

バイポーラートランジスタ 特性と等価回路

概要

本資料はバイポーラートランジスタの特性と等価回路について述べたものです。

目次

概要	1
目次	2
1. トランジスターの特性	4
1.1. デバイス・パラメーター	5
1.2. 回路パラメーター	10
1.3. 低周波低雑音増幅回路	17
製品取り扱い上のお願い	23

図目次

図 1.1	T 型等価回路	5
図 1.2	α の周波数軌跡	8
図 1.3	n 型等価回路	9
図 1.4	h パラメーターによる回路表示	10
図 1.5	y パラメーターによる回路表示	10
図 1.6	S パラメーターによる回路表示	11
図 1.7	h パラメーターの周波数軌跡	16
図 1.8	y パラメーターの周波数軌跡	16
図 1.9	NF と周波数の関係	18
図 1.10	トランジスターの雑音源	18
図 1.11	雑音電圧と信号源抵抗	19
図 1.12	NF-Rg, Ic (1)	20
図 1.13	NF-Rg, Ic (2)	20
図 1.14	多段増幅器の NF	21
図 1.15	多段増幅器の NF	21

表目次

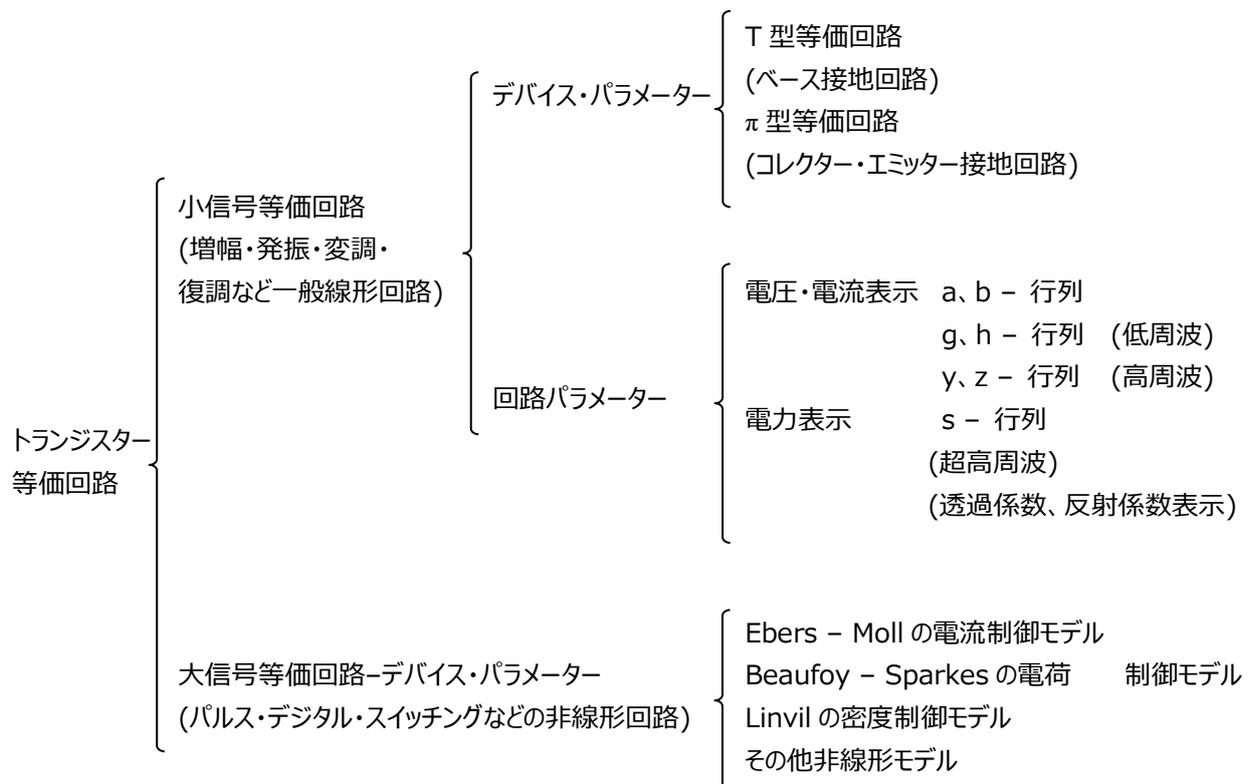
表 1.1	トランジスター等価回路一覧表	4
表 1.2	T 型等価回路定数と n 型等価回路定数との関係	9
表 1.3	各パラメーターの相互変換表	12
表 1.4	h パラメーターの変換公式一覧表	13
表 1.5	y パラメーターの変換一覧表	14
表 1.6	h パラメーターの T 型等価回路による表示	15
表 1.7	y パラメーターの T 型等価回路による表示	15
表 1.8	雑音の種類	18

1. トランジスターの特性

トランジスターの等価パラメーターには、デバイスの内部動作と密接に対応するデバイスパラメーターと、トランジスターを4端子回路網とみなし、マトリクスで表示された回路パラメーターとがあります。

また、取り扱う信号（振幅）の大小により、小信号等価回路と大信号等価回路とに分類されます。等価回路には非常に多くのものが発表されており、回路設計の際には各種等価回路の適用範囲および使用限界に十分注意して使用することが必要です。表 1.1 に等価回路の一覧表を示します。ここでは一般的な小信号等価回路について説明します。

表 1.1 トランジスター等価回路一覧表



1.1. デバイス・パラメーター

(1) T型等価回路

図 1.1 に T 型等価回路を示します。

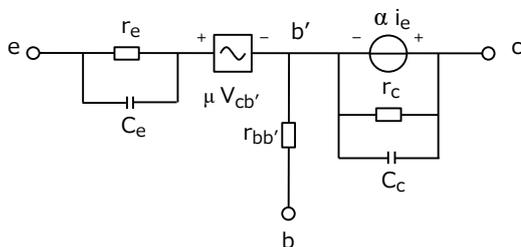


図 1.1 T 型等価回路

(a) r_e : エミッター抵抗

ベース・エミッター接合の順方向抵抗で、(1-1) 式で求められます。

$$r_e = \frac{k T}{q I_E} \text{ (}\Omega\text{)} \dots\dots\dots (1-1)$$

k : ボルツマン定数 (1.38×10^{-23} J/ K)

T : 絶対温度 (K)

q : 電子の電荷量 (1.602×10^{-19} C)

I_E : エミッター電流 (A)

