

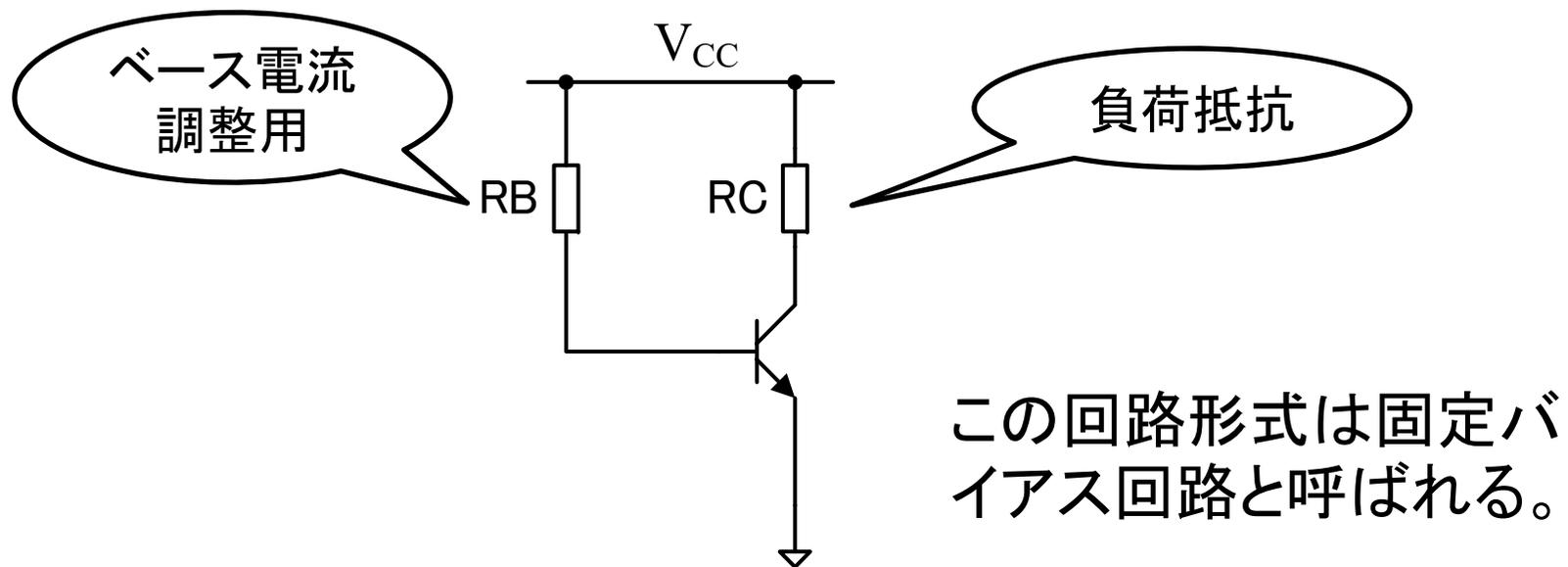
# 第4章 増幅回路

実用的な増幅回路の設計と特性解析

## 4.1 固定バイアス回路

# 電圧増幅回路のバイアス (Bias) 回路

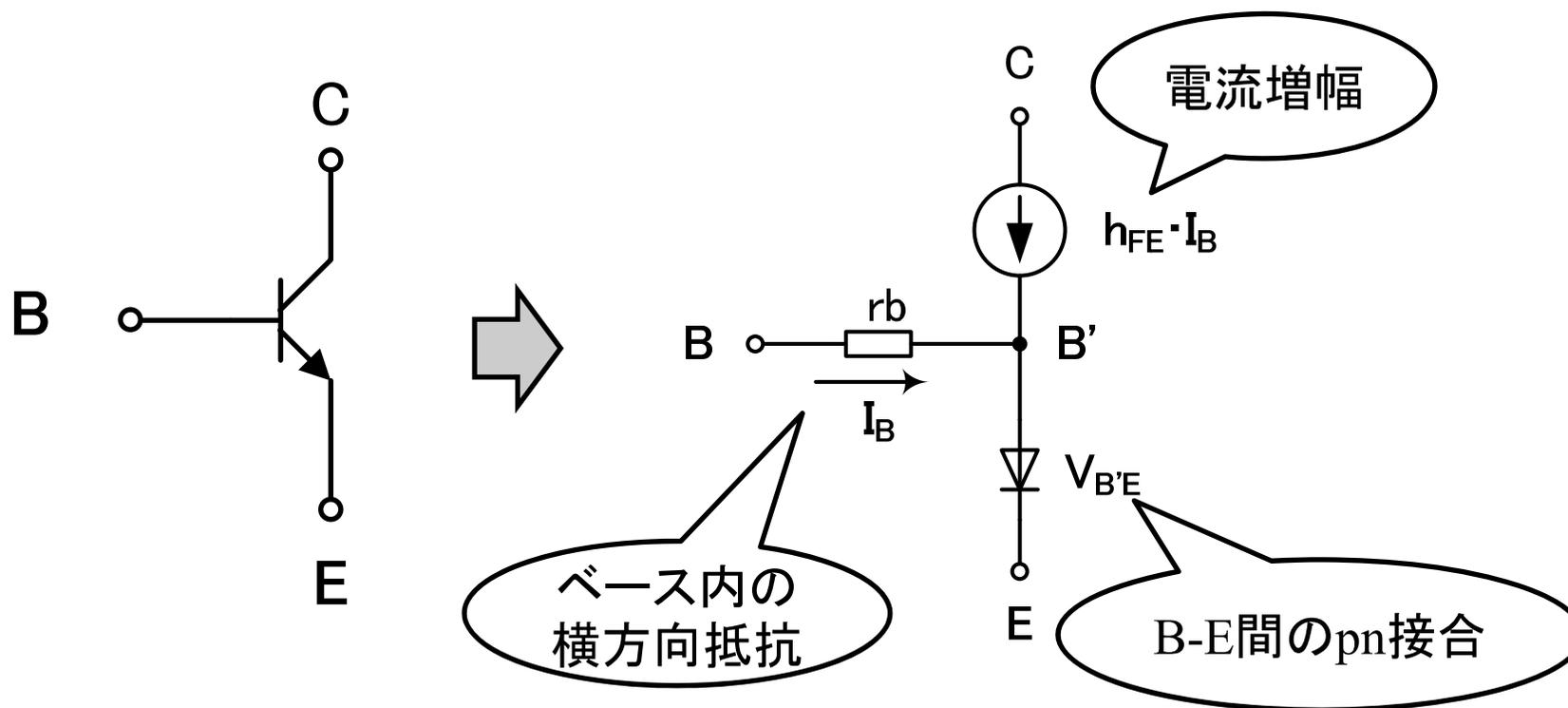
$V_{CC}$ と $V_{BB}$ を一つにまとめた回路  
(トランジスタが動作するために必要な直流電圧を与える回路)



