

Report on the Experiment

No. 6

Subject トランジスタ低周波増幅器の特性実験

Date 2020. 07. 16

Weather 晴れ Temp 27.9 °C Wet 62.3 %

Class	E4
Group	2
Chief	
Partner	井上 隆治
	重見 達也
	宮崎 拓也
	森 和哉

No	14
Name	小畠 一泰

Kure National College of Technology

1 目的

トランジスタによる RC 結合増幅器の特性試験を行い、実測値と計算値の比較を行い、トランジスタの諸特性を理解する。

2 理論

2.1 エミッタ接地自己バイアス回路

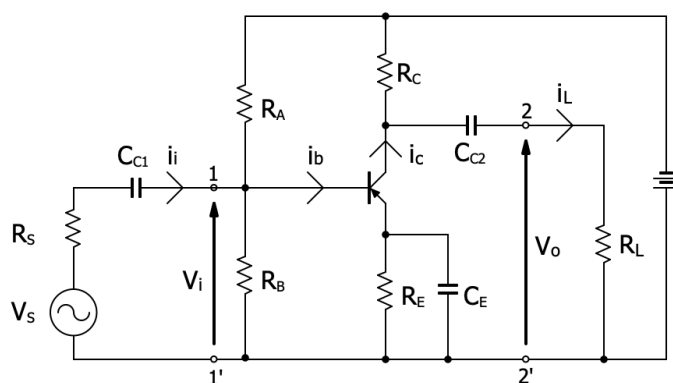


図 1: エミッタ接地自己バイアス回路-増幅回路

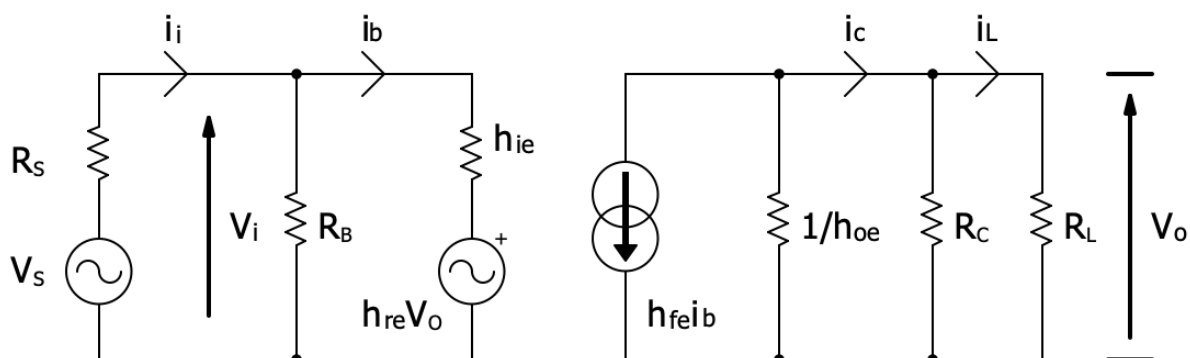


図 2: エミッタ接地自己バイアス回路-等価回路

1. 1-1' より見た入力インピーダンス Z'_i は

$$\begin{aligned} Z'_i &= \frac{Z_i R_{AB}}{Z_i + R_{AB}} \\ R_{AB} &= \frac{R_A R_B}{R_A + R_B} \\ Z_i &= \frac{\Delta h_e + h_{ie} Y_L}{h_{oe} + Y_L} \\ Y_L &= \frac{1}{Z_L} \end{aligned} \tag{1}$$

$$Z_L = R_C$$

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

2. 2-2' よりみた総合出力インピーダンス Z'_o は

$$\begin{aligned} Z'_o &= \frac{Z_o R_C}{Z_o + R_C} \\ Z_o &= \frac{h_{ie} + Z_s}{\Delta h_e + h_{oe} Z_s} \\ \frac{1}{Z_s} &= \frac{1}{R_s} + \frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B} \end{aligned} \quad (2)$$