常温 (300K) では、エミッター電流を mA で表すと (1-1) 式は (1-2) 式となります。

$$r_e \approx \frac{26}{I_E \text{ (mA)}} \text{ (}\Omega\text{)} \dots\dots\dots (1-2)$$

(b) C_e : エミッター容量 ($C_{Te} + C_{De}$)

エミッター容量は、ベース・エミッター接合の空乏層容量 C_{Te} と拡散容量 C_{De} の和として求められます。ベース・エミッター接合の空乏層容量は、拡散容量に比較して非常に小さく無視することができます。空乏層容量と拡散容量は (1-3)、(1-4) 式で求められます。

$$C_{Te} = A_e \sqrt[3]{\frac{\frac{1}{2} \varepsilon q^n N}{\phi_0 - V_{b'e}}} \quad (F) \dots\dots\dots (1-3)$$

- A_e : エミッター接合面積 (m^2)
- ε : 誘電率
- $^n N$: 高比抵抗側の多数キャリア濃度 (m^{-3}) (この場合は NPN)
- ϕ_0 : 接触電位差 (平衡時の電位障壁) (V)
- $V_{b'e}$: 接合の両端に印加される電圧 (V)

$$C_{De} = \frac{q I_E W^2}{2 k T D} \quad (F) \dots\dots\dots (1-4)$$

- W : ベース幅 (m)
- D : 少数キャリアのベース領域における拡散係数 (m^2/s)

(c) μ : 電圧帰還率 (アーリー定数)

アーリー効果として知られている定数で、ベース幅変調パラメーターです。

$$\mu = \frac{k T d_C}{3 q W (\phi_0 - V_{b'e})} \quad (F) \dots\dots\dots (1-5)$$

- d_C : コレクター空乏層の幅 (m)

(d) r_c : コレクター抵抗

ベース幅変調パラメーターで、次式で求められます。

$$r_c = \frac{1}{I_E \left(\frac{\partial \alpha}{\partial V_{b'c}} \right)} \quad (\Omega) \dots\dots\dots (1-6)$$

r_c の値は、通常 1~2M Ω 程度です。

(e) C_c : コレクター容量

エミッター容量と同じく、コレクター・ベース接合間の空乏層容量 C_{TC} と拡散容量 C_{DC} の和で求められます。コレクター・ベース接合の拡散容量は空乏層容量に比較して非常に小さいため、無視することができます。空乏層容量は、(1-7) 式で求められます。

$$C_{TC} = A_C \sqrt[3]{\frac{\varepsilon^2 q a}{\phi_0 - V_{b'c}}} \quad (F) \quad \dots\dots\dots (1-7)$$

- A_C : コレクター接合面積 (m^2)
- a : 不純物濃度勾配 (m^{-4})
- $V_{b'c}$: コレクター接合に印加される電圧 (V)
- C_{TC} は、通常 1~10pF 程度です。

(f) α : 直流電流増幅率

T 型等価回路で唯一、周波数依存性を認めているパラメーターで、(1-8) 式で求められます。

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{1 + j \omega C_e r_c}$$

$$f_\alpha = \frac{1}{2 \pi C_e r_e}$$

従って、

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{1 + j \frac{f}{f_\alpha}} \quad \dots\dots\dots (1-8)$$

- α_0 : 低周波における α の値
- f_α : α が断周波数 (α が α_0 より 3dB 低下する周波数)

図 1.2 に α の周波数軌跡を示します。 α を測定すると、周波数が f_α に近づくにつれて理論値と実測値とのずれが大きくなってきます。これは T 型等価回路が、物理現象の第 1 次近似であるためです。

これを補正するため Thomas-Moll は (1-9) 式のように余剰位相 m を導入しています。

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{1 + j \frac{f}{f_\alpha}} e^{-j m \frac{f}{f_\alpha}} \quad \dots\dots\dots (1-9)$$

(1-9) 式は周波数が f_α よりも低いところで実測値と良く一致します。

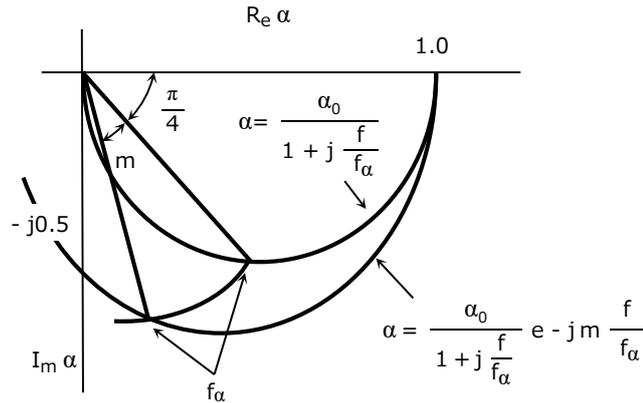
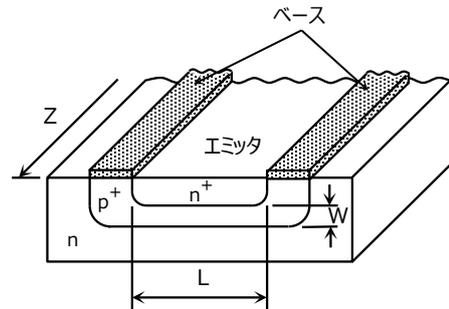


図 1.2 α の周波数軌跡

(g) $r_{bb'}$: ベース広がり抵抗

トランジスタの動作に寄与するベース領域の中心から外部ベース端子までの抵抗であり、トランジスタの形状寸法および、ベースの比抵抗などによって決定されます。

くし形形状でのベース広がり抵抗は (1-10) 式で求められます。



$$r_{bb'} \approx \frac{1}{12} \frac{\rho_B}{W} \frac{L}{Z} \quad (\Omega) \quad \dots \dots \dots (1-10)$$

ρ_B : ベース領域の比抵抗 ($\Omega \cdot m$)

エミッター接地での直流電流増幅率 (β) は π 型等価回路より、

$$\beta = \frac{\alpha_0}{1 - \alpha_0} \left(\frac{1}{1 + j \omega C_{b'e} r_{b'e}} \right) = \frac{\beta_0}{1 + j \omega C_{b'e} r_{b'e}}$$

f_α と同様に、 β の絶対値が $\beta_0 / \sqrt{2}$ になる周波数を β しや断周波数 f_β と定義すると、(1-11)式で求められます。

$$f_\beta = \frac{1}{2 \pi C_{b'e} r_{b'e}}$$

$$\beta = \frac{1}{1 + j \frac{f}{f_\beta}} \quad \dots \dots \dots (1-11)$$

(2) π 型等価回路

図 1.3 に π 型等価回路を示します。この等価回路は本質的には T 型等価回路に等しいものです。T 型等価回路との差異は、各パラメーターが原則的に、周波数特性を持たないことです。

