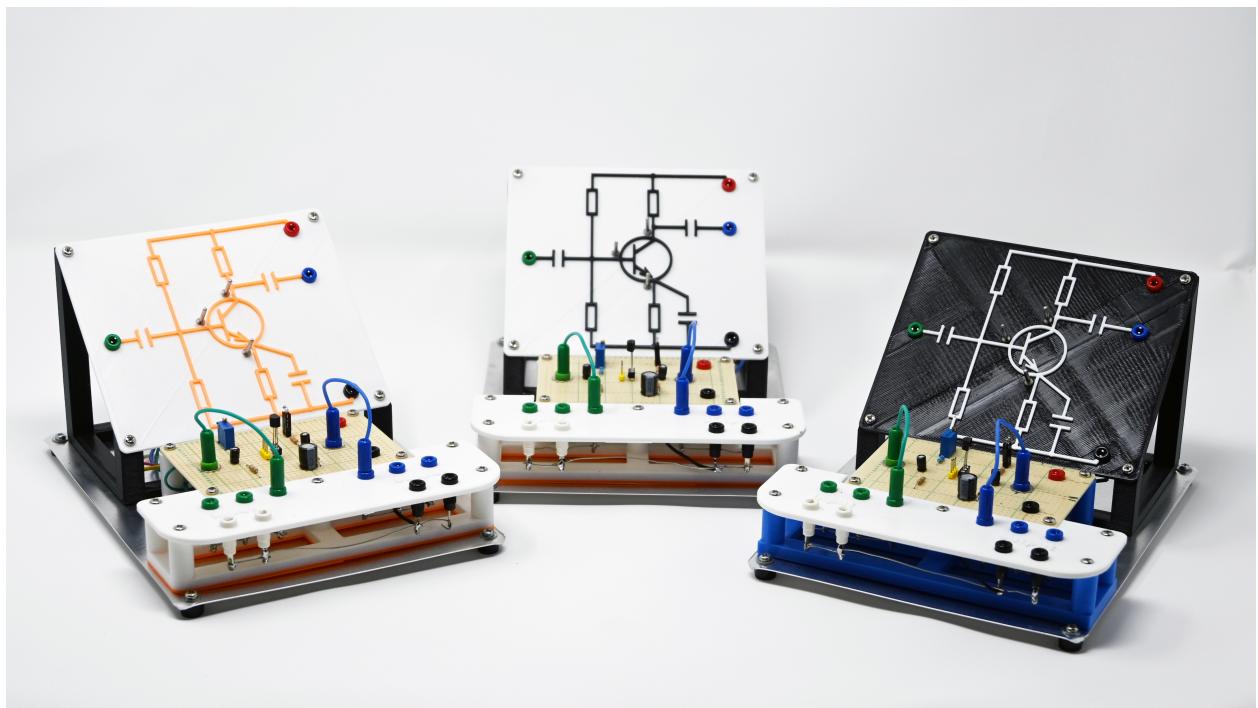


2023 年

夏休みの自由研究（してみた）



2023 年 9 月 23 日

S.Matoike

目次

第Ⅰ部 調査	3
第1章 トランジスタによる小信号增幅回路	4
1.1 製作・実験 ①：静特性	4
1.1.1 出力特性： $V_{CE} - I_C$ (I_B 一定)：第1象限	4
2SC1815Orange	5
2SC1815Yellow	5
2SC1815GReen	6
2SC1815BLue	6
1.1.2 $I_B - I_C$ 特性 ($V_{CE} = 5V$ 一定)：第2象限	9
2SC1815Orange	10
2SC1815Yellow	10
2SC1815GReen	10
2SC1815BLue	10
1.1.3 入力特性 $V_{BE} - I_B$ ($V_{CE} = 5V$ 一定)：第3象限	12
2SC1815Orange	13
2SC1815Yellow	13
2SC1815GReen	13
2SC1815BLue	13
1.1.4 直流負荷線 ($E_C = 9V$, $R_C = 390\Omega$)：第1象限	15
2SC1815Orange	16
2SC1815Yellow	16
2SC1815GReen	16
2SC1815BLue	16
1.2 製作・実験 ②：周波数特性	22
1.2.1 電流帰還バイアス回路設計の手順	22
1.2.2 教科書の回路モデルの製作	23
1.2.3 LTspice によるシミュレーション	23
1.2.4 実測データ：2SC1815Y	28
1.2.5 代替トランジスタ	37
2SC1815Orange	39

2SC1815Yellow	41
2SC1815GReen	43
2SC1815BLue	45
1.3 プログラム	47
1.3.1 主プログラム	47
1.3.2 静特性	48
1.3.3 静特性用データ	51
1.3.4 周波数特性	53
1.3.5 周波数特性用データ	55
1.3.6 データ補間	56
1.3.7 表示可能フォントの確認	57
第Ⅱ部 実習のための配布資料	58
第2章 トランジスタの静特性	59
2.1 実習の目的	59
2.2 使用する機器	59
2.3 実習	59
2.3.1 実習装置について調べる	60
2.3.2 出力特性： $V_{CE} - I_C$ (I_B 一定)：第1象限グラフ	61
2.3.3 $I_B - I_C$ 特性 ($V_{CE} = 5V$ 一定)：第2象限グラフ	63
2.3.4 入力特性 $V_{BE} - I_B$ ($V_{CE} = 5V$ 一定)：第3象限グラフ	65
2.3.5 直流負荷線 ($E_C = 9V$, $R_C = 390\Omega$)：第1象限グラフ	67
第3章 低周波增幅回路	69
3.1 実習の目的	69
3.2 使用する機器	69
3.3 実習	69
3.3.1 回路定数の設計	70
3.3.2 実習装置について調べる	71
3.3.3 入出力特性を測定する	73
3.3.4 周波数特性を測定する	77
謝辞	83
参考文献	83

第Ⅰ部

調査

第1章

トランジスタによる小信号増幅回路

1.1 製作・実験 ①：静特性

1.1.1 出力特性： $V_{CE} - I_C$ (I_B 一定)：第1象限

$V_{CE} - I_C$ 特性は出力特性とも呼ばれ、ベース電流 I_B 一定の状態で、コレクタ-エミッタ間の電圧 V_{CE} を変化させた時、コレクタ電流 I_C がどの様な変化をするかを示すもの

実験の手順は次の通り

- (1) $V_{CE} = 0.2V$ にする（直流電源装置 E_C を調節して）
- (2) $I_B = 20 \mu A$ にする（直流電源装置 E_B 及び半固定抵抗器 VR を調節して）
- (3) $V_{CE} = 0.2V$ を確認し、調整して、この時のコレクタ電流 I_C を測定し、記録する
- (4) $I_B = 20 \mu A$ のまま、 V_{CE} を $0.4 \sim 10.0V$ に変えて、その都度 I_C を測定して記録する
- (5) $V_{CE} = 0.2V$ に戻し、 I_B を $40, 60, 80 \mu A$ と変えて、それぞれの場合に上の手順 4 を実施する

測定を終えたら、横軸にコレクタ-エミッタ間の電圧 V_{CE} 、縦軸にコレクタ電流 I_C をとって、第1象限のグラフを作図する

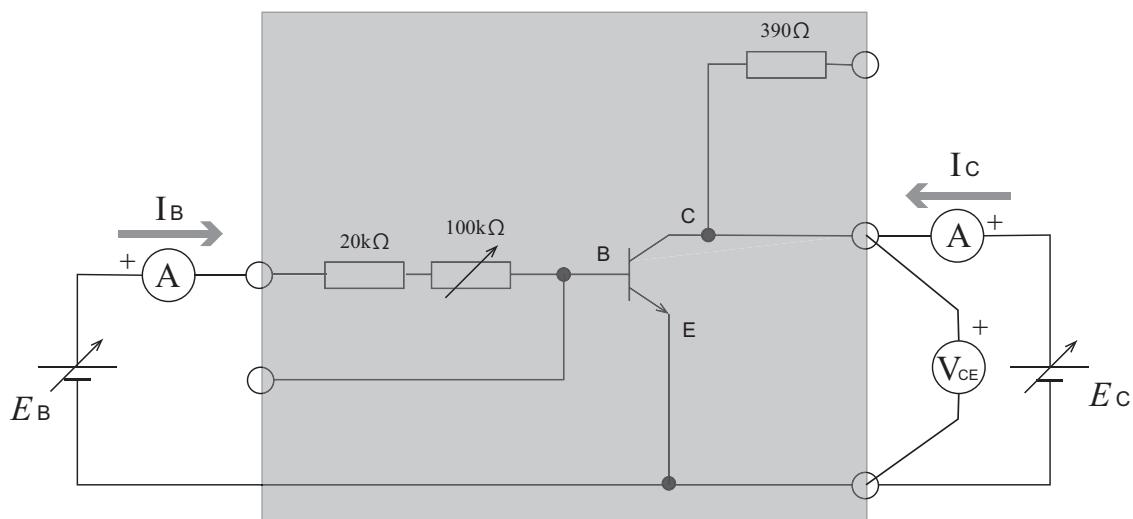


図 1.1 出力特性 $V_{CE} - I_C$ (I_B 一定)

2SC1815Orange

表 1.1 2SC1815O : V_{CE} – I_C 特性 : I_B 一定

V_{CE} [V]	コレクタ電流 I_C [mA] (2SC1815O)			
	$I_B = 20\mu A$	$I_B = 40\mu A$	$I_B = 60\mu A$	$I_B = 80\mu A$
0.2	2.251	4.282	6.240	7.971
0.4	2.398	4.755	7.033	9.165
0.6	2.402	4.771	7.108	9.424
0.8	2.404	4.781	7.127	9.464
1.0	2.408	4.791	7.143	9.495
2.0	2.419	4.830	7.207	9.624
5.0	2.448	4.924	7.397	9.943
8.0	2.477	5.011	7.585	10.240
10.0	2.495	5.057	7.700	10.430

2SC1815Yellow

表 1.2 2SC1815Y : V_{CE} – I_C 特性 : I_B 一定

V_{CE} [V]	コレクタ電流 I_C [mA] (2SC1815Y)			
	$I_B = 20\mu A$	$I_B = 40\mu A$	$I_B = 60\mu A$	$I_B = 80\mu A$
0.2	3.275	6.255	8.841	11.16
0.4	3.526	6.961	10.20	12.98
0.6	3.537	7.016	10.45	13.60
0.8	3.545	7.047	10.52	13.79
1.0	3.553	7.068	10.63	13.90
2.0	3.600	7.189	10.88	14.32
5.0	3.698	7.550	11.65	15.54
8.0	3.811	7.900	12.42	16.88
10.0	3.879	8.148	13.06	17.79

2SC1815GRen

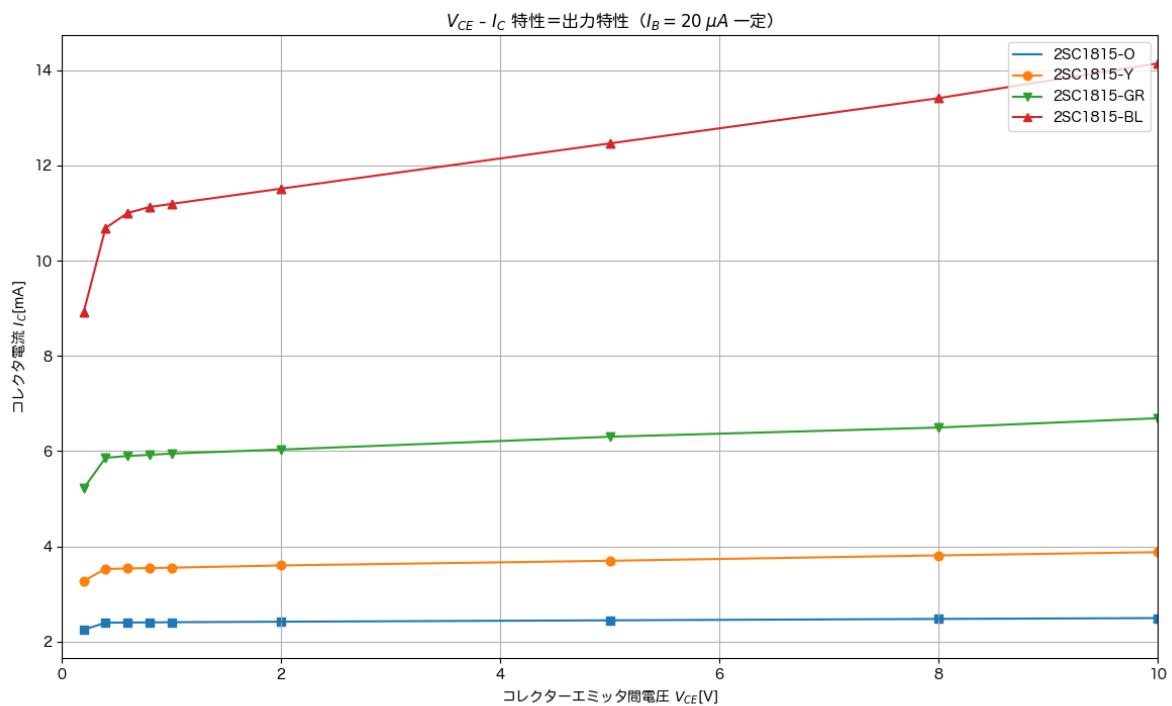
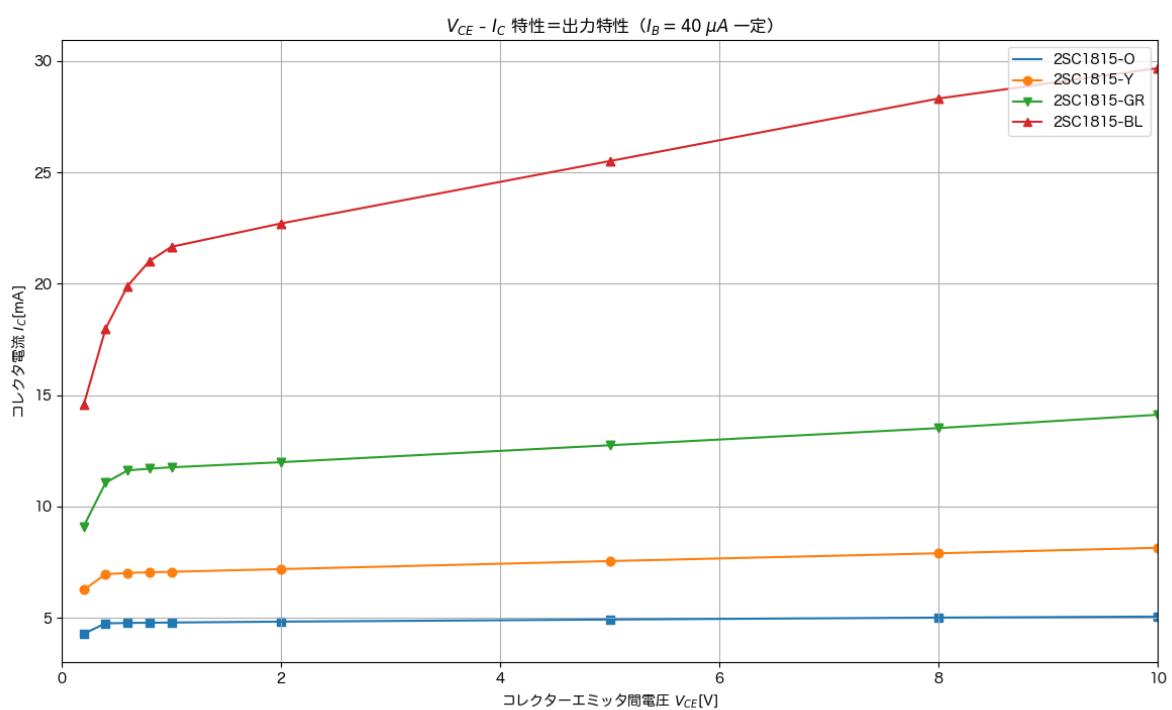
表 1.3 2SC1815GR : V_{CE} – I_C 特性 : I_B 一定

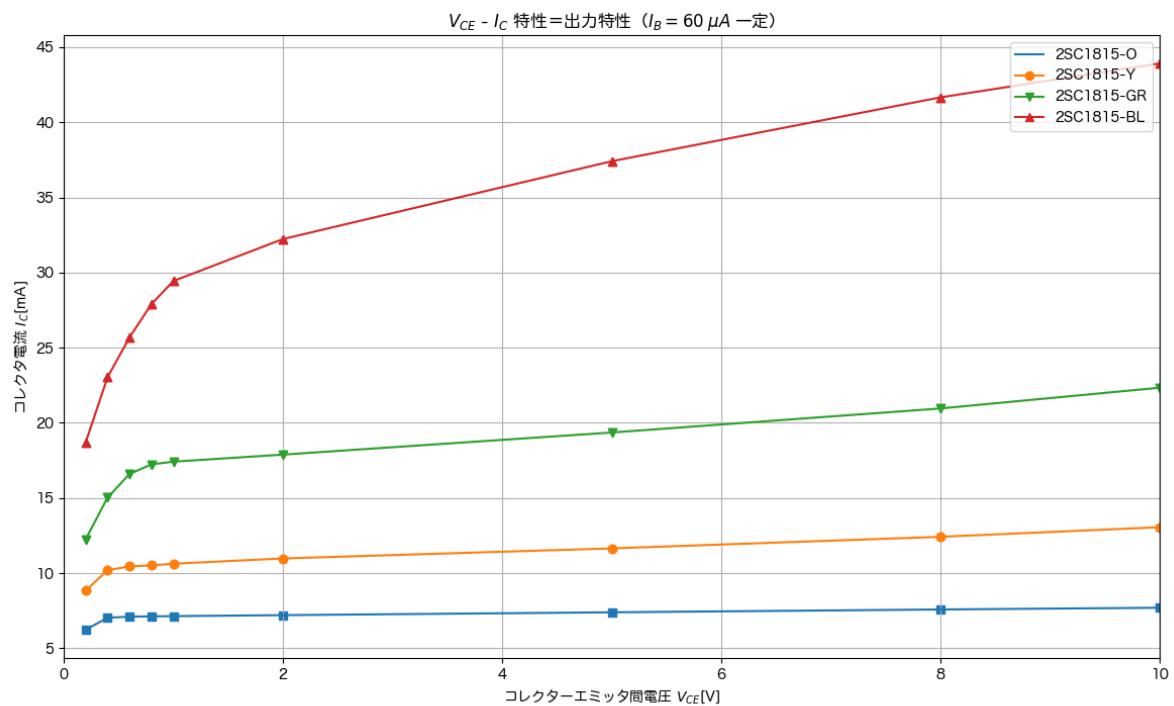
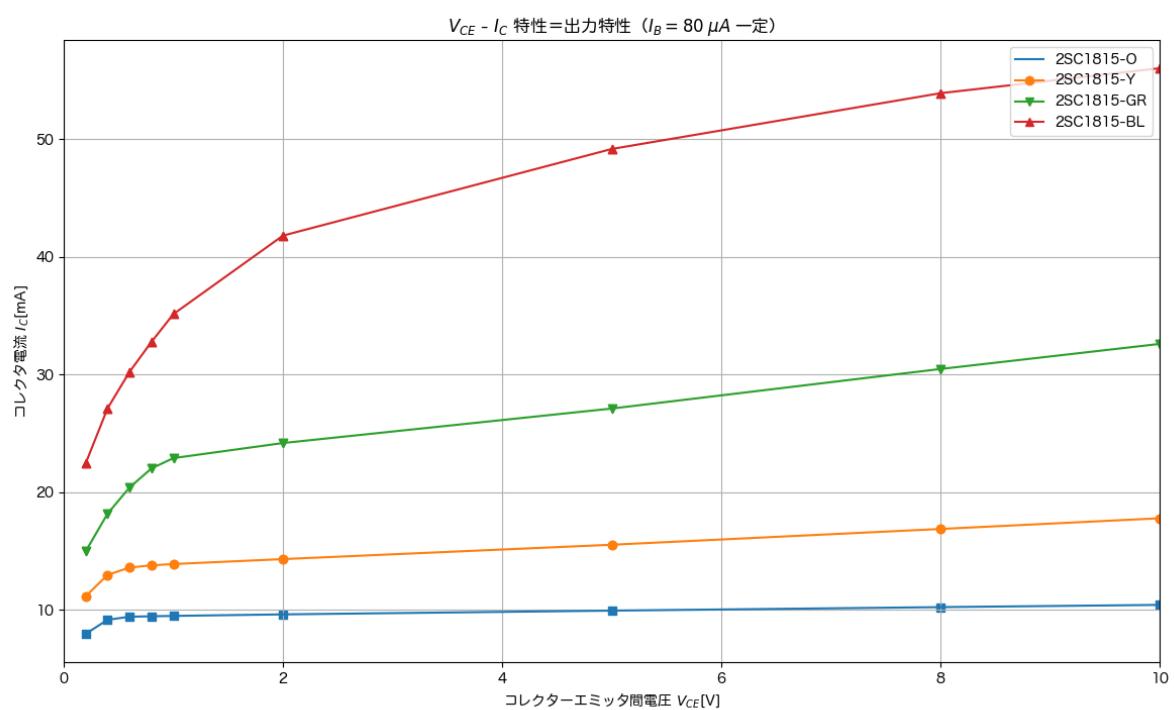
V_{CE} [V]	コレクタ電流 I_C [mA] (2SC1815GR)			
	$I_B = 20\mu A$	$I_B = 40\mu A$	$I_B = 60\mu A$	$I_B = 80\mu A$
0.2	5.218	9.108	12.26	14.98
0.4	5.860	11.068	15.03	18.18
0.6	5.898	11.62	16.60	20.40
0.8	5.922	11.70	17.24	22.02
1.0	5.948	11.76	17.42	22.90
2.0	6.033	11.99	17.89	24.18
5.0	6.302	12.75	19.36	27.11
8.0	6.495	13.52	20.96	30.47
10.0	6.691	14.12	22.34	32.60

2SC1815BLue

表 1.4 2SC1815BL : V_{CE} – I_C 特性 : I_B 一定

V_{CE} [V]	コレクタ電流 I_C [mA] (2SC1815BL)			
	$I_B = 20\mu A$	$I_B = 40\mu A$	$I_B = 60\mu A$	$I_B = 80\mu A$
0.2	8.919	14.56	18.70	22.45
0.4	10.684	17.98	23.04	27.13
0.6	10.998	19.90	25.69	30.22
0.8	11.124	21.02	27.90	32.77
1.0	11.19	21.66	29.44	35.13
2.0	11.51	22.71	32.23	41.80
5.0	12.46	25.51	37.41	49.16
8.0	13.41	28.32	41.66	53.90
10.0	14.14	29.68	43.92	56.02

図 1.2 $I_B = 20 \mu A$ 図 1.3 $I_B = 40 \mu A$

図 1.4 $I_B = 60 \mu A$ 図 1.5 $I_B = 80 \mu A$

1.1.2 $I_B - I_C$ 特性 ($V_{CE} = 5V$ 一定) : 第2象限

$I_B - I_C$ 特性は、コレクタ-エミッタ間の電圧 V_{CE} を一定にした状態で、ベース電流 I_B を変化させた時に、コレクタ電流 I_C がどの様に変化するかを示すもの

この特性の傾き I_C/I_B は、直流電流増幅率 h_{FE} と呼ばれる

実験の手順は次の通り

- (1) $V_{CE} = 5V$ となるように E_C を調整し、測定中はこの値を維持する
- (2) E_B (と必要に応じて可変抵抗器) を調整して、ベース電流 I_B を $0 \sim 80 \mu A$ まで $10 \mu A$ ずつ変化させ、その都度コレクタ電流 I_C を測定して記録する

測定を終えたら、横軸にベース電流 I_B 、縦軸にコレクタ電流 I_C をとって、第2象限のグラフを作図し、直流電流増幅率を求める

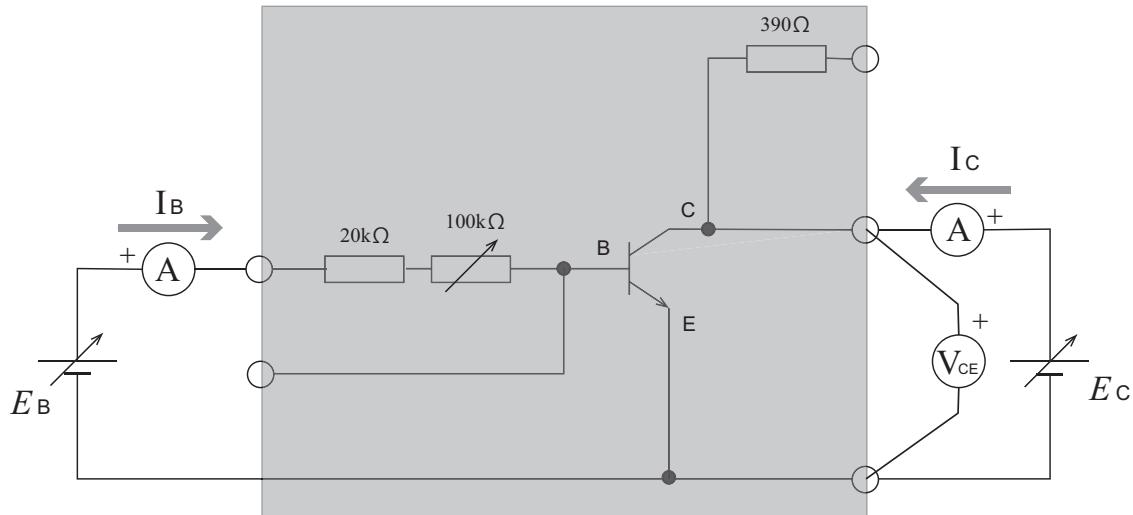


図 1.6 $I_B - I_C$ 特性 ($V_{CE} = 5V$ 一定)

2SC1815Orange

表 1.5 2SC1815O : $I_B - I_C$ 特性 : $V_{CE} = 5V$ 一定

$I_B[\mu\text{A}]$	0	10	20	30	40	50	60	70	80
$I_C[\text{mA}]$	0	1.229	2.457	3.691	4.924	6.179	7.427	8.689	9.958

2SC1815Yellow

表 1.6 2SC1815Y : $I_B - I_C$ 特性 : $V_{CE} = 5V$ 一定

$I_B[\mu\text{A}]$	0	10	20	30	40	50	60	70	80
$I_C[\text{mA}]$	0	1.814	3.679	5.565	7.505	9.453	11.44	13.49	15.50

2SC1815GRreen

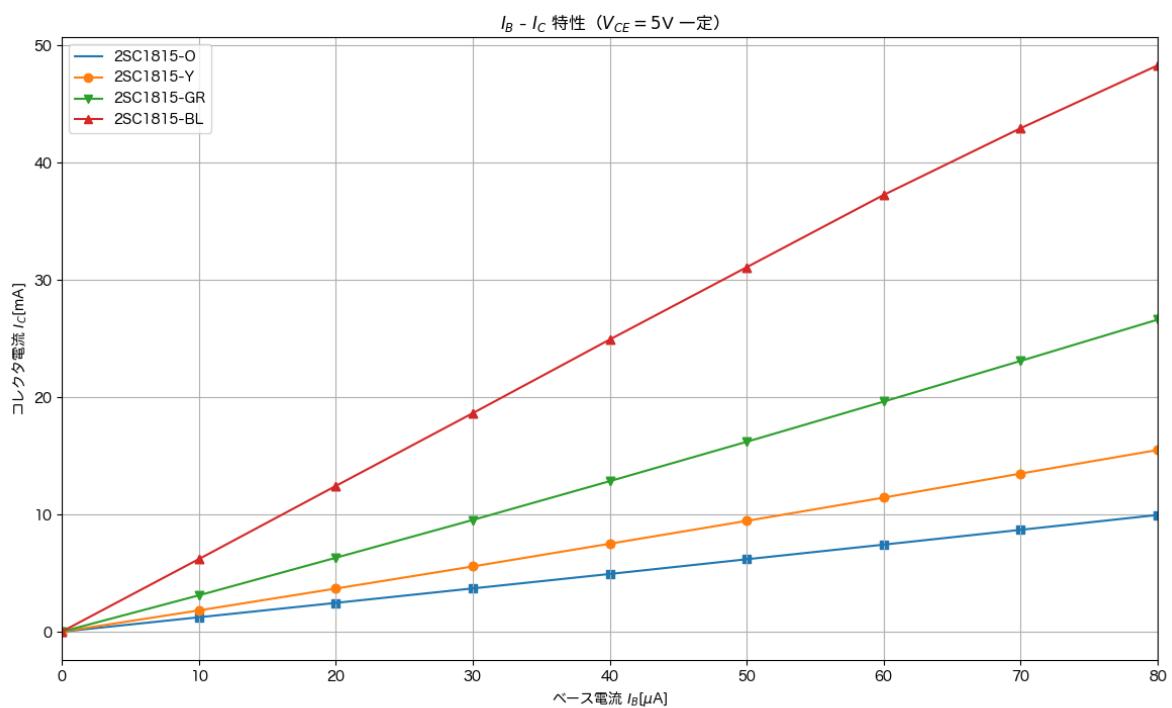
表 1.7 2SC1815GR : $I_B - I_C$ 特性 : $V_{CE} = 5V$ 一定

$I_B[\mu\text{A}]$	0	10	20	30	40	50	60	70	80
$I_C[\text{mA}]$	0	3.098	6.306	9.530	12.84	16.20	19.63	23.10	26.62

2SC1815BLue

表 1.8 2SC1815BL : $I_B - I_C$ 特性 : $V_{CE} = 5V$ 一定

$I_B[\mu\text{A}]$	0	10	20	30	40	50	60	70	80
$I_C[\text{mA}]$	0	6.189	12.43	18.64	24.92	31.09	37.26	42.95	48.31

図 1.7 $I_B - I_C$ 特性

1.1.3 入力特性 $V_{BE} - I_B$ ($V_{CE} = 5V$ 一定) : 第3象限

$V_{BE} - I_B$ 特性は入力特性とも呼ばれ、コレクタ-エミッタ間の電圧 V_{CE} を一定にした状態で、ベース-エミッタ間の電圧 V_{BE} を変化させた時、ベース電流 I_B がどの様に変わるかを示すもの

この特性は、ダイオードの順方向特性とほぼ同じになる

実験の手順は次の通り

- (1) $V_{CC} = 5V$ となる様に E_C を調整し、測定中はこの値を維持する
- (2) E_B (必要に応じて可変抵抗器) を調整して、ベース-エミッタ間の電圧 V_{BE} を変化させ、その都度ベース電流 I_B を測定し記録する

測定を終えたら、横軸にベース電流を、縦軸にベースエミッタ間の電圧をとて、第3象限のグラフを作図する

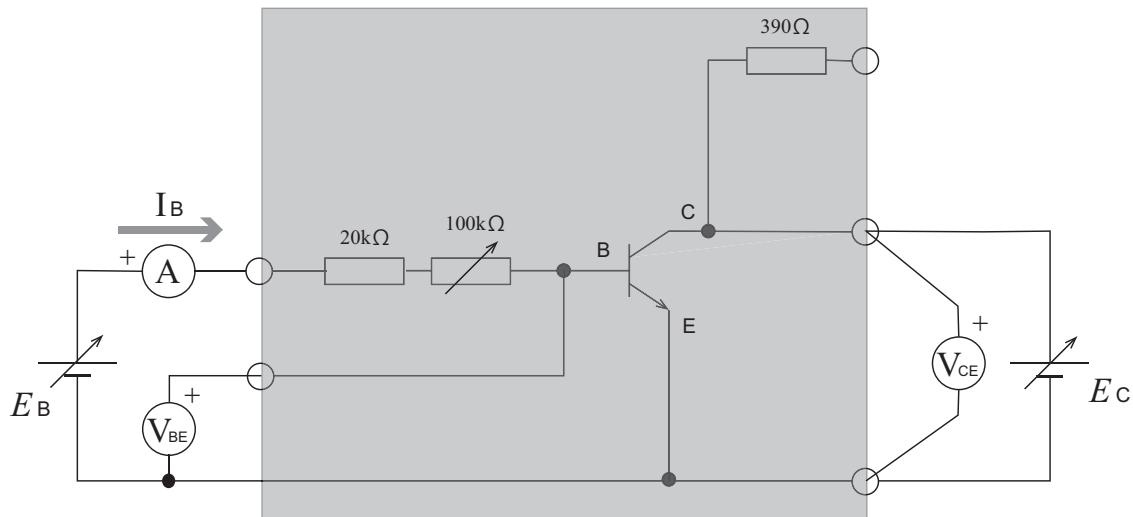


図 1.8 入力特性 $V_{BE} - I_B$ ($V_{CE} = 5V$ 一定)

2SC1815Orange

表 1.9 2SC1815O : V_{BE} – I_B 特性 : $V_{CE} = 5V$ 一定

V_{BE} [V]	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.664	0.6814	0.7036	0.7136
I_B [\mu A]	0.01	0.02	0.03	0.10	1.21	10.0	20.0	50.0	80.0

2SC1815Yellow

表 1.10 2SC1815Y : V_{BE} – I_B 特性 : $V_{CE} = 5V$ 一定

V_{BE} [V]	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.6523	0.6670	0.6787	0.6838
I_B [\mu A]	0.01	0.02	0.03	0.12	1.48	10.0	20.0	50.0	80.0