3. 総合電流増幅率 A'_i は

$$\begin{aligned} A'_i &= \frac{i_L}{i_i} = \frac{i_b}{i_i} \cdot \frac{i_c}{i_b} \cdot \frac{i_L}{i_c} \\ \frac{i_b}{i_i} &= \frac{R_{AB}}{R_{AB} + Z_i} \\ \frac{i_c}{i_b} &= \frac{h_{fe} Y_L}{h_{oe} + Y_L} \\ \frac{i_L}{i_c} &\doteq 1 \end{aligned}$$

4. 総合電圧増幅率 A'_v は

$$A'_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{i_L R_C}{i_i Z'_i} = \frac{R_C}{Z'_i} A'_i$$

5. 総合増幅度

$$P = |A'_i \cdot A'_v|$$

2.2 コレクタ接地増幅回路

次のような回路はコレクタ接地増幅回路 (エミッタホロワー) といい, 負帰還の 100 % かつたものである. この回路の電圧増幅度は 1 より小さいが, 電流増幅度, 電力増幅度は 1 より大きい.

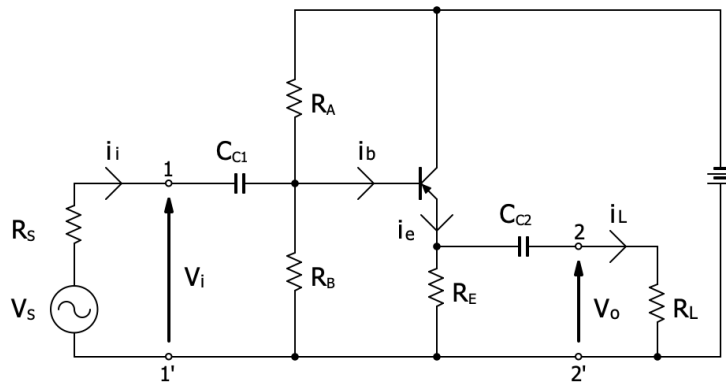


図 3: コレクタ接地増幅回路-増幅回路

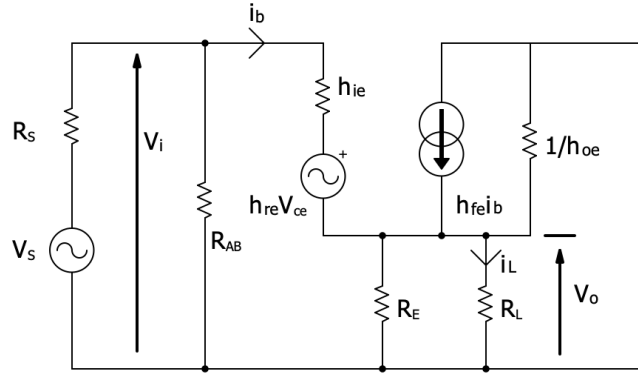


図 4: コレクタ接地増幅回路-等価回路

1. 1-1' よりみた入力インピーダンス Z'_i は

$$Z'_i = \frac{Z_i R_{AB}}{Z_i + R_{AB}}$$

ここで, R_{AB} は式 1 である.

$$Z_i = \frac{h_{ie} h_{oe} + (1 + h_{fe}) + h_{ie} Y_L}{h_{oe} + Y_L}$$

$$Y_L = \frac{1}{Z_L}$$

$$Z_L = R_E$$

2. 2-2' よりみた総合出力インピーダンス Z'_o は

$$Z'_o = \frac{Z_o R_E}{Z_o + R_E}$$

$$Z_o = \frac{h_{ie} + Z_s}{h_{ie} h_{oe} + 1 + h_{fe} + h_{oe} Z_s}$$

ここで $\frac{1}{Z_s}$ は式 2 であらわされる.

