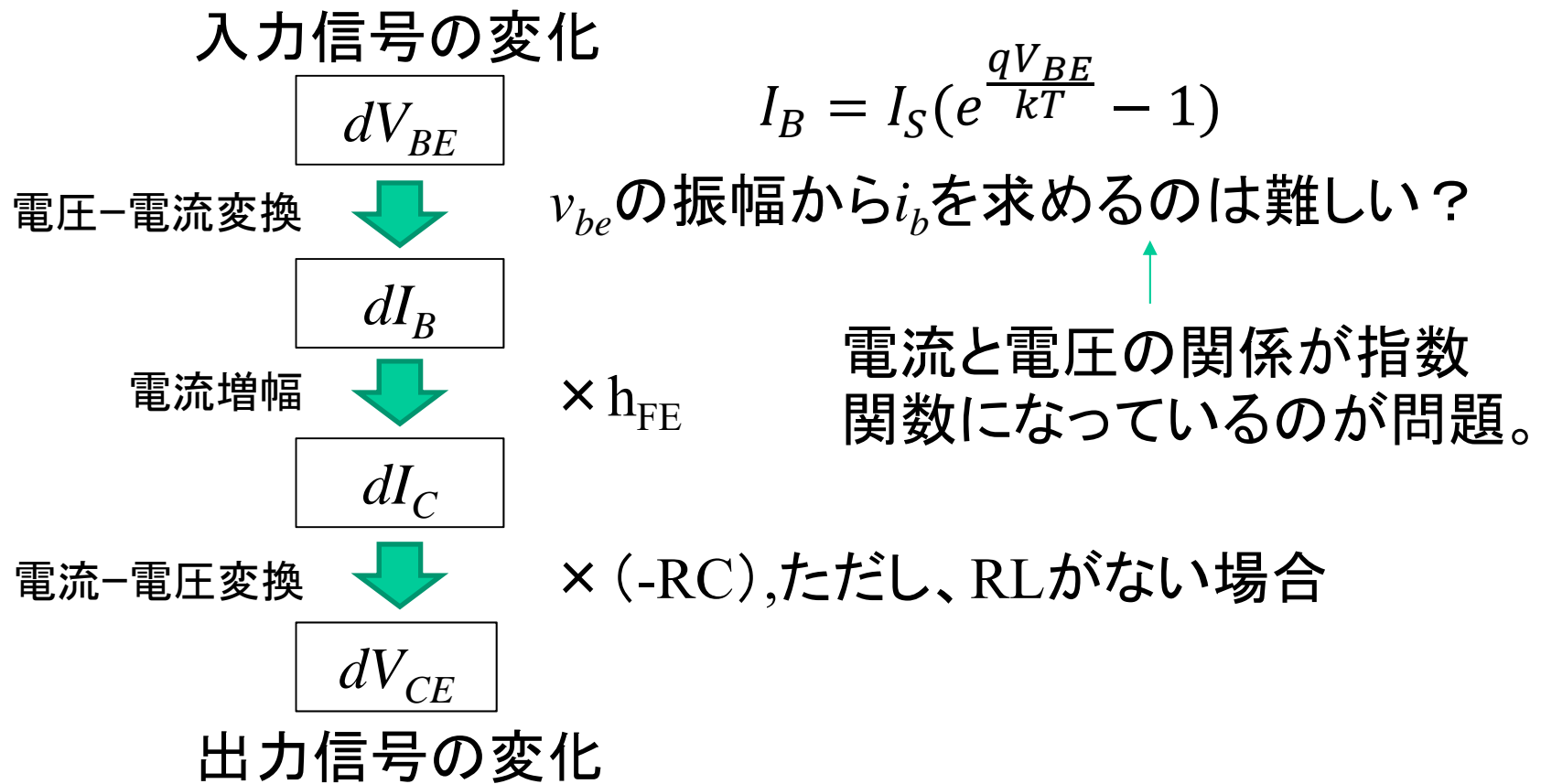


4.2 小信号パラメータ

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

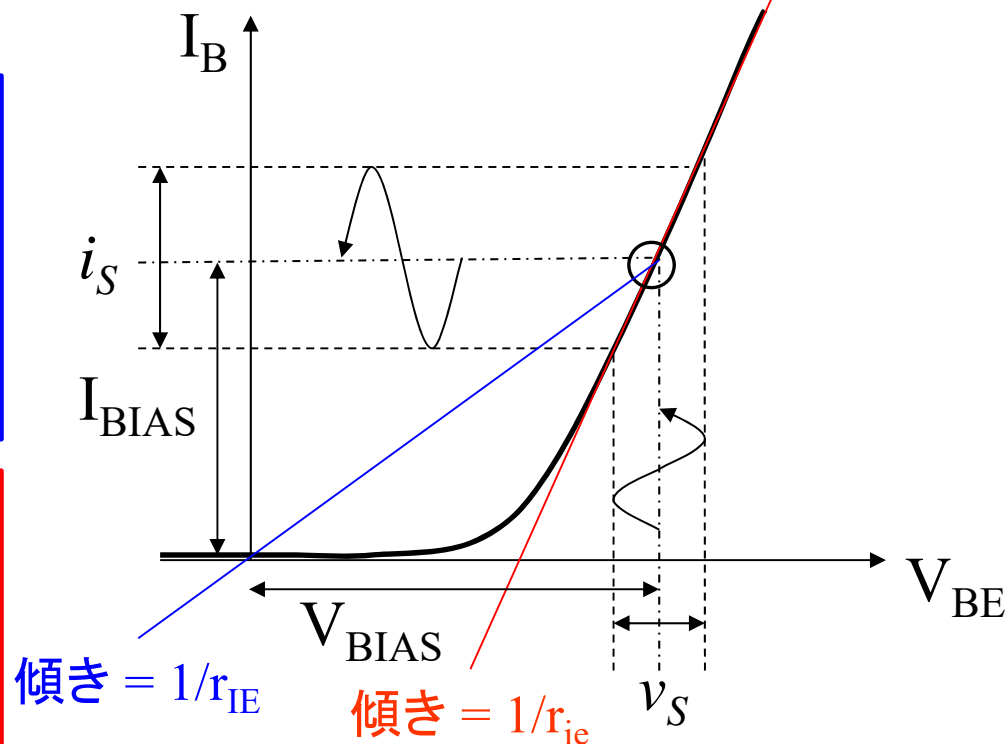
$$\frac{V_{\text{BIAS}}}{I_{\text{BIAS}}} \equiv r_{\text{IE}} (\Omega)$$