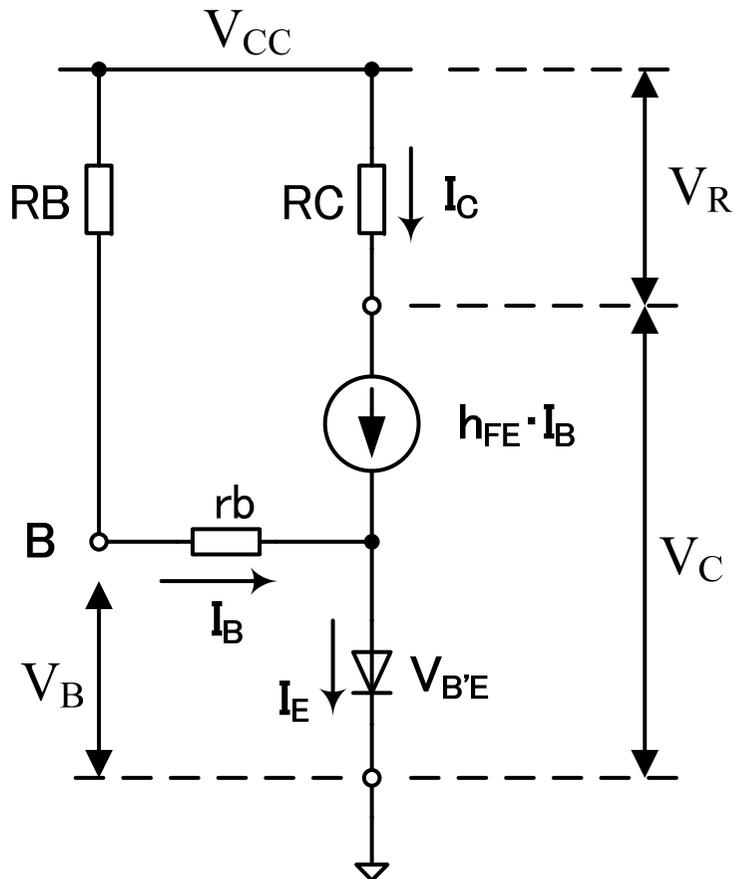
注意: この回路はトランジスタの $h_{FE}$ ばらつきに弱いので実用回路では用いない。動作原理を理解するために紹介する。

# トランジスタの直流等価回路

トランジスタの特性式(デバイスモデル)は複雑なので、近似的に直流等価回路に置き換えて解析するとよい。



# バイアス回路の解析



回路方程式((1)は直流負荷線)

$$V_{CC} = V_R + V_C = I_C R_C + V_C \quad (1)$$

$$V_{CC} = I_B (R_B + r_b) + V_{B'E} \quad (2)$$

式(2)よりバイアスの計算式を求める。

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{B'E}}{R_B + r_b} \quad (4-1)$$

