トランジスタ回路の解析
(直流電源＋交流電源)
(小)信号

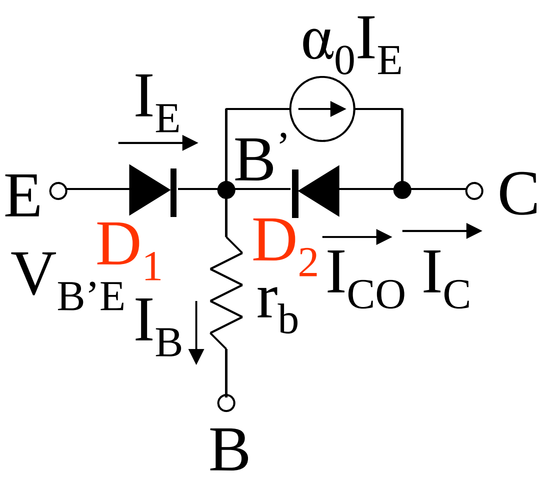
直流回路 ― 直流等価回路
(バイアス計算)
動作点
○ダイオードモデル(pnp/npn)

交流回路
(増幅度の計算) ― 交流(小信号)等価回路
○T形等価回路

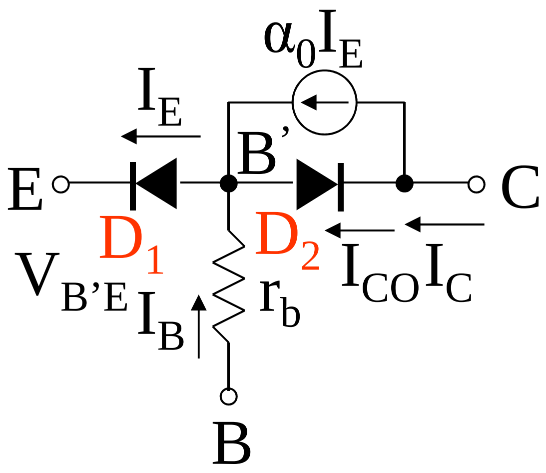
トランジスタには直流等価回路と交流等価回路がある

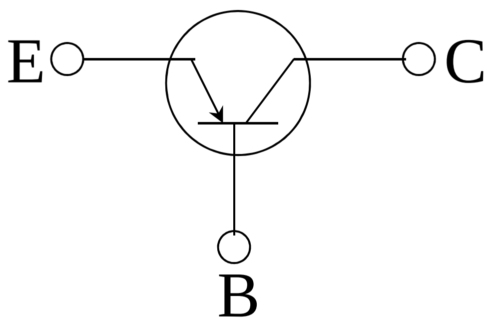
2.6 トランジスタの等価回路

2.6.1 トランジスタの直流等価回路



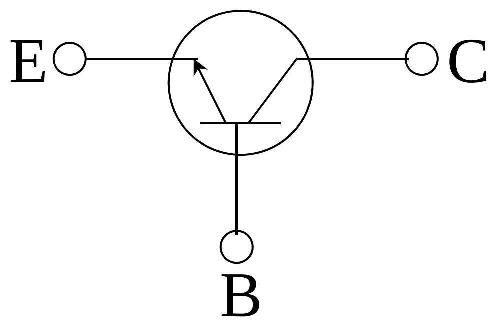
$$\begin{cases} I_C = \alpha_0 I_E + I_{CO} \\ I_E = I_B + I_C \end{cases}$$





