

トランジスタ回路の設計

電気情報工学科4年後期
電気電子工学実験II

目次

1	はじめに	1
1.1	2SC1815 の直流増幅率測定	1
2	トランジスタの基本特性について	1
2.1	演習手順	1
2.1.1	準備	1
2.1.2	I_E - V_{BE} 特性	1
2.1.3	I_C - I_B 特性	2
2.1.4	I_C - V_{CE} 特性	3
3	エミッタ接地回路のバイアス電圧 v_{be} の設定	4
3.1	演習手順	4
3.1.1	DC 動作点解析	4
3.1.2	過渡解析	5
4	電流帰還バイアス回路の動作点設定	5
4.1	演習手順	6
4.1.1	DC 動作点解析	6
5	エミッタ接地交流増幅回路の設計	6
5.1	演習手順	7
5.1.1	過渡解析 (中域の増幅度に関して)	7
5.1.2	AC 解析	8

1 はじめに

トランジスタの基本的な増幅回路であるエミッタ接地増幅回路を設計する。原理の説明と電子回路シミュレーションソフトによる演習を並行して行うことで、電子回路の設計方法を習得する。シミュレーションソフトは、LTspice を用いる。

1.1 2SC1815 の直流増幅率測定

ゴール トランジスタの直流電流増幅率を測定する。

キーワード 直流増幅率

課題 1 専用測定器を用いてトランジスタの直流電流増幅率を測定してください。

2 トランジスタの基本特性について

トランジスタは小さな信号を大きな信号に増幅できる特性を持つ半導体素子である。3つの電極は、E(エミッタ) C(コレクタ) B(ベース) で構成される。今回は、NPN トランジスタを扱う。

ゴール I_E - V_{BE} 特性、 I_C - I_B 特性、 I_C - V_{CE} 特性を LTspice のシミュレーションで取得する。

キーワード 直流電流増幅率、ダイオード特性

2.1 演習手順

2.1.1 準備

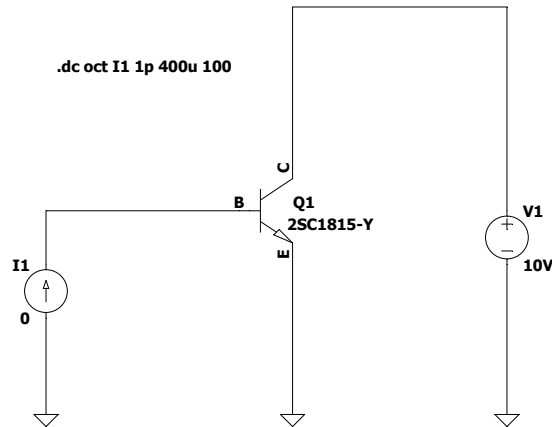
図 1(a) の回路を作成する。

1. 「Component」 → 「npn」 → OK
2. トランジスタを右クリック → 「Pick New Transistor」で「2SC1815」を選択し OK
3. 電流源、電圧源を以下の図のように配置し、DC スイープを図 1(b) のように設定
4. 「Run」 ボタンをクリックして解析を実行する
5. ベース電圧を測定する (プローブカーソルを合わせてクリックすると、図 1(c) のような画面になる。)

