

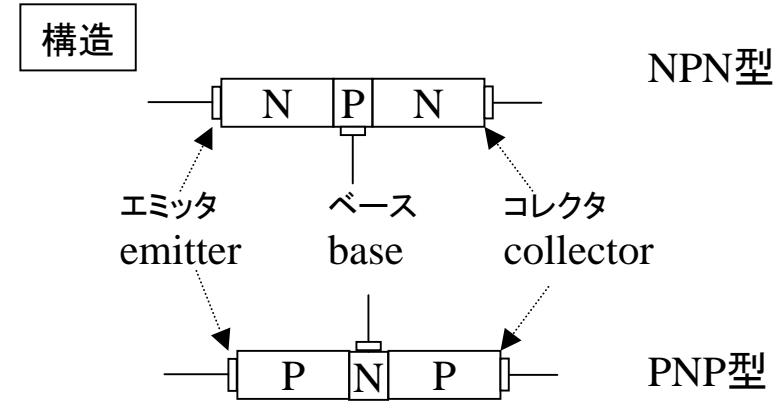
トランジスタ 1

- 1.原理
構造、動作
- 2.記号
- 3.特性
- 4.三つの代表的なトランジスタ回路
- 5.直流バイアス回路を加えた回路
直流分だけの回路
交流分だけの回路

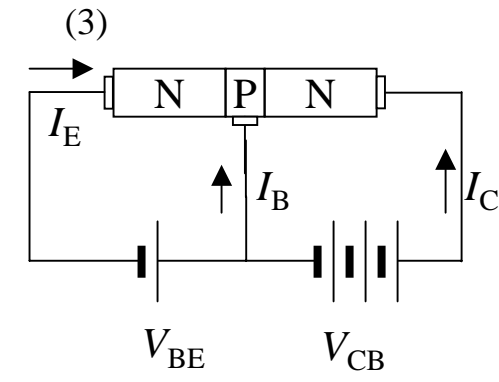
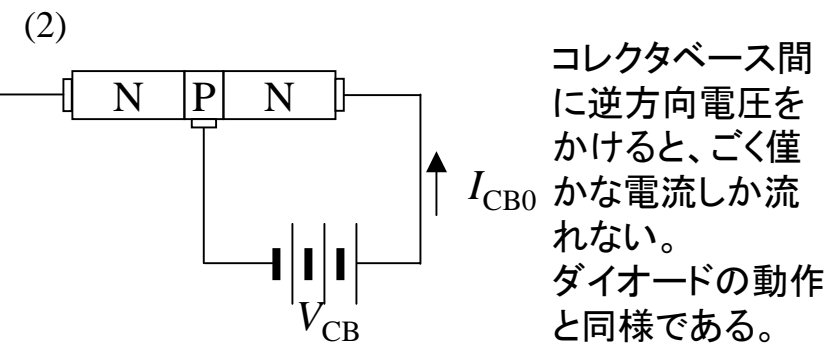
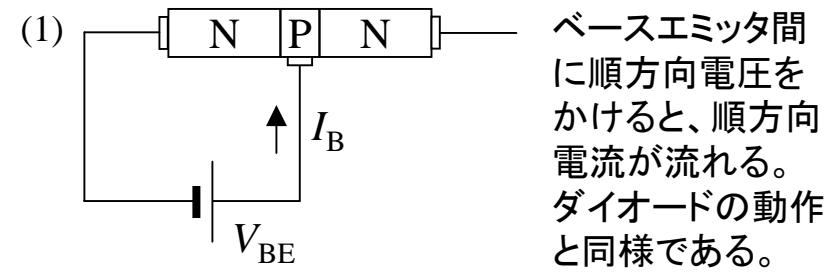
参考資料

時田元昭、「トランジスタと半導体」、電波新聞社
奥沢清吉、「ビギナートランジスタ読本」、誠文堂新光社
誠文堂新光社、「初歩のトランジスタ技術」
押本、小林、「トランジスタ回路計算法」、工学図書
電気工学ハンドブックおよびインターネット上の各種公開資料

