

実習のための配布資料

s.matoike

2023 年 11 月 1 日

第 1 章

トランジスタの静特性

1.1 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。

1.2 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)

1.3 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

1.3.1 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 1.1 装置の抵抗について調べる

項番	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			

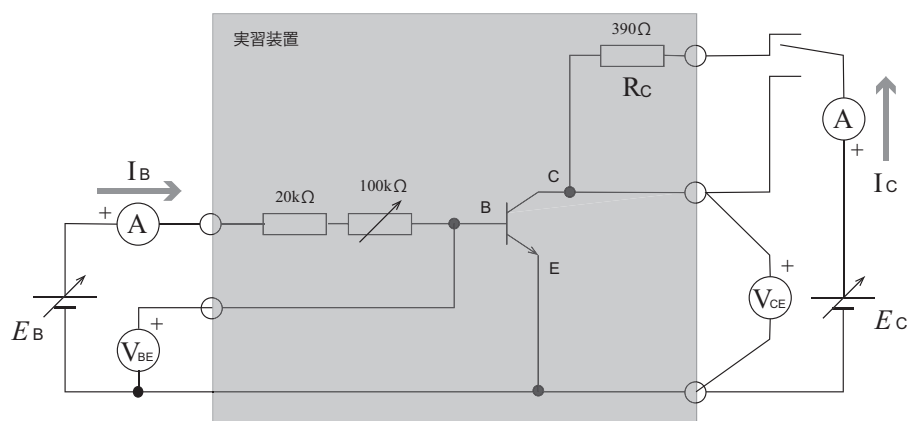
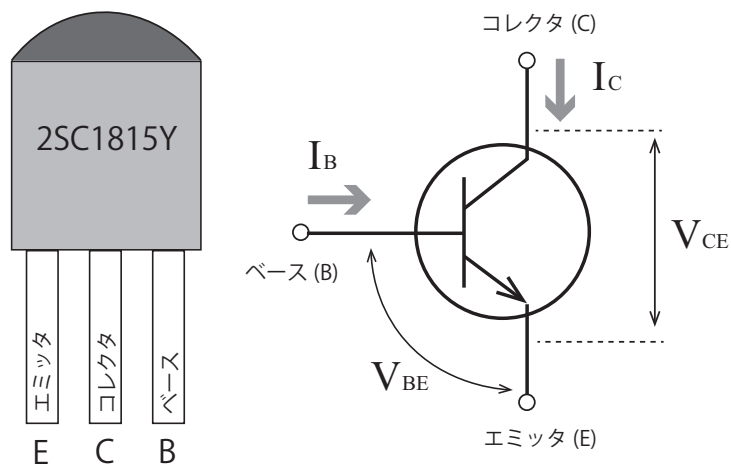


図 1.1 実習装置

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。



1.3.2 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、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 がどのような変化をするかを示すもの。実験の手順は次の通り。

- (1) $V_{CE} = 0.2\text{V}$ 、 $I_B = 20\ \mu\text{A}$ 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) $I_B = 20\ \mu\text{A}$ のまま、 V_{CE} を $0.4 \sim 10.0\text{V}$ に変えて、その都度 I_C を測定して記録する
- (3) $V_{CE} = 0.2\text{V}$ に戻し、 I_B を $40, 60, 80\ \mu\text{A}$ 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

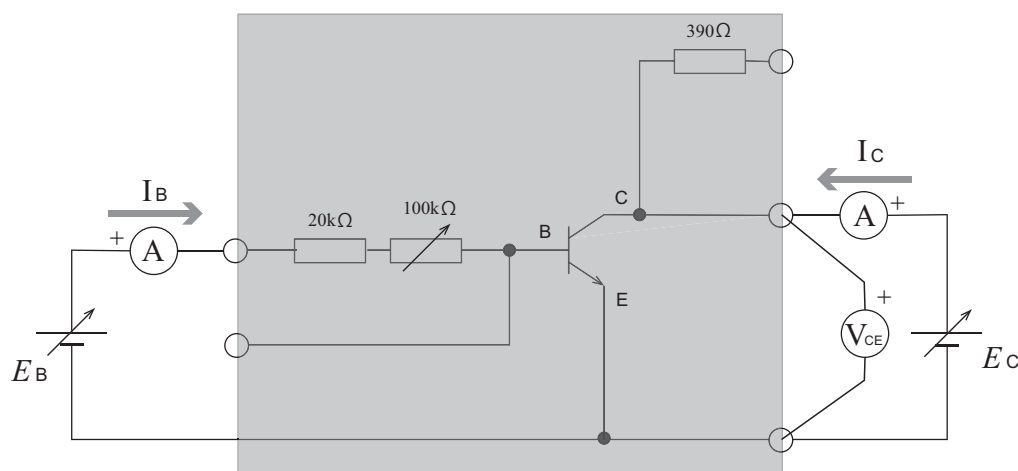


図 1.2 出力特性 $V_{CE} - I_C$ (I_B 一定)

表 1.2 2SC1815： $V_{CE} - I_C$ 特性： I_B 一定

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

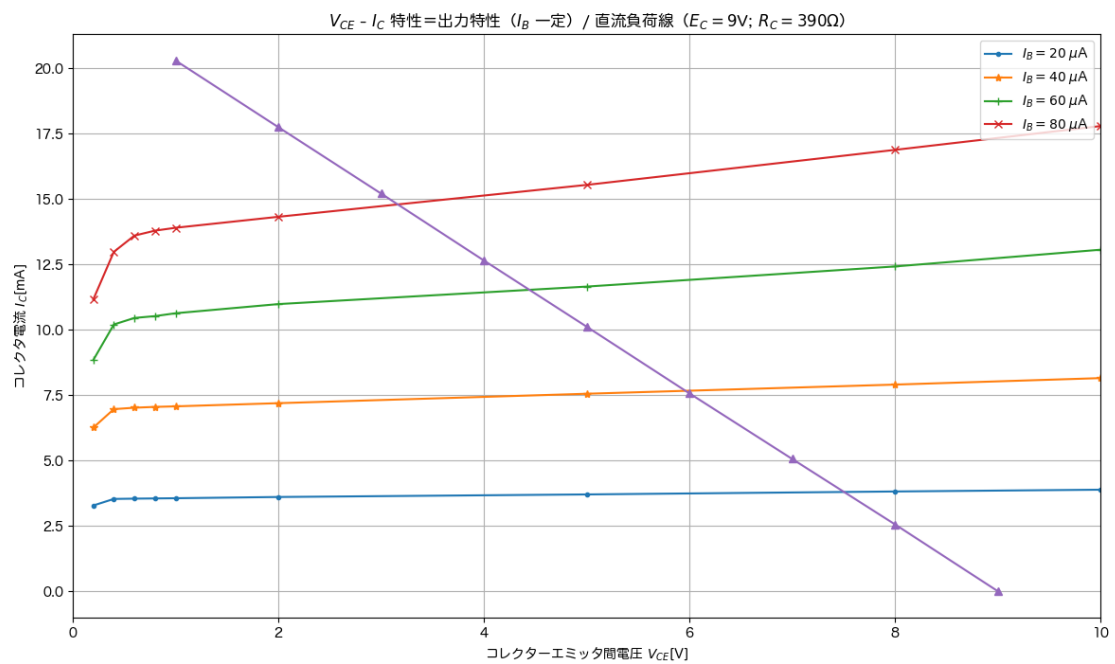


図 1.3 グラフ作成例：出力特性及び直流負荷線（2SC1815Y）

【結果の検討】

- (1) $V_{CE} - I_C$ 特性のグラフより、 $V_{CE} = 5V$ 、 $I_B = 40\mu A$ 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