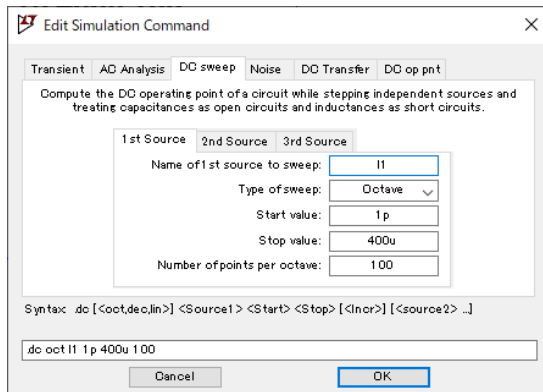
2.1.2 I_E - V_{BE} 特性

I_E - V_{BE} 特性を図 2 に示す。

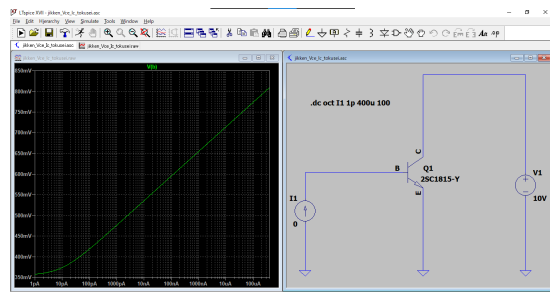
1. グラフの横軸にマウスカーソルを当てて定規カーソルで右クリック → 「Horizontal Axis」 → 「Quantity Plotted」欄を " $V(b)$ " に変更 → OK ボタンクリックで終了。
2. グラフの凡例の $V(b)$ をクリック → 「Expression Editor」 → 「Enter an algebraic expression to plot」を " $-I_e(Q1)$ " に変更する。
3. OK ボタンをクリックして終了すると $-I_e(Q1)$ vs $V(b)$ のグラフが表示される。
4. グラフの軸上で右クリックし、「Horizontal Axis」「Vertical Axis」「tick」を調整する。
5. この特性を印刷するか画像で保存しておく。この回路図も保存しておく。
6. 「Vertical Axis」 → 「Logarithmic」欄にチェック → OK と設定すると、片対数グラフでエミッタ電流が直線的に変化している。



(a) 特性取得用



(b) dc ディレクティブタブ



(c) DC スweep

図 1: I_E - V_{BE} 特性の取得方法

課題 2 2SC1815 の I_E - V_{BE} 特性を DC スweep により取得して下さい。(用いた回路図とディレクティブを示すこと。図 1(a)(c)、図 2(a)(b))

任意課題 4 片対数グラフを用いて、 $\frac{q}{kT} \log_{10}(e)$ の値 (理論値) と比較して下さい。

カーソルを用いて傾きを求める。グラフ上部の凡例を右クリック → 「Expression Editor」 → 「Attached Cursor」 → 1st & 2nd を選んで十字カーソルを 2 個表示

2.1.3 I_C - I_B 特性

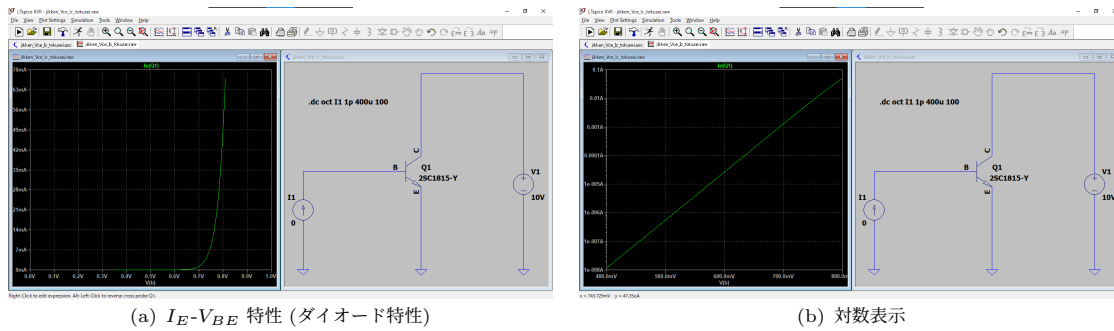
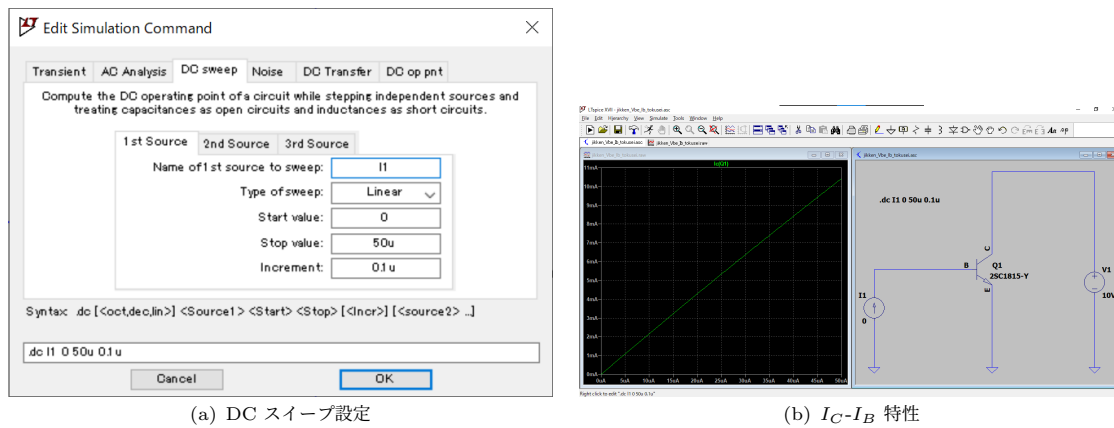
I_C - I_B 特性を図 3 に示す。「Edit Simulation Cmd」 → 「Edit Simulation Command」 → 「DC sweep」で以下のように設定しディレクティブを貼り付ける。