各パラメーターの物理的意味が理解しやすく、広く用いられています。実際の回路計算に用いる場合には、周波数範囲などを考慮し、図 1.3 の基本型を簡略化して用いるのが便利です。

T 型等価回路の定数と π 型等価回路の定数は、表 1.2 のような関係になります。

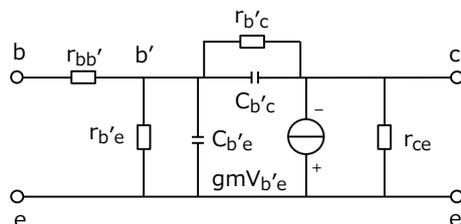


図 1.3 π 型等価回路

表 1.2 T 型等価回路定数と π 型等価回路定数との関係

T 型等価回路定数	π 型等価回路定数
C_e	$C_{b'e}$
$\frac{r_e}{1 - \alpha_0}$	$r_{b'e}$
C_c	$C_{b'c}$
$\frac{1}{r_e} - \frac{\mu(1 - \alpha_0)}{r_e}$	$\frac{1}{r_{b'c}}$
$\frac{r_e}{\mu}$	r_{ce}
$\frac{\alpha_0}{r_e}$	g_m
$r_{bb'}$	$r_{bb'}$

1.2. 回路パラメーター

(1) 電圧・電流表示

トランジスターを1つの4端子回路網とみなし、その物理的特性とは無関係に、端子の電気的特性のみによって記述する方法です。

入力電圧、電流と出力電圧、電流との関係を示すマトリクスには、表 1.1 に示すように、6つの型 (a, b, g, h, y, z 行列) があります。この中で比較的良く用いられるのが h パラメーターと y パラメーターです。

図 1.4、図 1.5 に h パラメーターおよび y パラメーターの定義を示します。エミッター接地およびベース接地の区分は i, r, f, o の後に e または b を付けて表示します。

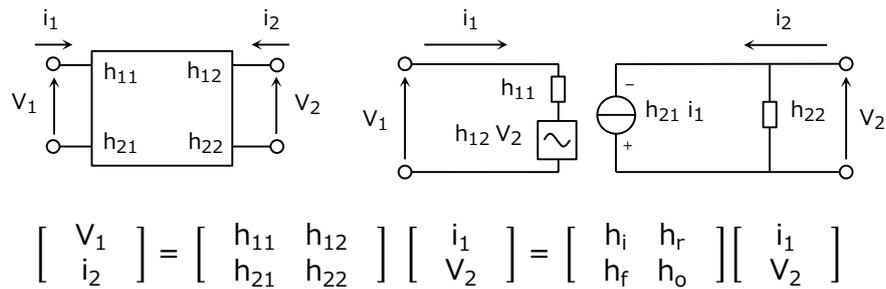


図 1.4 h パラメーターによる回路表示

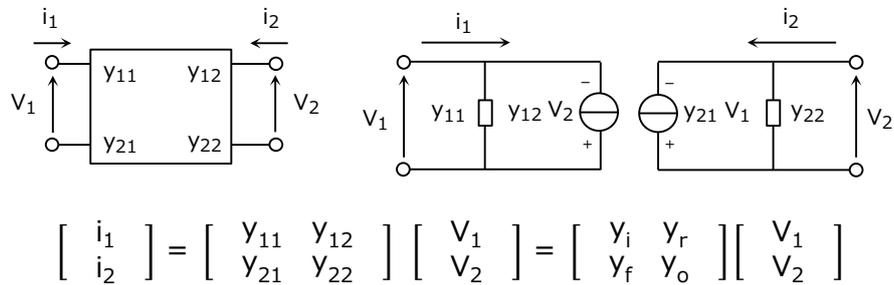


図 1.5 y パラメーターによる回路表示

各パラメーターは、次に示すような意味を持っています。

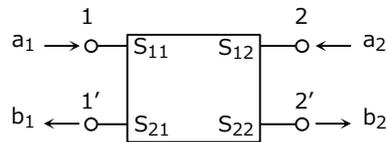
h_i : 入力インピーダンス	y_i : 入力アドミタンス
h_r : 逆方向電圧帰還率	y_r : 逆方向伝達アドミタンス
h_f : 順方向電流増幅率	y_f : 順方向伝達アドミタンス
h_o : 出力アドミタンス	y_o : 出力アドミタンス

上記2つのパラメーター表示で、hパラメーターは低周波領域、yパラメーターは高周波領域で多く用いられます。

(2) 電力表示

マイクロ波回路における波の反射、伝達などの現象は S 行列（散乱行列）を用いて取り扱うのが一般的です。半導体製品の周波数限界が拡大するにつれて、その回路表示にも S 行列が使用されることがあります。

S 行列の定義を図 1.6 に示します。



$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_i & S_r \\ S_f & S_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}$$

