

トランジスタの増幅回路と R-L-C共振回路

1. 背景・目的

能動素子であるトランジスタには、「増幅作用」があるが、信号を増幅させるためには周辺回路を組む必要があり、それにより増幅特性に影響を及ぼすこととなる。一方、受動素子を使った LC 回路は特定の周波数の信号を生成するのに使われたり、より複雑な信号から特定の周波数の信号だけを抽出するのに使われる。ここでは、バイポーラトランジスタを用いた増幅回路の実験と、L-C-R回路を用いた共振回路の実験を行い、それらの作用を理解すると共に、等価回路等で計算した理論値と実測値と比較しながらそれぞれの特性を理解する。

2. トランジスタの増幅回路とその特性

ここでは、エミッタ増幅回路を取り上げ、トランジスタの増幅作用について学ぶ。

図2-1はエミッタ増幅回路である。トランジスタにバイアスを加えて活性領域に動作点を設定し、コンデンサ C_1 を介して交流信号を重ねてトランジスタのベース端子に入力し、コレクタ端子に接続されたコンデンサ C_2 を介して増幅された交流信号を取り出すしくみである。

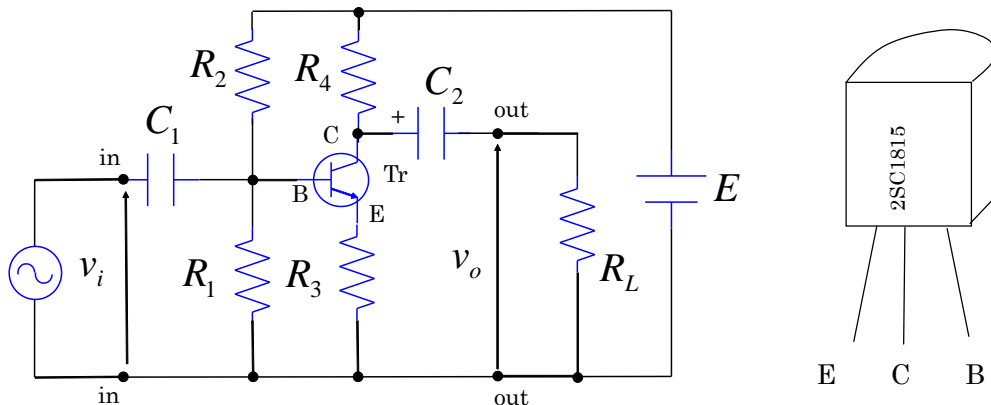


図2-1 実験回路と使用するトランジスタの概観図

($R_1 = 22 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 2 \text{ k}\Omega$, $R_4 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_L = 10 \text{ k}\Omega$, $C_1 = 0.1 \text{ }\mu\text{F}$, $C_2 = 10 \text{ }\mu\text{F}$, $E = 15 \text{ V}$, $Tr: 2SC1815Y$)

2-1. 増幅回路の理論特性

まず、この回路がどのような特性かを電氣的等価回路から導かれる計算式を使って理論値を算出する。なお、次に示す値は付録Aのトランジスタ特性表からおおよその値を見積もって使うこととする。→ [h_{FE} , V_{BE} , h_{fe} , h_{ie}] ただし, $h_{oe} = 0$, $h_{re} = 0$ とする。

2-1-1. バイアス値

- ・バイアス回路を描き、各電圧を算出する式を考えて、ベース端子の電圧 V_B 、コレクタ端子の電圧 V_C 、エミッタ端子の電圧 V_E の各値を計算で求めよ ($I_C \gg I_B$ と仮定して良い。)

2-1-2. 電圧利得

- ・結合コンデンサ C_1 , C_2 のインピーダンスを無視した簡易等価回路を描き, 電圧増幅度 A_v (倍) を与える式を導出して電圧利得 $G_v(\text{dB})$ を計算で求めよ。

