

# トランジスタ 4

## 7. 等価回路

### 7.2 FET の小信号等価回路

(1) ソース接地等価回路

(2) ゲート接地等価回路

(3) ドレイン接地等価回路

## 8. 基本増幅回路

### 8.1 増幅回路とその動作量

### 8.2 バイポーラトランジスタ増幅回路の基本動作量例

### 8.3 FET増幅回路の基本動作量例

#### 参考資料

時田元昭、「トランジスタと半導体」、電波新聞社

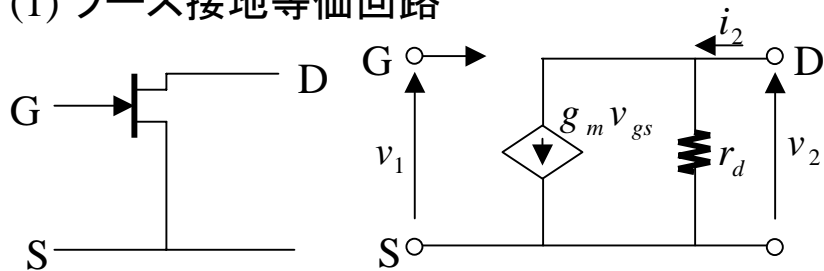
奥沢清吉、「ビギナートランジスタ読本」、誠文堂新光社

押本、小林、「トランジスタ回路計算法」、工学図書

電気工学ハンドブックおよびインターネット上の各種公開資料

## 7.2 FET の小信号等価回路

### (1) ソース接地等価回路



(a) 原理図

(交流)小信号対応として、 $y$ パラメータ方式を考える。

$i_1 = i_g, i_2 = i_d, v_1 = v_{gs}, v_2 = v_{ds}$  と置く。

上図から、

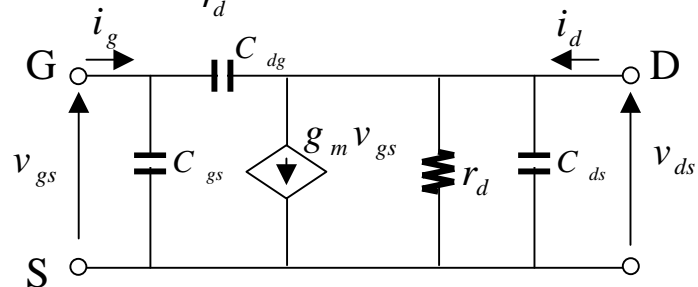
$$i_1 = y_{is} v_1 + y_{rs} v_2 = 0$$

$$i_2 = y_{fs} v_1 + y_{os} v_2$$

$$\rightarrow y_{is} = 0, y_{rs} = 0, y_{fs} = g_m, y_{os} = \frac{1}{r_d}$$

$$i_g = 0$$

$$i_d = g_m v_{gs} + \frac{1}{r_d} v_{ds}$$



(b) 低周波等価回路

### 低周波等価回路

#### 低周波等価回路の $y$ パラメータ

二次側短絡時の電流は

$$i_1 = j\omega(C_{gs} + C_{dg})v_1, i_2 = (g_m - j\omega C_{dg})v_1$$

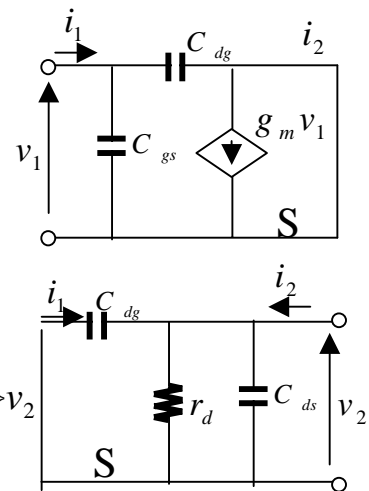
一次側短絡時の電流は

$$i_1 = -j\omega C_{dg} v_2, i_2 = \left\{ \frac{1}{r_d} + j\omega(C_{ds} + C_{dg}) \right\} v_2$$