図 1.6 S パラメーターによる回路表示

各パラメーターの物理的意味は次に示す内容を持っています。

- S₁₁ : 入力反射係数
- S₁₂ : 逆方向透過係数
- S₂₁ : 順方向透過係数
- S₂₂ : 出力反射係数

トランジスターの接地方法により、e または b を付けて表示するのは h パラメーター、y パラメーターと同様です。

表 1.3 各パラメーターの相互変換表

	[h]	[y]	[s]
[h]	$\begin{matrix} h_i & h_r \\ h_f & h_o \end{matrix}$	$\begin{matrix} \frac{1}{y_i} & -\frac{y_r}{y_i} \\ \frac{y_f}{y_i} & \frac{y_i y_o - y_r y_f}{y_i} \end{matrix}$	$\begin{matrix} \frac{(1 + s_i)(1 + s_o) - s_r s_f}{(1 - s_i)(1 + s_o) + s_r s_f} \\ \frac{2s_r}{(1 - s_i)(1 + s_o) + s_r s_f} \\ \frac{(1 - s_i)(1 + s_o) + s_r s_f}{(1 - s_i)(1 + s_o) + s_r s_f} \\ \frac{-2s_f}{(1 - s_i)(1 + s_o) + s_r s_f} \\ \frac{(1 - s_i)(1 + s_o) + s_r s_f}{(1 - s_i)(1 + s_o) + s_r s_f} \\ \frac{(1 - s_i)(1 - s_o) - s_r s_f}{(1 - s_i)(1 + s_o) + s_r s_f} \end{matrix}$
[y]	$\begin{matrix} \frac{1}{h_i} & -\frac{h_r}{h_i} \\ \frac{h_f}{h_i} & \frac{h_i h_o - h_r h_f}{h_i} \end{matrix}$	$\begin{matrix} y_i & y_r \\ y_f & y_o \end{matrix}$	$\begin{matrix} \frac{(1 - s_i)(1 + s_o) + s_r s_f}{(1 + s_i)(1 + s_o) - s_r s_f} \\ \frac{-2s_r}{(1 + s_i)(1 + s_o) - s_r s_f} \\ \frac{(1 + s_i)(1 + s_o) - s_r s_f}{(1 + s_i)(1 + s_o) - s_r s_f} \\ \frac{-2s_f}{(1 + s_i)(1 + s_o) - s_r s_f} \\ \frac{(1 + s_i)(1 + s_o) - s_r s_f}{(1 + s_i)(1 + s_o) - s_r s_f} \\ \frac{(1 + s_i)(1 - s_o) + s_r s_f}{(1 + s_i)(1 + s_o) - s_r s_f} \end{matrix}$
[s]	$\begin{matrix} \frac{(h_i - 1)(h_o + 1) - h_r h_f}{(h_i + 1)(h_o + 1) - h_r h_f} \\ \frac{2h_r}{(h_i + 1)(h_o + 1) - h_r h_f} \\ \frac{(h_i + 1)(h_o + 1) - h_r h_f}{-2h_f} \\ \frac{(h_i + 1)(h_o + 1) - h_r h_f}{(1 + h_i)(1 - h_o) + h_r h_f} \\ \frac{(1 + h_i)(1 - h_o) + h_r h_f}{(h_i + 1)(h_o + 1) - h_r h_f} \end{matrix}$	$\begin{matrix} \frac{(1 - y_i)(1 + y_o) + y_r y_f}{(1 + y_i)(1 + y_o) - y_r y_f} \\ \frac{-2y_r}{(1 + y_i)(1 + y_o) - y_r y_f} \\ \frac{(1 + y_i)(1 + y_o) - y_r y_f}{-2y_f} \\ \frac{(1 + y_i)(1 + y_o) - y_r y_f}{(1 + y_i)(1 - y_o) + y_r y_f} \\ \frac{(1 + y_i)(1 - y_o) + y_r y_f}{(1 + y_i)(1 + y_o) - y_r y_f} \end{matrix}$	$\begin{matrix} s_i & s_r \\ s_f & s_o \end{matrix}$

表 1.4 h パラメーターの変換公式一覧表

		必要な h パラメーター					
		ベース接地		エミッター接地		コレクター接地	
既知の h パラメーター	ベース接地			$\frac{h_{ib}}{1 + h_{fb}}$	$\frac{\Delta h_b - h_{rb}}{1 + h_{fb}}$	$\frac{h_{ib}}{1 + h_{fb}}$	1
			$\frac{-h_{fb}}{1 + h_{fb}}$	$\frac{h_{ob}}{1 + h_{fb}}$	$\frac{-1}{1 + h_{fb}}$	$\frac{h_{ob}}{1 + h_{fb}}$	
	エミッター接地	$\frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}}$	$\frac{\Delta h_e - h_{re}}{1 + h_{fe}}$			h_{ie}	$1 - h_{re}$
		$\frac{-h_{fe}}{1 + h_{fe}}$	$\frac{h_{oe}}{1 + h_{fe}}$			$-(1 + h_{fe})$	h_{oe}
	コレクター接地	$\frac{-h_{ic}}{h_{fc}}$	$\frac{-\Delta h_{rc}}{h_{fc}} - 1$	h_{ic}	$1 - h_{rc}$		
		$\frac{-(1 + h_{fc})}{h_{fc}}$	$\frac{-h_{oc}}{h_{fc}}$	$-(1 + h_{fc})$	h_{oc}		

$$\Delta h_e = h_{ie} h_{oe} - h_{re} h_{fe} \quad \Delta h_b = h_{ib} h_{ob} - h_{rb} h_{fb} \quad \Delta h_c = h_{ic} h_{oc} - h_{rc} h_{fc}$$

表 1.5 y パラメーターの変換一覧表

		必要な y パラメーター					
		ベース接地		エミッター接地		コレクター接地	
既 知 の y パ ラ メ ー タ ー	ベース接地			$\sum Y_b$	$-(Y_{rb} + Y_{ob})$	$\sum Y_b$	$-(Y_{ib} + Y_{fb})$
				$-(Y_{fb} + Y_{ob})$	Y_{ob}	$-(Y_{ib} + Y_{rb})$	Y_{ib}
	エミッター接地	$\sum Y_e$	$-(Y_{re} + Y_{oe})$			Y_{ie}	$-(Y_{ie} + Y_{re})$
		$-(Y_{fe} + Y_{oe})$	Y_{oe}			$-(Y_{ie} + Y_{fe})$	$\sum Y_e$
	コレクター接地	Y_{oc}	$-(Y_{fc} + Y_{oc})$	Y_{ic}	$-(Y_{ic} + Y_{rc})$		
		$-(Y_{rc} + Y_{oc})$	$\sum Y_c$	$-(Y_{ic} + Y_{fc})$	$\sum Y_c$		

$$\sum Y_e = Y_{ie} + Y_{re} + Y_{fe} + Y_{oe}$$

$$\sum Y_b = Y_{ib} + Y_{rb} + Y_{fb} + Y_{ob}$$

$$\sum Y_c = Y_{ic} + Y_{rc} + Y_{fc} + Y_{oc}$$

表 1.6 h パラメータの T 型等価回路による表示

ベース接地		エミッター接地	
h_{ib}	$\frac{r_e + r_{bb'} \left[(1 - \alpha_0) + j \frac{f}{f_\alpha} \right]}{1 + j \frac{f}{f_\alpha}}$	h_{ie}	$r_{bb'} + \frac{r_e}{(1 - \alpha_0) + j \frac{f}{f_\alpha}}$
h_{rb}	$j 2 \pi f C_c r_{bb'}$	h_{re}	$2 \pi f_\alpha C_c r_e \frac{j \frac{f}{f_\alpha}}{(1 - \alpha_0) + j \frac{f}{f_\alpha}}$
h_{fb}	$\frac{-\alpha_0}{1 + j \frac{f}{f_\alpha}}$	h_{fe}	$\frac{\alpha_0}{(1 - \alpha_0) + j \frac{f}{f_\alpha}}$
h_{ob}	$j 2 \pi f C_c$	h_{oe}	$2 \pi f_\alpha C_c \frac{j \frac{f}{f_\alpha} \left(1 + j \frac{f}{f_\alpha} \right)}{(1 - \alpha_0) + j \frac{f}{f_\alpha}}$