pnpトランジスタ

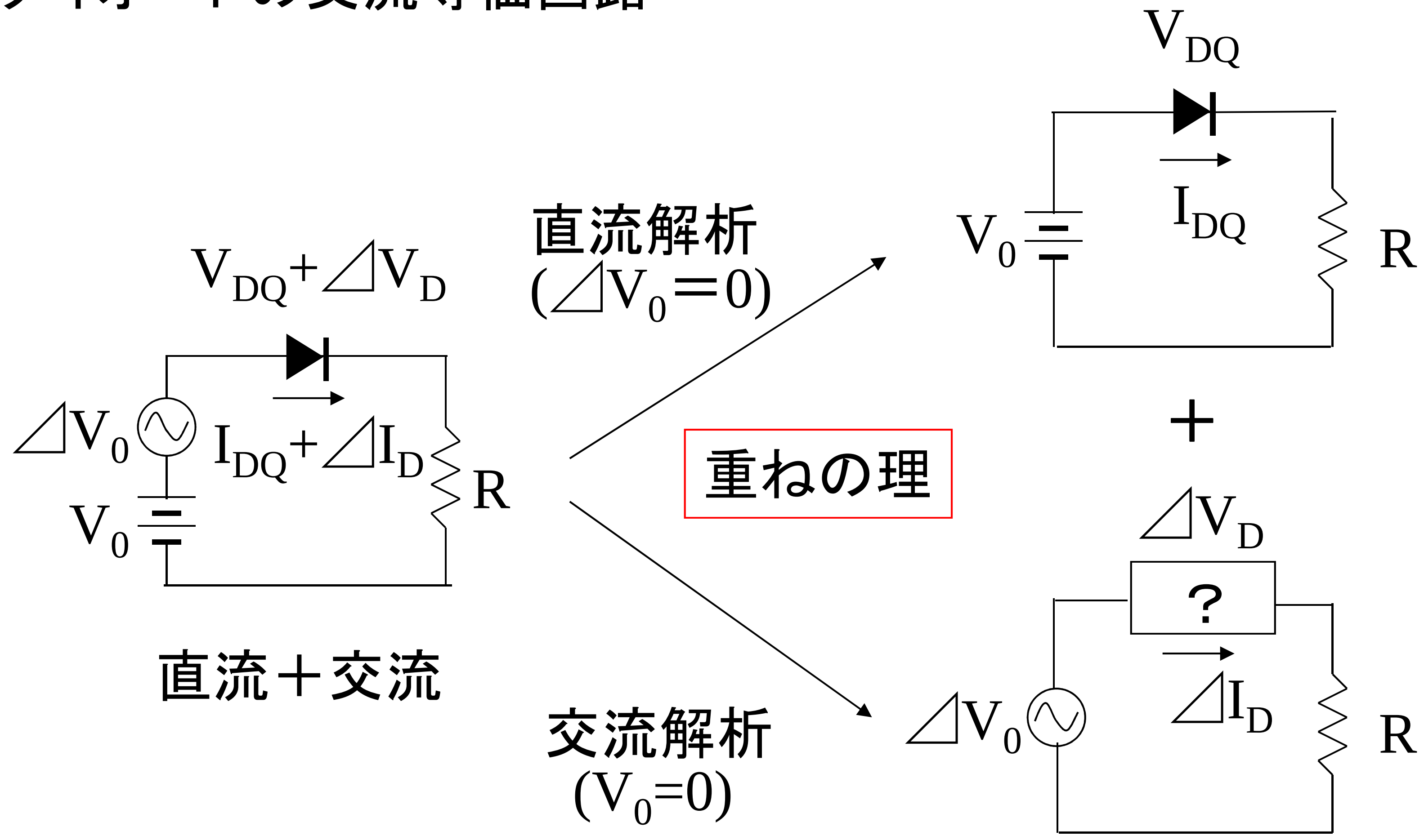
r_b : ベース広がり抵抗
(50～500Ω)



npnトランジスタ

トランジスタの直流等価回路(ダイオードモデル)

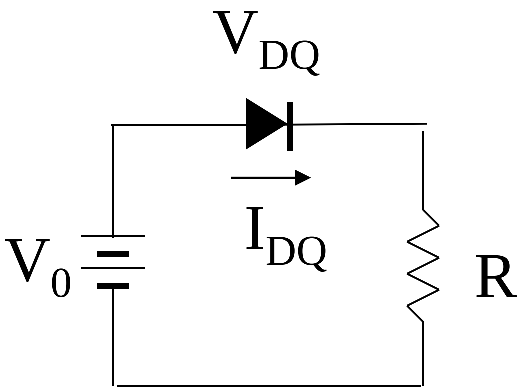
ダイオードの交流等価回路



ダイオードの交流等価回路は？

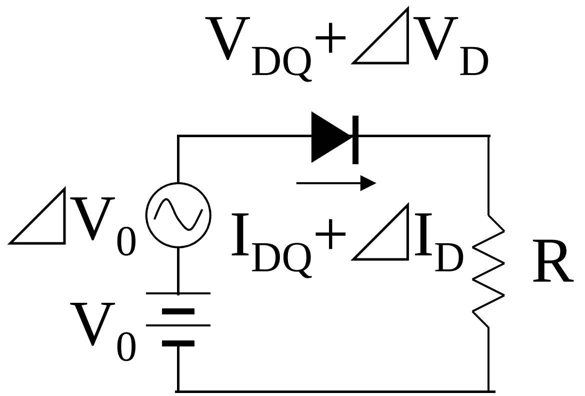
→ 微分抵抗 r_D

直流解析($\Delta V_0 = 0$)



$$V_0 = V_{DQ} + RI_{DQ}$$

直流＋交流



$$V_0 + \Delta V_0 = V_{DQ} + \Delta V_D + R(I_{DQ} + \Delta I_D)$$

$$V_0 + \Delta V_0 = V_{DQ} + RI_{DQ} + \Delta V_D + R\Delta I_D$$

直流部分

$$V_0 = V_{DQ} + RI_{DQ}$$

交流部分

$$\Delta V_0 = \Delta V_D + R\Delta I_D$$

交流部分

$$\Delta V_0 = \Delta V_D + R\Delta I_D$$

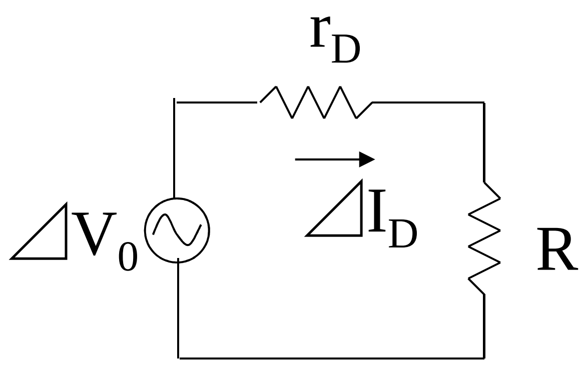
$$= \frac{\Delta V_D}{\Delta I_D}\Delta I_D + R\Delta I_D$$

$$= r_D\Delta I_D + R\Delta I_D$$

$$= (r_D + R)\Delta I_D$$

ただし、$r_D = \dfrac{\Delta V_D}{\Delta I_D}$ とする。

交流解析(V_0=0)



