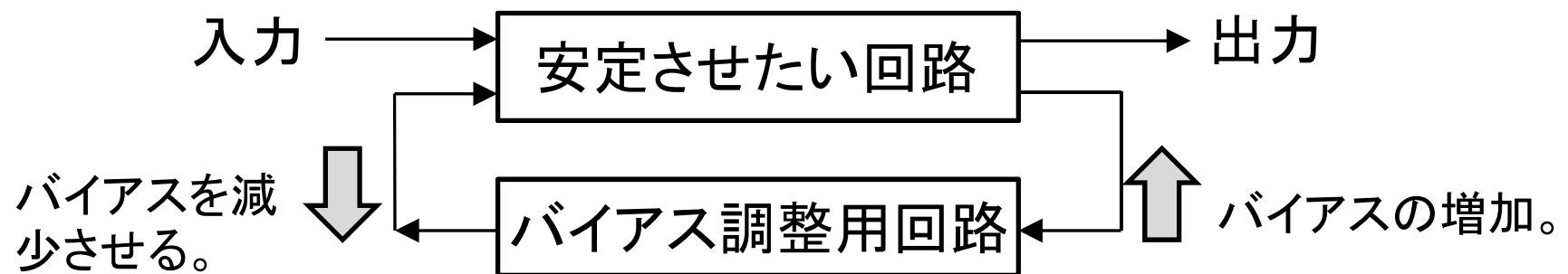


## 4.4 帰還バイアス回路

# 動作点の制御

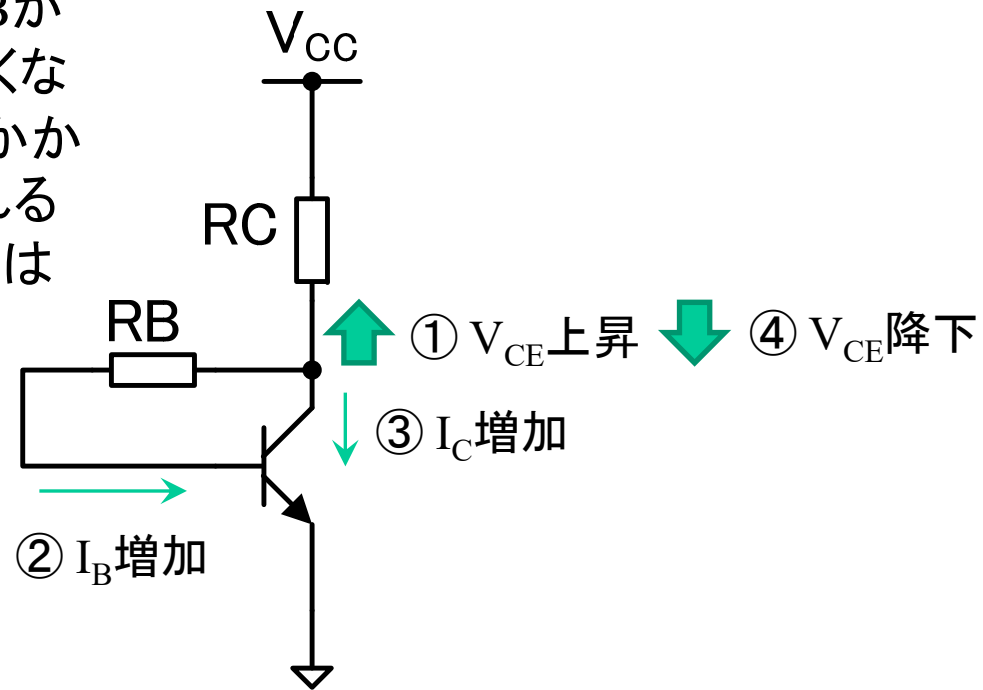
- 単純に電圧を印加したバイアス回路(固定バイアス)
  - 回路が簡単だが、トランジスタの特性変動には対応できない
- 帰還バイアス
  - バイアス電圧やバイアス電流が変化しないようにフィードバック制御する

## フィードバックによる回路特性制御の概念



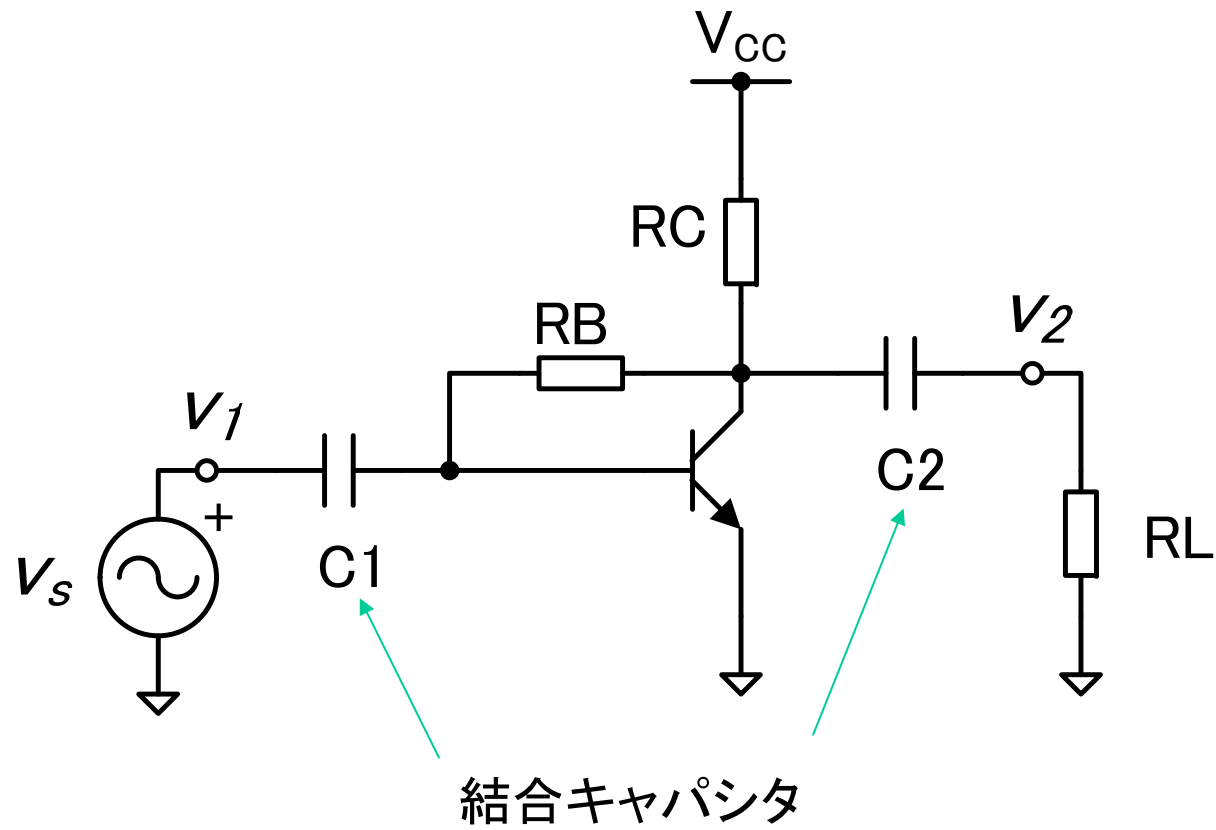
# 電圧帰還バイアス回路

問題点:この回路は、抵抗 $R_B$ が小さいほど、 $I_B$ の変化が大きくなり、フィードバック制御が強くなるが、動作点も $R_B$ で決定されるので、 $R_B$ を自由に決めることはできない。