2-1-3. 低域カットオフ周波数

- ・結合コンデンサ C_2 のインピーダンスを無視し, C_1 を含んだ簡易等価回路を描き, 低域のカットオフ周波数 f_L を与える式を導出してその値を計算で求めよ。

2-1-4. 入力インピーダンス

- ・結合コンデンサ C_1 , C_2 のインピーダンスを無視した簡易等価回路を描き, 入力インピーダンス Z_i を与える式を導出してその値を計算で求めよ。

2-1-5. 出力インピーダンス

- ・結合コンデンサ C_1 , C_2 のインピーダンスを無視した簡易等価回路を描き, 出力インピーダンス Z_o を与える式を導出してその値を計算で求めよ。

2-1-6. 出力波形の歪み

- ・入力電圧の振幅が増加すると, 出力波形がどのように歪むのか理論的に考えて説明せよ。

2-2. 増幅回路の作成と実測

図 2-1 に示す増幅回路 (実験装置) を作成する。負荷抵抗 R_L を接続するのを忘れないこと。

- ・発振器の周波数を 10 kHz, 電圧の振幅値を $0.4 V_{OP}$ (OP とは最大値のこと) 程度とし, 入力波形 v_i と出力電圧波形 v_o をオシロスコープで同時観察して (ch1: v_i , ch2: v_o), 信号が反転増幅されていることを確認せよ。

⇒ ⇒ ⇒ **Check 2-1**

2-2-1. バイアス電圧の測定

- ・発振器の出力電圧を 0 V とし, 下記に示すバイアス電圧をデジタルマルチメータ [DMM] (直流レンジ) で測定せよ。

V_B : Tr のベース — GND 間 直流電圧

V_C : Tr のコレクタ — GND 間 直流電圧

V_E : Tr のエミッタ — GND 間 直流電圧

- ・(2-1-1) で求めた計算値と比較せよ。

2-2-2. 電圧利得の測定

入力(in)端子に DMM1 (交流電圧レンジ) とオシロスコープの CH1 を接続し, 出力(out)端子に DMM2 (交流電圧レンジ) とオシロスコープの CH2 を接続する。DMM の表示は実効値 (rms) で表示されるので注意すること。

- ・発振器の周波数と電圧をそれぞれ $f = 10 \text{ kHz}$, $V_i = 0.4 V_{\text{rms}}$ (rms とは実効値のこと) とし, 入出力波形をオシロスコープで観察し (ch1: v_i , ch2: v_o), 画像を記録せよ。

- ・オシロスコープで読み取った入出力電圧の振幅値と、2 台のデジタルマルチメータで読み取った入出力電圧の実効値を表にまとめて、それらの関係が正しいことを確認し、この時の電圧増幅度 A_v （倍）及び電圧利得 $G_v(\text{dB})$ はいくらか求めよ。
- ・（2－1－2）で求めた計算値と比較せよ。

2－2－3．増幅率の周波数特性

- ・発振器の電圧 V_i を $0.4 \text{ V}_{\text{rms}}$ 一定とし、発振器の周波数 f を 10 Hz , 20 Hz , 50 Hz , 100 Hz , 200 Hz ・・・ 100 kHz としたときの出力電圧 V_o の実効値を測定し、電圧利得 G_v を求める。
（発振器の周波数を変化させると、発振器の出力電圧も変化する場合があるので注意すること。） f , V_i , V_o , G_v の関係を表にまとめよ。
- ・横軸を f , 縦軸を G_v として片対数グラフにプロットせよ。
- ・電圧利得が最大利得より 3 dB 低下する周波数（カットオフ周波数） f_L はどれくらいかグラフより求めよ。（ f_L 付近では発振器の周波数 f をより細かく変化させ、データを取る事）。
- ・（2－1－3）で求めた計算値と比較せよ。