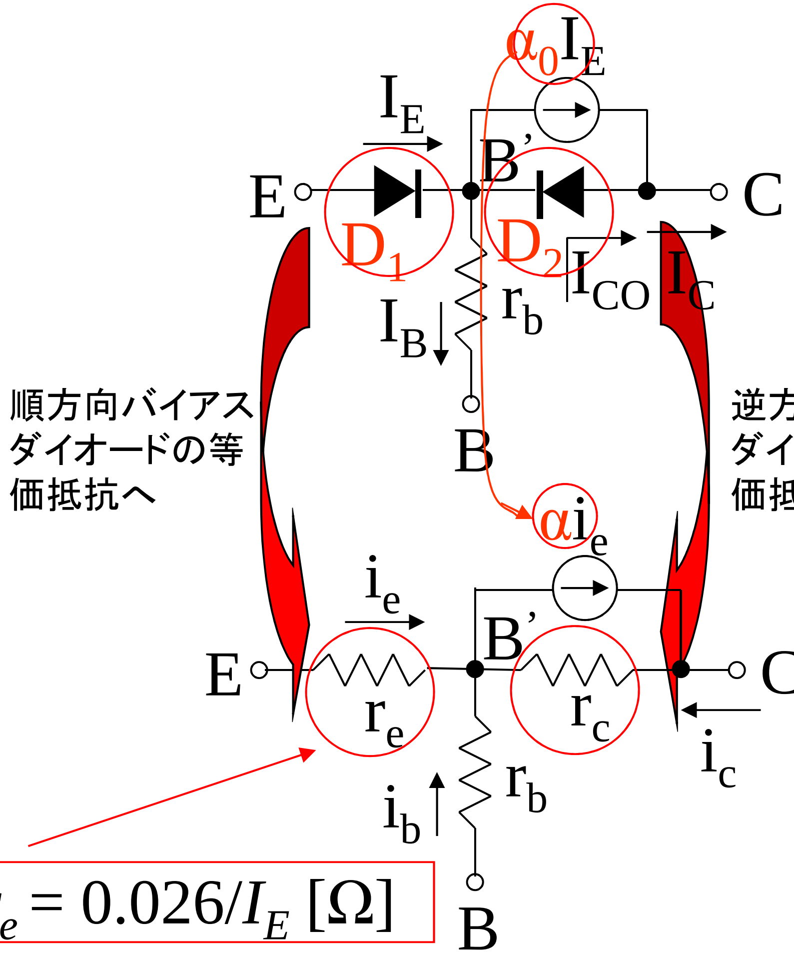
微分抵抗 $r_D = \left.\dfrac{dV_D}{dI_D}\right|_{I_D = I_{DQ}}$

$$= \frac{kT}{q} \cdot \frac{1}{I_{DQ}}$$

$$= \frac{0.026}{I_{DQ}} \quad [\Omega]$$

2.6.2 バイポーラトランジスタの小信号等価回路(交流等価回路)

ベース接地トランジスタの交流等価回路



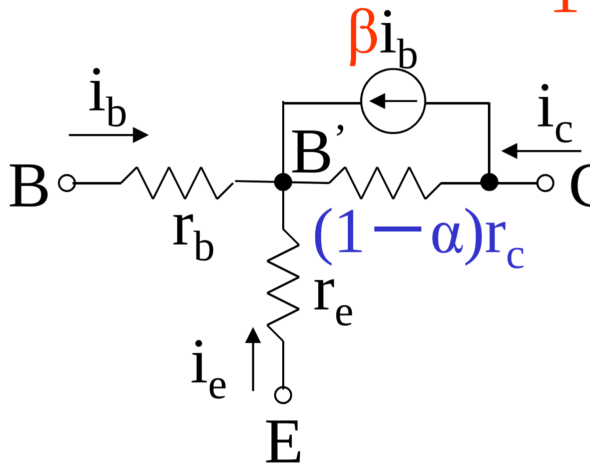
$r_e = 0.026/I_E$ [Ω]

ベース接地トランジスタのT形等価回路(pnp/npn)

