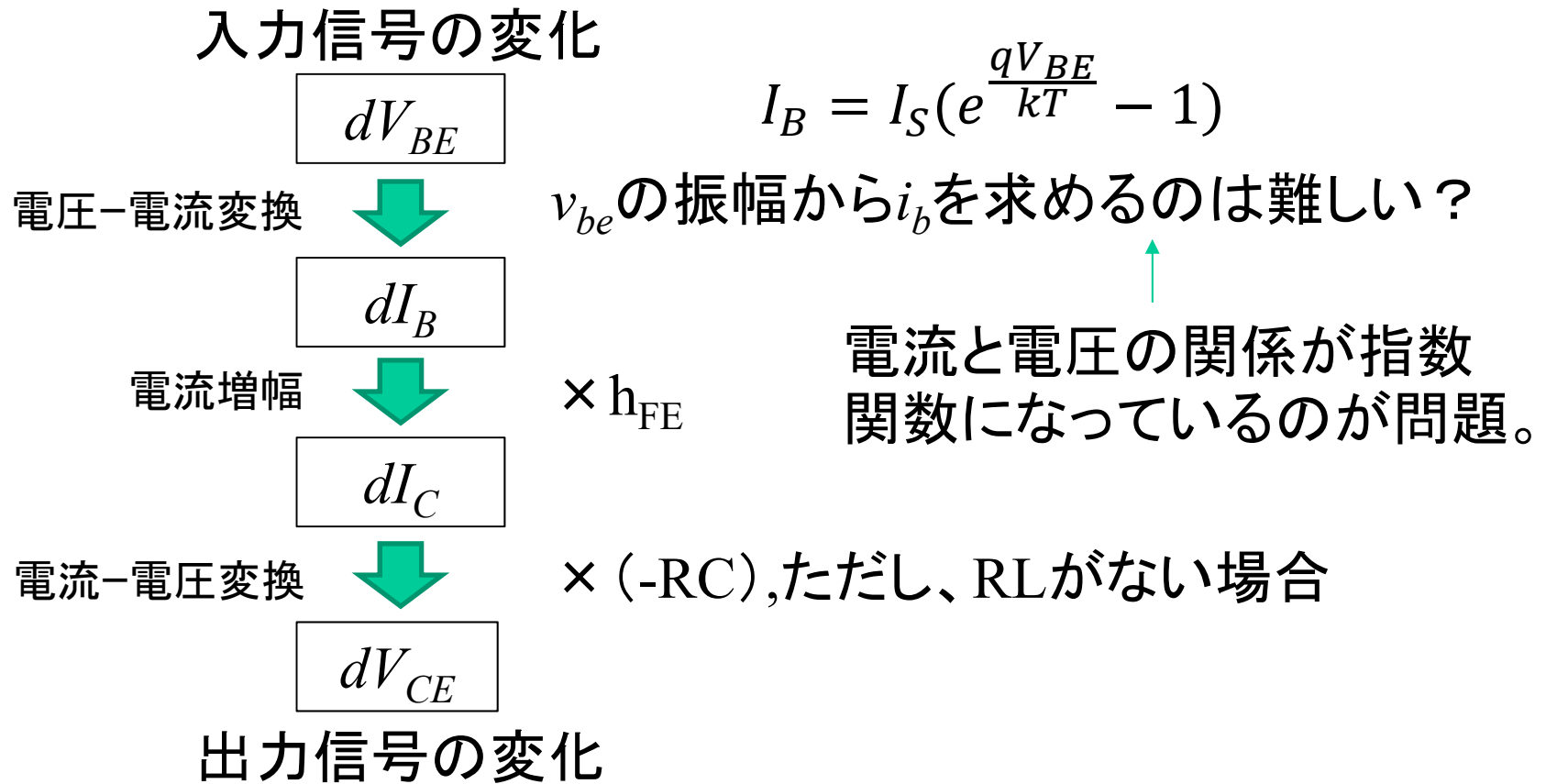


## 4.2 小信号パラメータ

# 電圧利得をどのように求めるか



# pn接合の非線形性への対処

直流バイアスに対する抵抗

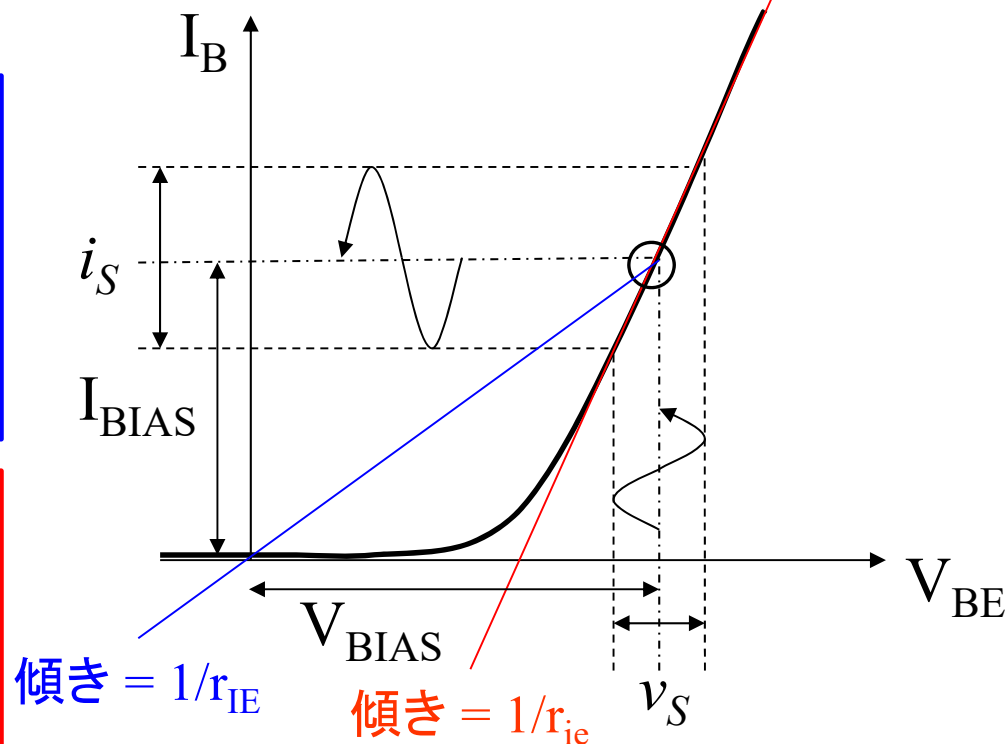
$$\frac{V_{\text{BIAS}}}{I_{\text{BIAS}}} \equiv r_{\text{IE}} (\Omega)$$