3. 総合電流増幅率 A'_i は

$$A'_i = \frac{i_L}{i_i} = \frac{i_b}{i_i} \cdot \frac{i_e}{i_b} \cdot \frac{i_L}{i_e}$$

$$\frac{i_b}{i_i} = \frac{R_{AB}}{R_{AB} + Z_i}$$

$$\frac{i_e}{i_b} = \frac{(1 + h_{fe}) Y_L}{h_{oe} + Y_L}$$

$$\frac{i_L}{i_e} \doteq 1$$

4. 総合電圧増幅率 A'_v は

$$A'_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{i_L R_E}{i_i Z'_i} = \frac{R_E}{Z'_i} A'_i$$

5. 総合増幅度

$$P = |A'_i \cdot A'_v|$$

3 実験機器

3.1 共通

1. OSC: Analog Discovery AWG1 端子
2. V_1, V_2 : Analog Discovery Scope Ch1, Ch2 端子
3. 電源: PR18-3A
4. TR: 2SB225
5. デジタルテスタ

3.2 エミッタ接地増幅器

1. 実験用プレート: エミッタ接地用

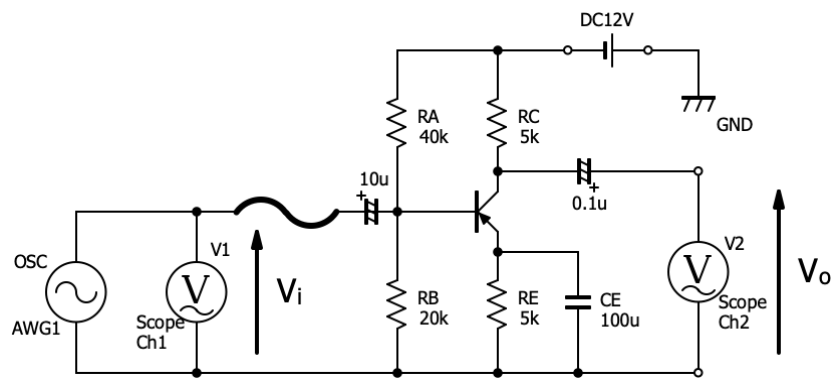


図 5: 電圧増幅度測定

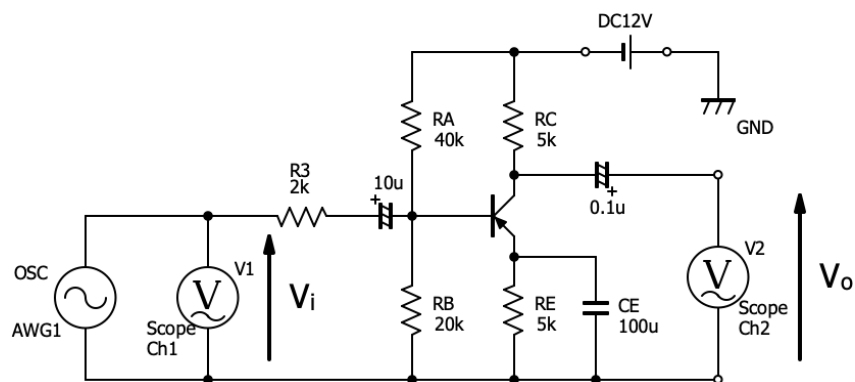


