

LTspice を用いたアナログ回路 II の再現

第 1 回目の内容

坂本 克好

電通大・先進理工

[背景]

LinearTechnology 社は SPICE 回路シミュレータ LTspice[D・1]を無料配布している。このソフトは、自社のデバイスの動作を確認するためのものである。同様の目的で、海外の各デバイスメーカーも回路シミュレータを無料配布している。多くの無料配布シミュレータの中で、LTspice の利点は、ファイルサイズが小さく、回路規模に制限がなく、シンプルなインターフェイスで使いやすいことである。

また、PC の性能の向上とインターネットの普及によりシミュレーションソフトの情報の入手しやすさなどの環境が整い個人での回路シミュレーションが身近になった。この事実は、検索サイトにおいて、LTspice で検索することで実感できる。

[目的]

電気通信大学・先進理工学科の電子工学コースと光エレクトロニクスコースで実施している工学実験のアナログ回路 II 第 1 回目の内容を LTspiceIV を用いて PC 上で再現する。また、実験を PC で再現することで、自宅にて準備実験や確認実験することができる。これにより、実験の内容と考察の理解を深める助けになる。

[内容]

内容は、6 の章と参考文献などから構成される。

- 1) レベルシフタの入出力特性
- 2) オペアンプを用いないリミッタ回路入出力特性
- 3) オペアンプを用いないリミッタ回路入出力波形観察
- 4) オペアンプを用いたリミッタ回路入出力特性
- 5) オペアンプを用いたリミッタ回路入出力波形観察
- 6) オペアンプを用いないリミッタ回路入出力特性と実験データの比較

課題について

参考文献

付録 A1、LTspice 上での実験データの表示について

A2、CVS ファイルの読み込みについて

A3、ダイオードと負荷線について

B、発振周波数を計算する

C、LTspice において XY 表示をする

回路定数について、

解析回路の回路定数は実験指導書(2016 年度版)の値と同じ値とした。

実験の回路と実験手順など詳細は、実験指導書を参照してください。

また、計算結果に対する詳細な考察は、読者に任せます。

注意事項として、LTspice のインストール・使用方法などは文献を参照してください。

特に、OP アンプ : TL074 の spice モデル[D - 3]の Download と追加方法、基本的な Spice 命令、さらに、error-log ファイルからのグラフ表示方法などの詳細は、文献や検索したサイトを参照してください。また、実際の実験で使用したダイオード : 1S2076A の SPICE モデルについては、互換品の 1S1588、または 1N4148 を使用している。

LTspice を公開している Linear Technology 社には、このような有用なソフトを無料で公開していることに感謝いたします。

また、Web 上で LTspice を用いた回路の情報を公開しているサイトの皆様にも感謝いたします。有難うございました。

また、アナログ回路 2 の実験内容と実験の検証をして頂きました永井先生には、実験内容について LTspice を用いて検証する機会を与えていただきましたことに感謝致します。さらに、実験室の管理運営、装置および部品の準備をしていただいた技術職員の矢崎先生・早川先生にも感謝致します。

1) レベルシフタの入出力特性

[目的]

レベルシフタ回路の入出力特性を観察する。

[手順と方法]

回路図の Fig17 を作成する。

OP アンプには、

TL074 を使用する。

また、入力端子と出力端子には、ラベル名を付ける。

解析には、DC 解析を実行する。

入力信号源：V1 を、0V から

12V まで変化させる。

解析命令記述ウインドを示す。

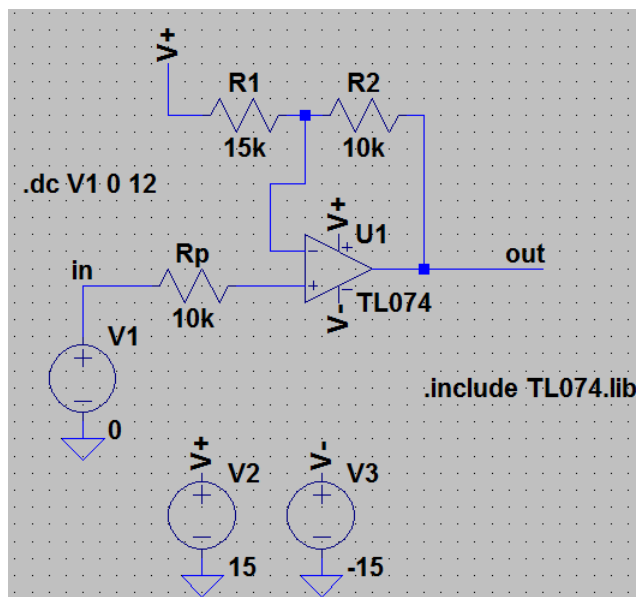


Fig.1 解析回路

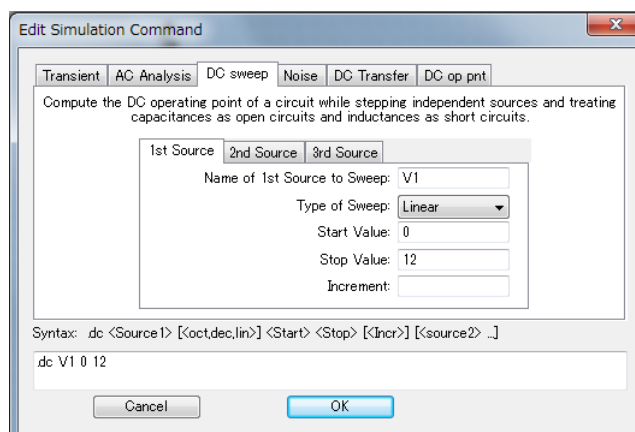


Fig.2 解析設定ウインド

[解析結果]