2－2－4．入力インピーダンスの測定

- ・図 2－2 のように $R_R = 10 \text{ k}\Omega$ の抵抗を接続し、発振器の周波数を $f = 10 \text{ kHz}$, 電圧を $V_s = 0.4 \text{ V}_{\text{rms}}$ とする。 V_s 及び V_i の各電圧を DMM で測定し、(2-1)式より入力インピーダンス Z_i を求めよ。

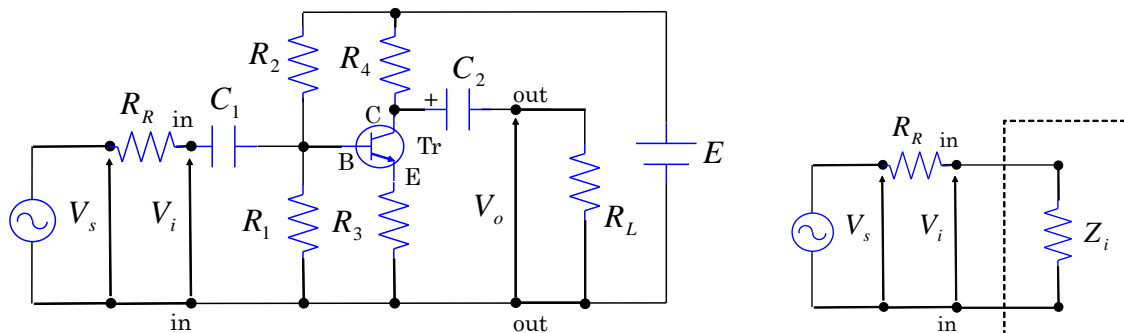


図 2－2 入力インピーダンスの測定方法

$$Z_i = \frac{V_i}{V_s - V_i} R_R \quad (2-1)$$

- ・（2－1－4）で求めた計算値と比較せよ。

2－2－5．出力インピーダンスの測定

- ・図 2－3 で発振器の周波数を $f = 10 \text{ kHz}$, 電圧を $V_i = 0.4 \text{ V}_{\text{rms}}$ とする。 SW を開いた時（ R_L をはずした時）の出力端電圧 V_{oo} と SW を閉じた時（ R_L を接続した時）の電圧 V_o を DMM で測定し、(2-2)式より出力インピーダンス Z_o を求めよ。