2SC1815GReen

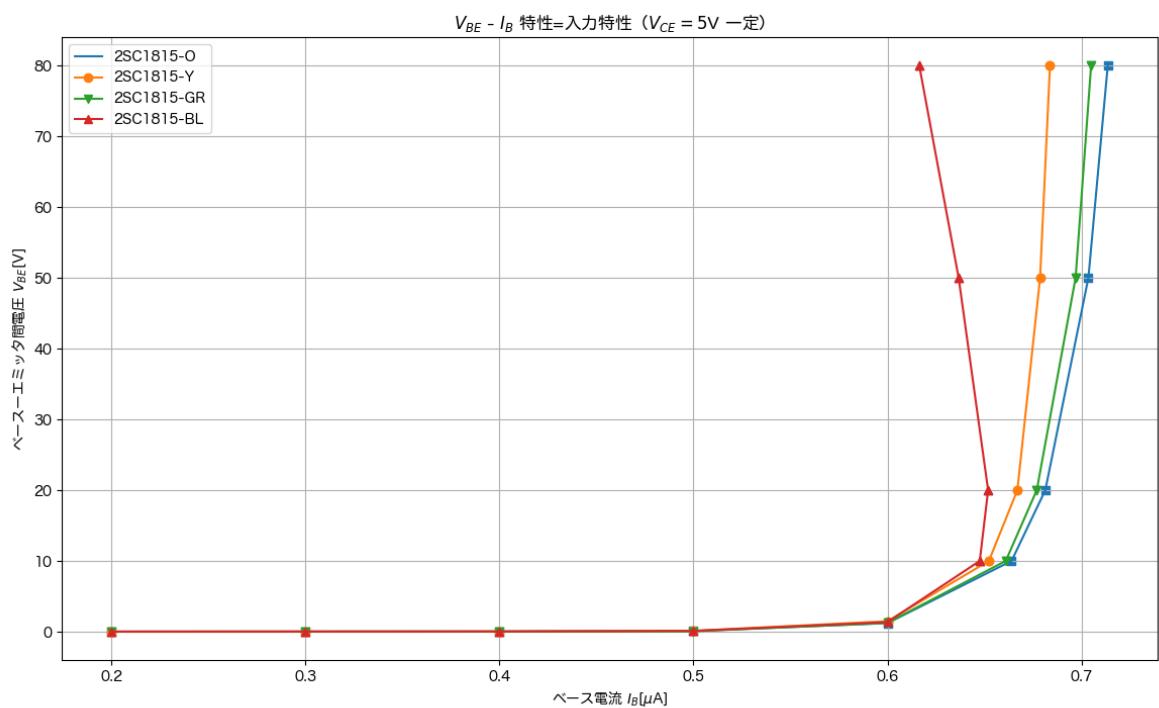
表 1.11 2SC1815GR : V_{BE} – I_B 特性 : $V_{CE} = 5V$ 一定

V_{BE} [V]	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.661	0.677	0.697	0.705
I_B [\mu A]	0	0	0.01	0.07	1.24	10.0	20.0	50.0	80.0

2SC1815BLue

表 1.12 2SC1815BL : V_{BE} – I_B 特性 : $V_{CE} = 5V$ 一定

V_{BE} [V]	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.6476	0.6519	0.6367	0.6164
I_B [\mu A]	0.01	0.02	0.03	0.11	1.36	10.0	20.0	50.0	80.0

図 1.9 V_{BE} - I_B 特性

1.1.4 直流負荷線 ($E_C = 9V$, $R_C = 390\Omega$) : 第1象限

直流負荷線は、トランジスタのコレクタに負荷抵抗 R_C が接続されている時の、コレクタ-エミッタ間の電圧 V_{CE} とコレクタ電流 I_C の関係を示している

コレクタ電流 I_C の増加に伴い、コレクタ-エミッタ間の電圧 V_{CE} は低下する

実験の手順は次の通り

- (1) 負荷抵抗 $R_C = 390\Omega$ を通したコレクタ電流 I_C を測定できる様に接続を変更する
- (2) ベース電流 $I_B = 0 \mu A$ になる様に E_B を調整し、その状態でコレクタ-エミッタ間の電圧 $V_{CE} = 9V$ となる様に E_C を調整する（これ以降 E_C には触らない）
- (3) コレクタ-エミッタ間の電圧 V_{CE} を観察しながら、 E_B （必要に応じて可変抵抗器）を調整して V_{CE} を変化させ、その都度コレクタ電流 I_C 測定し記録する

測定を終えたら、第1象限に直流負荷線を作図する

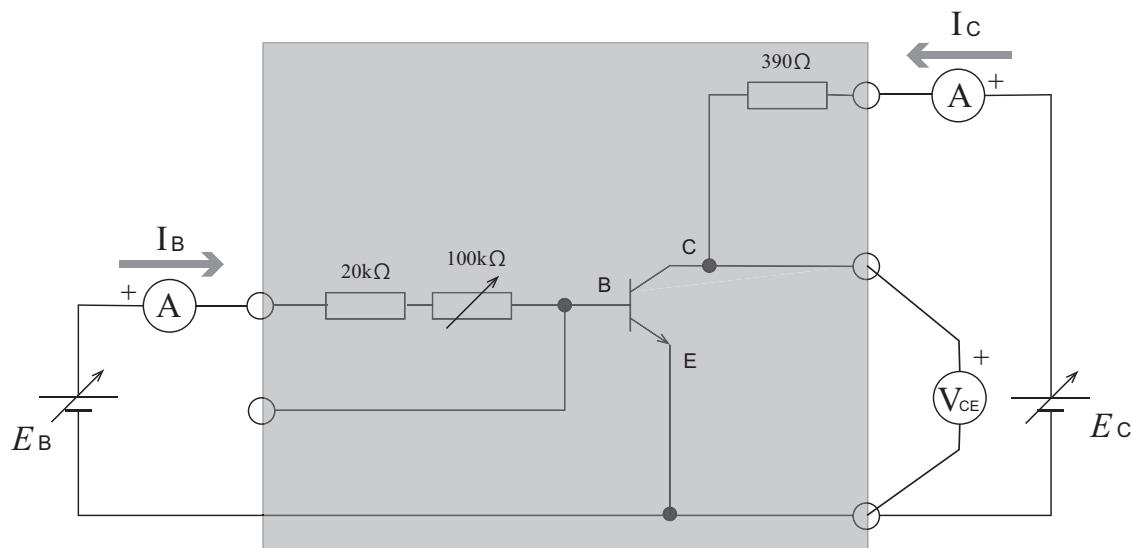


図 1.10 直流負荷線

2SC1815Orange

表 1.13 2SC1815O : 直流負荷線 : $E_C = 9V$ 、 $R_C = 390\Omega$

$V_{CE}[\text{V}]$	9.0	8.0	7.0	6.0	5.0	4.0	3.0	2.0	1.0
$I_C[\text{mA}]$	0	2.521	5.052	7.616	10.134	12.66	15.22	17.79	20.35

2SC1815Yellow

表 1.14 2SC1815Y : 直流負荷線 : $E_C = 9V$ 、 $R_C = 390\Omega$

$V_{CE}[\text{V}]$	9.0	8.0	7.0	6.0	5.0	4.0	3.0	2.0	1.0
$I_C[\text{mA}]$	0	2.555	5.057	7.567	10.118	12.65	15.21	17.75	20.30

2SC1815GRreen

表 1.15 2SC1815GR : 直流負荷線 : $E_C = 9V$ 、 $R_C = 390\Omega$

$V_{CE}[\text{V}]$	9.0	8.0	7.0	6.0	5.0	4.0	3.0	2.0	1.0
$I_C[\text{mA}]$	0	2.473	5.085	7.511	10.083	12.62	15.18	17.69	20.24

2SC1815BLue

表 1.16 2SC1815BL : 直流負荷線 : $E_C = 9V$ 、 $R_C = 390\Omega$

$V_{CE}[\text{V}]$	9.0	8.0	7.0	6.0	5.0	4.0	3.0	2.0	1.0
$I_C[\text{mA}]$	0.0	2.489	5.089	7.595	10.144	12.70	15.26	17.83	20.38

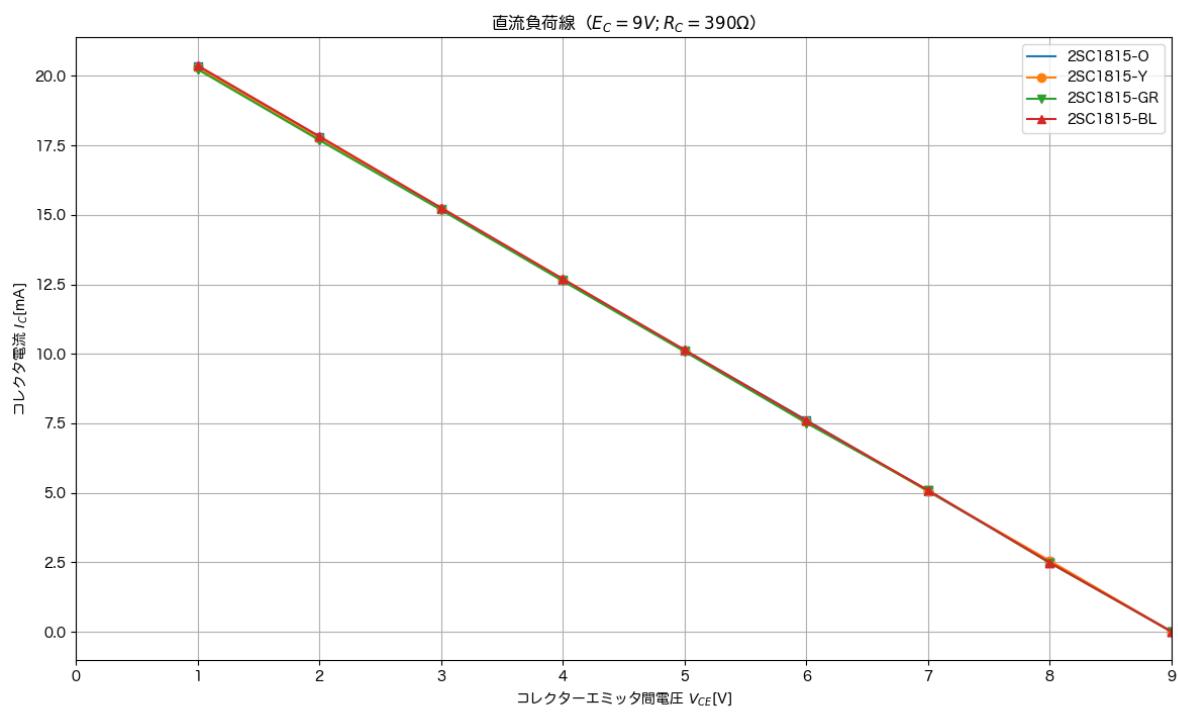


図 1.11 直流負荷線

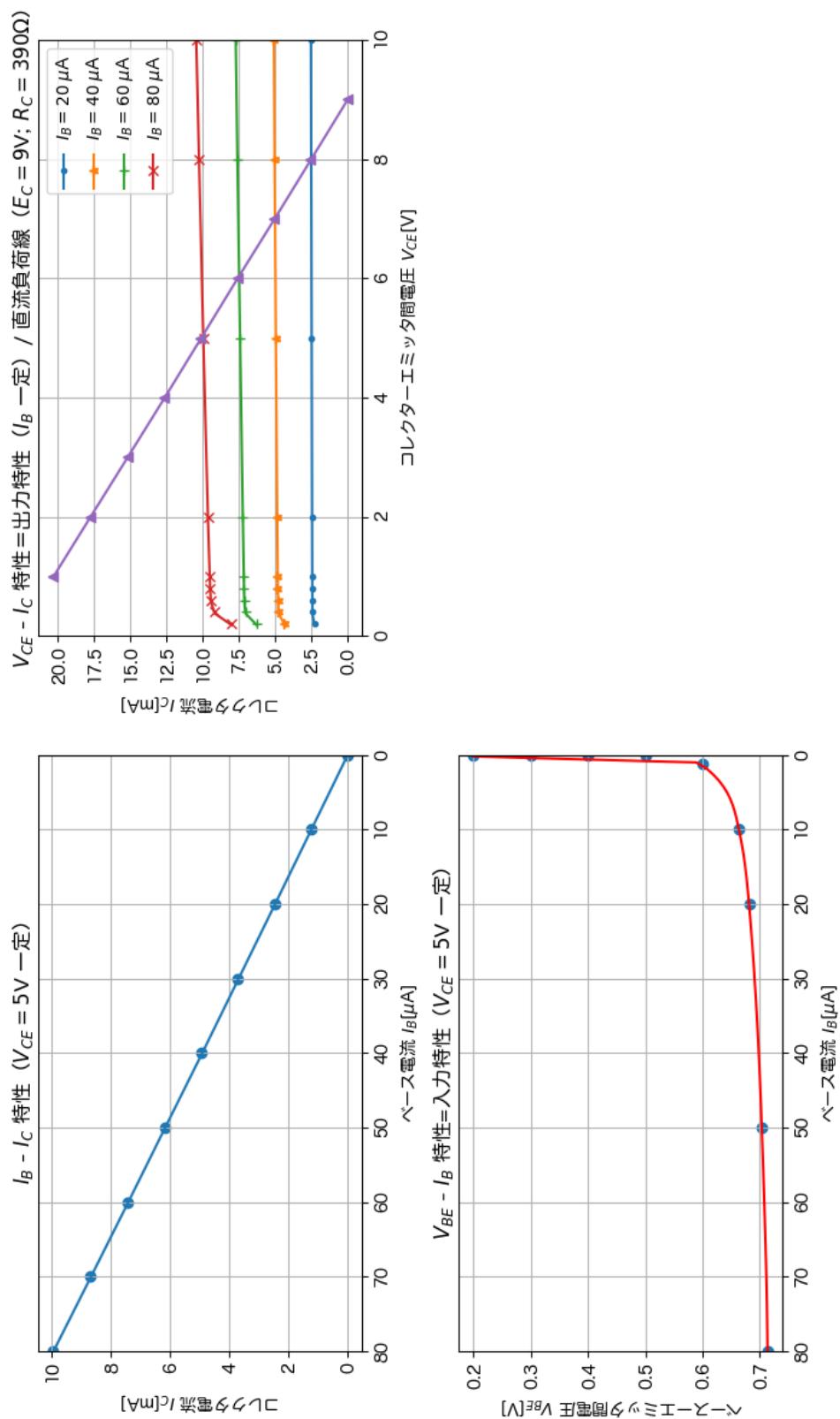


図 1.12 2SC1815O

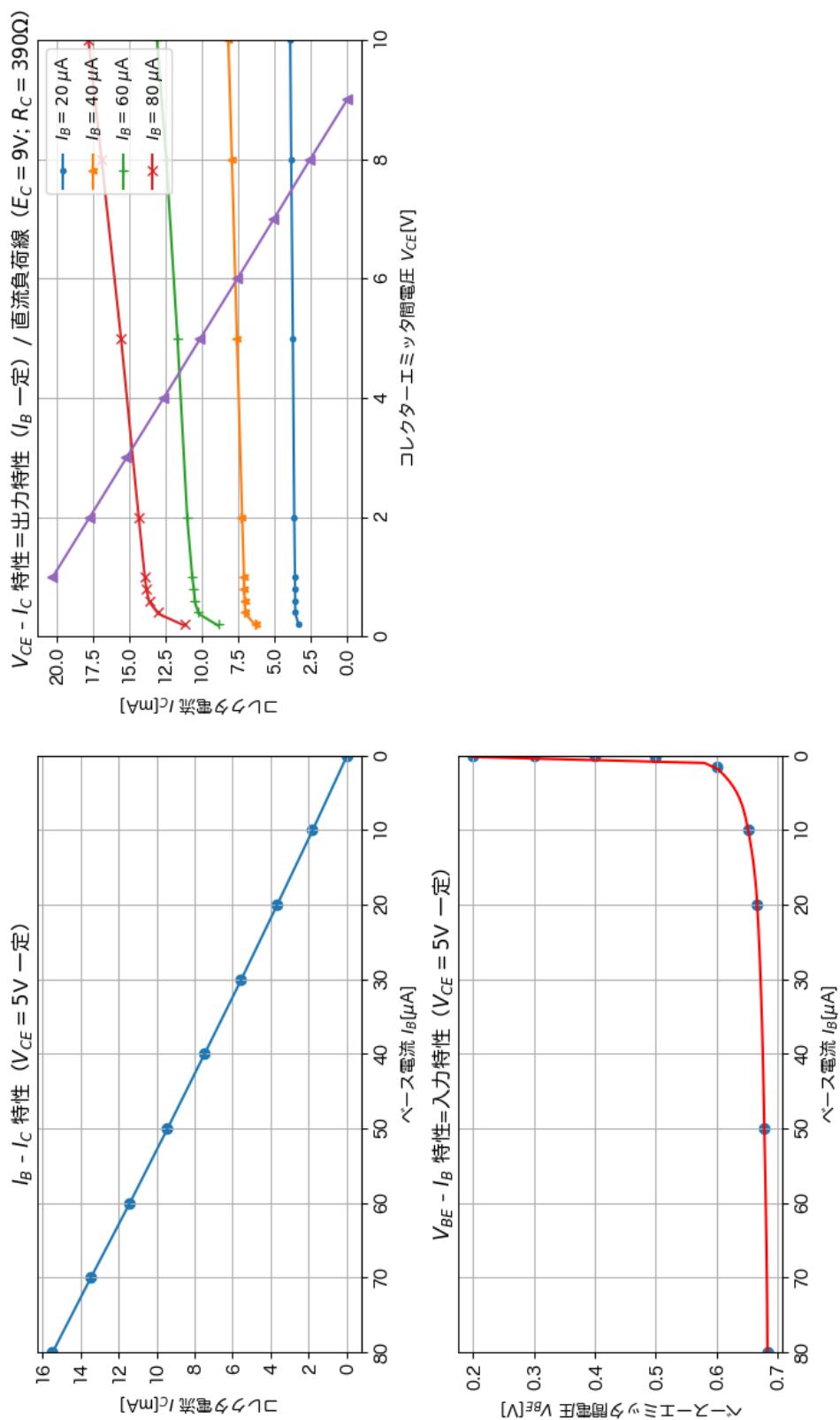


図 1.13 2SC1815Y

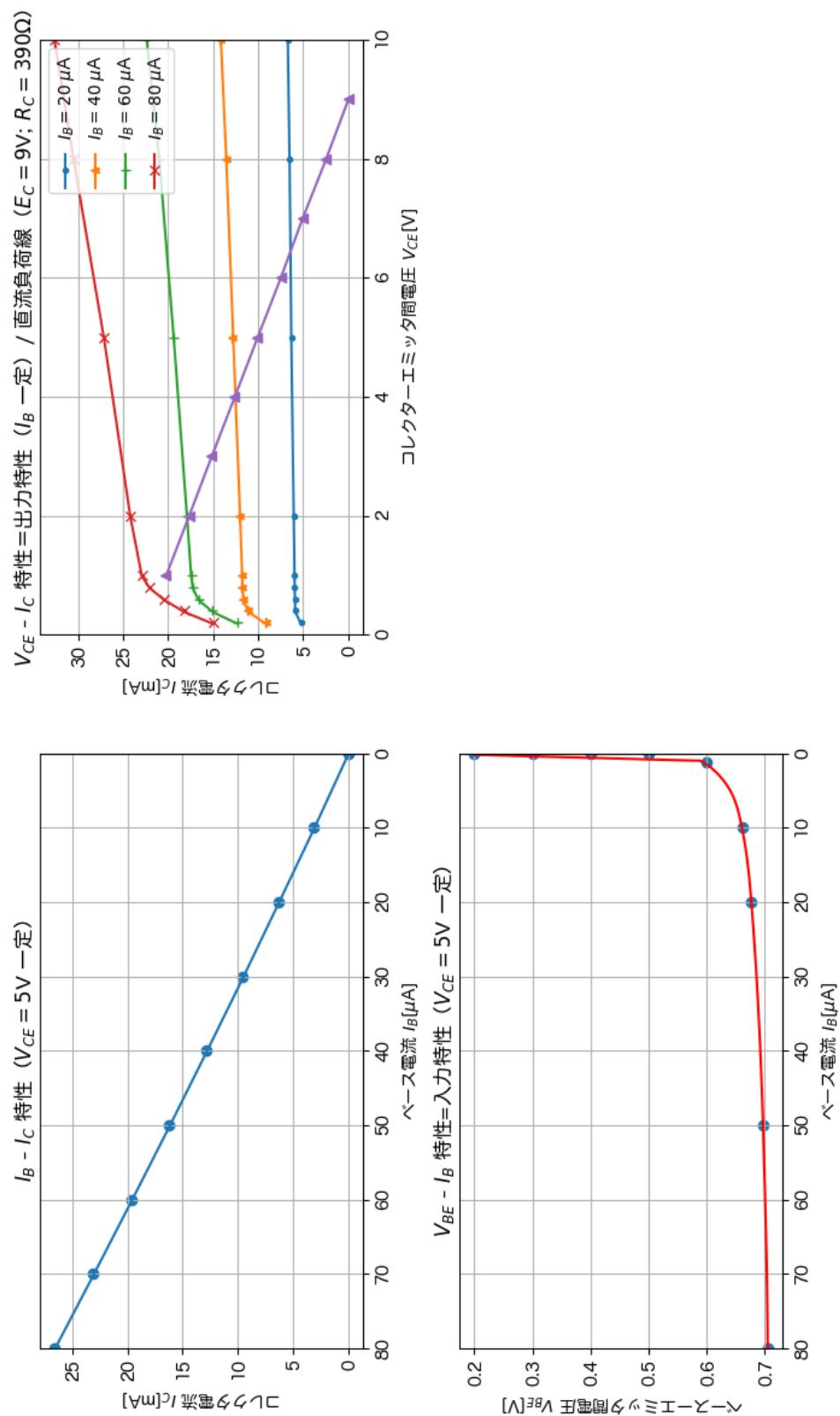


図 1.14 2SC1815GR

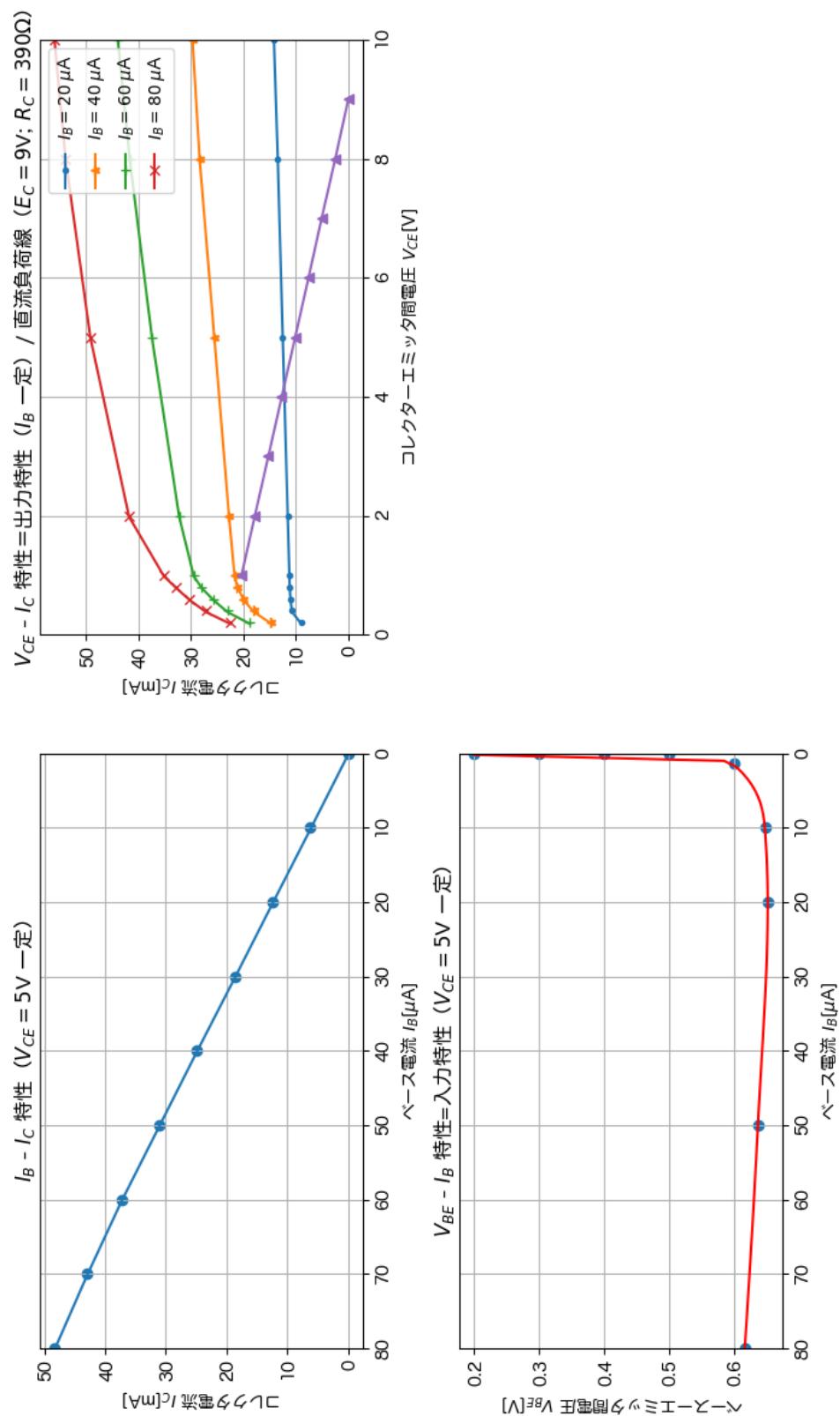


図 1.15 2SC1815BL

1.2 製作・実験 ②：周波数特性

1.2.1 電流帰還バイアス回路設計の手順

1. まず R_E を決める^{*1}

- (1) コレクタ電流 I_C として 1mA を流すこととする（設計条件）
- (2) エミッタ抵抗での電圧降下 V_E は、 $V_{CC} = 12V$ の 10% になる様にする（設計条件）
そうすると、 $V_{RE} = 1.2V$
- (3) $I_E = I_B + I_C$ だが、実際には $I_B \ll I_C$ であることから、 $I_E \doteq I_C$ と概算することにして、
 R_E にも I_C と同じ $I_E = 1mA$ が流れると考えれば、その時の電圧降下が $V_{RE} = 1.2V$ なの
だから、 $R_E = \frac{1.2}{1 \times 10^3} = 1.2k\Omega$
- (4) 1.2 kΩ は E 系列^{*2} にある数値なので、 $R_E = 1.2 k\Omega$ とする

2. 次に、 R_C を決める

- (1) $V_{CE} \doteq V_{RC}$ となる様にすれば、最大値の大きな交流信号を出力できる様になるので、

$$V_{CC} = V_{RC} + V_{CE} + V_{RE} \text{において、} V_{CE} = V_{RC} \text{とおけば、} V_{RC} = \frac{V_{CC} - V_{RE}}{2}$$

- (2) 設計条件より $I_C = 1mA$ だったから、 $R_C = \frac{V_{RC}}{I_C} = \frac{V_{CC} - V_{RE}}{2I_C} = \frac{12 - 1.2}{2 \times 1 \times 10^{-3}} = 5.4k\Omega$
- (3) E 系列から、 $R_C = 5.6k\Omega$ を選ぶ

3. ブリーダ抵抗 R_A を決める

- (1) $h_{FE} \doteq 180$ のトランジスタを使うことを想定している（設計条件）ので、

$$\text{コレクタ電流 } I_C \text{ に } 1mA \text{ を流す時のベース電流 } I_B \text{ は、} I_B = \frac{I_C}{h_{FE}} = \frac{1 \times 10^{-3}}{180} = 5.6\mu A$$

- (2) R_A にはベース電流 I_B の 20 倍の電流を流すこととする（設計条件）と、 $I_A = 20 \times I_B = 112\mu A$
- (3) ベース電位は $V_B = V_{BE} + V_{RE}$ であり、 $I_C = 1mA$ の時の V_{BE} を、シリコントランジスタの一般的な値である 0.6V にとれば、 $V_B = V_{RE} + V_{BE} = 1.2 + 0.6 = 1.8V$

- (4) この値 V_B は、 R_A にブリーダ電流 I_A が流れることによる電圧降下 V_{RA} に等しいから、

$$R_A = \frac{V_{RA}}{I_A} = \frac{V_B}{I_A} = \frac{1.8}{112 \times 10^{-6}} = 16.1 \doteq 16 k\Omega$$

- (5) 16 kΩ は E 系列にある数値なので、このまま $R_A = 16 k\Omega$

4. 最後に、 R_B を決める

- (1) ブリーダ抵抗 R_A と R_B は V_{CC} を分圧しているので、 $V_{RB} = V_{CC} - V_{RA} = 12 - 1.8 = 10.2V$

- (2) R_B にはブリーダ電流 I_A とベース電流 I_B の両方 $I_A + I_B$ が流れるので、 $V_{RB} = R_B \cdot (I_A + I_B)$
従って $R_B = \frac{V_{RB}}{I_A + I_B} = \frac{10.2}{112 \times 10^{-6} + 5.6 \times 10^{-6}} = 86.7 \times 10^3 \doteq 87k\Omega$

- (3) E 系列から $R_B = 91k\Omega$ を選ぶが、コレクタ電流を $I_C = 1mA$ に調整できる様にするため、
 R_B には、E 系列の 68kΩ に半固定抵抗の 50kΩ を直列に接続することも考えられる

*1 実教の教科書「電子回路」(第2章第5節) 小信号増幅回路の設計より

*2 抵抗値と静電容量値には、いくつかの標準数列が規定され、推奨されている。標準数列の E24 系列の数値は次の通り。

1.0 1.1 1.2 1.3 1.5 1.6 1.8 2.0 2.2 2.4 2.7 3.0 3.3 3.6 3.9 4.3 4.7 5.1 5.6 6.2 6.8 7.5 8.2 9.1

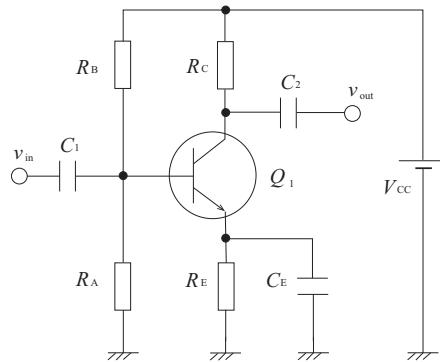


図 1.16 小信号増幅回路の製作

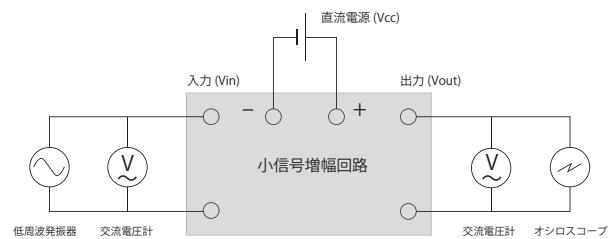


図 1.17 実験装置の構成

1.2.2 教科書の回路モデルの製作

表 1.17 実教「電子回路」P99 より

項目番号	項目	属性	表記	備考
1	半固定抵抗器 (R_E)	$\sim 2 k\Omega$ (1.2 $k\Omega$)	202	$20 \times 10^2 \Omega$, 直線性 B
2	抵抗器 (R_C)	5.6 $k\Omega$	緑・青・赤	$56 \times 10^2 \Omega$
3	抵抗器 (R_A)	16 $k\Omega$	茶・青・橙	$16 \times 10^3 \Omega$
4	抵抗器 (R_B)	91 $k\Omega$	白・茶・橙	$91 \times 10^3 \Omega$
5	電解コンデンサ (C_1)	10 μF 、16V		結合コンデンサ
6	電解コンデンサ (C_2)	10 μF 、16V		結合コンデンサ
7	電解コンデンサ (C_E)	330 μF 、16V		バイパスコンデンサ
8	トランジスタ (Q_1)	npn, $h_{FE} \approx 180$	2SC1815 ^{*3}	エミッタ接地
9	直流電源 (V_{CC})	DC 12V	DK-910	Sunhayato
10	発振器 (V_{in})	正弦波、10Hz~1MHz	AG-204D	KENWOOD
11	AC 電圧計 (V_{in} , V_{out})	V_{in} は 5mV (実効値) に	VT-187	KENWOOD
12	オシロスコープ	$CH1: V_{in}$, $CH2: V_{out}$	DS1054Z	RIGOL

1.2.3 LTspice によるシミュレーション

2SC1815Y を想定して周波数応答のシミュレーションを実施した。

以下の SPICE directive を使った。(教科書では $R_E = 1.2k\Omega$ になっている)

```
.ac dec 50 10 1MEG
.step param R list 0.4k 0.46k 1.2k
```

シミュレーションの結果と実機による測定データの間で、特に高域遮断周波数に乖離を生じることについて、「実機では信号ケーブルと計測器の入力インピーダンスが加わるのが原因である」^{*4}ので、ケーブルを含めた容量 85pF と入力抵抗 1MΩ (オシロスコープのプローブが ×1 の場合) を基本モデルに追加し