$$I_C = h_{FE} I_B \quad (4-2)$$

$$V_R = R_C \cdot I_C \quad (4-3)$$

$$V_C = V_{CC} - V_R \quad (4-4)$$

以上で、トランジスタのパラメータと抵抗から各部の直流電圧が計算できる。

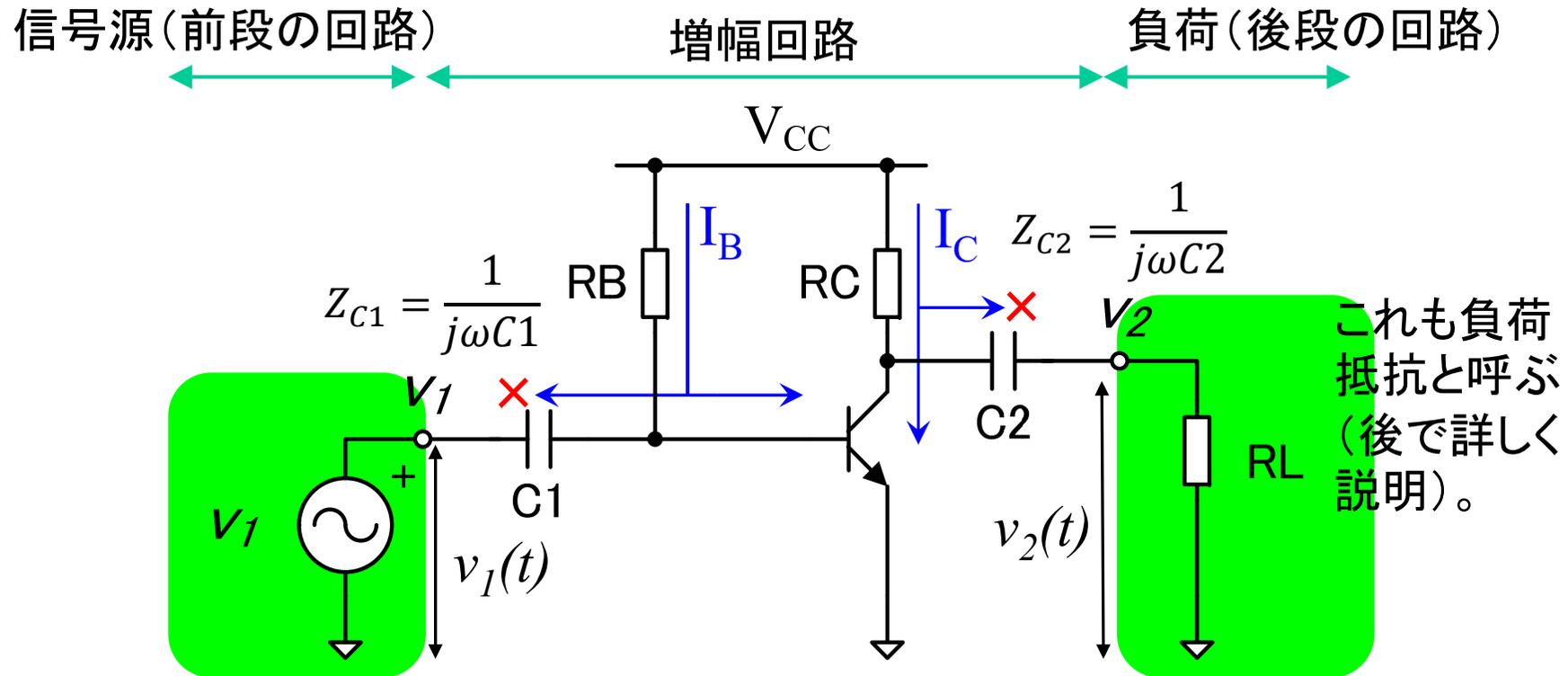
# 課題4.1.1

1. 前ページの回路において、 $V_B$ と $I_E$ をトランジスタのパラメータ( $r_b, h_{FE}, V_{B'E}$ )、抵抗( $RC, RB$ )、電源電圧 $V_{CC}$ で表せ
  - (注) この回路形式では、 $V_E = 0$ となるため、計算する必要はないが、他の回路形式では、 $V_E$ の計算も必要となることが多い
2.  $V_C, I_C, I_B$ を $h_{FE}, r_b, V_{B'E}, RC, RB, V_{CC}$ のみを用いて表せ。これで、回路の全ての配線の直流電位と直流電流が計算可能になる