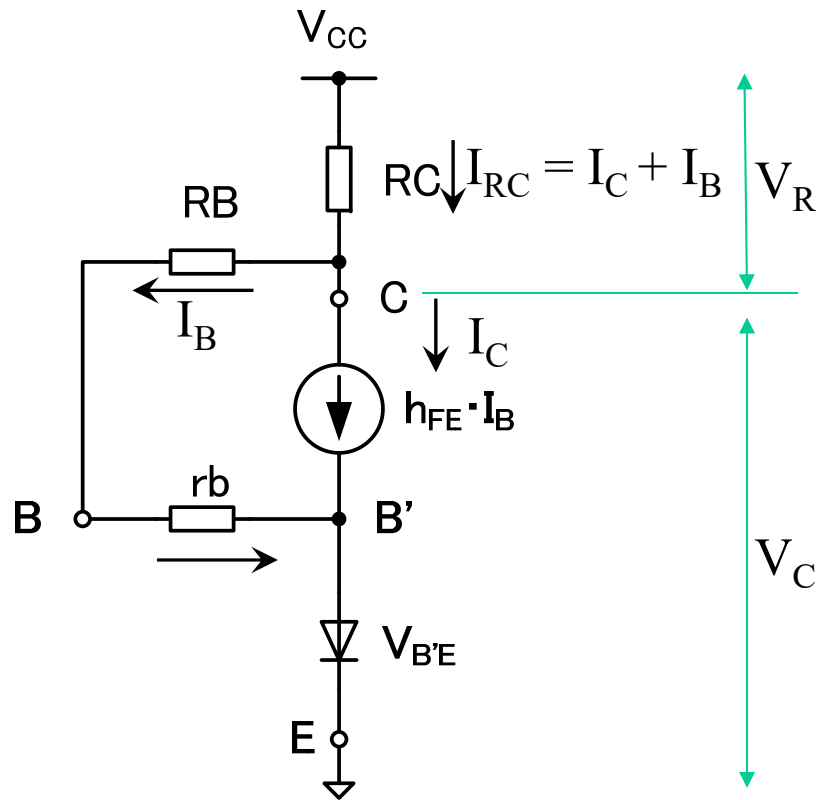


コレクタ電圧 $V_C$ を一定にするように動作するので電圧帰還と呼ばれる。

# 交流信号の接続



# 電圧帰還バイアス回路の設計



$I_B \ll I_C$  なので、 $I_{RC} = I_C + I_B$   
 $\doteq I_C$  と近似すると、出力電圧  
 の振幅範囲は、固定バイアス  
 の時と同じとなる。

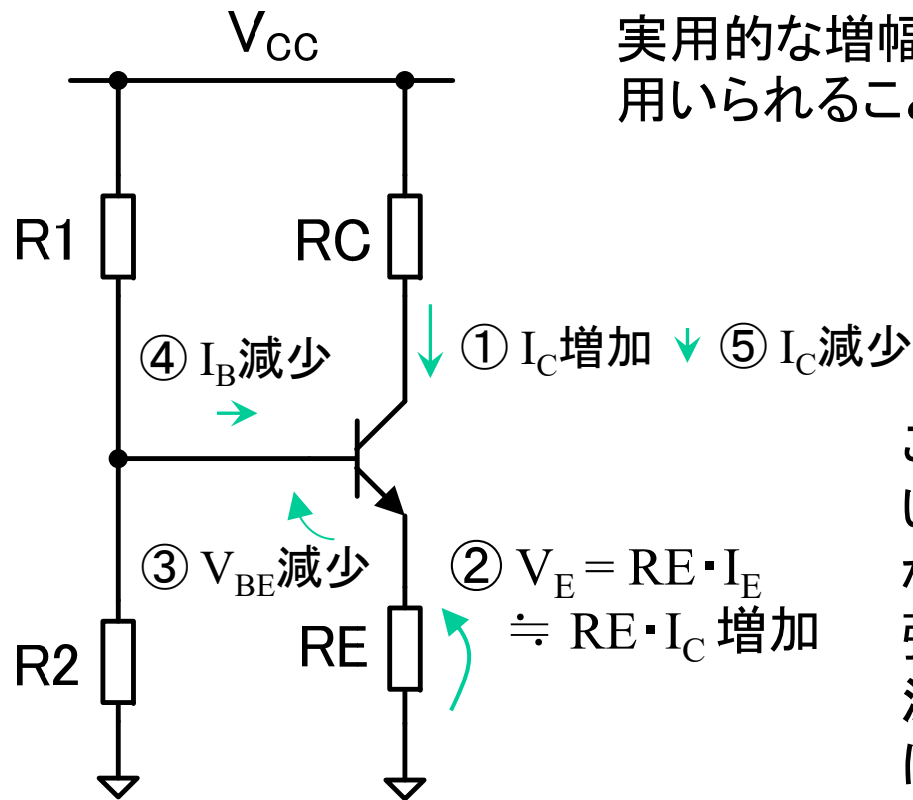
$$V_C = \frac{V_{CC}}{2 + \frac{RC}{RL}} \quad (4-9)$$

以下の直流回路方程式が得られる。

$$\begin{cases} I_{RC} = I_B + I_C = (1 + h_{FE})I_B \\ V_C = V_{CC} - RC \cdot I_{RC} \\ V_C = (RB + rb)I_B + V_{B'E} \end{cases}$$

$$\text{RBの決定法: } RB = \frac{V_C - V_{B'E}}{I_B} - rb = \frac{(V_C - V_{B'E})(1 + h_{FE})RC}{V_{CC} - V_C} - rb \quad (4-12)$$