^{*3} 教科書では $h_{FE} \approx 180$ とされていることから、トランジスタには 2SC1815Y の使用を想定している様に見える

^{*4} トランジスタ SPECIAL 「設計のための LTspice 回路解析 101 選」 第 1 部第 1 章 「シミュレーション回路を実機に近づける」

てシミュレーションをやり直し、実機に合わせるようにしてみた。

なお、LTspice の標準ライブラリでは 2SC1815 を選べないので、以下の様にしてポピュラーなトランジスタのデータを追加する操作をした。⁵

LTS defense の標準ライブラリの所在は、

`~/Library/Application\ Support/LTspice/lib`

このフォルダの下には 3 つのフォルダがあって、それぞれのフォルダは次の様になっている。

表 1.18 LTspice ライブラリの構成

フォルダ	内容
cmp	ダイオードやトランジスタなどのパラメータ・モデルのデータ・ファイル
sub	デバイスの回路情報がセットされた lib ファイルや sub ファイル
sym	回路図を作成する時のデバイスのシンボルのデータ

トランジスタは cmp フォルダに置かれることになっている様なので、この cmp フォルダの中のファイル standard.bjt の最後に以下を追記する。(テキストエディタで編集可)

```
*Low Noise Amp PC=0.4W Ic=0.15A Vcbo=60V Complementary 2SA1015
.model 2SC1815 NPN(Is=2.04E-15 Xti=3 Eg=1.11 Vaf=100 Bf=300 Ne=1.5 Ise=0
+ Vceo=50 Icrating=150m mfg=TOSHIBA
+ Ikf=200m Xtb=1.5 Br=3.377 Nc=2 Isc=0 Ikr=0 Rc=1 Cjc=1p Mjc=.3333
+ Vjc=.75 Fc=.5 Cje=25p Mje=.3333 Vje=.75 Tr=450n Tf=20n Itf=0 Vtf=0 Xtf=0)

.model 2SC1815-GR NPN(Is=2.04E-15 Xti=3 Eg=1.11 Vaf=100 Bf=300 Ne=1.5 Ise=0
+ Vceo=50 Icrating=150m mfg=TOSHIBA
+ Ikf=200m Xtb=1.5 Br=3.377 Nc=2 Isc=0 Ikr=0 Rc=1 Cjc=1p Mjc=.3333
+ Vjc=.75 Fc=.5 Cje=25p Mje=.3333 Vje=.75 Tr=450n Tf=20n Itf=0 Vtf=0 Xtf=0)

.model 2SC1815-Y NPN(Is=2.04E-15 Xti=3 Eg=1.11 Vaf=100 Bf=200 Ne=1.5 Ise=0
+ Vceo=50 Icrating=150m mfg=TOSHIBA
+ Ikf=200m Xtb=1.5 Br=3.377 Nc=2 Isc=0 Ikr=0 Rc=1 Cjc=1p Mjc=.3333
+ Vjc=.75 Fc=.5 Cje=25p Mje=.3333 Vje=.75 Tr=450n Tf=20n Itf=0 Vtf=0 Xtf=0)

*Low Noise Amp PC=0.4W Ic=0.15A Vcbo=50V Complementary 2SC1815
.model 2SA1015 PNP(Is=295.1E-18 Xti=3 Eg=1.11 Vaf=100 Bf=300 Ne=1.5 Ise=0
+ Vceo=50 Icrating=150m mfg=TOSHIBA
+ Ikf=200m Xtb=1.5 Br=10.45 Nc=2 Isc=0 Ikr=0 Rc=15 Cjc=66.2p
+ Mjc=1.054 Vjc=.75 Fc=.5 Cje=5p Mje=.3333 Vje=.75 Tr=10n Tf=1.661n Itf=0 Vtf=0 Xtf=0)
```

⁵ <https://qiita.com/exabugs/items/5bfb3a575ce05bb6cbde>

```
.model 2SA1015-GR PNP(Is=295.1E-18 Xti=3 Eg=1.11 Vaf=100 Bf=300 Ne=1.5 Ise=0
+ Vceo=50 Icrating=150m mfg=TOSHIBA
+ Ikf=200m Xtb=1.5 Br=10.45 Nc=2 Isc=0 Ikr=0 Rc=15 Cjc=66.2p
+ Mjc=1.054 Vjc=.75 Fc=.5 Cje=5p Mje=.3333 Vje=.75 Tr=10n Tf=1.661n Itf=0 Vtf=0 Xtf=0)

.model 2SA1015-Y PNP(Is=295.1E-18 Xti=3 Eg=1.11 Vaf=100 Bf=200 Ne=1.5 Ise=0
+ Vceo=50 Icrating=150m mfg=TOSHIBA
+ Ikf=200m Xtb=1.5 Br=10.45 Nc=2 Isc=0 Ikr=0 Rc=15 Cjc=66.2p
+ Mjc=1.054 Vjc=.75 Fc=.5 Cje=5p Mje=.3333 Vje=.75 Tr=10n Tf=1.661n Itf=0 Vtf=0 Xtf=0)
```

このライブラリデータの根拠となるデータシートの所在は次の通り

<http://akizukidenshi.com/download/2sc1815-gr.pdf>

<http://akizukidenshi.com/download/2sa1015-gr.pdf>

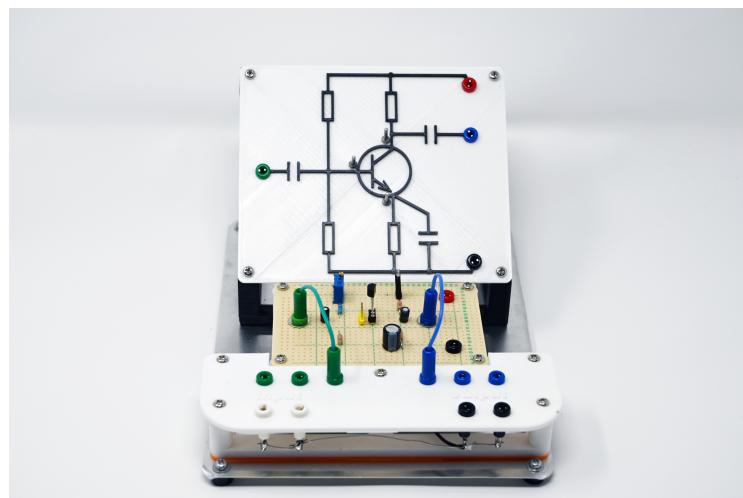


図 1.18 実習装置

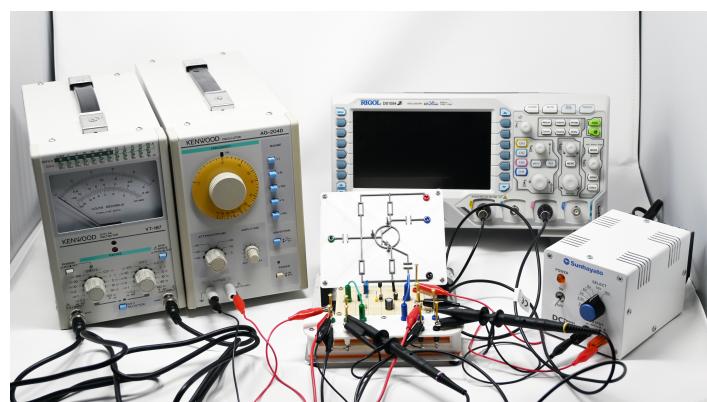


図 1.19 周波数特性の測定

```
;step param C list 220u 330u 480u
```

```
.step param R list 0.4k 0.46k 1.2k
```

```
.ac dec 50 10 1MEG
```

```
;tran 0 5m 0 5u
```

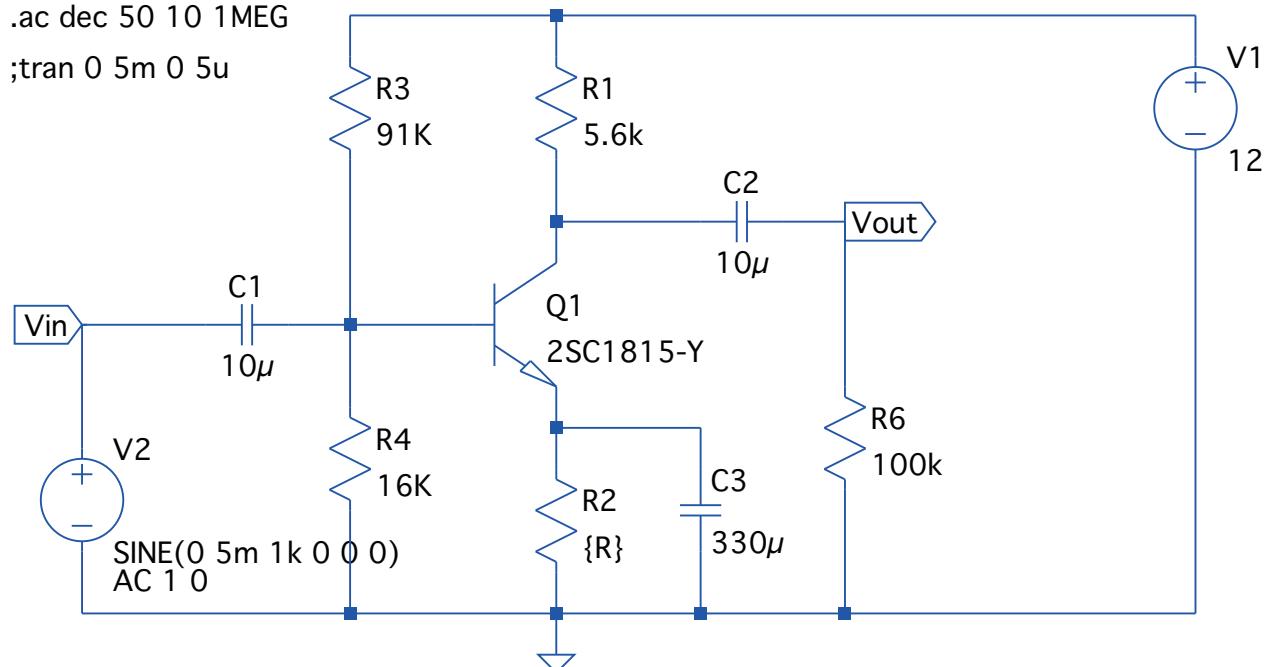
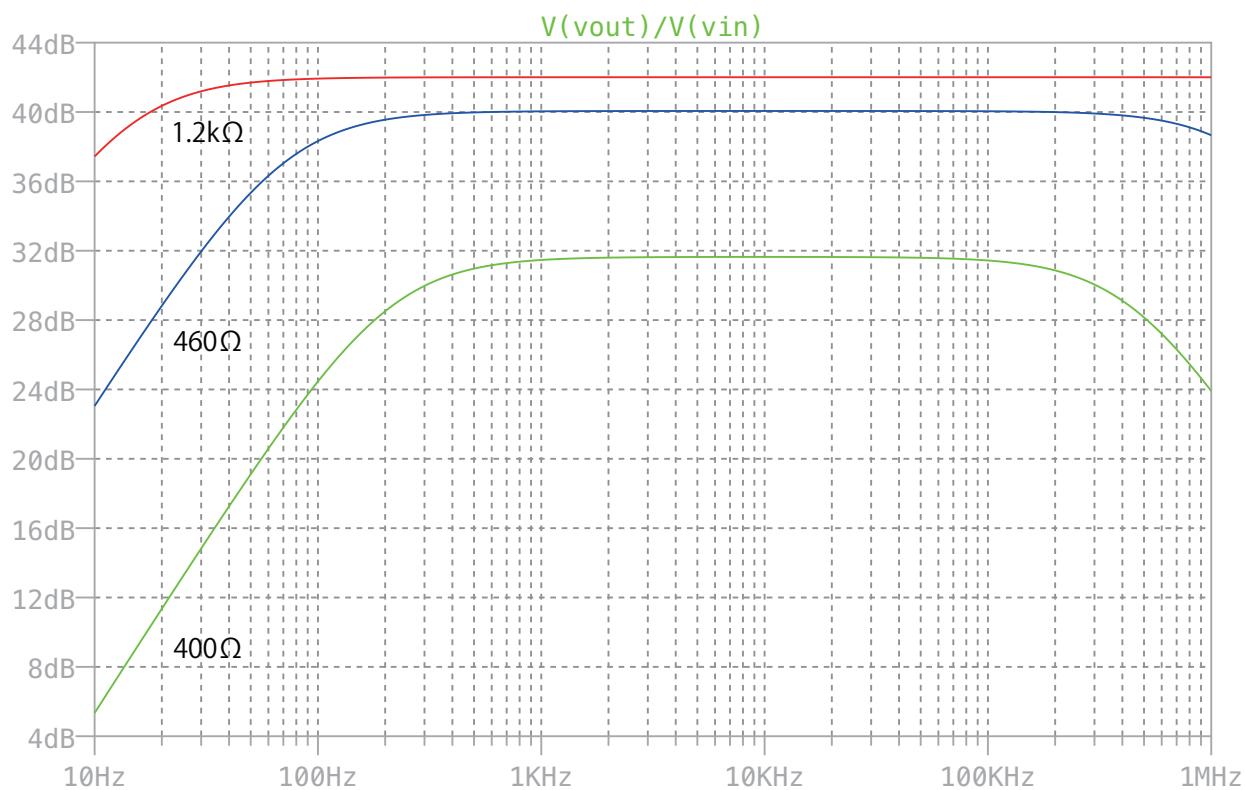


図 1.20 LTSpice によるモデル化

図 1.21 $R_E = 1.2k\Omega$ の特性が $f = 1MHz$ になってもフラットなままだが

```
;step param C list 220u 330u 480u
```

```
.step param R list 0.4k 0.46k 1.2k
```

```
.ac dec 50 10 1MEG
```

```
;tran 0 5m 0 5u
```

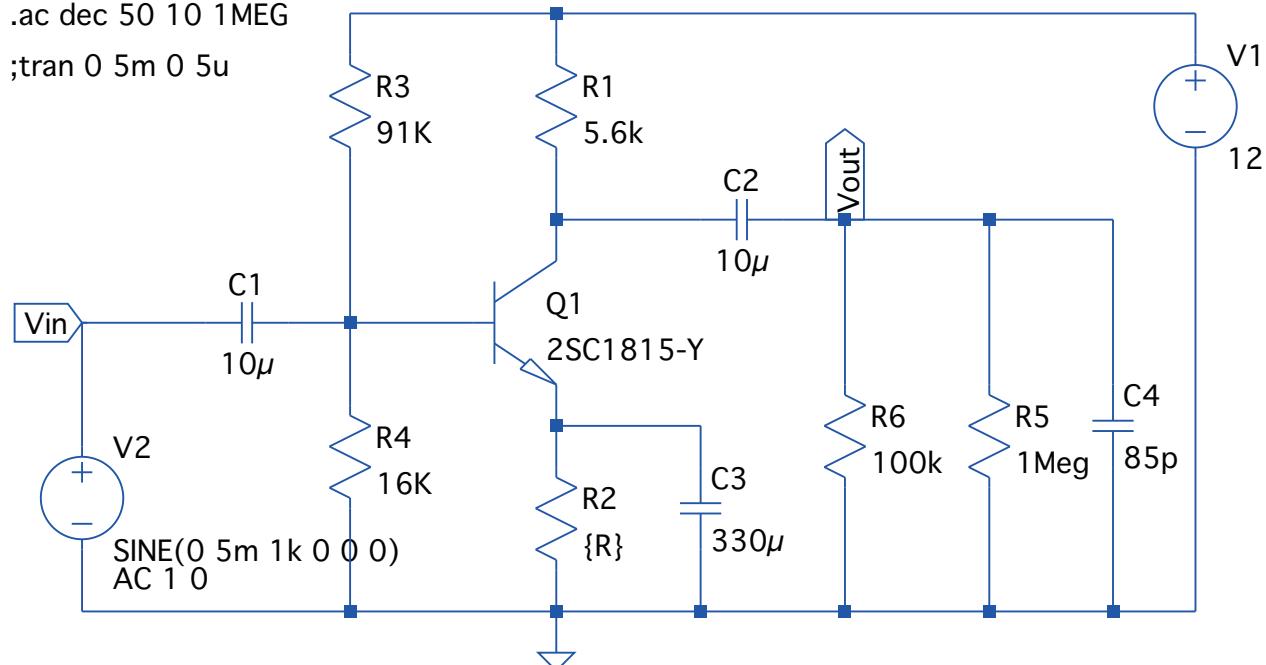


図 1.22 出力に、計測器とケーブルの CR (R5 と C4) を追加して実機に合わせた

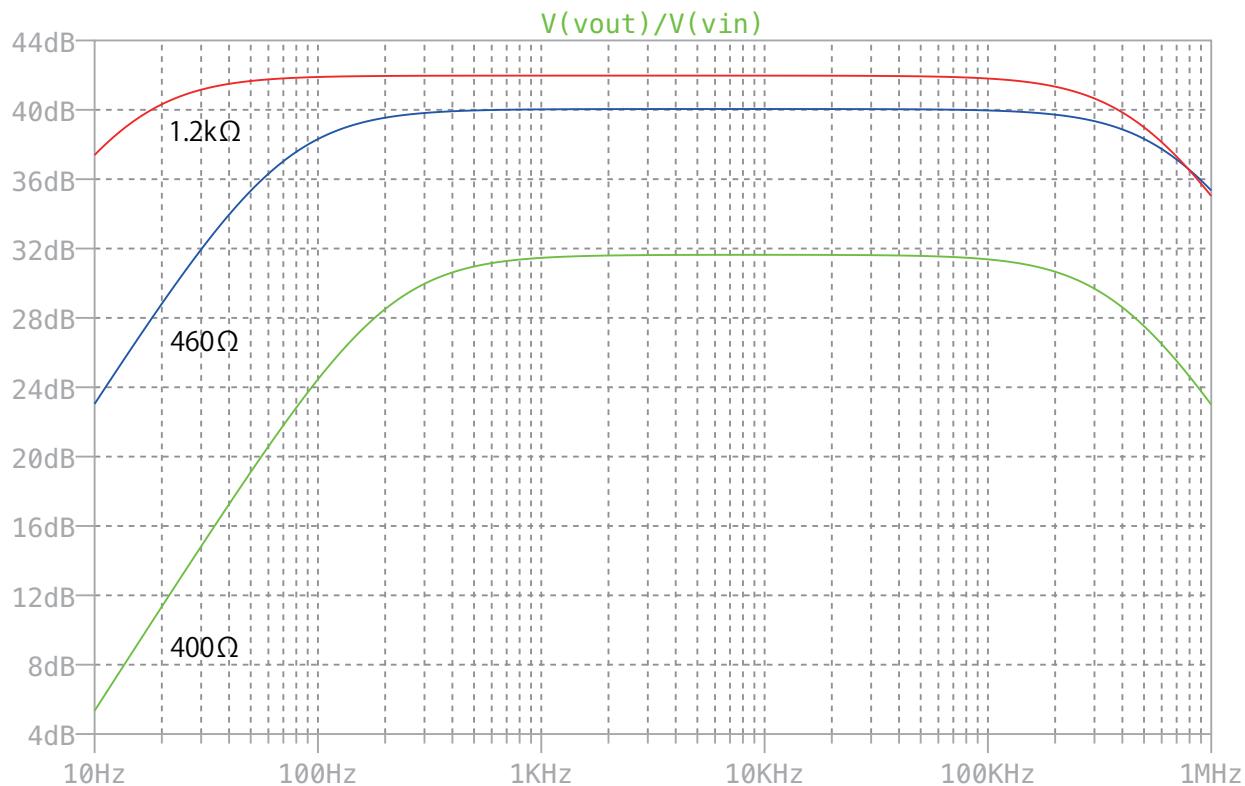


図 1.23 $R_E = 1.2k\Omega$ の特性が $f = 100kHz$ 辺りから右肩が下がってきている

1.2.4 実測データ：2SC1815Y

表 1.19 教科書の回路計による実測値（目標とした設計時の値に近い値が出ている）

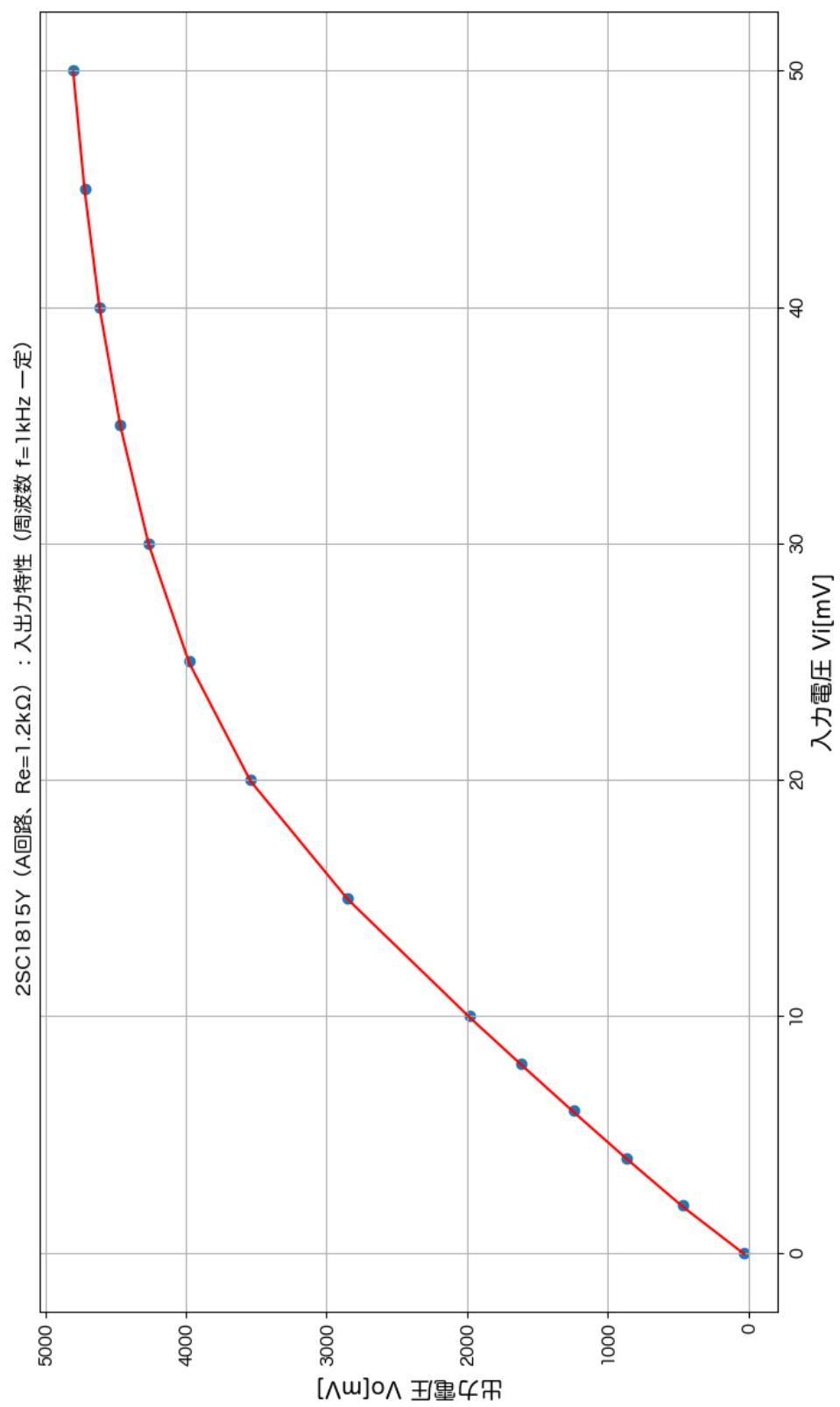
項目番	項目	実測値	備考（公称値など）
1	R_E	1.201 kΩ	半固定抵抗器 VR2kΩ (202) (1.2kΩ なら茶赤赤)
2	R_C	5.570 kΩ	緑青赤、 $56 \times 10^2\Omega$
3	R_A	15.90 kΩ	茶青橙、 $16 \times 10^3\Omega$
4	R_B	85.78 kΩ	68kΩ (青灰黒赤) + VR50kΩ (503) (91kΩ なら白茶橙)
5	V_{CC}	12.32 V	DC12V、Sunhayato の DK-910
6	h_{FE}	174	2SC1815Y (設計時 $h_{FE} = 180$)
7	I_C	999 μA	設計時の値 $1mA$ に近づけるため $R_B = 85.78k\Omega$ に調整
8	I_B	5.51 μA	設計時の計算値は、 $5.6 \mu A$
9	I_E	995 μA	厳密には $I_E = I_C + I_B$ だが（設計時 $I_E = I_C$ で概算）
10	I_A	115 μA	設計条件によるブリーダ電流は、 $20 \times I_B = 112 \mu A$
11	R_B の電流	120.8 μA	$I_A + I_B = 115 + 5.51 = 120.51 \mu A$
12	全電流	1.118 mA	R_B を流れる電流 + $I_C = 120.8 + 999 = 1.1198 mA$
13	V_{RC}	5.573 V	設計時の目標は、 $V_{RC} = V_{CE} = (V_{CC} - V_{RE})/2$
14	V_{CE}	5.535 V	$V_{RC} = V_{CE}$ で最大値の大きな交流信号出力が得られる
15	V_{BE}	0.6436 V	設計時にはシリコン Tr の値 0.6V で計算している
16	V_{RE}	1.208 V	設計時の条件では、 V_{CC} の 10% ($12.32 \times 0.1 = 1.231V$)
17	$V_B = V_{RA}$	1.85 V	$V_{BE} + V_{RE} = 0.6436 + 1.208 = 1.8516 V$
18	$V_C = V_{RE} + V_{CE}$	6.742 V	$V_{CC} - V_{RC} = 12.32 - 5.573 = 6.747V$

表 1.20 教科書の回路における実測値（入出力特性：周波数 1 kHz 一定）

入力電圧 V_i [mV]	0	2	4	6	8	10	15	20	25	30
出力電圧 V_o [mV]	33.3	469.1	863.4	1244	1616	1982	2849	3540	3976	4263
	35	40	45	50						
	4464	4612	4719	4800						

表 1.21 教科書の回路における実測値（周波数特性：入力電圧 $V_i = 5 mV$ 一定）

周波数 f[Hz]	15	20	30	50	70	100	200	300	500	1k
出力電圧 V_o [mV]	515	619	748	862	908	939	960	964	966	980
	2k	5k	10k	20k	50k	70k	100k	150k	200k	300k
	976	974	974	961	909	856	765	640	536	391
	400k	500k	600k	700k	800k	900k	1M			
	301	227	191	166	146	130	118			

図 1.24 教科書モデルでの入出力特性の測定 ($2\text{SC}1815\text{Y}$, $h_{FE} = 174$, $R_E = 1.2k\Omega$, $R_B = 85.78k\Omega$)