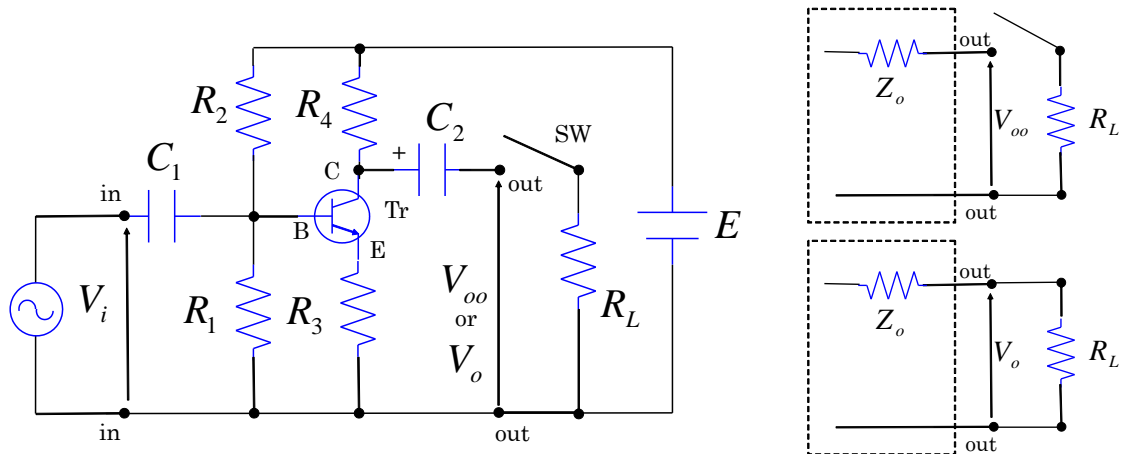


図 2-3 出力インピーダンスの測定方法

$$Z_o = \frac{V_{oo} - V_o}{V_o} R_L \quad (2-2)$$

- ・ (2-1-5) で求めた計算値と比較せよ。

2-2-6. 増幅率の測定と波形歪みの観測

- ・ 図 2-1 で発振器の周波数を $f = 10\text{kHz}$ に固定とする。入力電圧 V_i を $0.1\text{ V}_{\text{rms}}$, $0.2\text{ V}_{\text{rms}}$, $0.3\text{ V}_{\text{rms}}$, ... と上昇させた時の出力電圧値 V_o を DMM で測定してゆく (オシロスコープで出力端電圧波形を観察し, 波形に歪みが生じるまで測定する)。出力波形に歪みが生じ始めるのは入力電圧がどれくらいの時か測定せよ。
- ・ 入力電圧 $V_i = 1.0\text{ V}_{\text{rms}}$ 時の入力波形と出力波形をオシロスコープで同時観察し (ch1: v_i , ch2: v_o), 画像を記録せよ。

⇒ ⇒ ⇒ **Check 2-2**

- ・ (2-1-6) で考えた波形と比較せよ。

3. R-L-C共振回路とその特性

ここでは，抵抗，コイル，コンデンサより構成されるR-L-C直列共振回路を取り上げ，そのアドミッタンス特性と回路定数の算出方法について学ぶ。

図3-1はR-L-C直列回路に交流電源を接続したものである。この回路のアドミッタンス周波数特性は図3-2のようになり，アドミッタンスループ特性は図3-3のようになる。ここで，電源の角周波数を ω とする（ $\omega=2\pi f$ ）。

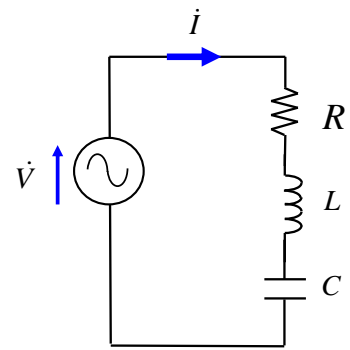


図3-1 R-L-C直列回路

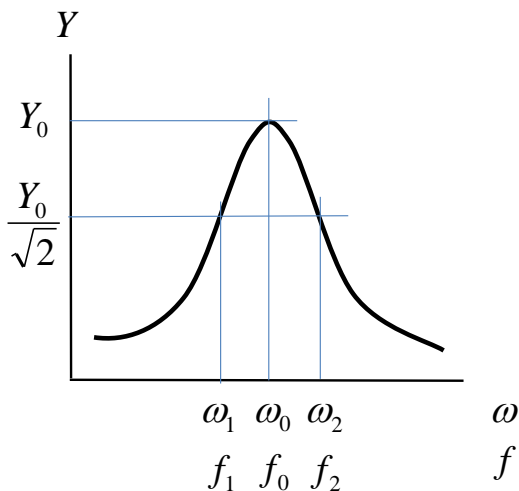


図3-2 アドミッタンスの周波数特性

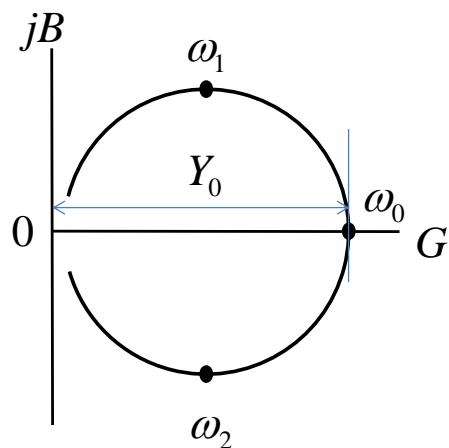


図3-3 アドミッタンスループ特性

3-1. 定数と理論特性

3-1-1. アドミッタンスと共振周波数

- ・図3-1において，電源の角周波数を ω とし，複素アドミッタンス \dot{Y} とその大きさ Y を与える式を示せ。また，アドミッタンスの大きさ Y が最大(共振)となるときの角共振周波数 ω_0 の値と，その時の Y の大きさ Y_0 を与える式を導出せよ。

