \end{aligned}$$

出力電圧 $v_o$ は

$$v_o = R_c i_c = R_c h_{fe} i_b$$

よって、電圧増幅度 $A_v$ は

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{R_c h_{fe} i_b}{i_b (h_{ie} + R_e h_{fe})}$$

一般に $h_{ie} \ll R_e h_{fe}$ であるから

$$A_v = \frac{R_c h_{fe} i_b}{R_e h_{fe} i_b} = \frac{R_c}{R_e}$$

## 3. 設計仕様

電子回路に限らず、工業製品を設計する場合、どのような条件でどのような性能をもたせるかあらかじめ決めておく必要がある。これを「仕様」という。

今回の授業では次の仕様で回路を設計する。

- ・ 電流帰還バイアス方式トランジスタ電圧増幅回路
- ・ 使用トランジスタ 2SC1815
- ・ 増幅度 5 [倍] 程度
- ・ 入力信号電圧  $1V_{p-p}$
- ・ 低域しや断周波数 20 [Hz] 以下
- ・ 高域しや断周波数 特に定めない

4.  $R_e$ ,  $R_c$  を求める

(1)  $I_c$  の決定

まず、アイドル電流  $I_c$  を決める。一般に、小信号電圧増幅回路では  $I_c$  を 1[mA]～10[mA]程度とする。 $I_c$  が大なるとき高域まで増幅できるが消費電力は大きく、小なるときは電力消費の少ない省エネ向けの設計となるが高域特性が劣化する。

ここでは、 $I_c$  を 2[mA]とする。

(2)  $R_e$  を求める

通常、 $R_e$ の両端の電圧  $V_e$  (エミッタの電位) を 1[V]～2[V]の間におく。ここでは  $V_e = 1$  [V]とする。図 10においてオームの法則から、

$$R_e = \frac{V_e}{I_c} = \frac{1}{2 \times 10^{-3}} = 500 [\Omega]$$

しかし、500[Ω]という抵抗は標準品には無いので、E24 系列で近い値 510[Ω] を用いる。

(3)  $R_c$  を求める

$$A_v = \frac{R_c}{R_e}$$

$$R_c = A_v R_e = 5 \times 510 = 2550 [\Omega]$$

E24 系列の近似値 2.7[kΩ] とする。

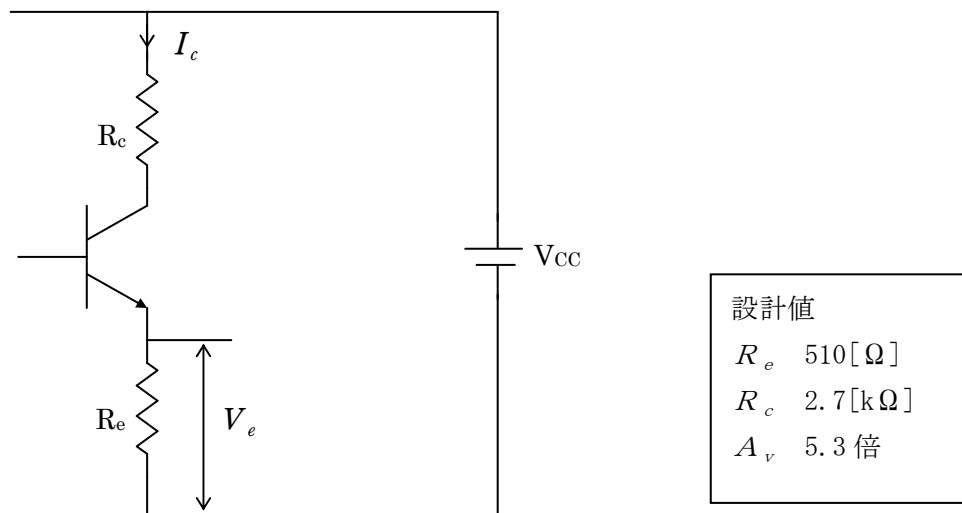


図 10

E 系列表

E-12	1.0	1.2	1.5	1.8	2.2	2.7	3.3	3.9	4.7	5.6	6.8	8.2
E-24	1.0	1.1	1.2	1.3	1.5	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.7	3.0
	3.3	3.6	3.9	4.3	4.7	5.1	5.6	6.2	6.8	7.5	8.2	9.6

