

1 実験目的

トランジスタの静特性の測定, バイアス回路の電圧の測定, 周波数特性の測定を通してトランジスタ増幅回路の動作を確認し, トランジスタの増幅回路の仕組みを学び理解する.

2 原理

2.1 トランジスタの静特性

トランジスタは P 型半導体と N 型半導体と呼ばれる半導体の接触面の PN 接合を 3 層に組み合わせており各層にエミッタ, ベース, コレクタの 3 つの端子を持つ. P にはホールと呼ばれるプラス電荷があり N には自由電荷があるため半導体は P から N への向きへ電流が流れ逆には流れない. NPN 型トランジスタにエミッタ接地方式で電圧をかけたときの図を (2.1) に示す. BE 間にはダイオードと同様順方向電圧 V_{BE} がかけられており, V_{CE} がかかっていないとき, E 側の自由電子は B 端子に流れ込み電流 I_B となる. CE 間に V_{CE} をかけると E 側に存在していた自由電子は中間の P 層を越えて C 端子に到達する. この電子の流れが電流 I_C であり, I_C の量は V_{CE} が印加されていればその電圧の大小よりも I_b によって増減する.

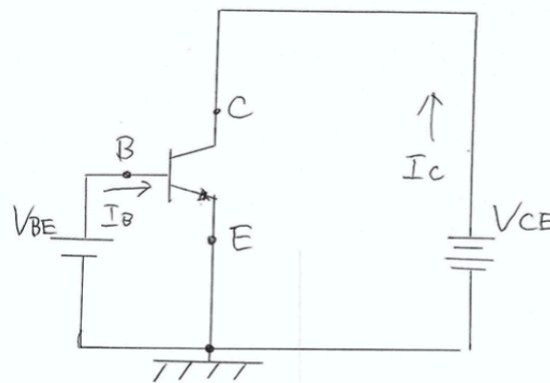


図 1: NPN 型トランジスタにエミッタ接地方式で電圧をかけたときの図

I_C の電流の最大値は V_{CE} , 出力を取り出すための負荷抵抗で決まり, 加える I_B はわずかになる. よって I_B により I_C を増幅されることが確認できる. このときの I_C/I_B は電流増幅率と呼び hFE と表される. このように各端子にかけられた直流バイアスのいずれかを変化させ測定したものの特性を静特性とよぶ.

2.2 バイアス回路の確認

静特性は I_C-V_{CE} , I_C-I_B , I_B-V_{BE} , $V_{BE}-V_{CE}$ が連動しており, I_B, V_{BE} が決まれば I_C, V_{CE} が定まらなっている. これを利用してバイアス点を定め交流信号を加える.