$V_{\text{BIAS}}$ を変えると値が変わってしまう。

小信号に対する抵抗

$$\frac{v_S}{i_S} \cong \frac{dV_{\text{BE}}}{dI_B} \equiv r_{\text{ie}} (\Omega)$$

$v_S$ の振幅を変えても殆ど一定。



振幅の小さい交流信号 = 小信号 (Small signal) に対する抵抗 (定数) と考える  
= 小信号近似 と呼ばれる (交流信号に対して線形近似ができる)。

# 直流と小信号の電流増幅率

バイアスに対する電流増幅率

$$\frac{I_{\text{BIAS2}}}{I_{\text{BIAS1}}} \equiv h_{\text{FE}} = \beta_0$$

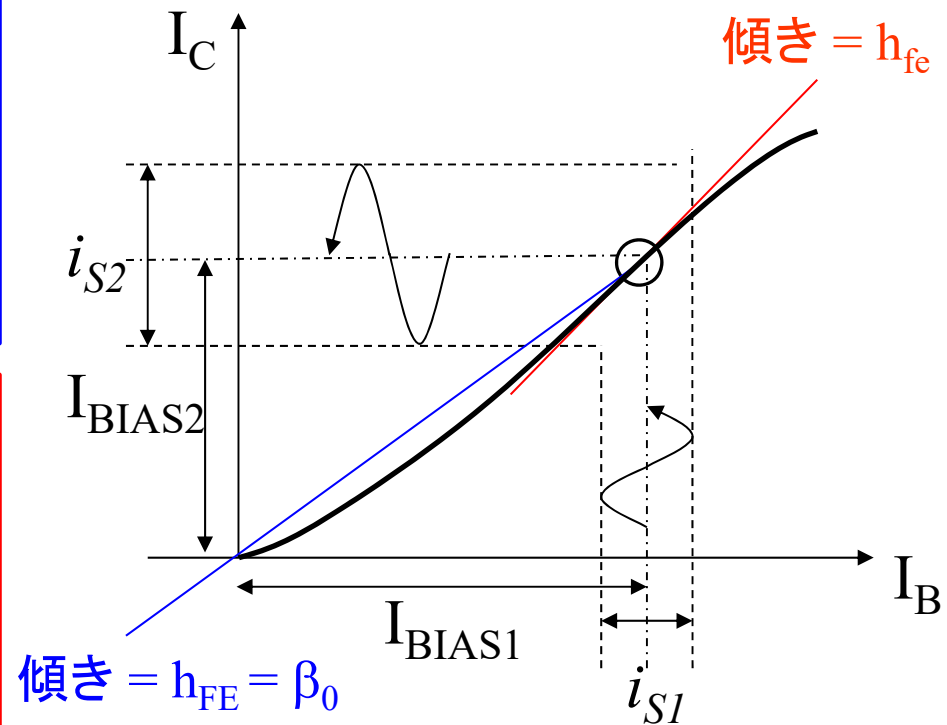
$I_{\text{BIAS1}}$  を変えると少し変化する。

小信号に対する電流増幅率

$$\frac{i_{S2}}{i_{S1}} \cong \frac{dI_C}{dI_B} \equiv h_{\text{fe}}$$

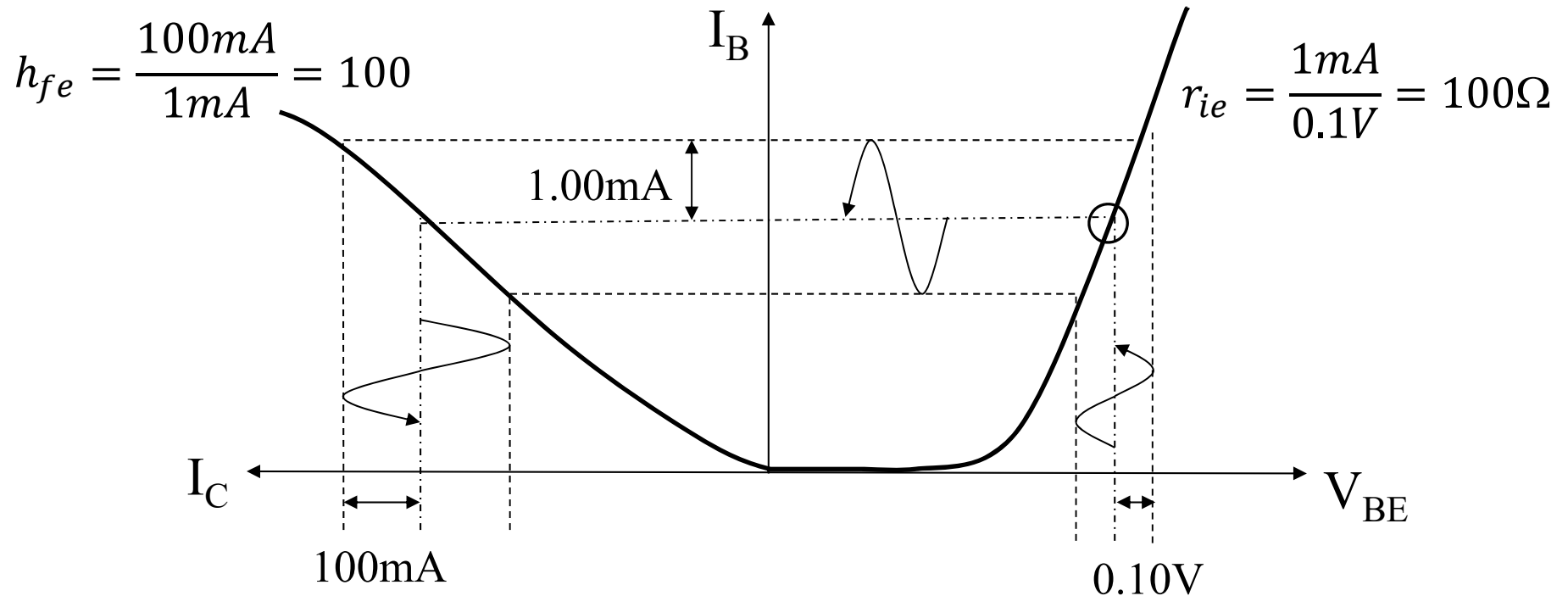
$i_{S1}$  の振幅を変えても殆ど一定。

$r_{ie}$ ,  $h_{\text{fe}}$  などを総称して小信号パラメータと呼ぶ。



$h_{\text{FE}} \doteq h_{\text{fe}}$  だが少し異なる。  
(完全な線形特性であれば一致する。)

# トランスコンダクタンスの定義



トランスコンダクタンス： 入力電圧→出力電流の変換係数

$$g_m \equiv \frac{dI_C}{dV_{BE}} = \frac{dI_B}{dV_{BE}} \frac{dI_C}{dI_B} = \frac{h_{fe}}{r_{ie}} = \frac{100}{100\Omega} = 1.00[\text{S}]$$