図 6: 入力インピーダンス測定

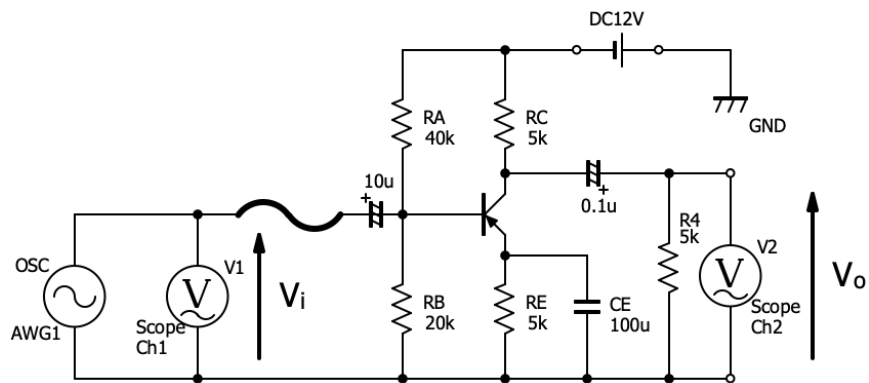


図 7: 出力インピーダンス測定

3.3 コレクタ接地増幅器

1. 実験用プレート: コレクタ接地用

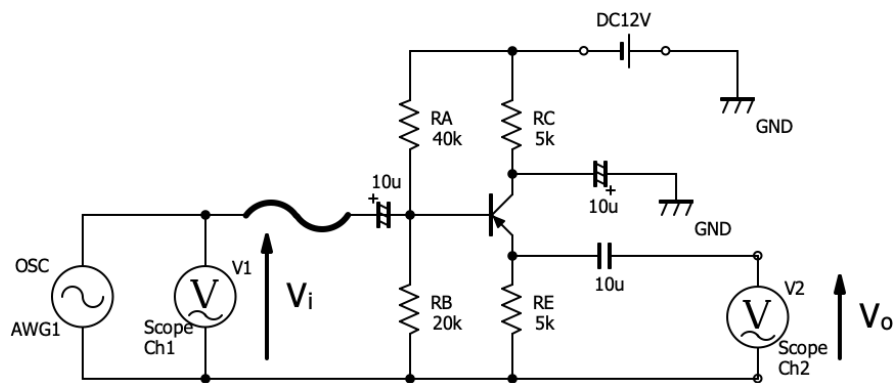


図 8: 電圧増幅度測定

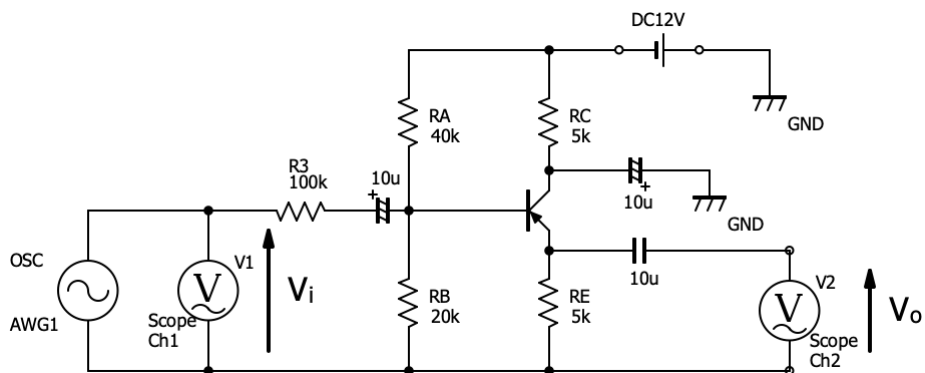


図 9: 入力インピーダンス測定

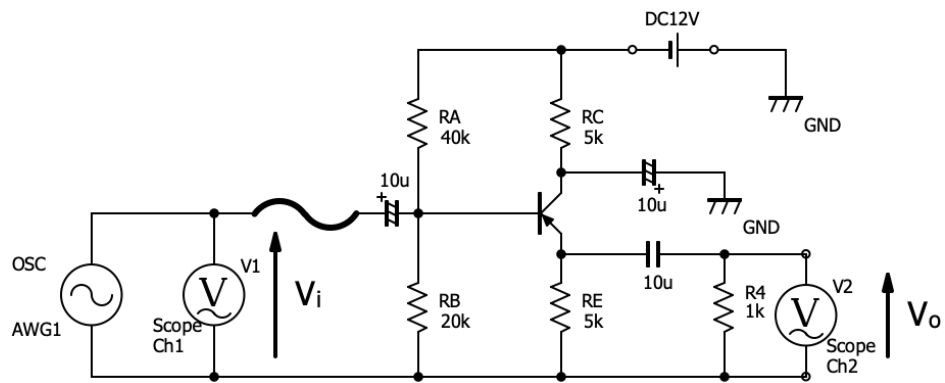


図 10: 出力インピーダンス測定

4 実験方法

4.1 エミッタ接地増幅器

1. 周波数特性と電圧増幅度の測定

Analog Discovery を USB ケーブルにて接続, Waveforms を起動後配線を行なった. その後各部バイアス電圧と電源電圧 12 [V] をデジタルテスタで測定した. v_i が 1.0 [V] 以下となるように v_o を調整し, Network Analyzer を用いて周波数特性を測定した. 縦軸 Gain は 0 – 60dB, 周波数を 20 [Hz] – 500 [kHz], 測定点数 200 点に変え測定した. 配線を変更せず, 周波数を 500 [Hz] – 2 [kHz], 測定点数を 20 点に変更して電圧増幅度を測定した. 測定データから 1 [kHz] を中心に測定点前後 5 点以上で平均を取り電圧増幅度 A_v とした.

