

1 実験の目的

【1 週目】トランジスタは基本的には、微小信号 (電流) を増幅する能動素子の 1 つであり、これを用いて増幅回路を構成できるが、トランジスタを動作させるにはバイアス回路が必要である。本実験テーマでは、固定バイアス法と電流帰還形バイアス法の 2 種類についてエミッタ接地増幅回路を作製して、その増幅特性を測定し理解を深める。

【2 週目】演算増幅器 (オペアンプ) はリニア IC の一つで、抵抗の接続方法により、反転増幅回路、非反転増幅回路を構成することができる。本実験テーマでは、オペアンプの動作について理解するとともに、反転、非反転増幅回路を作製し、その基本特性を理解する。

2 実験の理論または原理

2.1 固定バイアス回路

固定バイアス回路におけるバイアス条件であるベース電流 I_B とコレクタ・エミッタ間電圧 V_{CE} を以下に示す。

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$$

$$I_C = \beta I_B$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C = V_{CC} - \beta I_B R_C$$

2.2 電流帰還バイアス回路

$$I_1 = \frac{V_{CC} - V_{BE} - R_E I_E}{R_1} \quad (4)$$

$$I_2 = \frac{V_{BE} + R_E I_E}{R_2} \quad (5)$$

$$I_2 + I_B = I_1 \quad (6)$$

これらの関係を用いて、 I_C を導くと次の式が得られる。

$$I_C = \frac{\left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{CC} - V_{BE} \right)}{\left(\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{1}{\beta} + R_E \right)}$$

3 実験の結果と作業順序

3.1 固定バイアス回路

固定バイアス回路において電源電圧 $V_{CC} = 12V$ として $I_C = 2mA$, $V_{CE} = 6V$ に設定したい。
 T_R の β の値を実測して以下の値を計算した。

$$\beta = 156$$

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{2 * 10^{-3}}{156} = 12.82[uA]$$

$$R_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{I_B} = \frac{12 - 0.7}{12.82} = 882[k\Omega]$$

$$R_B = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{I_C} = \frac{12 - 6}{2 * 10^{-3}} = 3[k\Omega]$$

求めた R_B と R_C の値から実際に使用する抵抗値に近いものを選択した。

$$R_B = 820k + 51k = 881k\Omega$$

$$R_B = 2.99k\Omega$$

設定した抵抗を用いてブレッドボード上に回路を組む。そしてテスターを用いて設計値と比較する。

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C} = \frac{12 - 5.97}{2.99} = 2.017mA$$

$$V_{CE} = 6.02V$$

3.2 電流帰還バイアス回路

電流帰還バイアス回路において電源電圧 $V_{CC} = 12V$ として $I_C = 2mA$, $V_{CE} = 5V$ に設定したい。
 T_R の β の値を実測して以下の値を計算した。

$$R_E = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{I_C} - R_C = \frac{12 - 5}{2 * 10^{-3}} - 3 * 10^3 = 500[\Omega]$$

$$R_1 = \frac{V_{CC} - V_{BE} - R_E I_E}{I_1} = \frac{V_{CC} - V_{BE} - R_E I_C}{I_1} = \frac{12 - 0.7 - 500 \times 2 \times 10^{-3}}{0.2 \times 10^{-3}} = 51.5 \text{ k}\Omega$$

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{2 \times 10^{-3}}{156} = 12.8 \mu\text{A}$$

$$R_2 = \frac{V_{BE} + R_E I_E}{I_2} = \frac{0.7 + 500 \times 2 \times 10^{-3}}{0.2 \times 10^{-3} - 12.8 \times 10^{-6}} = 9.08 \text{ k}\Omega$$

$$\beta = 156$$

$$R_1 = 51.5 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 9.08 \text{ k}\Omega$$

$$R_E = 500 \Omega$$

上記の実測値から以下の抵抗を設計した。

$$R_1 = 52 \text{ k}\Omega (= 51 \text{ k}\Omega + 1 \text{ k}\Omega)$$

$$R_2 = 9.1 \text{ k}\Omega$$

$$R_E = 500 \Omega$$

設計した抵抗値を用いて回路を組み I_C と V_{CE} の値をデジタルテスターを用いて計測し設計値と比較した。

$$I_C = \frac{V_{RC}}{R_C} = \frac{5.82}{3.2 \text{ k}} = 1.82 \text{ mA}$$

3.3 固定バイアスによるエミッタ接地増幅回路

固定バイアスによるエミッタ接地増幅回路で使用する抵抗値を以下の式を用いて求めた。

$$R_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{I_B} = \frac{12 - 0.7}{12.8 \times 10^{-6}} = 881.4 \text{ k}\Omega$$