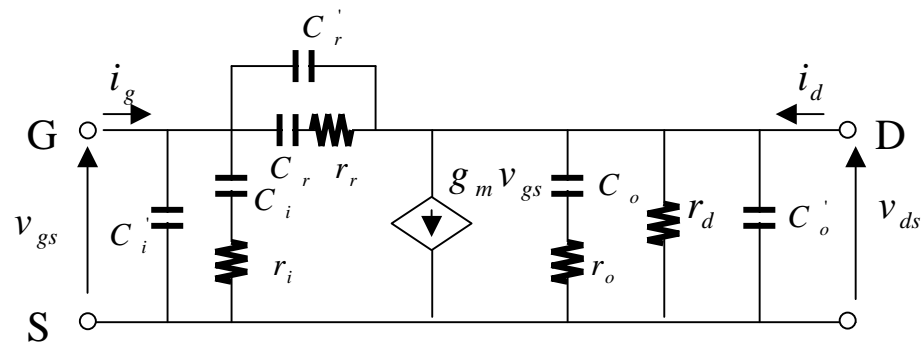
この2式から、

$$y_{is} = \left( \frac{i_1}{v_1} \right)_{v_2=0} = j\omega(C_{gs} + C_{dg}), y_{fs} = \left( \frac{i_2}{v_1} \right)_{v_2=0} = g_m - j\omega C_{dg}$$

$$y_{rs} = \left( \frac{i_1}{v_2} \right)_{v_1=0} = -j\omega C_{dg}, y_{os} = \left( \frac{i_2}{v_2} \right)_{v_1=0} = \frac{1}{r_d} + j\omega(C_{ds} + C_{dg})$$



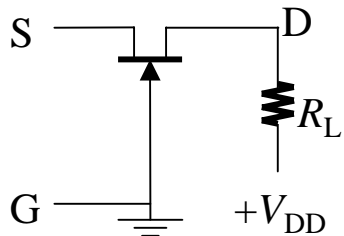
### 高周波等価回路



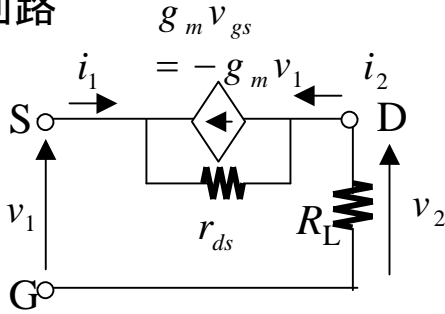
(c) 高周波等価回路

## 7.2 FET の小信号等価回路

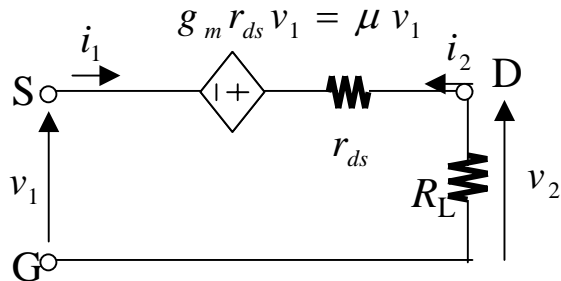
### (2) ゲート接地等価回路



(a) 原理図 a



(a) 原理図 b



(a) 原理図 c

### y パラメータ

二次側短絡時には、

$$i_1 = (1 + \mu)v_1 / r_{ds}, \quad i_2 = -i_1$$

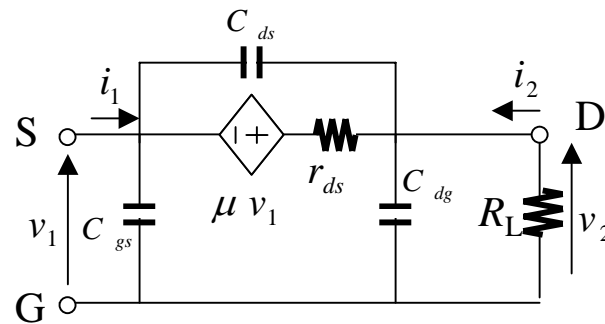
一次側短絡時には、

$$i_2 = v_2 / r_{ds}, \quad i_1 = -v_2 / r_{ds}$$

$$y_{ig} = \left( \frac{i_1}{v_1} \right)_{v_2=0} = \frac{1 + \mu}{r_{ds}}, \quad y_{fg} = \left( \frac{i_2}{v_1} \right)_{v_2=0} = -\frac{1 + \mu}{r_{ds}}$$