# 電流帰還バイアス回路

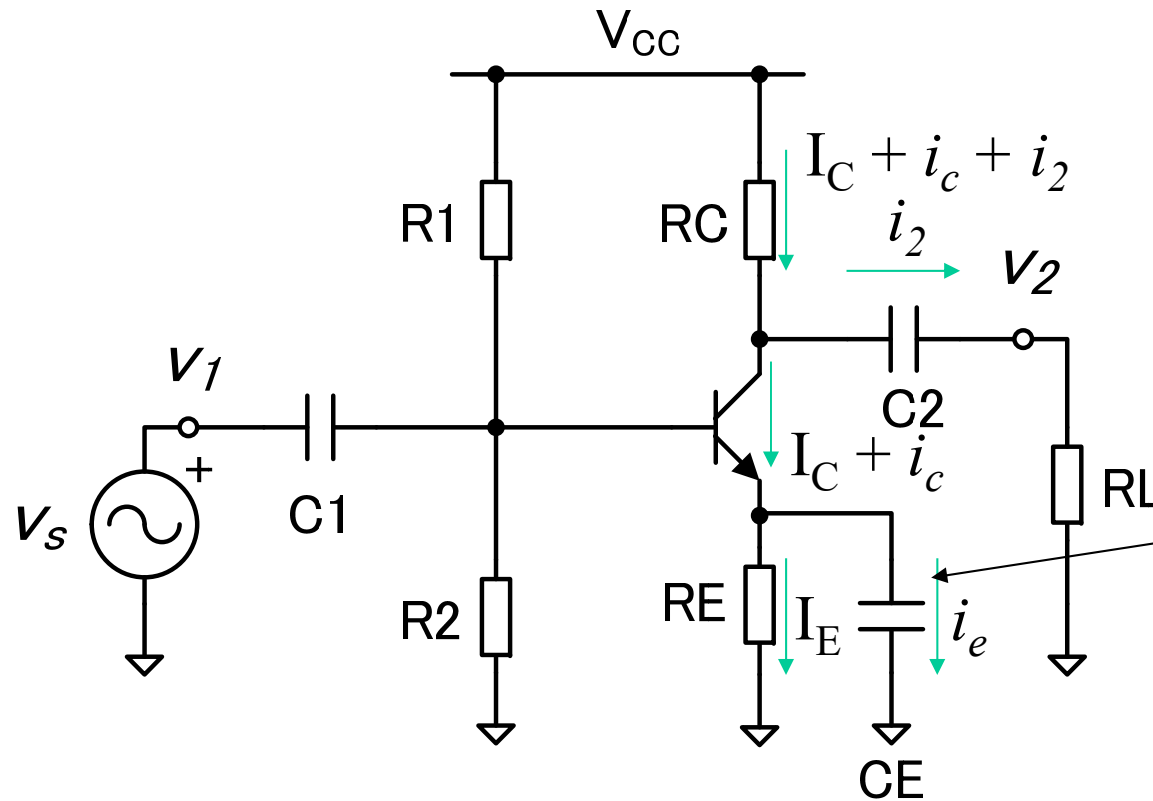


実用的な増幅回路として本回路が用いられることが多い。

この回路は、抵抗 $RE$ が大きいほど、 $V_{BE}$ の変化が大きくなり、フィードバック制御が強くなる。動作点は $R1, R2$ で決定されるので、 $RE$ を自由に決めることができる。

コレクタ電流 $I_C$ を一定にするように動作するので電流帰還と呼ばれる。

# 交流信号の接続

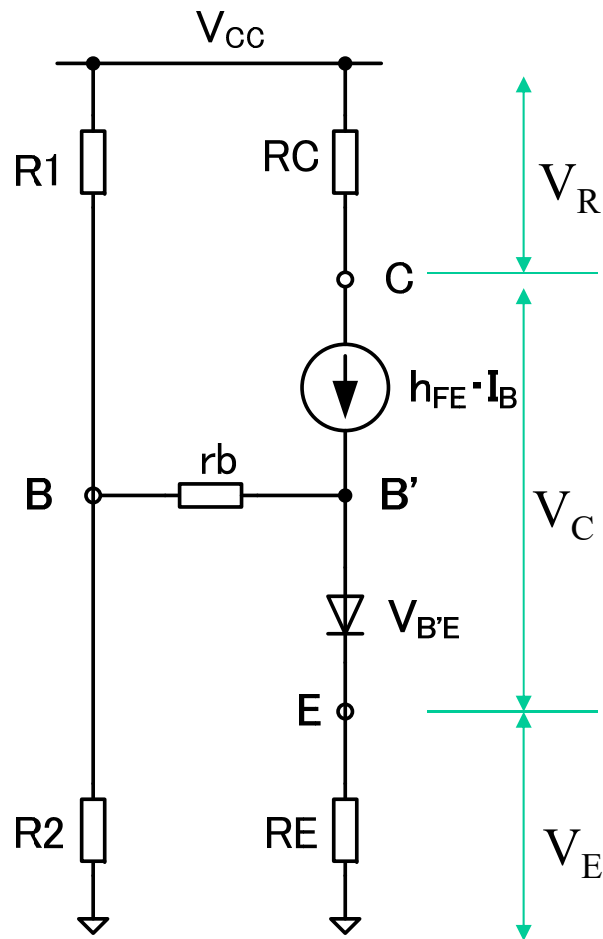


交流電流を電源やGNDに逃がすために挿入されるキャパシタは、バイパスキャパシタ(またはパスコン)と呼ばれる。

バイパスキャパシタ (Bypass capacitor)  
交流電流  $i_e$  により  
バイアスが変動することを防いでいる。

CEのインピーダンスが十分低い時、エミッタ電流の直流成分はREに、交流成分はCEに流れる。

# 電流帰還バイアス回路の設計1



CEを通して交流信号がGNDにショートしているため、出力電圧の振幅範囲は固定バイアスと同じなので、

$$V_C + V_E = \frac{V_{CC}}{2 + \frac{RC}{RL}}$$

$$V_R = V_{CC} - (V_C + V_E) = \frac{1 + \frac{RC}{RL}}{2 + \frac{RC}{RL}} V_{CC}$$

$V_C$ と $V_E$ の電圧割り当てには任意性があるが、**経験的に $V_E = 0.2V_C \sim 1.0V_C$ 程度とし、シミュレーションで安定性を確認する。**



# 電流帰還バイアス回路の設計2

前スライドの条件より、REの計算式を求める。

$$V_R:V_C:V_E = (1+k)\left(1+\frac{RC}{RL}\right):1:k \quad (4-13)$$

$(k=0.2\sim 1.0)$

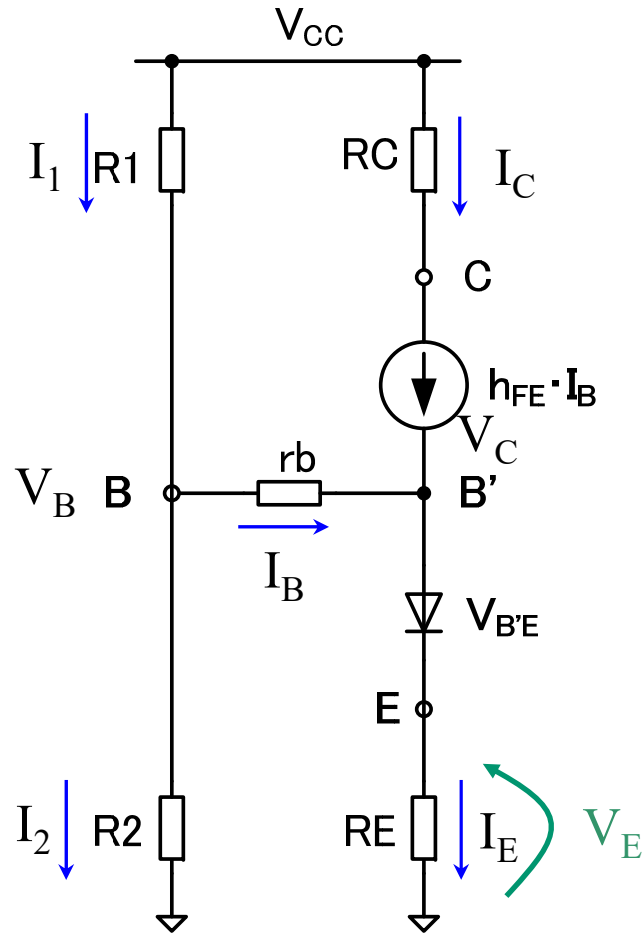
$$I_C = \frac{V_R}{RC} \quad (4-14)$$

$$I_B = \frac{I_C}{h_{FE}} \quad (4-15)$$

$$I_E = I_B + I_C = \frac{I_C}{h_{FE}} + I_C = \frac{1+h_{FE}}{h_{FE}} I_C \quad (4-16)$$

$$RE = \frac{V_E}{I_E} \quad \rightarrow V_{CC}, RC, RL, h_{FE} \text{ で表す} \quad (4-17)$$