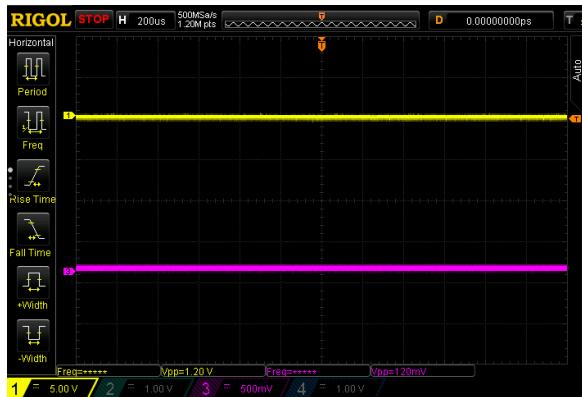
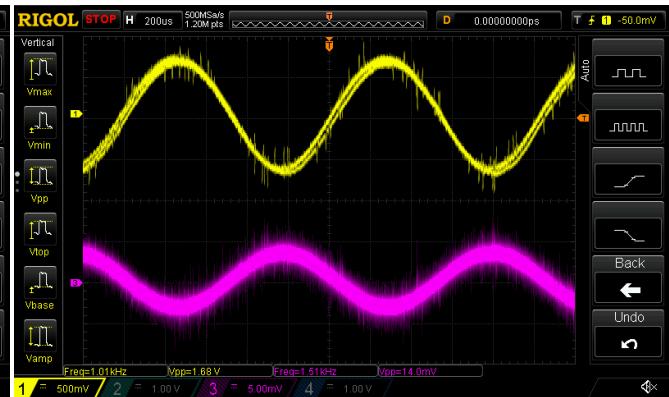
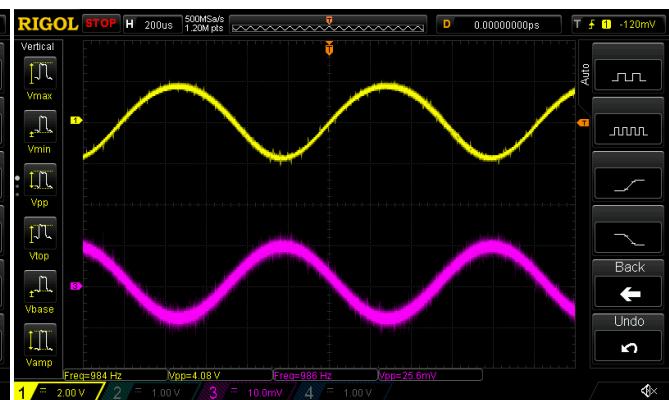
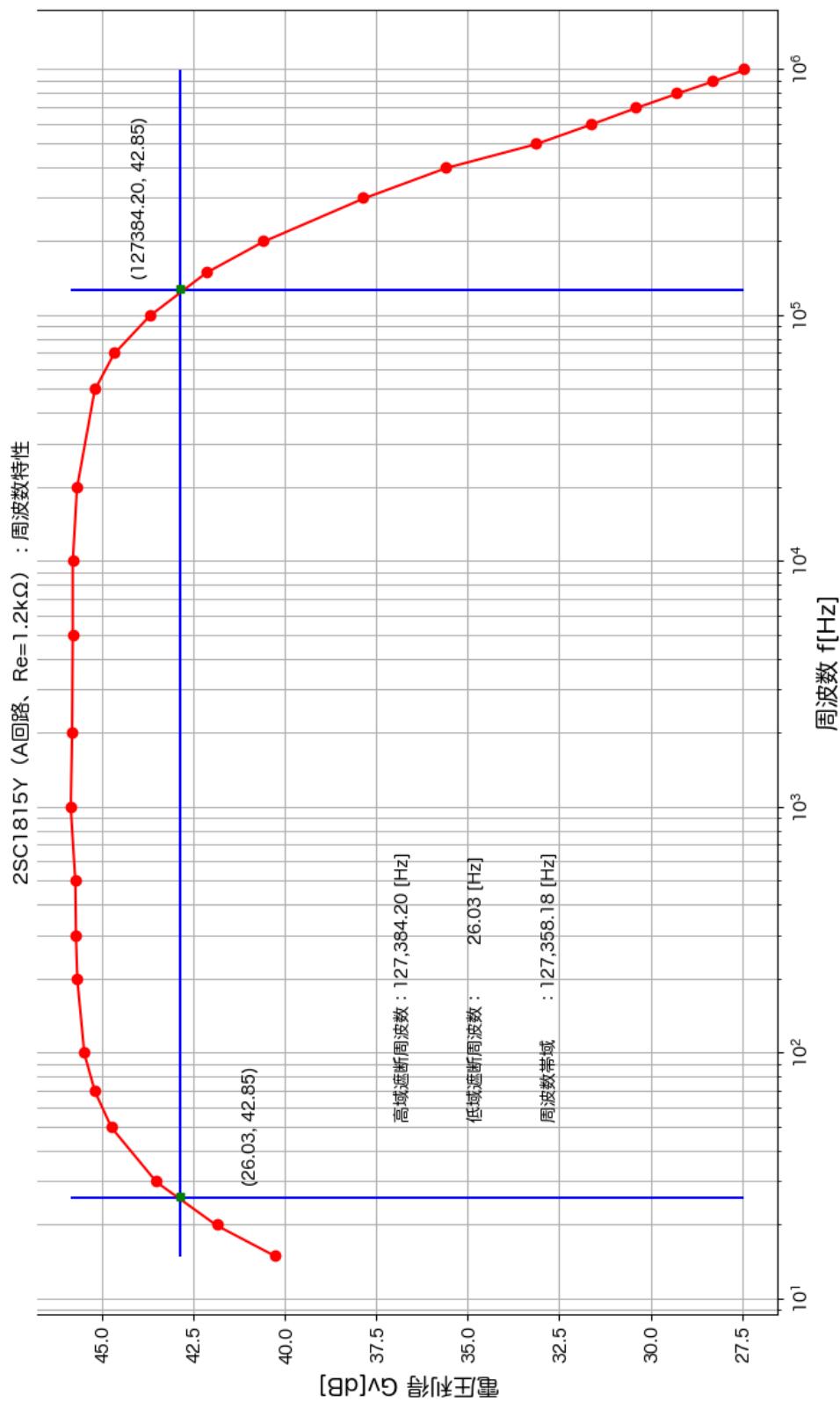
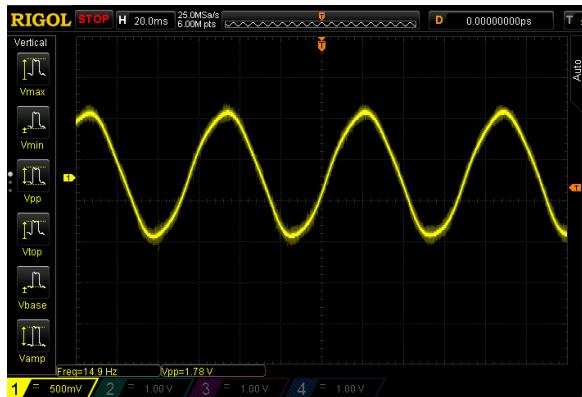
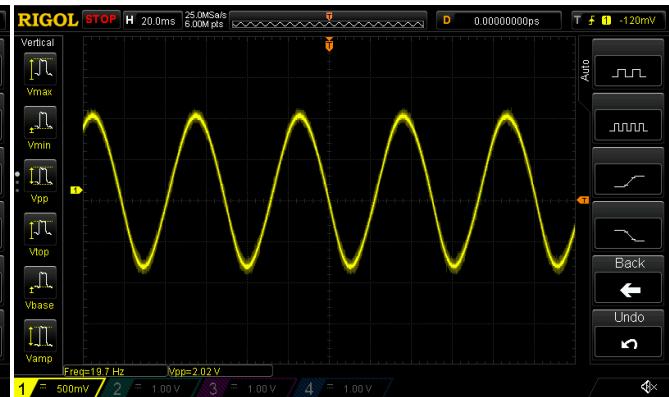
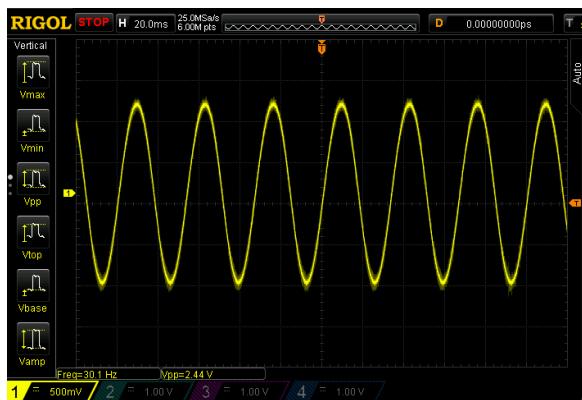
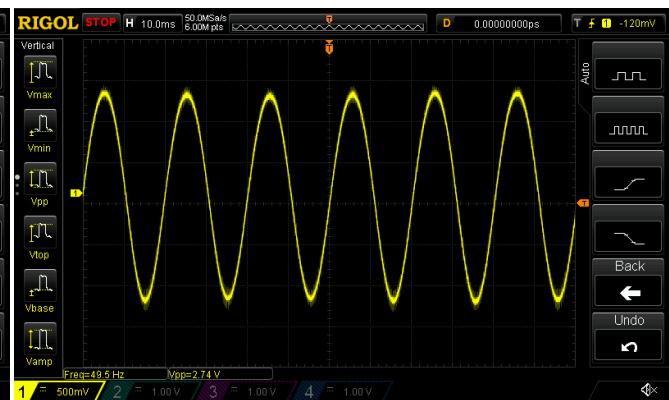
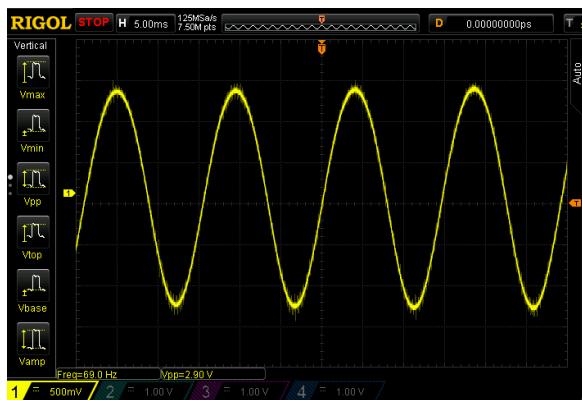
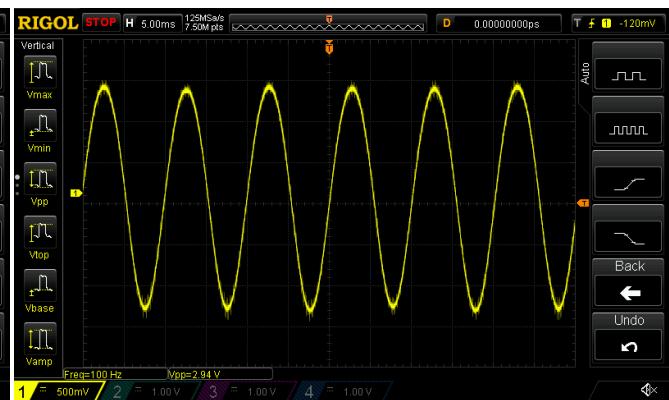
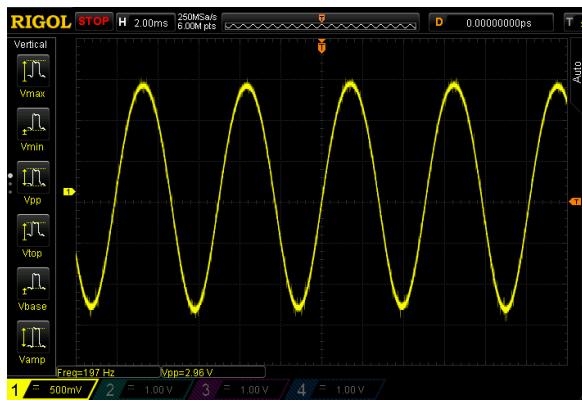
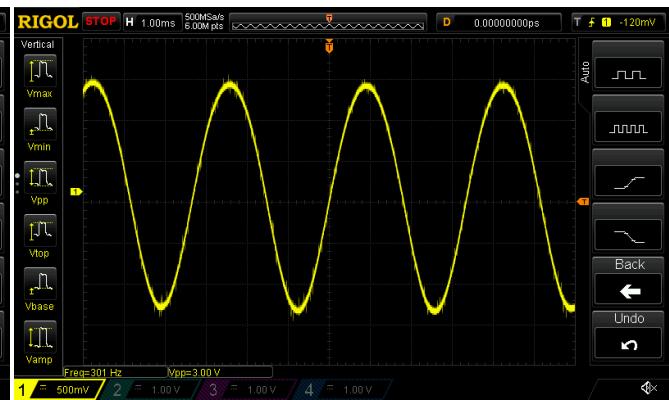
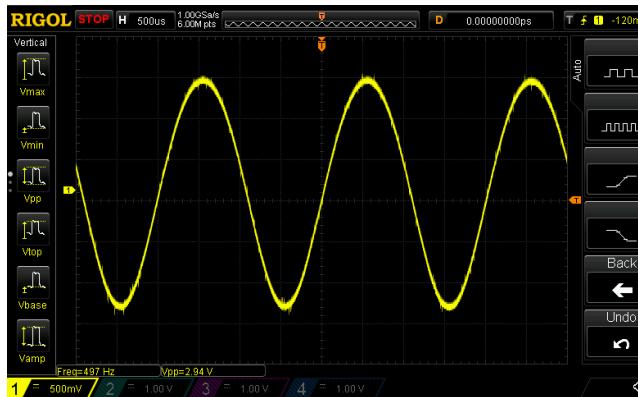
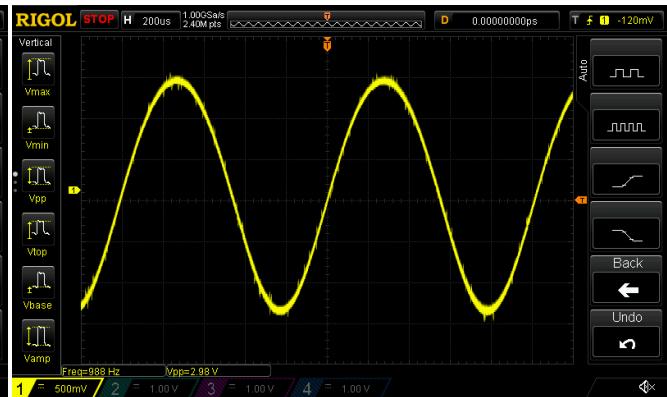
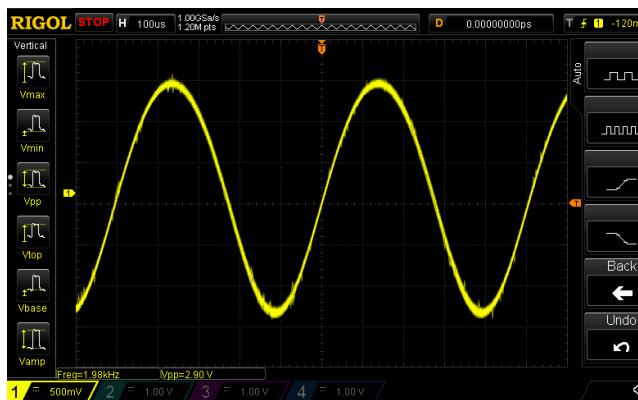
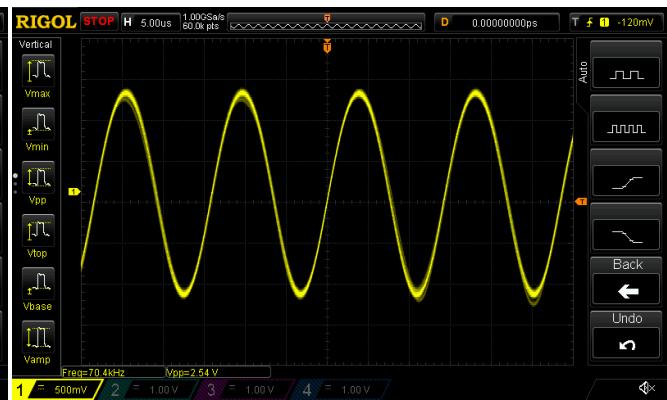
図 1.25 $V_i = 0 \text{ mV}$ 図 1.26 $V_i = 2 \text{ mV}$ 図 1.27 $V_i = 4 \text{ mV}$ 図 1.28 $V_i = 6 \text{ mV}$ 図 1.29 $V_i = 8 \text{ mV}$ 図 1.30 $V_i = 10 \text{ mV}$ 図 1.31 $V_i = 15 \text{ mV}$ 図 1.32 $V_i = 20 \text{ mV}$

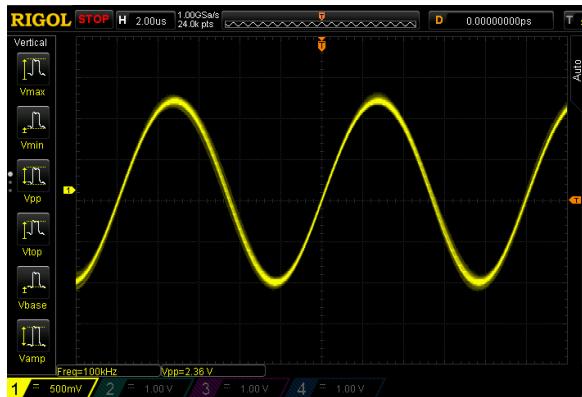
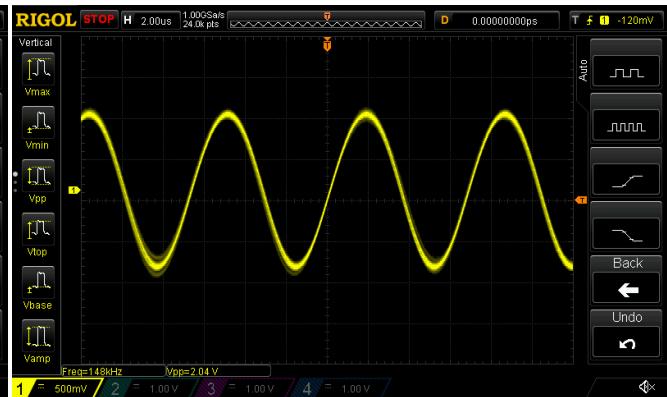
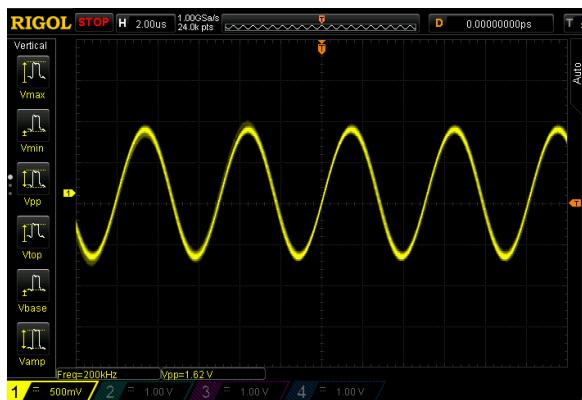
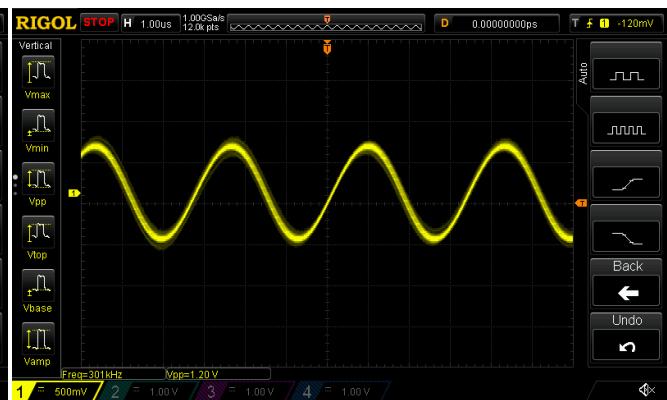
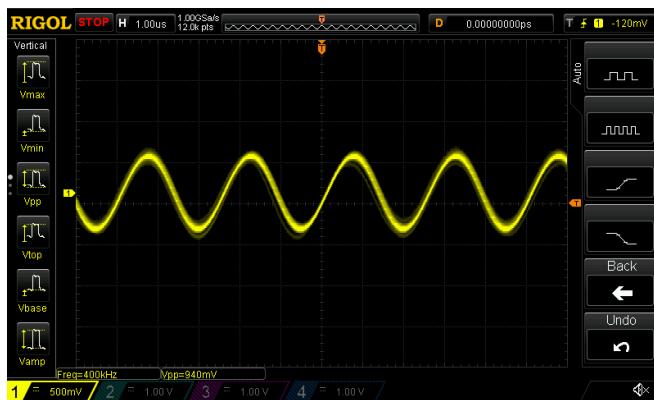
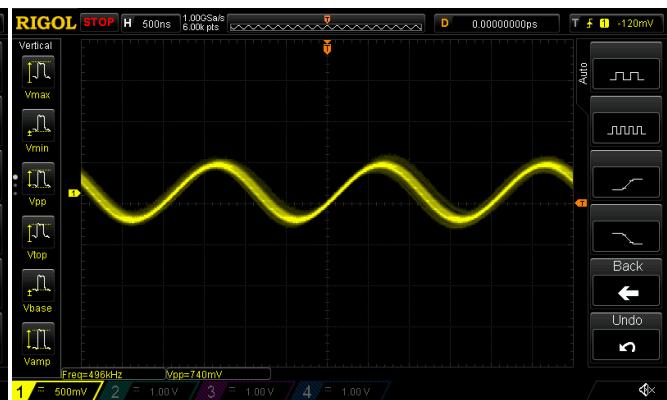
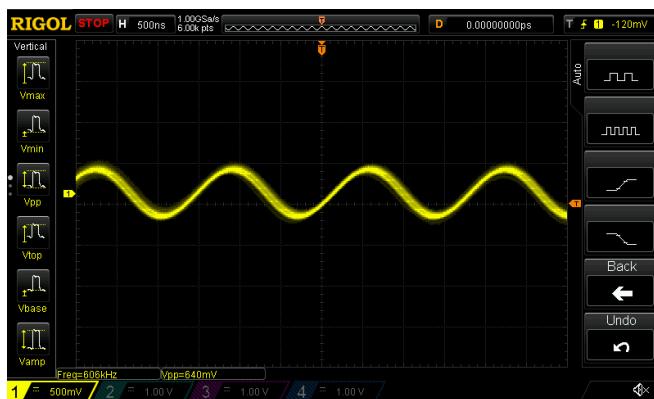
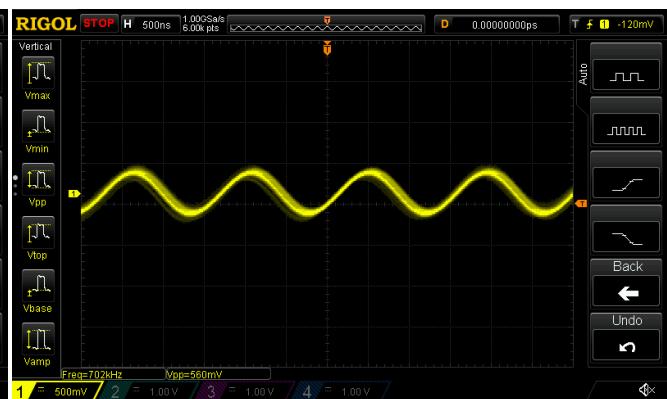
図 1.33 $V_i = 25 \text{ mV}$ 図 1.34 $V_i = 30 \text{ mV}$ 図 1.35 $V_i = 35 \text{ mV}$ 図 1.36 $V_i = 40 \text{ mV}$ 図 1.37 $V_i = 45 \text{ mV}$ 図 1.38 $V_i = 50 \text{ mV}$

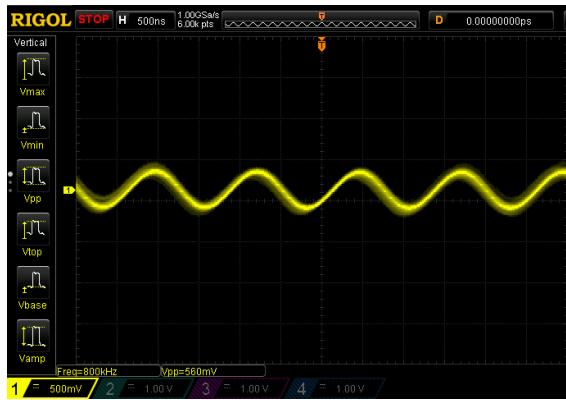
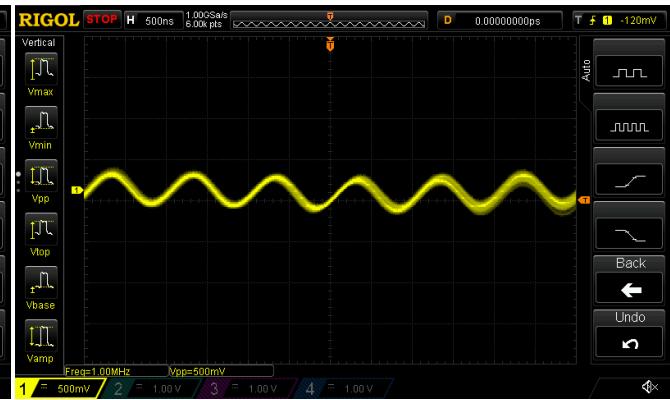
- (1) 入力電圧 $V_i = 10[\text{mV}]$ を超えたあたりから波形が潰れ始めている
(従って、次の周波数応答の実験では、入力電圧を 5mV として実施している)
- (2) 入力電圧 V_i と出力電圧 V_o の波形から、位相が $\pi[\text{rad}]$ だけずれているのが分かる

図 1.39 教科書モデルでの周波数特性の測定 ($2SC1815Y, h_{FE} = 174, R_E = 1.2k\Omega, R_B = 85.78k\Omega$)

図 1.40 $f = 15 \text{ Hz}$ 図 1.41 $f = 20 \text{ Hz}$ 図 1.42 $f = 30 \text{ Hz}$ 図 1.43 $f = 50 \text{ Hz}$ 図 1.44 $f = 70 \text{ Hz}$ 図 1.45 $f = 100 \text{ Hz}$ 図 1.46 $f = 200 \text{ Hz}$ 図 1.47 $f = 300 \text{ Hz}$

図 1.48 $f = 500 \text{ Hz}$ 図 1.49 $f = 1 \text{ kHz}$ 図 1.50 $f = 2 \text{ kHz}$ 図 1.51 $f = 5 \text{ kHz}$ 図 1.52 $f = 10 \text{ kHz}$ 図 1.53 $f = 20 \text{ kHz}$ 図 1.54 $f = 50 \text{ kHz}$ 図 1.55 $f = 70 \text{ kHz}$

図 1.56 $f = 100 \text{ kHz}$ 図 1.57 $f = 150 \text{ kHz}$ 図 1.58 $f = 200 \text{ kHz}$ 図 1.59 $f = 300 \text{ kHz}$ 図 1.60 $f = 400 \text{ kHz}$ 図 1.61 $f = 500 \text{ kHz}$ 図 1.62 $f = 600 \text{ kHz}$ 図 1.63 $f = 700 \text{ kHz}$

図 1.64 $f = 800 \text{ kHz}$ 図 1.65 $f = 1 \text{ MHz}$

- (1) 後半で振幅は少しづつ小さくなっていくのがわかる
- (2) 全周波数域 (15Hz ~ 1MHz) で、波形が潰れることなく、きれいに出力されている
(動作点と入力電圧の設定が適切だった)

1.2.5 代替トランジスタ

4種類の2SC1815があるので、それぞれを使って特性を測定した。測定に使った回路定数については、表1.22に示す h_{FE} と R_B の値以外は全て同じ($R_E = 1.2k\Omega$ など共通)にしている。

R_B の値は、4つの実験で共通して $I_C = 1mA$ となる様に半固定抵抗器^{*6}を使って調整した。

R_B を調節することによって、 R_A と R_B による V_{CC} の分圧で $V_B = (V_{RA})$ が決まり、それが I_B を変化させ、その h_{FE} 倍である $I_C = 1mA$ が決定している。 $I_C = 1mA$ が決まれば、その電流による R_C での電圧降下が $(V_{CC} - V_E)/2$ となるように R_C を決めていたのだから、 $V_{CE} \doteq V_{RC}$ を実現できる。^{*7}

表1.22から分かる様に、 h_{FE} の大きいトランジスタほど、 I_B が小さくなっている(何れも $I_C = 1mA$ となるために)のが分かる。 $(h_{FE} \times I_B)$ を計算してみると、 $938.34\mu A$ 、 $957.44\mu A$ 、 $980.2\mu A$ 、 $954.73\mu A$)

表1.22 代替トランジスタの実験

番号	種類	h_{FE} の範囲	測定回路で使った値	$I_B [\mu A]$	$f_L [Hz]$	$f_H [Hz]$	$B [Hz]$
1	Orange	70~140	$h_{FE} = 117, R_B = 83.23k\Omega$	8.02	27.1	193.0k	193.0k
2	Yellow	120~240	$h_{FE} = 176, R_B = 85.83k\Omega$	5.44	25.4	198.6k	198.6k
3	Green	200~400	$h_{FE} = 260, R_B = 87.42k\Omega$	3.77	24.7	199.5k	199.5k
4	Blue	350~700	$h_{FE} = 593, R_B = 90.78k\Omega$	1.61	21.7	199.8k	199.7k

実測結果のグラフを重ね合わせてみると、4つのグラフは概ね重なっている。

結論として、この実習においては $I_C = 1mA$ になる様に R_B を調整することによって、どのトランジスタも代替となり得ることが分かる。実習装置には、 R_B の値を表1.22の通りの調整範囲に含める様な半固定抵抗器を用意する(例えば、 R_B は抵抗器 $68k\Omega$ と半固定抵抗器 $50k\Omega$ の直列接続にする)こと、コレクタ電流 I_C を測定できる端子を備える必要がある。

1. $I_C = 1mA$ になる様に R_B を調整する手順
 - (1) 実習装置にはトランジスタがセットされた状態であることを確認する
 - (2) I_C 測定端子を短絡しているショートピンを外す
 - (3) 露になった I_C 測定端子に、鰐口クリップを付けたプローブを接続する
 - (4) プローブの鰐口クリップ側を回路計(電流計)に接続する
 - (5) 実習装置に接続した直流電源装置 $E_C(V_{CC} = 12V)$ のOutputをOnにする
 - (6) 回路計(電流計)を読んで、 $I_C = 1mA$ となる様に、 R_B の半固定抵抗器を調整する
 - (7) 調整を終えたら、
 - ① V_{CC} をOFFにして、② I_C 測定用プローブを取り外し、③ショートピンを元に戻す
2. I_C が $1mA$ になった時の R_B の抵抗値を知るための手順
 - (1) トランジスタを実習装置から取り外す
 - (2) 電源装置が実習装置に接続されていないことを確認する
(電源装置のOutputがOFFであっても、とにかく実習装置に電源装置を接続しない)
 - (3) 回路計で R_B を測定する(トランジスタのベース端子と V_{CC} のプラス側端子の間で)

^{*6} R_B を調節する半固定抵抗器は、 $V_{BE} \doteq 0.6V$ 周辺のデリケートな領域を調整しなければならないので、特に多回転半固定抵抗器(高精度25回転)を使用する。

^{*7} V_{CE} を直接観測しながら、 $V_{CE} = (V_{CC} - V_E)/2$ となる様に R_B を調整する方法も考えられるが、…

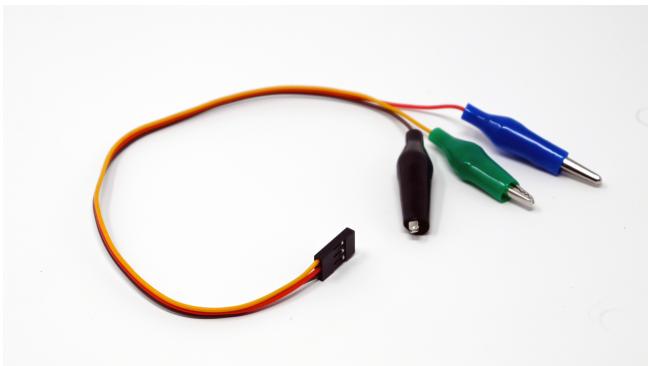


図 1.66 自作プローブ

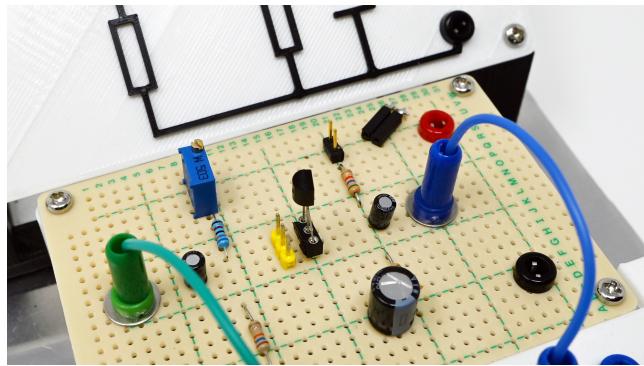
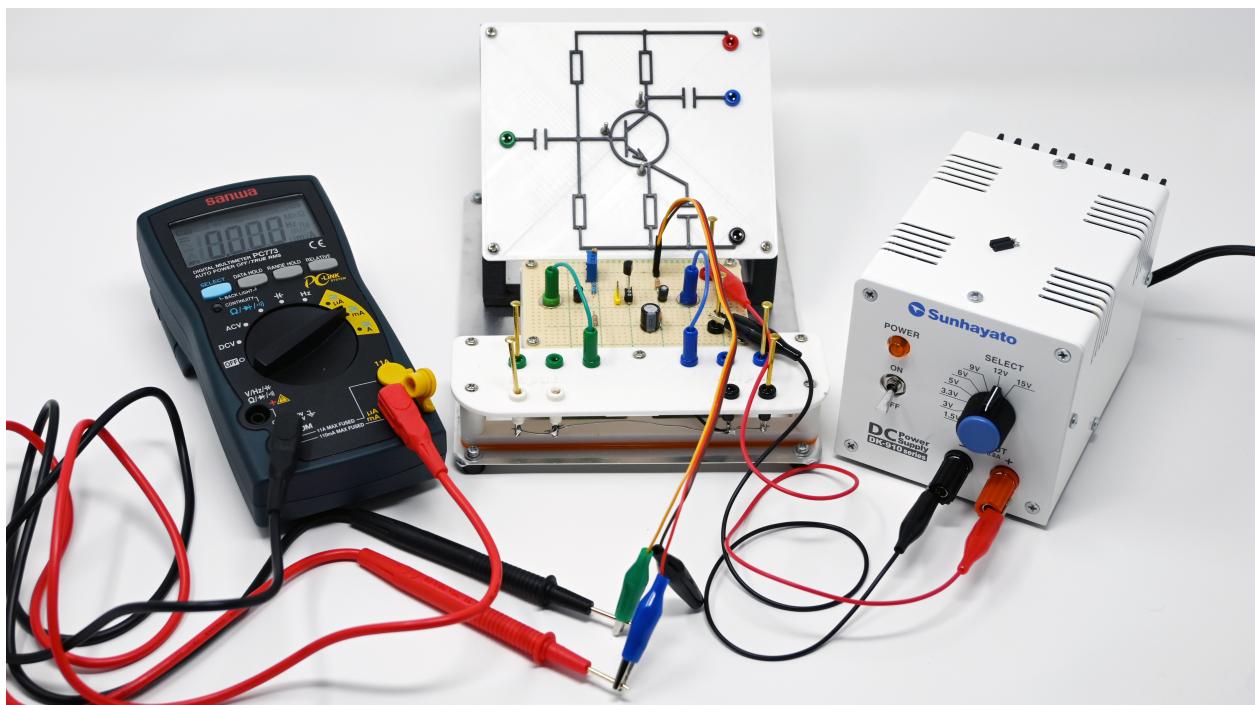


図 1.67 ショートピンを外したところ

図 1.68 I_C を測定して、 $I_C = 1\text{mA}$ となる様に R_B の半固定抵抗器を調整する

2SC1815Orange

表 1.23 教科書の回路における実測値（回路計による）2SC1815O

項目番号	項目	実測値	備考
1	R_E	1.200 kΩ	エミッタ端子と GND 端子の間で測定*8
2	R_C	5.571 kΩ	コレクタ端子と V_{CC} の+端子の間で測定
3	R_A	15.90 kΩ	ベース端子と GND 端子の間で測定
4	R_B	83.23 kΩ	ベース端子と V_{CC} の+端子の間で測定
5	V_{CC}	12.30 V	DC12V
6	h_{FE}	117	2SC1815-O
7	I_C	1000.0 μA	$I_C = 1mA$ になるように R_B を調整した
8	I_B	8.02 μA	
9	I_E	578.5 μA	?
10	I_A	115.9 μA	($20 \times I_B = 20 \times 8.02 = 160.4 \mu A$)
11	R_B の電流	124.3 μA	$I_A + I_B = 115.9 + 8.02 = 123.92 \mu A$
12	全電流	1.124 mA	$I_A + I_B + I_C = 115.9 + 8.02 + 1000 = 1.12392 mA$
13	V_{RC}	5.571 V	設計時の目標は $V_{RC} \doteq V_{CE} = (V_{CC} - V_{RE})/2$
14	V_{CE}	5.529 V	$V_{RC} \doteq V_{CE}$ で最大値の大きな交流信号を出力できる
15	V_{BE}	0.6561 V	シリコン Tr の値
16	V_{RE}	1.212 V	設計時の条件は、 V_{CC} の 10% = (1.23) V
17	$V_B = V_{RA}$	1.866 V	$V_{BE} + V_{RE} = 0.6561 + 1.212 = (1.8681) V$
18	$V_C = V_{RE} + V_{CE}$	6.737 V	$V_{CC} - V_{RC} = 12.3 - 5.571 = (6.729) V$