課題 3 2SC1815 の I_C - I_B 特性を DC スweep により取得して下さい。(用いた回路図とディレクティブを示すこと。図 3(a)(b))

任意課題 5 I_C - I_B 特性を用いてエミッタ交流電流増幅率と接地直流電流増幅率を求めて下さい。その値を直流電流増幅率と比較して下さい。

交流電流増幅率 特性曲線の 1 点で、ベース電流とコレクタ電流の増幅率を求める。

直流電流増幅率 特性曲線の 2 点で、ベース電流とコレクタ電流の増幅率を求める。

図 2: I_E - V_{BE} 特性図 3: I_C - I_B 特性

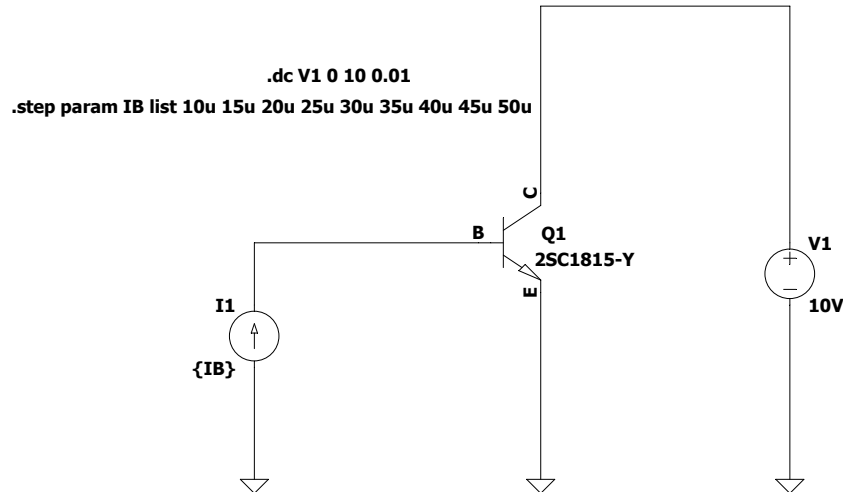
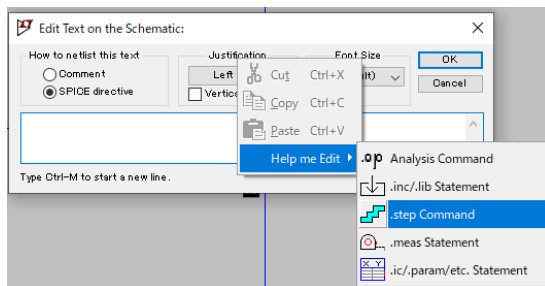
2.1.4 I_C - V_{CE} 特性

I_C - V_{CE} 特性を取得するための op ディレクティブの設定を図 4、 I_C - V_{CE} 特性を図 5 に示す。

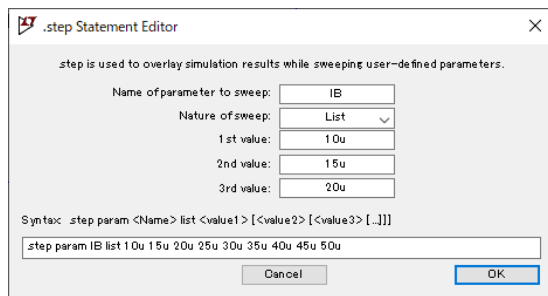
1. I_1 をパラメータとして設定する。 I_1 を右クリックして "{IB}" と入力する。
2. spice ディレクティブを設定
 - 「SPICE Directive」(.op) → 「Edit Text on the Schematic」→ 入力欄で右クリック「Help me Edit」→ 「.step Command」→ 「.step Statement Editor」に SPICE ディレクティブを書き込む → OK
 - .step param IB list 10u 15u 20u 25u 30u 35u 40u 45u 50u と入力
3. DC スイープの設定
 - .dc V1 0 10 0.01
 - 「Run」をクリックし、 I_C をプローブで測る。
4. この特性を印刷するか画像で保存しておく。