3-1-2. アドミッタンスループ

- ・複素インピーダンスを

$$\dot{Z} = R + jX \quad (3-1)$$

(R : レジスタンス, X : リアクタンス), 複素アドミッタンスを

$$\dot{Y} = G + jB \quad (3-2)$$

(G : コンダクタンス, B : サセプタンス) としたとき，

$$\dot{Z} = \frac{1}{\dot{Y}} \quad (3-3)$$

の関係から、アドミッタンス軌跡（横軸 G , 縦軸 B ）は $(\frac{1}{2R}, 0)$ を中心とし、半径 $\frac{1}{2R}$ の円を描くことを示せ。

3-1-3. 品質係数 Q 値の算出

・共振時では

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} \quad (3-4)$$

となる。ここで、(3-4)式の両辺を R で除し、品質係数 Q を

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 C R} \quad (3-5)$$

と定義する。図 3-2, 図 3-3 で、

$$Y = \frac{Y_0}{\sqrt{2}} \quad (3-6)$$

を与える角周波数を ω_2, ω_1 とするとき ($\omega_1 < \omega_2$ で、 ω_1, ω_2 はそれぞれ B 最大値と B 最小値を与える角周波数),

$$Q = \frac{\omega_0}{\omega_2 - \omega_1} \quad (3-7)$$

なる関係式を導き出せ。

3-1-4. R, L, C 値の算出方法

・ R, L, C の値がわからないとき、アドミッタンスループ特性より $Y_0, \omega_0, \omega_2, \omega_1$ を

測定すれば、(3-7)式より値を算出することができ、下記式により、 R, L, C の値を算出することができる。

$$R = \frac{1}{Y_0} \quad (3-8)$$

$$L = \frac{Q}{\omega_0 Y_0} \quad (3-9)$$

$$C = \frac{Y_0}{\omega_0 Q} \quad (3-10)$$

それぞれの式を導き出せ。

3-2. R-L-C回路のアドミタンス特性測定と定数の算出

3-2-1. アドミタンス特性の測定

- ・図3-4に示すようにR-L-C直列回路にLCRメータを接続し、アドミタンスの周波数特性及びアドミタンスループ特性を測定し、その数値データを使ってそれぞれグラフ化し提示せよ。このとき、掃引周波数範囲及び周波数の分解能は任意とする。
- ・実験データより、 Y_0 , f_0 , f_2 , f_1 (ω_0 , ω_2 , ω_1) の値を求めよ。

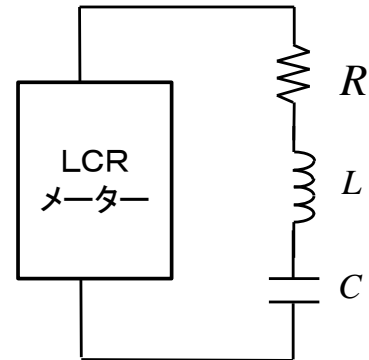


図3-4 実験装置の概略図

3-2-2. 定数の算出

- ・(3-7), (3-8), (3-9), (3-10)式を用いて Q , R , L , C の値を算出せよ。

3-2-3. グラフの追記

- ・求めた等価回路定数を使って、アドミタンスの周波数特性及びアドミタンスのループ円を計算し、実測したグラフに追記し、新たに提示しなさい。

4. 課題

- 4-1. エミッタ接地, ベース接地, コレクタ接地の各増幅回路の特徴についてまとめよ。
- 4-2. 共振回路の応用用途にはどのようなものがあるか調査し、それぞれについてまとめよ。