[S] = [1/Ω] : ジーメンズ(コンダクタンスの単位)

# 電圧利得の計算

電圧利得(Voltage gain)は電圧増幅率とも呼ばれる。

$$Gain \equiv \frac{dV_{CE}}{dV_{BE}} = \frac{dI_C}{dV_{BE}} \frac{dV_{CE}}{dI_C} = g_m \frac{dV_{CE}}{dI_C}$$

$$V_{CE} = V_{CC}(\text{定数}) - I_C RC$$

$$\frac{dV_{CE}}{dI_C} = -RC$$

抵抗が大きいと電圧利得が大きい。

$$\therefore Gain = -g_m RC = -\frac{h_{fe}}{r_{ie}} RC = -1S * 1k\Omega = -1000\text{倍}$$

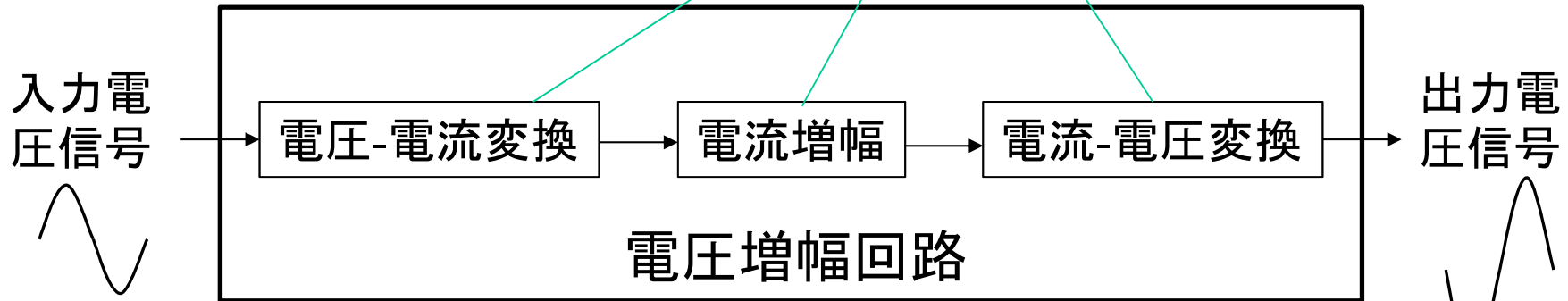
(例えば)