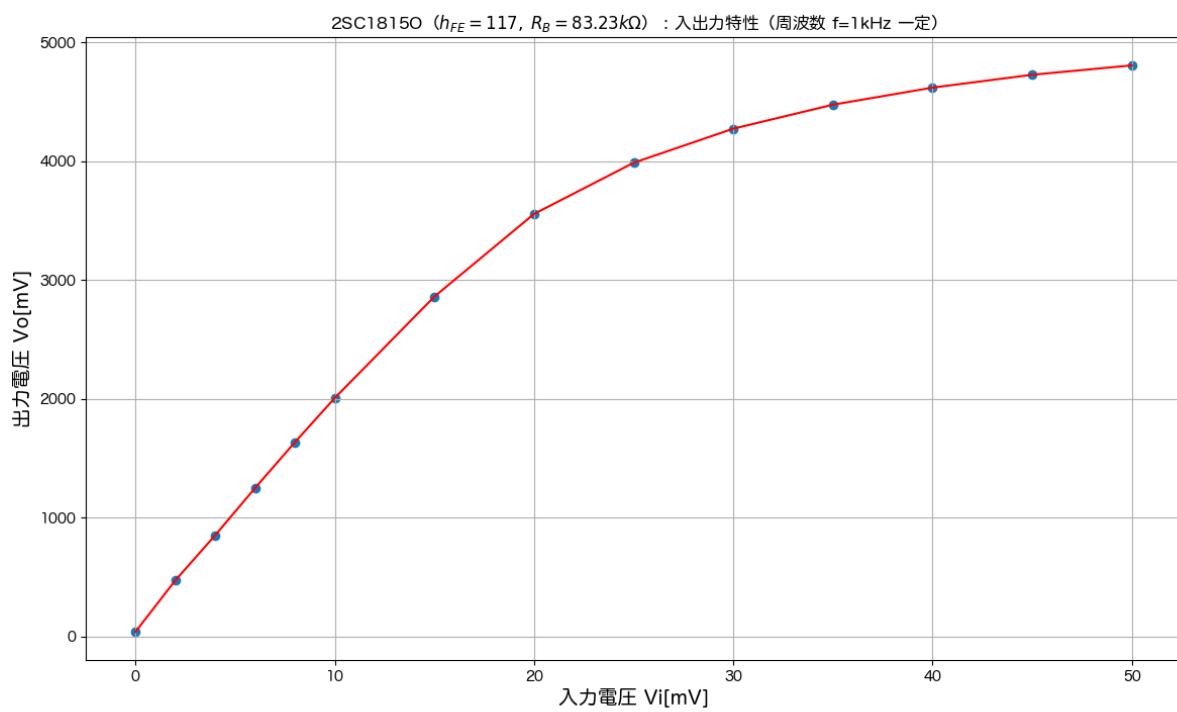
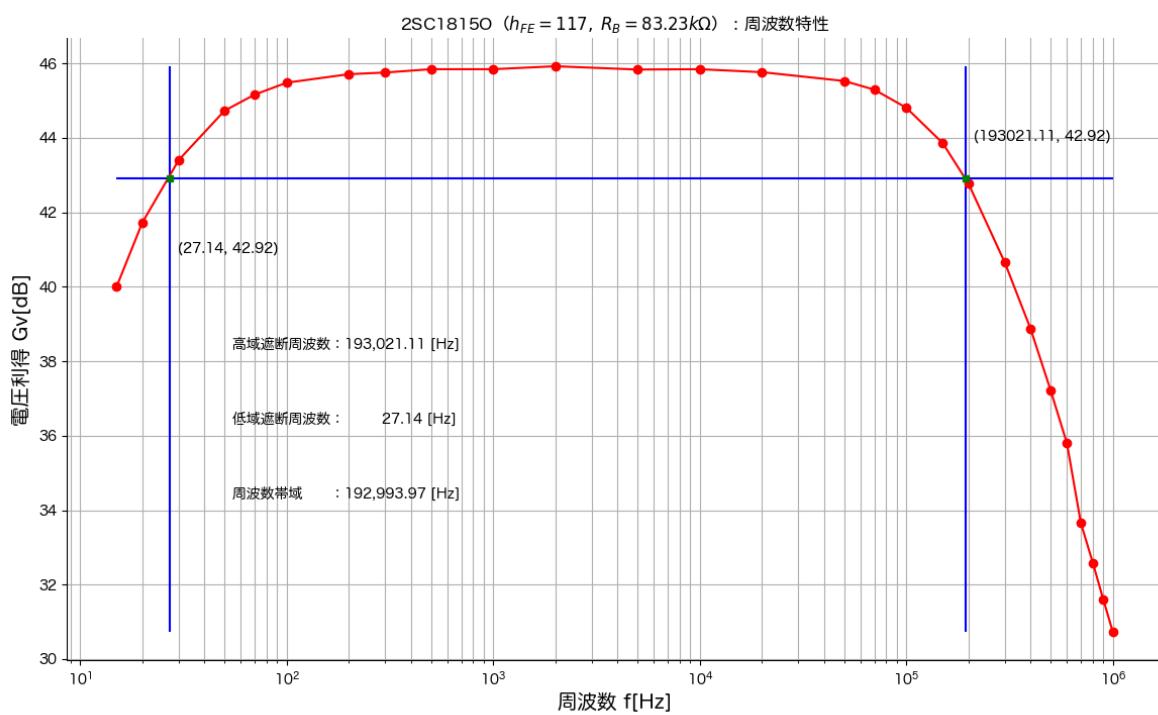
表 1.24 教科書の回路における実測値（入出力特性：周波数 1 kHz 一定）

入力電圧 V_i [mV]	0	2	4	6	8	10	15	20	25	30
出力電圧 V_o [mV]	38.6	471.8	851.7	1249	1635	2007	2861	3557	3988	4275
	35	40	45	50						
	4477	4621	4729	4808						

表 1.25 教科書の回路における実測値（周波数特性：入力電圧 $V_i = 5 mV$ 一定）

周波数 f[Hz]	15	20	30	50	70	100	200	300	500	1k
出力電圧 V_o [mV]	500	610	740	862	906	940	965	970	980	980
	2k	5k	10k	20k	50k	70k	100k	150k	200k	300k
	989	979	980	971	945	920	870	780	688	539
	400k	500k	600k	700k	800k	900k	1M			
	439	363	308	241	213	190	172			

*8 抵抗値の測定ではトランジスタを実習装置から取り外す

図 1.69 入出力特性 (2SC1815O: $h_{FE} = 117$, $R_B = 83.23\text{k}\Omega$)図 1.70 周波数特性 (2SC1815O: $h_{FE} = 117$, $R_B = 83.23\text{k}\Omega$)

2SC1815Yellow

表 1.26 教科書の回路における実測値（回路計による）2SC1815Y

項目番号	項目	実測値	備考
1	R_E	1.200 kΩ	エミッタ端子と GND 端子の間で測定
2	R_C	5.571 kΩ	コレクタ端子と V_{CC} の+端子の間で測定 ⁹
3	R_A	15.90 kΩ	ベース端子と GND 端子の間で測定
4	R_B	85.83 kΩ	ベース端子と V_{CC} の+端子の間で測定
5	V_{CC}	12.30 V	DC12V
6	h_{FE}	176	2SC1815-Y
7	I_C	1000.1 μA	$I_C = 1mA$ になるように R_B を調整した
8	I_B	5.44 μA	
9	I_E	570.2 μA	?
10	I_A	114.6 μA	($20 \times I_B = 20 \times 5.44 = 108.8 \mu A$)
11	R_B の電流	120.3 μA	$I_A + I_B = 114.6 + 5.44 = 120.04 \mu A$
12	全電流	1.121 mA	$I_A + I_B + I_C = 114.6 + 5.44 + 1000.1 = 1.12014 mA$
13	V_{RC}	5.584 V	設計時の目標は $V_{RC} \doteq V_{CE} = (V_{CC} - V_{RE})/2$
14	V_{CE}	5.502 V	$V_{RC} \doteq V_{CE}$ で最大値の大きな交流信号を出力できる
15	V_{BE}	0.6372 V	シリコン Tr の値
16	V_{RE}	1.212 V	設計時の条件は、 V_{CC} の 10% = (1.23) V
17	$V_B = V_{RA}$	1.848 V	$V_{BE} + V_{RE} = 0.6372 + 1.212 = (1.8492) V$
18	$V_C = V_{RE} + V_{CE}$	6.712 V	$V_{CC} - V_{RC} = 12.3 - 5.584 = (6.716) V$

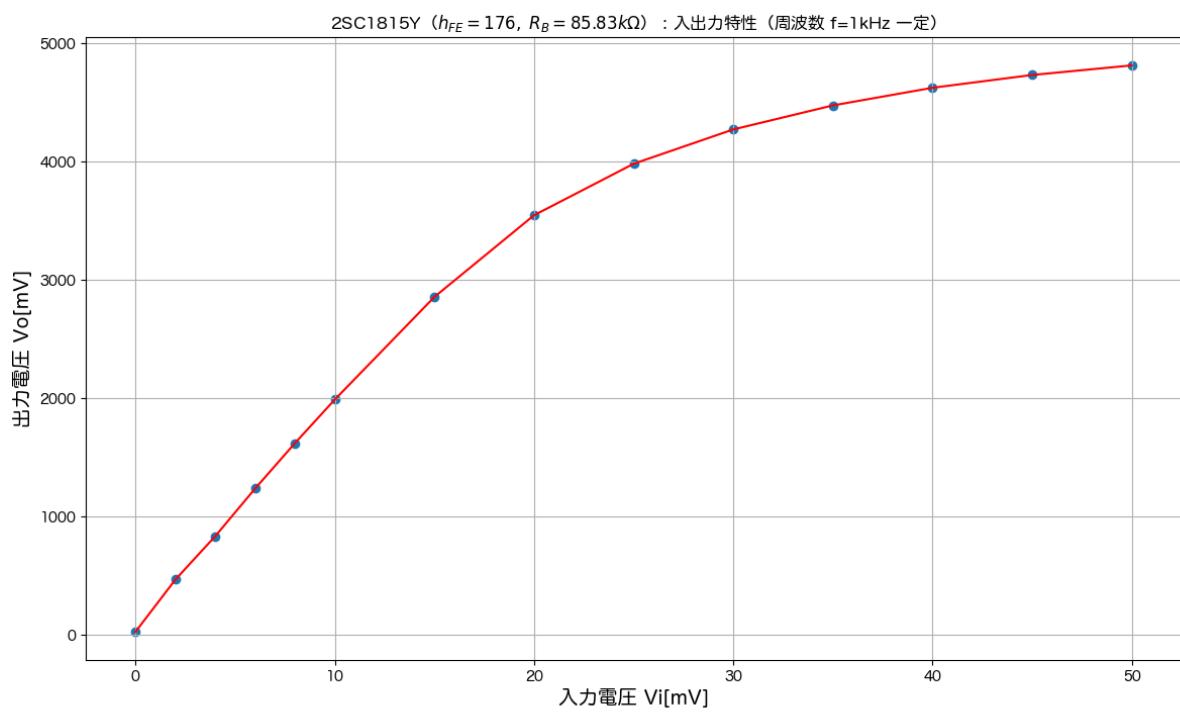
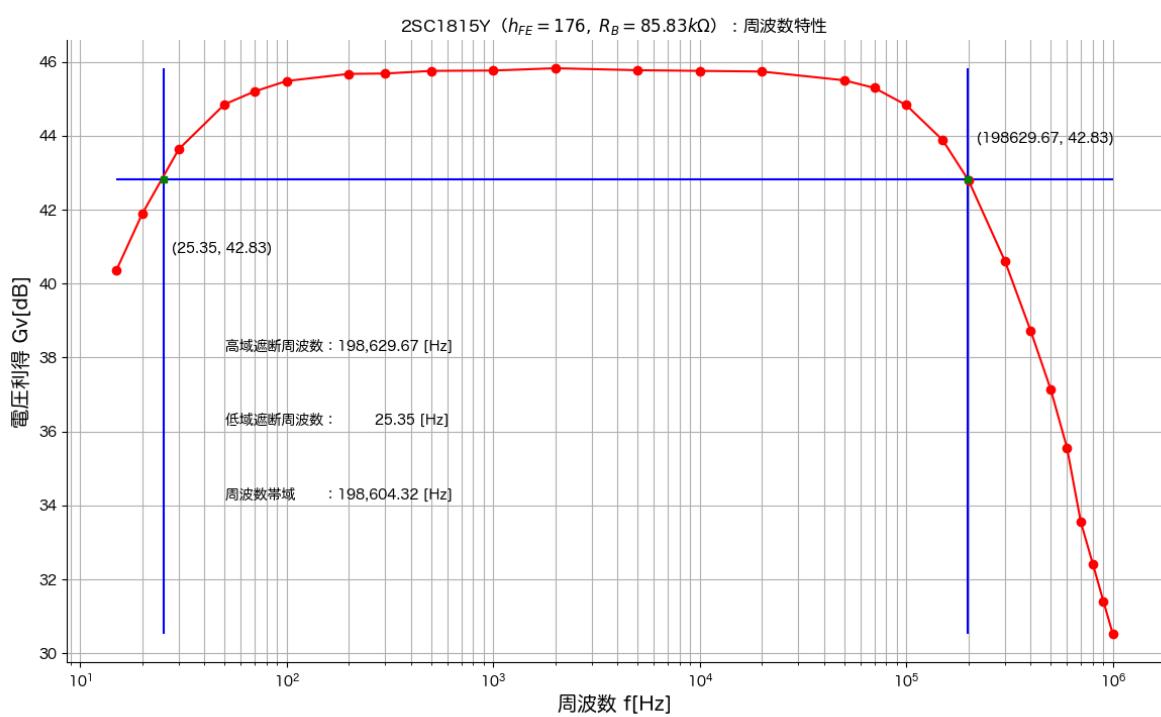
表 1.27 教科書の回路における実測値（入出力特性：周波数 1 kHz 一定）

入力電圧 V_i [mV]	0	2	4	6	8	10	15	20	25	30
出力電圧 V_o [mV]	29	469.4	836.1	1238	1622	1990	2857	3547	3982	4272
	35	40	45	50						
	4475	4624	4732	4813						

表 1.28 教科書の回路における実測値（周波数特性：入力電圧 $V_i = 5 mV$ 一定）

周波数 f[Hz]	15	20	30	50	70	100	200	300	500	1k
出力電圧 V_o [mV]	522	622	760	874	910	940	961	962	970	971
	2k	5k	10k	20k	50k	70k	100k	150k	200k	300k
	978	972	970	968	942	920	872	782	690	537
	400k	500k	600k	700k	800k	900k	1M			
	432	360	300	238	209	186	168			

⁹ 抵抗値の測定ではトランジスタを実習装置から取り外す

図 1.71 入出力特性 (2SC1815Y: $h_{FE} = 176$, $R_B = 85.83k\Omega$)図 1.72 周波数特性 (2SC1815Y: $h_{FE} = 176$, $R_B = 85.83k\Omega$)

2SC1815GR

表 1.29 教科書の回路における実測値（回路計による）2SC1815GR

項目番号	項目	実測値	備考
1	R_E	1.200 kΩ	エミッタ端子と GND 端子の間で測定
2	R_C	5.571 kΩ	コレクタ端子と V_{CC} の+端子の間で測定
3	R_A	15.90 kΩ	ベース端子と GND 端子の間で測定 ^{*10}
4	R_B	87.42 kΩ	ベース端子と V_{CC} の+端子の間で測定
5	V_{CC}	12.30 V	DC12V
6	h_{FE}	260	2SC1815-GR
7	I_C	1000.1 μA	$I_C = 1mA$ になるように R_B を調整した
8	I_B	3.77 μA	
9	I_E	994 μA	
10	I_A	115 μA	$(20 \times I_B = 20 \times 3.77 = 75.4 \mu A)$
11	R_B の電流	119 μA	$I_A + I_B = 115 + 3.77 = 118.77 \mu A$
12	全電流	1.118 mA	$I_A + I_B + I_C = 114.6 + 5.44 + 1000.1 = 1.11877 mA$
13	V_{RC}	5.581 V	設計時の目標は $V_{RC} \doteq V_{CE} = (V_{CC} - V_{RE})/2$
14	V_{CE}	5.504 V	$V_{RC} \doteq V_{CE}$ で最大値の大きな交流信号を出力できる
15	V_{BE}	0.6327 V	シリコン Tr の値
16	V_{RE}	1.210 V	設計時の条件は、 V_{CC} の 10% = (1.23) V
17	$V_B = V_{RA}$	1.841 V	$V_{BE} + V_{RE} = 0.6327 + 1.21 = (1.8427) V$
18	$V_C = V_{RE} + V_{CE}$	6.711 V	$V_{CC} - V_{RC} = 12.3 - 5.581 = (6.719) V$

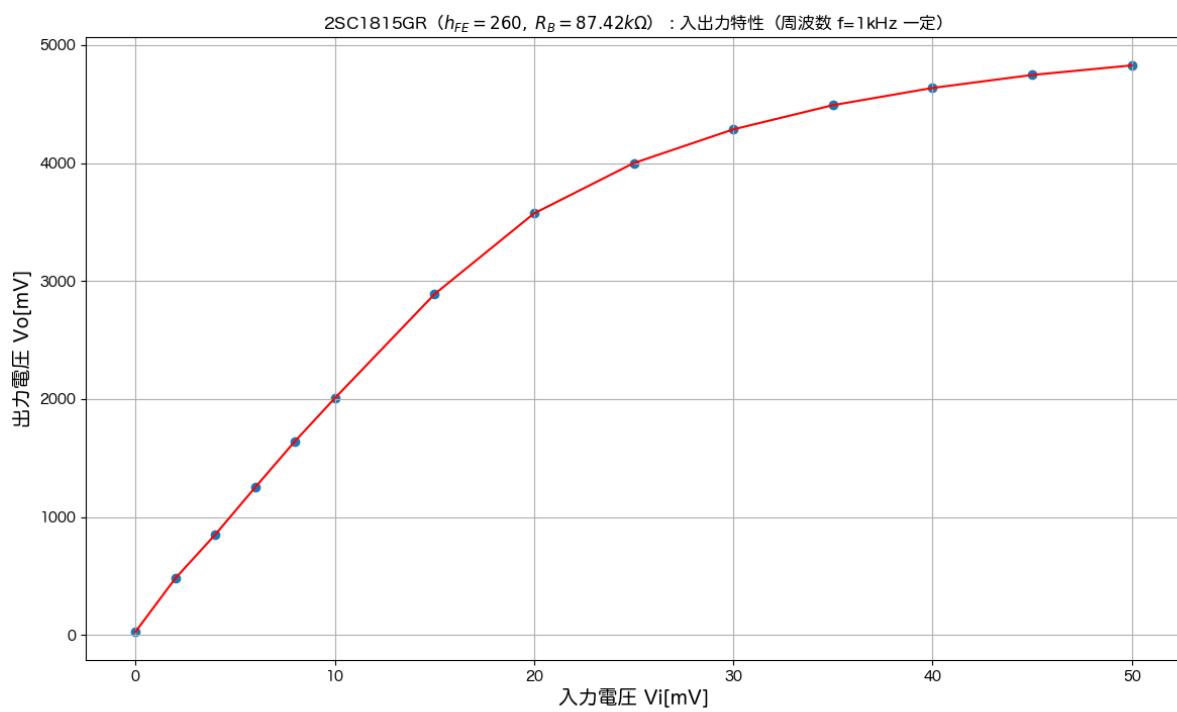
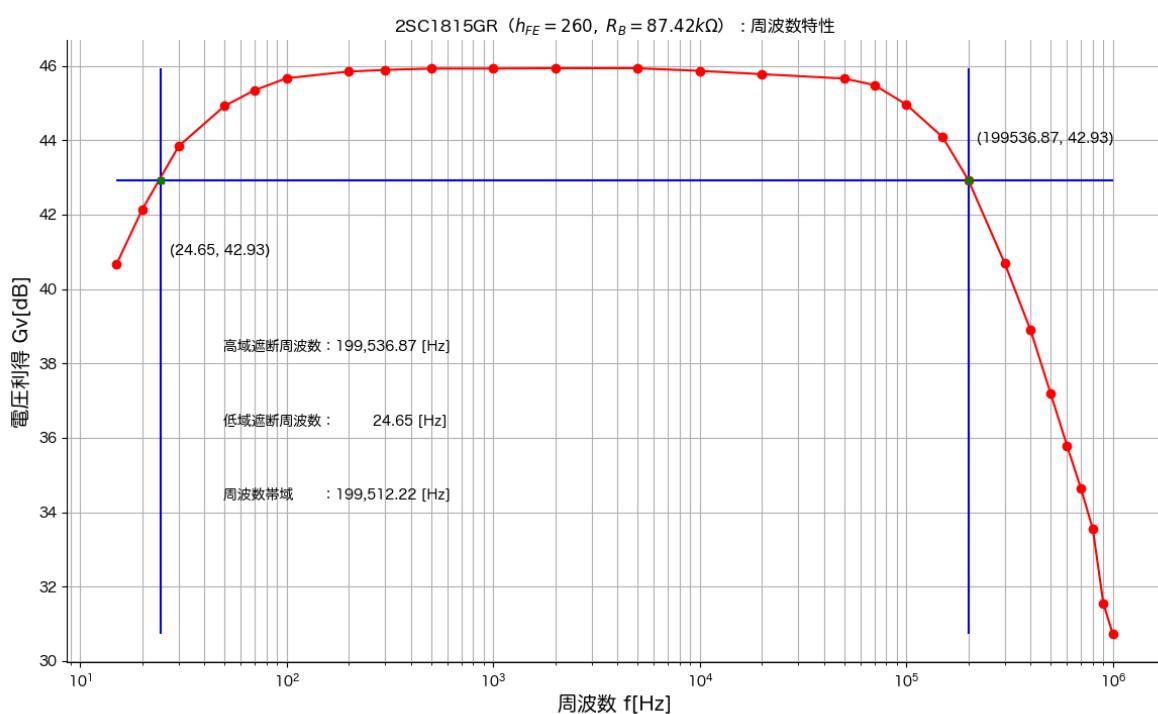
表 1.30 教科書の回路における実測値（入出力特性：周波数 1 kHz 一定）

入力電圧 V_i [mV]	0	2	4	6	8	10	15	20	25	30
出力電圧 V_o [mV]	29.2	482.1	852.1	1251	1643	2007	2888	3573	3999	4285
	35	40	45	50						
	4490	4636	4746	4827						

表 1.31 教科書の回路における実測値（周波数特性：入力電圧 $V_i = 5 mV$ 一定）

周波数 f[Hz]	15	20	30	50	70	100	200	300	500	1k
出力電圧 V_o [mV]	540	640	778	881	925	960	980	985	989	989
	2k	5k	10k	20k	50k	70k	100k	150k	200k	300k
	990	990	982	972	959	940	885	800	700	541
	400k	500k	600k	700k	800k	900k	1M			
	440	362	308	270	238	189	172			

^{*10} 抵抗値の測定ではトランジスタを実習装置から取り外す

図 1.73 入出力特性 (2SC1815GR: $h_{FE} = 260$, $R_B = 87.42k\Omega$)図 1.74 周波数特性 (2SC1815GR: $h_{FE} = 260$, $R_B = 87.42k\Omega$)

2SC1815BLue

表 1.32 教科書の回路における実測値（回路計による）2SC1815BL

項目番号	項目	実測値	備考
1	R_E	1.200 kΩ	エミッタ端子と GND 端子の間で測定
2	R_C	5.571 kΩ	コレクタ端子と V_{CC} の+端子の間で測定
3	R_A	15.90 kΩ	ベース端子と GND 端子の間で測定
4	R_B	90.78 kΩ	ベース端子と V_{CC} の+端子の間で測定 ^{*11}
5	V_{CC}	12.30 V	DC12V
6	h_{FE}	593	2SC1815-BL
7	I_C	1000 μA	$I_C = 1mA$ になるように R_B を調整した
8	I_B	1.61 μA	
9	I_E	558.9 μA	?
10	I_A	113.0 μA	($20 \times I_B = 20 \times 1.61 = 32.2 \mu A$)
11	R_B の電流	114.7 μA	$I_A + I_B = 113 + 1.61 = 114.6 \mu A$
12	全電流	1.114 mA	$I_A + I_B + I_C = 114.6 + 5.44 + 1000.1 = 1.11461 mA$
13	V_{RC}	5.569 V	設計時の目標は $V_{RC} \doteq V_{CE} = (V_{CC} - V_{RE})/2$
14	V_{CE}	5.534 V	$V_{RC} \doteq V_{CE}$ で最大値の大きな交流信号を出力できる
15	V_{BE}	0.6097 V	シリコン Tr の値
16	V_{RE}	1.205 V	設計時の条件は、 V_{CC} の 10% = (1.23) V
17	$V_B = V_{RA}$	1.812 V	$V_{BE} + V_{RE} = 0.6097 + 1.205 = (1.8147) V$
18	$V_C = V_{RE} + V_{CE}$	6.734 V	$V_{CC} - V_{RC} = 12.3 - 5.569 = (6.731) V$

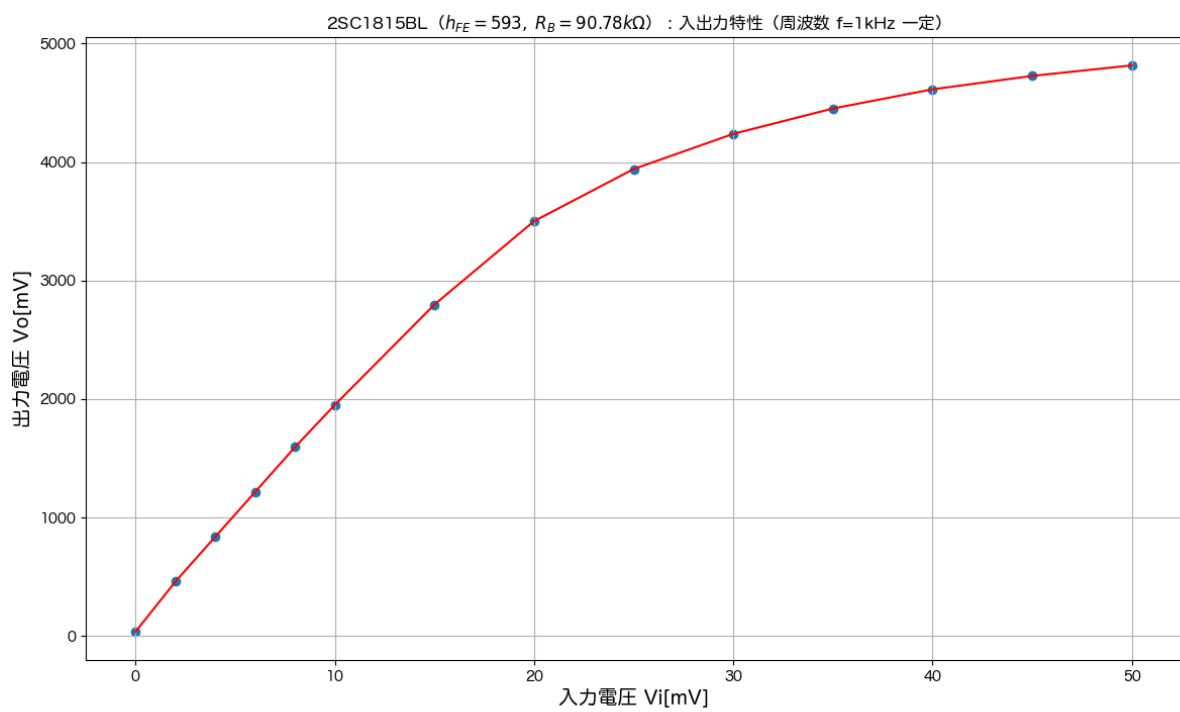
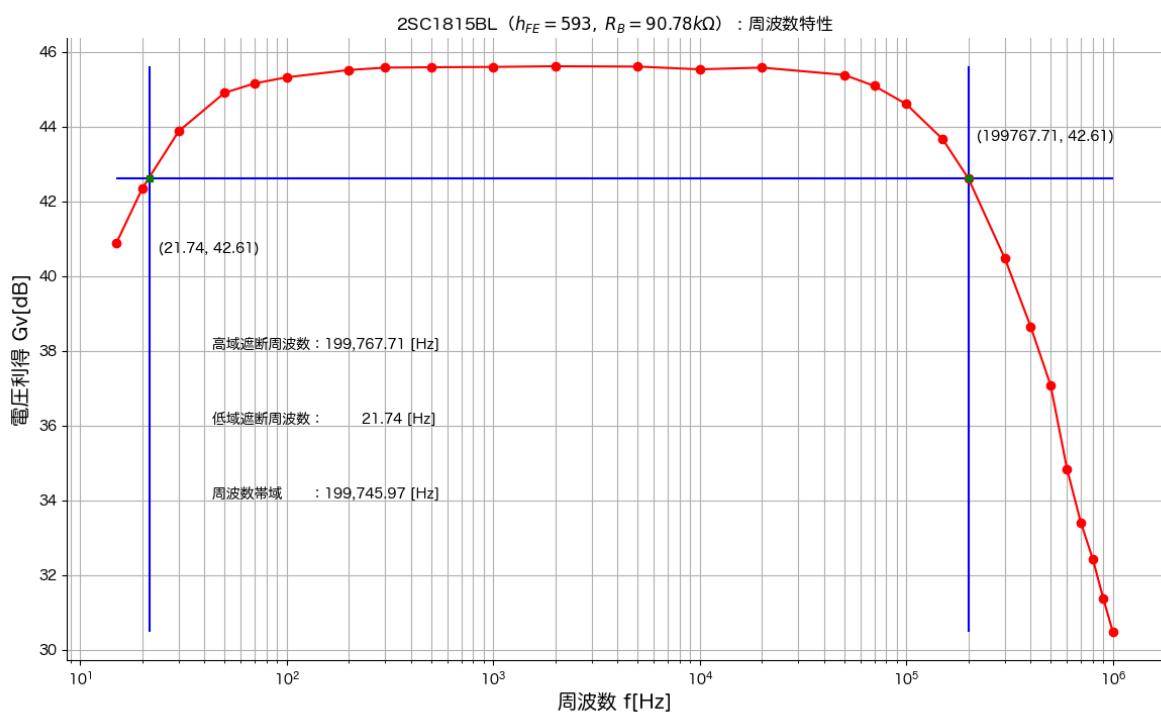
表 1.33 教科書の回路における実測値（入出力特性：周波数 1 kHz 一定）

入力電圧 V_i [mV]	0	2	4	6	8	10	15	20	25	30
出力電圧 V_o [mV]	36.0	459.1	837.2	1215	1594	1950	2797	3501	3941	4238
	35	40	45	50						
	4452	4614	4727	4816						

表 1.34 教科書の回路における実測値（周波数特性：入力電圧 $V_i = 5 mV$ 一定）

周波数 f[Hz]	15	20	30	50	70	100	200	300	500	1k
出力電圧 V_o [mV]	554	655	781	879	905	922	943	950	951	952
	2k	5k	10k	20k	50k	70k	100k	150k	200k	300k
	954	953	945	950	929	898	849	762	675	528
	400k	500k	600k	700k	800k	900k	1M			
	428	357	276	234	209	185	167			

^{*11} 抵抗値の測定ではトランジスタを実習装置から取り外す

図 1.75 入出力特性 (2SC1815BL: $h_{FE} = 593$, $R_B = 90.78k\Omega$)図 1.76 周波数特性 (2SC1815BL: $h_{FE} = 593$, $R_B = 90.78k\Omega$)

1.3 プログラム

1.3.1 主プログラム

ソースコード 1.1 主プログラム

```
1 from quadrant import QuadrantExp
2 from frequency import FrequencyExp
3
4 if __name__ == '__main__':
5     transistors1 = ['2SC1815orange', '2SC1815Yellow', '2SC1815Green', '2SC1815Blue']
6     transistors2 = ['2SC1815 ($h_FE=117,;R_B=83.23k\Omega$)', \
7                      '2SC1815Y ($h_FE=176,;R_B=85.83k\Omega$)', \
8                      '2SC1815GR ($h_FE=260,;R_B=87.42k\Omega$)', \
9                      '2SC1815BL ($h_FE=593,;R_B=90.78k\Omega$)']
10
11     # Static Character
12     transistor = 0
13     q = QuadrantExp(transistor, transistors1[transistor])
14     p = q.experiment()
15     p.savefig('static'+str(transistor)+'.png')
16     p.show()
17     #
18     Ib='Ib40'
19     p = q.experiment01( Ib )
20     p.savefig('staticE01'+Ib+'.png')
21     p.show()
22     p = q.experiment02()
23     p.savefig('staticE02.png')
24     p.show()
25     p = q.experiment03()
26     p.savefig('staticE03.png')
27     p.show()
28     p = q.experiment04()
29     p.savefig('staticE04.png')
30     p.show()
31     #
32     # Input-Output Character
33     transistor = 0
34     f = FrequencyExp(transistor, transistors2[transistor], True)
35     p = f.ioexperiment(transistor)
36     p.savefig('iochar'+str(transistor)+'.png')
37     p.show()
38     #
39     # Frequency Character
40     p = f.freqexperiment(transistor)
41     p.savefig('freqchar'+str(transistor)+'.png')
42     p.show()
```

1.3.2 静特性

ソースコード 1.2 静特性

```

1 import numpy as np
2 from interpolate import Interpolate
3 import matplotlib.pyplot as plt
4 from data_static import Static
5
6 class QuadrantExp:
7     def __init__(self, transistor=0, name='2SC1815GReen'):
8         self.data = Static(transistor)
9         self.name = name
10        self.markers = [".", ",", "o", "v", "^", "<", ">", "1", "2", "3", "4", "8",
11                      "s", "p", "*", "h", "H", "+", "x", "D", "d", "|", "_",
12                      "None", None, "", "$x$", "$\alpha$", "$\beta$", "$\gamma$"]
13        ]
14        plt.rcParams['font.family'] = "Hiragino Maru Gothic Pro"
15        plt.figure(figsize=(14, 8), dpi=100)
16        plt.subplots_adjust(wspace=0.2, hspace=0.3)
17        plt.get_current_fig_manager().canvas.set_window_title(self.name + ' 静特性',
18        )
19        self.ip = Interpolate()
20
21    def experiment(self):
22        self.experiment1()
23        self.experiment2()
24        self.experiment3()
25        return plt
26
27    def experiment1(self):
28        Vce, Ic20, Ic40, Ic60, Ic80 = self.data.getVceIc()
29        VceL, IcL = self.data.getLoadI()
30        ax1 = plt.subplot(2, 2, 2)
31        ax1.grid(True)
32        ax1.set_xlim(0, 10)
33        #ax1.set_ylim(0, 35)
34        ax1.set_title('V_{CE} - I_C 特性 = 出力特性 ($I_B$一定) / 直流負荷線 (' +
35                      '$E_C=9$V; $R_C=390\Omega$' ')
36        ax1.set_xlabel('コレクターエミッタ間電圧 $V_{CE}$ [V]')
37        ax1.set_ylabel('コレクタ電流 $I_C$ [mA]')
38        ax1.plot(Vce, Ic20, label='$I_B=20\mu A$', marker=self.markers[0])
39        ax1.plot(Vce, Ic40, label='$I_B=40\mu A$', marker=self.markers[14])
40        ax1.plot(Vce, Ic60, label='$I_B=60\mu A$', marker=self.markers[17])
41        ax1.plot(Vce, Ic80, label='$I_B=80\mu A$', marker=self.markers[18])
42        ax1.legend(loc='upper right')
43        ax1.plot(VceL, IcL, label='Ec=9V, R_c=390\Omega', marker=self.markers[4])
44
45    def experiment2(self):
46        Ib, Ic = self.data.getIbIc()
47        ax2 = plt.subplot(2, 2, 1)
48        ax2.set_xlim(0, max(Ib)) #80
49        #ax2.set_ylim(0, 35)
50        ax2.grid(True)
51        ax2.invert_xaxis()
52        ax2.set_title('$I_B - I_C$ 特性 ($V_{CE}=5$V一定) ')
53        ax2.set_xlabel('ベース電流 $I_B$ [$\mu A]$')
54        ax2.set_ylabel('コレクタ電流 $I_C$ [mA]')
55        ax2.scatter(Ib, Ic, label="observed")
56        ax2.plot(Ib, Ic, label='$V_{CE}=5$V')
57
58    def experiment3(self):