交流等価回路では、変化分の電圧、電流の向きは自由に定めて良いためpnpトランジスタとnpnトランジスタは,同一の交流等価回路となる。

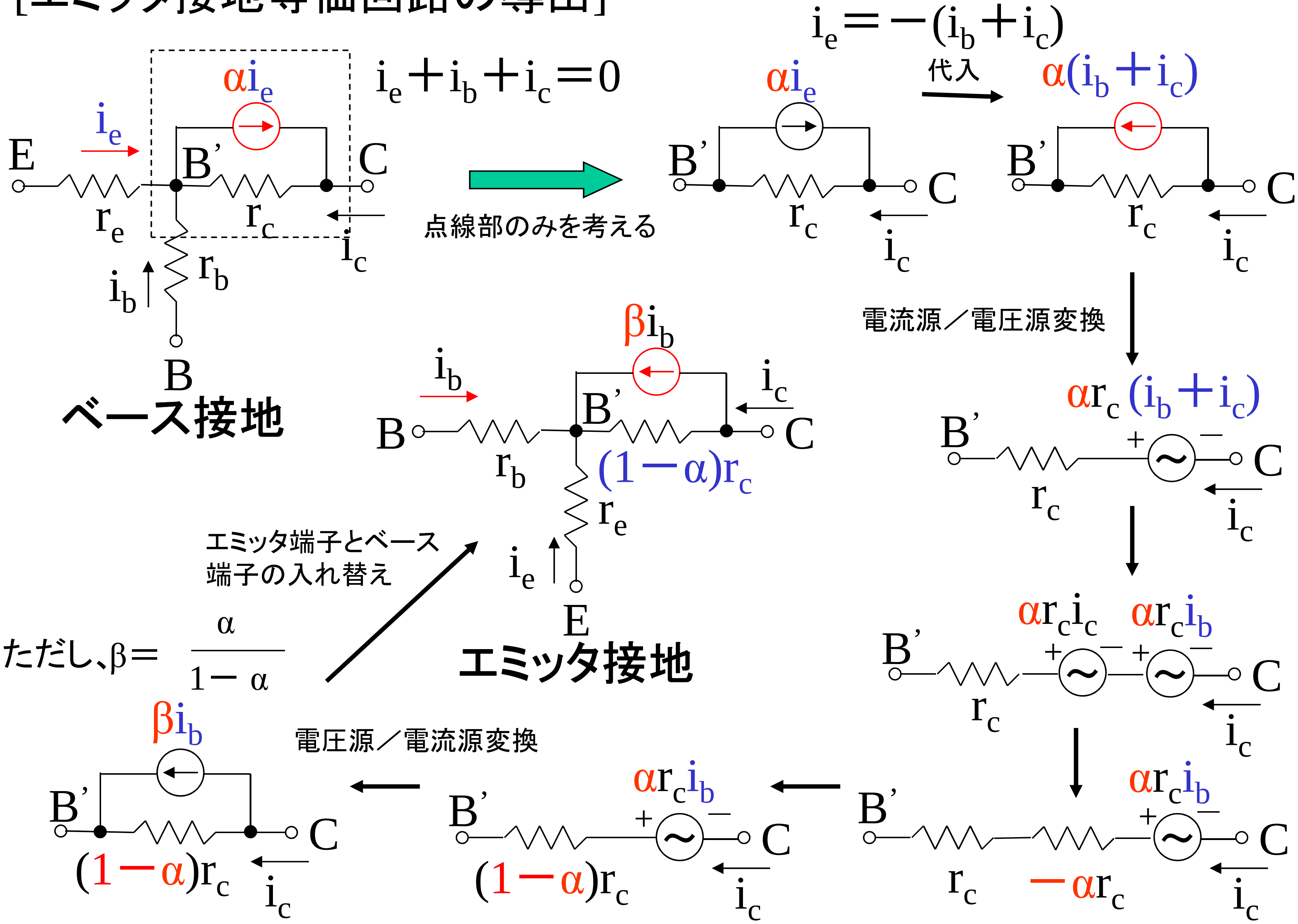
導出せよ！

$$\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$$



エミッタ接地トランジスタのT形等価回路(npn/pnp)
(またはコレクタ接地)

[エミッタ接地等価回路の導出]

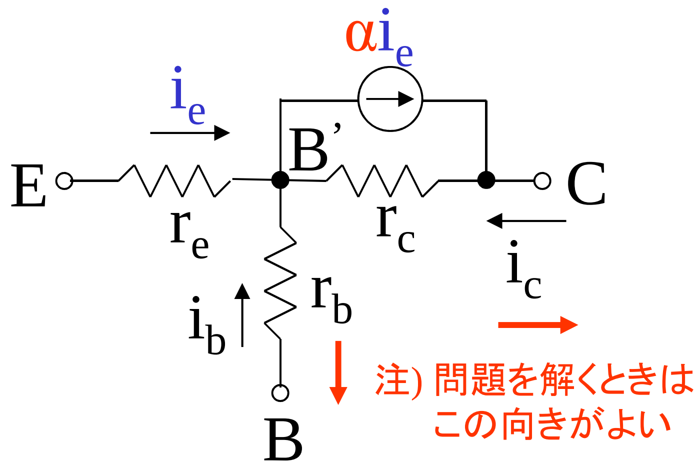


ベース接地T形等価回路 (pnp/npn)