課題 4 2SC1815 の I_C - V_{CE} 特性を SPICE ディレクティブを用いて取得して下さい。(用いた回路図とディレクティブを示すこと。図 4(a)、図 5(a)(b))

任意課題 6 I_C - V_{CE} 特性から、入力信号トランジスタの増幅回路を設計するための V_{CE} の領域は何 V ~ 何 V が良いでしょうか？

(a) I_C - V_{CE} 特性

(b) .op ディレクティブ



(c) step パラメータの設定

図 4: .op ディレクティブの設定

3 エミッタ接地回路のバイアス電圧 v_{be} の設定

エミッタ接地回路の動作点設定を、原理の説明とシミュレーションによる演習により理解する。

ゴール 2 電源バイアス回路を LTSpice で設計する。(バイアス電圧 V_{be} と負荷抵抗 R_L を決定する。)

キーワード I_C - V_{CE} 特性、 I_E - V_{BE} 特性、負荷線、動作点 $V_{CEQ} \cdot I_{CO} \cdot V_{BEQ}$

ストーリー I_E - V_{BE} 特性と、 I_C - V_{CE} 特性を使って、動作点 $V_{CEQ} \cdot I_{CO} \cdot V_{BEQ}$ を決める。→ 過渡解析により増幅率を実測 → 計算値と比較。

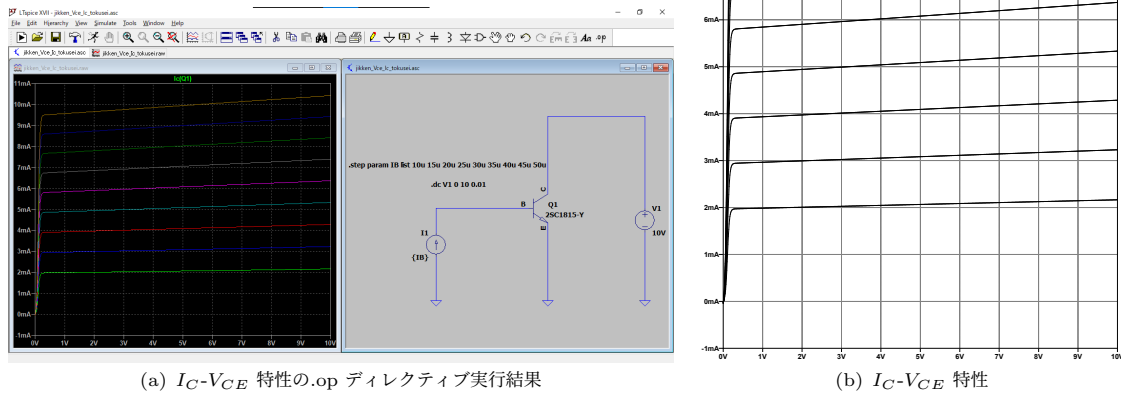
3.1 演習手順

原理で計算した値を用いて図 6(a) に示す回路図を設計する。入力信号は正弦波 $v_{be} = 5.27 \text{ mVp-p}$ を使用する。

3.1.1 DC 動作点解析

spice ディレクティブ「DC op pnt」に「.op」のみ記述し、ディレクティブに張り付ける → 「Run」で実行。→ 設計した値に対応するベース電流、コレクタ電流が DC 動作点の解析結果として現れる。

課題 5 2SC1815 の DC 動作点解析を行ってください。(ベース電流、コレクタ電流の DC 動作点を求め

図 5: I_{CE} - V_{CE} 特性

る。) (用いた回路図とディレクティブを示すこと。図 6(a)(b)) 動作点が正しく設定されているかどうか根拠と共に説明してください。直流電流増幅率 β_0 を求めて、計算値と比較して下さい。

3.1.2 過渡解析

「Edit Simulation cmd.」から Transient 解析を選び、「.tran 3ms」ディレクティブを適用させて、過渡解析を実行する。この時、 V_C 、 I_C 、 I_B の波形を確認する。