表 1.7 y パラメータの T 型等価回路による表示

ベース接地		エミッター接地	
Y_{ib}	$\frac{1 + j \frac{f}{f_\alpha}}{r_e + j r_{bb'} \frac{f}{f_\alpha}}$	Y_{ie}	$\frac{(1 - \alpha_0) + j \frac{f}{f_\alpha}}{r_e + j r_{bb'} \frac{f}{f_\alpha}}$
Y_{rb}	$- 2 \pi f_\alpha C_c \frac{j \frac{f}{f_\alpha} \left(1 + j \frac{f}{f_\alpha} \right)}{\frac{r_e}{r_{bb'}} + j \frac{f}{f_\alpha}}$	Y_{re}	$- 2 \pi f_\alpha C_c \frac{r_e}{r_{bb'}} \frac{j \frac{f}{f_\alpha}}{\frac{r_e}{r_{bb'}} + j \frac{f}{f_\alpha}}$
Y_{fb}	$-\frac{\alpha_0}{r_e + j r_{bb'} \frac{f}{f_\alpha}}$	Y_{fe}	$\frac{\alpha_0}{r_e + j r_{bb'} \frac{f}{f_\alpha}}$
Y_{ob}	$2 \pi f_\alpha C_c \frac{j \frac{f}{f_\alpha} \left(1 + \frac{r_e}{r_{bb'}} + j \frac{f}{f_\alpha} \right)}{\frac{r_e}{r_{bb'}} + j \frac{f}{f_\alpha}}$	Y_{oe}	$Y_{ob} \text{ に同じ}$

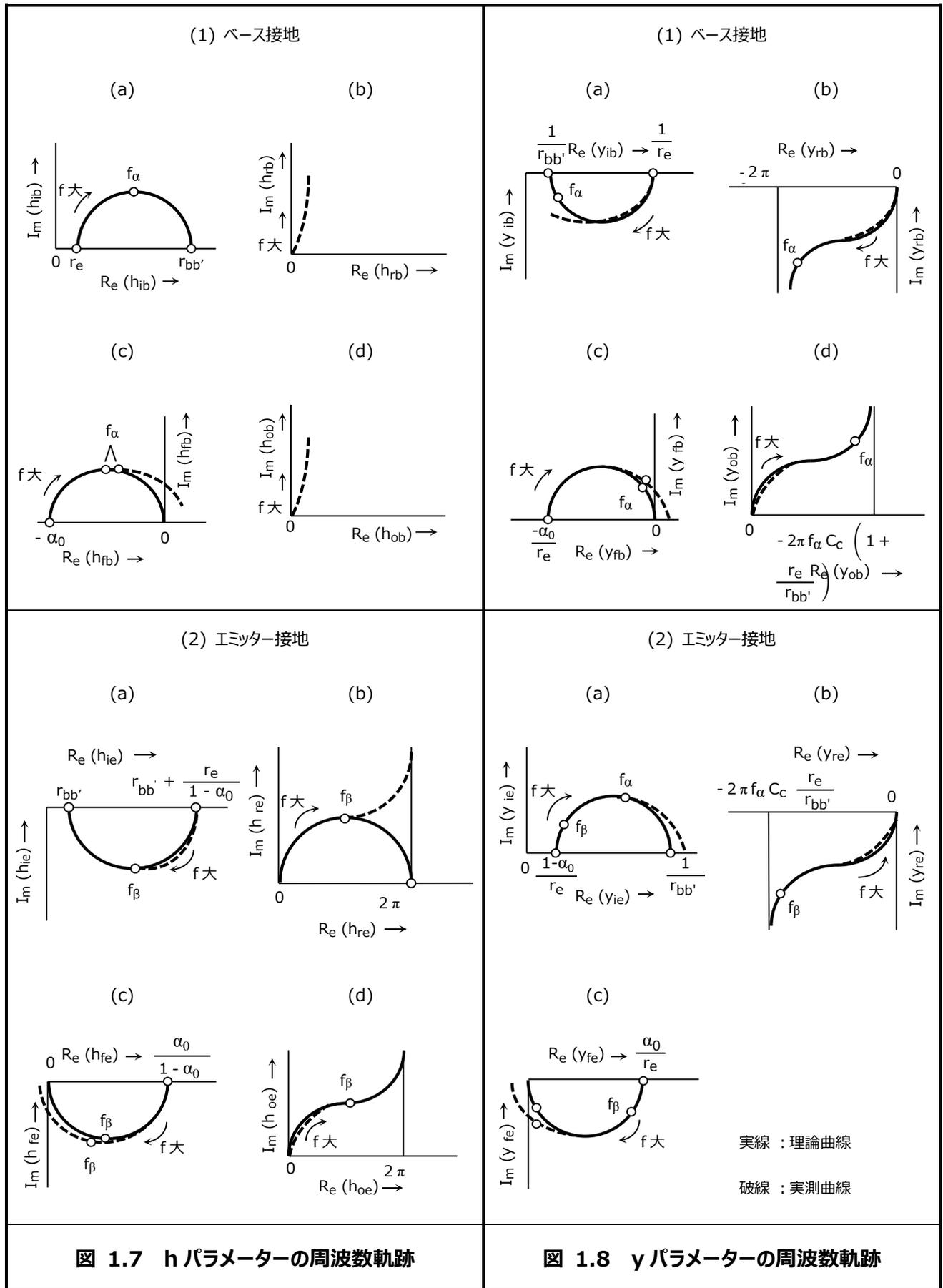


図 1.7 h パラメーターの周波数軌跡

図 1.8 y パラメーターの周波数軌跡

回路パラメーターの相互の関連、接地変換などについては、表 1.3、表 1.4、表 1.5 を参照してください。図 1.7、図 1.8 は表 1.6、表 1.7 より得られる h パラメーターおよび y パラメーターの周波数軌跡を表したものです。上述した各パラメーターは動作点、温度などによって変動するものであり、その傾向をつかんで設計する必要があります。