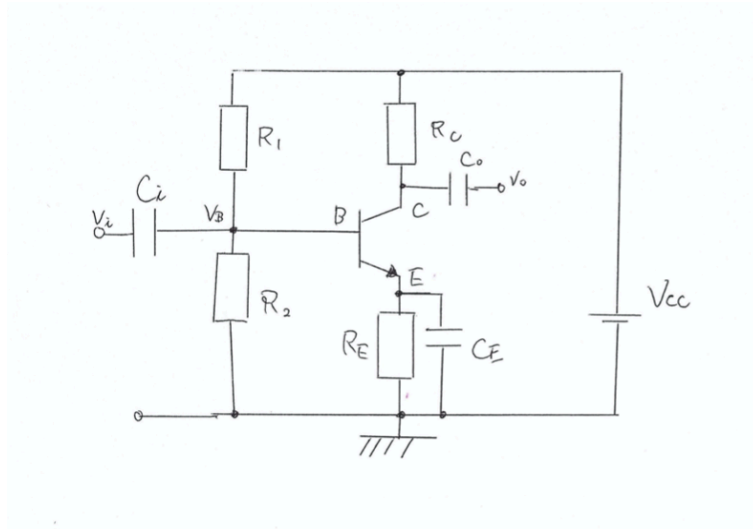


図 2: バイアス増幅回路の図

(2.2) のように抵抗によって各所の直流電圧電流比率を一定に保つ構成の回路を電流帰還バイアス回路という。これにはエミッタ抵抗 R_E が存在することでコレクタ電流の温度による上昇に対し負帰還作用を持ち R_1, R_2 によってベース電位 V_B が一定に保たれるという特徴がある。 C_E は高い増幅率を得るため交流信号に対する負帰還をさける目的で接続されている。 C_i, C_o はこの増幅回路とは別の前後の回路システムに交流信号のみ伝えるためのバイパスコンデンサである。増幅度は C_E がない場合

$$|A_V| = \frac{R_C}{R_E} \quad (1)$$

増幅周波数帯での増幅度

$$|A_V| = \frac{h_e R_C}{h_{ie}} \quad (2)$$

となる。

2.3 周波数特性の測定

アナログ回路では信号の状態を解析するために等価回路モデルが用いられ、電子回路のような非線形な特性をもつ素子であっても、インピーダンスをもつ素子と理想の電流源を組み合わせ、回路の状態を計算で求めることができるように部品が接続されている。電流帰還バイアス増幅回路の交流信号に着目した小信号等価回路を解析して、入出力電圧の比から電圧増幅度を求めると

$$|A_V| = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-(h_{fe} R_C)(1 + j\omega C_E R_E)}{h_{ie} + R_E(1 + h_{ie}) + j\omega C_E R_E h_{ie}} \quad (3)$$

となり、絶対値をとると電圧利得の理論式となり、有利化して実部、虚部の比率をとると位相差の理論値になる。

3 実験方法

3.1 トランジスタの静特性

NPN型バイポーラトランジスタ 2SC1815-Yの静特性を測定する. トランジスタ 2SC1815-Y, $R_B=100k\Omega$, $C_{po}=1000pF$ を回路基板に取り付ける. 直流可変電源とデジタルマルチメーターを (3.1) のように回路基板につなぐ.

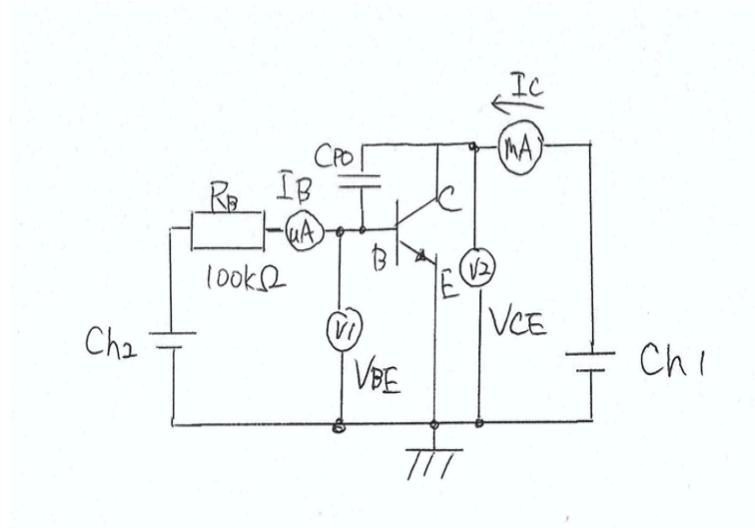


図 3: 電流帰還バイアス回路の測定点

まず I_B-V_{BE} 特性, I_C-I_B 特性について測定する. Ch1 を調整し, V_{CE} が 4V になるように設定する. 測定中は常に 4V になるように調整する. 次に I_C-V_{CE} 特性を測定する. I_B を $10\mu A$ になるように 2Ch を調整する. 次に Ch1 を調整し, $V_{CE}=0\sim 12V$ の間で変化させ, I_C を記録する. その間 I_B は一定の $10\mu A$ になるよう調整する. 同様に $20, 30\mu A$ も測定する.