1.3.3 $I_B - I_C$ 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 がどのよう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

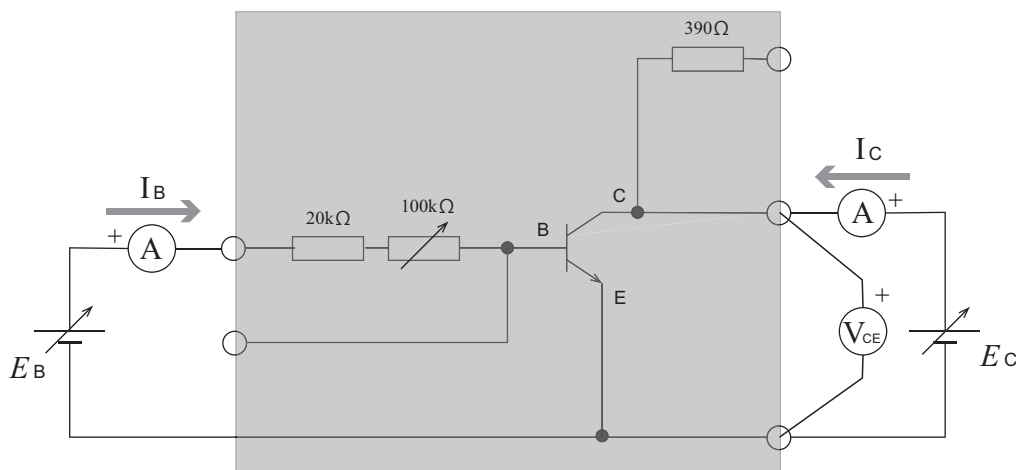
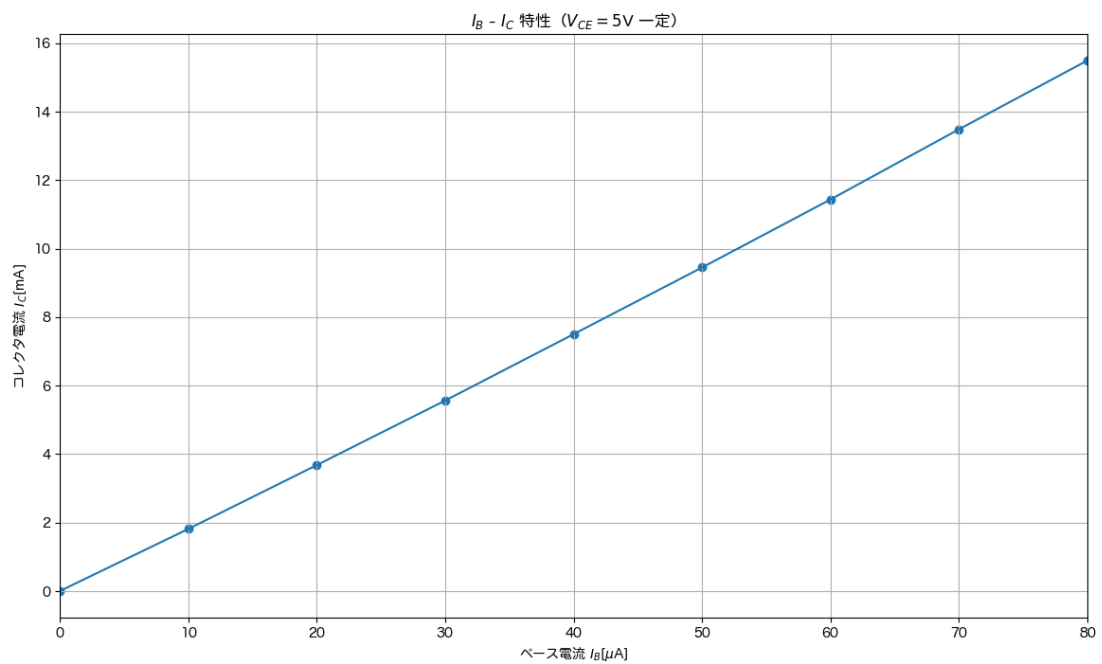


図 1.4 $I_B - I_C$ 特性 ($V_{CE} = 5V$ 一定)

表 1.3 2SC1815 : $I_B - I_C$ 特性 : $V_{CE} = 5V$ 一定

$I_B [\mu A]$	0	10	20	30	40	50	60	70	80
$I_C [mA]$									

図 1.5 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、 $I_B = 40\mu A$ 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) $I_B = 40\mu A$ 、 $V_{CE} = 5V$ の点から、 I_B を＋方向に $20\mu A$ 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

1.3.4 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 がどのよう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って、第3象限のグラフを作図する

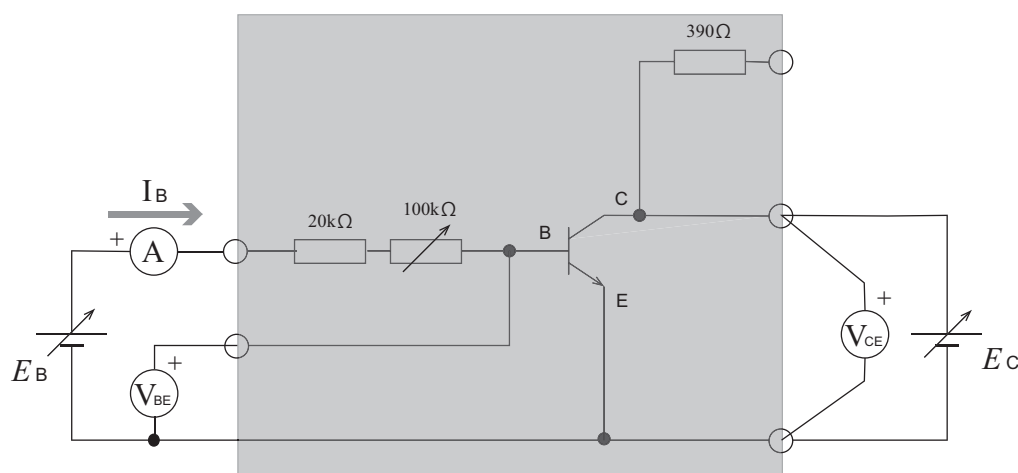


図 1.6 入力特性 $V_{BE} - I_B$ ($V_{CE} = 5V$ 一定)