1.3. 低周波低雑音増幅回路

(1) 低雑音増幅器の設計

低雑音増幅器を設計する場合には、使用するトランジスタの選択、使用方法に十分な注意が必要です。使用する電圧、電流、信号源インピーダンスを検討し、トランジスタの最も優れた雑音特性領域で使用してください。ここでは、低雑音トランジスタの特性を活かした回路設計に対する雑音特性の考え方、トランジスタの最適条件、また、トランジスタの雑音指数と増幅器の SN 比の関係などについて説明します。

(2) トランジスタの雑音特性

トランジスタの雑音指数 NF (Noise Figure) は、次式で求められます。

$$\begin{aligned} \text{NF} &= 10 \log \left(\frac{E_{\text{si}}}{E_{\text{ni}}} / \frac{E_{\text{so}}}{E_{\text{no}}} \right)^2 \\ &= 20 \log \left(\frac{E_{\text{si}}}{\sqrt{4 k T R_g B}} / \frac{E_{\text{so}}}{E_{\text{no}}} \right) \dots\dots\dots (1-12) \end{aligned}$$

- E_{si} : 入力信号電圧
 - E_{ni} : 入力雑音電圧
 - E_{so} : 出力信号電圧
 - E_{no} : 出力雑音電圧
 - k : ボルツマン定数 (1.38×10^{-23} J/°K)
 - T : 絶対温度 (K)
 - R_g : 信号源抵抗
 - B : 周波数帯域幅 (Hz)
- また、 $E_{\text{ni}} = \sqrt{4 k T R_g B}$

このNFと周波数の関係は、図 1.9 のようになります。周波数によって、(1) 1/ f 雑音領域、(2) White 雑音領域、(3) 分配雑音領域に分けられます。

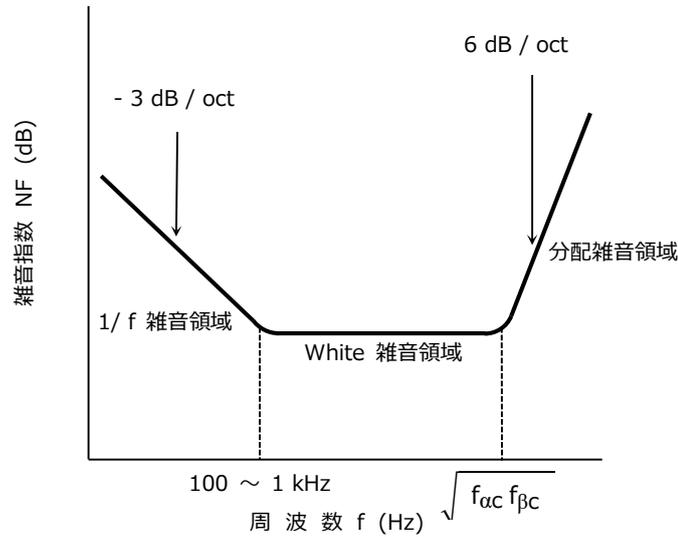
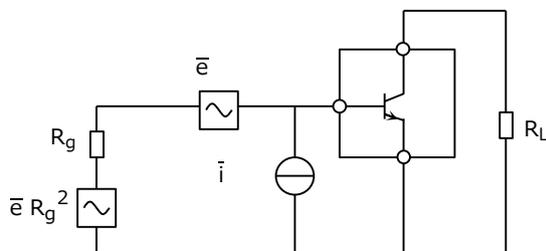


図 1.9 NFと周波数の関係

表 1.8 雑音の種類

種 類	1/ f 雑音	White 雑音	分配雑音
項 目	1/ f 雑音	White 雑音	分配雑音
説 明	周波数 f に比例して-3dB/ oct で減少する雑音	周波数に関係なく一定	周波数 f に比例して 6dB/ oct で増加する雑音
原 因	表面などのゆらぎ	ベースひろがり抵抗 r_{bb} などによる熱雑音	電流分離の際のゆらぎ
オーディオ用途	発生する	発生する	発生しない

トランジスタは、次のような電圧雑音源 e_N と電流雑音源 i_N で表すことができます。



$$e_N = \sqrt{4 k T R_N B}$$

$$i_N = \sqrt{2 q I_b B}$$

R_N : 等価雑音抵抗 (Ω)

q : 電荷 1.602×10^{-19} (C)

図 1.10 トランジスタの雑音源

ここで、トランジスタを雑音源をもたない理想トランジスタと考えると、前出の雑音指数 NF は、

$$NF = 10 \log \left(\frac{4 k T R_g + e_N^2 + i_N^2 + R_g^2 + 2 \gamma e_N i_N}{4 k T R_g} \right) \dots\dots\dots (1-13)$$

B : 1Hz
 γ : e_N, i_N の相関関数

で求められます。上式で NF と e_N, i_N の関係も表されています。

(1-13) 式から、雑音指数 NF はコレクター電流 I_C と信号源インピーダンス R_g に依存することが分かります。総合雑音電圧を e_{NT} とすると、

$$\bar{e}_{NT}^2 = 4 k T R_g + e_N^2 + i_N^2 R_g^2 + 2 \gamma e_N i_N \dots\dots\dots (1-14)$$

となります。信号源インピーダンス R_g との間には図 1.11 のような関係があります。

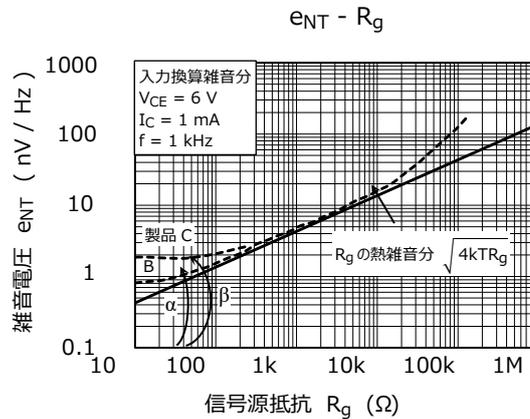


図 1.11 雑音電圧と信号源抵抗

図 1.11 で、製品 C の特性カーブの NF を考えると、 $R_g = 100 \Omega$ のときの R_g の熱雑音との差 B が NF になります。