```

```
56     Vbe, Ib = self.data.getVbeIb()
57     ax3 = plt.subplot(2, 2, 3)
58     ax3.set_xlim(0, max(Ib))    #80.0
59     #ax3.set_ylim(0, 0.8)
60     ax3.grid(True)
61     ax3.invert_yaxis()
62     ax3.invert_xaxis()
63     ax3.set_title('V_{BE}-I_B特性=入力特性 ($V_{CE}=5V一定)')
64     ax3.set_ylabel('ベースエミッタ間電圧 $V_{BE}[V]')
65     ax3.set_xlabel('ベース電流 $I_B[\mu A]')
66     _, method = self.ip.getMethod(9)
67     x_latent = np.linspace(min(Ib), max(Ib), 100)
68     fitted_curve = method(Ib, Vbe)
69     ax3.scatter(Ib, Vbe, label="observed")
70     ax3.plot(x_latent, fitted_curve(x_latent), c="red", label="fitted")
71
72 def experiment01(self, Ib = 'Ib40'):
73     ttl=''
74     if Ib == 'Ib20':
75         ttl = '$20;\mu A$'
76     elif Ib == 'Ib40':
77         ttl = '$40;\mu A$'
78     elif Ib == 'Ib60':
79         ttl = '$60;\mu A$'
80     elif Ib == 'Ib80':
81         ttl = '$80;\mu A$'
82     Vce, Tr = self.data.getTrEx01(Ib)
83     # サブプロットを描画する領域を作成
84     fig = plt.figure(figsize=(14, 8), dpi=100)
85     # figにAxesを1つ追加
86     ax4 = fig.add_subplot(111)
87     ax4.grid(True)
88     ax4.set_xlim(0, max(Vce[0]))    #10
89     #ax4.set_ylim(0, 35)
90     ax4.set_title('V_{CE}-I_C特性 = 出力特性 ($I_B=' + ttl + '一定)')
91     ax4.set_xlabel('コレクターエミッタ間電圧 $V_{CE}[V]')
92     ax4.set_ylabel('コレクタ電流 $I_C[mA]')
93     for i in range(4):
94         mylabel=''
95         if i==0:
96             mylabel = '2SC1815-0'
97         elif i==1:
98             mylabel = '2SC1815-Y'
99         elif i==2:
100            mylabel = '2SC1815-GR'
101        elif i==3:
102            mylabel = '2SC1815-BL'
103        ax4.scatter(Vce[i], Tr[i], marker=self.markers[i+1])
104        ax4.plot(Vce[i], Tr[i], label=mylabel, marker=self.markers[i+1])
105    ax4.legend(loc='upper right')
106    return plt
107
108 def experiment02(self):
109     Ib, Tr = self.data.getTrEx02()
110     # サブプロットを描画する領域を作成
111     fig = plt.figure(figsize=(14, 8), dpi=100)
112     # figにAxesを1つ追加
113     ax5 = fig.add_subplot(111)
114     ax5.set_xlim(0, max(Ib[0]))  #80
115     #ax5.set_ylim(0, 35)
116     ax5.grid(True)
117     #ax5.invert_xaxis()
118     ax5.set_title('I_B-I_C特性 ($V_{CE}=5V一定)')
119     ax5.set_xlabel('ベース電流 $I_B[\mu A]')
120     ax5.set_ylabel('コレクタ電流 $I_C[mA]')
```

```
121     for i in range(4):
122         mylabel=''
123         if i==0:
124             mylabel = '2SC1815-0'
125         elif i==1:
126             mylabel = '2SC1815-Y'
127         elif i==2:
128             mylabel = '2SC1815-GR'
129         elif i==3:
130             mylabel = '2SC1815-BL'
131         ax5.scatter(Ib[i], Tr[i], marker=self.markers[i+1])
132         ax5.plot(Ib[i], Tr[i], label=mylabel, marker=self.markers[i+1])
133         ax5.legend(loc='upper_left')
134     return plt
135
136 def experiment03(self):
137     Vbe, Tr = self.data.getTrEx03()
138     # サブプロットを描画する領域を作成
139     fig = plt.figure(figsize=(14, 8), dpi=100)
140     # figにAxesを1つ追加
141     ax6 = fig.add_subplot(111)
142     #ax6.set_xlim(0, max(Vbe[0]))    # 80.0
143     #ax6.set_ylim(0, 0.8)
144     ax6.grid(True)
145     #ax6.invert_yaxis()
146     #ax6.invert_xaxis()
147     ax6.set_title('V_{BE}-I_B特性=入力特性 ($V_{CE}=5$V一定)')
148     ax6.set_ylabel('ベース-エミッタ間電圧 $V_{BE}$ [V]')
149     ax6.set_xlabel('ベース電流 $I_B [\mu A]')
150     _, method = self.ip.getMethod(9)
151     for i in range(4):
152         mylabel=''
153         if i==0:
154             mylabel = '2SC1815-0'
155         elif i==1:
156             mylabel = '2SC1815-Y'
157         elif i==2:
158             mylabel = '2SC1815-GR'
159         elif i==3:
160             mylabel = '2SC1815-BL'
161         #x_latent = np.linspace(min(Vbe[i]), max(Vbe[i]), 100)
162         #fitted_curve = method(Vbe[i], Tr[i])
163         ax6.scatter(Vbe[i], Tr[i], marker=self.markers[i+1])
164         #ax6.plot(x_latent, fitted_curve(x_latent), label=mylabel)
165         ax6.plot(Vbe[i], Tr[i], label=mylabel, marker=self.markers[i+1])
166         ax6.legend(loc='upper_left')
167     return plt
168
169 def experiment04(self):
170     VceL, Tr = self.data.getTrEx04()
171     # サブプロットを描画する領域を作成
172     fig = plt.figure(figsize=(14, 8), dpi=100)
173     # figにAxesを1つ追加
174     ax7 = fig.add_subplot(111)
175     ax7.grid(True)
176     ax7.set_xlim(0, max(VceL[0]))    #10
177     #ax7.set_ylim(0, 35)
178     ax7.set_title('直流負荷線 ($E_C=9V; R_C=390\Omega$)')
179     ax7.set_xlabel('コレクターエミッタ間電圧 $V_{CE}$ [V]')
180     ax7.set_ylabel('コレクタ電流 $I_C$ [mA]')
181     for i in range(4):
182         mylabel=''
183         if i==0:
184             mylabel = '2SC1815-0'
185             mylabel = '2SC1815-Y'
```

```

186         mylabel = '2SC1815-Y'
187     elif i==2:
188         mylabel = '2SC1815-GR'
189     elif i==3:
190         mylabel = '2SC1815-BL'
191     ax7.scatter(VceL[i], Tr[i], marker=self.markers[i+1])
192     ax7.plot(VceL[i], Tr[i], label=mylabel, marker=self.markers[i+1])
193     ax7.legend(loc='upper right')
194 return plt

```

1.3.3 静特性用データ

ソースコード 1.3 静特性用データ

```

1 class Static:
2     def __init__(self, transistor=0):
3         self.transistor = transistor
4         self.Vce_vccic = [[0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 2.0, 5.0, 8.0, 10.0], \
5                            [0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 2.0, 5.0, 8.0, 10.0], \
6                            [0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 2.0, 5.0, 8.0, 10.0], \
7                            [0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 2.0, 5.0, 8.0, 10.0]]
8         self.Ic20_vccic = [[2.251, 2.398, 2.402, 2.404, 2.408, 2.419, 2.448, 2.477, \
9                            2.495], \
10                           [3.275, 3.526, 3.537, 3.545, 3.553, 3.600, 3.698, 3.811, \
11                            3.879], \
12                           [5.218, 5.86, 5.898, 5.922, 5.948, 6.033, 6.302, 6.495, \
13                            6.691], \
14                           [8.919, 10.684, 10.998, 11.124, 11.19, 11.51, 12.46, \
15                            13.41, 14.14]]
16         self.Ic40_vccic = [[4.282, 4.755, 4.771, 4.781, 4.791, 4.830, 4.924, 5.011, \
17                            5.057], \
18                           [6.255, 6.961, 7.016, 7.047, 7.068, 7.189, 7.550, 7.900, \
19                            8.148], \
20                           [9.108, 11.068, 11.62, 11.7, 11.76, 11.99, 12.75, 13.52, \
21                            14.12], \
22                           [14.56, 17.98, 19.90, 21.02, 21.66, 22.71, 25.51, 28.32, \
23                            29.68]]
24         self.Ic60_vccic = [[6.240, 7.033, 7.108, 7.127, 7.143, 7.207, 7.397, 7.585, \
25                            7.700], \
26                           [8.841, 10.20, 10.45, 10.52, 10.63, 10.98, 11.65, 12.42, \
27                            13.06], \
28                           [12.26, 15.03, 16.6, 17.24, 17.42, 17.89, 19.36, 20.96, \
29                            22.34], \
30                           [18.70, 23.04, 25.69, 27.90, 29.44, 32.23, 37.41, 41.66, \
31                            43.92]]
32         self.Ic80_vccic = [[7.971, 9.165, 9.424, 9.464, 9.495, 9.624, 9.943, 10.240, \
33                            10.430], \
34                           [11.16, 12.98, 13.60, 13.79, 13.90, 14.32, 15.54, 16.88, \
35                            17.79], \
36                           [14.98, 18.18, 20.4, 22.02, 22.9, 24.18, 27.11, 30.47, \
37                            32.6], \
38                           [22.45, 27.13, 30.22, 32.77, 35.13, 41.80, 49.16, 53.90, \
39                            56.02]]
40         self.Ib_ibic = [[0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80], \
41                           [0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80], \
42                           [0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80], \
43                           [0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80]]
44         self.Ic_ibic = [[0, 1.229, 2.457, 3.691, 4.924, 6.179, 7.427, 8.689, 9.958], \
45                           [0, 1.814, 3.679, 5.565, 7.505, 9.453, 11.44, 13.49, 15.50], \
46                           [0, 3.098, 6.306, 9.53, 12.84, 16.2, 19.63, 23.1, 26.62], \
47                           [0, 6.189, 12.43, 18.64, 24.92, 31.09, 37.26, 42.95, 48.31]]
48         self.Vbe_vbeib = [[0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
49                           [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
50                           [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
51                           [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
52                           [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
53                           [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
54                           [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
55                           [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
56                           [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
57                           [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
58                           [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
59                           [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
60                           [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
61                           [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
62                           [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
63                           [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
64                           [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
65                           [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
66                           [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
67                           [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
68                           [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
69                           [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
70                           [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
71                           [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
72                           [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
73                           [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
74                           [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
75                           [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
76                           [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
77                           [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
78                           [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
79                           [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
80                           [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
81                           [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
82                           [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
83                           [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
84                           [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
85                           [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
86                           [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
87                           [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
88                           [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
89                           [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
90                           [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
91                           [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
92                           [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
93                           [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
94                           [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
95                           [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
96                           [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
97                           [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
98                           [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
99                           [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
100                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
101                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
102                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
103                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
104                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
105                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
106                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
107                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
108                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
109                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
110                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
111                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
112                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
113                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
114                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
115                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
116                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
117                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
118                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
119                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
120                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
121                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
122                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
123                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
124                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
125                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
126                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
127                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
128                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
129                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
130                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
131                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
132                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
133                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
134                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
135                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
136                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
137                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
138                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
139                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
140                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
141                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
142                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
143                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
144                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
145                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
146                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
147                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
148                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
149                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
150                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
151                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
152                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
153                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
154                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
155                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
156                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
157                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
158                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
159                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
160                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
161                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
162                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
163                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
164                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
165                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
166                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
167                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
168                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
169                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
170                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
171                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
172                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
173                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
174                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
175                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
176                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
177                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
178                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
179                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
180                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
181                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
182                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
183                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
184                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
185                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
186                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
187                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
188                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
189                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
190                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
191                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
192                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
193                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
194                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
195                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.664, 0.6814, 0.7036, 0.7136], \
196                          [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.6
```

```
33             [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.6523, 0.6670, 0.6787, 0.6838], \
34             [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.661, 0.677, 0.697, 0.705], \
35             [0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.6476, 0.6519, 0.6367, 0.6164]] \
36             ##
37     self.Ib_vbeib = [[0.01, 0.02, 0.03, 0.10, 1.21, 10.0, 20.0, 50.0, 80.0], \
38             [0.01, 0.02, 0.03, 0.12, 1.48, 10.0, 20.0, 50.0, 80.0], \
39             [0.0, 0.001, 0.01, 0.07, 1.24, 10.0, 20.0, 50.0, 80.0], \
40             [0.01, 0.02, 0.03, 0.11, 1.36, 10.0, 20.0, 50.0, 80.0]] \
41             #
42     self.Vce_loadl = [[9.0, 8.0, 7.0, 6.0, 5.0, 4.0, 3.0, 2.0, 1.0], \
43             [9.0, 8.0, 7.0, 6.0, 5.0, 4.0, 3.0, 2.0, 1.0], \
44             [9.0, 8.0, 7.0, 6.0, 5.0, 4.0, 3.0, 2.0, 1.0], \
45             [9.0, 8.0, 7.0, 6.0, 5.0, 4.0, 3.0, 2.0, 1.0]] \
46     self.Ic_loadl = [[0, 2.521, 5.052, 7.616, 10.134, 12.66, 15.22, 17.79, \
47             20.35], \
48             [0, 2.555, 5.057, 7.567, 10.118, 12.65, 15.21, 17.75, \
49             20.30], \
50             [0.0, 2.473, 5.085, 7.511, 10.083, 12.62, 15.18, 17.69, \
51             20.24], \
52             [0.0, 2.489, 5.089, 7.595, 10.144, 12.70, 15.26, 17.83, \
53             20.38]] ## \
54 
55 def getVceIc(self):
56     return self.Vce_vccic[self.transistor], self.Ic20_vccic[self.transistor],
57         self.Ic40_vccic[self.transistor], self.Ic60_vccic[self.transistor], self.
58         Ic80_vccic[self.transistor]
59 
60 def getIbIc(self):
61     return self.Ib_ibic[self.transistor], self.Ic_ibic[self.transistor]
62 
63 def getVbeIb(self):
64     return self.Vbe_vbeib[self.transistor], self.Ib_vbeib[self.transistor]
65 
66 def getLoadl(self):
67     return self.Vce_loadl[self.transistor], self.Ic_loadl[self.transistor]
68 
69 def getTrEx01(self, icurr='Ib20'):
70     if icurr=='Ib20':
71         return self.Vce_vccic, self.Ic20_vccic
72     elif icurr=='Ib40':
73         return self.Vce_vccic, self.Ic40_vccic
74     elif icurr=='Ib60':
75         return self.Vce_vccic, self.Ic60_vccic
76     elif icurr=='Ib80':
77         return self.Vce_vccic, self.Ic80_vccic
78 
79 def getTrEx02(self):
80     return self.Ib_ibic, self.Ic_ibic
81 
82 def getTrEx03(self):
83     return self.Vbe_vbeib, self.Ib_vbeib
84 
85 def getTrEx04(self):
86     return self.Vce_loadl, self.Ic_loadl
```

1.3.4 周波数特性

ソースコード 1.4 周波数特性

```

1 import math
2 import matplotlib.pyplot as plt
3 from data_freq import Frequency
4
5 class FrequencyExp:
6     def __init__(self, transistor=0, name='2SC1815Yellow', flag=True):
7         self.data = Frequency(transistor)
8         self.name = name
9         self.flag = flag
10        self.markers = [".", ",", "o", "v", "^", "<", ">", "1", "2",
11                        "3", "4", "8",
12                        "s", "p", "*", "h", "H", "+", "x", "D", "d", "|",
13                        "-", "None", None, "", "$x$",
14                        "$\alpha$",
15                        "$\beta$",
16                        "$\gamma$"]
17
18    def ioexperiment(self, datan=-1):
19        self.iochar()
20        return plt
21
22    def freqexperiment(self, datan=-1):
23        self.freqchar(datan)
24        return plt
25
26    def iochar(self):
27        # Input/Output Characteristics
28        Vi, Vo = self.data.getIOC()
29        plt.figure(figsize=(14, 8), dpi=100)
30        plt.scatter(Vi, Vo, label="observed")
31        plt.plot(Vi, Vo, color="r")
32        plt.title(self.name + 'の入出力特性（周波数f=1kHz一定）')
33        plt.xlabel('入力電圧Vi[mV]', fontsize=14)
34        plt.ylabel('出力電圧Vo[mV]', fontsize=14)
35        plt.grid(which="both") # "both"はxy軸両方にグリッド
36        plt.get_current_fig_manager().canvas.set_window_title(self.name + 'の低周波
37                                                増幅特性')
38
39    def gvab(self, Vi, Vo):
40        self.Av = []
41        self.Gv = []
42        for i, x in enumerate(Vo):
43            y = x / Vi[i]
44            self.Av.append(y)
45            self.Gv.append(20.0 * math.log10(y))
46        GvA = max(self.Gv)
47        GvB = GvA - 3
48        return GvA, GvB
49
50    def crossp(self, GvB, Hz):
51        # 交点の座標(hz1, GvB), (hz2, GvB)を取得
52        hz1 = hz2 = 0
53        for i in range(len(self.Gv) - 1):
54            left = i
55            right = i + 1
56            if self.Gv[left] <= GvB <= self.Gv[right]:
57                rate = (GvB - self.Gv[left]) / (self.Gv[right] - self.Gv[left])
58                hz1 = rate * (Hz[right] - Hz[left]) + Hz[left]
59            if self.Gv[left] >= GvB >= self.Gv[right]:
60                rate = (GvB - self.Gv[right]) / (self.Gv[left] - self.Gv[right])
61                hz2 = Hz[right] - rate * (Hz[right] - Hz[left])

```

```
57     return hz1, hz2, hz2 - hz1
58
59     def plot_lines(self, Hz, GvB, hz1, hz2, lbl='', markn=2):
60         if self.flag:
61             plt.plot(Hz, self.Gv, color='r', marker=self.markers[markn])
62         else:
63             plt.plot(Hz, self.Gv, label=lbl, marker=self.markers[markn])
64             plt.legend(loc='upper left')
65         # 交点をグラフにプロット
66         plt.plot(hz1, GvB, 'ms', ms=5, label='_nolegend', color='green')
67         if self.flag:
68             plt.text(hz1 * 1.1, GvB - 2, '({x:.2f}, {y:.2f})'.format(x=hz1, y=GvB),
69                         fontsize=10)
70         plt.hlines(GvB, min(Hz), max(Hz), color="b", label='_nolegend')
71         plt.vlines(hz1, min(self.Gv), max(self.Gv), color="b", label='_nolegend')
72         if hz2>0:
73             plt.plot(hz2, GvB, 'ms', ms=5, label='_nolegend', color='green')
74             if self.flag:
75                 plt.text(hz2 * 1.1, GvB + 1, '({x:.2f}, {y:.2f})'.format(x=hz2, y=GvB),
76                           ), fontsize=10)
77             plt.vlines(hz2, min(self.Gv), max(self.Gv), color="b", label='_nolegend')
78
79     def freqchar(self, datan):
80         # Frequency Characteristics
81         plt.figure(figsize=(14, 8), dpi=100)
82         if self.flag:
83             Hz, Vi, Vo = self.data.getFRQ(datan)
84             GvA, GvB = self.gvab(Vi, Vo)
85             #print(f"Max of Gv (=GvA) : {GvA}[dB], \t GvA-3(=GvB) : {GvB}[dB]")
86             hz1, hz2, B = self.crossp(GvB, Hz)
87             #print(f"低域遮断周波数 (fL) = {hz1:.3f}[Hz] \t 高域遮断周波数 (fH) = {hz2:.3f}[Hz] \t 周波数帯域幅 (B) = {B:.3f}[Hz]")
88             self.plot_lines(Hz, GvB, hz1, hz2)
89         else:
90             Hz, Vi, Vo = self.data.getFRQ(datan=17)
91             GvA, GvB = self.gvab(Vi, Vo)
92             hz1, hz2, B = self.crossp(GvB, Hz)
93             self.plot_lines(Hz, GvB, hz1, hz2, lbl='Orange', markn=0)
94
95             Hz, Vi, Vo = self.data.getFRQ(datan=18)
96             GvA, GvB = self.gvab(Vi, Vo)
97             hz1, hz2, B = self.crossp(GvB, Hz)
98             self.plot_lines(Hz, GvB, hz1, hz2, lbl='Yellow', markn=3)
99
100            Hz, Vi, Vo = self.data.getFRQ(datan=15)
101            GvA, GvB = self.gvab(Vi, Vo)
102            hz1, hz2, B = self.crossp(GvB, Hz)
103            self.plot_lines(Hz, GvB, hz1, hz2, lbl='Green', markn=5)
104
105            Hz, Vi, Vo = self.data.getFRQ(datan=16)
106            GvA, GvB = self.gvab(Vi, Vo)
107            hz1, hz2, B = self.crossp(GvB, Hz)
108            self.plot_lines(Hz, GvB, hz1, hz2, lbl='Blue', markn=2)
109
110        if self.flag:
111            y = (max(self.Gv)-min(self.Gv)) / 2 + min(self.Gv)
112            plt.text(hz1 * 2.0, y - 2, '低域遮断周波数 : {x:13,.2f}[Hz]'.format(x=hz1), fontsize=10)
113            if hz2>0:
114                plt.text(hz1 * 2.0, y, '高域遮断周波数 : {y:10,.2f}[Hz]'.format(y=hz2), fontsize=10)
115                plt.text(hz1 * 2.0, y - 4, '周波数帯域 : {z:10,.2f}[Hz]'.format(z=B), fontsize=10)
116
117        #
118        ax = plt.gca()
```

```

116     ax.spines['top'].set_color('none')
117     ax.set_xscale('log') # x軸をlogスケールで
118     if not self.flag:
119         self.name = '2SC1815Y(B回路、Re=23, 24, 25, 27, 30, 40, 56 Ω)'
120         plt.title(self.name + '：周波数特性')
121         plt.xlabel('周波数f[Hz]', fontsize=14)
122         plt.ylabel('電圧利得Gv[dB]', fontsize=14)
123         plt.grid(which="both")
124         plt.get_current_fig_manager().canvas.set_window_title(self.name + '：低周波
          増幅特性')

```

1.3.5 周波数特性用データ

ソースコード 1.5 周波数特性用データ

```

1 class Frequency:
2     def __init__(self, transistor=1):
3         self.transistor = transistor
4         Vi_ioc = [0, 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50]
5         self.Vi_ioc = [Vi_ioc, Vi_ioc, Vi_ioc, Vi_ioc] # x座標
6         Vo_iocM10 = [38.6, 471.8, 851.7, 1249, 1635, 2007, 2861, 3557, 3988, 4275,
7             4477, 4621, 4729, 4808]
8         Vo_iocM1Y = [29, 469.4, 836.1, 1238, 1622, 1990, 2857, 3547, 3982, 4272,
9             4475, 4624, 4732, 4813]
10        Vo_iocM1G = [29.2, 482.1, 852.1, 1251, 1643, 2007, 2888, 3573, 3999, 4285,
11            4490, 4636, 4746, 4827]
12        Vo_iocM1B = [36, 459.1, 837.2, 1215, 1594, 1950, 2797, 3501, 3941, 4238,
13            4452, 4614, 4727, 4816]
14        self.Vo_ioc = [Vo_iocM10, Vo_iocM1Y, Vo_iocM1G, Vo_iocM1B]
15        Hz_fraq = [15, 20, 30, 50, 70, 100, 200, 300, 500, 1000, 2000, 5000, 10000,
16            20000, 50000, 70000, 100000, 150000, 200000, 300000, 400000, 500000,
17            600000, 700000, 800000, 900000, 1000000]
18        self.Hz_fraq = [Hz_fraq, Hz_fraq, Hz_fraq, Hz_fraq]
19        Vi_fraq = [5.0, 5.0, 5.0, 5.0, 5.0, 5.0, 5.0, 5.0, 5.0, 5.0, 5.0, 5.0,
20            5.0, 5.0, 5.0, 5.0, 5.0, 5.0, 5.0, 5.0, 5.0, 5.0, 5.0, 5.0]
21        self.Vi_fraq = [Vi_fraq, Vi_fraq, Vi_fraq, Vi_fraq]
22        Vo_fraqM10 = [500, 610, 740, 862, 906, 940, 965, 970, 980, 989, 979, 980,
23            971, 945, 920, 870, 780, 688, 539, 439, 363, 308, 241, 213, 190, 172]
24        Vo_fraqM1Y = [522, 622, 760, 874, 910, 940, 961, 962, 970, 971, 978, 972, 970,
25            968, 942, 920, 872, 782, 690, 537, 432, 360, 300, 238, 209, 186, 168]
26        Vo_fraqM1G = [540, 640, 778, 881, 925, 960, 980, 985, 989, 989, 990, 990, 982,
27            972, 959, 940, 885, 800, 700, 541, 440, 362, 308, 270, 238, 189, 172]
28        Vo_fraqM1B = [554, 655, 781, 879, 905, 922, 943, 950, 951, 952, 954, 953, 945,
29            950, 929, 898, 849, 762, 675, 528, 428, 357, 276, 234, 209, 185, 167]
30        self.Vo_fraq = [Vo_fraqM10, Vo_fraqM1Y, Vo_fraqM1G, Vo_fraqM1B]
31
32     def getIOC(self, datan=-1):
33         if datan<=-1:
34             return self.Vi_ioc[self.transistor], self.Vo_ioc[self.transistor]
35         else:
36             return self.Vi_ioc[datan], self.Vo_ioc[datan]
37
38     def getFRQ(self, datan=-1):
39         if datan<=-1:
40             return self.Hz_fraq[self.transistor], self.Vi_fraq[self.transistor], self.
41                 Vo_fraq[self.transistor]
42         else:
43             return self.Hz_fraq[datan], self.Vi_fraq[datan], self.Vo_fraq[datan]

```

1.3.6 データ補間

ソースコード 1.6 データ補間

```
1 import numpy as np
2 from scipy import interpolate
3 import matplotlib.pyplot as plt
4
5 class Interpolate:
6     ip1 = ["最近傍点補間", lambda x, y: interpolate.interp1d(x, y, kind="nearest")]
7     ip2 = ["線形補間", interpolate.interp1d]
8     ip3 = ["ラグランジュ補間", interpolate.lagrange]
9     ip4 = ["重心補間", interpolate.BarycentricInterpolator]
10    ip5 = ["Krogh補間", interpolate.KroghInterpolator]
11    ip6 = ["2次スプライン補間", lambda x, y: interpolate.interp1d(x, y, kind="quadratic")]
12    ip7 = ["3次スプライン補間", lambda x, y: interpolate.interp1d(x, y, kind="cubic")]
13    ip8 = ["秋間補間", interpolate.Akima1DInterpolator]
14    ip9 = ["区分的3次エルミート補間", interpolate.PchipInterpolator]
15
16    def __init__(self):
17        self.ips = [self.ip1, self.ip2, self.ip3, self.ip4, self.ip5, self.ip6, self.ip7,
18                   self.ip8, self.ip9]
19        self.ip = self.ip9
20
21    def demo(self):
22        x_observed = [9, 28, 38, 58, 88, 98, 108, 118, 128, 138, 148, 158, 168, 178,
23                      188, 198, 208, 218, 228, 238, 278, 288, 298]
24        y_observed = [51, 80, 112, 294, 286, 110, 59, 70, 56, 70, 104, 59, 59, 72,
25                      87, 99, 64, 60, 74, 151, 157, 57, 83]
26        x_latent = np.linspace(min(x_observed), max(x_observed), 100)
27        for method_name, method in [self.ip1, self.ip2, self.ip3, self.ip4, self.ip5,
28                                     self.ip6, self.ip7, self.ip8, self.ip9]:
29            print(method_name)
30            fitted_curve = method(x_observed, y_observed)
31            plt.scatter(x_observed, y_observed, label="observed")
32            plt.plot(x_latent, fitted_curve(x_latent), c="red", label="fitted")
33            plt.grid()
34            plt.legend()
35            plt.show()
36
37    def getMethod(self, id):
38        return self.ips[id-1]
```

1.3.7 表示可能フォントの確認

ソースコード 1.7 フォント確認

```
1 import matplotlib
2 import matplotlib.pyplot as plt
3
4 class FontCheck:
5     def __init__(self):
6         # フォントを全て読み込み
7         fonts = set([f.name for f in matplotlib.font_manager.fontManager.ttflist])
8         print(fonts)
9         # 描画領域のサイズ調整
10        plt.figure(figsize=(10, len(fonts) / 4))
11        # フォントの表示
12        for i, font in enumerate(fonts):
13            plt.text(0, i, f"日本語: {font}", fontname=font)
```

第 II 部

実習のための配布資料

第2章

トランジスタの静特性

2.1 実習の目的

トランジスタの電極間の電圧や各電極に流れる電流を測定することによって、電気的な特性を理解し、加えてその用途・役割について学習する。

2.2 使用する機器

- 回路計
- トランジスタ（2SC1815-O、2SC1815-Y、2SC1815-GR）^{*1}
- 直流電流計 2 台 (mA 及び μ A)
- 直流電圧計 2 台
- 直流安定化電源装置 2 台 (V_{CC} 用と、 V_{BB} 用)

2.3 実習

実習する項目

- (1) 実習装置について調べる
- (2) $V_{CE} - I_C$ 特性（出力特性）を調べて、第1象限グラフを作成する
- (3) $I_B - I_C$ 特性を調べて、第2象限グラフを作成する
- (4) $V_{BE} - I_B$ 特性（入力特性）を調べて、第3象限グラフを作成する
- (5) 直流負荷線について調べて、第1象限グラフに重ねて作図する

^{*1} except for BL

2.3.1 実習装置について調べる

実習装置の抵抗器（固定抵抗器2つ、半固定抵抗器1つ）の表示を記録して、その抵抗器の公称値を調べる。また、回路計を使ってそれぞれの抵抗値を実測し、公称値と比較する。

表 2.1 装置の抵抗について調べる

項目番	項目	カラーコード等の表示	公称値	実測値
1	コレクタ側の固定抵抗器			
2	ベース側の固定抵抗器			
3	ベース側の半固定抵抗器			

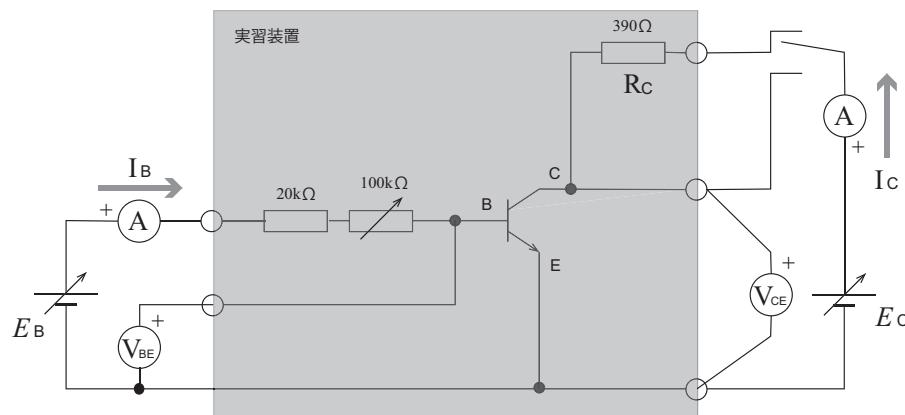
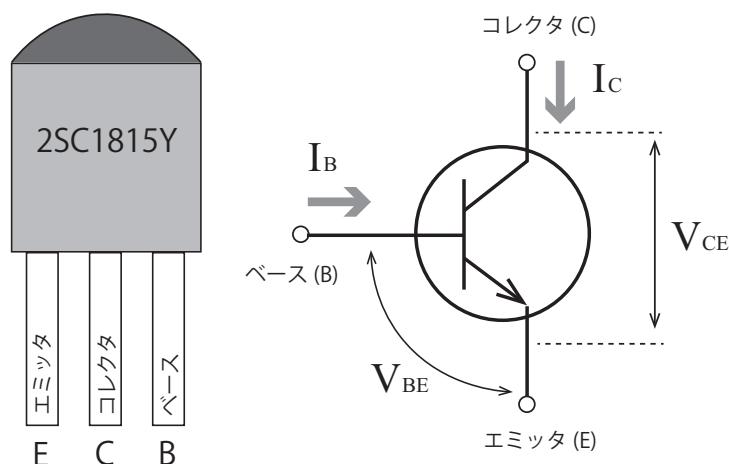


図 2.1 実習装置

実習装置で使っているトランジスタの外観、及び名盤の表記をスケッチし、トランジスタの図記号、端子の名称、各端子を流れる電流の呼称と表記、端子間電圧の呼称と表記について調べて記録する。