1. トランジスタは二つのPN接合を結合した構造を持ち、NPN型とPNP型とがある

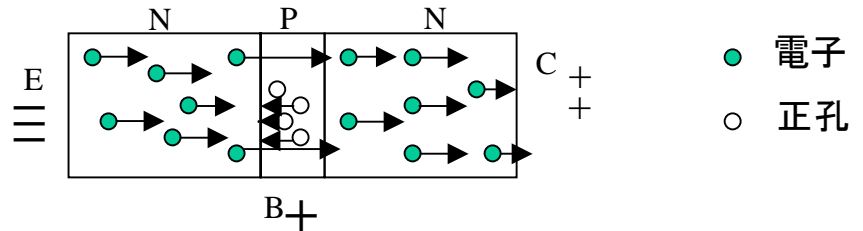


動作 NPNの例→PNPでは電流、電圧が逆向き。



BE間に順方向電圧、CB間に逆方向電圧をかけると、 $I_C \doteq -I_E, I_B \doteq 0$ となる。すなわち、Trに流れ込む向きを正として、

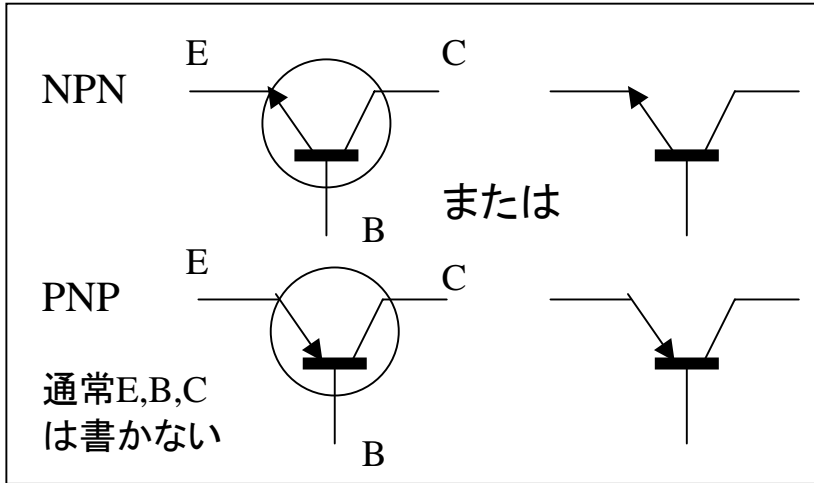
$(-I_E) = I_B + I_C$ であるが、 $I_C = \alpha(-I_E)$ の関係があり、 $I_B = (1-\alpha)(-I_E)$ となる。この比をとり、 $I_C / I_B = \frac{\alpha}{1-\alpha} \equiv \beta \rightarrow I_C = I_B \times \beta, \alpha = \frac{\beta}{1+\beta}$
 α は 0.98 ~ 0.99 ~ 0.995 などであるので β は 50 ~ 100 ~ 200 というような大きな値になる。



