

## 4.3 バイアス回路の安定性

# トランジスタ特性変動の主な原因

- 製造ばらつき
  - $h_{FE}$ に数倍程度のばらつきがある
- 温度依存性(温度係数)
  - $dV_{B'E}/dT \doteq -2mV/^{\circ}C$
  - $dh_{FE}/T = \text{数}\%/^{\circ}C$
  - 温度は使用環境だけではなく、トランジスタ自体の発熱によっても変化する
  - 温度が時間的に変化することにより出力電圧や電流が変動する現象をドリフト(Drift)と呼び、回路の誤差の原因となる



トランジスタ特性の変動により動作点が大きくずれるため、回路に工夫をしないと正常動作しない確率が高い。

# 安定指数

トランジスタ特性が、増幅回路のバイアス電流 $I_C$ に及ぼす影響の大きさは、安定指数 $S_{V_{B'E}}$ ,  $S_{h_{FE}}$ ,  $S_{I_{CBO}}$ で表される。安定指数が小さい回路は、トランジスタ特性の変動に強い。

$$S_{V_{B'E}} = \frac{\partial I_C}{\partial V_{B'E}} \quad S_{h_{FE}} = \frac{\partial I_C}{\partial h_{FE}} \quad S_{I_{CBO}} = \frac{\partial I_C}{\partial I_{CBO}}$$

$$\frac{\Delta I_C}{I_C} = S_{V_{B'E}} \frac{\Delta V_{B'E}}{I_C} + S_{h_{FE}} \frac{\Delta h_{FE}}{I_C} + S_{I_{CBO}} \frac{\Delta I_{CBO}}{I_C}$$

$I_{CBO}$ は、C-B間(逆方向電圧)の熱発生電流。 $I_{CBO}$ 自体は小さな値なので、これまでは無視していたが、 $S_{I_{CBO}}$ は相対的に大きい。

# 安定指数の計算式

$I_{CBO}$  はコレクタとベースの間に流れるので、式(4-1)、(4-2)に $I_{CBO}$ の項を追加する。ただし、ベース領域にホールを供給するため、増幅には寄与せず、単に $I_C$ に加算される。(注意) 安定指数の計算式は回路によって異なる。

$$I_B - I_{CBO} = \frac{V_{CC} - V_{B'E}}{RB + rb}$$

$$I_C = h_{FE}I_B + I_{CBO} = h_{FE} \frac{V_{CC} - V_{B'E}}{RB + rb} + (1 + h_{FE})I_{CBO}$$

$$\left[ \begin{array}{l} S_{V_{B'E}} = \frac{\partial I_C}{\partial V_{B'E}} = \frac{-h_{FE}}{RB + rb} \end{array} \right. \quad (4-10)$$

$$\left[ \begin{array}{l} S_{h_{FE}} = \frac{\partial I_C}{\partial h_{FE}} = \frac{V_{CC} - V_{B'E}}{RB + rb} + I_{CBO} \end{array} \right. \quad (4-11)$$

$$\left[ \begin{array}{l} S_{I_{CBO}} = \frac{\partial I_C}{\partial I_{CBO}} = 1 + h_{FE} \end{array} \right.$$