3.2 バイアス回路の確認

トランジスタの静特性の実験で測定した結果からバイアス回路を [1] の (3) を参考に設計し実装する. トランジスタの静特性の結果 (4.1) より, $20\mu A$ あたりは $I_C=3.039, I_B=20.059$ となるので

$$h_{FE} = \frac{3.039}{20.059 \times 10^{-3}} = 151.5[mA] \quad (4)$$

同様に (4.1) より, $I_{C2}=4.854, I_{B2}=31.932, I_{C1}=1.691, I_{B1}=11.210$ となり

$$h_{fe} = \frac{4.854 - 1.691}{31.932 - 11.210 \times 10^{-3}} = 152.6[mA] \quad (5)$$

となる. つづいて h_{ie} を求める. A_V は [1] の表 2.1 より 150, R_C は [1] の (2.5) と表 2.1 より $2.2k\Omega$, h_{fe} は (5) で求めたので, [1] の (2.6) より

$$h_{ie} = \frac{150 \times 2200}{150} = 2238.13[mA] \quad (6)$$

[1] の (2.7) より, $I_{B2}=31.932, I_{B1}=11.210, V_{BE2}=0.704, V_{BE1}=0.678$ となり

$$h_{ie} = \frac{0.704 - 0.678}{31.932 - 11.210 \times 10^{-3}} = 1254.71[mA] \quad (7)$$

$V_{CCE} = 7.44 [V]$ I_C 座標軸上のバイアス点 I_{CQ} を求める.

$$I_{CQ} = \frac{V_1 - V_2}{R_C} = 1.69[mA] \quad (8)$$

I_B 座標軸上のバイアス点 I_{BQ} を求める.

$$I_{BQ} = 11.08[\mu A] \quad (9)$$

$V_{CC} = V_1 = 12[V]$ V_E は $V_{CC}-V_{CCE}$ より $4.56[V]$

$$R_E = \frac{V_E}{I_{CQ}} = 2698.2[\Omega] \quad (10)$$

$$R_1 + R_2 = \frac{V_{CC}}{10/times I_{BQ}} = 108.3 \times 10^3[\Omega] \quad (11)$$

$$V_B = V_E - V_{BEQ} = 4.56 + 0.678 = 5.238[V] \quad (12)$$

$$R_2 = (R_1 + R_2) \frac{V_B}{V_{CC}} = 47.1 \times 10^3[\Omega] \quad (13)$$

$$R_1 = 61.2 \times 10^3[\Omega] \quad (14)$$

$$C_E \geq 54.64[nF] \quad (15)$$

$$C_i \geq 0.53[nF] \quad (16)$$

$$C_0 \geq 0.36[nF] \quad (17)$$

がそれぞれ導き出されたので R_1 に $67k \Omega, R_2$ に $46k \Omega$ の抵抗を選んで取り付けた. 実測値はそれぞれ $67.8352k \Omega, 46.8978k \Omega$ だった. コンデンサは C_E は $1mF$ のものを, C_i を $100nF$ のものを直列接続した. 実測値はそれぞれ $960.6754nF, 95.2922 \mu F$ となった. これをもとにバイアス回路を実装し, 直流可変電源を $12V$ になるように流す. $V_1 V_3$ と V_B を測定し, それぞれの電圧と電流値を算出する.

3.3 周波数特性の測定

実装したバイアス回路に直流可変電源を V_{CC} の位置へ接続する. Sig 位置に交流電源として BA 信号線, 基盤の GND 位置に直流可変電源の GND と BA の GND 線をつなぐ. オシロスコープの CH1 を減衰率を 1 倍にして v_i 位置に, CH2 を減衰率 10 倍にして v_o 位置に接続する. オシロスコープは入力結合を AC とする. ファンクションジェネレータの出力の設定を sin 波, 26mVpp, 1kHz にし, バッファアンプの電源を入れる. 直流可変電源を 12V に設定し V_{CC} として, 直流電圧をかける. ファンクションジェネレータを出力し, オシロスコープの v_i, v_o を記録し, 利得を求めグラフを作成する. 同様に周波数を 100kHz から 100Hz まで測定する. 各周波数においてオシロスコープで δt を記録する. 位相差を求めグラフにする.