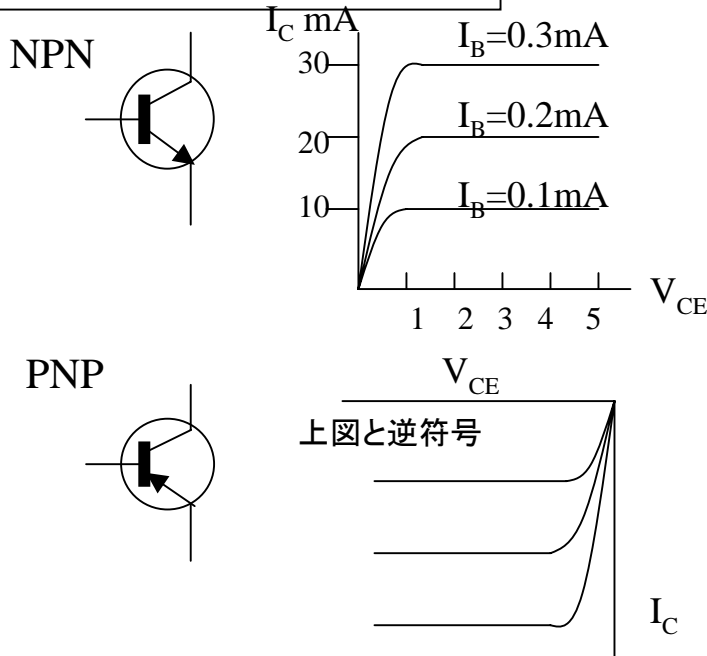
BE間の順方向電圧によってエミッタ側の電子はB方向に移動するが、コレクタ側の高電圧により、ベース部分を通り越してコレクタに向かいコレクタ電流となる。ベースには僅かな電流が流れる。このとき、 α, β はほぼ一定、すなわち、**ベース電流が増幅されコレクタ電流になるとみなせる。** $I_C = I_B \times \beta$

β は、 h_{FE}, h_{fe} とも表記する。

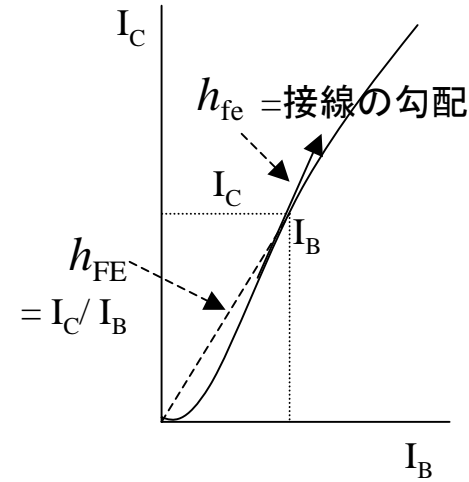
2. トランジスタの記号



3. トランジスタの特性の例



エミッタ接地(次頁)の電流増幅率



β には2種類ある。 h_{FE} と h_{fe} である。

h_{FE} = 直流増幅率 = I_C / I_B

h_{fe} = 小信号増幅率 = 接線の勾配

h_{FE} は、グラフ上の一点(I_C, I_B)に対して I_C / I_B の比で表す。

h_{fe} は、グラフ上の一点(I_C, I_B)における接線の勾配で表す。

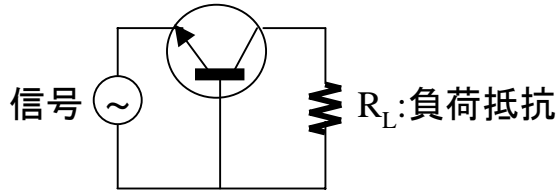
いずれも、どの点で測るかによって値が異なるので、正確には計量点を明示する必要がある。

点(I_C, I_B)をトランジスタの増幅作用の中心点とするには、予め与える直流電圧と電流(バイアスという)で決めるが、そのための、DC電源と抵抗器の組合せを**バイアス回路**と呼んでいる。

4. 三つの代表的なトランジスタ回路(NPNの場合)

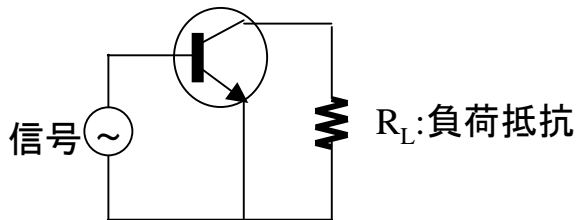
直流バイアス回路を無視した信号関連回路(次頁参照)