5. 電源電圧  $V_{c.c}$  を決める。

図 1 1 - a において、直流電圧  $V_c$ 、 $V_e$  はオームの法則より、有効数字 2 桁で求めると、

$$V_c = I_c R_c = 2 \times 10^{-3} \times 2.7 \times 10^3 = 5.4 [\text{V}]$$

$$V_e = I_c R_e = 2 \times 10^{-3} \times 510 = 1.0 [\text{V}]$$

また、 $R_c$  両端に現れる交流電圧の最大値  $v_c$ 、 $R_e$  両端に現れる交流電圧最大値  $v_e$  は

$$v_c = A_v v_i$$

6 ページ②式より

$$v_i = h_{ie} i_b + R_e i_c$$

$$h_{ie} i_b \ll R_e i_c \text{ であるから}$$

$$v_i = R_e i_c$$

$$= v_e$$

仕様より、入力電圧は  $1 \text{V}_{p.p}$  であるから、その最大値は  $0.5 [\text{V}]$  である。よって、

$$v_e = 0.5 [\text{V}]$$

$$v_c = 5.3 \times 0.5 = 2.7 [\text{V}]$$

となる。

直流電圧と交流電圧は図 1 1 - b のような関係となる。(電圧バランス図)

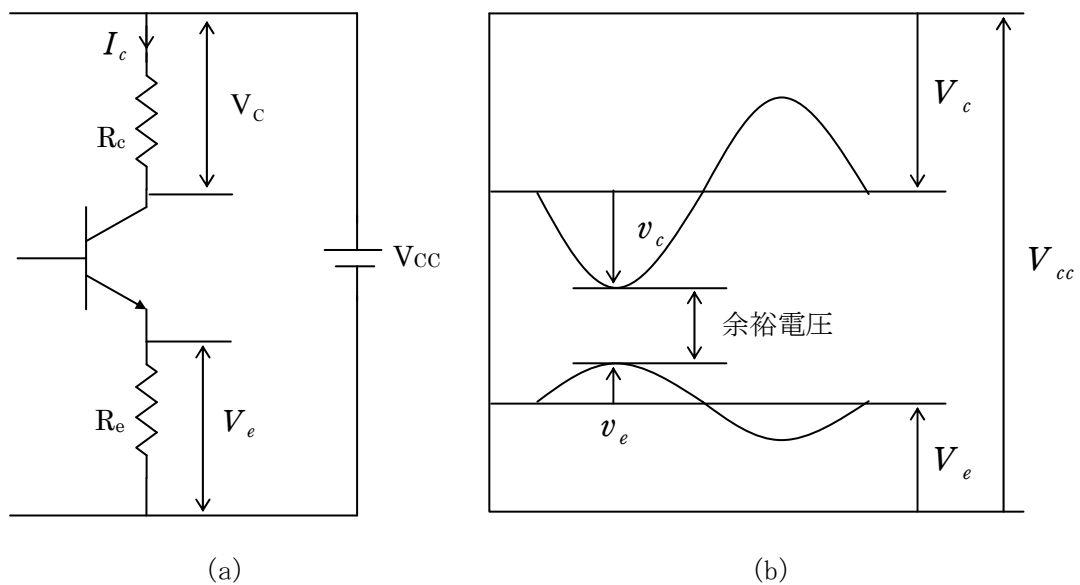


図 1 1



図 1 1—b から電源電圧  $V_{CC}$  を次のように求める。

$$\begin{aligned} V_{CC} &= V_c + v_c + V_e + v_e + \text{余裕電圧} \\ V_{CC} &= 5.4 + 2.7 + 1.0 + 0.5 + \text{余裕電圧} \\ &= 9.6 + \text{余裕電圧} \\ &\quad \text{余裕電圧を } 2.4[\text{V}] \text{ に取り} \\ V_{CC} &= 9.6 + 2.4 = 12.0 [\text{V}] \end{aligned}$$