4 結果

4.1 トランジスタの静特性

$I_C - V_{CE}$ 特性, $I_C - I_B$ 特性, $I_B - V_{BE}$ 特性の測定データをそれぞれ表とグラフで示す.

表 1: V_{CE} が 4V のときの $I_C - I_B, I_B - V_{BE}$ 特性

$I_B[\mu A]$	$I_C[mA]$	$V_{BE}[V]$	$V_{CE}[V]$
17	0	0	0
0.000	0.000	0.001	4.001
0.020	0.000	0.298	4.001
0.250	0.030	0.570	3.998
2.603	0.382	0.640	3.962
5.405	0.806	0.660	3.918
8.293	1.245	0.670	3.873
11.210	1.691	0.678	4.020
14.157	2.139	0.683	3.981
17.106	2.589	0.688	3.935
20.059	3.039	0.692	3.889
23.020	3.490	0.696	3.943
25.988	3.944	0.699	3.896
28.959	4.398	0.701	3.850
31.932	4.854	0.704	4.003
34.909	5.328	0.706	4.486
37.887	5.774	0.708	3.986
40.869	6.231	0.709	3.984

表 2: I_B が 30[μ A] のときの I_C - V_{CE} 特性

IB[μ A]	IC[mA]	VCE[V]
30.020	0.018	0.005
30.059	1.088	0.089
29.834	2.616	0.133
29.726	3.970	0.194
29.714	4.390	0.351
29.708	4.410	0.549
29.712	4.433	1.147
29.714	4.446	1.545
29.722	4.474	2.542
29.727	4.503	3.539
29.740	4.547	5.534
29.755	4.604	7.528
29.780	4.653	9.522
29.808	4.704	11.518
29.822	4.732	12.015

表 3: I_B が 20[μ A] のときの I_C - V_{CE} 特性

IB[μ A]	IC[mA]	VCE[V]
20.094	0.0015	0.003
19.242	0.962	0.102
20.000	2.351	0.160
19.956	2.951	0.299
19.952	2.964	0.497
19.953	2.971	0.696
19.956	2.975	0.896
19.956	2.983	1.295
19.958	2.988	1.494
19.960	2.992	1.694
19.962	3.006	2.693
19.970	3.034	4.689
19.991	3.068	6.686
20.006	3.105	9.681
20.029	3.137	11.678
20.034	3.145	12.070

表 4: I_B が 10[μ A] のときの I_C - V_{CE} 特性

IB[μ A]	IC[mA]	VCE[V]
10.387	0.0085	0.002
10.361	0.2338	0.077
10.0725	0.767	0.122
9.944	1.274	0.171
9.912	1.456	0.252
9.912	1.468	0.351
9.912	1.47	0.45
9.912	1.471	0.55
9.913	1.472	0.65
9.912	1.474	0.75
10.234	1.522	0.845
10.235	1.529	1.844
10.236	1.535	2.843
10.239	1.541	3.843
10.242	1.547	4.842
10.245	1.552	5.841
10.25	1.559	6.84
10.255	1.564	7.84
10.26	1.57	8.83
10.262	1.574	9.838
10.264	1.579	10.838
10.267	1.584	11.838
10.252	1.584	12.056