ベース接地回路



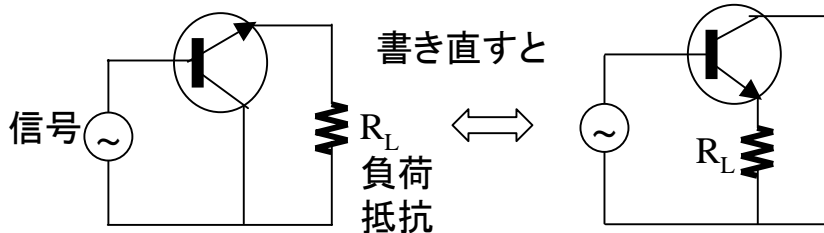
出力インピーダンス(出力側からトランジスタ側を見た値)が大きい。
大きな R_L が使えるので、電圧増幅ができる。
電流増幅はできない。 $|I_C/I_E| = \alpha \doteq 1$
入力インピーダンス(入力側からトランジスタ側を見た値)は低い。
入出力位相差は 0°
高周波特性が良い。
インピーダンス変換回路としても使用。

エミッタ接地回路(通常増幅回路)



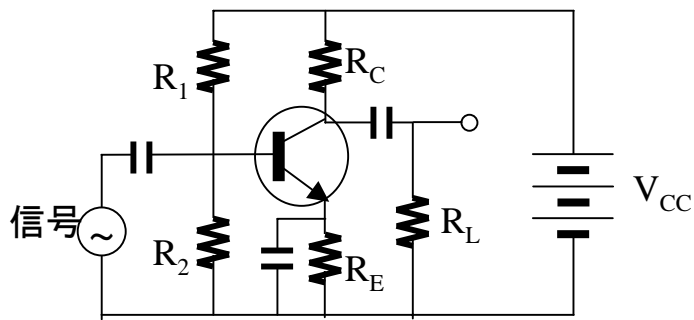
出力インピーダンスが中程度、入力インピーダンスも中。
電圧増幅利得は中。
電流増幅利得は大きい($= \beta = h_{fe}$)
入出力位相差は 180°
高周波特性、直線性で劣る。
増幅回路に標準的に使用される。


コレクタ接地回路(エミッタフォロワ)



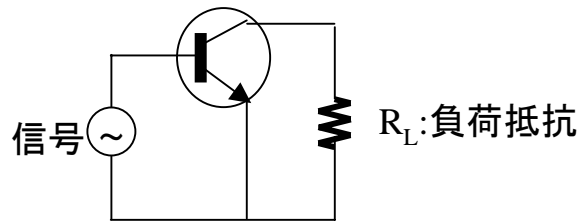
出力インピーダンスが小さい。
電圧増幅ができない。
電流増幅利得は大きい。
入力インピーダンスは高い。
入出力位相差は 0°
インピーダンス変換回路に使用。

5. 直流バイアス回路を加えた回路
(NPN、エミッタ接地の場合)

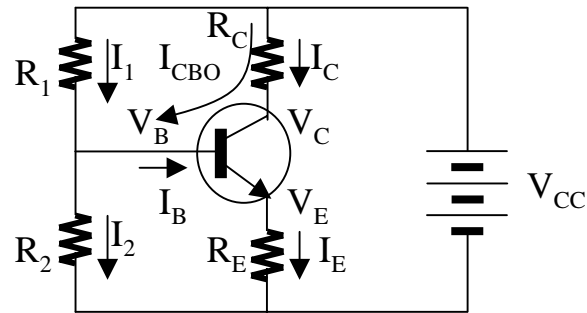


 信号(交流分)を通過させる
コンデンサ
 R_E があっても交流的には
エミッタ接地(下図)