TOSHIBA

2SC1815

東芝トランジスタ シリコンNPNエピタキシャル形 (PCT方式)

2SC1815

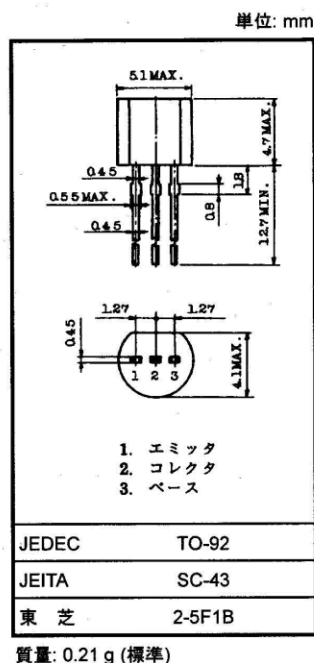
○ 低周波電圧増幅用

○ 励振段増幅用

- 高耐圧でしかも電流量が大きい。
: $V_{CEO} = 50\text{ V}$ (最小), $I_C = 150\text{ mA}$ (最大)
- 直流電流増幅率の電流依存性が優れています。
: $h_{FE}(2) = 100$ (標準) ($V_{CE} = 6\text{ V}$, $I_C = 150\text{ mA}$)
: $h_{FE}(I_C = 0.1\text{ mA})/h_{FE}(I_C = 2\text{ mA}) = 0.95$ (標準)
- $P_O = 10\text{ W}$ 用アンプのドライバおよび一般スイッチング用に適しています。
- 低雑音です。: $NF = 1\text{ dB}$ (標準) ($f = 1\text{ kHz}$)
- 2SA1015 とコンプリメンタリになります。(O, Y, GR クラス)

絶対最大定格 ($T_a = 25^\circ\text{C}$)

項 目	記 号	定 格	単 位
コレクタ・ベース間電圧	V_{CBO}	60	V
コレクタ・エミッタ間電圧	V_{CEO}	50	V
エミッタ・ベース間電圧	V_{EBO}	5	V
コレクタ電流	I_C	150	mA
ベース電流	I_B	50	mA
コレクタ損失	P_C	400	mW
接合温度	T_j	125	$^\circ\text{C}$
保存温度	T_{stg}	-55~125	$^\circ\text{C}$



注: 本製品の使用条件 (使用温度/電流/電圧等) が絶対最大定格以内での使用においても、高負荷 (高温および大電流/高電圧印加、多大な温度変化等) で連続して使用される場合は、信頼性が著しく低下するおそれがあります。弊社半導体信頼性ハンドブック (取り扱い上のご注意とお願いおよびディレーティングの考え方と方法) および個別信頼性情報 (信頼性試験レポート、推定故障率等) をご確認の上、適切な信頼性設計をお願いします。

電氣的特性 ($T_a = 25^\circ\text{C}$)

項 目	記 号	測 定 条 件	最 小	標 準	最 大	単 位
コレクタしや断電流	I_{CBO}	$V_{CB} = 60\text{ V}$, $I_E = 0$	—	—	0.1	μA
エミッタしや断電流	I_{EBO}	$V_{EB} = 5\text{ V}$, $I_C = 0$	—	—	0.1	μA
直 流 電 流 増 幅 率	$h_{FE}(1)$ (注)	$V_{CE} = 6\text{ V}$, $I_C = 2\text{ mA}$	70	—	700	
	$h_{FE}(2)$	$V_{CE} = 6\text{ V}$, $I_C = 150\text{ mA}$	25	100	—	
コレクタ・エミッタ間飽和電圧	$V_{CE(sat)}$	$I_C = 100\text{ mA}$, $I_B = 10\text{ mA}$	—	0.1	0.25	V
ベース・エミッタ間飽和電圧	$V_{BE(sat)}$	$I_C = 100\text{ mA}$, $I_B = 10\text{ mA}$	—	—	1.0	V
トランジション周波数	f_T	$V_{CE} = 10\text{ V}$, $I_C = 1\text{ mA}$	80	—	—	MHz
コレクタ出力容量	C_{ob}	$V_{CB} = 10\text{ V}$, $I_E = 0$, $f = 1\text{ MHz}$	—	2.0	3.5	pF
ベース拡がり抵抗	$r_{bb'}$	$V_{CE} = 10\text{ V}$, $I_E = -1\text{ mA}$, $f = 30\text{ MHz}$	—	50	—	Ω
雑 音 指 数	NF	$V_{CE} = 6\text{ V}$, $I_C = 0.1\text{ mA}$, $f = 1\text{ kHz}$, $R_G = 10\text{ k}\Omega$	—	1	10	dB