# 固定バイアス回路の安定性

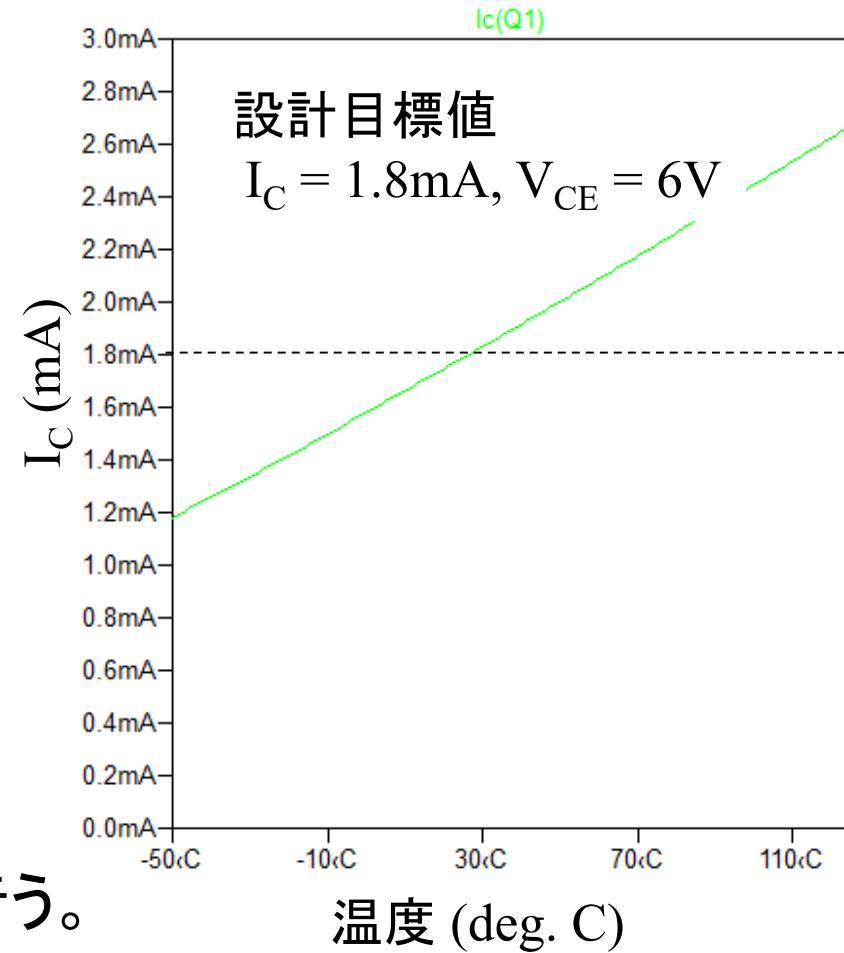
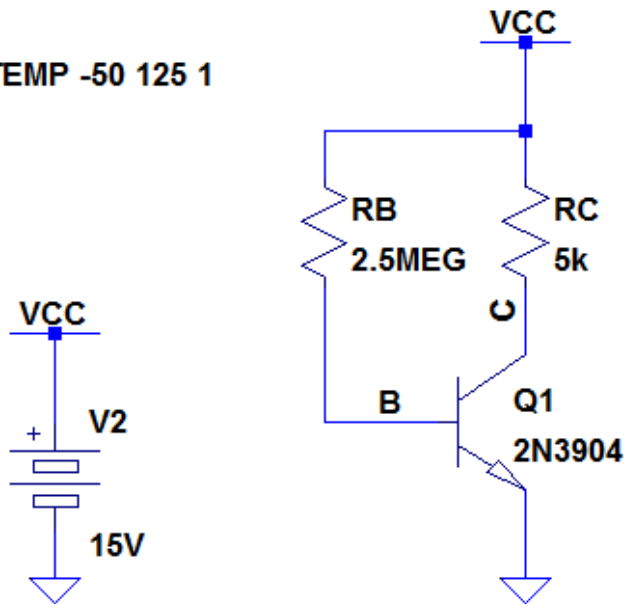
$R_B = 1\text{M}\Omega$ ,  $r_b = 50\Omega$ ,  $h_{FE} = 300$ ,  $V_{B'E} = 0.7\text{V}$ ,  $V_{CC} = 15\text{V}$  での計算例。 $\Delta V_{B'E} = -0.1\text{V}$ ,  $\Delta h_{FE} = 40$ ,  $I_C = 1.8\text{mA}$ としてみよう。

$$\begin{aligned}\frac{\Delta I_C}{I_C} &= S_{V_{B'E}} \frac{\Delta V_{B'E}}{I_C} + S_{h_{FE}} \frac{\Delta h_{FE}}{I_C} \quad (I_C \text{ に対して } I_{CBO} \text{ は小さいので無視}) \\ &= -3.0 \cdot 10^{-4} \frac{-0.1\text{V}}{1.8\text{mA}} + 1.4 \cdot 10^{-5} \frac{40}{1.8\text{mA}} = 33\%\end{aligned}$$

固定バイアス回路は、温度が数10度変化した場合、上記計算程度の $I_C$ の変動が観測されることになり、動作点が活性領域の端に移動してしまう。また、 $h_{FE}$ の製造ばらつきにも弱いことが予想される。さらに、ここでは、 $S_{I_{CBO}}$ を無視したが、実際には、 $I_{CBO}$ も強い温度依存性を持つ。