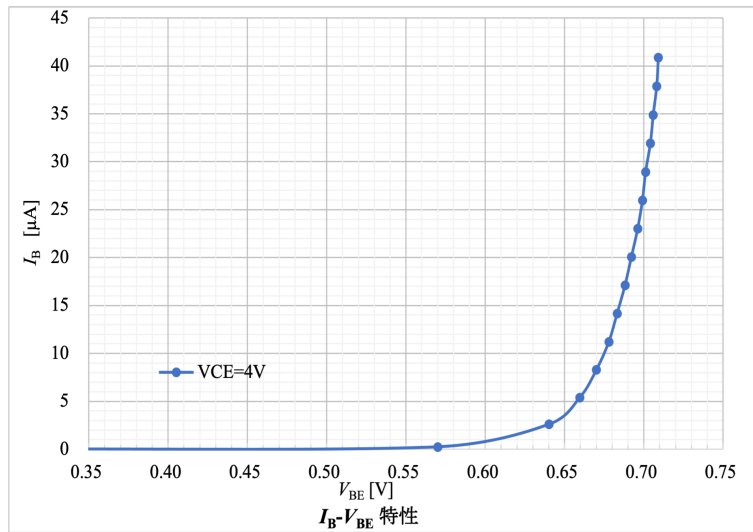


図 4: V_{CE} が 4V のときの $I_B - V_{BE}$ 特性

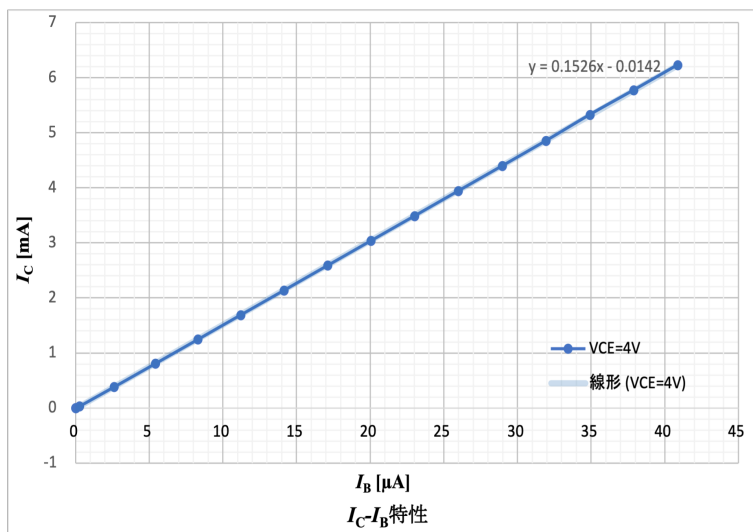


図 5: V_{CE} が 4V のときの $I_C - I_B$ 特性

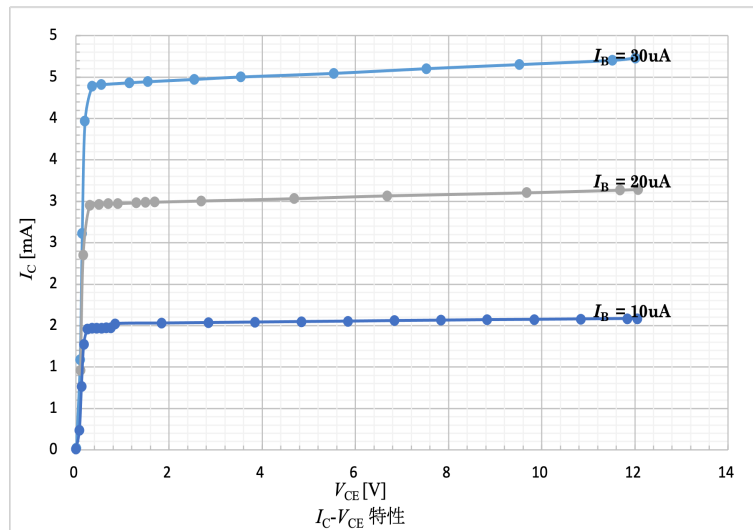


図 6: I_B が $10[\mu A]$, $20[\mu A]$, $30[\mu A]$ のときの $I_C - V_{CE}$ 特性

4.2 バイアス回路の確認

実装したバイアス回路の実測値を測定し, 設計時の値と比較する.