入力電圧 $V_1 = 29.4 \text{ [mV}_{p-p}]$ 、周波数 $f = 1.04 \text{ [kHz]}$ に設定して出力電圧を測定し電圧増幅度と電圧利得を求めた。

$$\text{出力電圧 } V_2 = 5.00 \text{ [V}_{p-p}]$$

$$\text{電圧増幅度 } A_v = \frac{V_2}{V_1} = \frac{5.00}{29.4} = 171.2 []$$

$$\text{電圧利得 } G_v = 20 \log |A_v| = 20 \log |171.2| = 44.7 \text{ dB}$$

3.4 電流帰還バイアスによるエミッタ接地増幅回路

電流帰還バイアスによるエミッタ接地増幅回路において入力電圧 $V_1 = 29.5[mV_{p-p}]$, 周波数 990Hz に設定して出力電圧を測定する。その値を用いて電圧増幅度と電圧利得を求めた。

出力電圧 $V_2 = 3.01[V_{p-p}]$ 電圧増幅度 $A_v = 104$ 倍電圧利得 $G_v = 20\log|104| = 40.3 \text{ dB}$

1. ** 電流帰還バイアス回路における IC の導出 **

$$I_C = \frac{R_2 V_C C - (R_1 + R_2) V_B E}{R_1 R_E + R_2 R_E + \frac{R_1 R_2}{\beta}}$$

2. ** エミッタ接地増幅器の電圧増幅度 A_v の導出 ** エミッタ接地増幅器の電圧増幅度 A_v は、等価回路から導き出されます。入力電圧 V_1 に対する出力電圧 V_2 の比率として、 A_v は以下の式で表されます。

$$A_v = \frac{V_2}{V_1} = -\frac{h_{fe}}{h_{ie}} R_L$$

3. ** トランジスタ交換時の IC の変化率の比較 ** 固定バイアス回路と電流帰還バイアス回路で、トランジスタの特性のバラツキ（ β が 50 増加）による IC の変化を比較します。固定バイアス回路では IC は β の変化に比例して約 50 増加しました。一方、電流帰還バイアス回路では IC はわずかに 3.4

4. ** 結合コンデンサと側路コンデンサの役割と影響 ** 結合コンデンサは交流信号を通過させ、直流成分を遮断する役割を持ち、異なる動作電圧範囲を持つブロック間で交流信号を伝送する際に使用されます。結合コンデンサがない場合、直流成分が信号に乗ってしまい、信号が変質するリスクがあります。

側路コンデンサは、エミッタ抵抗による電圧降下を交流信号に対して無効化する役割を果たします。これがないと、出力端子の動作電圧範囲が狭まり、増幅度が低下します。また、側路コンデンサがないと、特に低周波数での増幅度が大きく低下することが確認できます。

3.5 反転直流増幅回路の入出力特性の測定

ブレッドボード上に反転直流増幅回路を作成する。 $R_1 = R_2 = R_3 = 10[k\Omega]$ として回路を作成する。直流入力電圧を $+0.6V$ として抵抗 R_2 を変化し E_0 直流電圧増幅度を求めた。反転直流増幅回路において、仮想接地が理論だけでなく実験でも確認され、理論値計算にも活用可能であることがわかった。

表1 Your Table Caption

R2[k Ω]	理論値 A_v	測定値 A_v	Eo[V]	Ei[V]	vcc+[V]	vcc-[-V]
10.05	-1.00	-0.59	-0.3	0.508	15.04	15.03
20.09	-2.00	-1.95	-0.992	0.508		
29.75	-2.96	-2.91	-1.48	0.508		
38.87	-3.87	-3.80	-1.93	0.508		
56.2	-5.59	-5.47	-2.78	0.508		
60.7	-6.04	-5.93	-3.01	0.508		
67.4	-6.71	-6.61	-3.36	0.508	15.04	15.03
80.9	-8.05	-7.89	-4.01	0.508		
89.5	-8.91	-8.76	-4.45	0.508		
99.6	-9.91	-9.72	-4.94	0.508		