# 電流帰還バイアス回路の設計3



R1, R2 の決定法

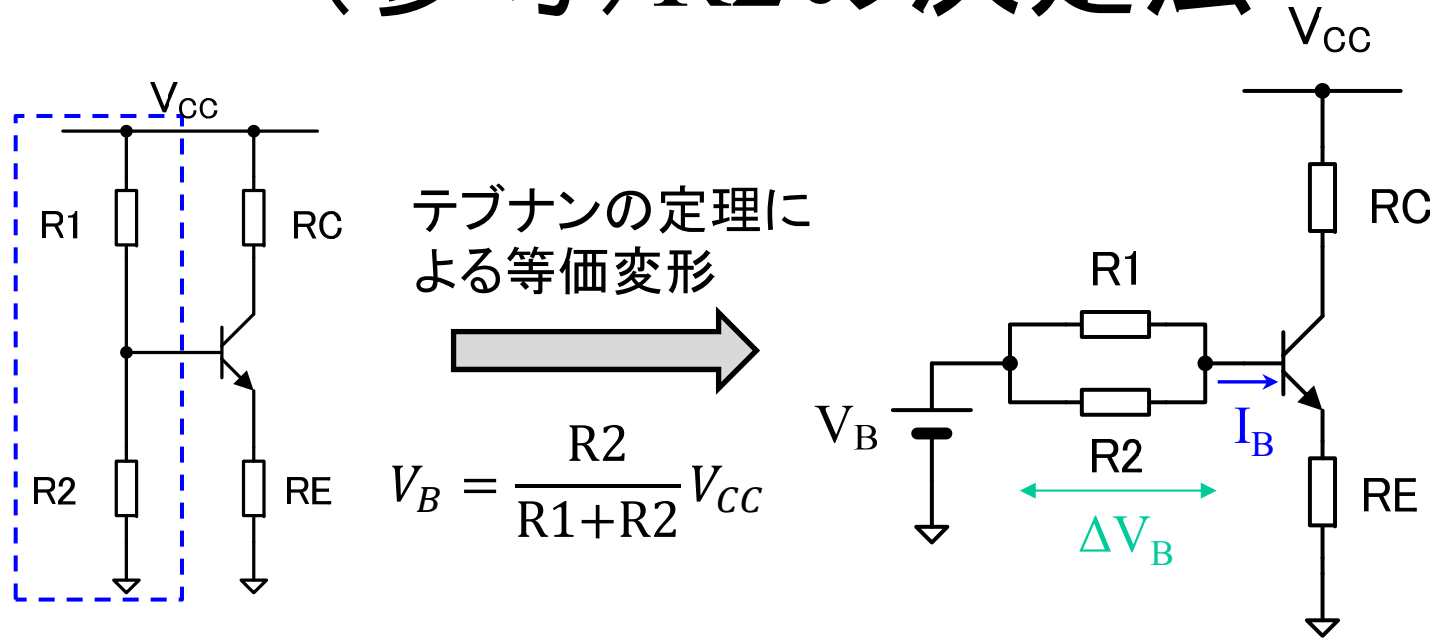
$$\begin{cases} V_B = V_{CC} - R1 \cdot I_1 \\ V_B = R2 \cdot I_2 \\ I_C = h_{FE} \cdot I_B \\ I_B = I_1 - I_2 = \frac{V_{CC} - V_B}{R1} - \frac{V_B}{R2} \end{cases}$$

$$\therefore R1 = \frac{V_{CC} - V_B}{I_B + \frac{V_B}{R2}} = \frac{V_{CC} - V_B}{\frac{I_C}{h_{FE}} + \frac{V_B}{R2}} \quad (4-18a)$$

ただし、 $V_B = V_{B'E} + V_E + rb \cdot I_B$  (4-18b)

R2の値は任意だが、次ページを参照。 10

# (参考) R2の決定法



R1, R2の値には、任意性があるが、下記の条件により決定することができる。

(R1//R2)が付いているため、 $I_B$ が変動すると、 $\Delta V_B$ だけ電圧降下が起こる。

$\Delta V_B$ は、電流帰還バイアス回路の帰還を弱めるため、小さいほどよい。

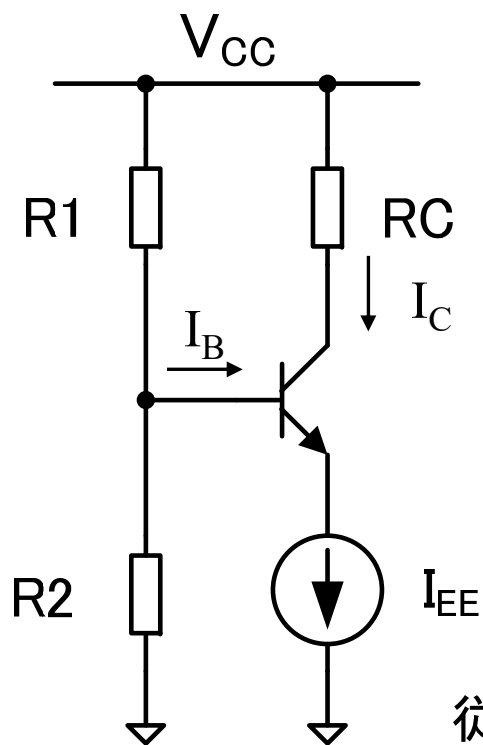
$\Delta V_B = (R_1 // R_2) I_B \ll V_{B'E}$  ...なら、 $V_{B'E}$ に対して電圧降下が無視できる。

$R_1 // R_2 \sim R_2 < V_{B'E} / I_B$

$V_{B'E} = 0.67V$  のとき  $I_B = 5.7\mu A$  というトランジスタの場合、 $R_2 \ll 118k\Omega$  となる。11