$$y_{rg} = \left( \frac{i_1}{v_2} \right)_{v_1=0} = -\frac{1}{r_{ds}}, \quad y_{og} = \left( \frac{i_2}{v_2} \right)_{v_1=0} = \frac{1}{r_{ds}}$$

$$v_2 = -R_L i_2$$



(b) 低周波等価回路

二次側短絡時には、

$$i_1 = j\omega(C_{sg} + C_{ds})v_1 + (1 + \mu)v_1 / r_{ds},$$

$$i_2 = -(i_1 - j\omega C_{sg}v_1) = -i_1 + j\omega C_{sg}v_1$$

一次側短絡時には、

$$i_2 = j\omega(C_{dg} + C_{ds})v_2 + v_2 / r_{ds},$$

$$i_1 = -(i_2 - j\omega C_{dg}v_2) = -i_2 + j\omega C_{dg}v_2$$

$$y_{ig} = \left( \frac{i_1}{v_1} \right)_{v_2=0} = \frac{1 + \mu}{r_{ds}} + j\omega(C_{sg} + C_{ds}),$$

$$y_{fg} = \left( \frac{i_2}{v_1} \right)_{v_2=0} = -\frac{1 + \mu}{r_{ds}} - j\omega C_{ds}$$

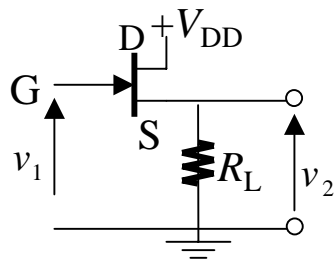
$$y_{rg} = \left( \frac{i_1}{v_2} \right)_{v_1=0} = -\frac{1}{r_{ds}} - j\omega C_{ds},$$

$$y_{og} = \left( \frac{i_2}{v_2} \right)_{v_1=0} = \frac{1}{r_{ds}} + j\omega(C_{dg} + C_{ds})$$

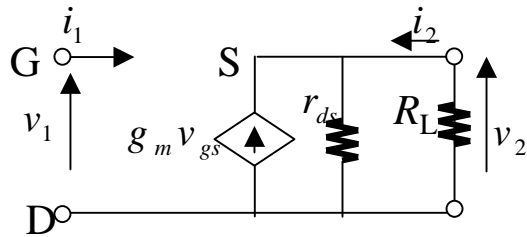
$$v_2 = -R_L i_2$$

## 7.2 FET の小信号等価回路

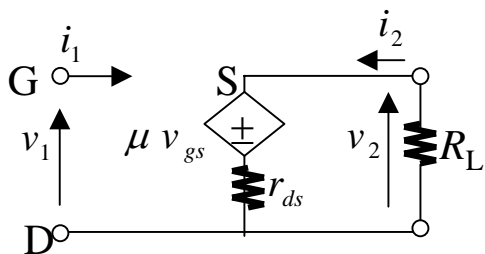
### (3)ドレイン接地等価回路



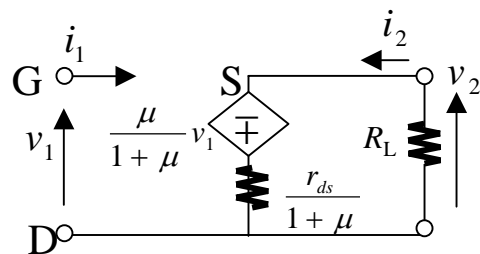
(a) 原理図 a



(a) 原理図 b



(a) 原理図 c



(a) 原理図 d

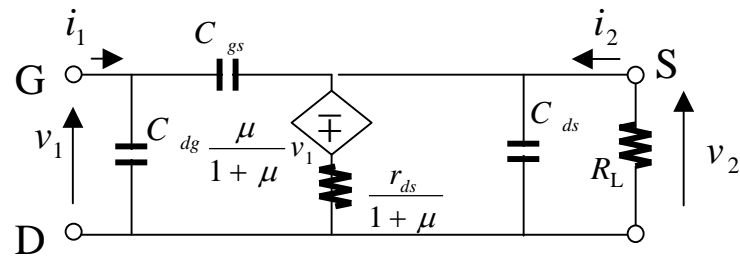
原理図 c で、

$$v_{gs} = v_1 - v_2 = v_1 + i_2 R_L, \quad i_2 = -\frac{\mu v_{gs}}{R_L + r_{ds}} = -\frac{\mu(v_1 + i_2 R_L)}{R_L + r_{ds}}$$