解析を実行する。

解析終了後に、

回路図の out 端子をクリックすると右のグラフが表示される。

このグラフにおいて、横軸が入力電圧:in を示し、縦軸が出力電圧:out を示す。

入力 0V で、出力が-10V であり、入力 12V で、出力が+10V である直線に変化することが確認できる。

レベルシフト回路の動作が確認できた。

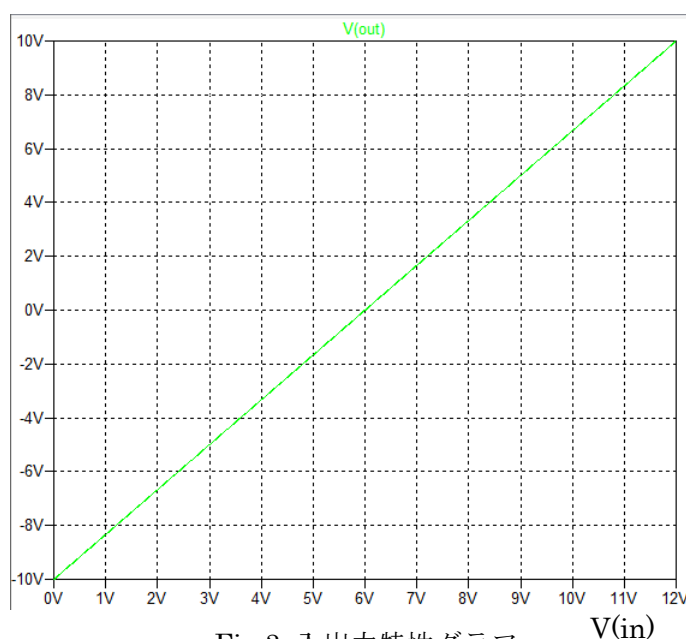


Fig.3 入出力特性グラフ

2) オペアンプを用いないリミッタ回路入出力特性

[目的] 指導書の実験回路を LTspice を用いて実験を再現する。

[手順と方法] 6.2 オペアンプを用いないリミッタの入出力特性の回路図 P4-9 の Fig18 を参考に回路を作成する。

OP アンプ:TL074 用の TL074 ライブラリを SPICE の lib 命令で読み込む。

また、ダイオードの 1S1588 のライブラリを SPICE の model 命令で設定する。

[解析結果]

電源:V1 はレベルシフト回路の電源とする。

また、電源:V2 を DC sweep しています。

sweep 範囲は、0 から 12V に設定する。

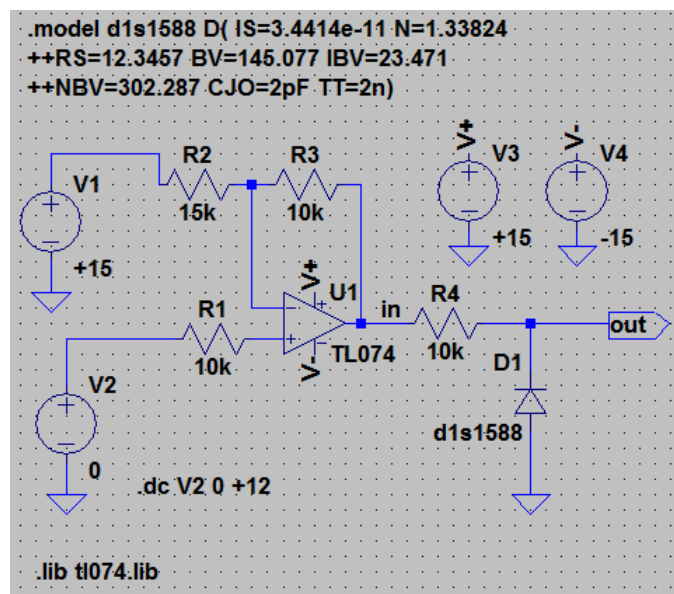


Fig.1 回路図

解析には、DC sweep を実行する。

解析終了後、端子 Out をクリックすると、

横軸が V2 のグラフが表示されます。

このグラフの横軸のラベルをクリックする。

右のウインドが開くので、

Quantity Plotted 欄を V(in)に変更する。

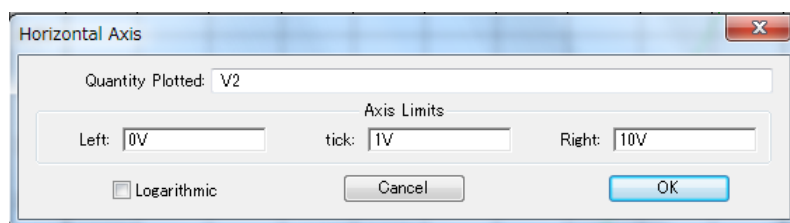


Fig.2 ラベルプロパティ

OK ボタンをクリックすると、

横軸が V(in)で、

縦軸が V(out)のグラフに変更されます。

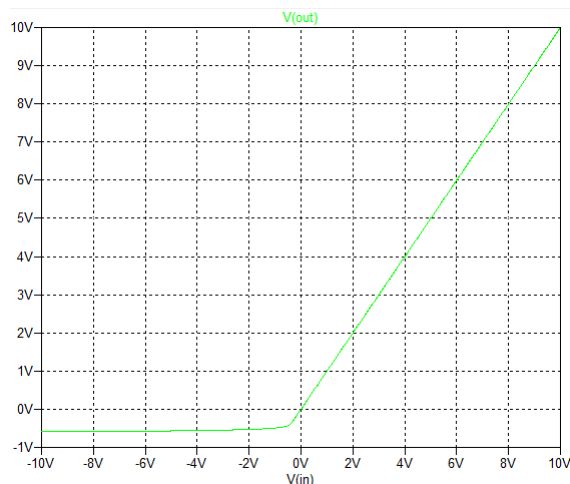


Fig.3 入力出力のグラフ

3) オペアンプを用いないリミッタ回路入出力波形観察

[目的]正弦波入力したときの出力波形を観察する。

[手順と方法]回路図は、Fig.19 を参考に作成する。

[解析結果]入力信号源:V1 を 1kHz の sin 波として、
振幅をパラメータ : ampl として、SPICE の step 命令を用いて、100m,500m,1,2,3,5V と変化させる。