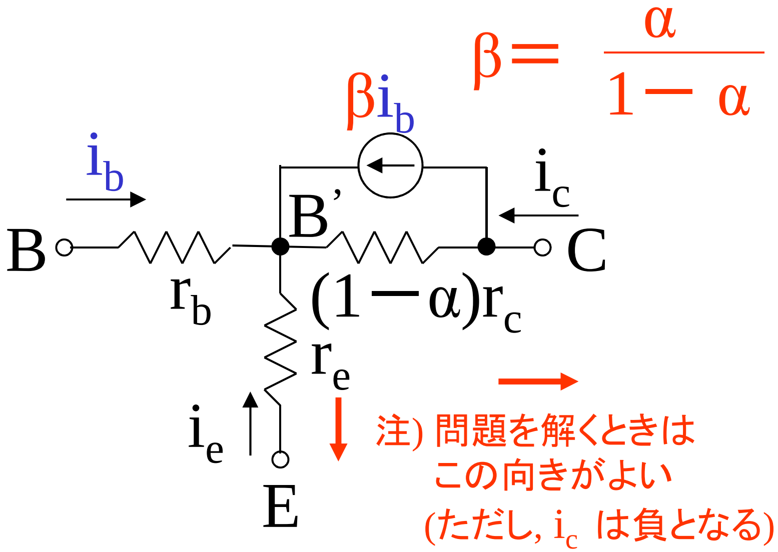
エミッタ接地T形等価回路 (pnp/npn) (またはコレクタ接地)

電流源表示

ベース接地T形等価回路:

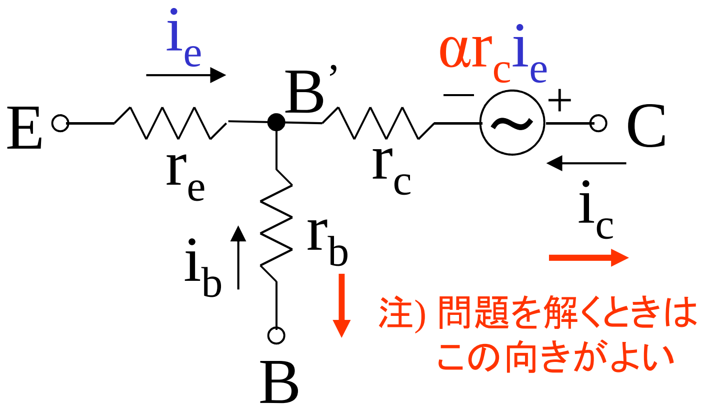


エミッタ接地T形等価回路:

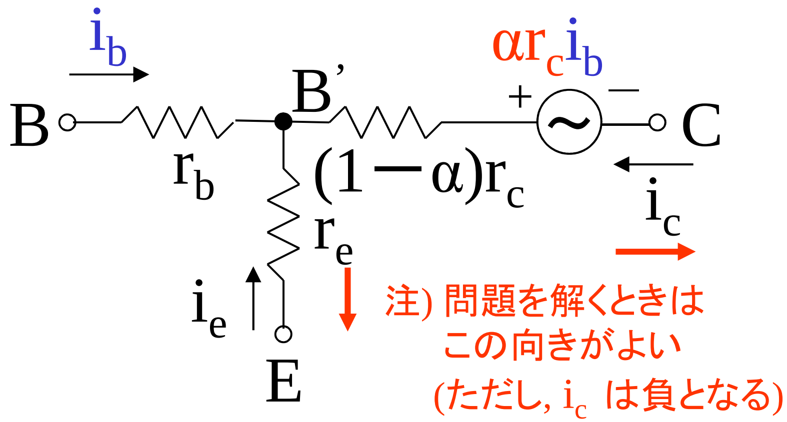


電圧源表示

ベース接地T形等価回路:



エミッタ接地T形等価回路:



相互抵抗 $r_m = \alpha r_c$

図2.41(b)参照

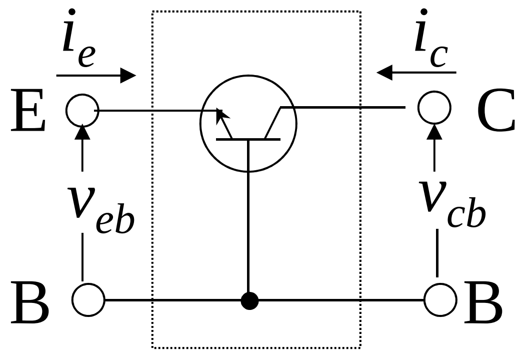
h-パラメータによる等価回路 (ベース接地)

h-パラメータ(hybrid-parameter)／h-行列(hybrid-matrix)

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} I_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \qquad H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} v_{eb} \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{ib} & h_{rb} \\ h_{fb} & h_{ob} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_e \\ v_{cb} \end{bmatrix}$$