$$i_2 \left( 1 + \frac{\mu R_L}{R_L + r_{ds}} \right) = -\frac{\mu v_1}{R_L + r_{ds}}$$

$$i_2 = -\frac{\mu v_1}{(1 + \mu)R_L + r_{ds}} = -\frac{\frac{v_1}{1 + \mu}}{R_L + \frac{r_{ds}}{1 + \mu}}, \quad \mu = g_m r_{ds}, \quad v_2 = -R_L i_2$$

→ 原理図 d



(b) 低周波等価回路

二次側短絡時には、

$$i_1 = j\omega(C_{dg} + C_{gs})v_1, \quad i_2 = -j\omega C_{gs}v_1$$

一次側短絡時には、

$$i_2 = \left\{ \frac{1 + \mu}{r_{ds}} + j\omega(C_{ds} + C_{gs}) \right\} v_2, \quad i_1 = -j\omega C_{gs}v_2$$

したがって、 $y$ パラメータは、以下の通り。

$$y_{ig} = \left( \frac{i_1}{v_1} \right)_{v_2=0} = j\omega(C_{dg} + C_{gs}),$$

$$y_{fg} = \left( \frac{i_2}{v_1} \right)_{v_2=0} = -j\omega C_{gs}$$

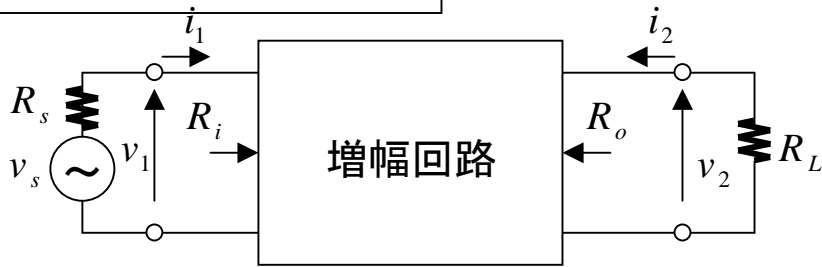
$$y_{rg} = \left( \frac{i_1}{v_2} \right)_{v_1=0} = -j\omega C_{gs},$$

$$y_{og} = \left( \frac{i_2}{v_2} \right)_{v_1=0} = \frac{1 + \mu}{r_{ds}} + j\omega(C_{ds} + C_{gs})$$

$$v_2 = -R_L i_2, \quad \mu = g_m r_{ds}$$

## 8.基本増幅回路

### 8.1 増幅回路とその動作量



#### 動作量

- (1)  $R_i$ : 入力抵抗 input resistance,  
入力インピーダンス input impedance
- (2)  $R_o$ : 出力抵抗 output resistance,  
出力インピーダンス output impedance
- (3)  $A_i$ : 電流増幅率 current amplification,  
電流利得 current gain
- (4)  $A_v$ : 電圧増幅率 voltage amplification,  
電圧利得 voltage gain
- (5)  $G_p$ : 電力利得 power gain
- (6) MAPG, 最大有能電力利得  
maximum available power gain

$$R_i, Z_i = \frac{v_1}{i_1}, \quad R_o, Z_o = \frac{v_2}{i_2}, \quad A_i = \frac{i_2}{i_1}, \quad A_v = \frac{v_2}{v_1},$$

$$G_p = \frac{v_2 i_2}{v_1 i_1} = \frac{i_2^2 R_L}{i_1^2 R_i} = A_i^2 \frac{R_L}{R_i}$$

$$MAPG = \frac{\text{増幅回路の有能電力}}{\text{信号源の有能電力}},$$

(インピーダンス整合時)

### $h$ パラメータから動作量を求める

$$v_1 = h_i i_1 + h_r v_2 \cdots (1)$$

$$i_2 = h_f i_1 + h_o v_2 \cdots (2)$$

$R_i$  は入力側から増幅回路を見た値である。

$$v_2 = -R_L i_2 \cdots (3)$$

(3)を(2)に代入すると、

$$i_2 = h_f i_1 - h_o R_L i_2 \rightarrow i_2 = \left\{ \frac{h_f}{1 + h_o R_L} \right\} i_1 \cdots (4)$$

$$v_2 = -R_L i_2 = -R_L \left\{ \frac{h_f}{1 + h_o R_L} \right\} i_1 \cdots (5)$$

$$R_i = \frac{v_1}{i_1} = h_i - h_r R_L \left\{ \frac{h_f}{1 + h_o R_L} \right\} = \frac{h_i + (h_i h_o - h_r h_f) R_L}{1 + h_o R_L}$$