# 電圧、電流表記の約束

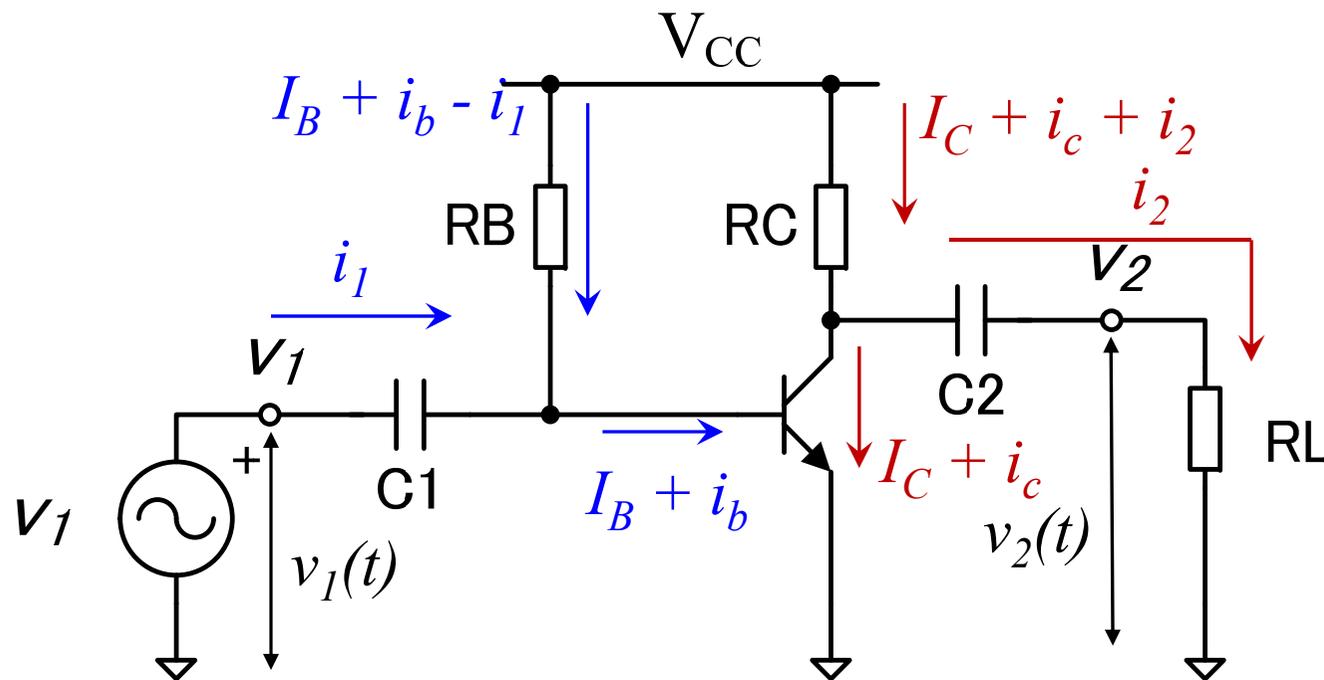
- 直流成分(バイアス)は大文字で表記
  - $V_{CE}$ ,  $V_{BE}$ ,  $I_C$  など
- 交流成分(時間関数)は小文字で表記
  - $v_s$ ,  $i_b$ ,  $v_{ce}$  など
- 交流成分(複素数)は大文字で表記
  - $V_{IN}$ ,  $V_{OUT}$  など
- ただし、適用専門分野の慣習により、規則に従わない場合も多いので、注意が必要

# 交流信号の接続方法



直接、信号源 $v_s$ 、負荷 $R_L$ を接続すると動作点が設計値と違ってしまいますので、結合キャパシタ(Coupling capacitor)で、必要のない直流電流を防ぐ。交流に対して、 $C1, C2$ が十分大きければ、 $|Z_{C1}| = |Z_{C2}| \sim 0$ と近似できる。

# 直流電流と交流電流の経路



直流（大文字）と交流（小文字）の電流経路が異なることに注意。  
トランジスタがOFF ( $I_C + i_c = 0$ ) になっても、 $R_C$ に $i_2$ が流れる。

# 交流信号を加えた回路の解析(1)

出力電圧 $v_2$ の最大値と最小値を求める。

トランジスタが遮断状態(OFF)

$I_C + i_c = 0$  のとき  $v_2 = v_{2max}$  (最大値) =  $RL \cdot i_2$  C2両端の電圧

$$V_{CC} = RC \cdot i_2 + V_C + v_{2max} = \left( \frac{RC}{RL} + 1 \right) v_{2max} + V_C$$

$$v_{2max} = \frac{V_{CC} - V_C}{\frac{RC}{RL} + 1} = \frac{RL}{RC + RL} (V_{CC} - V_C) \quad (4-5)$$

トランジスタが飽和状態(ON)