# 定電流源による電流帰還バイアス

電流帰還バイアス回路では、 $RE$ が大きいほど、 $I_C$ の変化に対して敏感にフィードバックがかかるため、安定化の効果が大きい。しかし、 $RE$ を大きくすると $I_C$ も小さくなってしまうため、 $RE$ の代わりに定電流源 $I_{EE}$ を用いる。



$$I_{EE} = I_B + I_C = (1 + h_{FE})I_B$$

$$I_C = h_{FE}I_B = \frac{h_{FE}}{1 + h_{FE}}I_{EE} \quad (4-19)$$

安定指数を求めると

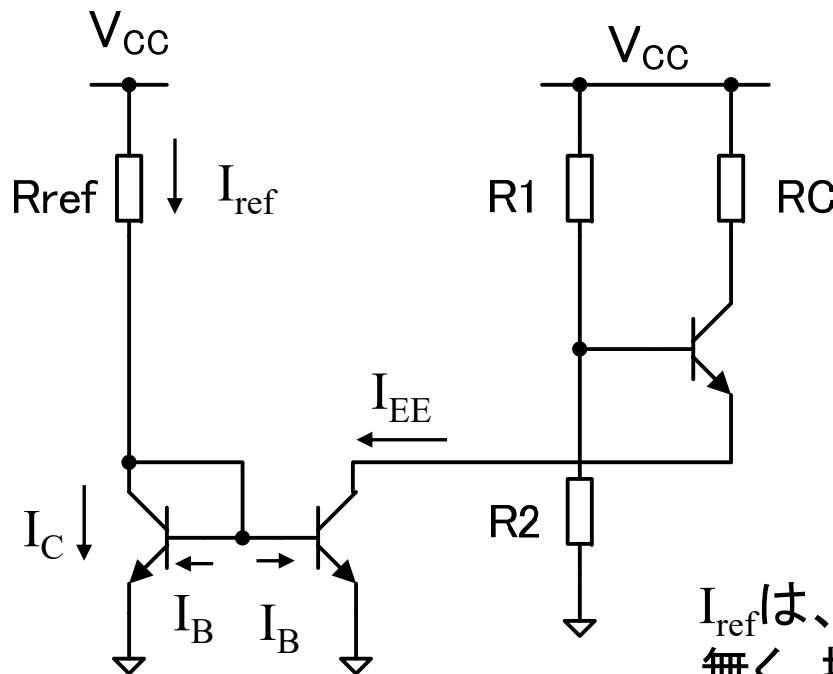
$$S_{V_{B'E}} = \frac{\partial I_C}{\partial V_{B'E}} = 0$$

$$S_{h_{FE}} = \frac{\partial I_C}{\partial h_{FE}} = \frac{I_{EE}}{(1 + h_{FE})^2} \cong 0$$

従って、トランジスタ特性の影響は殆ど受けない。<sub>12</sub>

# 定電流源回路

定電流源回路として**カレントミラー**(Current mirror)が使用される。



$$I_{ref} = 2I_B + I_C = (2 + h_{FE})I_B$$

$$I_{EE} = h_{FE}I_B = \frac{h_{FE}}{2 + h_{FE}} I_{ref}$$

$h_{FE} \gg 2$  のとき

$$I_{EE} = I_{ref}$$

$I_{ref}$  は、トランジスタの特性とは関係が無く、抵抗の温度係数の影響のみ受ける。さらに、温度や電源電圧の影響を受けない定電流源回路もある。

# 課題4.4.1

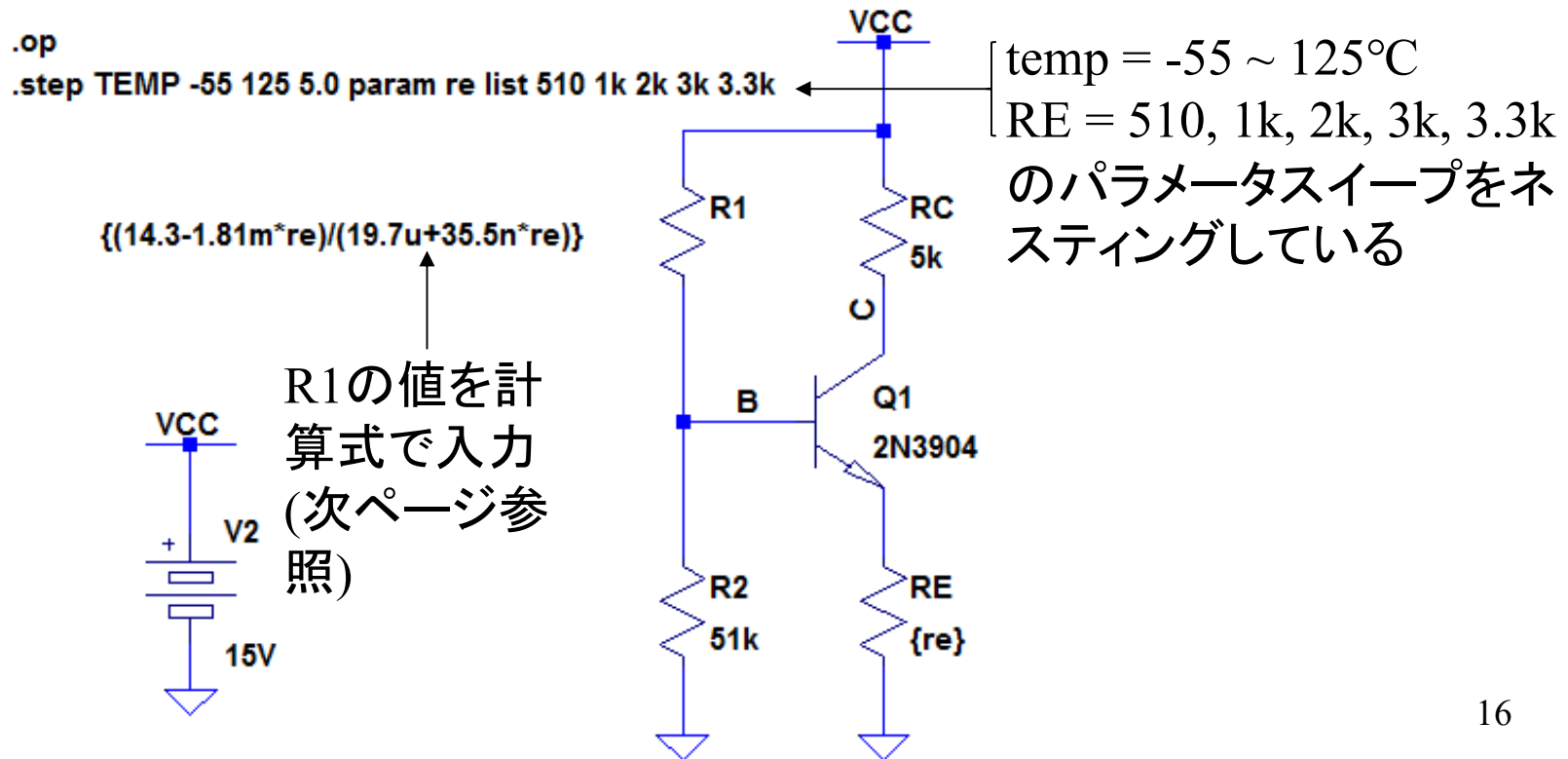
1. 電圧帰還バイアス回路について、 $R_C = 5\text{k}\Omega$ ,  $R_L = 10\text{k}\Omega$ ,  $V_{CC} = 15\text{V}$  のとき、最適な動作点となる  $R_B$  の値を求めよ。ただし、トランジスタの  $V_{B'E} = 700\text{mV}$ ,  $h_{FE} = 300$ ,  $r_b = 0\Omega$  とする。
2. 電流帰還バイアス回路について、 $R_C = 5\text{k}\Omega$ ,  $R_L = 10\text{k}\Omega$ ,  $V_{CC} = 15\text{V}$  のとき、最適な動作点となる  $R_E$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  の値を決定せよ。算出根拠も示すこと。ただし、トランジスタの  $V_{B'E} = 700\text{mV}$ ,  $h_{FE} = 300$ ,  $r_b = 0\Omega$  とする。
3. 負荷抵抗  $R_C$  を定電流源に置き換えると、 $I_C$  を減らさずに電圧利得を大きくすることができる。その理由について説明せよ。