→記憶しておこう。 $g_m$ はトランジスタのパラメータで決まる。6

# 電圧増幅率の計算式の意味

$$Gain = -g_m RC = -\frac{1}{r_{ie}} h_{fe} RC$$

変換係数

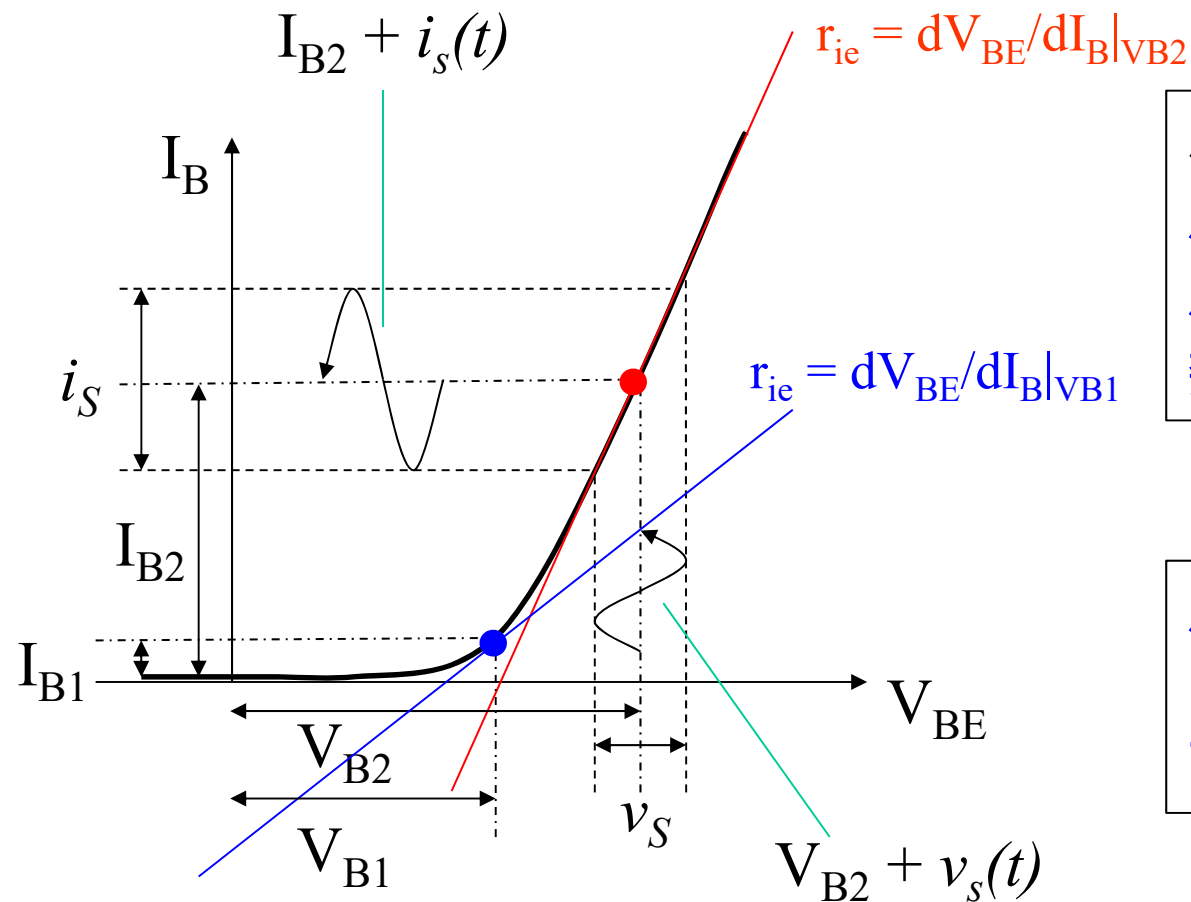


大きな電圧増幅率を実現するためには

- 入力から見た抵抗を小さく
- 電流増幅率は大きく
- 出力の抵抗を大きく

Gainが負なので  
位相が逆になる。

# バイアスと小信号パラメータの関係



小信号パラメータは、  
バイアス電圧または  
バイアス電流の関  
数となっている。

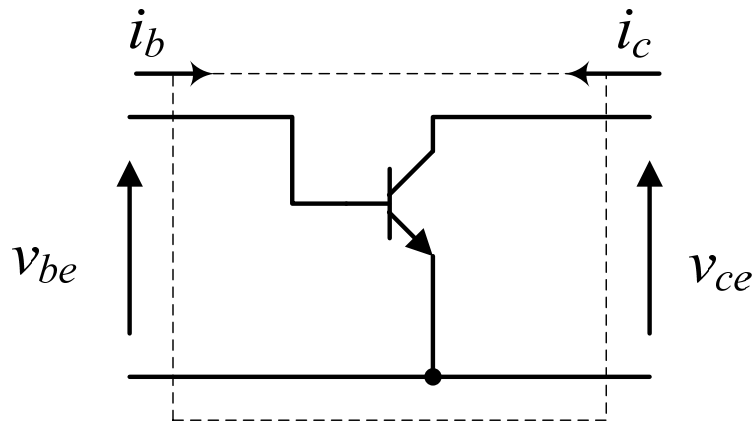


バイアスが変わると  
回路の性能、特性も  
変わるので注意。

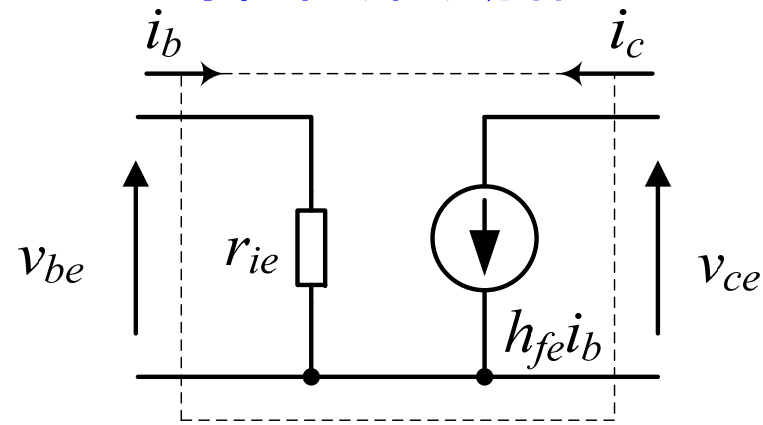


# トランジスタの $\pi$ 形等価回路

$\pi$ 形等価回路(動作モデル)



小信号に対しては、近似的に線形性が成り立つので、線形素子に置き換えが可能。

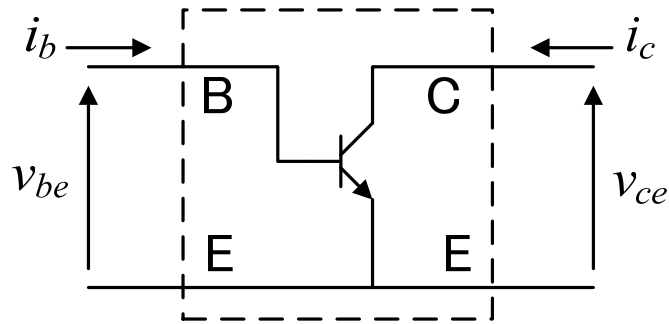


$$r_{ie} = \frac{v_{be}}{i_b} \quad h_{fe} = \frac{i_c}{i_b}$$
$$g_m = \frac{i_c}{v_{be}} = \frac{i_b}{v_{be}} \frac{i_c}{i_b} = \frac{1}{r_{ie}} h_{fe}$$

トランジスタの小信号等価回路中の電流源の値は、 $h_{fe} \cdot i_b$ となっていて、電流  $i_b$  に比例して値が変化する。入力電流によって制御されているので、**電流制御電流源**と呼ばれる。

# hパラメータ

$h_{fe}$ のh由来はハイブリッドパラメータ。



$$\begin{bmatrix} v_{be} \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_b \\ v_{ce} \end{bmatrix}$$

$$\equiv \begin{bmatrix} h_{ie} (\Omega) & h_{re} \\ h_{fe} & h_{oe} (S) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_b \\ v_{ce} \end{bmatrix}$$

↑  
トランジスタのhパラメータ表記法

(参考)

i : input

o : output

r : reverse

f : forward

e : emitter common

$h_{ie}$  : 入力抵抗 (定義より  $r_{ie}$  と同じ)

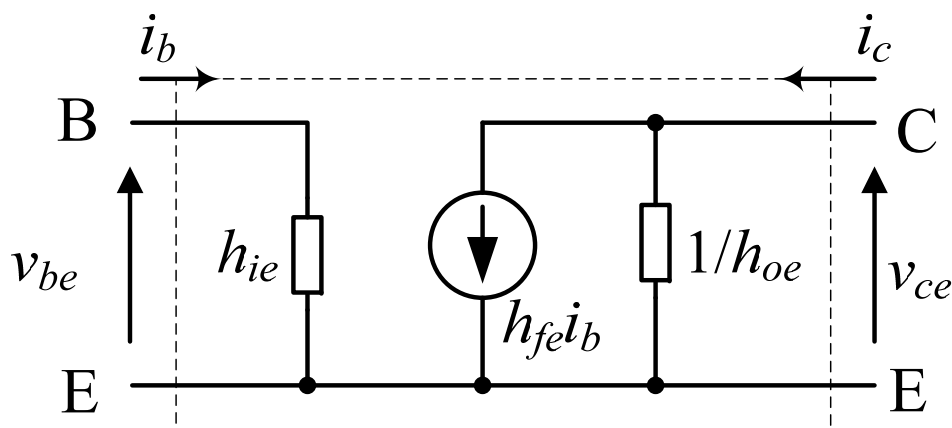
$h_{re}$  : 逆方向電圧増幅率 (通常  $h_{re} \doteq 0$ )