$R_o$  は、 $v_s = 0$ としたときに出力側から増幅回路を見たときの値であるから、

$$v_1' = -R_s i_1' \cdots (6)$$

を式(1)に代入して、

$$-R_s i_1' = h_i i_1' + h_r v_2', \rightarrow (R_s + h_i) i_1' + h_r v_2' = 0$$

$$i_1' = -\left\{ \frac{h_r}{R_s + h_i} \right\} v_2' \cdots (7)$$

(2)式に代入して、

$$i_2' = -h_f \left\{ \frac{h_r}{R_s + h_i} \right\} v_2' + h_o v_2' \cdots (8)$$

$$R_o = \frac{v_2'}{i_2'} = \frac{1}{h_o - h_f \left\{ \frac{h_r}{R_s + h_i} \right\}} = \frac{R_s + h_i}{(h_i h_o - h_f h_r) + h_o R_s}$$

$A_v$  は、 $i_2 = -v_2/R_L$  としたときの  $v_2/v_1$  であるので、これを式 (2) に代入して、

$$-v_2/R_L = h_f i_1 + h_o v_2, \rightarrow i_1 = -\left\{ (h_o + 1/R_L) / h_f \right\} v_2$$

(1) に代入して、

$$v_1 = -\left\{ h_i (h_o + 1/R_L) / h_f \right\} v_2 + h_r v_2$$

$$= -\left[ \left\{ (h_i h_o - h_r h_f) + h_i / R_L \right\} / h_f \right] v_2$$

$$A_v = \frac{v_2}{v_1} = \frac{-h_f}{(h_i h_o - h_r h_f) + h_i / R_L}$$

$$= \frac{-h_f R_L}{h_i + (h_i h_o - h_r h_f) R_L}$$

$A_i$  は、 $v_2 = -R_L i_2$  としたときの  $i_2/i_1$  であるので、これを式 (2) に代入して、

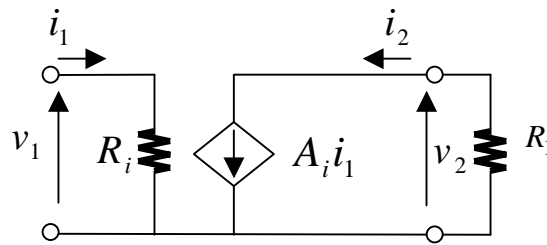
$$i_2 = h_f i_1 - h_o R_L i_2, \rightarrow i_1 = \left\{ (1 + h_o R_L) / h_f \right\} i_2$$

$$A_i = \frac{i_2}{i_1} = \frac{h_f}{1 + h_o R_L}$$

$$G_p = |A_v| |A_i| = \frac{h_f^2 R_L}{\left\{ h_i + (h_i h_o - h_r h_f) R_L \right\} (1 + h_o R_L)}$$