## 課題4.4.1のヒント

1. 動作点として、 $V_C+V_E$ ,  $V_R$ を求める
2.  $V_R$ より $I_C, I_E, I_B$ を求める
3.  $V_E$ と $V_C$ の比を適当に決め、 $V_C+V_E$ の値から $V_E$ ,  $V_C$ を求める
4.  $R2 < V_{B'E}/I_B$  となるように、 $R2$ を適当に決める
5. 式(4-18a), (4-18b)より、 $V_B, R1$ を求める

# 電流帰還バイアスの効果

電流帰還バイアス回路のREの効果についてシミュレーションで確認し、-55~125°Cの温度範囲で $I_C$ が15%以下の誤差範囲で安定化するためのREの値を求める。





## (参考)R1の計算式

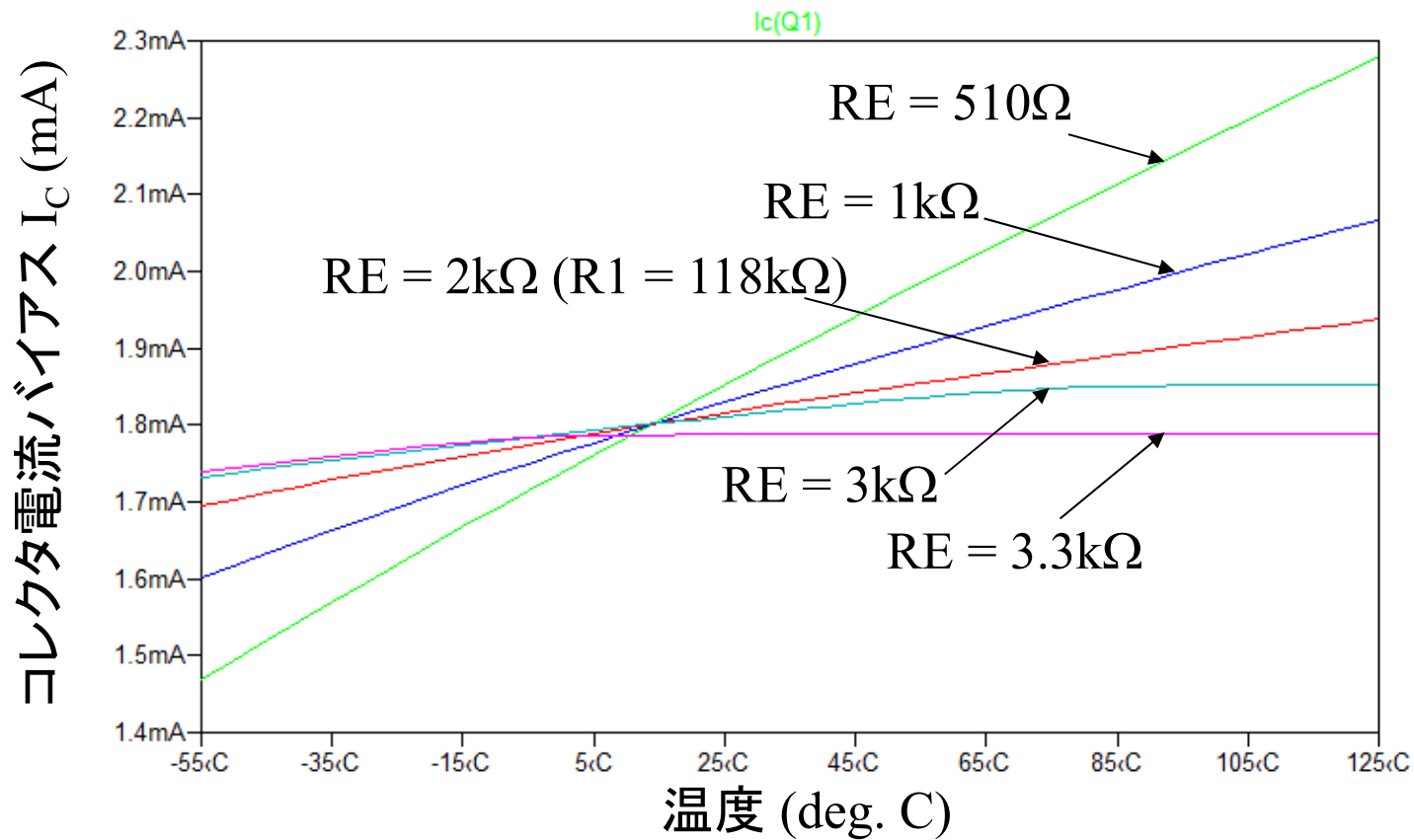
テクニック:REをパラメータ変更する際、動作点が同じになるようにR1またはR2を調整する。ここでは、R2を固定して、R1の値を自動的に調整するための計算式を求める。

式(4-18a)より

$$\begin{aligned} R1 &= \frac{V_{CC} - V_B}{I_B + \frac{V_B}{R2}} = \frac{V_{CC} - (V_{B'E} + V_E)}{I_B + \frac{(V_{B'E} + V_E)}{R2}} = \frac{(V_{CC} - V_{B'E}) - RE \cdot I_E}{(I_B + \frac{V_{B'E}}{R2}) + RE \frac{I_E}{R2}} \\ &= \frac{(15V - 0.7V) - 1.81mA \cdot RE}{(6.00\mu A + \frac{0.7V}{51k\Omega}) + RE \frac{1.81mA}{51k\Omega}} = \frac{14.3 - 1.81m \cdot RE}{19.7\mu + 35.5n \cdot RE} \end{aligned}$$

# シミュレーション結果

RE=2.0kΩのとき -55°C~125°Cの $I_C$ 変動 = 0.244mA(13.6%)