表 1.4 2SC1815 : $V_{BE} - I_B$ 特性 : $V_{CE} = 5V$ 一定

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

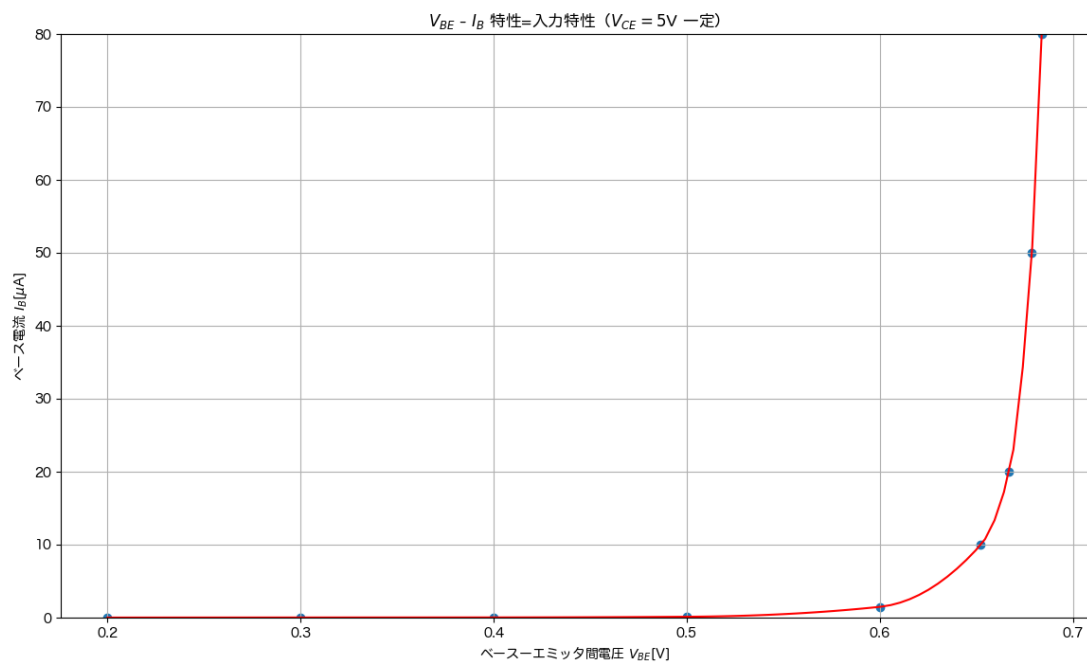


図 1.7 グラフ作成例：入力特性（2SC1815Y）

【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）についてまとめる

1.3.5 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た後、次の手順で実験を進める

- (1) 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）
- (2) 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} を表 1.5 の通り変化させ、その都度コレクタ電流 I_C 測定して記録する

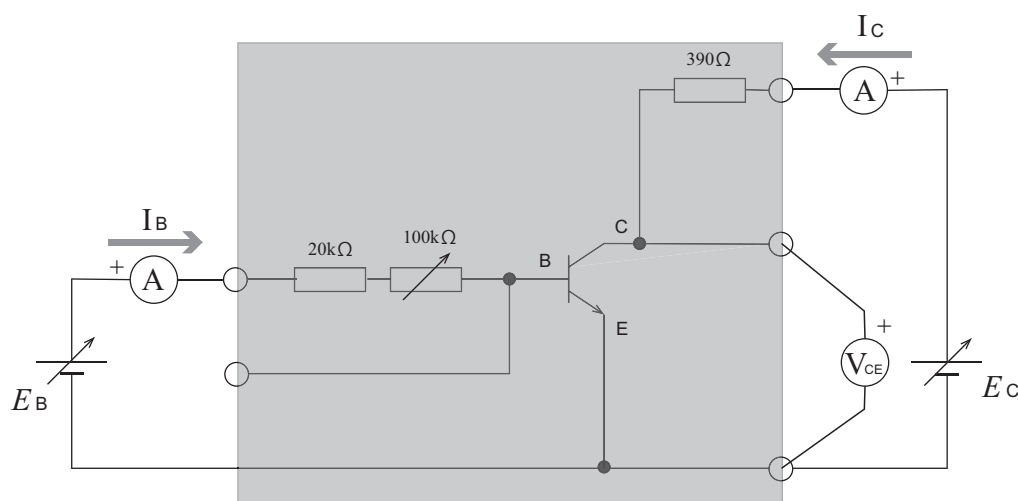


図 1.8 直流負荷線

表 1.5 2SC1815 : 直流負荷線 : $E_C = 9V$, $R_C = 390\Omega$

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

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

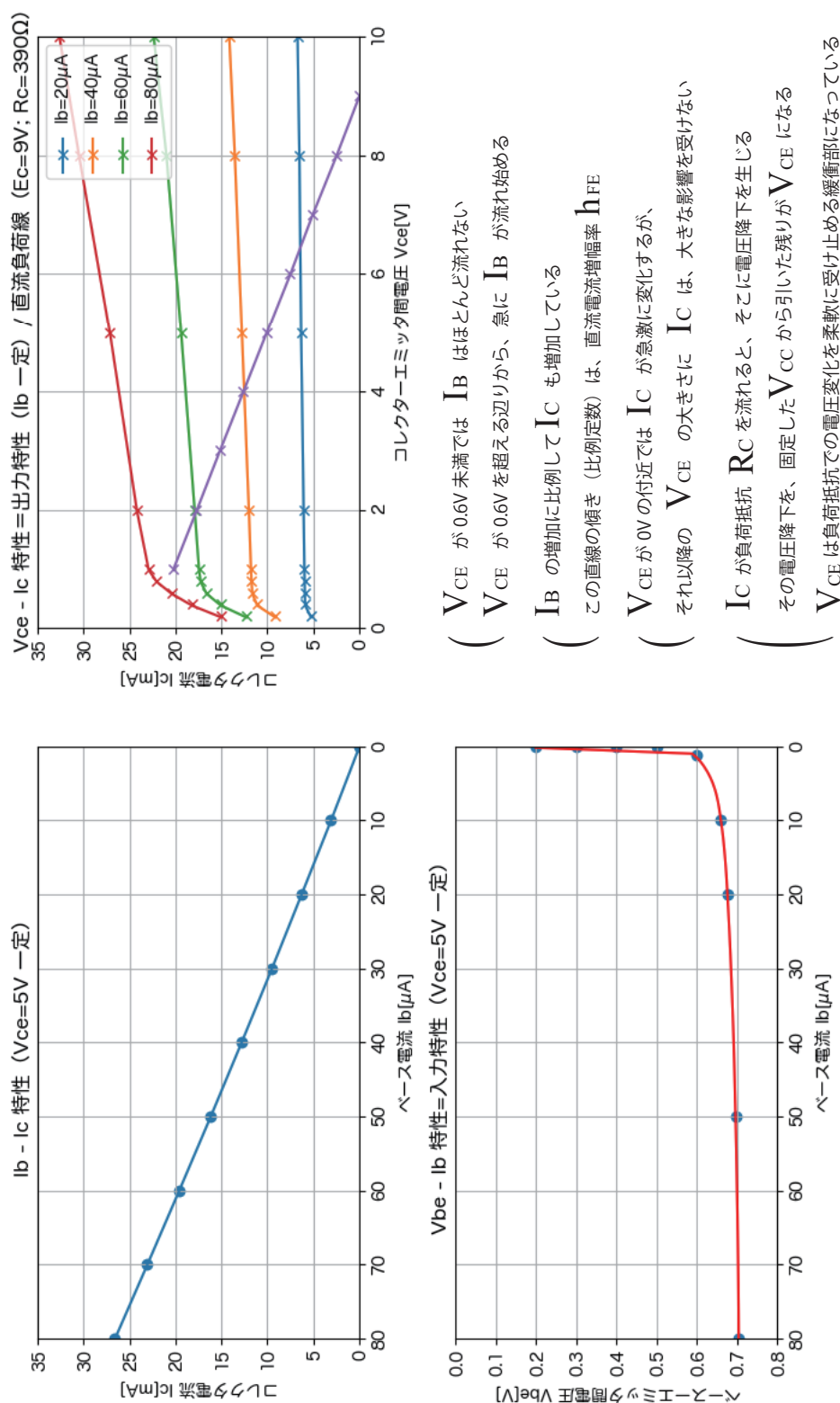


図 1.9 作図例：トランジスタの静特性 (2SC1815Y)