$V_C + v_2 = V_{CE(sat)} \doteq 0$  のとき  $v_2 = v_{2min}$  (最小値) とすると、

$$v_{2min} = -V_C \quad (4-6)$$

# 交流信号を加えた回路の解析(2)

出力電圧が±両方に同じ振幅となるための条件を求める。

$$|v_{2min}| = |v_{2max}| \quad (4-7)$$

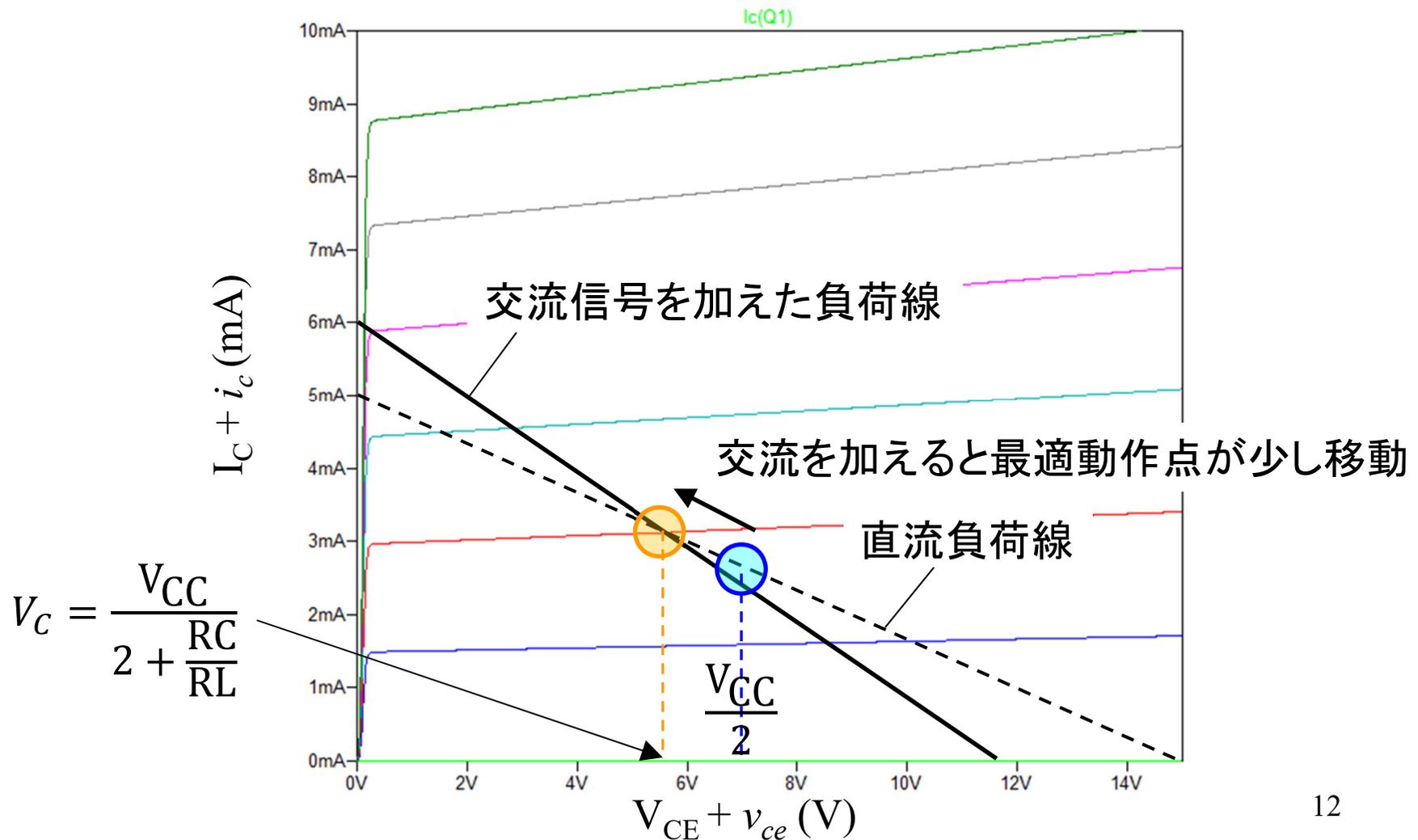
となるためには、

$$\frac{RL}{RC+RL}(V_{CC} - V_C) = V_C \quad (4-8)$$

式(4-8)より、出力電圧振幅が最大となるバイアス条件(  $v_2 = 0$  )は、

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

# 交流信号を加えた負荷線



# 電圧増幅回路の設計手順の例

1. RC, RLは事前に決定しておく
2. 式(4-9)の条件により $V_C$ を求める
3. 直流負荷線により $I_C$ を求める
4.  $h_{FE}$ を用いて $I_B$ を求める
5. 式(4-1)によりRBを求める。 $V_{B'E}$ は、立ち上がり電圧で近似

## 計算に必要な値の例

項目	値の例	根拠
RC	5k $\Omega$	電圧増幅率(後述)、消費電力、 $h_{FE}$ など
RL	10k $\Omega$	後段の回路の特性より決定
$V_{CC}$	15V	出力電圧の振幅、電圧利得、出力電流
$h_{FE}$	300	$h_{FE}$ - $I_C$ 特性のシミュレーションより
$V_{B'E}$	700mV	$V_{BE} \doteq V_{B'E}$ と近似し、 $I_B$ - $V_{BE}$ 特性のシミュレーションから求める
$r_b$	0	実際には100 $\Omega$ 程度あるがとりあえず無視

# 計算によるバイアスの設計の例

$V_{CC} = 15V$ ,  $R_C = 5k\Omega$ ,  $R_L = 10k\Omega$  の場合の、 $R_B$ を決定する。

$$V_C = \frac{V_{CC}}{2 + \frac{R_C}{R_L}} = \frac{15V}{2 + \frac{5k\Omega}{10k\Omega}} = 6.00V$$

$$I_C = -\frac{V_C}{R_C} + \frac{V_{CC}}{R_C} = -\frac{6.00V}{5k\Omega} + \frac{15V}{5k\Omega} = 1.80mA$$

$$I_B = \frac{I_C}{h_{FE}} = \frac{1.80mA}{300} = 6.00\mu A$$

$$R_B + r_b \cong R_B = \frac{V_{CC} - V_{B'E}}{I_B} = -\frac{15V - 0.700V}{6.00\mu A} = 2.38M\Omega$$