V_{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

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

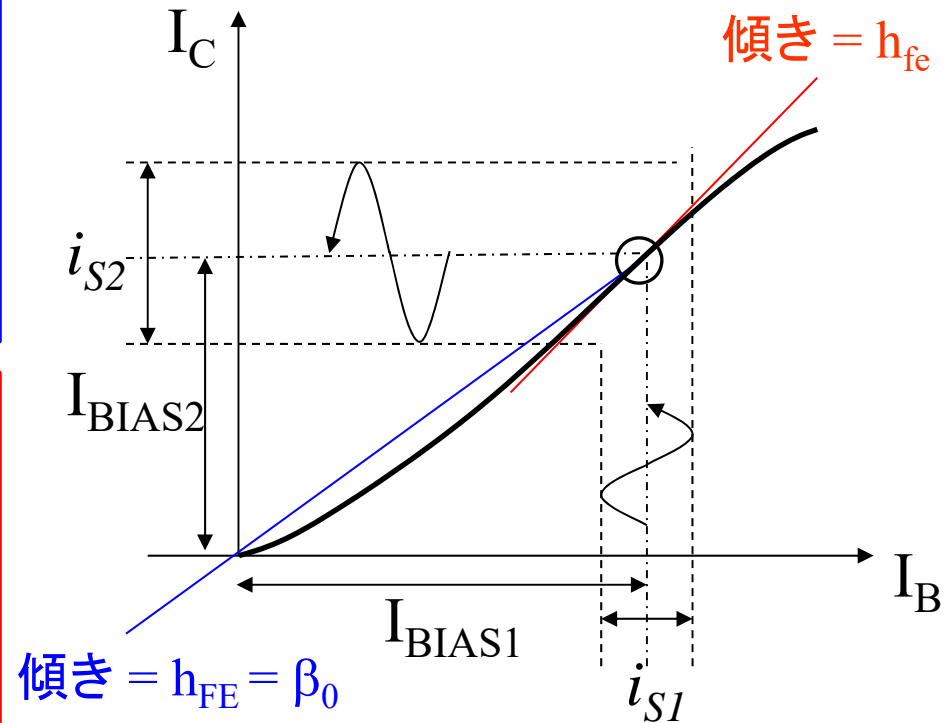
I_{BIAS1} を変えると少し変化する。

小信号に対する電流増幅率

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

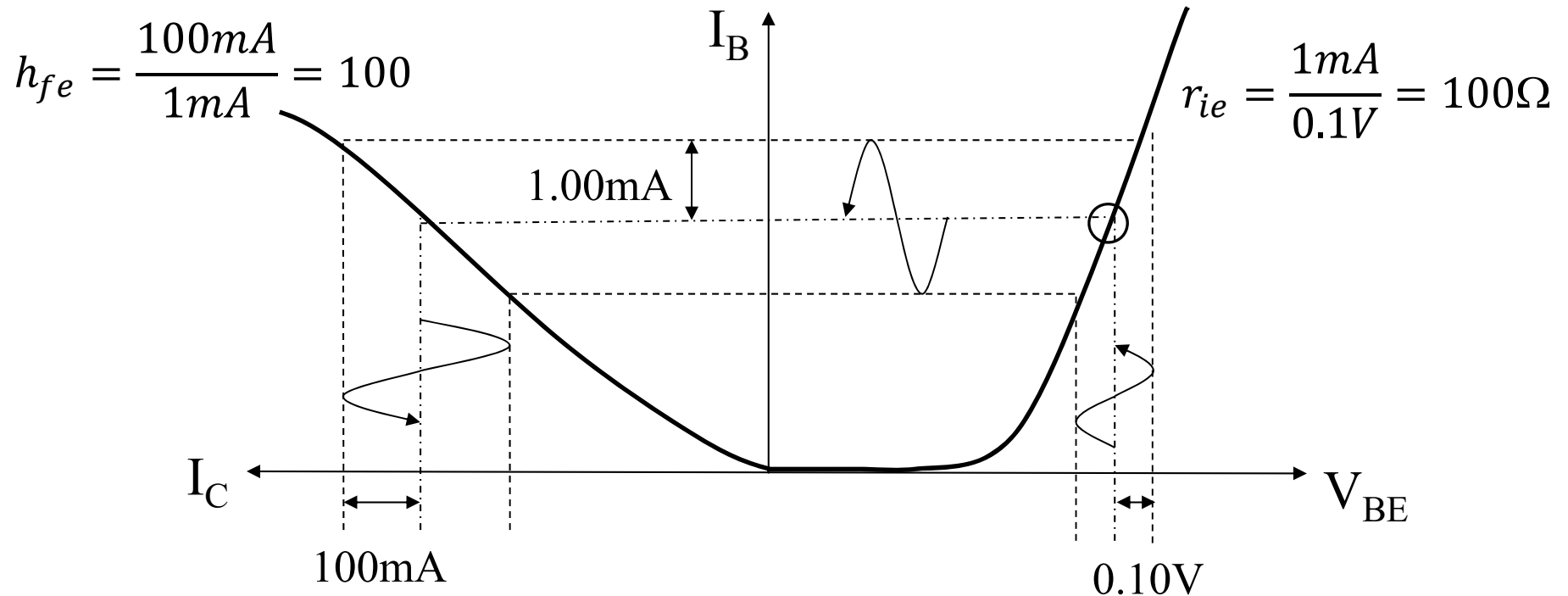
i_{S1} の振幅を変えても殆ど一定。

r_{ie} , h_{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。

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

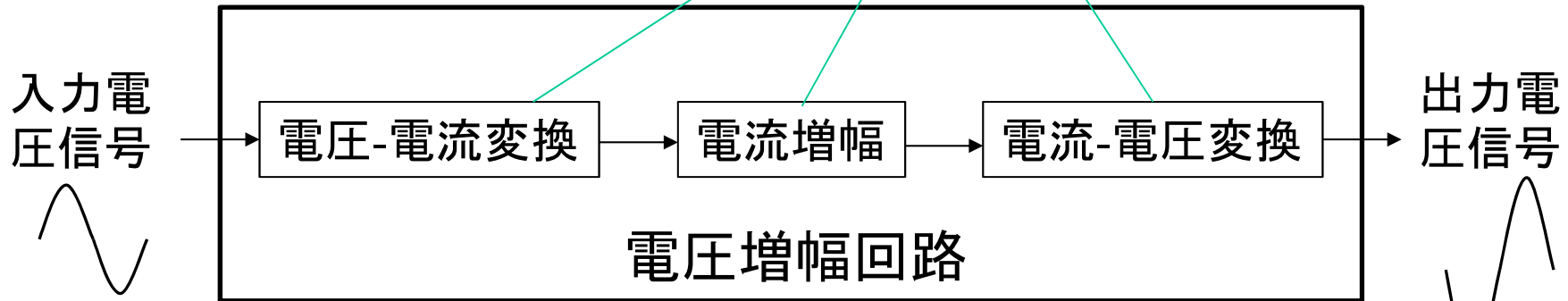
(例えば)