$$NF = 20 (\log \beta - \log \alpha) \rightarrow \text{図 1.11 の B の部分に相当}$$

(1-14) 式からも分かるように、信号源抵抗 R_g が小さい領域では電圧性雑音が主因であり、 R_g が大きい領域では電流性雑音が主因となります。

また、図 1.11 のグラフに、コレクター電流の依存性を加えた NF- R_g, I_C 特性を図 1.12、図 1.13 に示します。

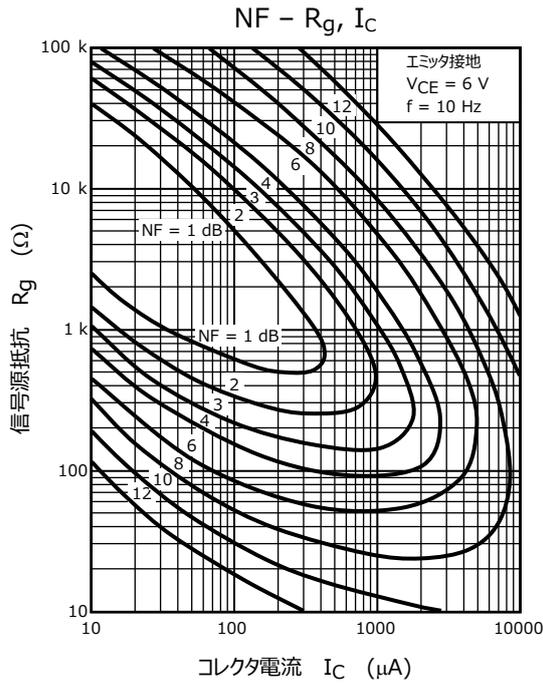


図 1.12 NF-Rg, Ic (1)

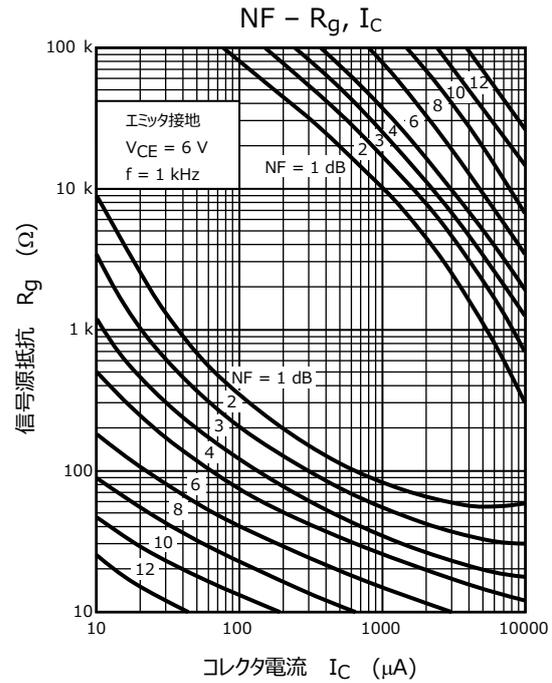


図 1.13 NF-Rg, Ic (2)

これらのグラフは NF の等高線で示していますが、このグラフから最適使用条件を決定することができます。

回路の信号源インピーダンスから、 $f=10\text{Hz}$ 、 $f=1\text{kHz}$ のおおよその NF-Rg、 I_C で NF が最小となるコレクタ電流 I_C を求めます。低雑音増幅器の設計に際しては、前後の回路条件を含めて考える必要があります。以上の点を考慮して、増幅器の雑音について説明します。

(3) 増幅器の雑音

増幅器の設計では、信号対雑音比 (SN 比) が重要となります。

$$S/N = 20 \log \frac{\text{定格出力}}{\text{雑音出力電圧}} \quad (\text{dB}) \quad \dots\dots\dots (1-15)$$

(1-12) 式から、(1-15) 式は次のように NF と結び付けられます。

$$\begin{aligned} S/N &= 20 \log \frac{E_{so}}{E_{no}} \\ &= 10 \log \frac{E_{so}^2}{E_{no}^2} \\ &= 10 \log \left(\frac{E_{si}^2}{E_{no}^2} 10^{\frac{NF}{10}} \right) \\ &= 10 \log \frac{E_{si}^2}{4kTR_g B} - NF \quad (\text{dB}) \quad \dots\dots\dots (1-16) \end{aligned}$$

増幅器の SN 比 (dB)	=	入力側の SN 比 (dB)	-	増幅器の NF (dB)
----------------	---	----------------	---	--------------

多段増幅器の雑音指数

図 1.14 のような多段増幅器の NF は次の式で求められます。

$$NF_T = NF_1 + \frac{NF_2 - 1}{G_1} + \frac{NF_3 - 1}{G_1 G_2} \dots\dots\dots (1-17)$$

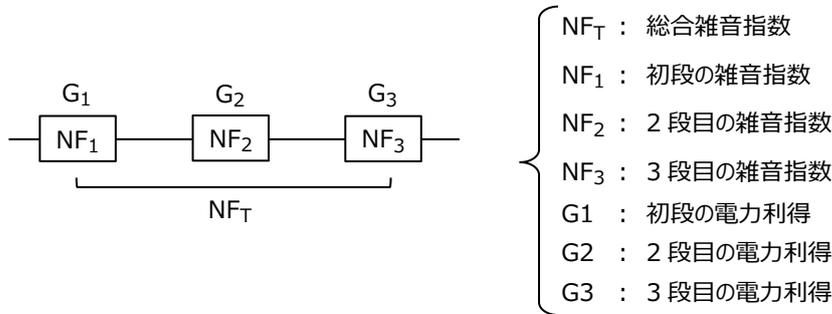


図 1.14 多段増幅器の NF

また、等価雑音抵抗を R_N で表すと、

$$R_N = R_{N1} + \frac{R_{N2}}{A_1} + \frac{R_{N3}}{(A_1 A_2)^2} \dots\dots\dots (1-18)$$

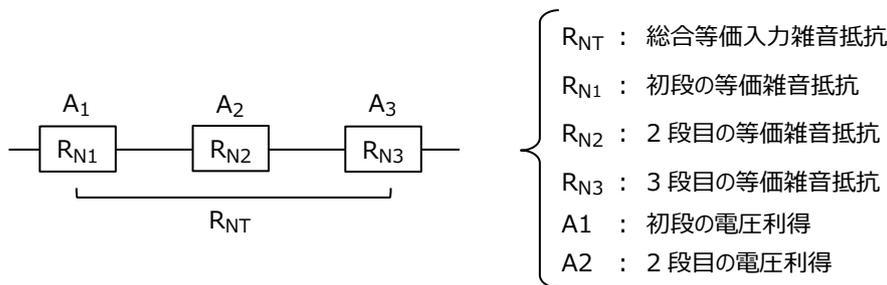


図 1.15 多段増幅器の RN

(1-17)、(1-18) 式から、初段の電圧利得 A_1 が十分に大きければ、総合雑音数 NF_T は

$$NF_T \approx NF_1 \dots\dots\dots (1-19)$$

となり、初段に使用するトランジスターの NF によって決まります。

トランジスタの雑音指数 NF 発表値から回路の雑音指数 NF_T の求め方

トランジスタの雑音指数 NF の発表値は、スポット周波数 (1kHz、100Hz、10Hz) で測定したもので、広帯域増幅器で、かつ低域でブーストしている回路には、そのまま適用できず次の方法で換算します。分配雑音領域は非常に高い周波数なので、低周波増幅で関与するのは $1/f$ 雑音領域とホワイト雑音領域です。