2.3.2 出力特性： V_{CE} – I_C (I_B 一定)：第1象限グラフ

$V_{CE} - I_C$ 特性は出力特性とも呼ばれ、ベース電流 I_B 一定の状態で、コレクタ-エミッタ間の電圧 V_{CE} を変化させた時、コレクタ電流 I_C がどの様な変化をするかを示すもの。実験の手順は次の通り。

- (1) $V_{CE} = 0.2V$, $I_B = 20 \mu A$ に調節する (直流電源装置 E_C , E_B 及び半固定抵抗器 VR を操作)
- (2) $I_B = 20 \mu A$ のまま、 V_{CE} を $0.4 \sim 10.0V$ に変えて、その都度 I_C を測定して記録する
- (3) $V_{CE} = 0.2V$ に戻し、 I_B を $40, 60, 80 \mu A$ と変えて、それぞれの場合に上の手順 2 を実施する

横軸にコレクタ-エミッタ間の電圧 V_{CE} 、縦軸にコレクタ電流 I_C をとって、第1象限のグラフを作図する

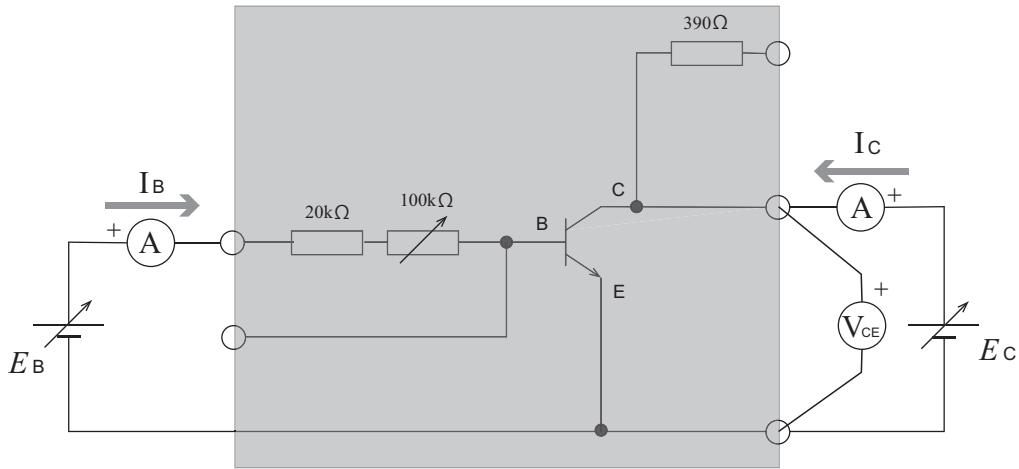


図 2.2 出力特性 V_{CE} – I_C (I_B 一定)

表 2.2 2SC1815 : V_{CE} – I_C 特性 : I_B 一定

	コレクタ電流 I_C [mA] (2SC1815)			
	$I_B = 20 \mu A$	$I_B = 40 \mu A$	$I_B = 60 \mu A$	$I_B = 80 \mu A$
0.2				
0.4				
0.6				
0.8				
1.0				
2.0				
5.0				
8.0				
10.0				

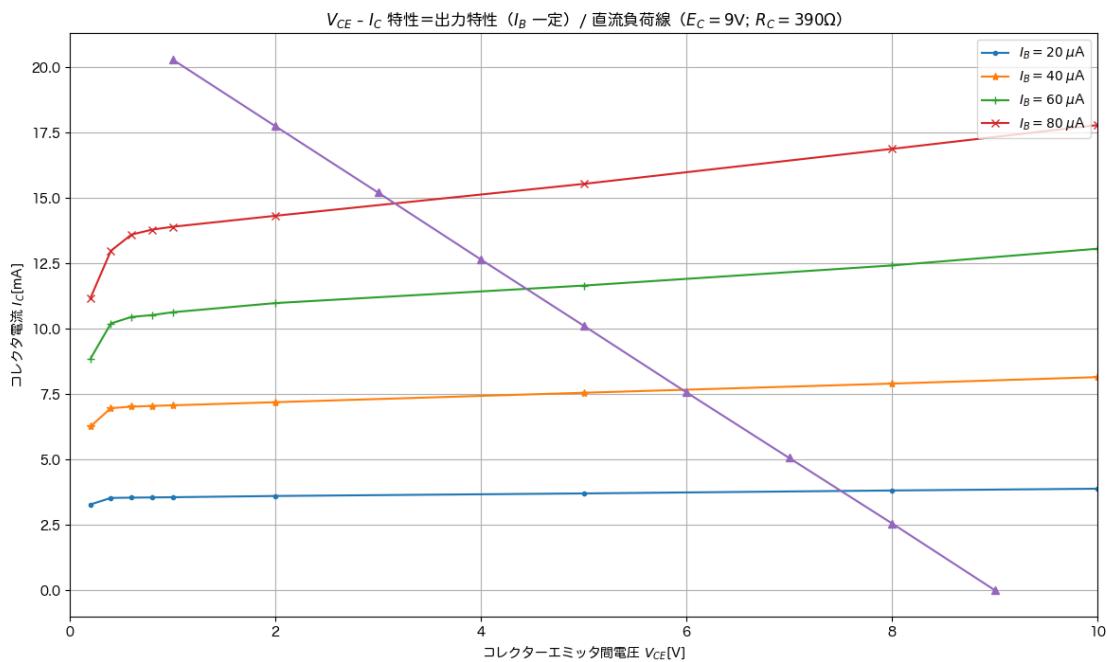


図 2.3 グラフ作成例：出力特性及び直流負荷線（2SC1815Y）

【結果の検討】

- (1) $V_{CE} - I_C$ 特性のグラフより、 $V_{CE} = 5\text{V}$ 、 $I_B = 40\mu\text{A}$ の時の I_C の値を読み取る
- (2) この時の直流電流増幅率 $h_{FE} = I_C/I_B$ を求める
- (3) このグラフから分かること（出力特性、 $V_{CE} - I_C$ 特性）についてまとめる

2.3.3 I_B - I_C 特性 ($V_{CE} = 5V$ 一定) : 第 2 象限グラフ

$I_B - I_C$ 特性は、コレクタ-エミッタ間の電圧 V_{CE} を一定にした状態で、ベース電流 I_B を変化させた時に、コレクタ電流 I_C がどの様に変化するかを示すもの

この特性の傾き I_C/I_B は、直流電流増幅率 h_{FE} と呼ばれる

実験の手順は次の通り

- (1) $V_{CE} = 5V$ となるように E_C を調整し、測定中はこの値を維持する
 - (2) E_B （と必要に応じて可変抵抗器）を調整して、ベース電流 I_B を $0 \sim 80 \mu A$ まで $10 \mu A$ ずつ変化させ、その都度コレクタ電流 I_C を測定して記録する

測定を終えたら、横軸にベース電流 I_B 、縦軸にコレクタ電流 I_C をとって、第2象限のグラフを作図し、直流電流増幅率を求める

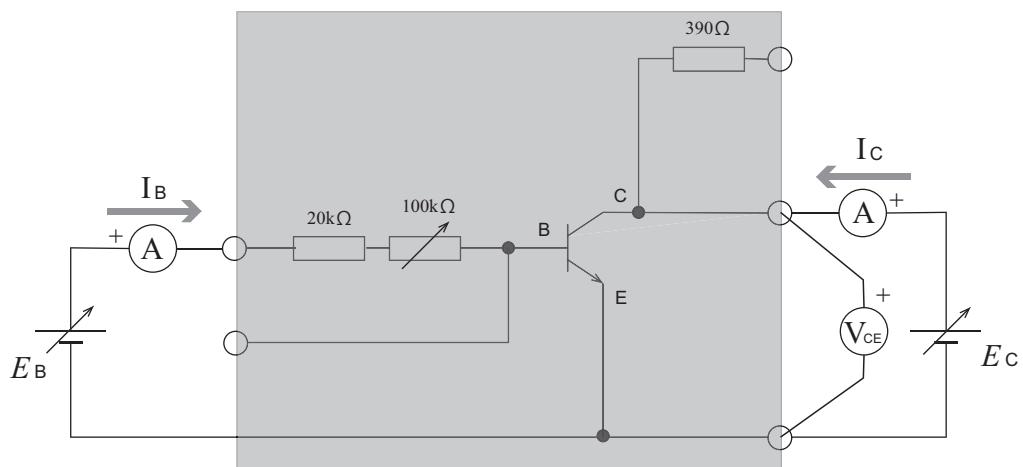
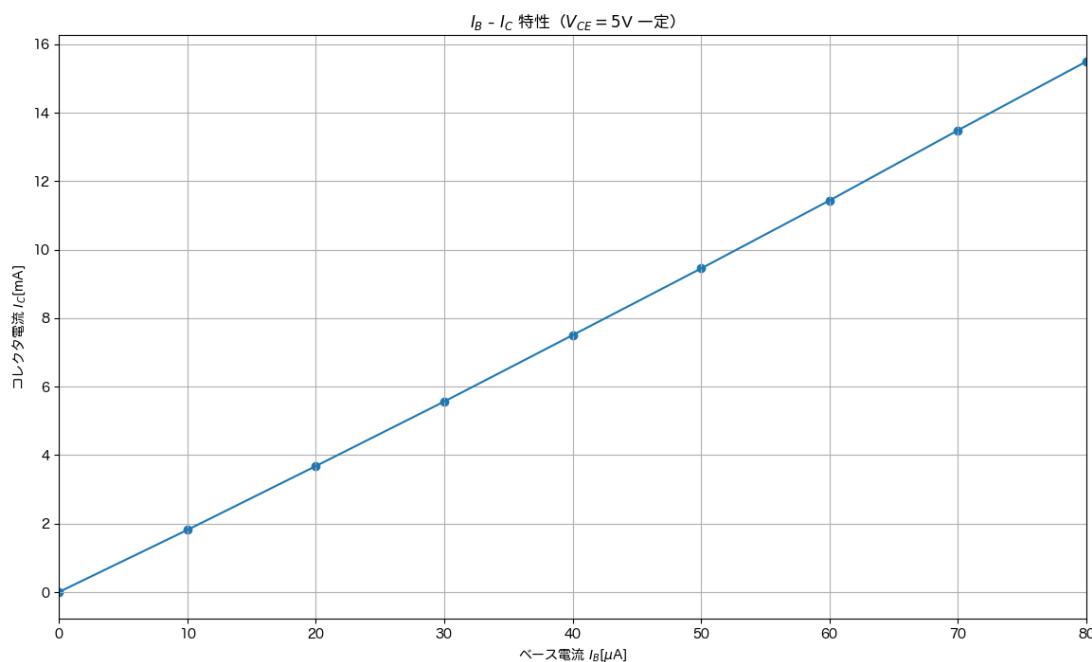


図 2.4 $I_B = I_C$ 特性 ($V_{CE} = 5V$ 一定)

表 2.3 2SC1815: $I_B = I_C$ 特性: $V_{GE} = 5V$ 一定

図 2.5 グラフ作成例： $I_B - I_C$ 特性 (2SC1815Y)

【結果の検討】

- (1) $I_B - I_C$ 特性のグラフより、 $I_B = 40\mu\text{A}$ の時の I_C の値を読み取る
- (2) この時の直流電流増幅率 $h_{FE} = I_C/I_B$ を求める
- (3) $I_B = 40\mu\text{A}$ 、 $V_{CE} = 5\text{V}$ の点から、 I_B を+方向に $20\mu\text{A}$ だけ変化させた時の I_C の値をグラフから読み取る
- (4) この時読み取った I_C の変化量から、この時の電流増幅率 $h_{fe} = \Delta I_C/\Delta I_B$ を求める
- (5) このグラフから分かること ($I_B - I_C$ 特性) についてまとめる

2.3.4 入力特性 $V_{BE} - I_B$ ($V_{CE} = 5V$ 一定) : 第3象限グラフ

$V_{BE} - I_B$ 特性は入力特性とも呼ばれ、コレクタ-エミッタ間の電圧 V_{CE} を一定にした状態で、ベース-エミッタ間の電圧 V_{BE} を変化させた時、ベース電流 I_B がどの様に変わるかを示すもの

この特性は、ダイオードの順方向特性とほぼ同じになる

実験の手順は次の通り

- (1) $V_{CC} = 5V$ となる様に E_C を調整し、測定中はこの値を維持する
- (2) E_B (必要に応じて可変抵抗器) を調整して、ベース-エミッタ間の電圧 V_{BE} を変化させ、その都度ベース電流 I_B を測定し記録する

測定を終えたら、横軸にベース電流を、縦軸にベースエミッタ間の電圧をとて、第3象限のグラフを作図する

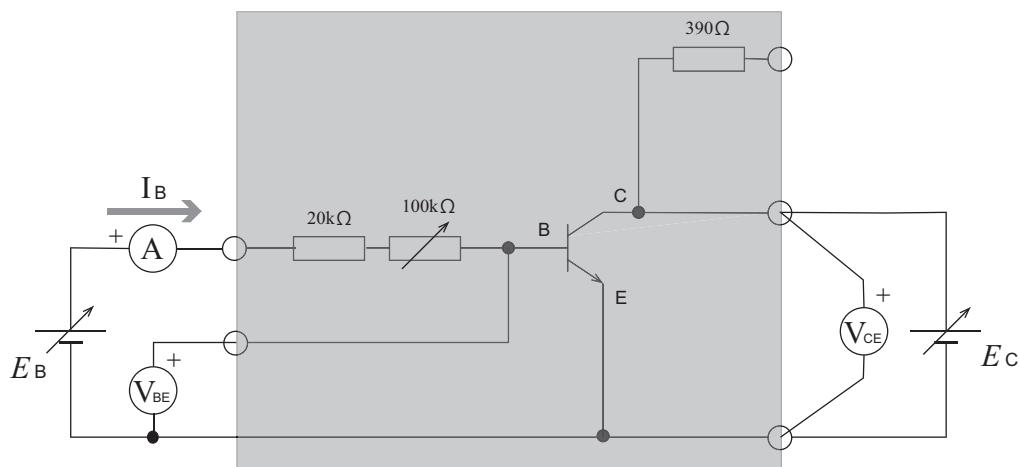


図 2.6 入力特性 $V_{BE} - I_B$ ($V_{CE} = 5V$ 一定)

表 2.4 2SC1815 : $V_{BE} - I_B$ 特性 : $V_{CE} = 5V$ 一定

$V_{BE}[\text{V}]$	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6				
$I_B[\mu\text{A}]$						10.0	20.0	50.0	80.0

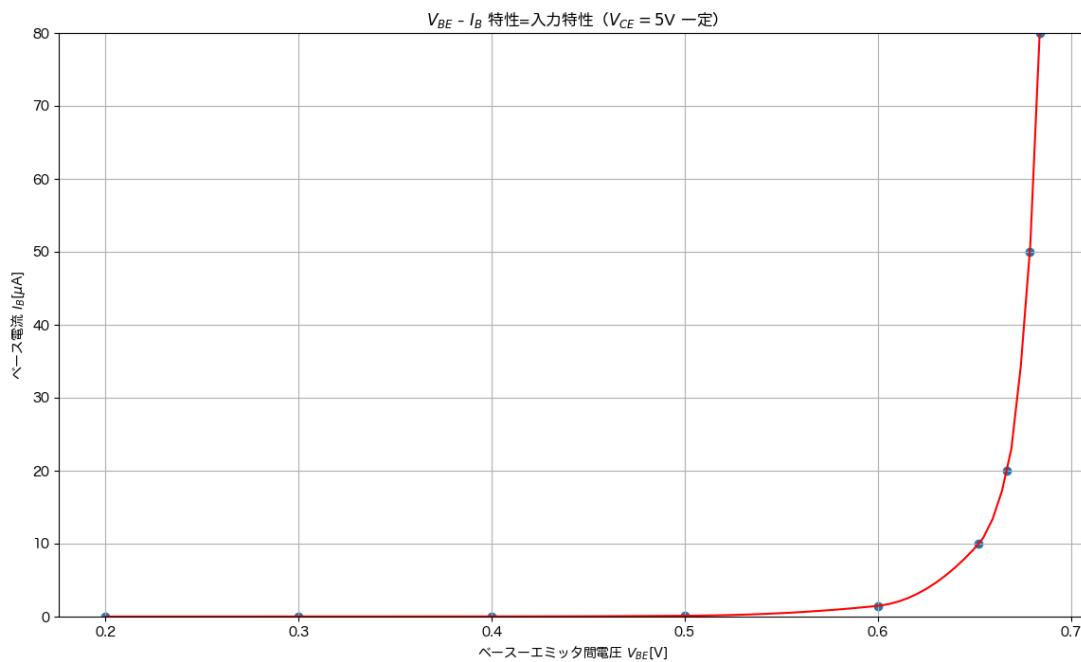


図 2.7 グラフ作成例：入力特性（2SC1815Y）

【結果の検討】

- (1) このグラフから分かること（入力特性、 $V_{BE} - I_B$ 特性）についてまとめよ

2.3.5 直流負荷線 ($E_C = 9V$, $R_C = 390\Omega$) : 第1象限グラフ

直流負荷線は、トランジスタのコレクタに負荷抵抗 R_C が接続されている時の、コレクタ-エミッタ間の電圧 V_{CE} とコレクタ電流 I_C の関係を示している

負荷抵抗 $R_C = 390\Omega$ を通したコレクタ電流 I_C を測定できる様に接続を変更し、その後の実験手順は次の通り行う

- (1) ベース電流 $I_B = 0 \mu A$ になる様に E_B を調整する
- (2) その状態でコレクタ-エミッタ間の電圧 $V_{CE} = 9V$ となる様に E_C を調整する（これ以降 E_C には触らない）
- (3) コレクタ-エミッタ間の電圧 V_{CE} を観察しながら、 E_B （必要に応じて可変抵抗器）を調整して V_{CE} を変化させ、その都度コレクタ電流 I_C 測定し記録する

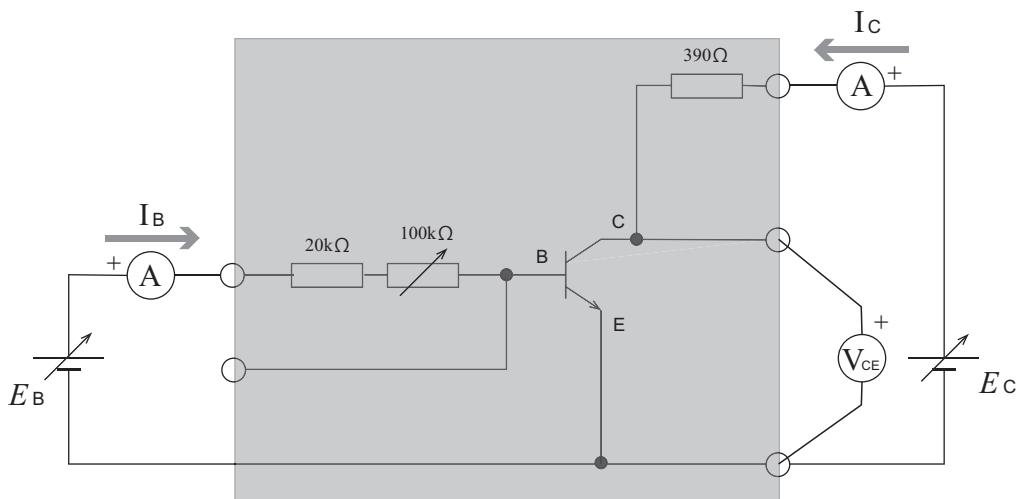


図 2.8 直流負荷線

表 2.5 2SC1815：直流負荷線： $E_C = 9V$ 、 $R_C = 390\Omega$

$V_{CE}[\text{V}]$	9.0	8.0	7.0	6.0	5.0	4.0	3.0	2.0	1.0
$I_C[\text{mA}]$									

直流負荷線のグラフは、第1象限の出力特性グラフに重ねて作図する。

【結果の検討】

- (1) 直流負荷線を2等分する点の V_{CE} と I_C をグラフから読み取る
- (2) 読み取った点の印をグラフ上に書き込む
- (3) このグラフから分かること（直流負荷線、 $V_{CE} - I_C$ 特性）についてまとめる

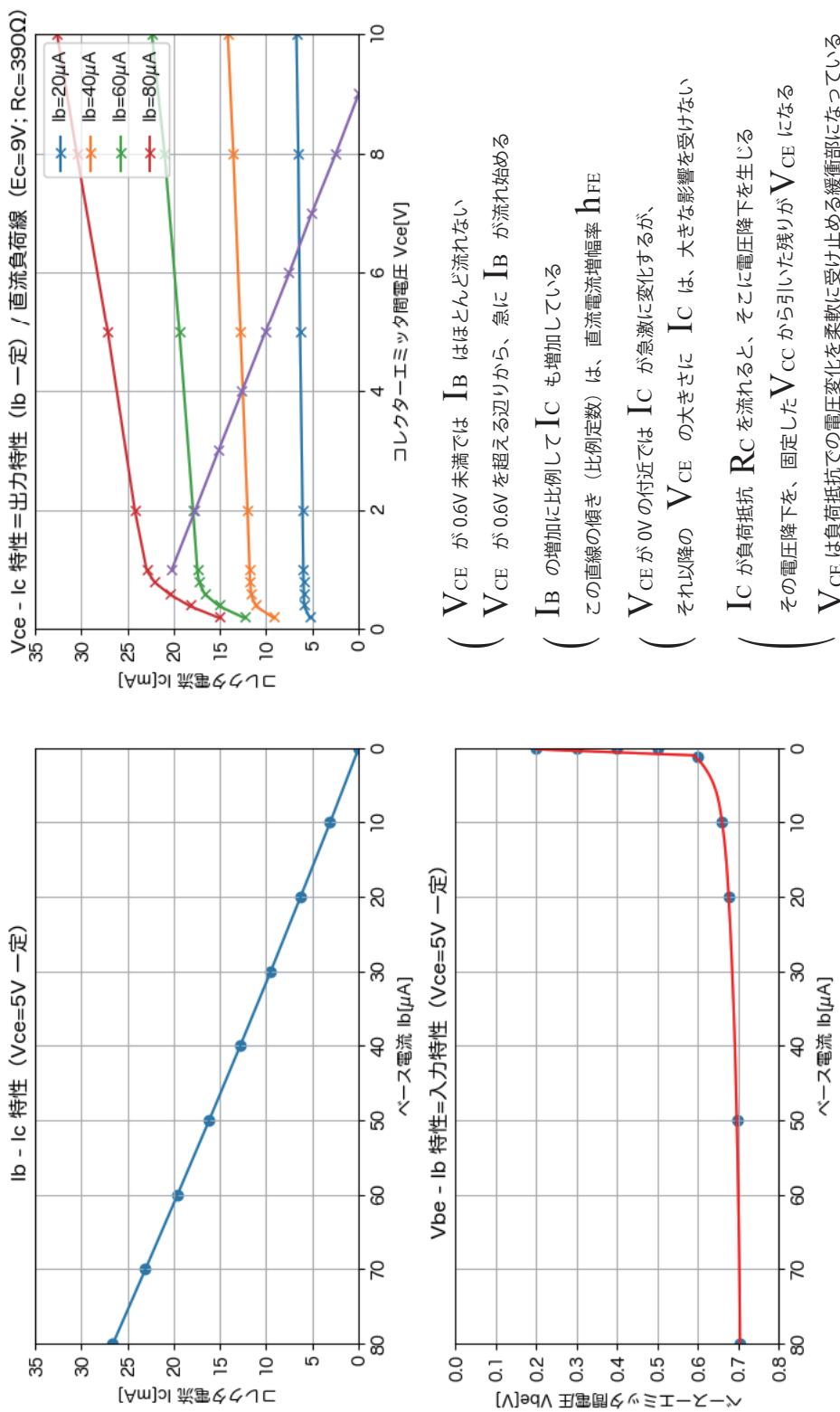


図 2.9 作図例：トランジスタの静特性 (2SC1815Y)

第3章

低周波增幅回路

3.1 実習の目的

エミッタ接地 CR 結合低周波一段増幅回路の諸特性を測定することを通して、トランジスタを用いた増幅回路の特性及び動作原理を理解する。

3.2 使用する機器

- 回路計
- トランジスタ（2SC1815-O、2SC1815Y、2SC1815-GR、2SC1815-BL）^{*1}
- 低周波発振器
- オシロスコープ
- 直流安定化電源装置（ V_{CC} 用）
- 電子電圧計 2 台

3.3 実習

実習する項目

- (1) 回路定数の設計について学習する^{*2}
- (2) 実習装置について調べる
- (3) 入出力特性を測定し、グラフを作成して特性を理解する
- (4) 周波数特性を測定し、グラフを作成して特性を理解する

^{*1} $I_C = 1\text{mA}$ となる様に R_B を調整すれば、どれでも Ok !

^{*2} 実教出版株式会社「電子回路」新訂版、第2章第5節「トランジスタによる小信号増幅回路の設計」

3.3.1 回路定数の設計

1. まず R_E を決める

設計条件

- (1) コレクタ電流 I_C には、1mA を流すことにする。
- (2) V_{CC} は、直流電源装置からの DC12V とする。
- (3) エミッタ抵抗 R_E における電圧降下 $V_E = V_{RE}$ は、 V_{CC} の 10% になる様にする。

(1) 設計条件の (2) と (3) より、 $V_{RE} = V_{CC} \times 0.1 = (\quad)$ V

(2) R_E に流れる電流は、 $I_E = I_B + I_C$ になるが、実際には $I_B \ll I_C$ であるから、 $I_E \approx I_C$ と概算する。従って R_E の電流 I_E も、 I_C と同じ (\quad) mA だと考えられる。その時の R_E における電圧降下は $V_{RE} = (\quad)$ V だったから、 $R_E = \frac{V_{RE}}{I_E} = (\quad)$ kΩ

2. 次に、 R_C を決める

設計条件

- (4) $V_{CE} \approx V_{RC}$ となる様に設計する。これにより最大値の大きな交流信号が得られる。

(1) $V_{CC} = V_{RC} + V_{CE} + V_{RE}$ で、 $V_{CE} = V_{RC}$ とおけば、 $V_{RC} = \frac{V_{CC} - V_{RE}}{2} = (\quad)$ V

(2) 抵抗 R_C の端子間電圧が上記の通りであり、これに流れる電流 I_C は設計条件 (1) で決められているので、 $R_C = \frac{V_{RC}}{I_C} = (\quad)$ kΩ だが、E 系列^{*3} の数値から $R_C = 5.6k\Omega$ を選ぶ

3. ブリーダ抵抗 R_A を決める

設計条件

- (5) 使用するトランジスタの直流電流増幅率を $h_{FE} \approx 180$ とする。
- (6) このトランジスタのベース-エミッタ間の電圧は $V_{BE} \approx 0.6V$ とする。
- (7) R_A にはベース電流 I_B の 20 倍の電流 (ブリーダ電流 I_A) を流すことにする。

(1) コレクタ電流 I_C に 1mA を流す時のベース電流 I_B は、 $I_B = \frac{I_C}{h_{FE}} = (\quad)$ μA

(2) 設計条件 (7) よりブリーダ電流は、 $I_A = 20 \times I_B = (\quad)$ μA

(3) ベース電位は $V_B = V_{BE} + V_{RE}$ であるから、 $V_B = (\quad) + (\quad) = (\quad)$ V

(4) この値 V_B は、 R_A にブリーダ電流 I_A が流れることによる電圧降下 V_{RA} に等しいから、

$$R_A = \frac{V_{RA}}{I_A} = \frac{V_B}{I_A} = (\quad) k\Omega$$

4. 最後に、 R_B を決める

(1) ブリーダ抵抗 R_A と R_B は V_{CC} を分圧しているので、 $V_{RB} = V_{CC} - V_{RA} = (\quad)$ V

(2) R_B にはブリーダ電流 I_A とベース電流 I_B の両方 $I_A + I_B = (\quad)$ μA が流れるので、

$$V_{RB} = R_B \cdot (I_A + I_B) \text{ より、 } R_B = \frac{V_{RB}}{I_A + I_B} = (\quad) k\Omega$$

^{*3} 抵抗値と静電容量値には、いくつかの標準数列が規定され、推奨されている。標準数列の E24 系列の数値は次の通り。

1.0 1.1 1.2 1.3 1.5 1.6 1.8 2.0 2.2 2.4 2.7 3.0 3.3 3.6 3.9 4.3 4.7 5.1 5.6 6.2 6.8 7.5 8.2 9.1

(3) E系列の数値から、 $R_B = 91k\Omega$ を選ぶことにする

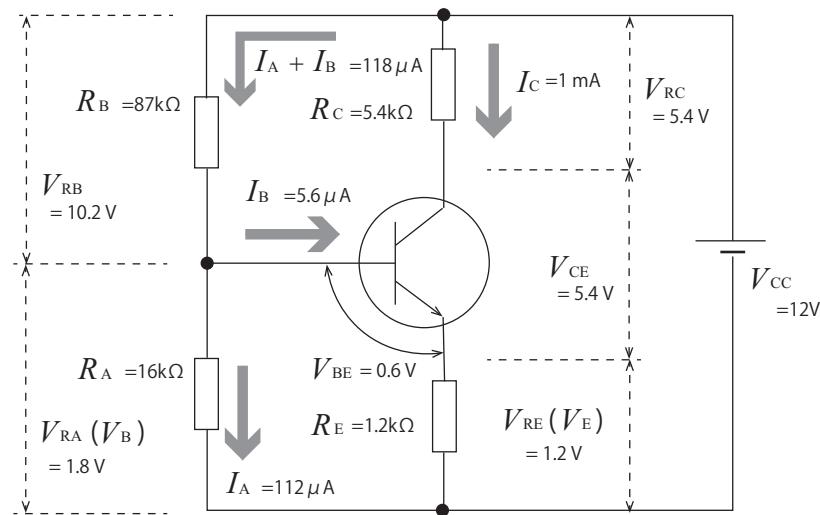


図 3.1 回路定数を算出した時の値

3.3.2 実習装置について調べる

回路計を使って以下の手順で測定し、図 3.2 と表 3.1 に測定した値を記録する

- (1) 表 3.1 の項番の 1~6 を測定し記録する。(実習装置から Tr は取り外し、電源装置も繋がない)
- (2) Tr の名前を読み取って記録し、そのトランジスタについて調査したことをレポートに報告する
- (3) 抵抗器のカラーコードなどを読み取り、その抵抗器の公称値を調べ、実測値と比較する
- (4) ここで Tr を実習装置にセットし、また直流電源装置を 12V に設定して実習装置に給電する
- (5) Tr の 3 つの端子を使って、表 3.1 の項番 7~12 の電圧を回路計で直接測定する
- (6) 設計時の条件や目標値と、実際に測定した値とを比較する

実習装置で使っているトランジスタの外観、及び名盤の表記をスケッチし、トランジスタの図記号、端子の名称、各端子を流れる電流の呼称と表記、端子間電圧の呼称と表記について調べて記録する。

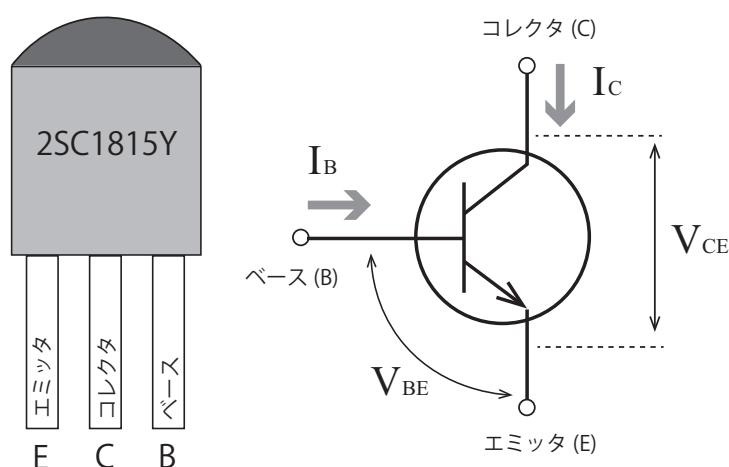
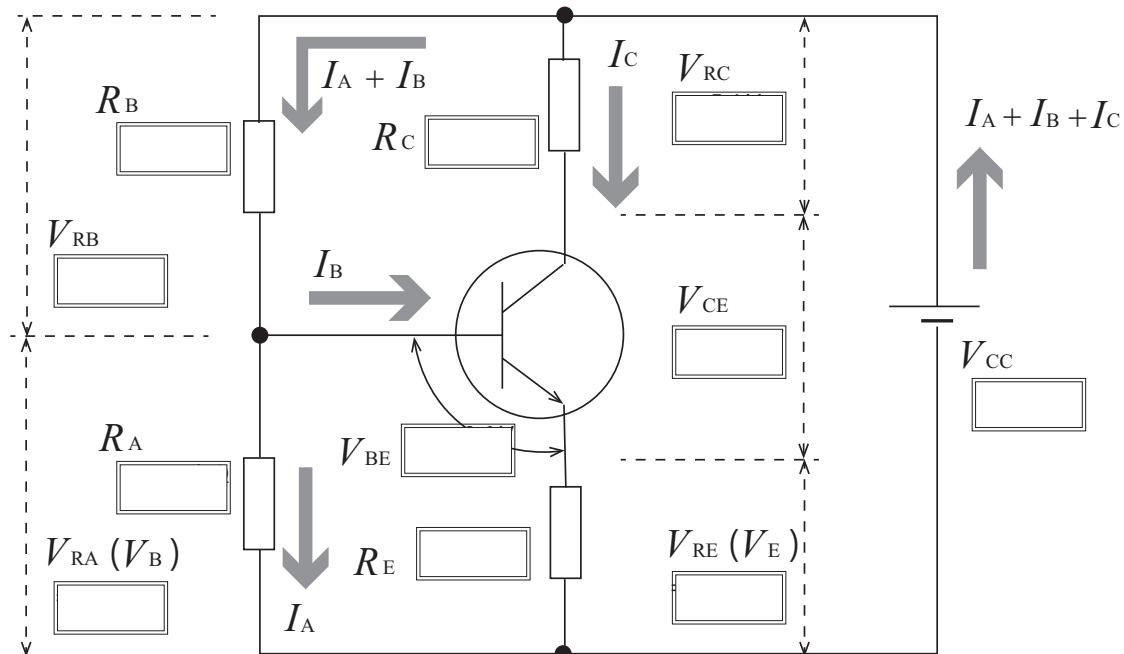