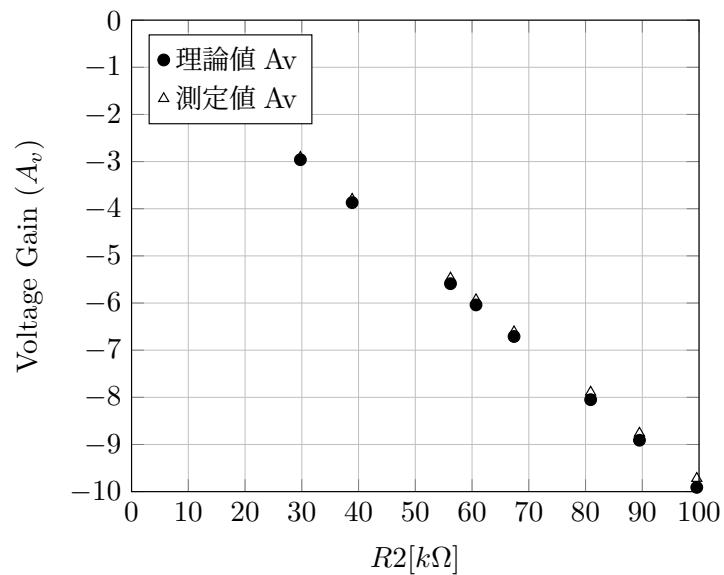


図1 Voltage Gain vs. R2

抵抗 R2 を 50 [k Ω] 程度に設定し、直流入力電圧 Ei を - 4 [V] ~ + 4 [V] まで変化させ、直流出力電圧 Eo を測定する。直流入力電圧 Ei が 0 から 4[V] までの範囲では、直流電圧増幅度 A_v は比例的に増幅されるが、Ei=2.5[V] で電源 ± 15 [V] に飽和する。一方、0 から -4[V] までの範囲では、Ei=-2.5[V] で飽和する。正と負の Ei のバイアスを変えると、飽和する Ei の値が異なる。

表2 Your table caption

$R2[k\Omega]$	理論値 A_v	測定値 A_v	$E_o[V]$	$E_i[V]$	$v_{cc} + [V]$	$v_{cc} - [V]$
56.2	-5.59	-3.34	-13.3	3.98	15.04	15.03
56.2	-5.59	-3.80	-13.3	3.5		
56.2	-5.59	-4.38	-13.3	3.04		
56.2	-5.59	-5.34	-13.3	2.49		
56.2	-5.59	-5.56	-11	1.98		
56.2	-5.59	-5.54	-8.36	1.51		
56.2	-5.59	-5.57	-5.54	0.994	15.04	15.03
56.2	-5.59	-5.57	-2.79	0.501		
56.2	-5.59	-5.69	-1.12	0.197		
56.2	-5.59	-5.61	1.15	-0.205		
56.2	-5.59	-5.63	2.82	-0.501		
56.2	-5.59	-5.64	5.64	-1		
56.2	-5.59	-5.61	8.42	-1.5		
56.2	-5.59	-5.63	11.2	-1.99		
56.2	-5.59	-5.58	13.9	-2.49		
56.2	-5.59	-4.70	14	-2.98		
56.2	-5.59	-3.99	14	-3.51		
56.2	-5.59	-3.51	14	-3.99		

3.6 非反転直流増幅回路の入出力特性の測定

直流入力電圧を $+0.5[V]$ として、抵抗 $R2$ を $10\sim100[k\Omega]$ と変化させて直流出力電圧 E_o を測定し、直流電圧増幅度 A_v を求める。また、測定値と理論値と比較する。非反転直流増幅回路において、仮想接地が理論だけでなく実験でも確認され、理論値計算にも活用可能であることがわかった。

抵抗 $R2$ を $50[k]$ 程度に設定し、直流入力電圧 E_i を $-4[V] \sim +4[V]$ まで変化させ、直流出力電圧 E_o を測定する。

4 実験の考察およびまとめ

5 参考文献

表3 Experimental Data

$R2[k\Omega]$	理論値 A_v	測定値 A_v	$E_o[V]$	$E_i[V]$
10.05	2.01	2.02	1.01	0.5
20.18	3.01	3.01	1.51	0.501
30.25	4.03	4.03	2.02	0.501
38.89	4.89	5.07	2.54	0.501
56.1	6.61	6.61	3.31	0.501
66.1	7.61	7.60	3.81	0.501
76.4	8.64	8.62	4.32	0.501
86.5	9.65	9.62	4.82	0.501
95.2	10.52	10.48	5.25	0.501
99.6	10.96	10.94	5.48	0.501

表4 実験データ

$R2[k\Omega]$	理論値 A_v	測定値 A_v	$E_o[V]$	$E_i[V]$
56.2	6.62	3.48	13.9	3.99
56.2	6.59	3.97	13.9	3.50
56.2	6.62	4.62	13.9	3.01
56.2	6.62	5.52	13.9	2.52
56.2	6.62	6.57	13.2	2.01
56.2	6.62	6.59	9.88	1.50
56.2	6.62	6.59	6.56	1.00
56.2	6.62	6.61	3.29	0.50
56.2	6.62	6.47	1.3	0.20
56.2	6.62	6.56	-1.28	-0.20
56.2	6.62	6.56	-3.19	-0.49
56.2	6.62	6.62	-6.62	-1.00
56.2	6.62	6.60	-9.83	-1.49
56.2	6.62	6.60	-13.2	-2.00
56.2	6.62	5.32	-13.3	-2.50
56.2	6.62	4.43	-13.3	-3.00
56.2	6.62	3.80	-13.3	-3.50
56.2	6.62	3.33	-13.3	-3.99