表 5: バイアス回路の設計時の値と実測値

	設計時の値	実測値	差分
V1	12V	12V	0V
V2	8.23V	8.775V	0.495V
V3	4.56V	3.98V	-0.58V
VCEQ	3.72V	4.795V	1.075V
VB	5.238	4.633	-0.605
ICQ	1.69mA	1.46mA	-0.23mA
IBQ	11.08 μA	9.548 μA	-1.532 μA
IEQ	1.69mA	1.49mA	-0.22mA

4.3 周波数特性の測定

周波数特性の測定結果を表に示す.

表 6: 周波数特性の測定

	vi=15mVpp と するための FG 出力値	実効値 (RMS)		実測利得	vi 基準の vo との 時間差	実測位相差
f [Hz]	Fgout [mVpp]	vi[mV]	vo[V]	—Av— [dB]	Δt [us]	ϕ [deg.]
100	17.7	5.3	0.448	38.62	-3840	-138.24
200	16.3	5.3	0.54	40.29	-2110	-151.92
500	15.0	5.2	0.577	40.95	-906.0	-163.08
1000	14.7	5.1	0.59	41.12	-463.0	-166.68
2000	14.6	5.2	0.588	41.13	-235.0	-169.2
5000	14.4	5.1	0.583	41.16	-95.00	-171
10000	14.4	5.1	0.583	41.16	-48.15	-173.34
20000	14.5	5.1	0.587	41.15	-24.00	-172.8
50000	14.4	5.1	0.585	41.19	-9.50	-171
100000	14.4	5.1	0.59	41.22	-4.800	-172.8
200000	14.4	5.1	0.59	41.27	-2.400	-172.8

次に理論利得を示す.

表 7: 理論利得と理論位相差

FG 出力値	理論利得	理論位相差
f [Hz]	—Av— [dB]	ϕ [deg.]
100	39.85197898	-131.487869
200	42.27675197	-150.3866871
500	43.29704887	-167.1728582
1000	43.46454058	-173.503682
2000	43.5074427	-176.7411955
5000	43.51953164	-178.6952769
10000	43.52126138	-179.3475525
20000	43.52169393	-179.6737655
50000	43.52181505	-179.869505
100000	43.52183235	-179.9347524
200000	43.52183668	-179.9673762

それぞれの利得と位相差を周波数を横軸にグラフ化すると以下ようになった.