さらに、出力波形の平均値を計算する。これには、
SPICE の avg 命令を使用する。

解析方法には、Transient 解析を実行する。

計算時間を、5msec とする。

解析終了後に、

Out 端子をクリックすると、

右のグラフが表示されます。

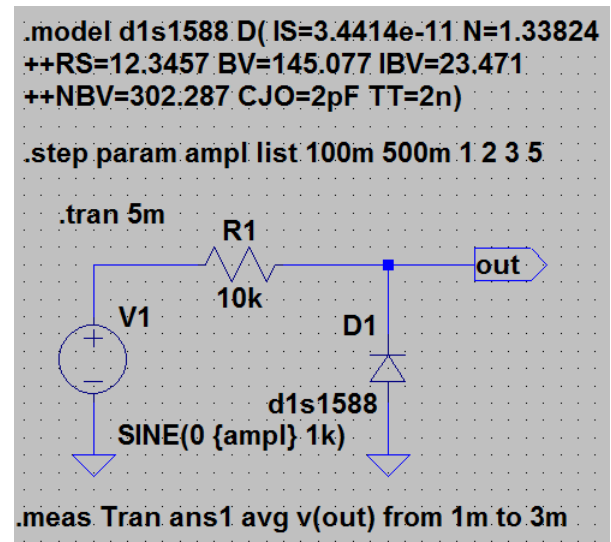


Fig.1 回路図

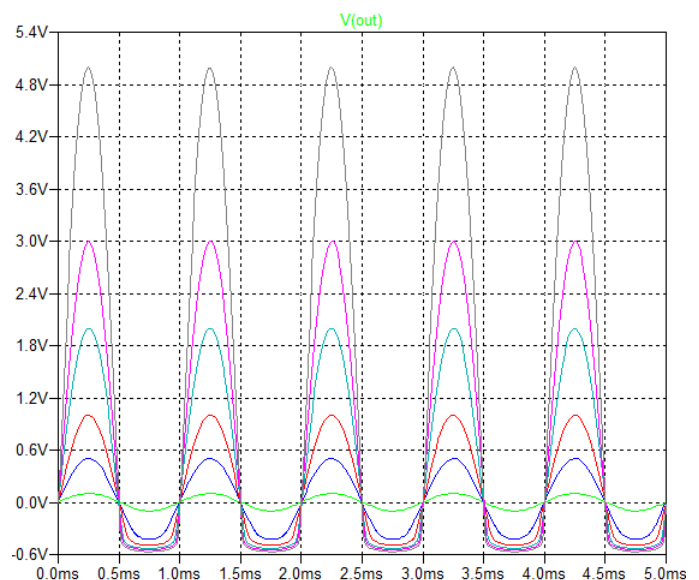


Fig.2 出力波形のグラフ

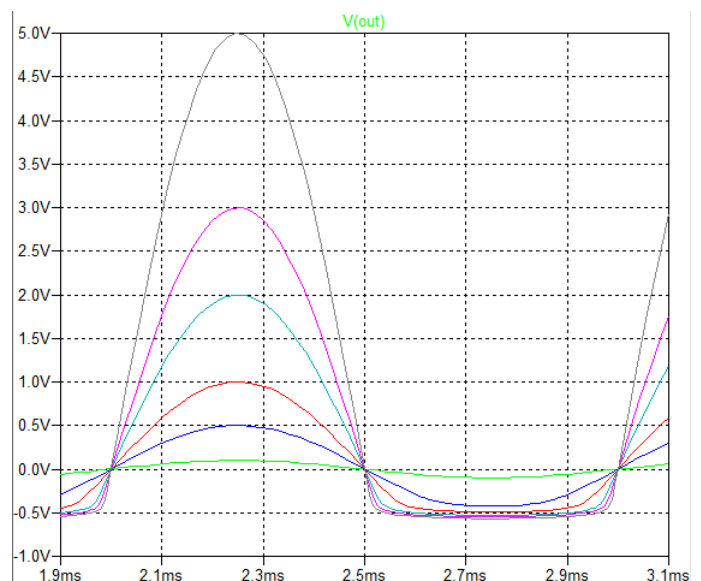


Fig.3a 出力波形のグラフの拡大

出力波形の特徴を確認するために、
波形が正電圧から負電圧に変化する
場所を拡大する。

負電圧が出力されていることがわかる。
出力電圧は入力電圧により変化して、
-0.5V 程度で飽和していることがわかる。

実際の実験でも確認できるか観察すること！

次に、平均値をグラフ表示させるために、回路図のメニューの VIEW の SPICE ErrorLog を選択する。

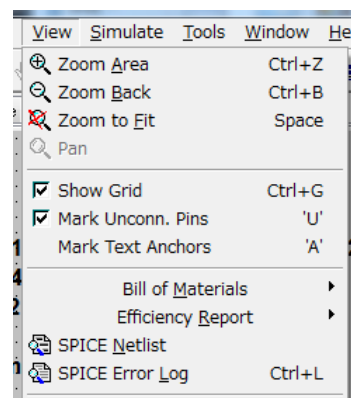


Fig.4 View メニューの一覧

ErrorLog ファイルが開くので、このファイル上で右クリックする。
このメニューの Plot .step'ed .meas data を選択するとグラフが表示される。