→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

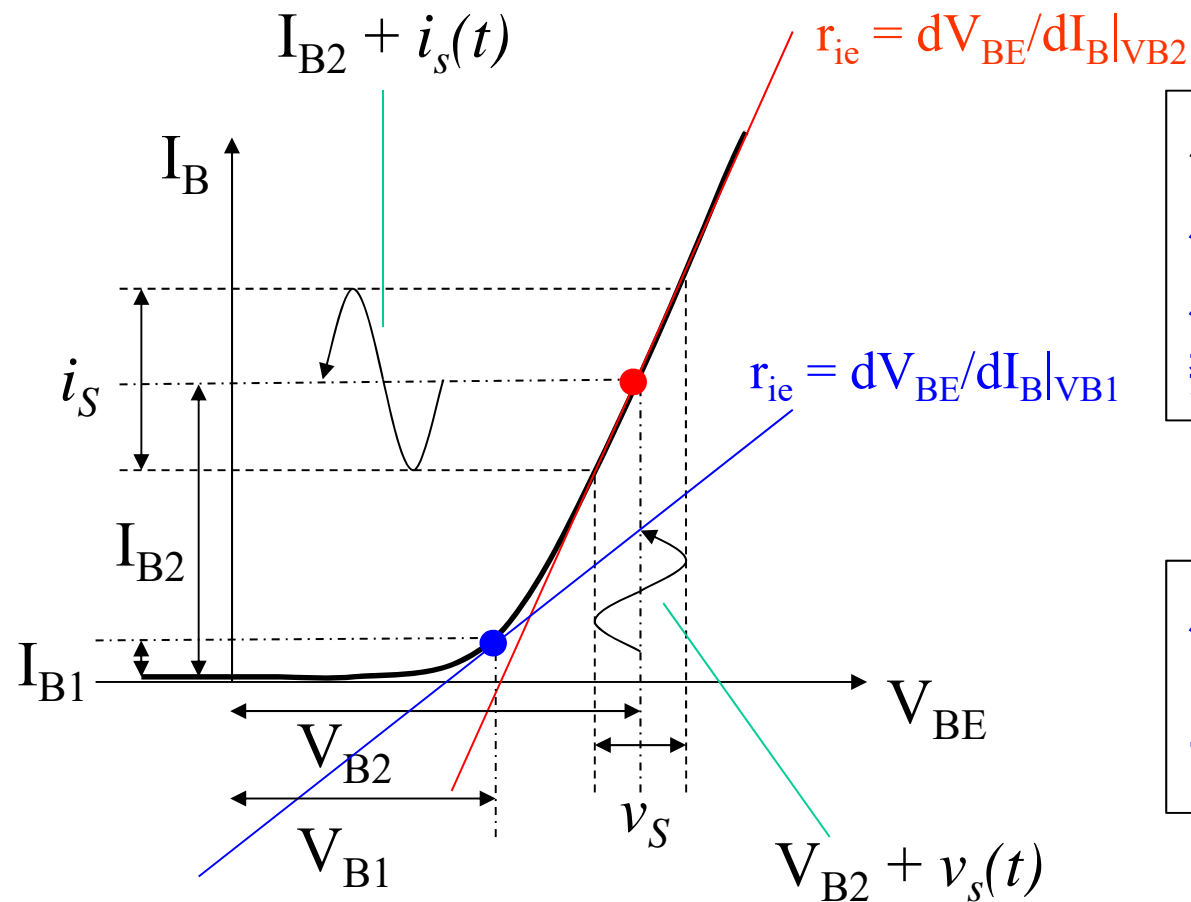


大きな電圧増幅率を実現するためには

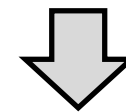
- 入力から見た抵抗を小さく
- 電流増幅率は大きく
- 出力の抵抗を大きく

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



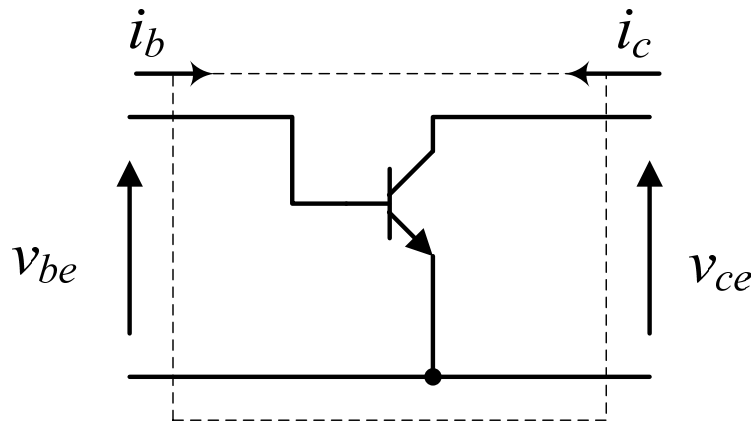
小信号パラメータは、
バイアス電圧または
バイアス電流の関
数となっている。



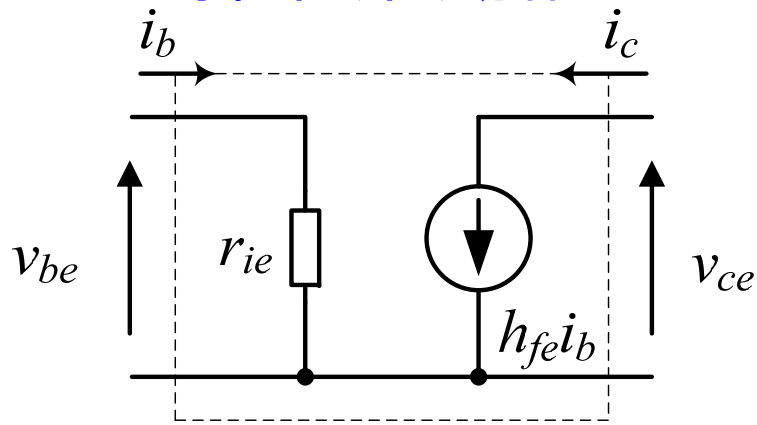
バイアスが変わると
回路の性能、特性も
変わるので注意。

トランジスタの π 形等価回路

π 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。

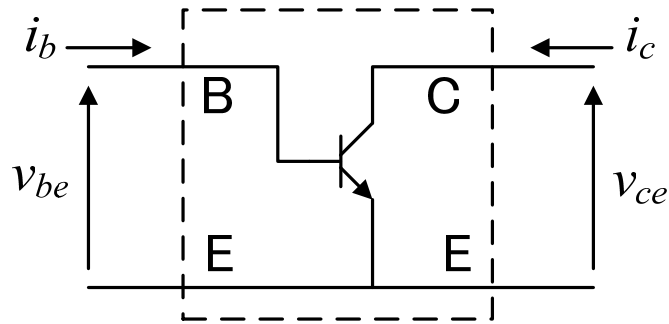


$$r_{ie} = \frac{v_{be}}{i_b} \quad h_{fe} = \frac{i_c}{i_b}$$
$$g_m = \frac{i_c}{v_{be}} = \frac{i_b}{v_{be}} \frac{i_c}{i_b} = \frac{1}{r_{ie}} h_{fe}$$

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)