$h_{fe}$  : 順方向電流増幅率

$h_{oe}$  : 出力コンダクタンス

# hパラメータとπ形等価回路の関係

スライド9の回路には、 $h_{oe}$ が表されていないので、少し改良する。  
 $h_{re}$ は、ほぼ0なので無視できる。



$$h_{fe}i_b = g_m v_{be}$$
$$g_m = h_{fe}/h_{ie}$$

## トランジスタ回路の解析法(※)

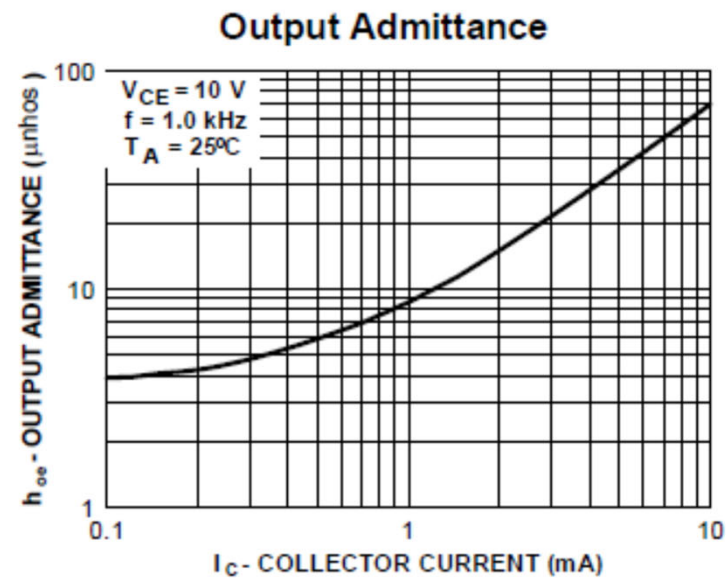
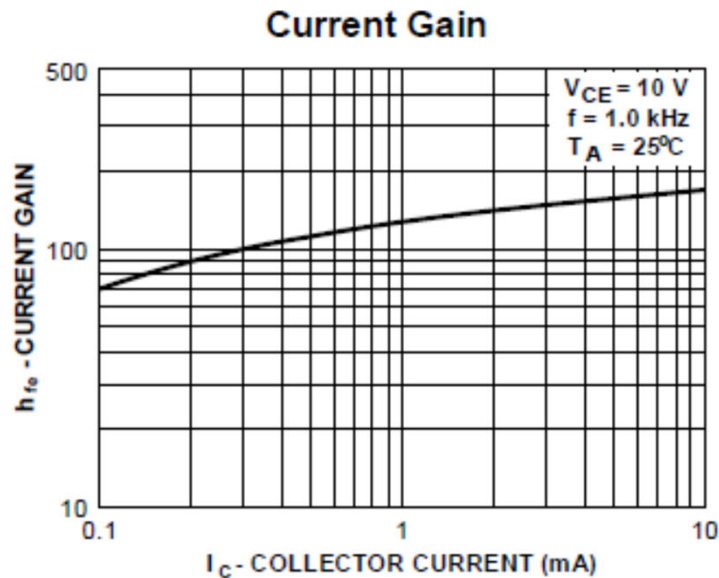
1. バイアスの算出
2. hパラメータをデータシートで読み取る
3. トランジスタを等価回路で置き換える
4. 利得などを手計算で求める

※ 回路シミュレータのAC解析は、この手順を自動化している。従って、AC解析では、非線形性の影響をシミュレーションできない(入力振幅は任意設定可)。

# データシートの読み方

$h_{fe}$  の  $I_C$  依存性 ( $V_{CE}$  一定)

$h_{oe}$  の  $I_C$  依存性 ( $V_{CE}$  一定)



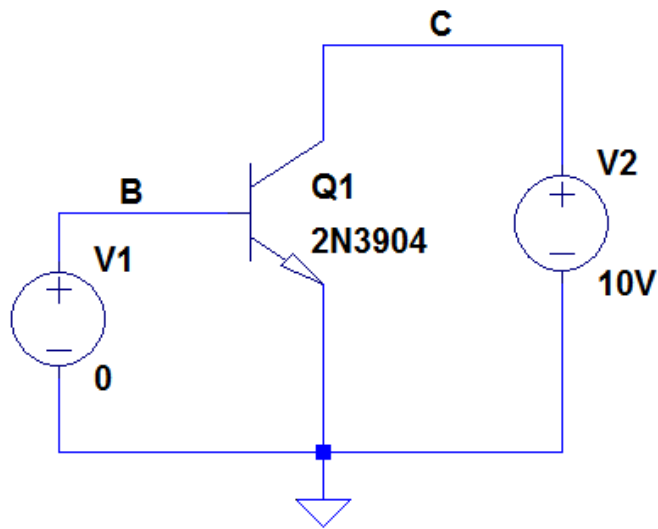
$h_{fe}$ ,  $g_m$  などのパラメータは、バイアス  $I_C$ ,  $V_{CE}$  に依存して変化する。

(注意) 直流バイアスの計算には、 $h_{fe}$  ではなく  $h_{FE}$  を使用すること。

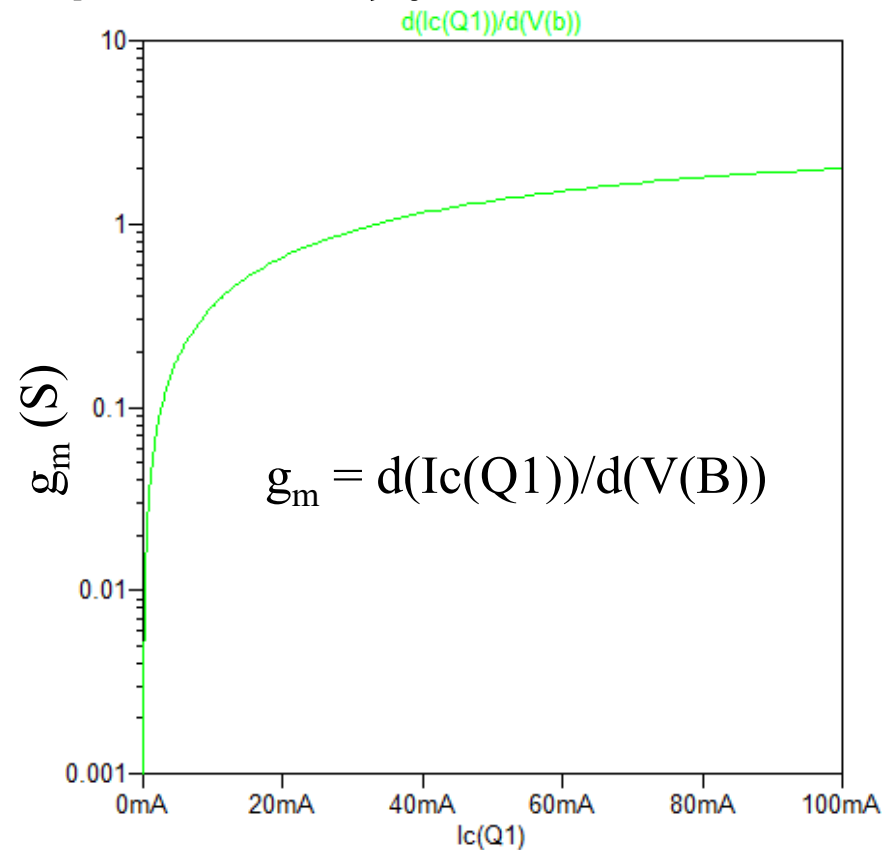
# $g_m$ - $I_C$ 特性のシミュレーション

通常、データシートには $h$ パラメータしか記載されていない。  
 $g_m = h_{fe}/h_{ie}$  の関係より、 $g_m$  を手計算で求めることができるが、  
ここでは、シミュレーションで求めてみよう。