第 2 章

低周波増幅回路

2.1 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。

2.2 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

2.3 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」

2.3.1 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、 $I_E \doteq I_C$ 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、 $R_E = \frac{V_{RE}}{I_E} = (\quad) k\Omega$

2. 次に、 R_C を決める

設計条件

- (4) $V_{CE} \doteq V_{RC}$ 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、 $R_C = \frac{V_{RC}}{I_C} = (\quad) k\Omega$ 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 $h_{FE} \doteq 180$ 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 $V_{BE} \doteq 0.6V$ 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、 $I_B = \frac{I_C}{h_{FE}} = (\quad) \mu A$
- (2) 設計条件 (7) よりブリーダ電流は、 $I_A = 20 \times I_B = (\quad) \mu A$
- (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 $I_A + I_B = (\quad) \mu A$ が流れるので、 $V_{RB} = R_B \cdot (I_A + I_B)$ より、 $R_B = \frac{V_{RB}}{I_A + I_B} \doteq (\quad) k\Omega$

*3 抵抗値と静電容量値には、いくつかの標準数値が規定され、推奨されている。標準数値の 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

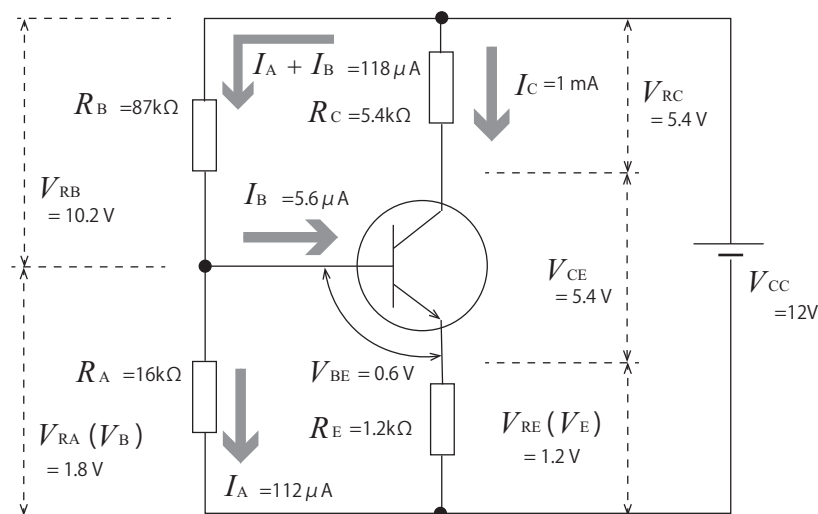


図 2.1 回路定数を算出した時の値

2.3.2 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 2.2 と表 2.1 に測定した値を記録する

- (1) 表 2.1 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、電源装置も繋がらない)
- (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 2.1 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

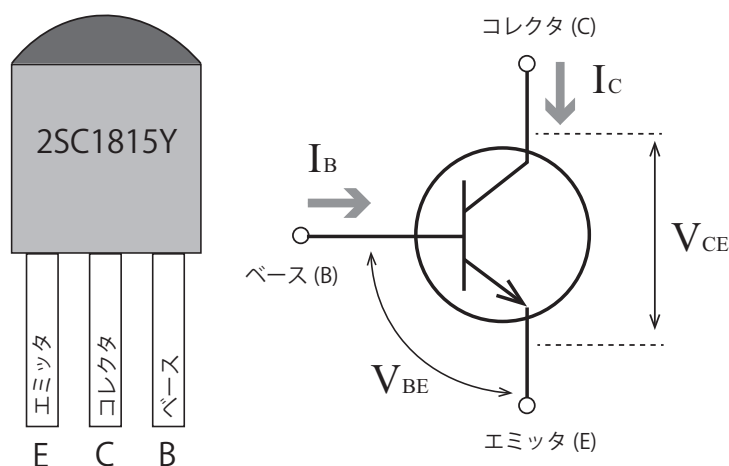
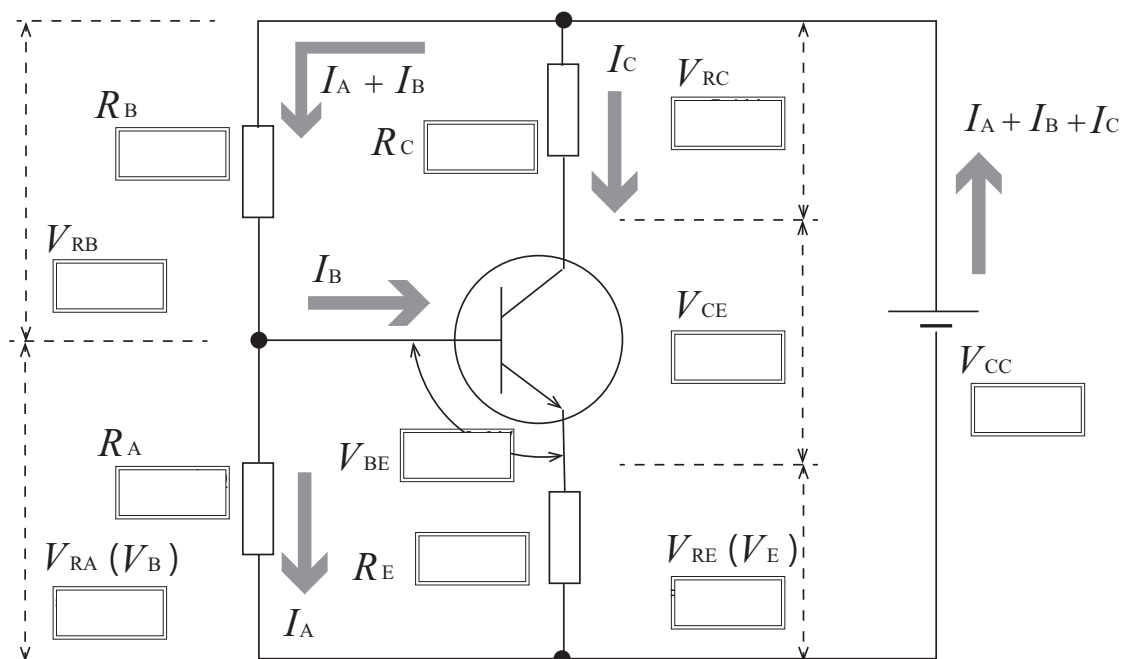