なお、 $A_v \times R_i = \frac{-h_f R_L}{1 + h_o R_L} = -A_i R_L$ , すなわち、

$$A_v = -A_i \cdot \frac{R_L}{R_i} \dots \text{利得インピーダンス法則}$$



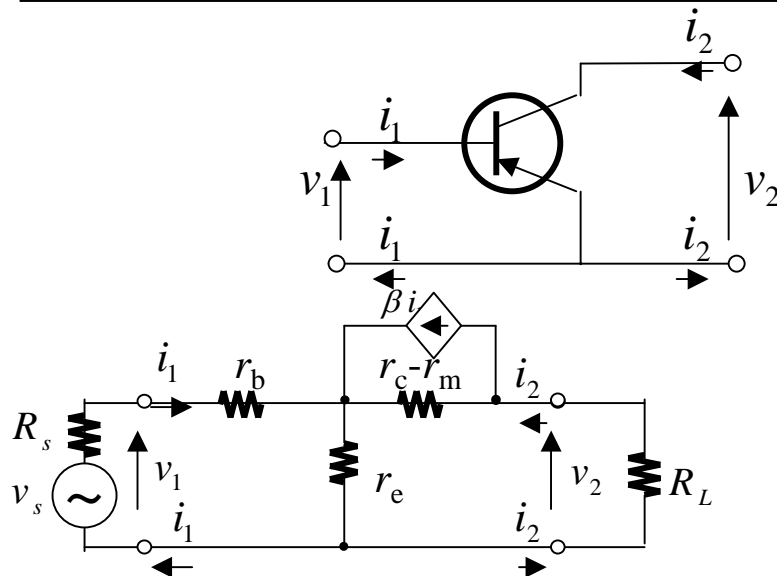
$$v_1 = R_i i_1,$$

$$v_2 = -R_L i_2 = -R_L A_i i_1$$

$$A_v = \frac{v_2}{v_1} = \frac{-R_L A_i}{R_i}$$

トランジスタ増幅回路の一般等価回路  
(どんな構成でも、動作量が分かれば上図で表すことができる。)

### 8.2 バイポーラトランジスタ増幅回路の基本動作量例



エミッタ接地回路に図のように電源、負荷抵抗を付加したときの  $R_i$ ,  $A_i$  は、 $h$  パラメータとまたは  $T$  パラメータから次頁に示すようにして求められ等価回路で表される。

$$h_{ie} = (r_b + r_e) - \frac{\{(1-\alpha)r_c + r_e\}r_e - r_e r_c}{(1-\alpha)r_c + r_e}$$

$$\approx r_b + r_e / (1-\alpha)$$

$$h_{re} = \frac{r_e}{(1-\alpha)r_c + r_e} \approx \frac{r_e}{(1-\alpha)r_c}$$

$$h_{fe} = -\frac{r_e - \alpha r_c}{(1-\alpha)r_c + r_e} \approx \frac{\alpha}{1-\alpha} = \beta$$

$$h_{oe} = \frac{1}{(1-\alpha)r_c + r_e} \approx \frac{1}{(1-\alpha)r_c}$$

$$\Delta h_e \equiv h_{ie} h_{oe} - h_{re} h_{fe}$$

$$\approx \{r_b + r_e / (1-\alpha)\} \frac{1}{(1-\alpha)r_c} - \frac{r_e \beta}{(1-\alpha)r_c}$$

$$\approx \frac{1}{(1-\alpha)r_c} \{r_b + r_e / (1-\alpha) - r_e \alpha / (1-\alpha)\}$$

$$\approx \frac{r_b + r_e}{(1-\alpha)r_c}$$

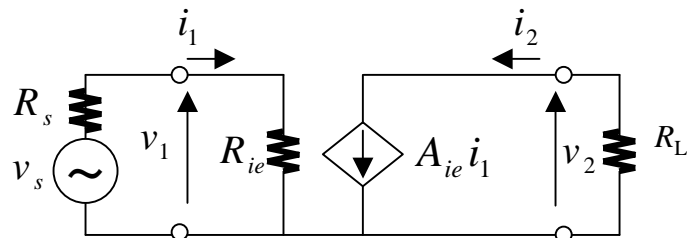
$$R_{ie} = \frac{h_{ie} + (h_{ie} h_{oe} - h_{re} h_{fe}) R_L}{1 + h_{oe} R_L}$$

$$\approx \frac{r_b + r_e / (1-\alpha) + (r_b + r_e) / (1-\alpha) \times R_L / r_c}{1 + 1 / (1-\alpha) r_c}$$

$$\approx \frac{r_b (1-\alpha) r_c + r_e r_c + (r_b + r_e) R_L}{1 + (1-\alpha) r_c}$$

$$A_{ie} = \frac{h_{fe}}{1 + h_{oe} R_L} \approx \frac{\beta}{1 + \frac{R_L}{(1-\alpha)r_c}} \approx \beta$$