2. 入力インピーダンスの測定

$R_3 = 0$ のときの電圧増幅度を A_v , R_3 をある値にした時のそれを A'_v とすれば,

$$Z'_i = \frac{A'_v}{A_v - A'_v} R_3, Z_i = \frac{Z'_i R_{AB}}{R_{AB} - Z'_i}$$

ここで R_{AB} は 13.3 [k Ω] である $R_3 = 2$ [k Ω] を挿入し, $f = 1$ [kHz] で A'_v を (1) と同様の手順で測定した. なお A_v は (1) で $f = 1$ [kHz] における値を使用した.

3. 出力インピーダンスの測定

$R_4 = \infty$ の場合の増幅度を A_v , R_4 をある値にした時のそれを A'_v とすれば

$$Z'_o = \frac{A_v - A'_v}{A'_v} R_4, Z_o = \frac{R_C Z'_o}{R_C - Z'_o}$$

4.2 コレクタ接地増幅器

1. 電圧増幅度の測定

コレクタ接地用実験プレートに変更後, 1) と同様に電圧増幅度 A_v を求めるように配線を行った. その後 1)-(1) と同様の手順で $f = 1$ [kHz] を中心とした A_v を測定した. ただし, 縦軸 Gain は –40 – +20dB に変更した.

2. 入力インピーダンスの測定

1)-(2) と同様に行った. $R_3 = 100$ [k Ω] とし, $Z'_i \cong 13.3$ [k Ω] になるはずである. このときの A_v は 2)-(1) で求めた値である.

3. 出力インピーダンスの測定

1)-(3) と同様に行う. v_o は歪の点で 0.3 [V] 以下で行い, $Z'_o \cong 40$ [Ω] になるはずである. このときの A_v は同上, $R_4 = 1$ [k Ω] とした.