# 温度特性のシミュレーション

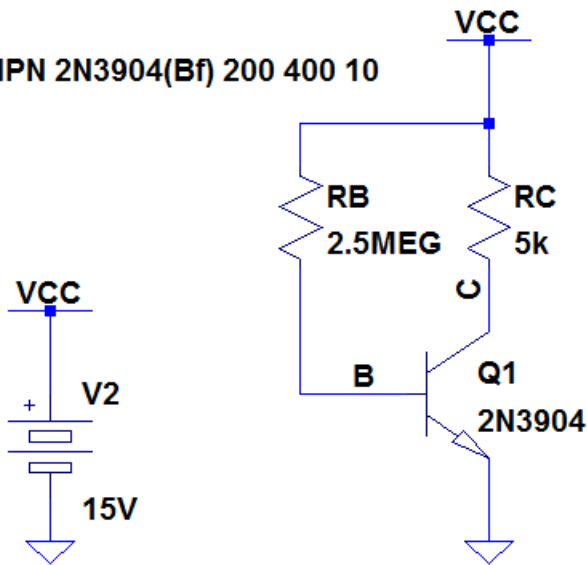
```
.op  
.step TEMP -50 125 1
```



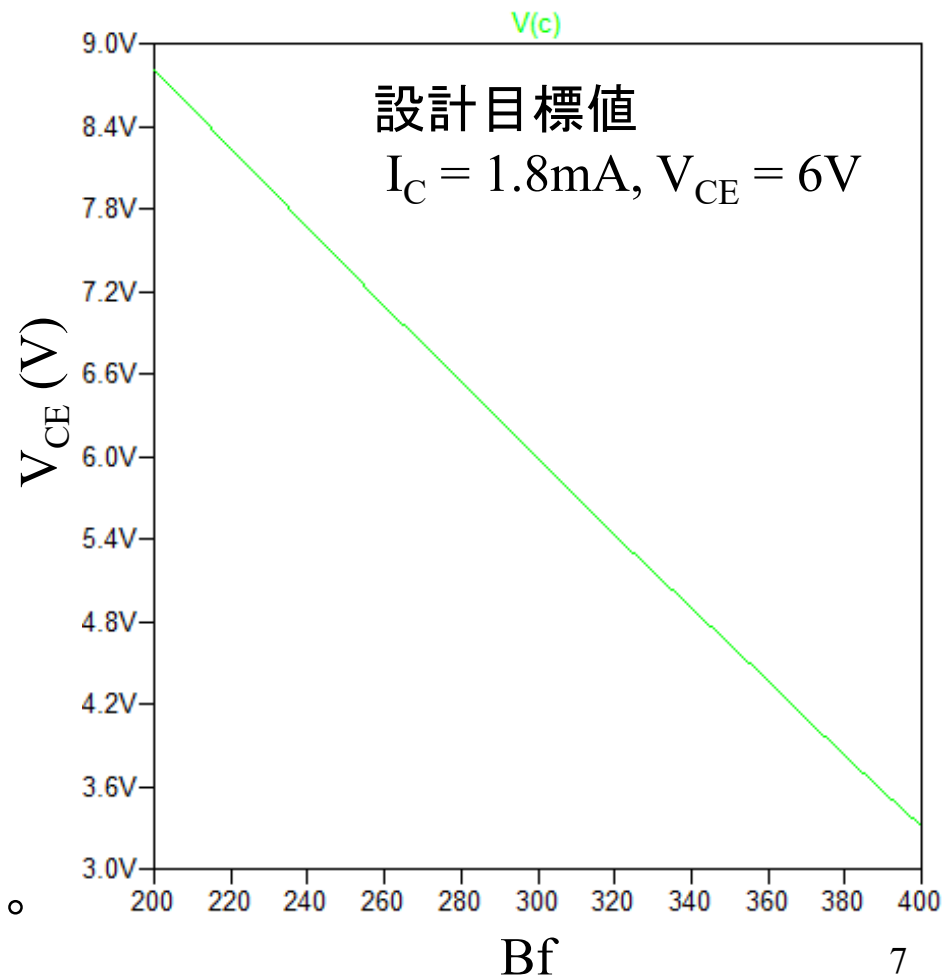
温度を変更して動作点解析を行う。

# トランジスタ特性変動のシミュレーション

.op  
.step NPN 2N3904(Bf) 200 400 10



Bfは、理想的な場合の $h_{FE}$ に相当するパラメータ(詳しくは、<http://jaco.ec.t.kanazawa-u.ac.jp/edu/vlsi/spidev/bjt.html>)。



## 4.3節のまとめ

- 半導体デバイスの特性変動
  - 温度や製造ばらつきにより、半導体デバイスの特性は大きく変化する
  - 温度が時間変化することにより出力が変動する現象はドリフトと呼ばれる
- 安定指数
  - 半導体デバイスの特性変動に対するバイアス点の変動の大きさを示す値
  - 安定指数の小さい回路は温度や半導体デバイスのばらつきに強い
  - 固定バイアス回路は、半導体デバイス特性の変動の影響を受けやすい
- 動作点解析
  - 回路のバイアスが設計どおりに加わっているか、動作点解析により確認する必要がある
  - 動作点解析を行うときに、.stepコマンドを併用して、温度変動や半導体素子の特性変動の影響を調べることができる