注: $h_{FE}(1)$ 分類 O: 70~140, Y: 120~240, GR: 200~400, BL: 350~700

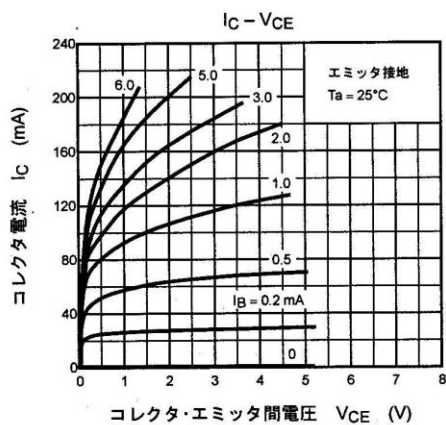


図 A-1

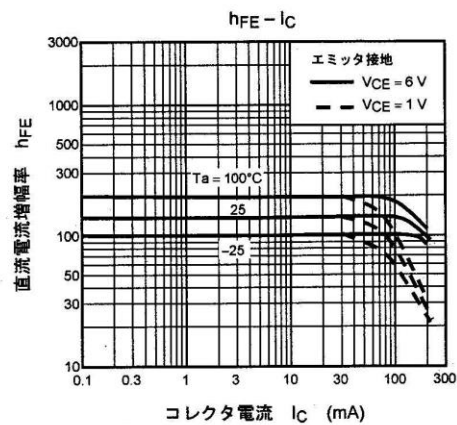


図 A-2

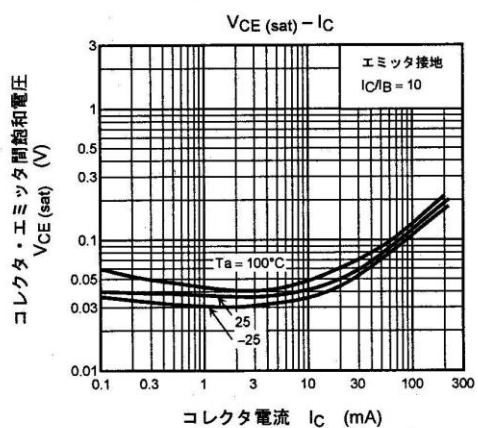


図 A-3

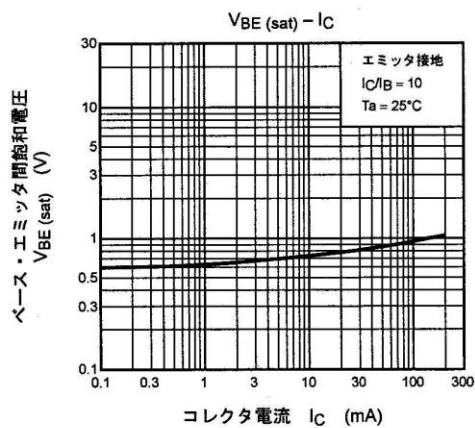