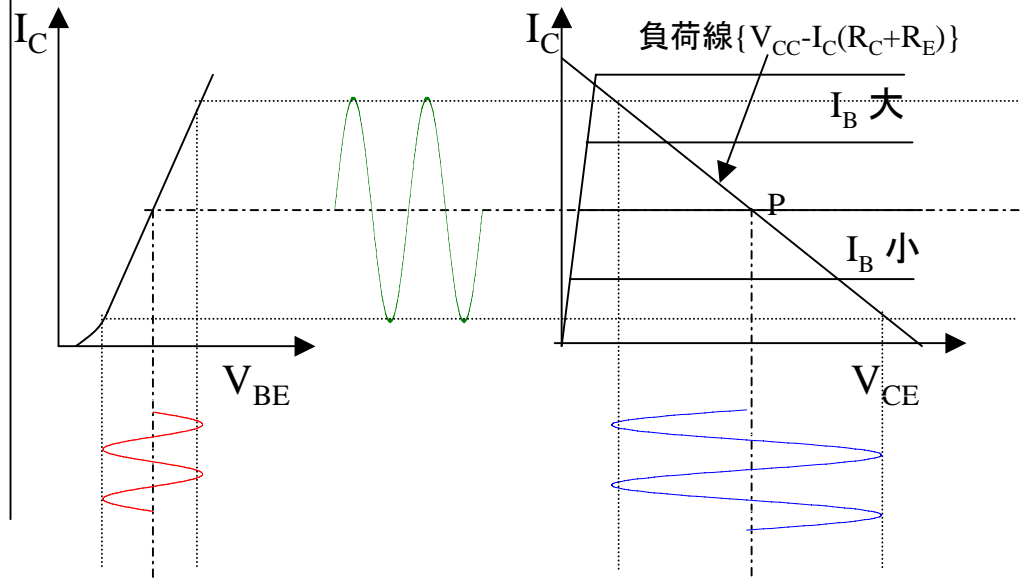
交流分だけの回路(信号回路)

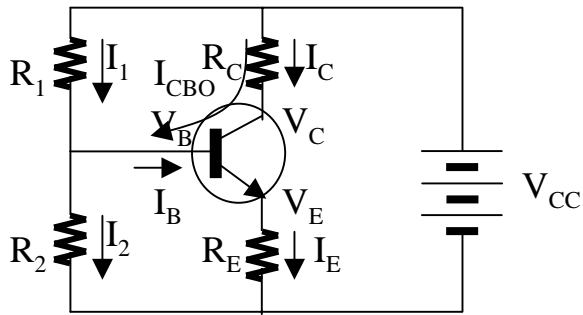


直流分だけの回路



直流バイアスの目的は、交流動作の零点Pを決めること
 である。
 代表として、電圧はコレクタ-ベース間電圧または、コレ
 クタ-エミッタ間電圧を、電流は、コレクタ電流または
 エミッタ電流を取っている。図解はA級増幅の例