# 動作点解析

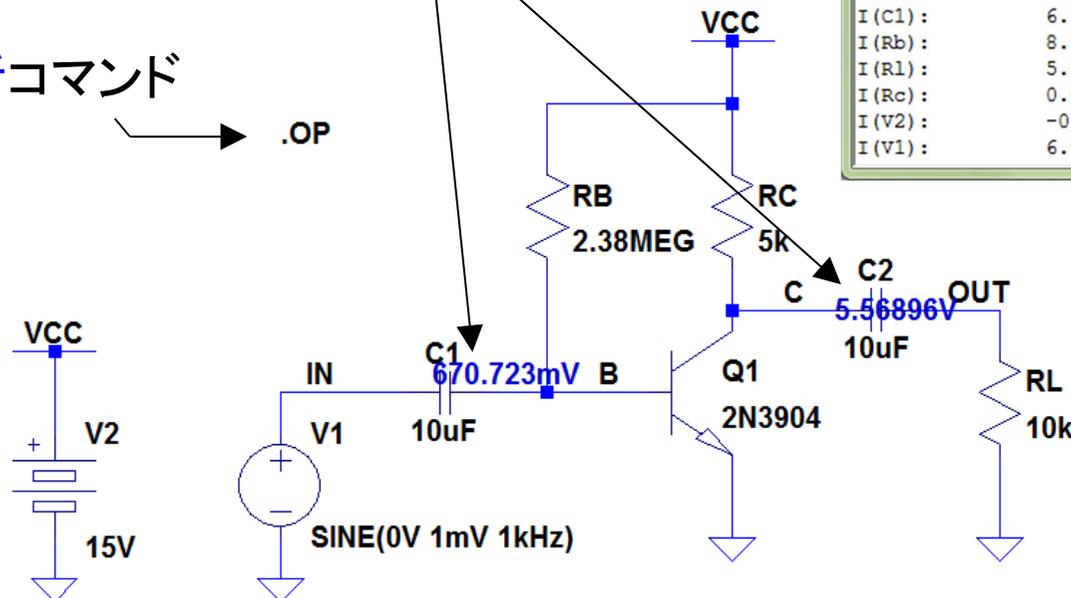
## 動作点解析の結果表示

バイアス電圧を回路図上に表示する方法

1. 空きスペースを右クリック
2. メニュー: view - Place .op Data Flags
3. 表示したい配線をクリック

動作点解析コマンド

.OP

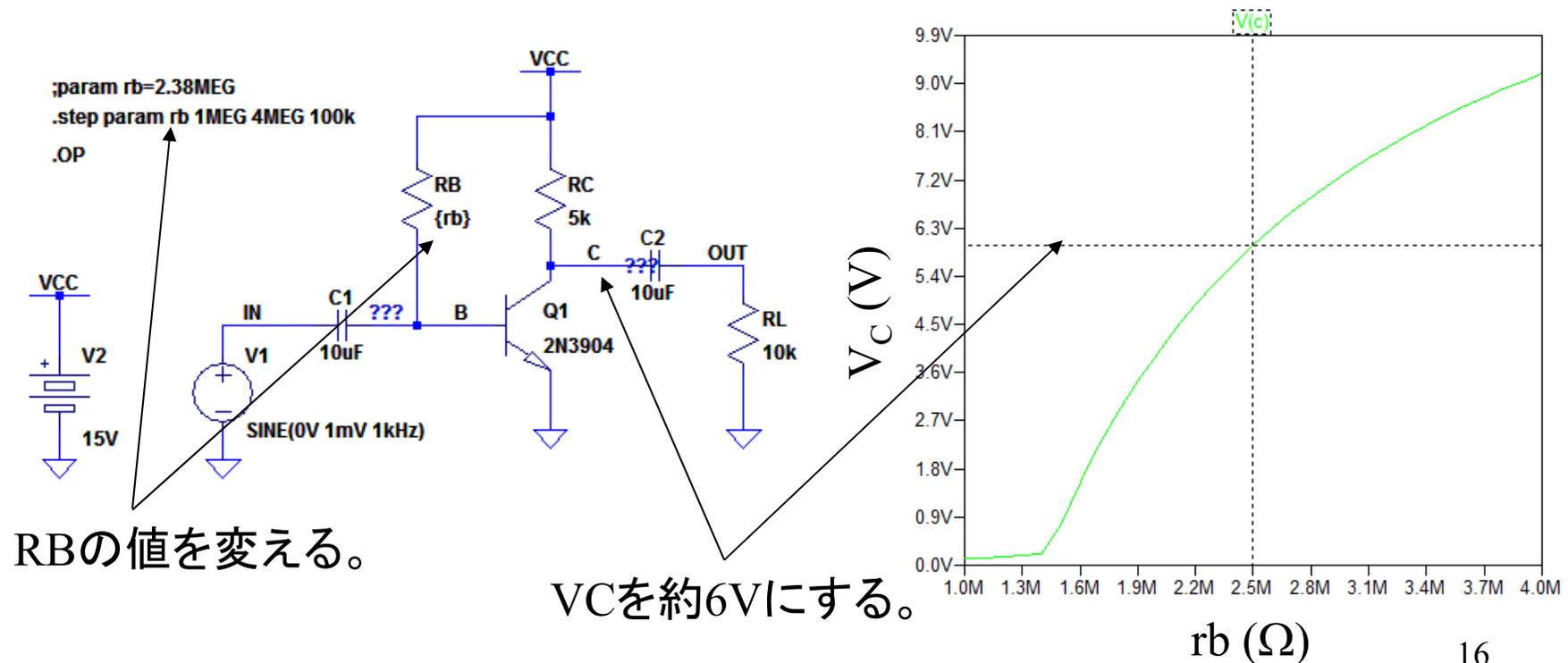


```
J:\Lecture\Ec2\2013\cir\4.1a.asc
--- Operating Point ---
V(vcc):      15          voltage
V(c):        5.67969    voltage
V(out):      5.67969e-013 voltage
V(b):        0.697997   voltage
V(in):       0          voltage
Ic(Q1):      0.00186406 device_current
Ib(Q1):      8.56407e-006 device_current
Ie(Q1):      -0.00187263 device_current
I(C2):       -5.67969e-017 device_current
I(C1):       6.97997e-018 device_current
I(Rb):       8.56407e-006 device_current
I(Rl):       5.67969e-017 device_current
I(Rc):       0.00186406 device_current
I(V2):       -0.00187263 device_current
I(V1):       6.97997e-018 device_current
```