課題 6 2SC1815 の過渡解析を行ってください。(用いた回路図とディレクティブを示すこと。図 6(c)) i_b 、 i_c の波形に対する、 V_c の波形の位相の特徴を説明して下さい。交流電流増幅率 β_0 を求めて下さい。
($\beta_0 = i_c / i_b$)

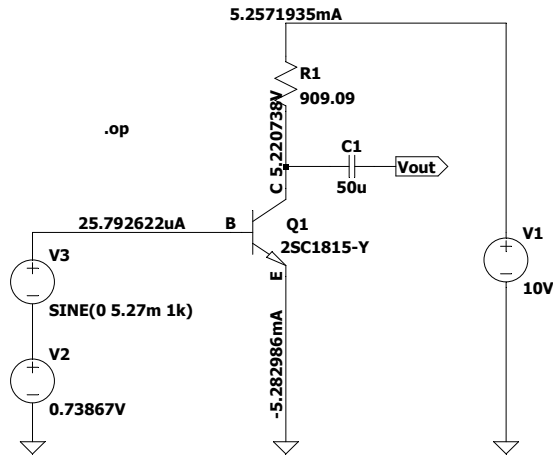
4 電流帰還バイアス回路の動作点設定

電流帰還バイアス回路は、エミッタ接地増幅回路の基本形であり、増幅回路の直流電流動作点を決めるための動作原理図である。(実際にこの形のままで使われることはない。) 固定バイアス、自己バイアス等、入力信号 (電圧) にバイアスを加える方法はいくつかあるが、一般的に、トランジスタの持つ特性により動作に悪影響を受ける。(直流電流増幅率の温度変化) この回路は、温度変化による影響を受けにくい設計となっている。

ゴール 前章で決めた動作点と諸条件から直流電流の動作点を決める。(ブリーダ抵抗の値を決定する。)

キーワード ブリーダ抵抗、温度補償

ストーリー 前章で決めた動作点+諸条件 → 閉路方程式を立てて回路に流れる直流電流を求める。→ 直流電流の動作点を決める。→ LTspice 上で設計 → DC スイープにより動作点を確認 → 計算値と比較

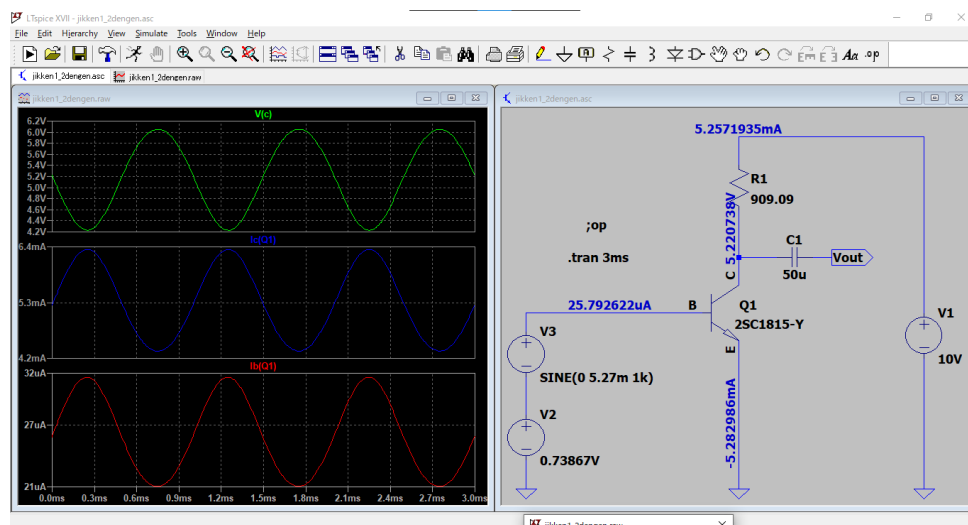


(a) 2 電源バイアス回路の動作点

--- Operating Point ---

V(c):	5.22074	voltage
V(b):	0.73867	voltage
V(n001):	10	voltage
V(n002):	0.73867	voltage
V(vout):	0.000261024	voltage
Ic(Q1):	0.00525719	device_current
Ib(Q1):	2.57926e-005	device_current
Ie(Q1):	-0.00528299	device_current
I(C1):	-2.61024e-016	device_current
I(R1):	0.00525719	device_current
I(V3):	-2.57926e-005	device_current
I(V2):	-2.57926e-005	device_current
I(V1):	-0.00525719	device_current