とする。

6. バイアス抵抗  $R_1$ ,  $R_2$  を求める。

図 1 2 においてトランジスタのベース電圧  $V_b$  にはコレクタ電圧  $V_c$  より 0.6[V] 高い電圧を供給する。この 0.6[V] はシリコン結合型トランジスタにおいて  $I_b$  を流すとき、ベース—エミッタ間に 0.6[V] 程度の電位差が必要なためである。

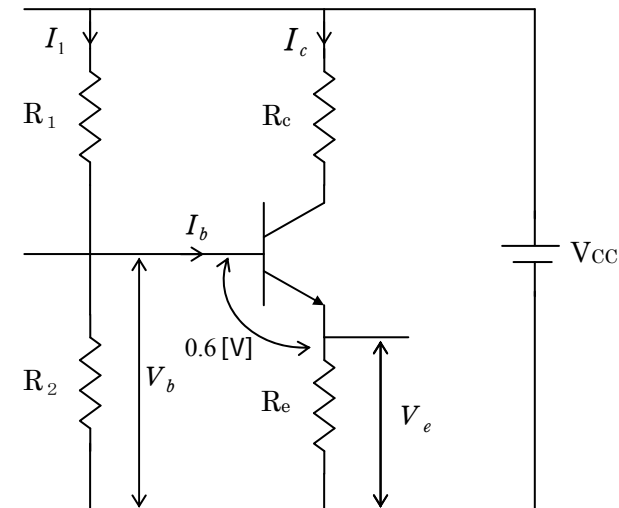


図 1 2

バイアス抵抗  $R_1$ ,  $R_2$  に流す電流  $I_1$  が小さいと、回路の動作が不安定になる。 $I_1$  は経験則上  $I_b$  の 10 倍以上とする。ここで、 $I_b$  は、 $I_c = h_{fe} I_b$  より

$$I_b = \frac{I_c}{h_{fe}}$$

この式に  $I_c$  にアイドル電流 2[mA],  $h_{fe}$  には、小信号用トランジスタの一般的な値 200 を代入する。

$$I_b = \frac{2 \times 10^{-3}}{200} = 1 \times 10^{-5} [\text{A}] = 10 [\mu\text{A}]$$

$I_b$  をある程度厳密に求めたい場合は、使用するトランジスタの規格表を調べ、その  $h_{fe}$  の平均的な値を用いればよい

$I_1$  を  $I_c$  の 10 倍として

$$I_1 = 10 [\mu\text{A}] \times 10 = 100 [\mu\text{A}]$$

を得る。

(1)  $R_2$  を求める。

$V_b = R_2 I_1$  であるから、

$$R_2 = \frac{V_b}{I_1} = \frac{1.6}{100 \times 10^{-6}} = 1.6 \times 10^4 [\Omega] = 16 [\text{K}\Omega]$$

(2)  $R_1$  を求める。

$R_1$  両端の電圧は  $V_{cc} - V_b = R_1 I_1$  であるから、

$$R_1 = \frac{V_{cc} - V_b}{I_1} = \frac{12 - 1.6}{100 \times 10^{-6}} = 104 \times 10^3 [\Omega] = 100 [\text{K}\Omega]$$

7. コンデンサ  $C_1$ ,  $C_2$  を求める。

$C_1$ ,  $C_2$  は結合コンデンサと呼ばれ、増幅回路入力出力端に設けられる。このコンデンサは外部からの直流分（直流電流）をカットし交流分のみを通過させるためのものである。

入力側の回路を見ると図 1 3 となっている。この回路はハイパスフィルタと呼ばれる回路で、高い周波数の交流分はよく通過させるが、低い周波数の交流分は通過させにくい性質を持っている。

いま、入力電圧  $v_1$  の周波数を  $f$  [Hz] とすると、回路のインピーダンス  $\dot{Z}$  は

$$\dot{Z} = R - j \frac{1}{2\pi f C_1}$$

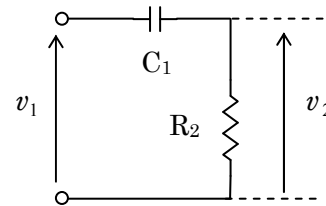


図 1 3

回路を流れる電流  $\dot{I}$  は

$$\dot{I} = \frac{\dot{V}_1}{\dot{Z}} = \frac{\dot{V}_1}{R_2 - j \frac{1}{2\pi f C_1}}$$