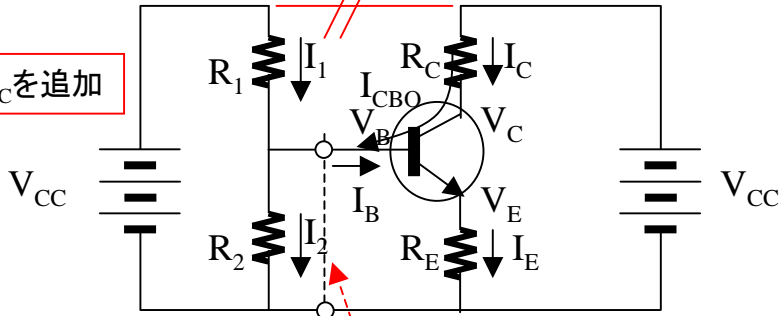




等価回路1

同電位の箇所を切断しても同じ

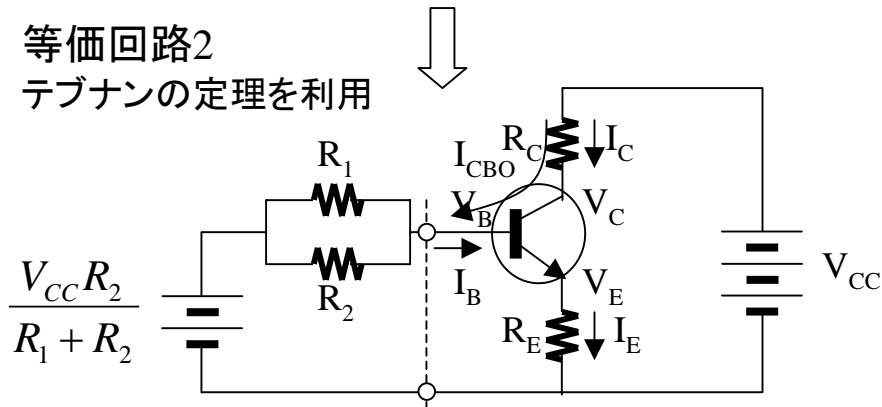
V_{CC}を追加



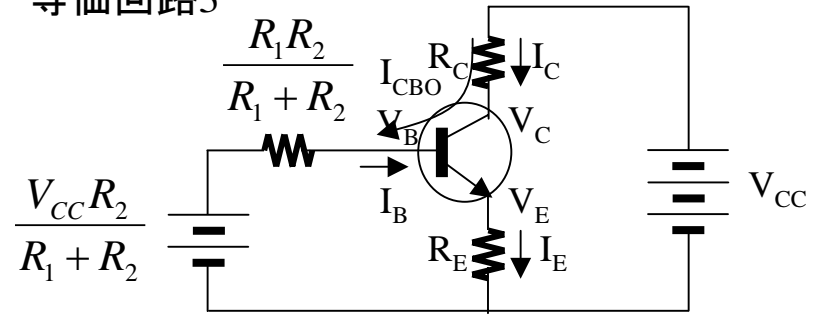
この点から電源側のインピーダンスはR₁R₂の並列値
開放電圧はV_{CC}をR₁R₂で分圧したR₂側の値

等価回路2

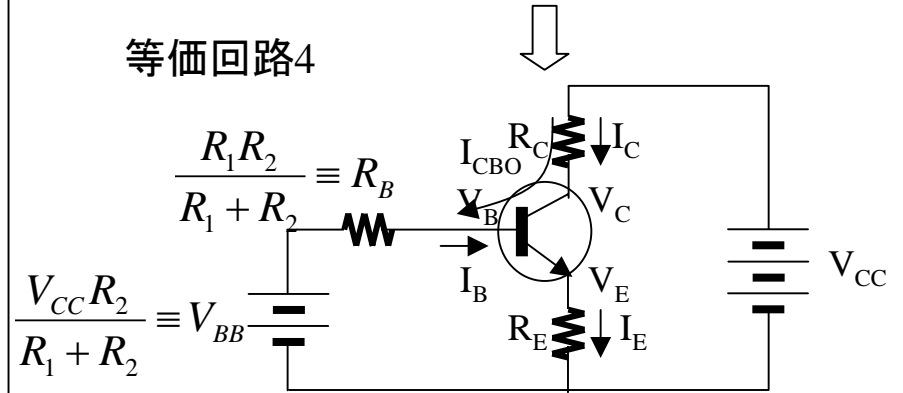
テブナンの定理を利用



等価回路3



等価回路4



$$I_C = \alpha I_E + I_{CBO}, I_E = \alpha I_E + I_B, \alpha = \frac{h_{FE}}{1 + h_{FE}}$$

$$\rightarrow I_B = (1 - \alpha) I_E = \frac{I_E}{1 + h_{FE}}$$

$$V_{BB} = (I_B - I_{CBO}) R_B + V_{BE} + I_E R_E$$

$$= \left(\frac{R_B}{1 + h_{FE}} + R_E \right) I_E + V_{BE} - I_{CBO} R_B$$

バイアス回路数値例

$$h_{FE} = 100, V_{BE} = 0.6[V], I_{CBO} = 0.1[\mu A], V_{CC} = 12[V]$$

$$R_1 = 17[k\Omega], R_2 = 8[k\Omega], R_C = 3[k\Omega], R_E = 3[k\Omega]$$

$$R_B = \frac{17 \times 8}{17 + 8} = 5.44[k\Omega], V_{BB} = \frac{8}{17 + 8} \times 12 = 3.84[V]$$