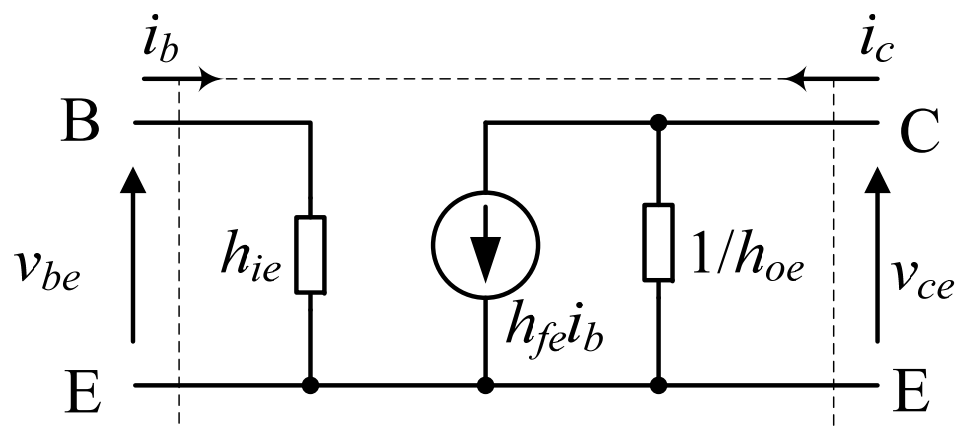
h_{re} : 逆方向電圧増幅率 (通常 $h_{re} \doteq 0$)

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(※)

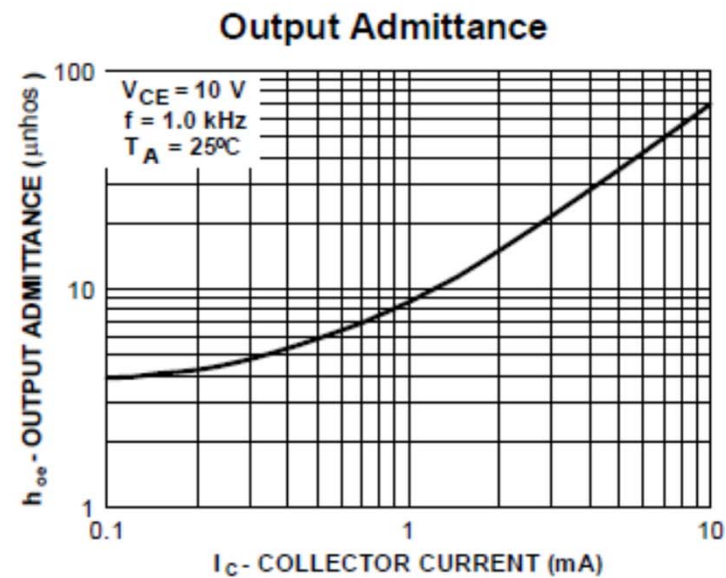
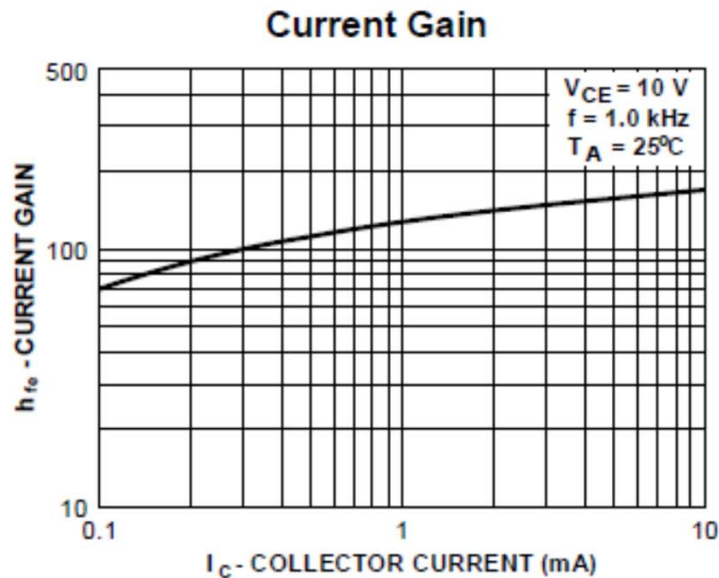
1. バイアスの算出
2. hパラメータをデータシートで読み取る
3. トランジスタを等価回路で置き換える
4. 利得などを手計算で求める

※ 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)



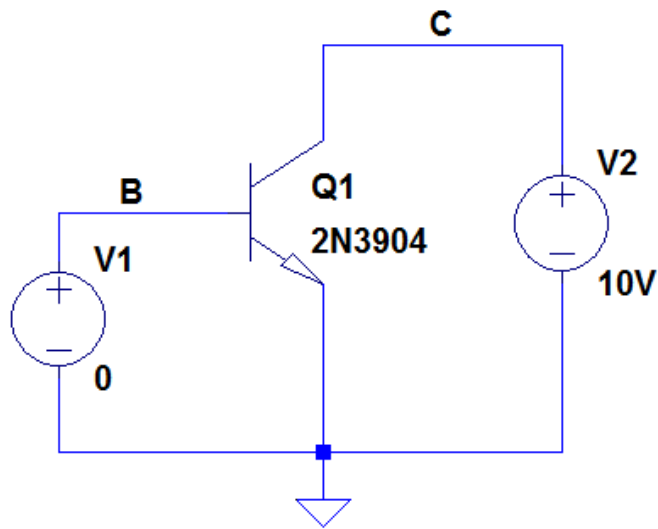
h_{fe} , g_m などのパラメータは、バイアス I_C , V_{CE} に依存して変化する。