表 2.1 回路計による実測値

項番	項目	実測値	備考（公称値など）
1	R_E	$k\Omega$	カラーコード（ ）、（ ） Ω
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	$k\Omega$	半固定抵抗器 表記（ ）、 $20 \times 10^2 \Omega$
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？



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

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

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

図 2.2 実際の回路で測定した時の値

2.3.3 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－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

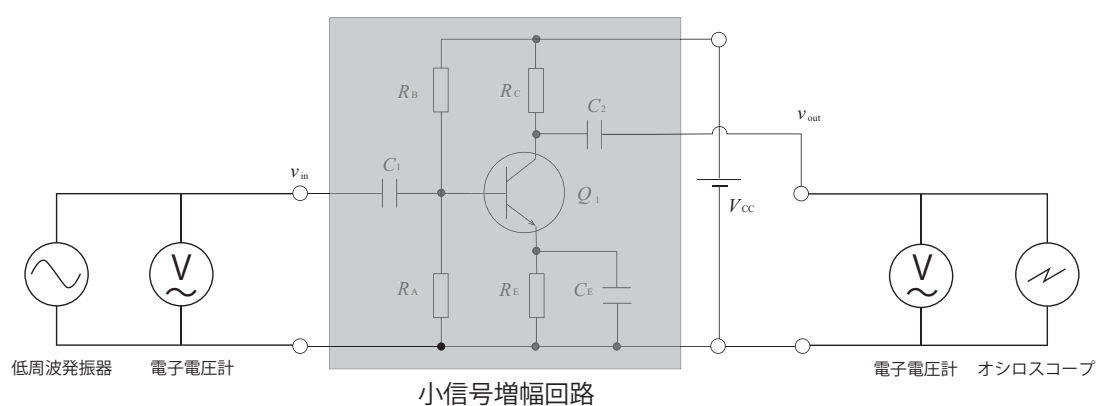


図 2.3 実習装置

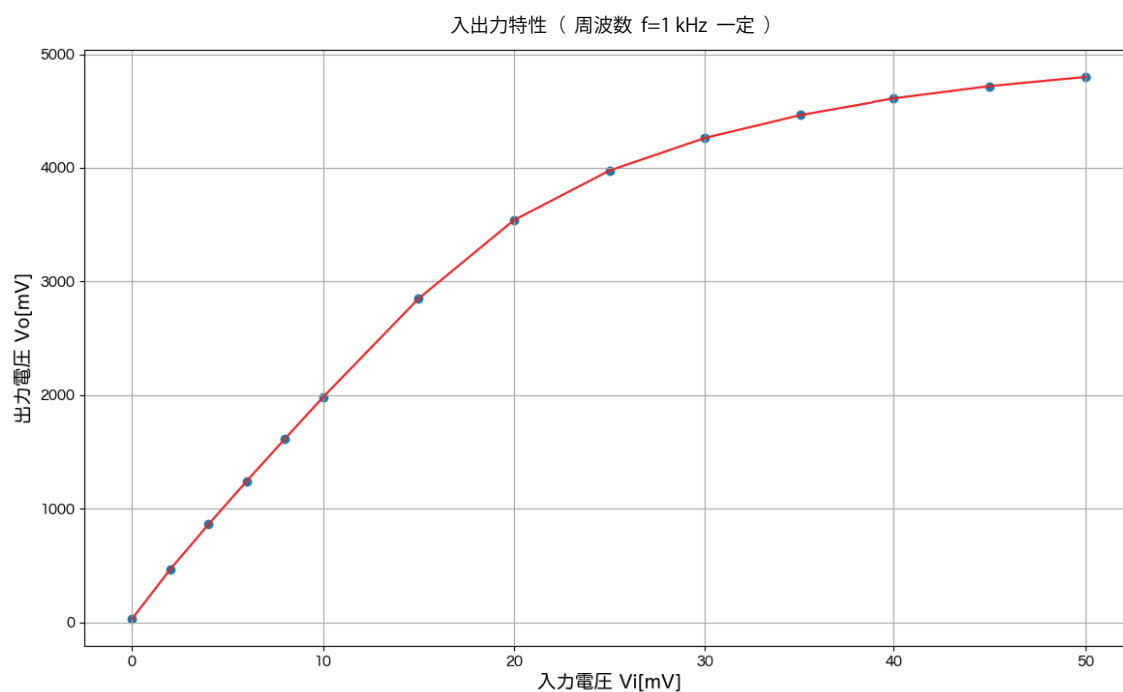


図 2.4 入出力特性のグラフ作成例

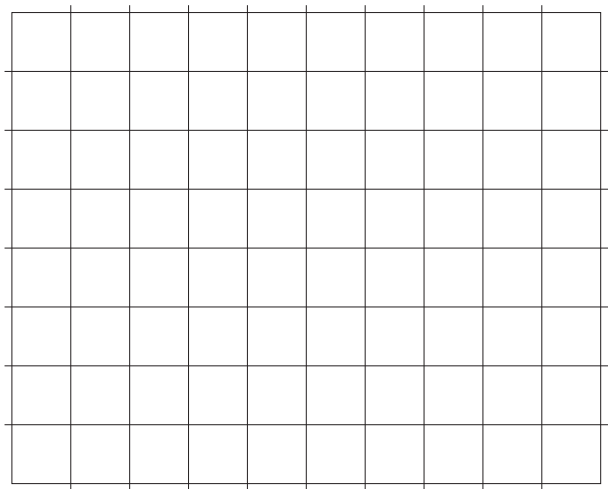
表5 入出力特性 (周波数 $f = 1\text{kHz}$ 一定)