.dc V1 0 0.85 0.001



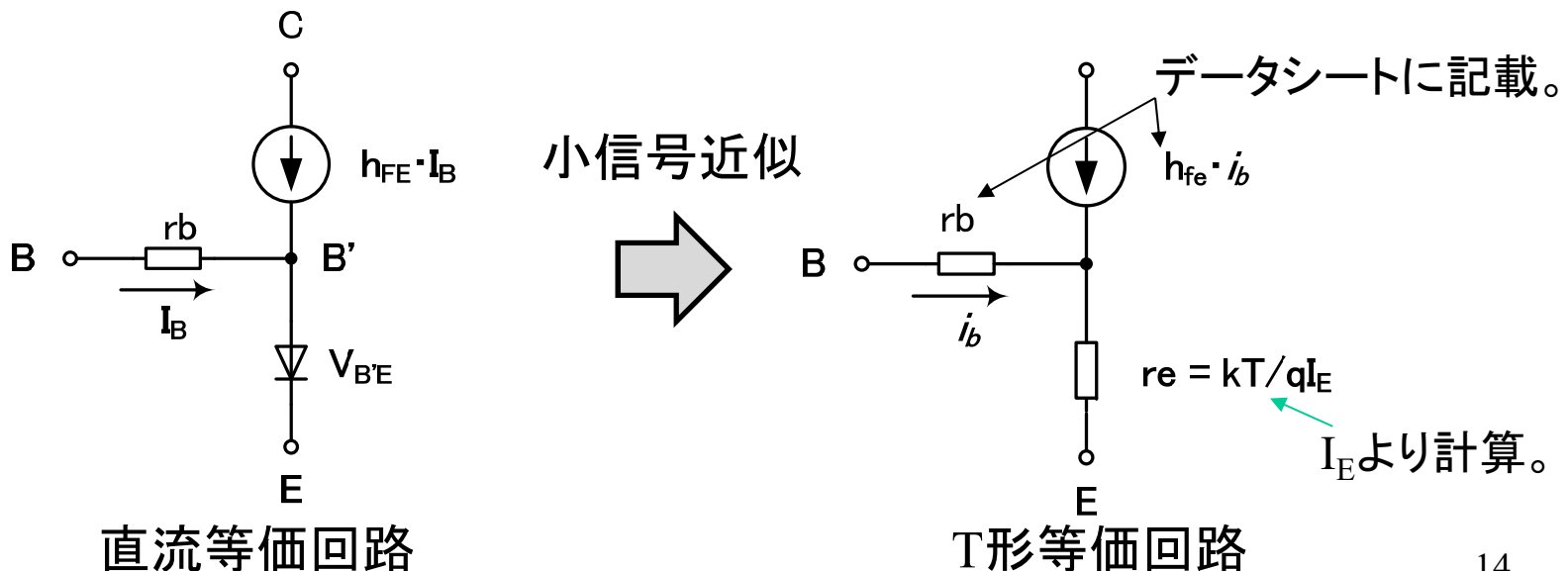
測定回路



# トランジスタのT形等価回路

hパラメータを用いて表す $\pi$ 形等価回路の他にT形等価回路もよく使われる。

| 等価回路の形式     | 特徴  |
|-------------|---|
| $\pi$ 形等価回路 | hパラメータで表せる(容易に測定できる)。<br>デバイスの構造とは関係がない動作モデル。 |
| T形等価回路      | デバイスの構造と対応関係がある。                              |



## (参考) $r_e$ の計算方法

エミッタ電流は、B-E間のpn接合に流れる電流に比例するためダイオードと同じ指数関数で表される。

$$I_E = \frac{I_C}{h_{FB}} = \frac{h_{FE}}{h_{FB}} I_B = \frac{h_{FE}}{h_{FB}} I_S (e^{\frac{qV_{B'E}}{kT}} - 1)$$

$$\frac{dI_E}{dV_{B'E}} = \frac{1}{r_e} = \frac{q}{kT} \frac{h_{fe}}{h_{fb}} I_S e^{\frac{qV_{B'E}}{kT}} \cong \frac{q}{kT} I_E$$

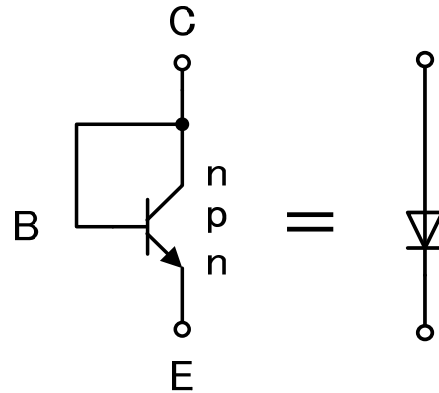
$$r_e = \frac{dV_{B'E}}{dI_E} = \frac{kT}{q} \frac{1}{I_E}$$

T=300K(室温)のとき、

$$r_e = \frac{dV_{B'E}}{dI_E} = \frac{kT}{q} \frac{1}{I_E} = \frac{1.380 \cdot 10^{-23} \text{J/K} \cdot 300.0 \text{K}}{1.602 \cdot 10^{-19} \text{Coul}} \frac{1}{I_E} = \frac{26 \text{mV}}{I_E}$$

# トランジスタのダイオード接続

トランジスタを(トランジスタと全く同じ温度特性を持つ)ダイオードとして使用することができる。

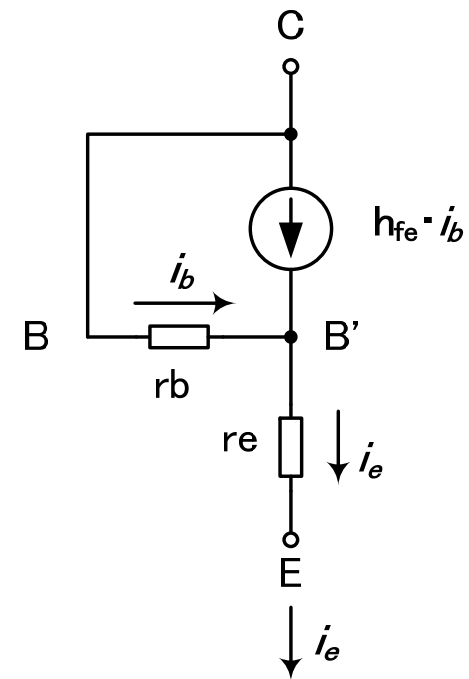


$$i_e = h_{fe} i_b + i_b = (h_{fe} + 1) i_b$$

$$v_{be} = r_b i_b + r_e i_e = \left( \frac{r_b}{h_{fe} + 1} + r_e \right) i_e$$

$$r_{B'E} = \frac{v_{be}}{i_e} = \left( \frac{r_b}{h_{fe} + 1} + r_e \right) \cong r_e$$