(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。

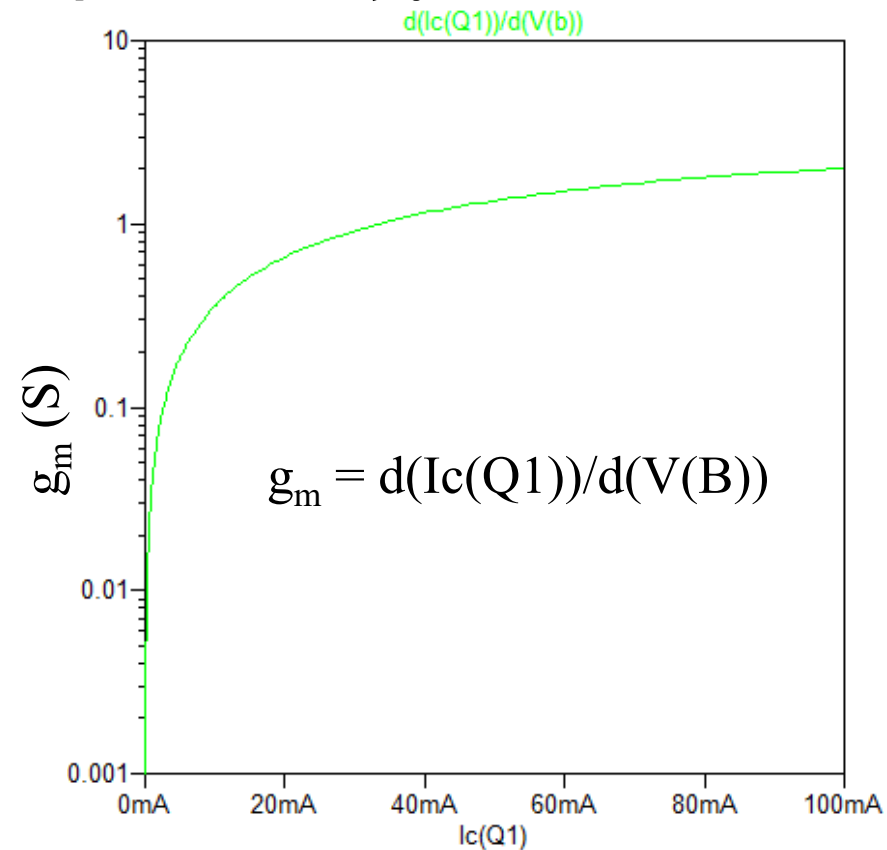
g_m - I_C 特性のシミュレーション

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



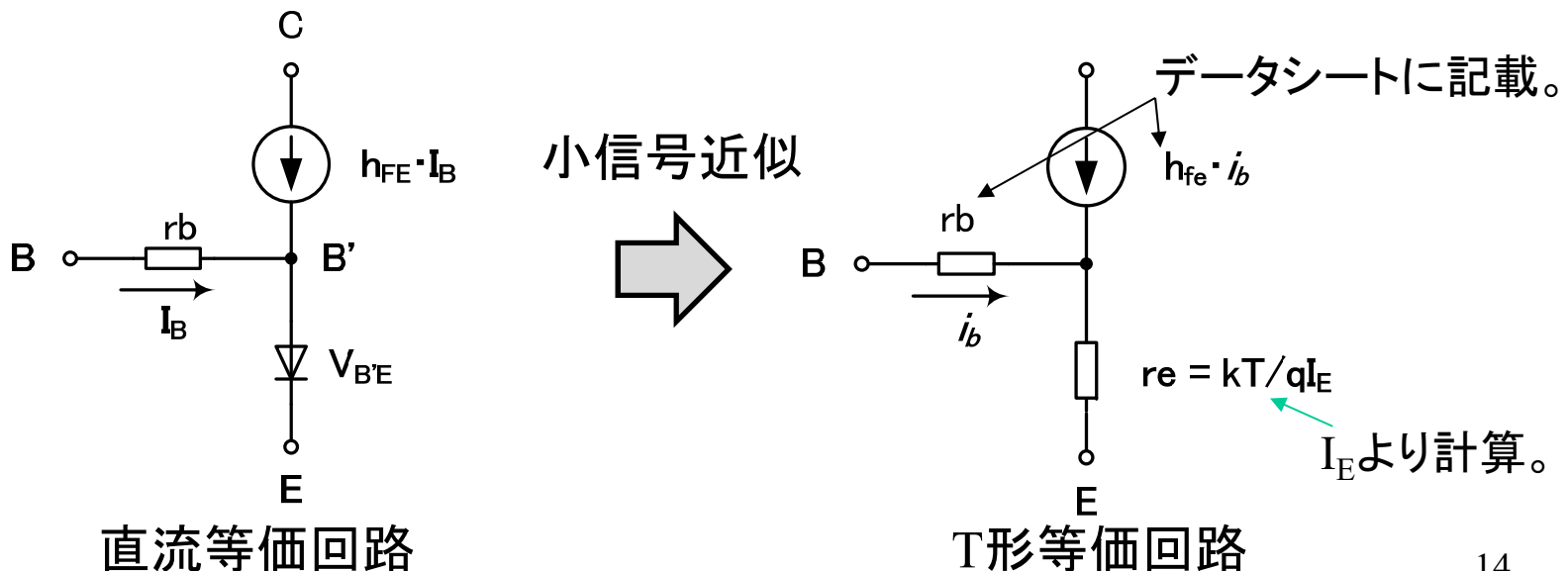
測定回路



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 π 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
π 形等価回路	hパラメータで表せる(容易に測定できる)。 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。