表 3.1 回路計による実測値

項目番	項目	実測値	備考（公称値など）
1	R_E	$k\Omega$	半固定抵抗器 表記（ ）、 $20 \times 10^2 \Omega$
2	R_C	$k\Omega$	カラーコード（ ）、（ ）Ω
3	R_A	$k\Omega$	カラーコード（ ）、（ ）Ω
4	R_B	$k\Omega$	カラーコード（ ）、（ ）Ω
5	V_{CC}	V	直流安定化電源装置 (DC12V)
6	h_{FE}		Tr の名称は（ ）
7	V_{RC}	V	設計時の目標は $V_{RC} \doteq V_{CE} = (V_{CC} - V_{RE})/2$ だけど？
8	V_{CE}	V	$V_{RC} \doteq V_{CE}$ で最大値の大きな交流信号出力が得られる
9	V_{BE}	V	シリコン Tr の値になっているかな？
10	V_{RE}	V	設計時の条件、 V_{CC} の 10% = () V になっている？
11	V_{RA}	V	$V_{BE} + V_{RE} = () V$ と比べてどうかな？
12	$V_{RE} + V_{CE}$	V	$V_{CC} - V_{RC} = () V$ と比べてどうかな？



$$V_B = V_{RA} = V_{BE} + V_{RE} = \boxed{\quad}$$

$$V_C = V_{CE} + V_{RE} = \boxed{\quad}$$

$$V_{CC} = V_{RC} + V_C = V_{RC} + V_{CE} + V_{RE} = V_{RB} + V_{RA}$$

図 3.2 実際の回路で測定した時の値

3.3.3 入出力特性を測定する

入出力特性（オシロスコープで入力波形および出力波形を観察、記録する）

- (1) 電源電圧を $E_C(V_{CC}) = 12V$ とし、発振器の周波数を 1kHz 一定の正弦波とする
- (2) 入力電圧 V_i を増加させ、その時の出力電圧 V_o の値を記録する
- (3) 電圧増幅度 ($A_V = V_o/V_i$) を計算する
- (4) 入出力特性（入力電圧ー出力電圧）をグラフに表す
- (5) グラフの直線部分を直線のまま延伸し、実測値と離れる時の入力電圧を読み取る
- (6) その時の入力電圧の前後で、出力波形に歪みを生じ始めていることを確認する

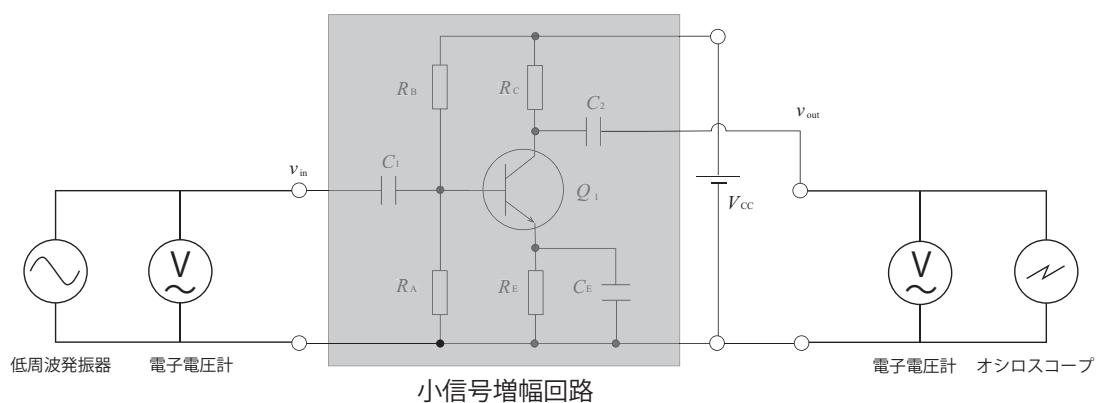


図 3.3 実習装置

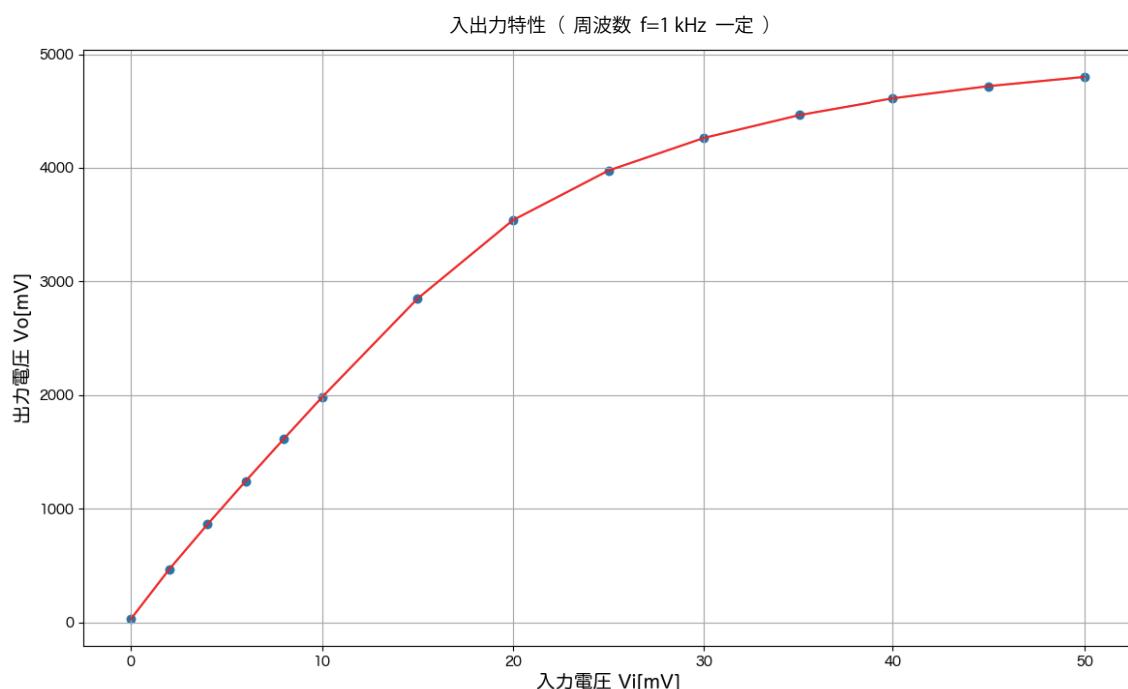


図 3.4 入出力特性のグラフ作成例

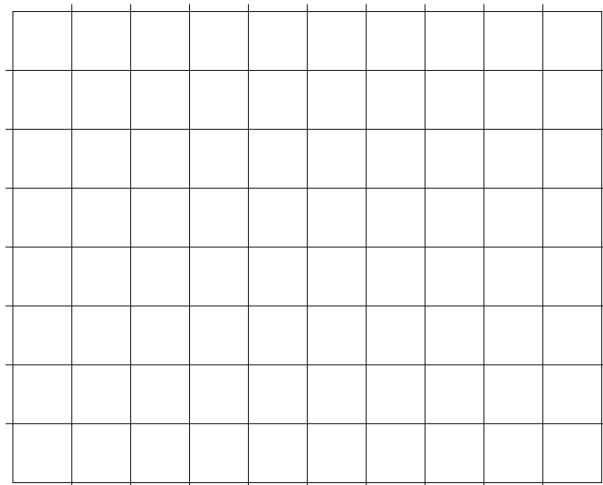
表5 入出力特性 (周波数 $f = 1\text{kHz}$ 一定)

入力電圧 V_i [mV]	0	2	4	6	8	10	15	20
出力電圧 V_o [mV]								
電圧増幅度 A_v								

25	30	35	40	45	50

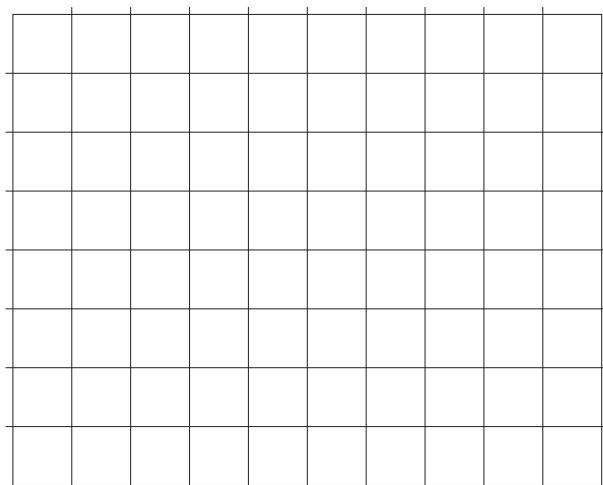
図3.5 入出力特性の記録用紙

【入出力特性：オシロスコープ画面の情報をスケッチせよ】



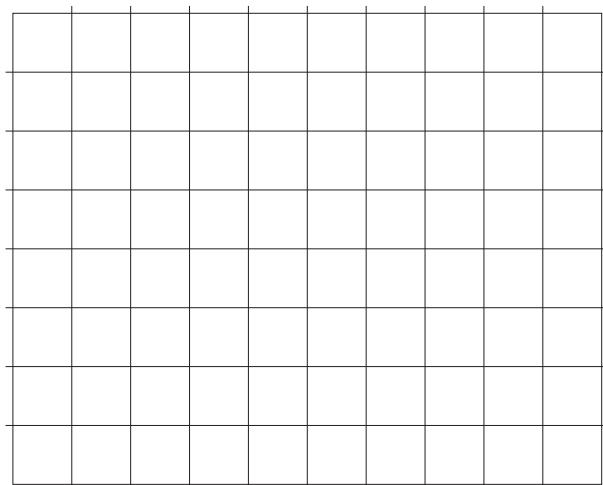
入力（実効値） $V_i = 6 \text{ mV}$ の時の出力

項目	DIVs	Value/DIV	Value
振幅 pp		2.0[V]	
波長		200.0[μs]	



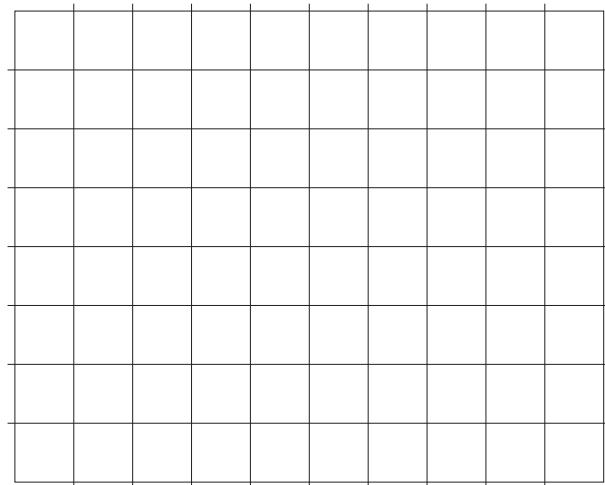
入力（実効値） $V_i = 10 \text{ mV}$ の時の出力

項目	DIVs	Value/DIV	Value
振幅 pp		2.0[V]	
波長		200.0[μs]	

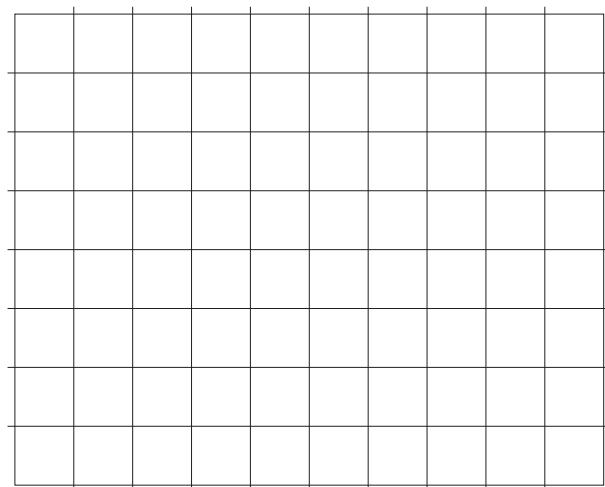


入力（実効値） $V_i = 20 \text{ mV}$ の時の出力

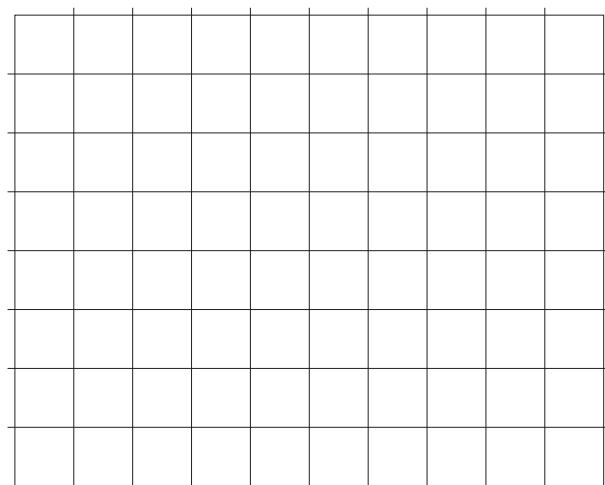
項目	DIVs	Value/DIV	Value
振幅 pp		5.0[V]	
波長		200.0[μs]	

入力（実効値） $V_i = 30 \text{ mV}$ の時の出力

項目	DIVs	Value/DIV	Value
振幅 pp		5.0[V]	
波長		200.0[μs]	

入力（実効値） $V_i = 40 \text{ mV}$ の時の出力

項目	DIVs	Value/DIV	Value
振幅 pp		5.0[V]	
波長		200.0[μs]	

入力（実効値） $V_i = 50 \text{ mV}$ の時の出力

項目	DIVs	Value/DIV	Value
振幅 pp		5.0[V]	
波長		200.0[μs]	

3.3.4 周波数特性を測定する

周波数特性（オシロスコープで出力波形を観察、記録する）

- (1) 電源電圧を $E_C(V_{CC}) = 12V$ とし、入力電圧を $V_i = 5mV$ 一定の正弦波とする
- (2) 入力の周波数を変えて、その都度出力電圧 V_o を記録する ($V_i = 5mV$ を一定を保つ)
- (3) 電圧増幅度 $A_v = V_o/V_i$ 、および電圧利得 $G_v[dB] = 20 \log A_v$ を計算する
- (4) 周波数特性（周波数—電圧利得）を、周波数を対数とする片対数グラフに表す
- (5) 中域周波数での電圧利得 G_{vA} を読み取り、そこから $3dB$ 低下した増幅度 $G_{vA} - 3$ を求める
- (6) 低域遮断周波数 f_L 、高域遮断周波数 f_H 、帯域幅 B をグラフから読み取る

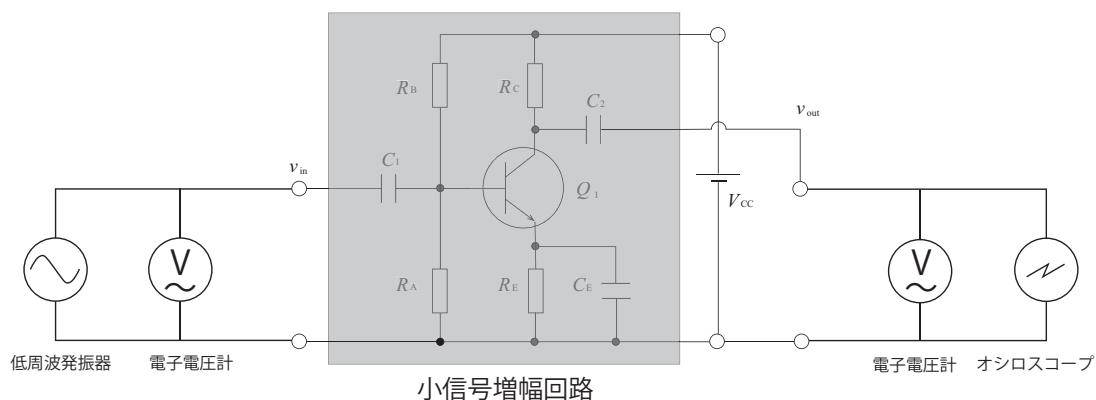


図 3.6 実習装置

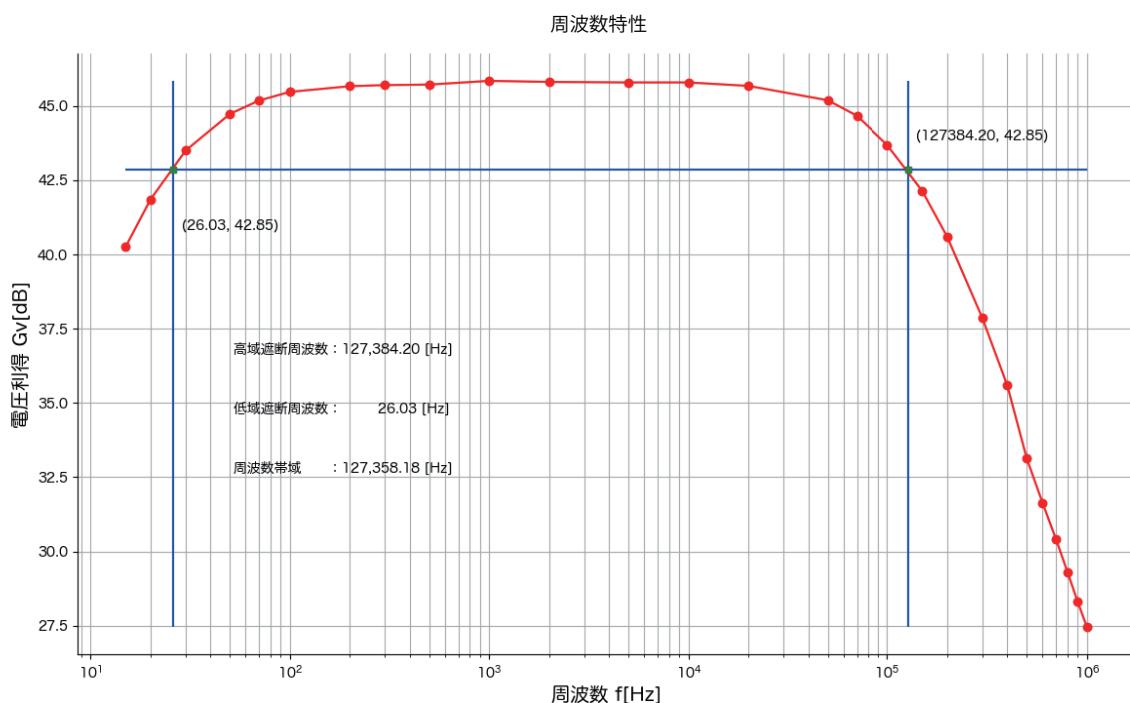
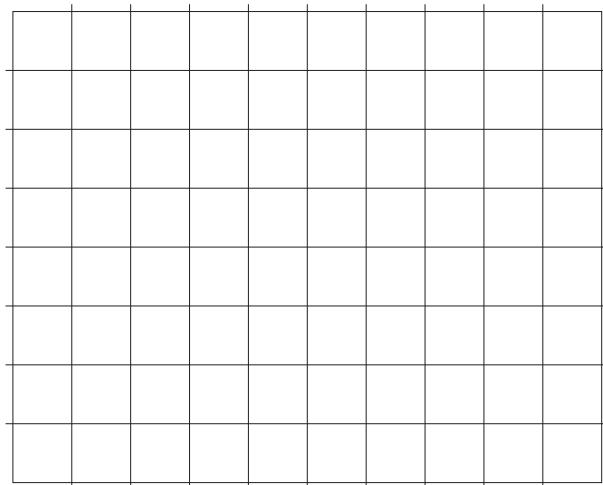


図 3.7 周波数特性のグラフ作成例

表6 周波数特性（入力電圧 $V_i = 5 \text{ mV}$ ）

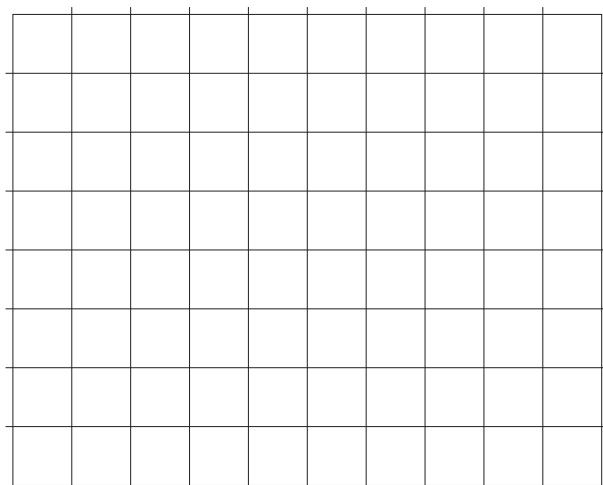
図 3.8 周波数特性の記録用紙

【周波数特性：オシロスコープ画面の情報をスケッチせよ】



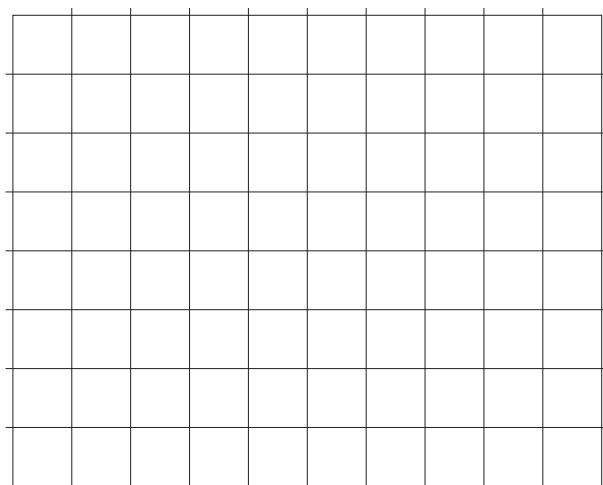
入力周波数 $f = 15Hz$ の時の出力

項目	DIVs	Value/DIV	Value
振幅 pp		500[mV]	
波長		20.0[ms]	



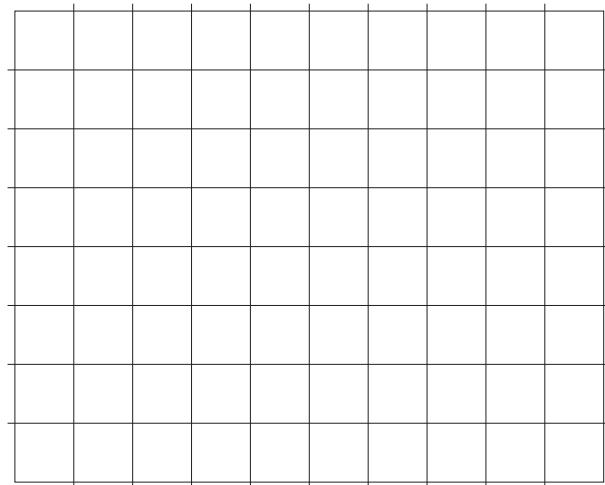
入力周波数 $f = 20Hz$ の時の出力

項目	DIVs	Value/DIV	Value
振幅 pp		500[mV]	
波長		20.0[ms]	

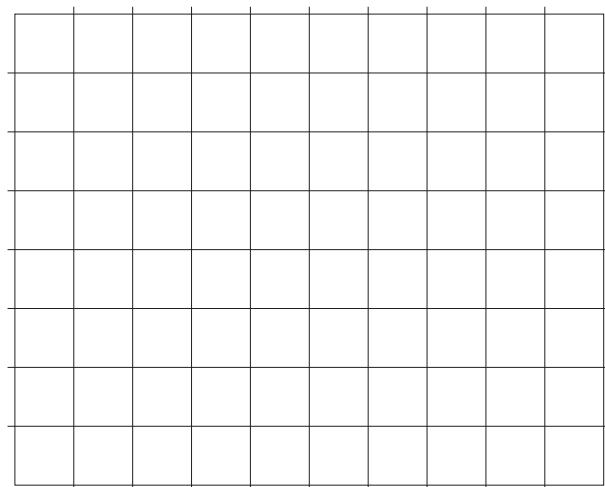


入力周波数 $f = 30Hz$ の時の出力

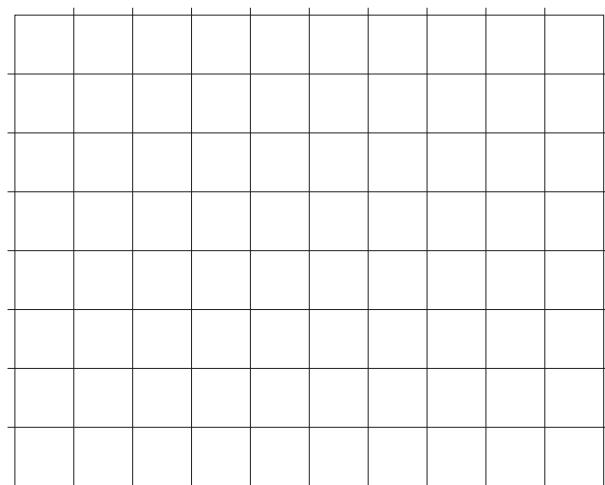
項目	DIVs	Value/DIV	Value
振幅 pp		500[mV]	
波長		20.0[ms]	

入力周波数 $f = 50Hz$ の時の出力

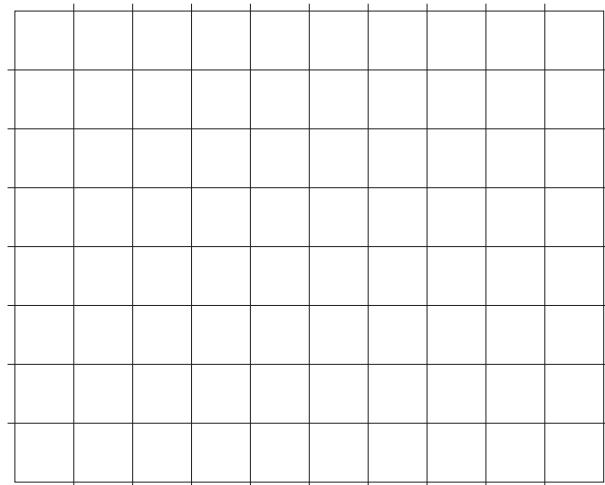
項目	DIVs	Value/DIV	Value
振幅 pp		500[mV]	
波長		10[ms]	

入力周波数 $f = 70Hz$ の時の出力

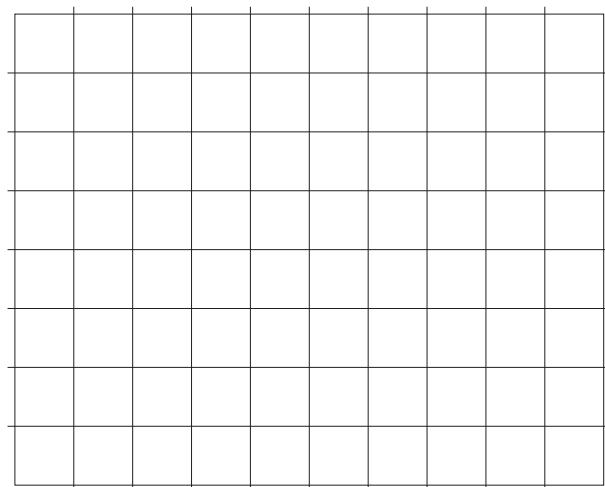
項目	DIVs	Value/DIV	Value
振幅 pp		500[mV]	
波長		5[ms]	

入力周波数 $f = 100Hz$ の時の出力

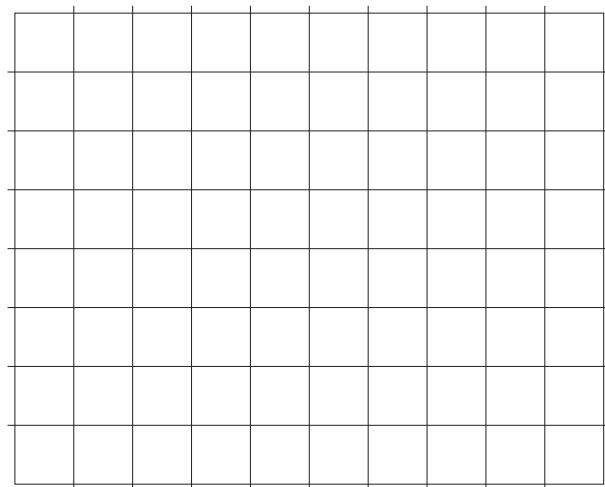
項目	DIVs	Value/DIV	Value
振幅 pp		500[mV]	
波長		5.0[ms]	

入力周波数 $f = 1kHz$ の時の出力

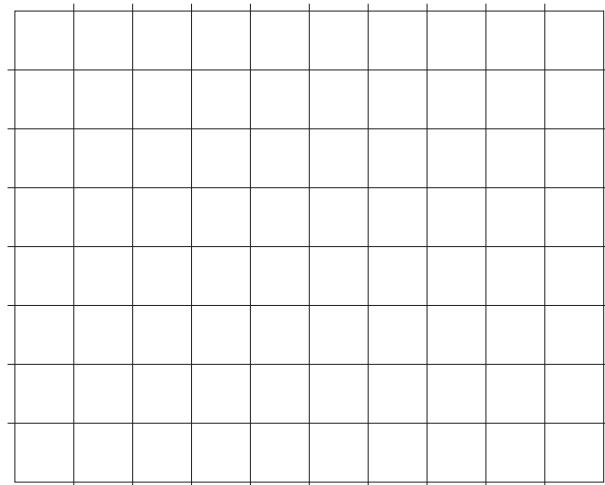
項目	DIVs	Value/DIV	Value
振幅 pp		500[mV]	
波長		200[μ s]	

入力周波数 $f = 10kHz$ の時の出力

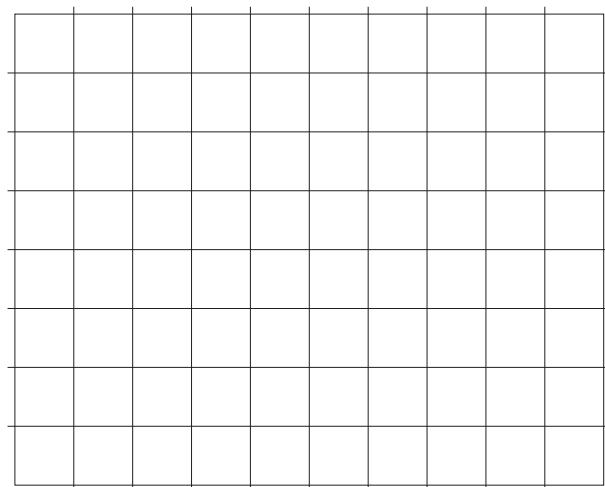
項目	DIVs	Value/DIV	Value
振幅 pp		500[mV]	
波長		20,0[μ s]	

入力周波数 $f = 100kHz$ の時の出力

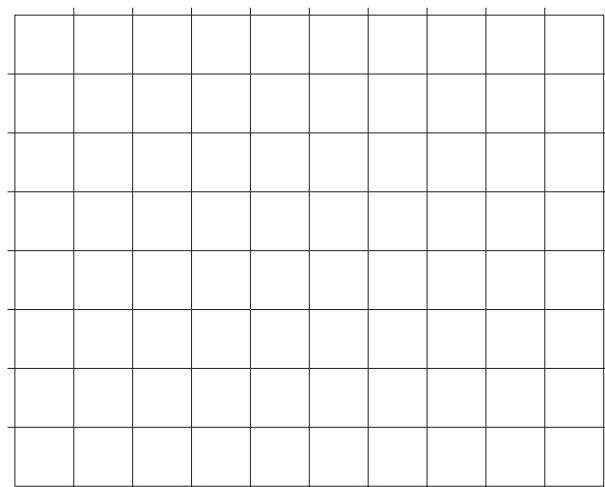
項目	DIVs	Value/DIV	Value
振幅 pp		500[mV]	
波長		2.00[μ s]	

入力周波数 $f = 400kHz$ の時の出力

項目	DIVs	Value/DIV	Value
振幅 pp		500[mV]	
波長		1.00[μs]	

入力周波数 $f = 600kHz$ の時の出力

項目	DIVs	Value/DIV	Value
振幅 pp		500[mV]	
波長		500[ns]	

入力周波数 $f = 800kHz$ の時の出力

項目	DIVs	Value/DIV	Value
振幅 pp		500[mV]	
波長		500[ns]	

参考文献

- [1] 高木茂孝、鈴木憲次「電子回路」新訂版、実教出版株式会社
- [2] 遠坂俊昭「シミュレータを使った回路設計ステップ 1・2・3」トランジスタ技術 SPECIAL(No.156)
設計のための LTspice 回路解析 101 選
- [3] <https://qiita.com/exabugs/items/5bfb3a575ce05bb6cbde>