(b) 動作点解析結果



(c) 過渡解析結果

図 6: 2 電源バイアス回路の各種特性

4.1 演習手順

4.1.1 DC 動作点解析

課題 7 図 7 の回路を作成し、.op ディレクティブを用いて DC 動作点解析をして下さい。(用いた回路図とディレクティブを示すこと。図 6(a)(b)) DC 動作点が正しく設定されているかどうか考えて下さい。

5 エミッタ接地交流増幅回路の設計

電流帰還バイアス回路を用いたエミッタ接地交流増幅回路を設計する。この回路が、実際に使用されるエミッタ接地回路である。

ゴール 電流帰還バイアス回路を用いたエミッタ接地交流増幅回路を設計する。

キーワード 等価回路、結合キャパシタ C_1 、 C_2 、 C_E 、電圧増幅度、遮断周波数、入力インピーダンス、四端子定数、 $V_{BE} - I_E$ 特性

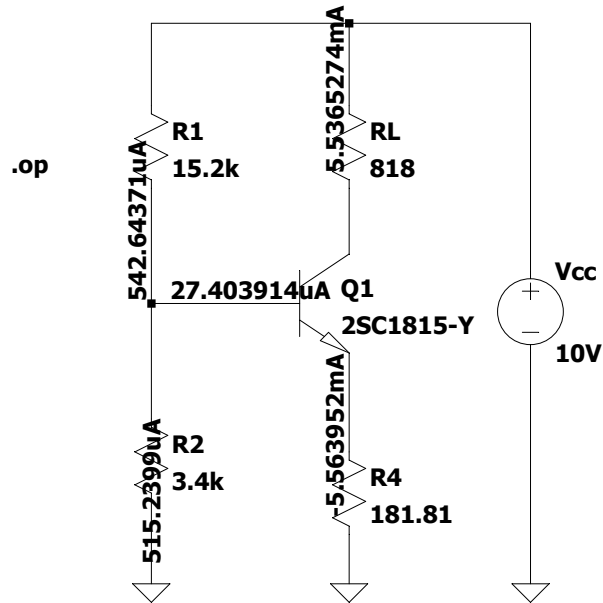


図 7: 電流帰還バイアス回路 DC 動作点解析

ストーリー エミッタ接地回路の交流成分を考える → 交流等価回路にする → 入力インピーダンス、出力インピーダンスをなんか計算する → 低域遮断周波数、電圧増幅度、結合キャパシタの値を決める。ついでに利得とかも計算する。→ LTspice で設計 → LTspice で交流増幅特性 (AC 解析) → LTspice で過渡解析 → 計算値と比較

5.1 演習手順

バイアス設定確認 → 動作点解析 → 交流増幅特性解析の順に行う。 C_2 の出力側に次段の入力インピーダンス $R_i = 1k\Omega$ を接続することで、中域の増幅度が変化する。

$$\text{電圧増幅度 (中域)} |A_v| = \frac{\beta R'_L}{Z_i} = \frac{R'_L}{Z_i/\beta} \approx \frac{R'_L}{r_e} \quad (R'_L = R_L // R_i = \frac{R_L R_i}{R_L + R_i}) \quad (1)$$

$$\text{電圧利得 } 20 \log(R'_L/r_e) \quad (2)$$

5.1.1 過渡解析 (中域の増幅度に関して)

1. $v_1 = 10\text{mV}$ (振幅), 1 kHz
2. R_i の次段の入力抵抗を $1k\Omega$
3. $R'_L = R_L // R_i$ より、 R_i は、中域の増幅度に影響を与える。

中域増幅度 $|A_v| = \frac{\beta R'_L}{Z_i} = \frac{R'_L}{Z_i/\beta} \approx \frac{R'_L}{r_e}$ より、