ここで、

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{e}_g^2 : \text{信号源抵抗 } R_g \text{ より発生する熱雑音の 2 乗平均電圧} \\ \bar{e}_w^2 : \text{White 雑音の二乗平均電圧} \\ e^{-2}_{1/f} : 1/f \text{ 雑音の二乗平均電圧} \end{array} \right. \dots\dots\dots (1-20)$$

とすると、雑音指数の定義から

$$NF(\text{White 雑音領域}) = \frac{\bar{e}_g^2 + \bar{e}_w^2}{\bar{e}_g^2} = NF_{(1\text{kHz})} \dots\dots\dots (1-21)$$

$NF_{(1\text{kHz})}$: 1kHz spot 周波数での NF

(1-20) 式から \bar{e}_w^2 を求めると

$$\bar{e}_w^2 = (NF_{(1\text{kHz})} - 1) \bar{e}_g^2 \dots\dots\dots (1-22)$$

また、 $f=10\text{Hz}$ における雑音指数を $NF_{(10\text{Hz})}$ とすると

$$NF_{(10\text{Hz})} = \frac{\bar{e}_g^2 + \bar{e}_w^2 + \bar{e}_{1/f}^2(10\text{Hz})}{\bar{e}_g^2} \dots\dots\dots (1-23)$$

(1-22) 式から

$$\bar{e}_{1/f}^2(10\text{Hz}) = (NF_{(10\text{Hz})} - NF_{(1\text{kHz})}) \bar{e}_g^2 \dots\dots\dots (1-24)$$

$1/f$ 雑音は、周波数に対して -3dB/oct で変化するため、一般の周波数での $\bar{e}_{1/f}^2$ は

$$\bar{e}_{1/f}^2 = (NF_{(10\text{Hz})} - NF_{(1\text{kHz})}) \bar{e}_g^2 \frac{10}{f} \dots\dots\dots (1-25)$$

で求められます。

参考文献

- 1) WILLIAM A.RHEINFELDER : DESIGN OF LOW NOISE TRANSISTOR INPUT CIRCUITS, LONDON ILIFFE BOOKS LTD. (1964)
- 2) J.WATSON : SEMICONDUCTOR CIRCUIT DESIGN, ADAM HILGER LTD. (1970)

製品取り扱い上のお願

株式会社東芝およびその子会社ならびに関係会社を以下「当社」といいます。
本資料に掲載されているハードウェア、ソフトウェアおよびシステムを以下「本製品」といいます。

- 本製品に関する情報等、本資料の掲載内容は、技術の進歩などにより予告なしに変更されることがあります。
- 文書による当社の事前の承諾なしに本資料の転載複製を禁じます。また、文書による当社の事前の承諾を得て本資料を転載複製する場合でも、記載内容に一切変更を加えたり、削除したりしないでください。
- 当社は品質、信頼性の向上に努めていますが、半導体・ストレージ製品は一般に誤作動または故障する場合があります。本製品をご使用頂く場合は、本製品の誤作動や故障により生命・身体・財産が侵害されることのないように、お客様の責任において、お客様のハードウェア・ソフトウェア・システムに必要な安全設計を行うことをお願いします。なお、設計および使用に際しては、本製品に関する最新の情報（本資料、仕様書、データシート、アプリケーションノート、半導体信頼性ハンドブックなど）および本製品が使用される機器の取扱説明書、操作説明書などをご確認の上、これに従ってください。また、上記資料などに記載の製品データ、図、表などに示す技術的な内容、プログラム、アルゴリズムその他応用回路例などの情報を使用する場合は、お客様の製品単独およびシステム全体で十分に評価し、お客様の責任において適用可否を判断してください。
- 本製品は、特別に高い品質・信頼性が要求され、またはその故障や誤作動が生命・身体に危害を及ぼす恐れ、膨大な財産損害を引き起こす恐れ、もしくは社会に深刻な影響を及ぼす恐れのある機器（以下“特定用途”という）に使用されることは意図されていませんし、保証もされていません。特定用途には原子力関連機器、航空・宇宙機器、医療機器（ヘルスケア除く）、車載・輸送機器、列車・船舶機器、交通信号機器、燃焼・爆発制御機器、各種安全関連機器、昇降機器、発電関連機器などが含まれますが、本資料に個別に記載する用途は除きます。特定用途に使用された場合には、当社は一切の責任を負いません。なお、詳細は当社営業窓口まで、または当社 Web サイトのお問い合わせフォームからお問い合わせください。
- 本製品を分解、解析、リバースエンジニアリング、改造、改変、翻案、複製等しないでください。
- 本製品を、国内外の法令、規則及び命令により、製造、使用、販売を禁止されている製品に使用することはできません。
- 本資料に掲載してある技術情報は、製品の代表的動作・応用を説明するためのもので、その使用に際して当社及び第三者の知的財産権その他の権利に対する保証または実施権の許諾を行うものではありません。
- 別途、書面による契約またはお客様と当社が合意した仕様書がない限り、当社は、本製品および技術情報に関して、明示的にも黙示的にも一切の保証（機能動作の保証、商品性の保証、特定目的への合致の保証、情報の正確性の保証、第三者の権利の非侵害保証を含むがこれに限らない。）をしておりません。
- 本製品、または本資料に掲載されている技術情報を、大量破壊兵器の開発等の目的、軍事利用の目的、あるいはその他軍事用途の目的で使用しないでください。また、輸出に際しては、「外国為替及び外国貿易法」、「米国輸出管理規則」等、適用ある輸出関連法令を遵守し、それらの定めるところにより必要な手続を行ってください。
- 本製品の RoHS 適合性など、詳細につきましては製品個別に必ず当社営業窓口までお問い合わせください。本製品のご使用に際しては、特定の物質の含有・使用を規制する RoHS 指令等、適用ある環境関連法令を十分調査の上、かかる法令に適合するようご使用ください。お客様がかかる法令を遵守しないことにより生じた損害に関して、当社は一切の責任を負いかねます。