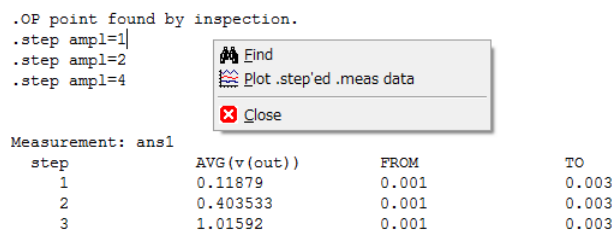


Fig.5 ErrorLog ファイルと右クリックメニュー

右に、X 軸が step 変数の ampl で、縦軸が V(out)の平均値 : avg のグラフが得られる。

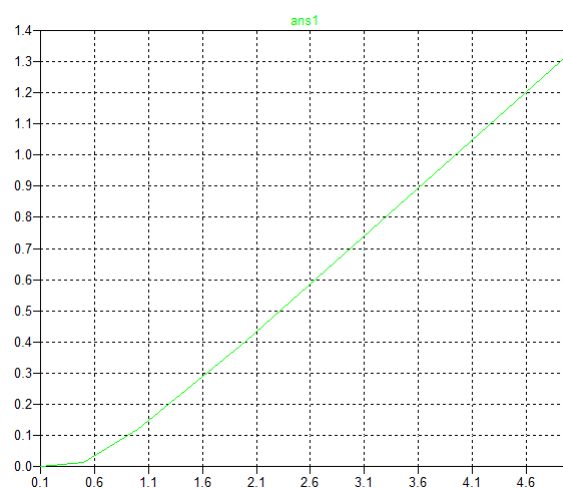


Fig.6 ampl と平均値のグラフ

4) オペアンプを用いたリミッタ回路入出力特性
 [目的]オペアンプを用いたときのリミッタ回路の入出力特性の動作を確認する

[手順と方法]回路図の Fig.20 を作成する。

OP アンプには、TL074 を使用する。

さらに、ダイオードは、1S1588 を用いるために、
 Model 命令でダイオードの
 デバイスパラメータを指定する。

[解析結果]

電源:V1 は、レベルシフト用の電源とする。

信号源である電源: V2 を DCsweep する。

sweep 範囲は、0 から 12V です。

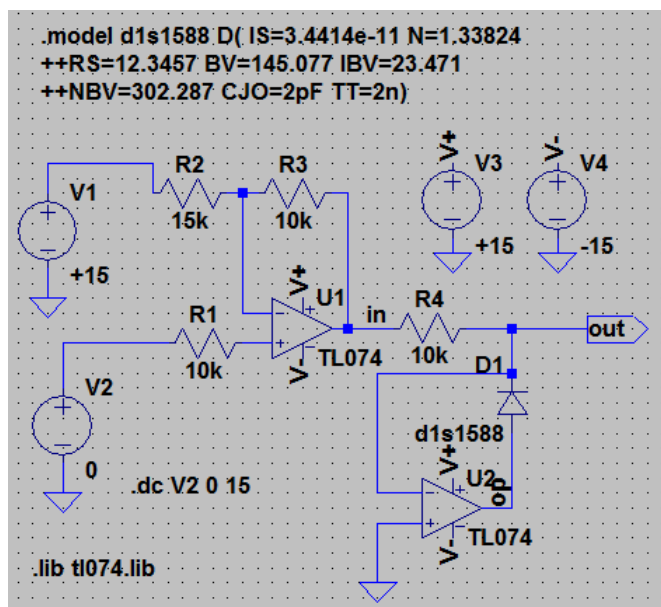


Fig.1 回路図

解析方法は、DC 解析を実行する。

実行後に、out 端子をクリックすると、右のグラフが表示される。このグラフの横軸は V2 であるので、入力端子: in に変更する。軸辺りをクリックすると、以下のウインドが開く。