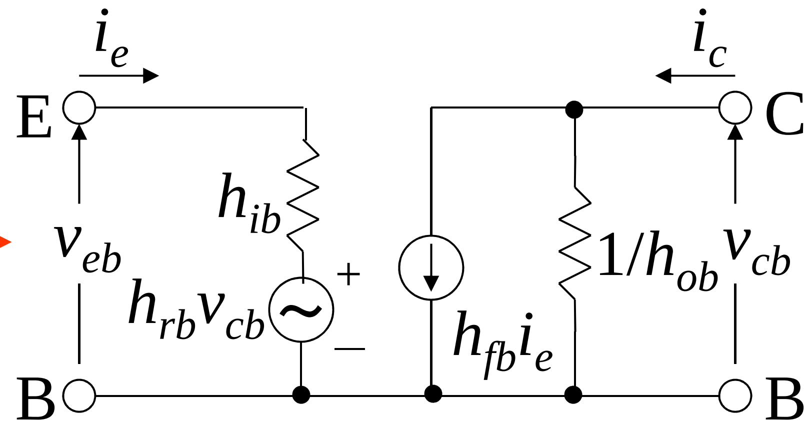
i:input, r:reverse
f:forward, o:output
b:ベース接地



2端子対回路

$$\begin{cases} v_{eb} = h_{ib} i_e + h_{rb} v_{cb} \\ i_c = h_{fb} i_e + h_{ob} v_{cb} \end{cases}$$

ベース接地h-パラメータの関係式

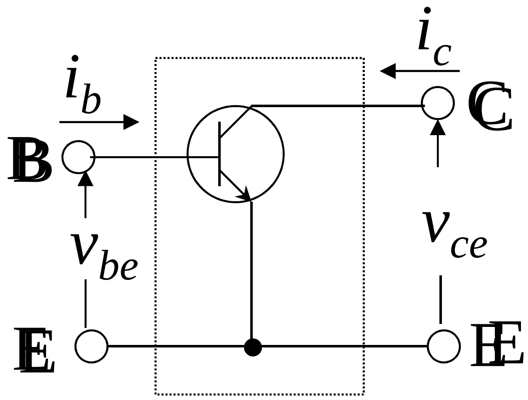


h-パラメータによる等価回路
(ベース接地)

h-パラメータによる等価回路 (エミッタ接地)

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

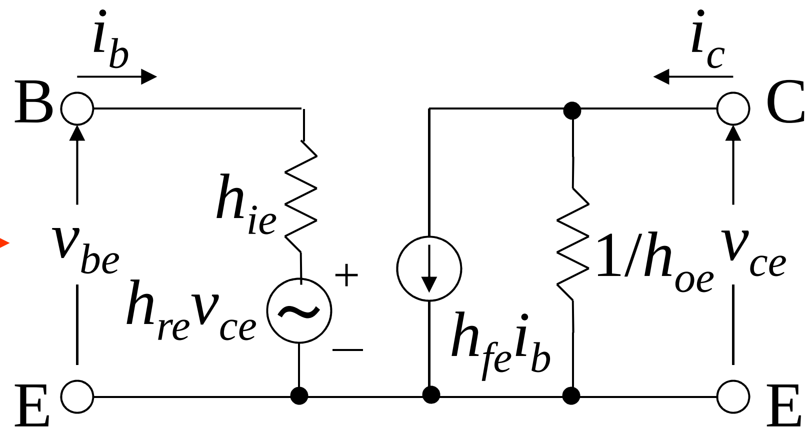
i:input, r:reverse
f:forward, o:output
e:エミッタ接地



2端子対回路

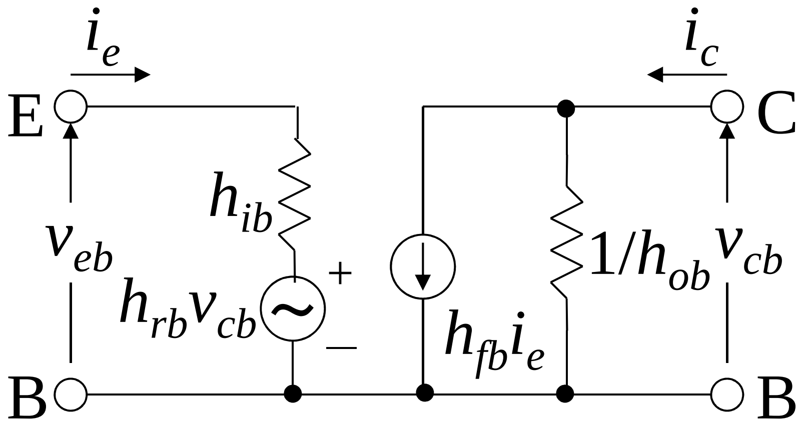
$$\begin{cases} v_{be} = h_{ie} i_b + h_{re} v_{ce} \\ i_c = h_{fe} i_b + h_{oe} v_{ce} \end{cases}$$