$r_b$ の影響をほぼ取り除くことができる。



小信号等価回路



# 増幅回路の小信号等価回路

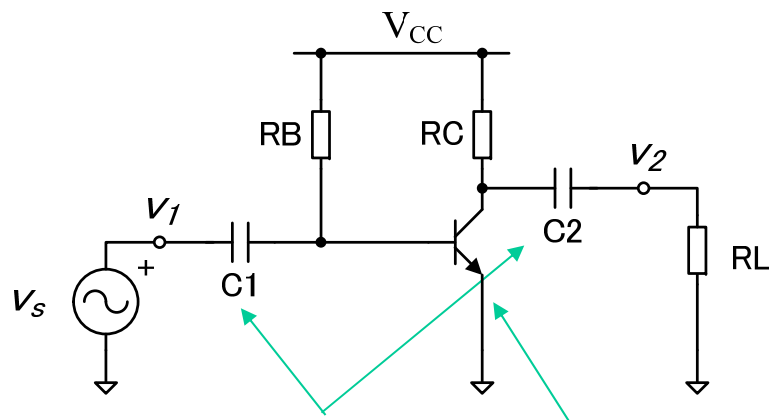
交流と直流を合わせて解析すると非常に煩雑になるため、交流信号(小信号)は分けて解析を簡単化する。交流小信号に対する等価回路を小信号等価回路(small-signal equivalent circuit)と呼ぶ。実際には、バイアスがないとトランジスタが動作しないので、小信号等価回路は、回路解析のための仮想的な回路である。

## 小信号等価回路の作成手順

1. トランジスタを小信号等価回路に置き換える
2. 結合キャパシタはインピーダンスが小さいので短絡させる
3. 直流電圧源は、GNDにする(直流電圧成分を取り除く)
4. 直流電流源は、開放する(直流電流成分を取り除く)
5. 回路を解析しやすく等価変形する

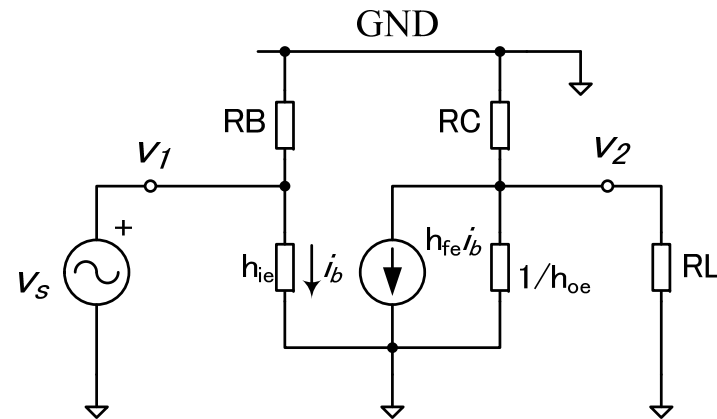
# 小信号等価回路の作成例1

## トランジスタの $\pi$ 形等価回路を使用した例

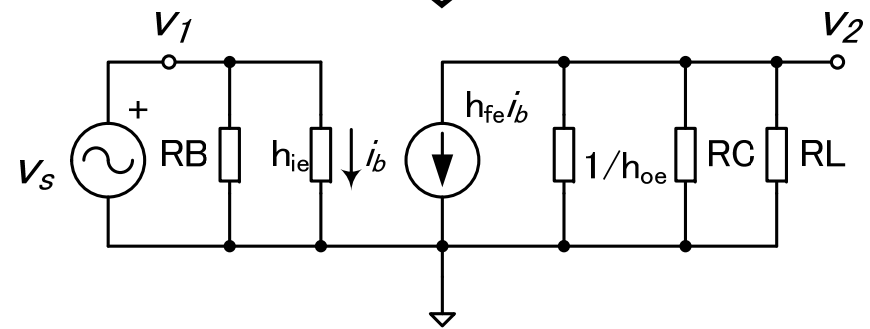


結合キャパシタを短絡。

トランジスタを等価回路に置き換え。



変形



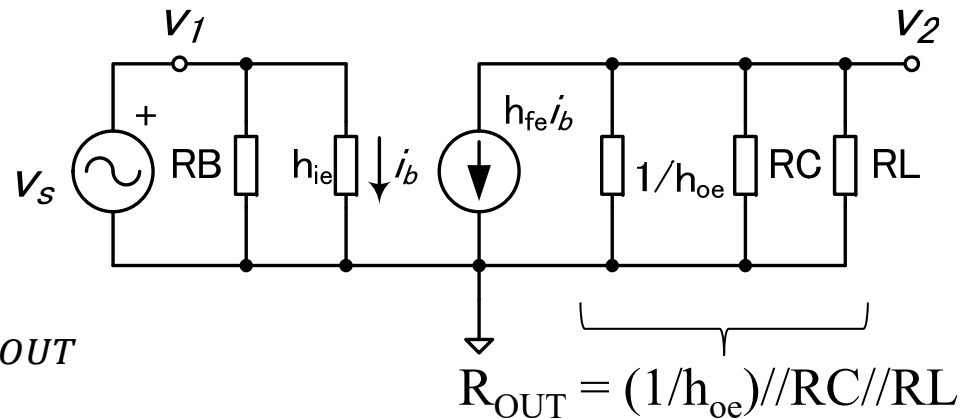
# 小信号等価回路を用いた電圧利得の解析

RCのみを考慮した電圧利得は既に求めたが、小信号等価回路でRB, RLも考慮した正確な電圧利得を求めてみよう。

回路方程式

$$\begin{cases} v_1 = h_{ie} i_b \\ v_2 = -R_{OUT} h_{fe} i_b \end{cases}$$

$$Gain = \frac{v_2}{v_1} = -\frac{h_{fe}}{h_{ie}} R_{OUT}$$



大きな電圧利得を達成する方法

- $h_{fe}$  の大きなトランジスタを使用する
- $h_{ie}$  の小さなトランジスタを使用する
- RC, RL の値を大きくする

RC, RL両方合わせて電流-電圧変換素子として働く。このため、RC, RL両方が負荷と呼ばれる。

# 2種類の電圧利得の計算法

1. 出力電圧対入力電圧の微分係数 (DC解析による方法)

$$Gain = \frac{dV_{OUT}}{dV_{IN}}$$

- 長所: 非線形性があっても計算できる
- 短所: キャパシタやインダクタが含まれていると計算できない

2. 入力と出力の交流信号振幅の比 (AC解析による方法)

$$Gain = \frac{v_{out}}{v_{in}}$$

- 長所1: キャパシタやインダクタが含まれていても計算できる
- 長所2: 小信号等価回路を用いて計算できる
- 短所: 波形が歪むと正確に計算できない

# 電圧利得の計算例

4.1節スライド14の電圧増幅回路の電圧利得を計算してみよう。

$$I_C = (V_{CC} - V_C)/RC = (15V - 6V)/5k\Omega = 1.8mA \text{ のとき}$$

$$h_{fe} = 313$$

$$h_{ie} = 4.58k\Omega$$

$$h_{oe} = 17.9\mu S$$

} データシートまたはシミュレーションで求める。  
(求め方は、後のスライドを参照。)