QuantityPlotted 欄に、V(in)を入力して、
 OK ボタンを選択する。

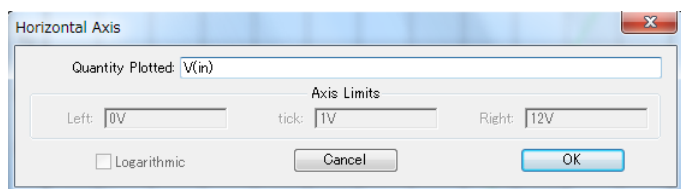


Fig.2 ラベルプロパティ

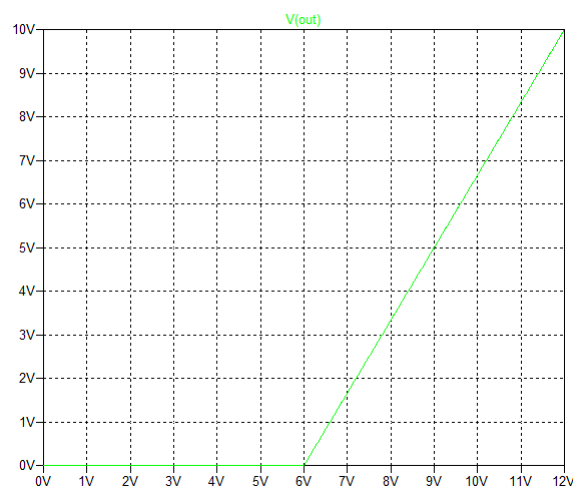


Fig.3 入力と出力のグラフ

縦軸をクリックして、表示範囲を変更する。マイナス側を-1V からに変更する。

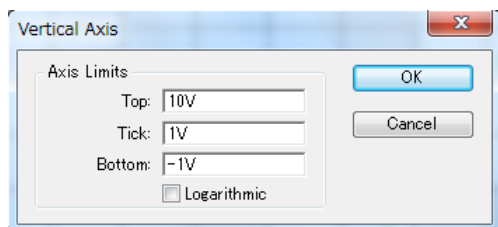


Fig.4 軸のプロパティ

負の入力電圧において、出力電圧が 0V であることがわかる。

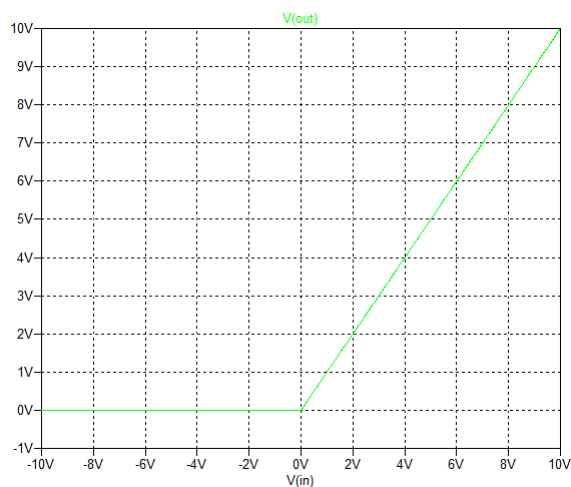


Fig.5 変更後の入力と出力のグラフ

5) オペアンプを用いたリミッタ回路入出力波形観察

[目的] オペアンプを用いたときの

リミッタ回路の入出力波形観察する

[手順と方法] 回路図の Fig.21 を作成する。

OP アンプには、TL074 を使用する。

さらに、ダイオードは、1S1588 を用いるために、

Model 命令でダイオードの

デバイスパラメータを指定する。

入力信号 V2 を正弦波とし、sin 波の振幅を

ampl と定義して、Step 命令により

0.1, 0.5, 1, 2, 3, 5 V と変化させる。

さらに、

平均値を計算するために、meas 命令を用いる。

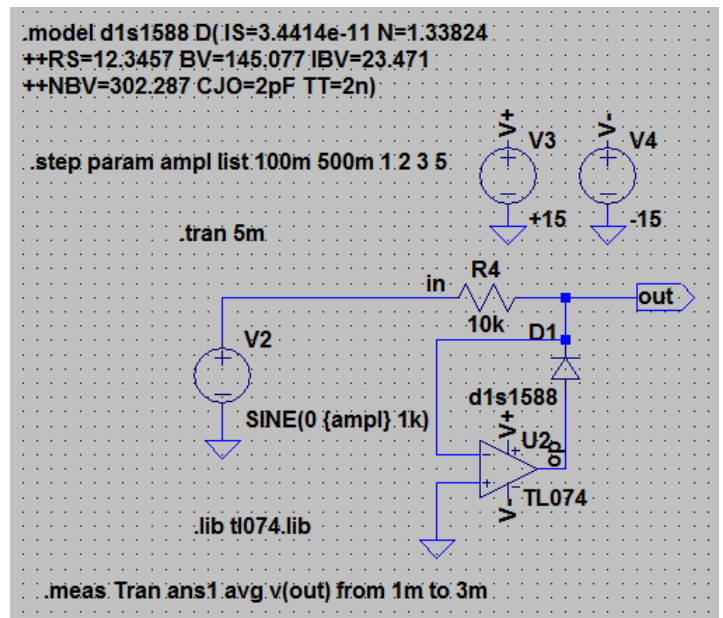


Fig.1 回路図

[解析結果]