エミッタ接地h-パラメータの関係式



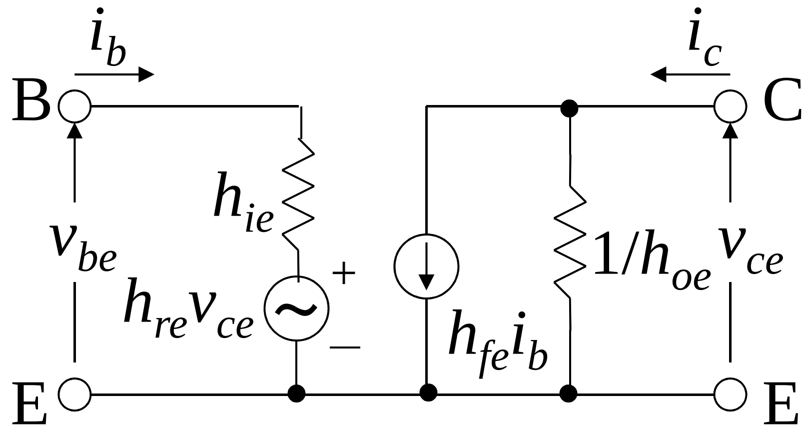
h-パラメータによる等価回路 (エミッタ接地)

h-パラメータによる等価回路 (ベース接地)



$$
\begin{cases}
v_{eb} = h_{ib}i_e + h_{rb}v_{cb} \\
i_c = h_{fb}i_e + h_{ob}v_{cb}
\end{cases}
$$

h-パラメータによる等価回路 (エミッタ接地)



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

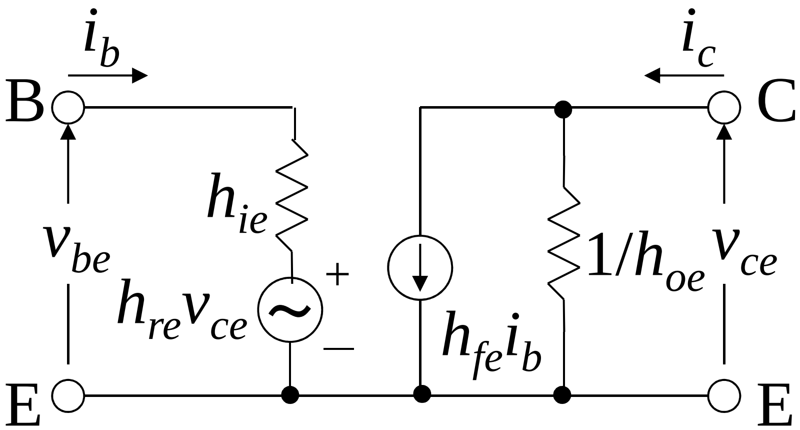
[T形等価回路の定数とエミッタ接地h-パラメータの関係]

$$\left.\begin{aligned} h_{ie} &= r_b + \frac{r_e r_c}{r_e + (1-\alpha) r_c}, \quad & h_{re} &= \frac{r_e}{r_e + (1-\alpha) r_c} \\ h_{fe} &= \frac{\alpha r_c - r_e}{r_e + (1-\alpha) r_c}, \quad & h_{oe} &= \frac{1}{r_e + (1-\alpha) r_c} \end{aligned}\right\} \text{自分で導出せよ！}$$

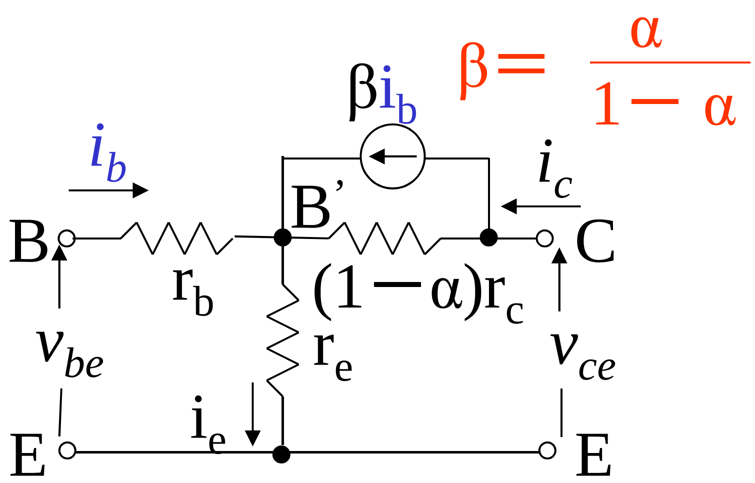
上式より逆にエミッタ接地h-パラメータからTパラメータを求めると

$$r_e = \frac{h_{re}}{h_{oe}}, \qquad r_b = h_{ie} - \frac{h_{re}}{h_{oe}} (1 + h_{fe})$$

$$r_c = \frac{1 + h_{fe}}{h_{oe}}, \qquad \alpha = \frac{h_{re} + h_{fe}}{1 + h_{fe}}$$



h-パラメータによる等価回路
(エミッタ接地)