5 結果のまとめと課題

5.1 エミッタ接地増幅器

1. 各部のバイアス

R_C [k Ω]	V_B [V]	V_E [V]	V_C [V]	I_e [mA]
5	8.38	3.58	8.15	0.716

2. 周波数特性の測定

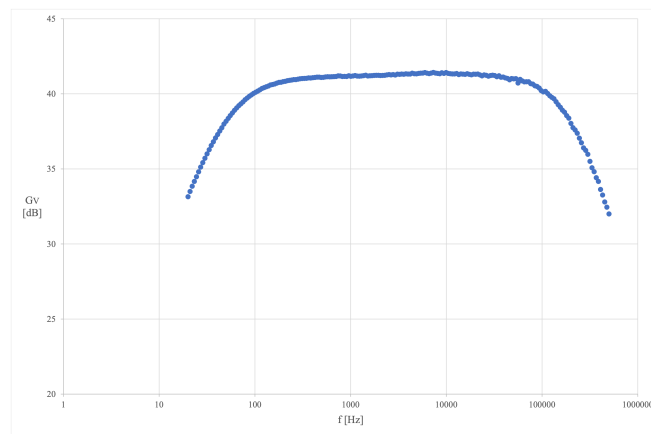


図 11: エミッタ接地増幅器における周波数特性

3. 入力インピーダンスの測定

$R_3 = 0$	$R_3 = 2$ [k Ω]
$A_v = 114.535$	$A'_v = 57.510$

$$Z'_i = 2016.975 \text{ } [\Omega], Z_i = 2377.533 \text{ } [\Omega]$$

4. 出力インピーダンスの測定

$R_4 = \infty$	$R_4 = 5$ [k Ω]
$A_v = 114.535$	$A'_v = 60.944$

$$Z'_o = 4396.819 \text{ } [\Omega], Z_o = 36446.936 \text{ } [\Omega]$$

5.2 コレクタ接地増幅器

1. 電圧増幅度の測定

$$A_v = 0.986$$

2. 入力インピーダンスの測定

$R_3 = 0$	$R_3 = 100 \text{ [k}\Omega\text{]}$
$A_v = 0.986$	$A'_v = 0.114$

$$Z'_i = 13025.087 \text{ } [\Omega], Z_i = 630140.556 \text{ } [\Omega]$$

3. 出力インピーダンスの測定

$R_4 = \infty$	$R_4 = 1 \text{ [k}\Omega\text{]}$
$A_v = 0.986$	$A'_v = 0.942$

$$Z'_o = 47.188 \text{ } [\Omega], Z_o = 47.638 \text{ } [\Omega]$$

6 考察及び検討

1. エミッタ接地, コレクタ接地の中域における A_v, Z_i, Z_o を適当な I_e に対して算出し, 実測値と比較せよ. 計算において h 定数は規格表 (表 7) のものを使う.

表 6: 測定結果

接地形式	$R_L \text{ [k}\Omega\text{]}$	$I_e \text{ [mA]}$	A_v (実測)	A_v (計算)	$Z_i \text{ } [\Omega]$ (実測)	$Z_i \text{ } [\Omega]$ (計算)	$Z_o \text{ } [\Omega]$ (実測)	$Z_o \text{ } [\Omega]$ (計算)
エミッタ	5	0.716	114.535	103.731	2016.975	1549.944	4396.819	3704.077
コレクタ	5	0.716	0.986	0.991	13025.087	12447.620	47.188	35.644

表 6 より測定値と計算値に大きなズレは認められず, トランジスタの性能誤差及び温度変化に起因するものであると考えられることから実験は成功であるといえる.

2. $V_{CE} - I_C$ 曲線上に $R_L - R_E = 5 \text{ [k}\Omega\text{]}$ の場合で, エミッタ接地増幅器の負荷線を引き, 図式的に増幅度を求め, 実測値と比較せよ.

負荷線を描いた図を別紙図 9.14 に示し, 図 9.13 および図 9.14 について考察していく.

動作点に注目すると,

$$V_{CE}|_{I_B=-10} = -5.6 \text{ [V]}$$

$$V_{CE}|_{I_B=-20} = -3.2 \text{ [V]}$$

V_{CE} の変化量=出力電圧 v_o だから

$$v_o = |-5.6 - (-3.2)| = 2.4 \text{ [V]}$$

また, V_{BE} の変化量=入力電圧 v_i だから

$$V_{BE}|_{I_B=-20} = -0.13 \text{ [V]}$$

$$V_{BE}|_{I_B=-10} = -0.11 \text{ [V]}$$

$$v_i = |-0.13 - (-0.11)| = 0.02$$

したがって電圧増幅度は,

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = 120$$

実測値 $A_v = 114.535$ であるが, この誤差は図式的に求めたことによるものであると考えられる.

3. 1)-(1) の実測値の周波数特性より求めた低域遮断周波数と, 計算より求めた値を比較検討せよ.

実測値より最大値から -3dB 周辺においては,

$$38.367\text{dB}$$

また, 計算値は

$$20 \log_{10}(103.731) = 40.318\text{dB}$$

誤差は 2dB ほどであることから実験における低域遮断周波数で遮断できているといえる.

4. 総合的考察

エミッタ接地回路の電圧利得は大きい, コレクタ接地回路はほぼ 1 となった. また入/出力インピーダンスに関してはエミッタ接地回路については低/高, コレクタ接地回路は高/低となった. これらのことから要求に応じた回路設計をする必要がある. また一部計算値と実測値で誤差が生まれたがこれらは各節で記したとおり, トランジスタの性能誤差や経年劣化による品質の低下などであると考え. 加えて, 表 7 は室温が 23°C であるが, 実験当日は 28°C と若干高く, このことから誤差が生まれたと考える.

7 研究

表 7: 負荷抵抗における h 定数 ($T_a = 23^\circ\text{C}$)

負荷抵抗 R_L [k Ω]	h_{ie} [k Ω]	h_{re} [$\times 10^{-6}$]	h_{fe}	h_{oe} [μS]
5	1.754	1.0	49.12	70.0