解析には、Transient 解析を実行する。

解析終了後に、

Out 端子をクリックすると右のグラフが表示される。

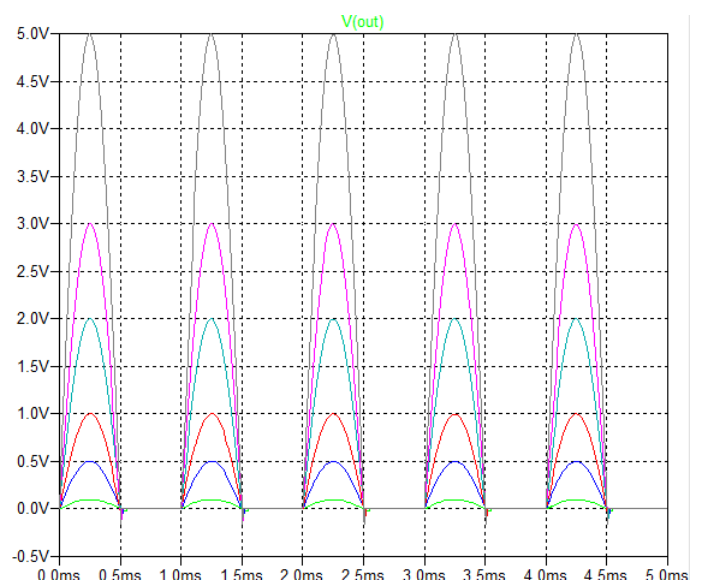


Fig.2 出力波形のグラフ

出力波形の特徴の詳細を観察するために、

正電圧から負電圧に変化する部分を拡大する。

右図の様に、オーバーシュートが確認できる。

さらに、入力信号の大きさにより

オーバーシュートの大きさが

変化していることがわかる。

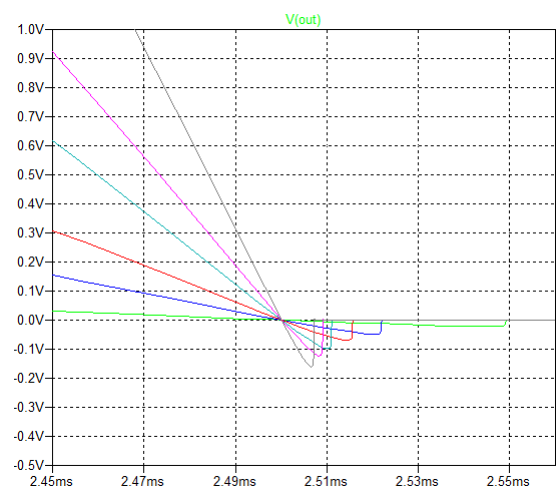


Fig.3 出力波形のグラフの拡大

実際の実験でも確認できるか観察すること！

次に、回路図のメニューの **VIEW** 中の **SPICE ErrorLog** を選択する。

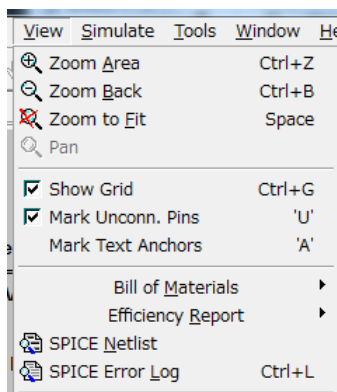


Fig.4 View メニューの一覧

ErrorLog ファイルが開くので、
右クリックしてメニューを開く。

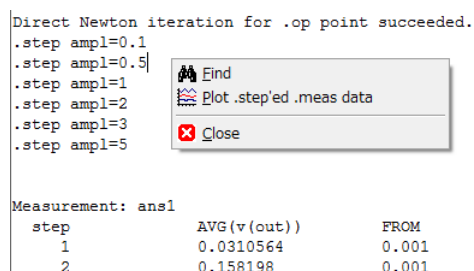


Fig.5 ErrorLog ファイルと右クリックメニュー

この中の、”Plot .step’s .meas data”を選択すると、
横軸が v_{in} の ampl と
縦軸が $V(out)$ の平均値 : AVG
のグラフが表示される。

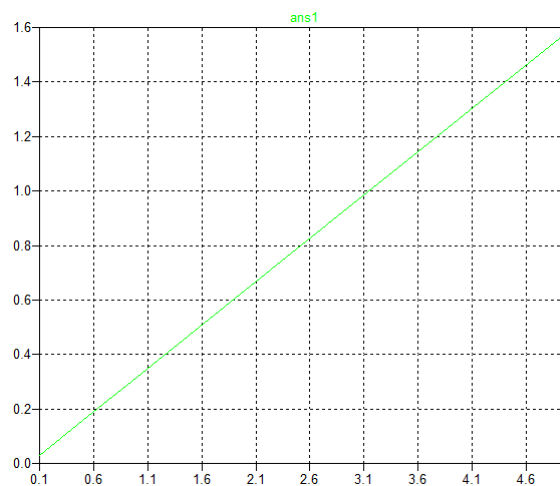


Fig.6 ampl と平均値のグラフ

6) オペアンプを用いないリミッタ回路入出力特性と実験データの比較

[目的]

実験データを LTspice 用いて表示し、
計算値と比較する。

[手順と方法]

オペアンプを用いないリミッタの
入出力特性の回路図 P7 の Fig18 を
参考に回路を作成する。

OP アンプ:TL074 用の TL074

ライブラリを SPICE の

lib 命令で読み込む。ダイオードの

1S1588 のライブラリを

SPICE の model 命令で設定する。

[解析結果]

電源: V1 はレベルシフト回路の
電源とする。

電源: V2 を DC sweep しています。

sweep 範囲は、0 から 12V に設定する。

DC sweep を実行する。

Out 端子をクリックすると、
横軸が V2 のグラフが表示されます。

このグラフの横軸のラベルを
クリックする。

Fig.2 のウインドが開くので、
Quantity Plotted 欄を V(vctrl)に変更する。
横軸が、V(vctrl)に変更されたので、
実験データを出力する端子の bv_table 端子
をクリックする。