(参考)動作点解析は、AC解析、TRAN解析でも裏で実行されている。 15

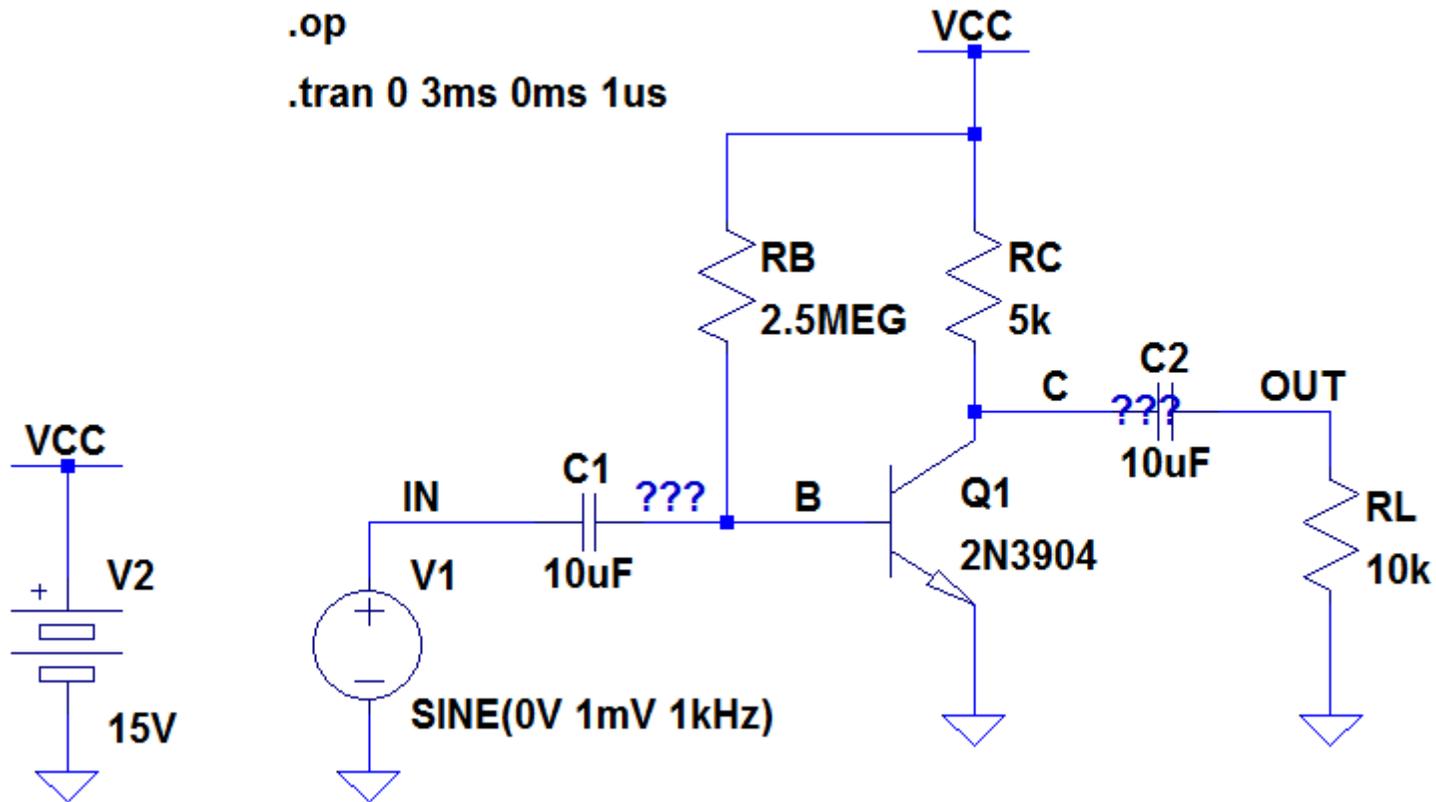
# シミュレーションによるバイアス設計

動作点解析で $V_C$ が設計よりも低めになったため、 $R_B$ をパラメータスイープして、動作点を調整する。 $R_B$ を少し大きくして $I_B$ ,  $I_C$ を絞れば、 $R_C$ の電圧が小さくなるため $V_C$ をあげることができる。