$R_2$  両端の電圧は

$$\dot{V}_2 = \dot{I} R_2 = \frac{\dot{V}_1 R_2}{R_2 - j \frac{1}{2\pi f C_1}}$$

ここで、 $\frac{|\dot{V}_2|}{|\dot{V}_1|}$ が $\frac{1}{\sqrt{2}}$ となる周波数を低域しや断周波数という。低域しや断周波数を $f_L$  [Hz]とすると

$$\begin{aligned}\frac{\dot{V}_2}{\dot{V}_1} &= \frac{R_2}{R_2 - j\frac{1}{2\pi f_L C_1}} \\ &= \frac{1}{1 - j\frac{1}{2\pi f_L C_1 R_2}} \\ \frac{|\dot{V}_2|}{|\dot{V}_1|} &= \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{1^2 + \left(\frac{1}{2\pi f_L C_1 R_2}\right)^2}}\end{aligned}$$

$$\sqrt{2} = \sqrt{1^2 + \left(\frac{1}{2\pi f_L C_1 R_2}\right)^2}$$

$$2 = 1 + \left(\frac{1}{2\pi f_L C_1 R_2}\right)^2$$

$$1 = \left(\frac{1}{2\pi f_L C_1 R_2}\right)^2$$

$$f_L^2 = \left(\frac{1}{2\pi C_1 R_2}\right)^2$$

$$f_L = \frac{1}{2\pi C_1 R_2} = \frac{1}{2\pi R_2 C_1}$$

となる。

$C_1$ を求める。仕様で低域しや断周波数 $f_L$ は20[Hz]以下と定められており、 $R_2$ は16[K $\Omega$ ]と設計したので、

$$20 = \frac{1}{2\pi \times 16 \times 10^3 C_2}$$

$$C_1 = \frac{1}{2\pi \times 16 \times 10^3 \times 20} = 5 \times 10^{-7} = 0.5 [\mu\text{F}]$$

したがって、 $C_1$ には0.5[ $\mu\text{F}$ ]以上のコンデンサを用いれば仕様を満足することとなる。E12系列の近似値は0.56，E24系列の近似値は0.51となるが標準部品にはこのような値はない。ここでは、標準部品とし大量に供給されている1[ $\mu\text{F}$ ]を用いる。

$C_2$ の後段にはどのような負荷（抵抗）が接続されるか不明であるが、入力段と同じと考えて1[ $\mu\text{F}$ ]とする。

以上で回路設計は完了した。

## 8. 動作検証

設計した回路が正しく動作するか否かを検証する。20年くらい前は設計値を元に回路を試作して各種の測定を行い動作検証をしていた。現在は、電子回路シミュレーションソフトを用いて行う。電子回路シミュレーションソフトには色々なものがあるが、現在、最も使われているのが「SPICE」というソフトである。

SPICEは電子回路をテキストデータで表したネットリストを用いてシミュレーションを行う。しかし、複雑な回路をネットリストで表現するのは非常に手間なので、電子回路CADで入力した回路からネットリストを生成してSPICEでシミュレーションを行わせるのが一般的である。

今回はフリーウェア（無料ソフト）のLTspice/SwCadⅢを用いて検証する。  
LTspice/SwCadⅢの活用方法は別冊「LTspice/SwCadⅢ入門」により学習する。

## 9. 設計演習

次の仕様を満足する回路を設計しSPICEで動作検証せよ。

仕様

- 電流帰還バイアス方式トランジスタ電圧増幅回路
- 使用トランジスタ 2SC1815
- 増幅度 18～20 [dB]
- アイドル電流 2[mA], 3[mA], 5[mA], 7[mA], 8[mA], 10[mA]のうちから選ぶ。
- 入力信号電圧 100mV<sub>p-p</sub>
- 低域しゃ断周波数 10[Hz]以下
- 高域しゃ断周波数 特に定めない