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

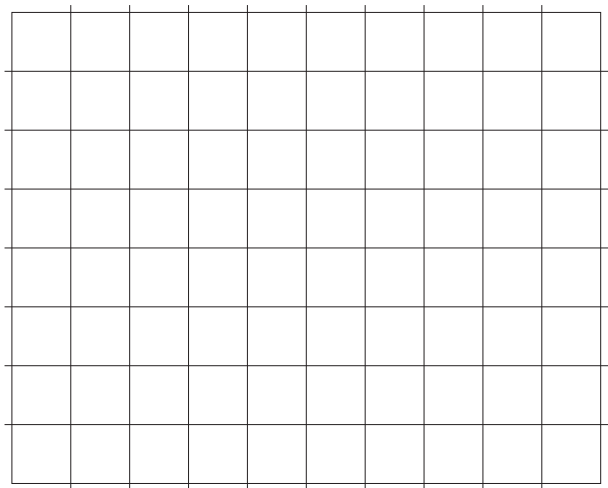
図 2.5 入出力特性の記録用紙

【入出力特性：オシロスコープ画面の情報をスケッチせよ】



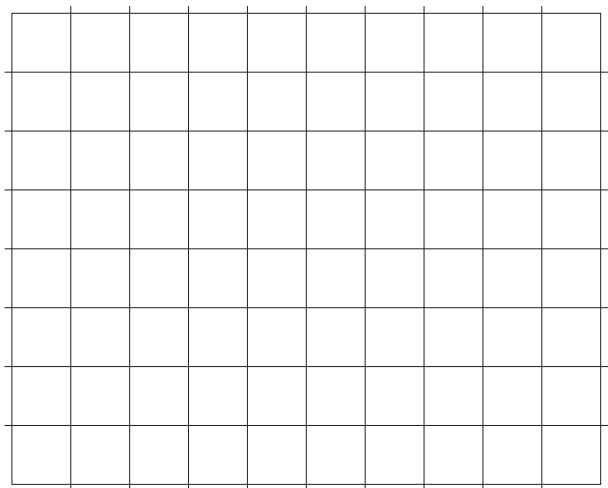
入力（実効値） $V_i = 6 \text{ mV}$ の時の出力

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



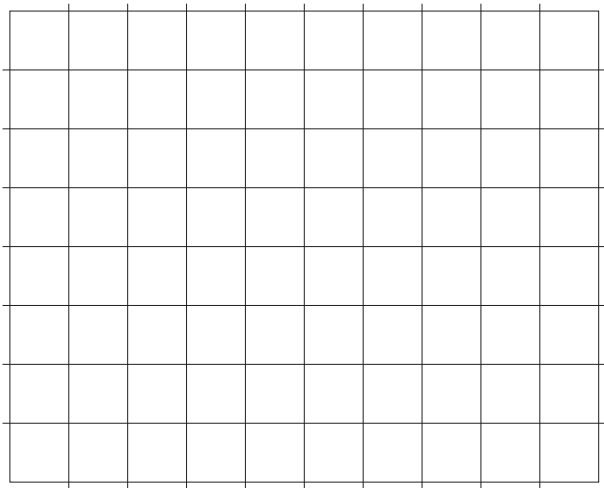
入力（実効値） $V_i = 10 \text{ mV}$ の時の出力

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



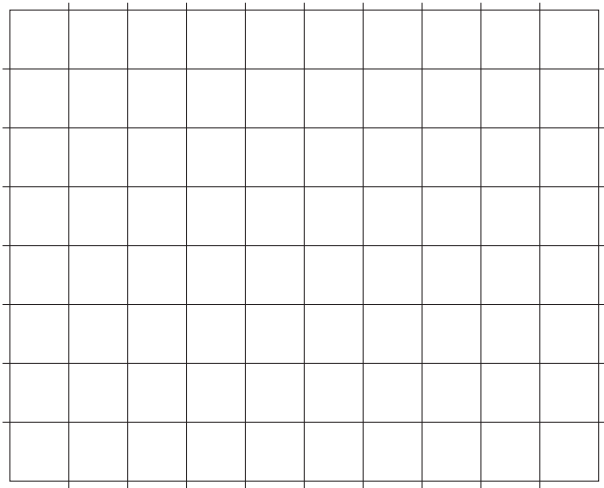
入力（実効値） $V_i = 20 \text{ mV}$ の時の出力

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



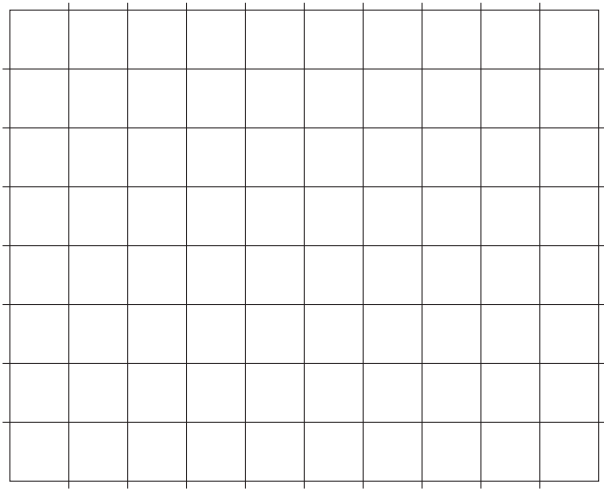
入力（実効値） $V_i = 30\text{ mV}$ の時の出力

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]	