$$I_C = \frac{3.84 - 0.6 + (5.44 + 3) \times 0.1 \times 10^{-3}}{5.44 \times 1000 / 100 + 3000}$$

$$= \frac{3.24484}{3054.4} = 0.9156[mA]$$

$h_{FE} = 500$ に変えても次式のとおり、あまり変わらない。

$$I_C = \frac{3.24484}{3010.88} = 1.078[mA]$$

一般に次の3つの指標を安定係数と呼び、バイアスの安定度の判定に使用する。

$$S_1 \equiv \frac{\partial I_C}{\partial I_{CBO}} = \frac{(1+h_{FE})(R_B+R_E)}{R_B+R_E+h_{FE}R_E} = \frac{1+h_{FE}}{1+h_{FE} \frac{R_E}{R_B+R_E}} \approx \frac{R_B+R_E}{R_B}$$

$$S_2 \equiv \frac{\partial I_C}{\partial V_{BE}} = -\frac{h_{FE}}{R_B+(1+h_{FE})R_E} \approx -\frac{1}{R_E}, Ah_{FE} \text{を}(I_C) \text{の分子として、}$$

$$S_3 \equiv \frac{\partial I_C}{\partial h_{FE}} = \frac{A(R_B+R_E)}{(R_B+R_E+h_{FE}R_E)^2} \approx \frac{I_C S_1}{h_{FE}^2}$$

$$\therefore I_E = \frac{V_{BB} - V_{BE} + I_{CBO} R_B}{\frac{R_B}{1+h_{FE}} + R_E}$$

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

$$= \frac{V_{BB} - V_{BE} + I_{CBO} R_B}{\frac{R_B}{h_{FE}} + \frac{1+h_{FE}}{h_{FE}} R_E} + I_{CBO}$$

$$= \frac{V_{BB} - V_{BE} + I_{CBO} R_B + \left(\frac{R_B}{h_{FE}} + \frac{1+h_{FE}}{h_{FE}} R_E \right) I_{CBO}}{\frac{R_B}{h_{FE}} + \frac{1+h_{FE}}{h_{FE}} R_E}$$

$$= \frac{V_{BB} - V_{BE} + \left(\frac{1+h_{FE}}{h_{FE}} R_B + \frac{1+h_{FE}}{h_{FE}} R_E \right) I_{CBO}}{\frac{R_B}{h_{FE}} + \frac{1+h_{FE}}{h_{FE}} R_E}$$

$$\therefore I_C = \frac{(V_{BB} - V_{BE}) h_{FE} + (1+h_{FE})(R_B + R_E) I_{CBO}}{R_B + R_E + h_{FE} R_E} \dots (I_C)$$

$$I_C \approx \frac{V_{BB} - V_{BE} + (R_B + R_E) I_{CBO}}{\frac{R_B}{h_{FE}} + R_E}, \because h_{FE} \gg 1$$

安定係数数値例と温度変化の計算

$$S_1 \equiv \frac{\partial I_C}{\partial I_{CBO}} \approx \frac{R_B + R_E}{R_B} = \frac{8.44}{5.44} = 1.55$$

$$S_2 \equiv \frac{\partial I_C}{\partial V_{BE}} \approx \frac{-1}{R_E} = \frac{-1}{3000}$$

$$S_3 \equiv \frac{\partial I_C}{\partial h_{FE}} \approx \frac{I_C S_1}{h_{FE}^2} \approx \frac{1 \times 10^{-3} \times 1.55}{(100^2 \sim 500^2)} = (1.55 \sim 0.06) \times 10^{-5}$$