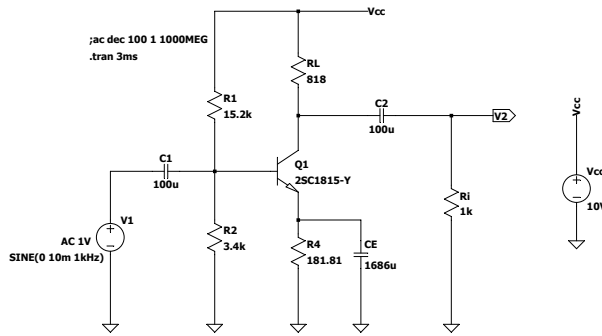
$$R'_L = R_L // R_i = 818.18 // 10^3 = 449.999... \approx 450[\Omega] \quad (3)$$

$$\text{電圧増幅率 } |A_v| \approx \frac{R'_L}{r_e} = \frac{450}{4.7272...} = 95.1937... \approx 95 \quad (4)$$

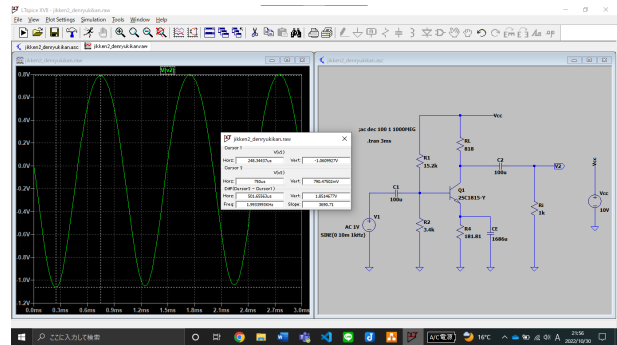
$$\text{電圧利得 } 20 \log\left(\frac{R'_L}{r_e}\right) = 20 \log\left(\frac{450}{4.7272...}\right) = 39.572... \approx 39.6\text{dB} \quad (5)$$

課題 8 入力信号 $v_1 = 20 \text{ mVp-p } 1\text{kHz}$ として図 8 の回路を設計し、過渡特性を取得して下さい。

(用いた回路図とディレクティブを示すこと。図 8(a)(b))



(a) エミッタ接地交流増幅回路



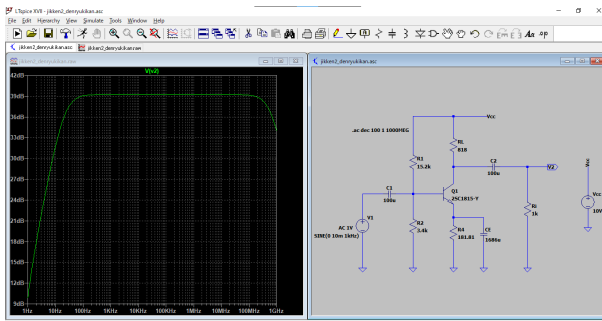
(b) 過渡特性結果

図 8: 過渡特性

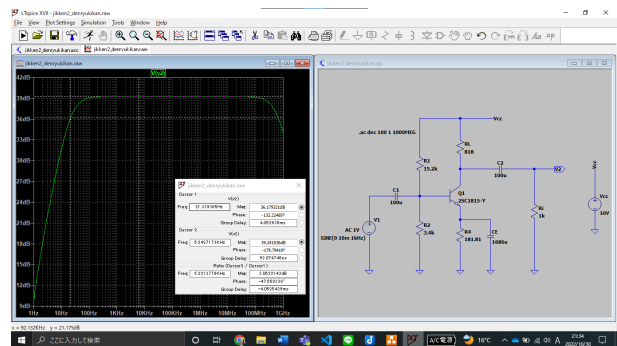
5.1.2 AC 解析

課題 9 手順に沿って図 9 に示す AC 解析を行って下さい。

「Edit Simulation Command.」→「AC 解析」→「Stop frequency」を「100MEG」に設定 → .ac ディレクティブを回路図に張り付けて「Run」を実行する。電圧プローブを v_2 に設定する。



(a) AC 解析結果



(b) AC 特性 (3dB 降下をカーソルで取得)

図 9: AC 解析

課題 10 低域遮断周波数、電圧増幅率、電圧利得を計測し、それらの理論値と実測値を比較してください。

低域遮断周波数: 電圧利得が 3dB 降下する周波数

電圧増幅率: 過渡解析において、 v_2 の p-p 値を求め、 v_2/v_1 の値を求める。

電圧利得: $20 \log |A_v|$ の値を AC 解析の中域利得と比較する。