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

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

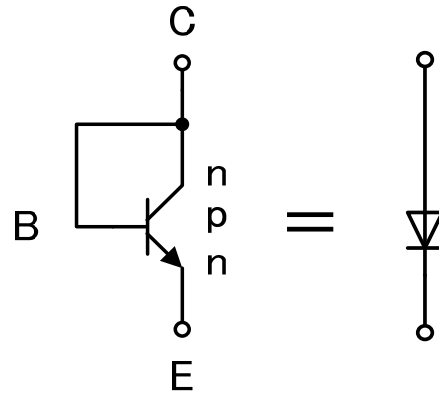
$$r_e = \frac{dV_{B'E}}{dI_E} = \frac{kT}{q} \frac{1}{I_E}$$

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。

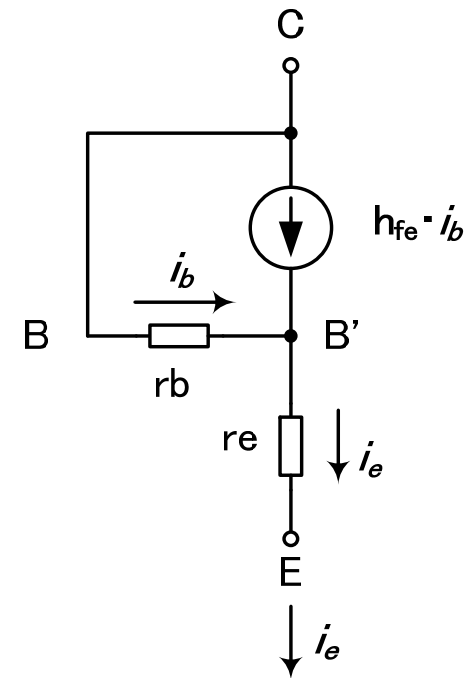


$$i_e = h_{fe} i_b + i_b = (h_{fe} + 1) i_b$$

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

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

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

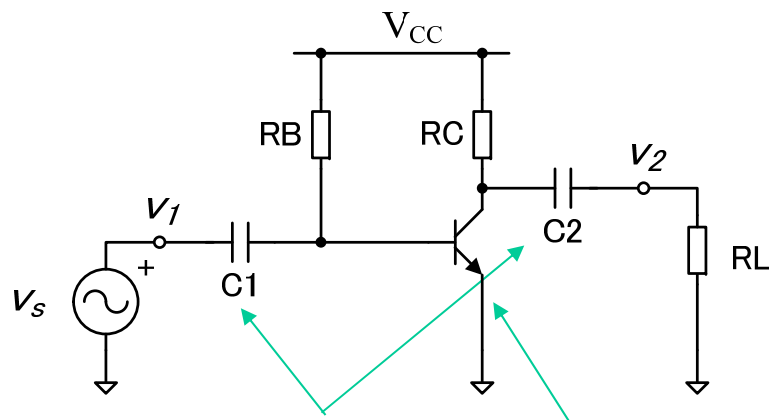
交流と直流を合わせて解析すると非常に煩雑になるため、交流信号(小信号)は分けて解析を簡単化する。交流小信号に対する等価回路を小信号等価回路(small-signal equivalent circuit)と呼ぶ。実際には、バイアスがないとトランジスタが動作しないので、小信号等価回路は、回路解析のための仮想的な回路である。