$RC = 5k\Omega$ ,  $RL = 10k\Omega$  のとき

$$R_{OUT} = \frac{1}{h_{oe} + \frac{1}{RC} + \frac{1}{RL}} = 3.15k\Omega$$

$$Gain = -\frac{h_{fe}}{h_{ie}} R_{OUT} = -215$$

## 課題4. 2

1. トランジスタのT形等価回路を使用した電圧増幅回路の小信号等価回路を求めよ
2. トランジスタのT形等価回路を使用した小信号等価回路を用いて、電圧利得の計算式を求めよ

# 小信号パラメータの測定

エミッタ接地増幅回路の小信号パラメータの定義

$$\begin{bmatrix} v_{be} \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{ie} & h_{re} \\ h_{fe} & h_{oe} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_b \\ v_{ce} \end{bmatrix}$$

$V_{CE} =$  一定の測定回路で測定(※)

$$h_{ie} = \left. \frac{v_{be}}{i_b} \right|_{v_{ce}=0}$$

$$h_{fe} = \left. \frac{i_c}{i_b} \right|_{v_{ce}=0}$$

$$g_m = y_{21} = \left. \frac{i_c}{v_{be}} \right|_{v_{ce}=0}$$

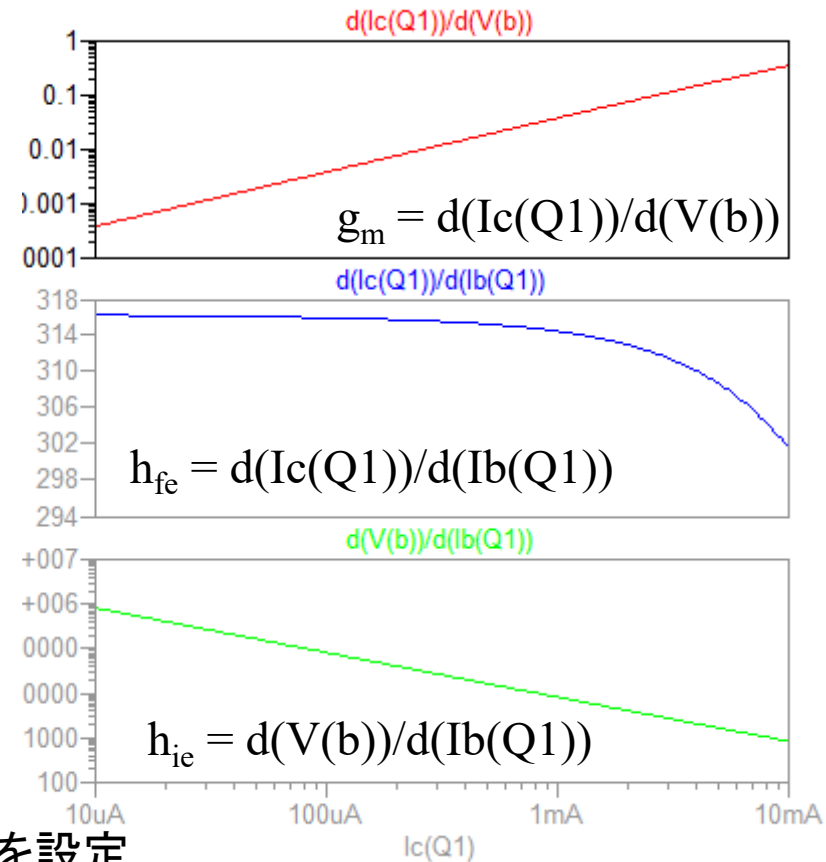
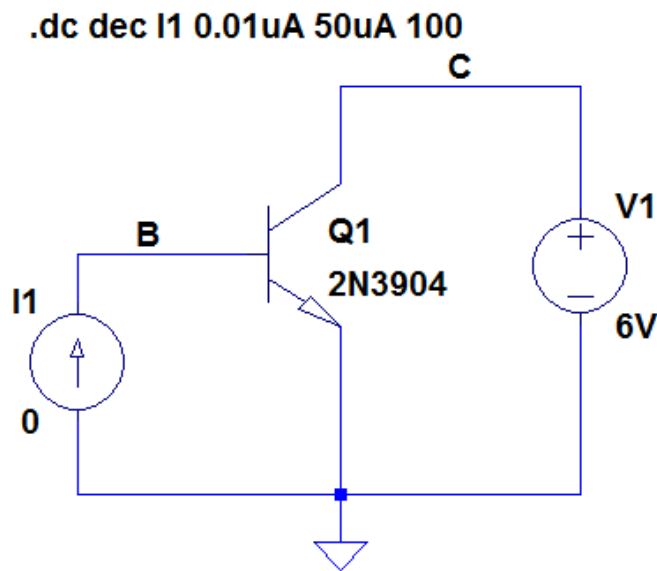
$I_B =$  一定の測定回路で測定(※)

$$h_{oe} = \left. \frac{i_c}{v_{ce}} \right|_{i_b=0}$$

※ 直流バイアス $V_C, I_B$ を加えて測定する。

# 小信号パラメータのシミュレーション 測定 (DC解析の微分による方法)

$h_{ie}$ ,  $h_{fe}$ ,  $g_m$  の測定回路



1. メニュー: Plot Settings - Add trace
2. Expression(s) to add に縦軸の計算を設定
3. 横軸: Quantity Plotted =  $Ic(Q1)$ , Logarithmicにチェック



## 4.2節のまとめ

- 半導体デバイスの非線形特性への対処
  - 電流電圧特性をバイアス近傍の傾きに相当するパラメータで近似する(小信号近似)
  - 例1:  $I_B$ - $V_{BE}$  特性のバイアス点での傾きをコンダクタンス  $1/r_{ie}$  で近似する
  - 例2:  $I_C$ - $V_{BE}$  特性のバイアス点での傾きを相互コンダクタンス  $g_m = y_{21}$  とする
- トランジスタの等価回路
  - $\pi$ 形等価回路とT形等価回路が使用される
  - $\pi$ 形等価回路はhパラメータで表せる
  - (参考)2端子対回路のパラメータは相互変換が可能なので、どのパラメータを使用してもよい
- 小信号等価回路
  - 直流バイアスと交流信号を分けて、小信号等価回路による交流成分に対する解析を行うと、回路方程式が簡単に作れる
  - 交流信号に対して、RCとRLの両方が負荷として働く