エミッタ接地等価回路



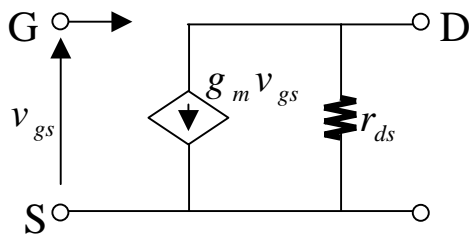
なお、出力抵抗は次式の通り計算できる。

$$R_{oe} = \frac{R_s + h_{ie}}{(h_{ie} h_{oe} - h_{fe} h_{re}) + h_{oe} R_s}$$

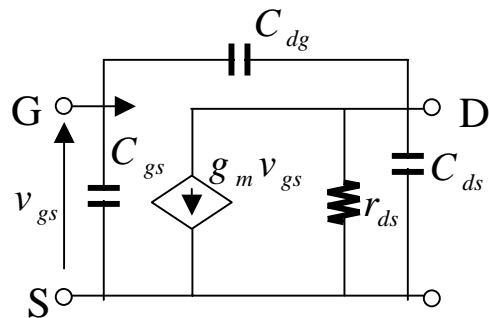
$$\approx \frac{R_s + r_b + r_e / (1-\alpha)}{(r_b + r_e) / (1-\alpha) r_c + R_s / (1-\alpha) r_c}$$

$$\approx \frac{(1-\alpha) r_c (R_s + r_b) + r_e r_c}{r_b + r_e + R_s}$$

### 8.3 FET 基本増幅回路の動作量例

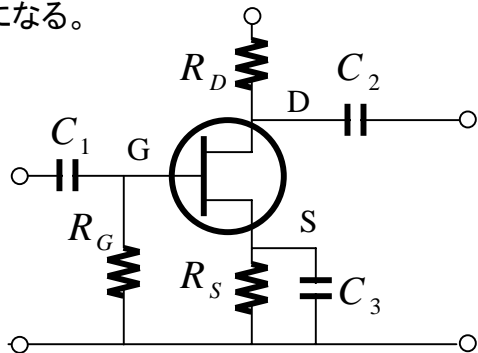


(a) 低周波等価回路(ソース接地)

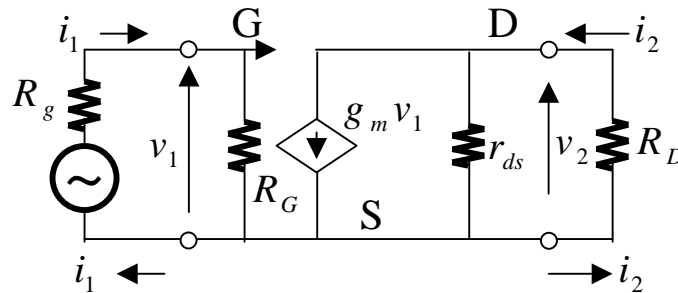


(b) 一般交流等価回路(ソース接地)

(a) (b) 図のようにFETのゲートソース間入力抵抗は非常に大きい、(c) 図のように直流バイアスが必要なことからバイアス抵抗が使用され結局これが入力抵抗を下げることになる。



(c) バイアスを含む回路構成



(d) 同上低周波等価増幅回路

$$v_1 = R_G i_1 \cdots \cdots A$$

$$i_2 = g_m v_1 + v_2 / r_{ds} \cdots B$$

$$v_2 = -R_D i_2 \cdots \cdots C$$

$$B \rightarrow C$$

$$v_2 = -R_D (g_m v_1 + v_2 / r_{ds}), \text{ 整理して、}$$

$$v_2 (1 + R_D / r_{ds}) = -g_m R_D v_1$$

$$\therefore A_v = \frac{v_2}{v_1} = \frac{-g_m R_D}{1 + R_D / r_{ds}} \approx -g_m R_D, (\because r_{ds} \gg R_D)$$

$$A, C \rightarrow B$$

$$i_2 = g_m R_G i_1 - R_D i_2 / r_{ds}, \text{ 整理して、}$$

$$i_2 (1 + R_D / r_{ds}) = g_m R_G i_1$$

$$\therefore A_i = \frac{i_2}{i_1} = \frac{g_m R_G}{1 + R_D / r_{ds}} \approx g_m R_G$$

$$A \text{ から、 } R_i = \frac{v_1}{i_1} = R_G$$

$v_g = 0$  とすれば、 $i_1 = v_1 = 0 \rightarrow g_m v_1 = 0$  となり、

$$R_o = \frac{v_2}{i_2} \Big|_{v_g=0} = r_{ds}$$