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

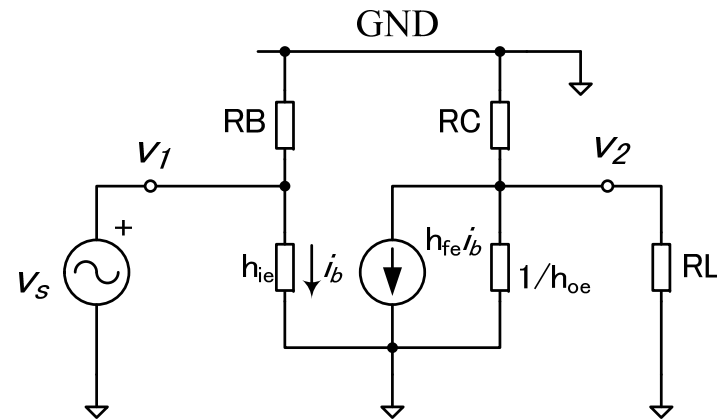
小信号等価回路の作成例1

トランジスタの π 形等価回路を使用した例

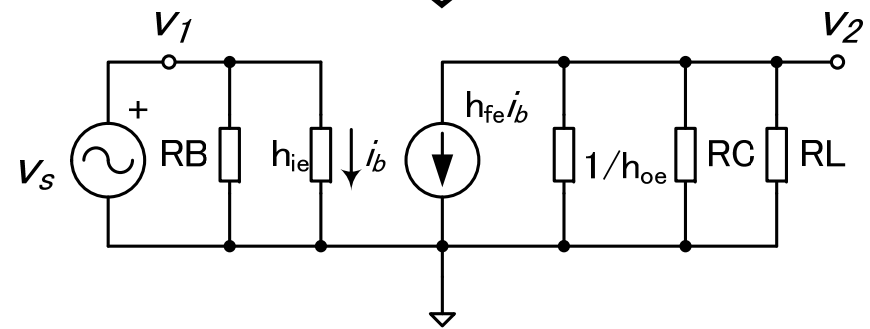


結合キャパシタを短絡。

トランジスタを等価回路に置き換え。



変形



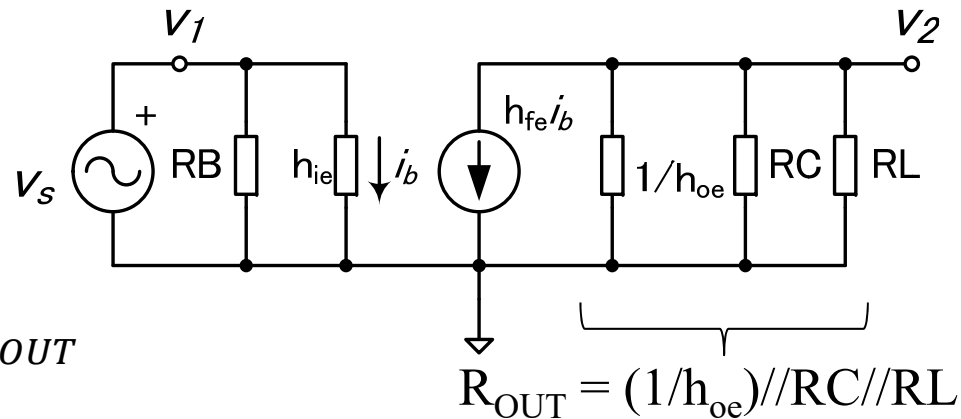
小信号等価回路を用いた電圧利得の解析

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

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

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



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。

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