エミッタ接地T形等価回路

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

$$\begin{cases} v_{be} = (\mathrm{r_b}+\mathrm{r_e})i_b + \mathrm{r}_e i_c \\ v_{ce} = (\mathrm{r_e} - \alpha \mathrm{r_c})i_b + \{\mathrm{r_e} + (1-\alpha)\mathrm{r_c}\}i_c \end{cases}$$

$$\boxed{h_{ie} = \left.\frac{v_{be}}{i_b}\right|_{v_{ce}=0},\quad h_{fe} = \left.\frac{i_c}{i_b}\right|_{v_{ce}=0},\quad h_{re} = \left.\frac{v_{be}}{v_{ce}}\right|_{i_b=0},\quad h_{oe} = \left.\frac{i_c}{v_{ce}}\right|_{i_b=0}}$$

Tパラメータは、直接測定することが困難であるので、一般にh-パラメータから変換して求める。

β_0をエミッタ接地(直流)電流増幅率とすると記号h_{FE} を用いて

β_0をh_{FE}と表記する場合がある

βをエミッタ接地(小信号)電流増幅率とするとエミッタ接地のh_{fe}（h-パラメータ）を用いて

$\beta \fallingdotseq h_{fe}$とする場合がある

2.6.3 FETの小信号等価回路(交流等価回路)

ドレイン電流I_DをV_{GS}とV_{DS}の2変数関数とすると

$$I_D = f(V_{GS}, V_{DS})$$

上式の全微分は

$$dI_D = \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} dV_{GS} + \frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}} dV_{DS}$$

となる。ここで、

$$g_m = \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}}\ [S], \quad \frac{1}{r_d} = \frac{\partial I_D}{\partial V_{DS}}\ [S]$$

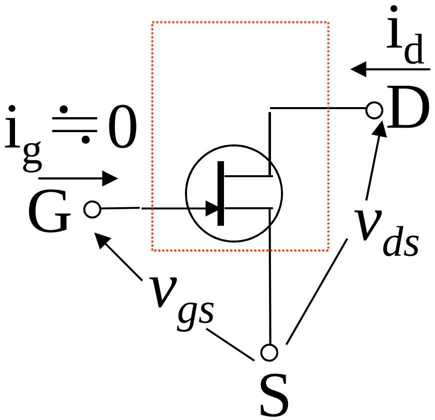
とおくと

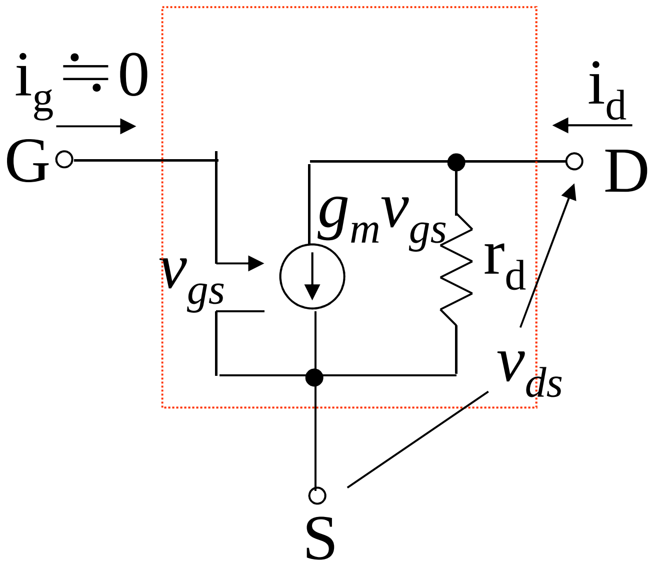
$$i_d = g_m v_{gs} + \frac{v_{ds}}{r_d}$$ (g_m:相互コンダクタンス, r_d:ドレイン抵抗)

が得られる。

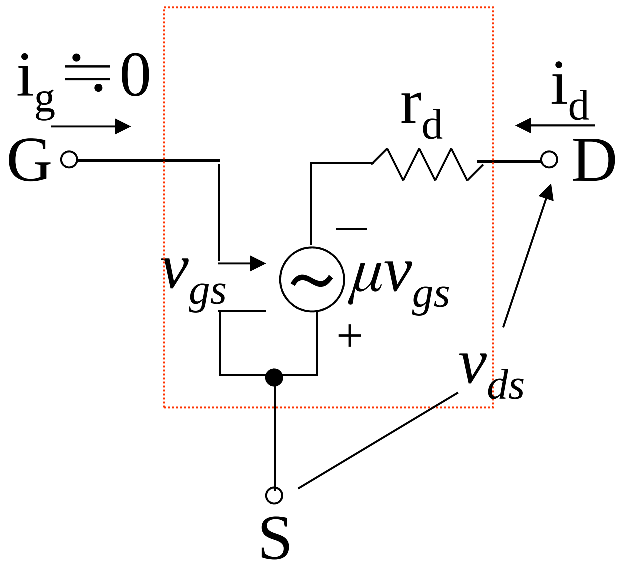
[FETにおける電流電圧の関係式]

$$i_d = g_m v_{gs} + \frac{v_{ds}}{r_d} \quad (g_m\text{:相互コンダクタンス},\ r_d\text{:ドレイン抵抗})$$





電流源表示



電圧源表示

$$\mu = g_m r_d \quad (\mu\text{ :電圧増幅率})$$