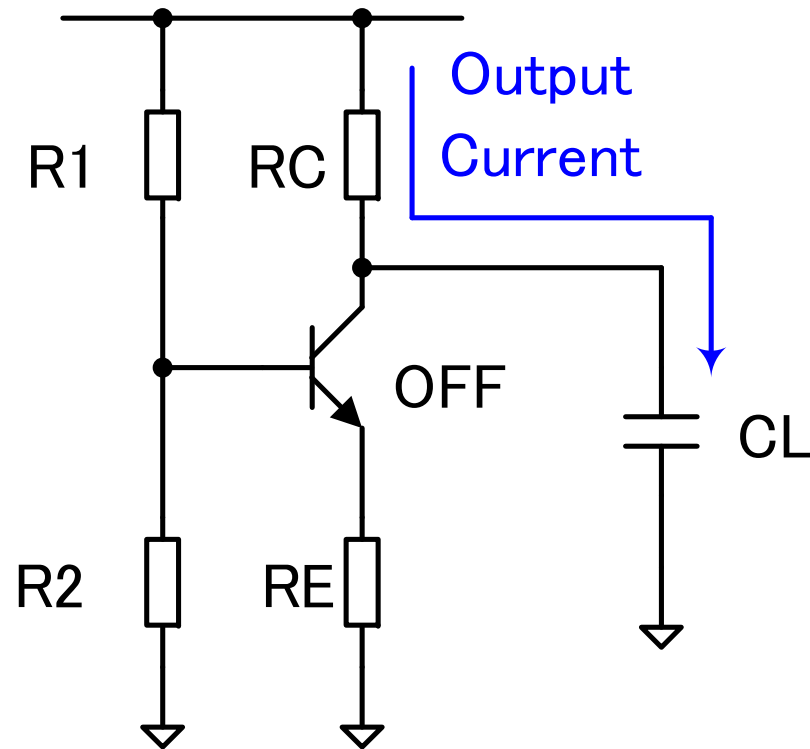


# RCの決定法

これまで、RCの値は適当に選んで、RC以外の設計を行ってきたが、RCの値を決めるためには、種々の性能のバランス考慮する必要がある。

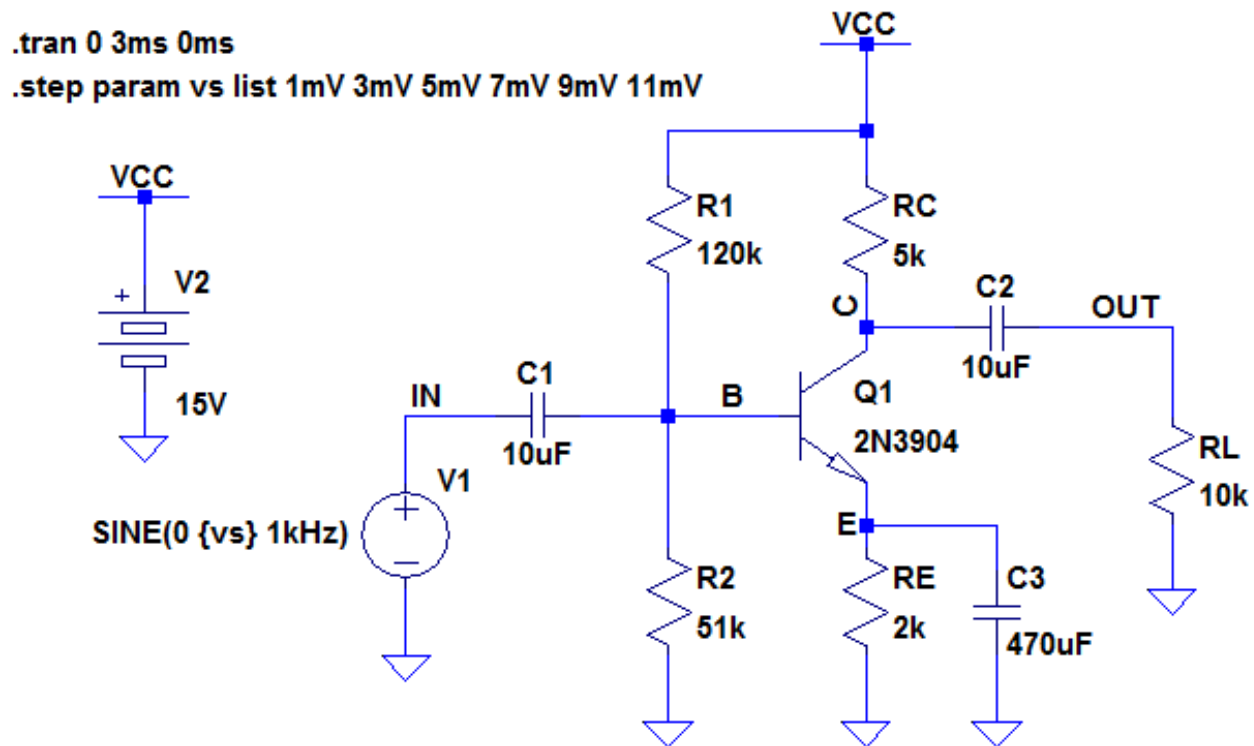
- 電圧増幅率
  - $Gain = -g_m R_{OUT}$  (4.2節) より、負荷抵抗 $R_{OUT}$ が大きいほど電圧増幅率が大きい
- $h_{fe}$  または  $g_m$ 
  - あまり小さな $I_C$ では、 $h_{fe}$  や  $g_m$  が小さくなってしまうので、適当な $I_C$ を流すために、極端に大きくないRCが必要
- 最大絶対定格 ( $P_C$ )
  - $I_C$ が絶対最大定格を越えないためには、ある程度大きなRCが必要
- 出力インピーダンス
  - RCが大きすぎると、出力端子に接続した負荷に流せる電流が制限される
- 消費電力
  - 無駄に大きな $I_C$ を流して消費電力が大きくならないようにRCを選ぶ