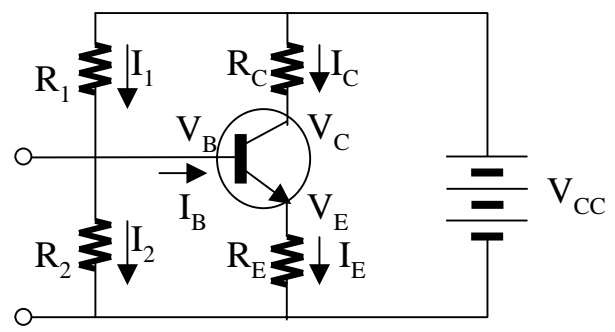
I_{CBO} (コレクタ遮断電流)の温度係数は約2倍/ 10°C である。
 V_{BE} の温度係数は、約 $2\text{mV}/^\circ\text{C}$ である。
 h_{FE} (直流電流増幅率)の温度係数は、約 $0.5 \sim 1.5\% / ^\circ\text{C}$ である。

このように、トランジスタは温度の影響を受けやすいので温度変化により、バイアス点が大きくずれないように設計上の配慮が必要となる。 I_C の温度による変化量は、

$$\frac{\Delta I_C}{\Delta T} = S_1 \cdot \frac{\Delta I_{CBO}}{\Delta T} + S_2 \cdot \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta T} + S_3 \cdot \frac{\Delta h_{FE}}{\Delta T} \text{ から求められる。}$$

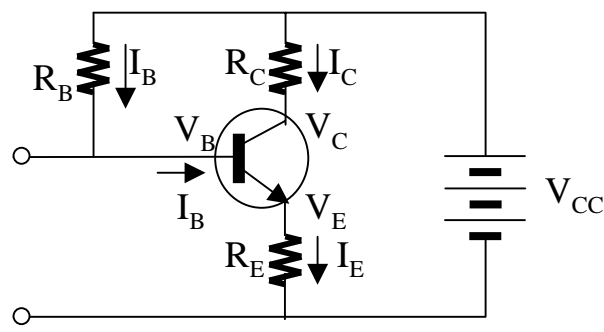
いろいろなバイアス回路

①電圧分割方式



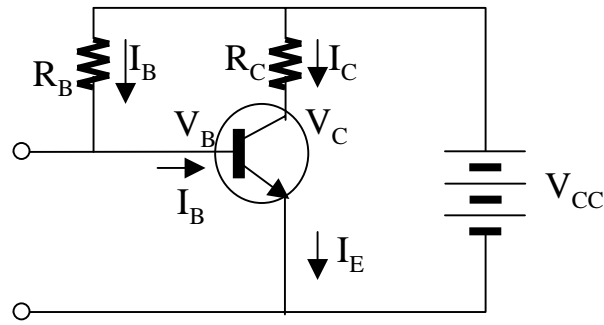
代表的な基本回路である。

②電流帰還方式



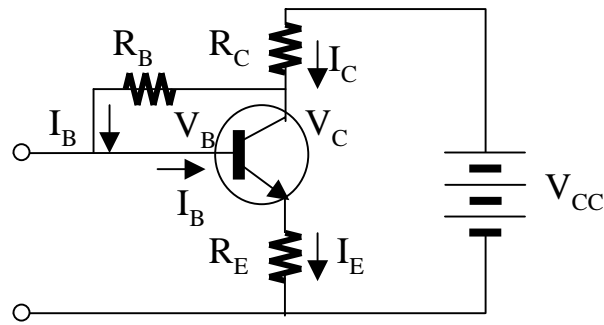
R_2 がない。
 安定化係数 S_1 が大きいので I_{CBO} の大きいゲルマニウムTrには不向き。 R_B が大きいので、結合コンデンサのリーク電流にも留意する必要あり。

③固定バイアス方式



R_E, R_2 がない。
 エミッタ側のバイパスコンデンサが省略できるが、負帰還がなく安定化係数が大きくばらつきが大きい。

④自己バイアス方式



R_2 がなく、 V_B の取り出し位置が V_C 。
 信号に対して負帰還がかかり、増幅利得が減少、入力Zも低下するが、温度安定度、 h_{FE} ばらつきが改善される。