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16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(※)

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

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

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

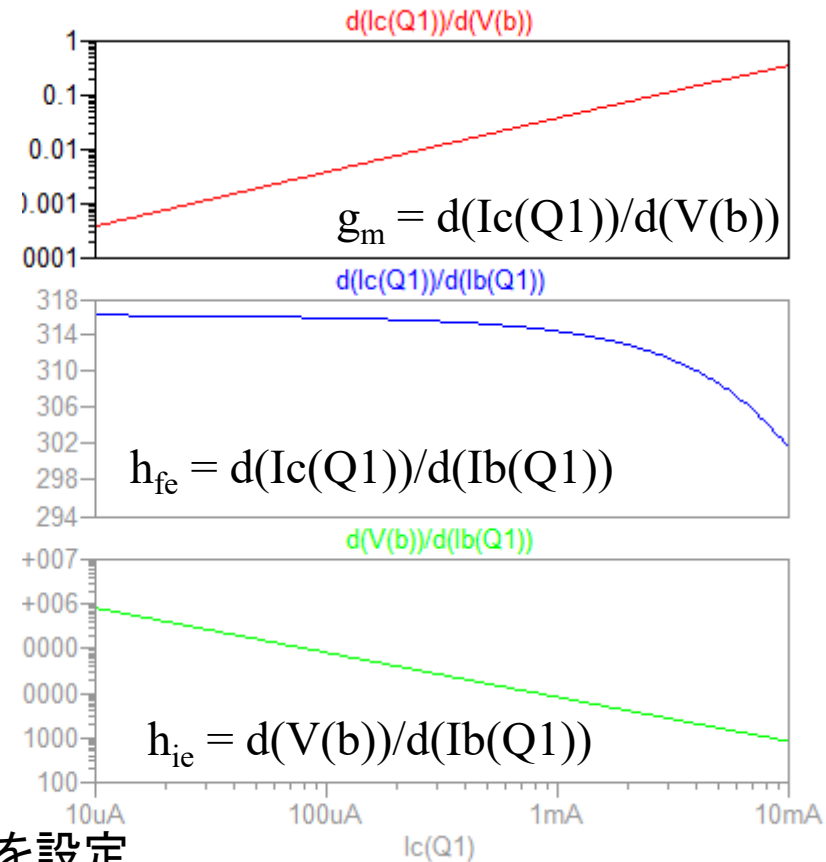
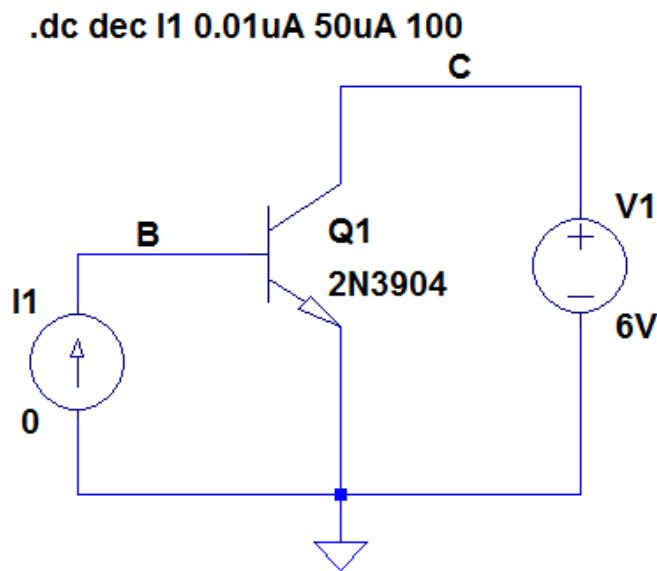
$I_B =$ 一定の測定回路で測定(※)

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

※ 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 = $I_c(Q1)$, 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
 - π 形等価回路とT形等価回路が使用される
 - π 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