右図のグラフが表示できます。

実験データは、-4V から+4V の間に存在する。

この範囲において、
負の範囲(挿入グラフ)から、
-1V において、実験値が計算値より小さいこと
が確認できる。

正の範囲では、計算値と実験値は一致している。

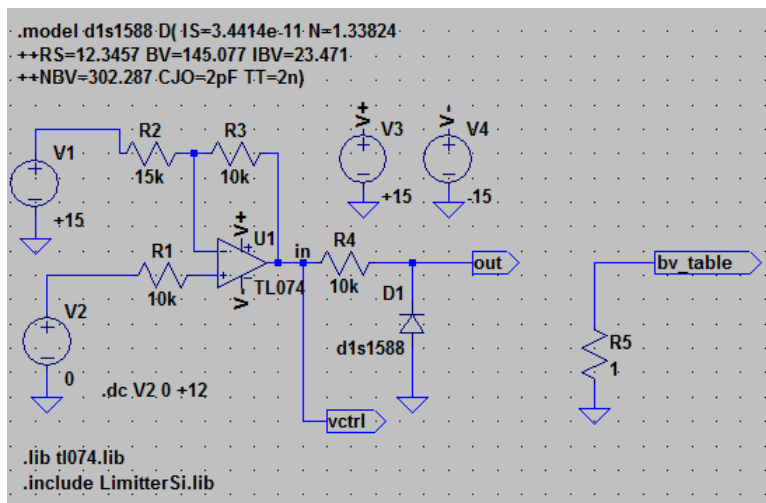


Fig.1 回路図

実験データ表示の詳細は、
付録を参照せよ

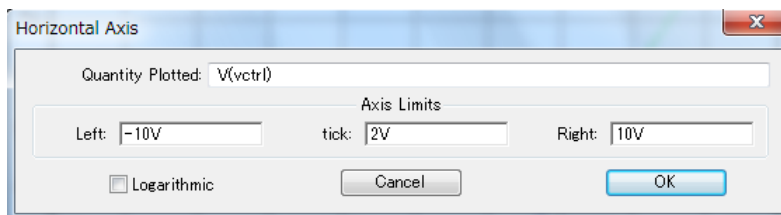


Fig.2 軸設定ウインド

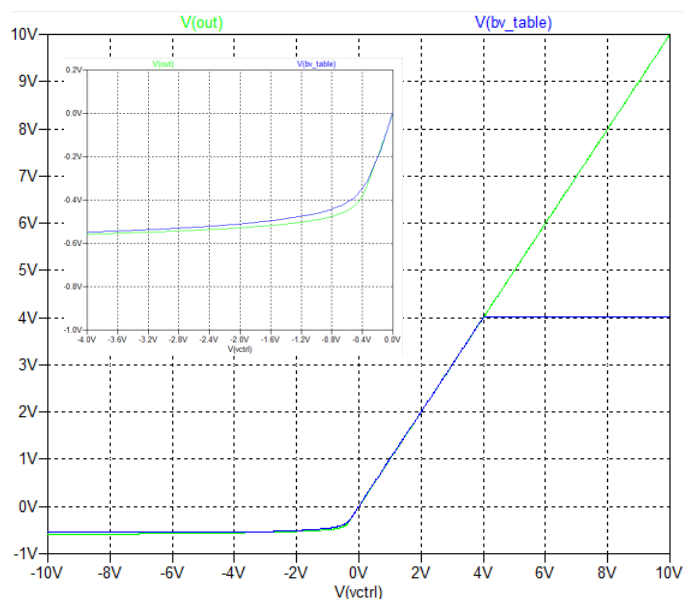


Fig.3 実験値と計算値の比較グラフ

1 日目の課題について

テキストの実験課題については、2 日目の課題について説明する。

1 日目でのこの章の目的は、以下の課題を考えることにより、考察のヒントにすることである。

1)各実験項目において、ダイオードを変更したときの影響を考察せよ。

((ヒント))

ダイオードを変更する手順について
はじめに、SPICE 命令を
コメント化する。

SPICE 命令をクリックして、
Editor ウィンドの Comment を
選択する。

つぎに、ダイオードを右クリックして
D1 のプロパティウィンドを開く。

このウィンドで、Pick New Diode を
選択する。

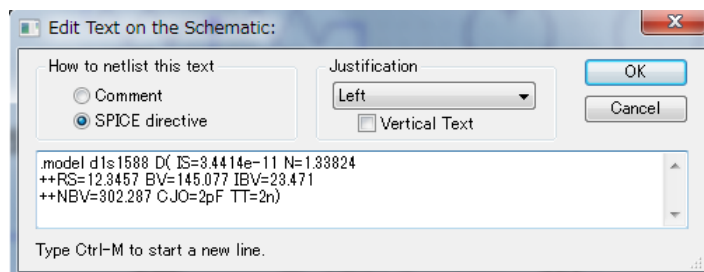


Fig.1 SPICE 命令記述ウィンド

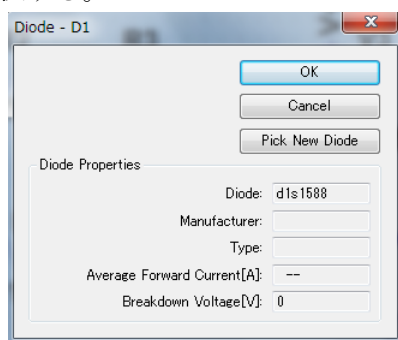


Fig.2 Diode プロパティ

右の Select Diode ウィンドが開く。
多くの Diode が表示されるので、
動作確認したい Diode を選択する。

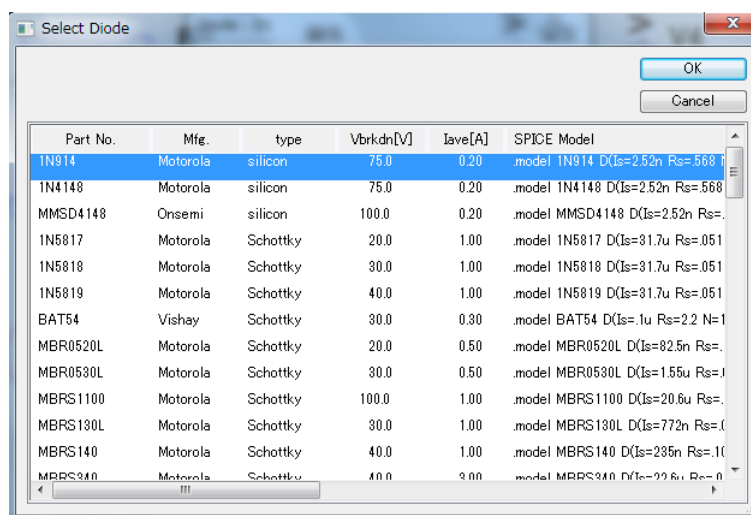


Fig.3 Diode 選択ウィンド

2)リミッタ回路やヒステリシスコンパレータ回路の実験において

高速オペアンプに変更した場合

出力波形の変化を観察して IC を変更した場合の影響を考察せよ。

((ヒント))