図 A-4

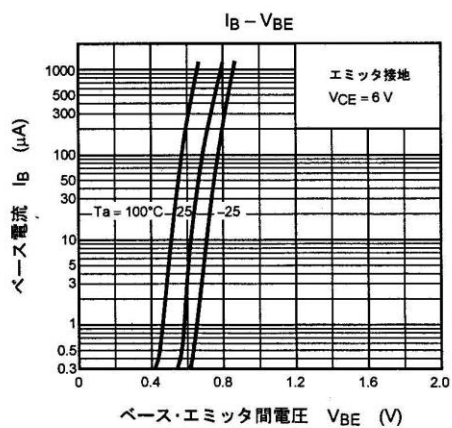


図 A-5

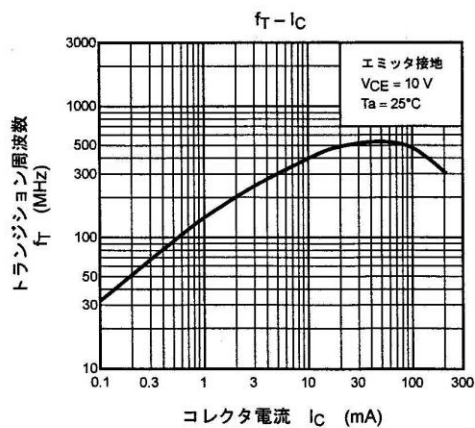


図 A-6

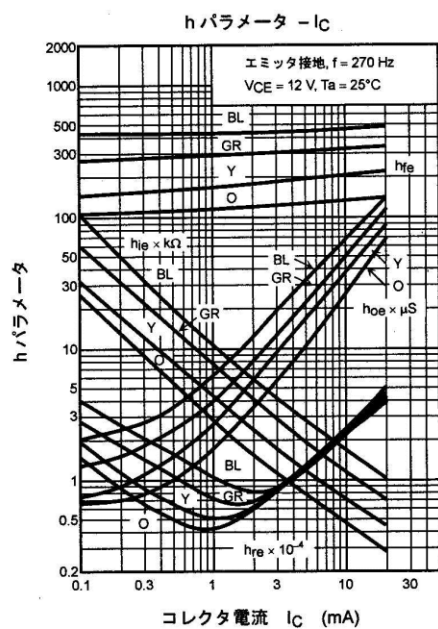


図 A-7

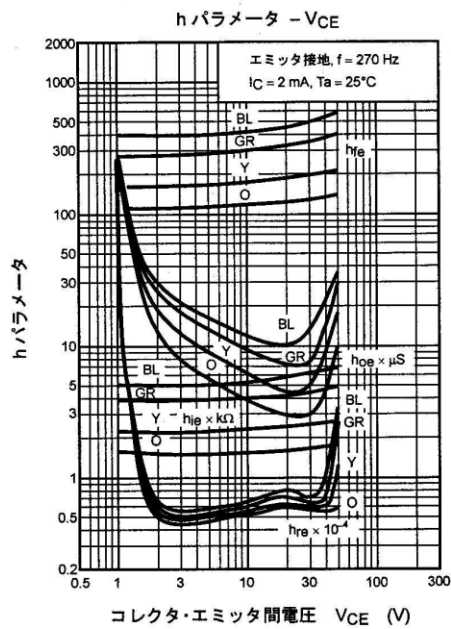


図 A-8

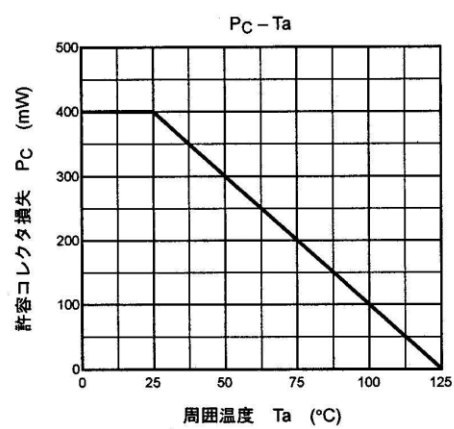


図 A-9