2.3.4 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

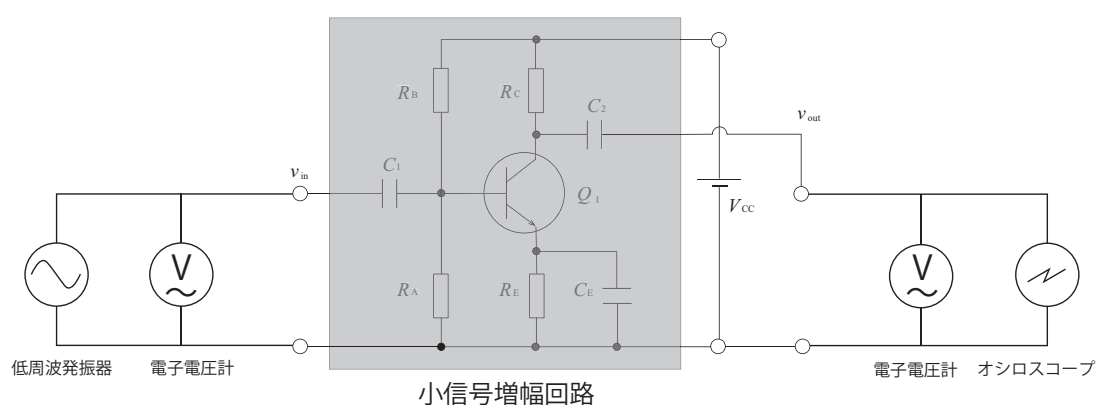


図 2.6 実習装置

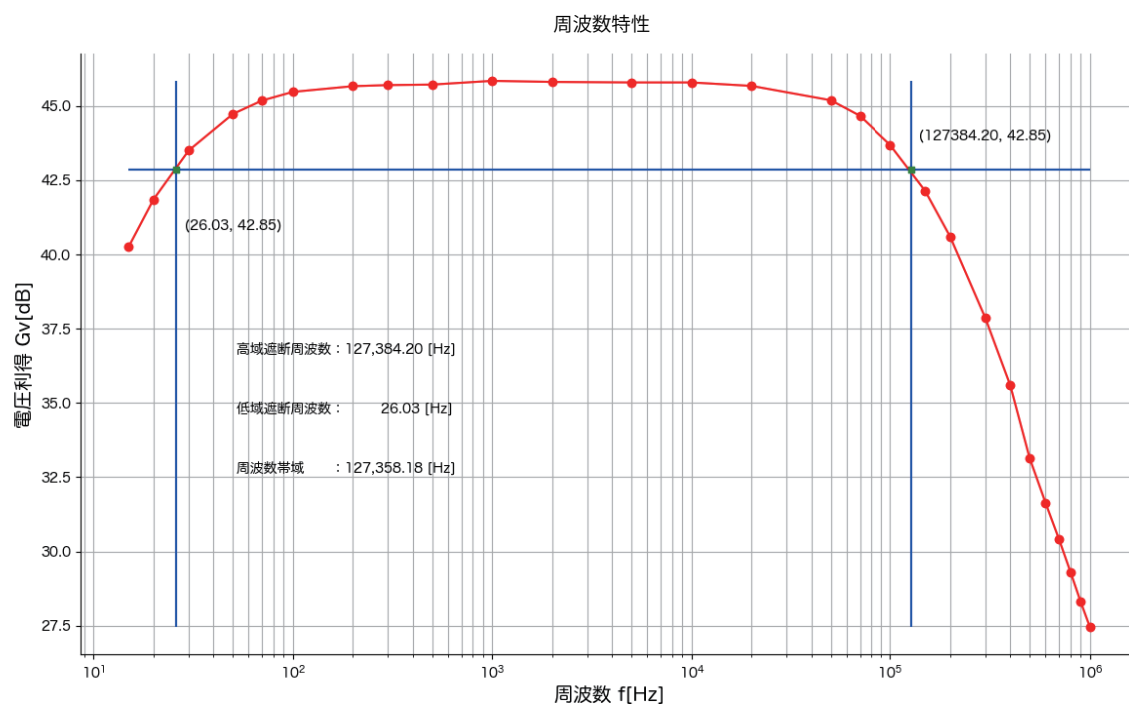


図 2.7 周波数特性のグラフ作成例

表6 周波数特性 (入力電圧 $V_i = 5\text{ mV}$)

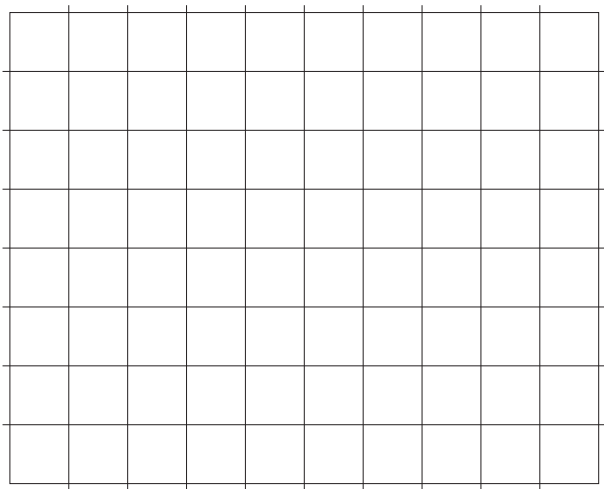
周波数 f [Hz]	15	20	30	50	70	100	200	300	500	1k
出力電圧 V_o [mV]										
電圧増幅度 A_v										
電圧利得 G_v [dB]										