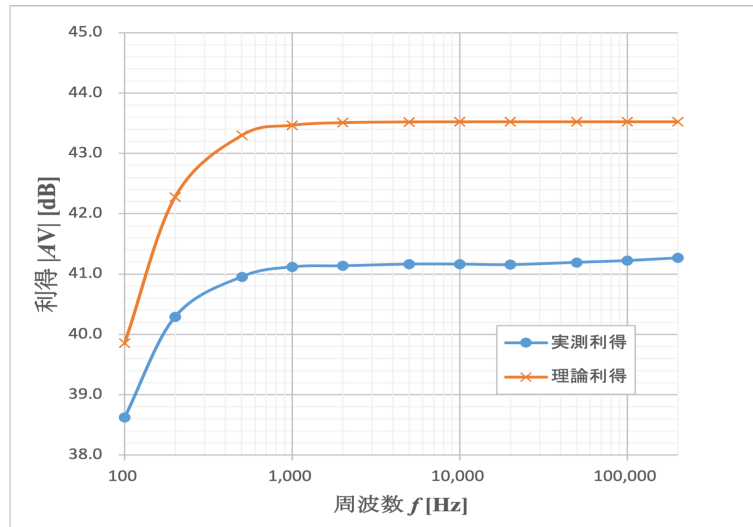


図 7: 利得の理想値と実測値のグラフ

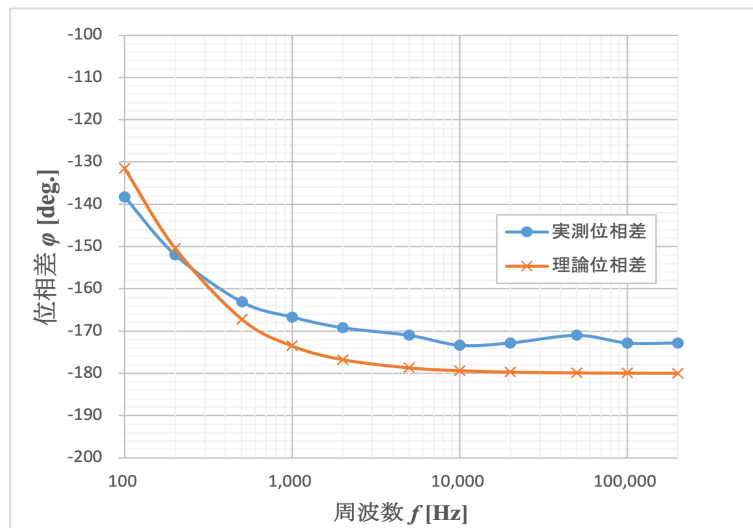


図 8: 理論位相差と実測位相差のグラフ

5 考察

5.1 (1) $I_C - V_{CE}$ 特性結果において主なパラメータとその影響についての確認できたことを説明する

V_{CE} を 4V に固定したときの測定結果図 4 を見る。 I_B の値は V_{BE} を 0.55V に変化させたとき、 I_B はほとんど変化せず、0mA である。0.55V を過ぎたあたりから I_B が上昇し始める。よって閾値が 0.55V あたりであると考えられる。次に V_{CE} が 4V のときの $I_C - I_B$ 特性である図 5 を確認す

る。 $I_C - I_B$ は比例することがわかる。よって I_B が変化すると I_C にも変化があることがわかる。次に I_B を固定し、 $I_C - V_{CE}$ 特性結果である図 6 を確認すると、 I_B が $10\mu\text{A}$, $20\mu\text{A}$, $30\mu\text{A}$ のときもそれぞれある一定の V_{CE} の値を超えると 2mA , 3.5mA , 5mA の値でほとんど一定になっている。よって $I_C - I_B$, $I_C - V_{CE}$, $I_B - V_{BE}$, $V_{CE} - V_{BE}$ が連動しており、 I_B と V_{BE} の値が決まれば I_C と V_{CE} の値も決まることが確認できる。

5.2 (2) バイアス回路の理論値と実測値を比較しその結果の報告

設計したバイアス回路の理論値と実測値である表 5 をみて理論値と実測値を比較する。 V_1 は電源電圧なので同等になる。 V_2 の値は多少多く、 V_3 の値は多少少なくなっている。これは R_1 , R_2 に設定した抵抗がそれぞれ近い値のものをつかったために変化したものであると考えられる。この結果によってそれぞれ V_2 , V_3 が関連するものの実測値と理論値に誤差が出ている。

5.3 (4) 実験 3 の測定結果から増幅度 150 倍 ± 10%, 増幅周波数 1kHz 以上と なっているかを確認した結果を述べる。

図 7: 利得の理想値と実測値のグラフを確認すると、グラフの形は似通ったものになっているが全体的に値が低くなっている。増幅度 150 倍 (43.5dB) の ± 10% であるかどうか確認すると 41dB あたりを推移しているため設計の範囲内であることがわかる。また 1kHz 以上で利得の上昇が止まっているため増幅周波数 1kHz 以上となっているのを確認できる。よって仕様通りに実装できたことが確認できる。増幅度 10% 未満だが差がでたのは実験 2 の誤差からくるものと考えられる。

6 まとめ

NPN 型のバイポーラトランジスタによるエミッタ接地電流帰還増幅回路を作成し、信号が増幅されるのを確認した。またバイアス回路の設計をし、トランジスタの増幅作用について検証した。

参考文献

[1] 電気通信大学『アナログ回路実験』2023 年, p10~15