# 過渡応答解析

前ページの動作点解析結果より、RBを2.5MEGΩに変更する。

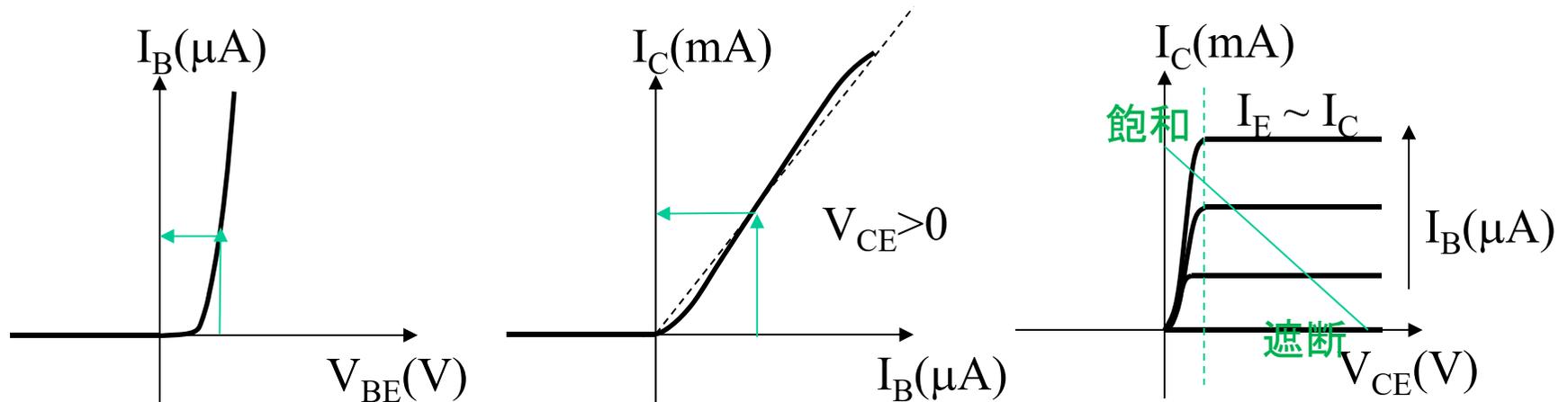


## 課題4. 1. 2

1. 前スライドの回路で、TRAN解析を実行し、入力電圧 $V(IN)$ と出力電圧 $V(OUT)$ の波形を示せ
2. TRAN解析の結果より、 $V(IN)$ ,  $V(OUT)$ ,  $V(B)$ ,  $V(C)$ それぞれに含まれる、直流電圧成分の大きさおよび交流電圧成分の振幅を求めよ
3. 信号源 $V1$ の振幅を変更してシミュレーションを行い、出力電圧の振幅が何ボルトぐらいになると出力波形の歪みが大きくなるか、シミュレーションにより求めよ

# 歪み (Distortion)

入力信号源の電圧振幅を大きくすると、出力波形に歪みが発生する。歪みの原因は、半導体デバイスの非線形性(比例関係の不成立)に起因する。電球など発熱するものも非線形な特性を持つ。



入力電圧に対して入力電流波形が歪む。

入力電流と出力電流の線形性は比較的よい。

活性領域からはみ出すと出力電圧波形が歪む。

# 4.1節のまとめ

- バイアス回路
  - トランジスタに適切な直流バイアスを印加し、動作点を決定するための回路構成
- 信号源と負荷はバイアスを乱すので直接トランジスタに接続できない
  - 前段の回路や後段の回路にも同じバイアス電圧が加わっていれば、直接接続ができる(一般的には回路毎にバイアスが異なる)
  - 前段、後段の回路とバイアスが一致していない場合は、結合キャパシタを介して信号源と負荷を接続する
- 最適な動作点は負荷抵抗の値によって変わる
  - 直流負荷線と交流信号を加えた負荷線は一致しない(負荷抵抗が $\infty$ なら一致)
  - 負荷抵抗を接続した場合の、最適動作点は、+/-両方向の振幅が等しくなる条件から求めることができる
- 動作点は、回路シミュレータの動作点解析で調べることができる
  - AC解析、TRAN解析でも動作点の計算はしているので、回路シミュレータの操作で表示させることもできる
  - 回路を設計したら、先ず動作点が正しいかシミュレーションで確認する必要がある
- 増幅回路の歪み
  - 波形の歪みは、主に半導体素子の非線形性(と周波数特性)に起因する