	2k	5k	10k	20k	50k	70k	100k	150k	200k	300k

	400k	500k	600k	700k	800k	900k	1M			

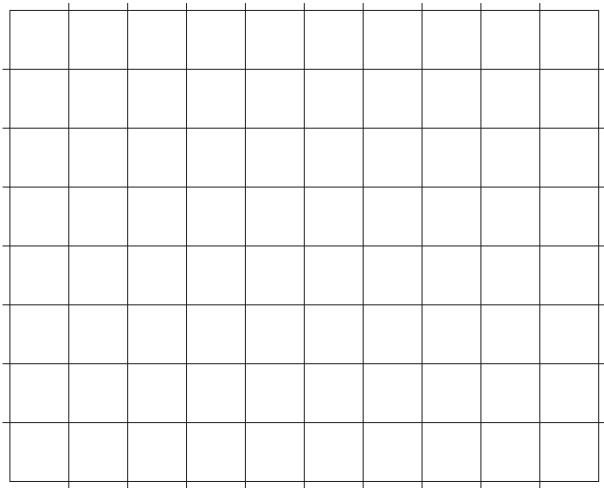
図 2.8 周波数特性の記録用紙

【周波数特性：オシロスコープ画面の情報をスケッチせよ】



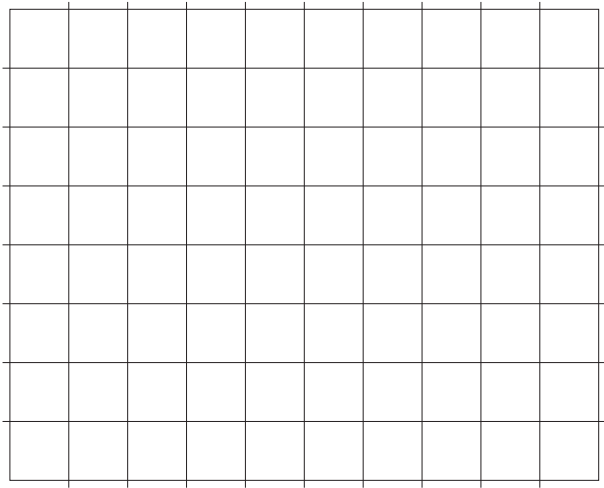
入力周波数 $f = 15\text{Hz}$ の時の出力

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



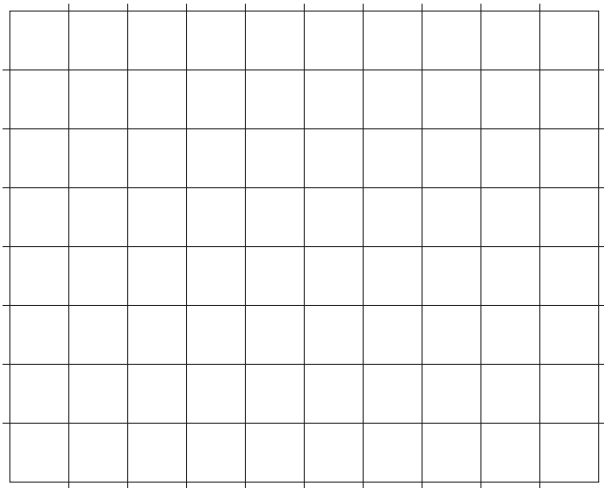
入力周波数 $f = 20\text{Hz}$ の時の出力

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



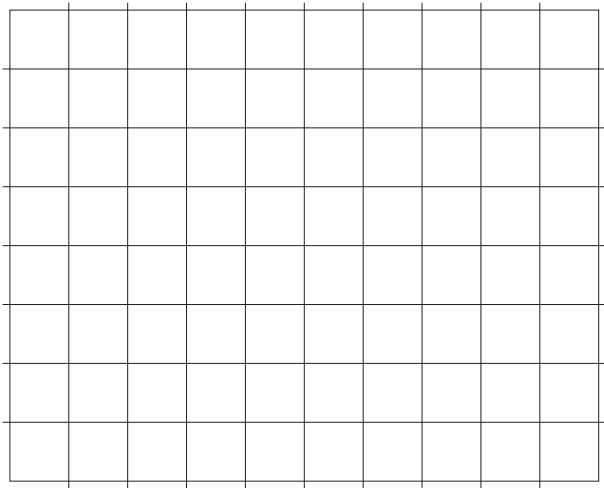
入力周波数 $f = 30\text{Hz}$ の時の出力

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



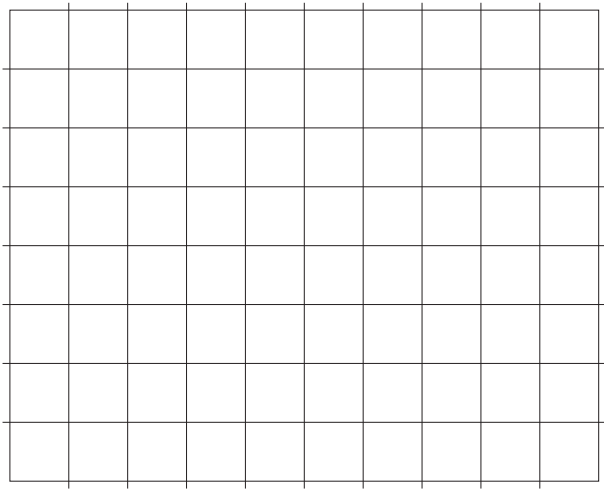
入力周波数 $f = 50\text{Hz}$ の時の出力

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



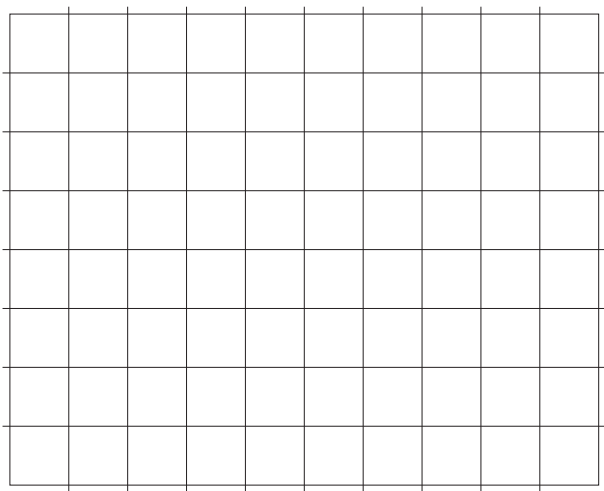
入力周波数 $f = 70\text{Hz}$ の時の出力

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



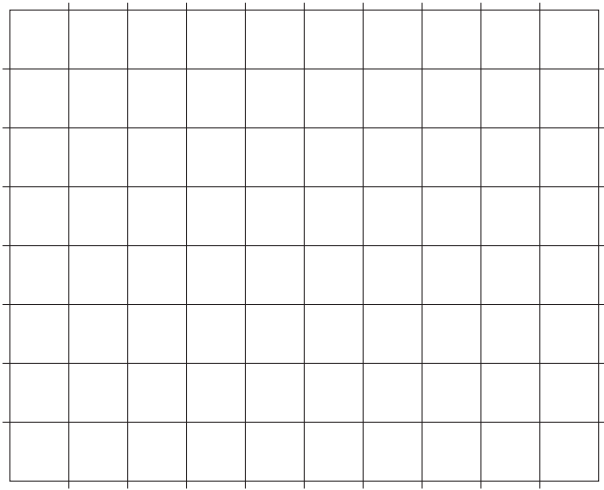
入力周波数 $f = 100\text{Hz}$ の時の出力

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



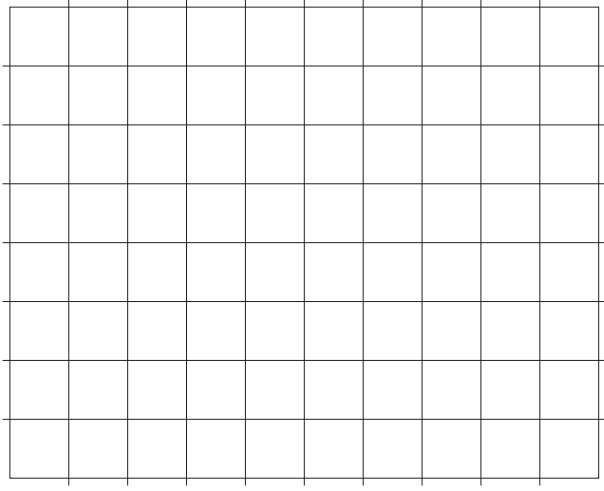
入力周波数 $f = 1\text{kHz}$ の時の出力

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



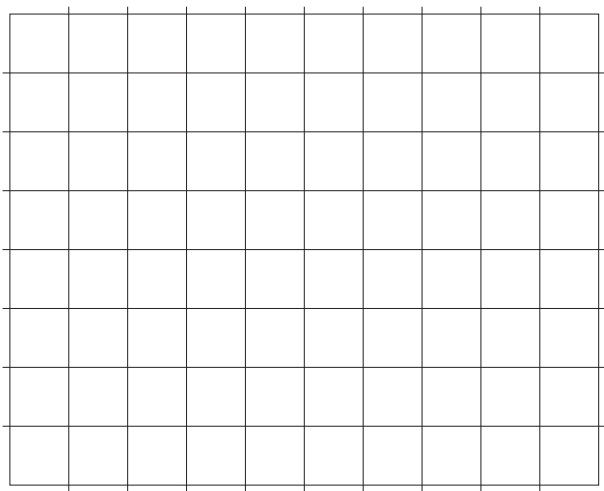
入力周波数 $f = 10\text{kHz}$ の時の出力

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



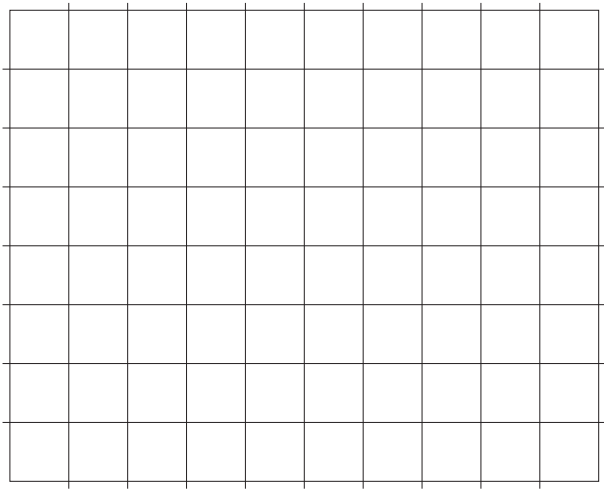
入力周波数 $f = 100\text{kHz}$ の時の出力

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



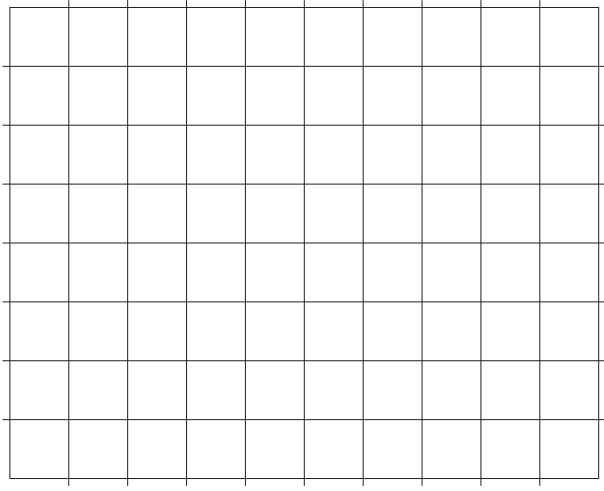
入力周波数 $f = 400kHz$ の時の出力

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



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]	



図 2.9 周波数特性の片対数記録用紙