# 出力インピーダンス



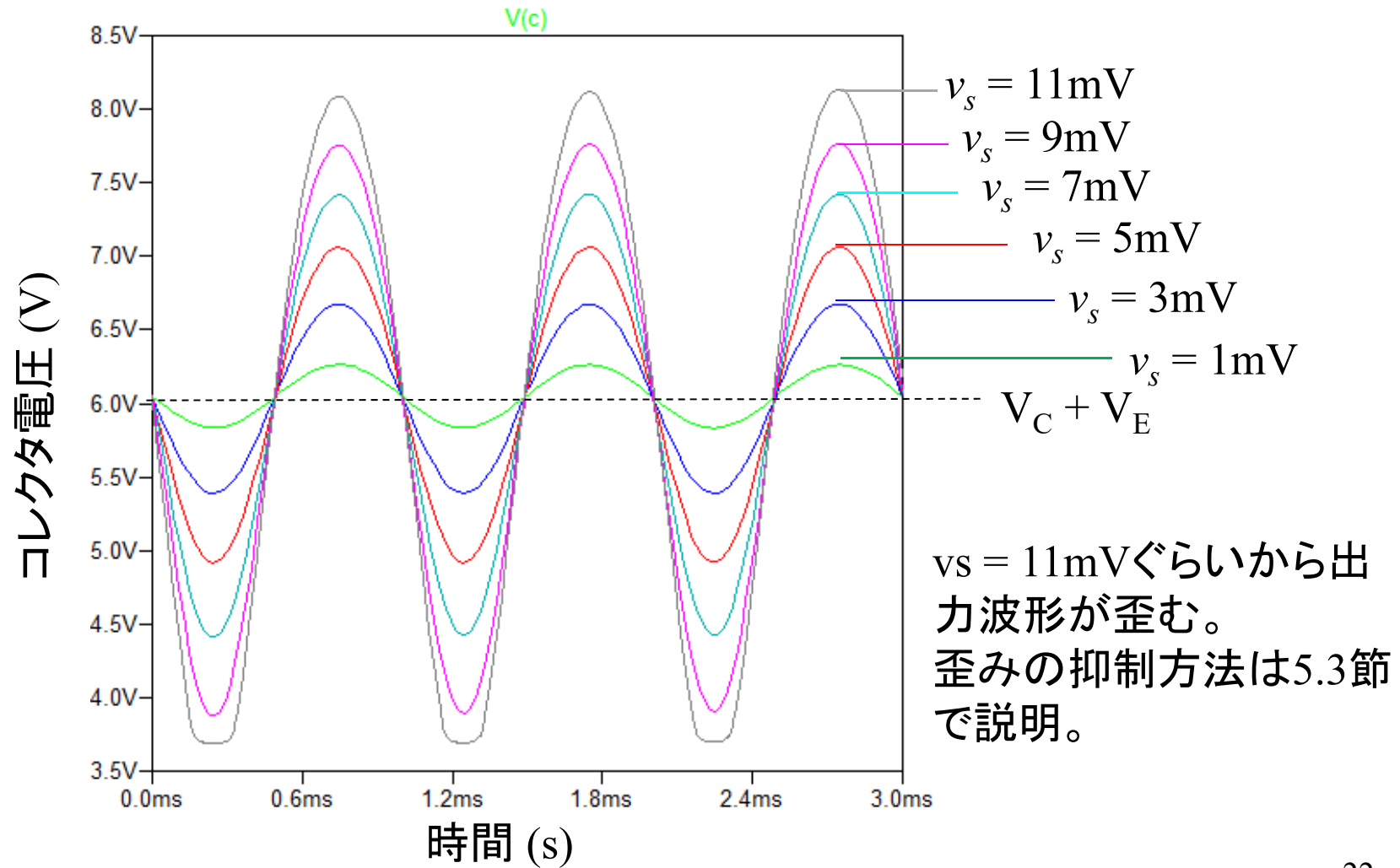
例えば、出力にキャパシタンスCLを接続した場合、トランジスタがOFFのとき、CLに電荷が充電され、トランジスタがONのときには、CLに蓄えた電荷が放電される。しかし、RCが大きすぎると、CLへの充電に時間がかかり、出力の応答速度が遅くなる。このように、出力に接続できるものが制限を受ける現象は、「出力インピーダンス」の概念を用いて、考えることができるが、その方法は、後節で扱う。

# エミッタ接地増幅回路のシミュレーション (Transient解析)



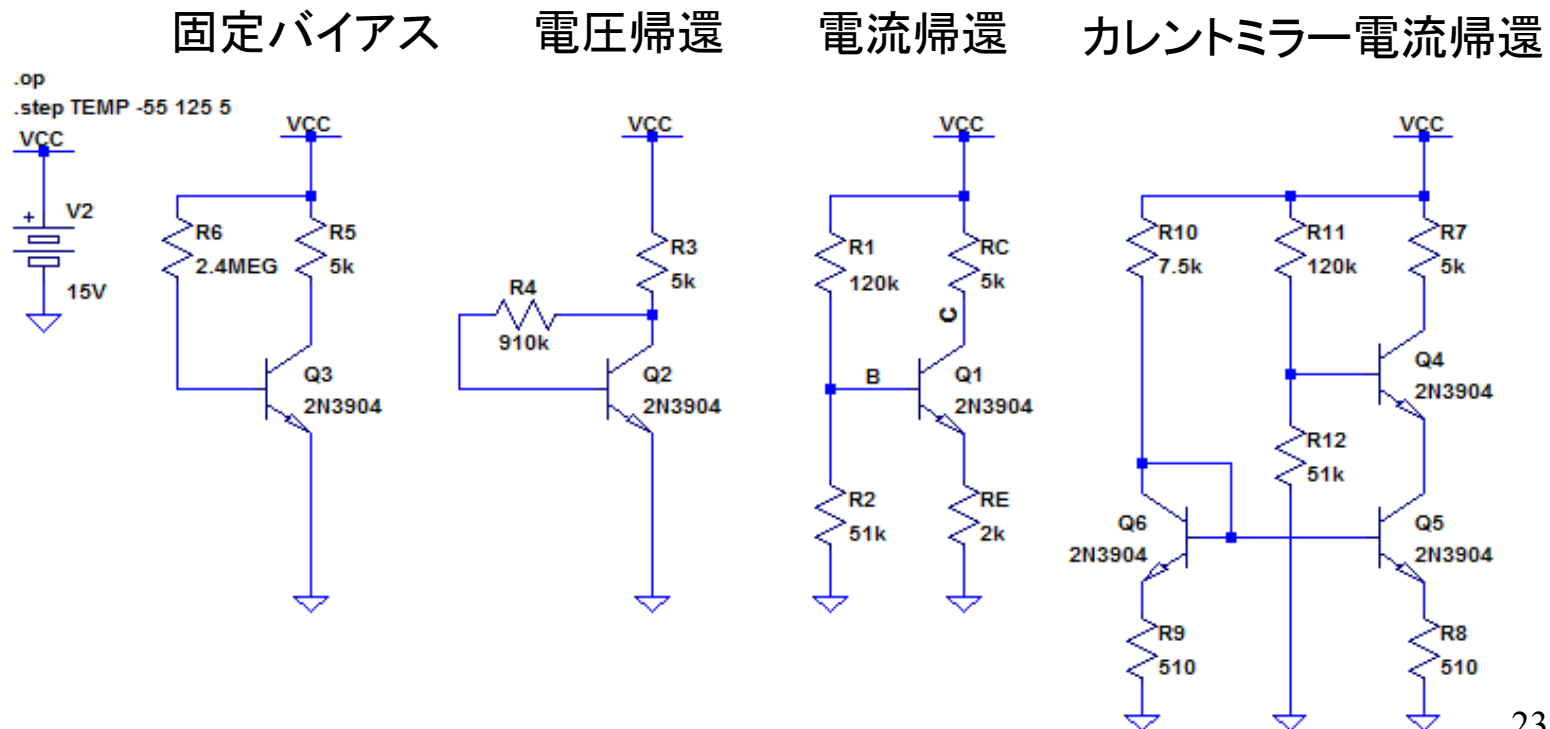
入力信号の振幅をステップさせて、Transient解析を行い、各部のバイアス、波形の歪みの様子を調べる。

# 出力波形



# 演習4.4.2

各種バイアス回路に対する電流 $I_C$ の温度特性を比較するグラフを作成せよ。



## 4.4節のまとめ

- 動作点の安定化技術
  - 増幅回路の特性を一定に保つため、負帰還(ネガティブフィードバック)が使用される
  - 電圧帰還バイアス回路と電流帰還バイアス回路がある
  - 動作点のトランジスタの特性( $V_{B'E}$ ,  $h_{FE}$  など)への依存性を弱めることにより安定化することができる
  - 電流帰還バイアス回路は、安定性と動作点の設定に関して設計自由度があり、実用的な増幅回路として使用できる
  - 直流成分だけに帰還を働かせるため、バイパスキャパシタを併用する
  - 定電流源を使用することにより、バイアス電流をほぼ完全に安定化することができる