使用する OP アンプなどの IC は、多数存在するので秋月電子で販売している IC を選択しました。
例として、高速オペアンプ : LM7171 を使用する。

SPICE ライブラリを以下のサイトから PSPICE ライブラリを Download して使用する。

<http://m.tij.co.jp/product/jp/LM7171>

Download したファイルを解凍する。

解凍したファイルを回路と同じフォルダにコピーする。

次に、解凍したファイルを Editor で開いて、端子の並びを確認する。

TL074 の library を開く、

SUBCKT の端子の並びが

同じであることを確認する。

解凍したフォルダ中のファイル

を開き、端子の順番を確認する。

```
1 |* TL074 OPERATIONAL AMPLIFIER "MACROMODEL" SUBCIRCUIT↓
2 |* CREATED USING PARTS RELEASE 4.01 ON 06/16/89 AT 13:08↓
3 |* (REV N/A) SUPPLY VOLTAGE: +/-15V↓
4 |* CONNECTIONS: NON-INVERTING INPUT↓
5 |* INVERTING INPUT↓
6 |* POSITIVE POWER SUPPLY↓
7 |* NEGATIVE POWER SUPPLY↓
8 |* OUTPUT↓
9 |*
10|.SUBCKT TL074 1 2 3 4 5↓
11|*↓
```

Fig.4 TL074 の内容

並びが同じなので、同じ

デバイスモデルが使用できる。

読み込むファイル名と、

OP オペアンプ名を変更

する。OP アンプ名は、

SUBCKT の後の定義名

と同じ名前にする。

```
20 |*//////////////////////////////////////↓
21 |*LM7171A Operational Amplifier Macro-Model↓
22 |*//////////////////////////////////////↓
23 |*↓
24 |* connections: non-inverting input↓
25 |* inverting input↓
26 |* positive power supply↓
27 |* negative power supply↓
28 |* output↓
29 |*
30 |*
31 |.SUBCKT LM7171A/NS 3 2 4 5 6↓
32 |*↓
```

Fig.5 LM7171 の内容

変更した回路の一部分を、右図に示す。

すべての OP アンプを変更した場合と、個別の
OP アンプを変更した場合の影響について考察する。

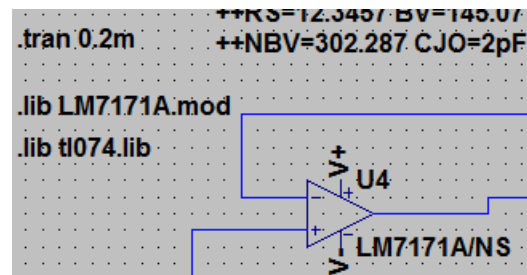


Fig.6 OP アンプを変更した回路の一部

参考文献

本について Data from Amazon.co.jp (2016, Oct.)

B-1) 神崎 康宏、“電子回路シミュレータ LTspice 入門編—素子数無制限!動作を忠実に再現! (ツール活用シリーズ)”, CQ 出版 (2009/02)

B-2) 遠坂 俊昭、“電子回路シミュレータ LTspice 実践入門: 日本製定番デバイス・モデルで学ぶディスプレイ回路 (ツール活用シリーズ)”, CQ 出版 (2011/12/17)

B-3) 渋谷 道雄、“回路シミュレータ LTspice で学ぶ電子回路”, オーム社 (2011/7/26)

B-4) 堀米 毅、“定番回路シミュレータ LTspice 部品モデル作成術”, CQ 出版 (2013/5/25)

B-5) “トランジスタ技術 SPECIAL (スペシャル) 2013 年 07 月号”, CQ 出版; 季刊版 (2013/6/29)

B-6) Gilles Brocard, The LTSpice IV Simulator: Manual, methods and applications, Swiridoff Verlag (2013/7/1)

B-7) 北川 章夫, “LTspice 電子回路シミュレータ (I・O BOOKS)”, 工学社 (2016/02)

解析方法や SPICE の基本命令の使用方法については、PSpice に関する文献も参考になります。

Web サイトについて

ネット接続可能環境においては、検索サイトでキーワード検索する。

ネットの問題点としては、サイト移動や消失などがあります。普遍的でない。

Data from google.co.jp (2015.August)

S-1) ベルが鳴っています

http://www7b.biglobe.ne.jp/~river_r/bell/

S-2) LTspice によるシミュレーション例

<http://homepage1.nifty.com/ntoshio/rakuen/spice/>

Top タイトル: フリーソフトで楽々エンジニアリング

<http://homepage1.nifty.com/ntoshio/rakuen/index.htm>

S-3) LTspice

Top タイトル “ねがていぶろぐ” [“http://gomisai.blog75.fc2.com/](http://gomisai.blog75.fc2.com/)

非常に多くの解説・説明サイトがあります。

エレキジャック (<http://www.eleki-jack.com/>) サイトでは、

B-1) の著者の神崎 康宏による多くの LTspice ページが掲載されています。

Download サイトについて(2016.Oct.)

D-1)LTspice の Download サイトについて

Design Simulation and Device Models[1]

[1]<http://www.linear-tech.co.jp/designtools/software/>

Windows 版と MacOS X 版があります。

このページの”LTspiceIV(Windows 用)を
ダウンロード”をクリックする。

右上の様なウインドが開くので、登録なしで Download するために、

項目の”No Thanks, just download the software”をクリックする。

上の項目は、ユーザー登録して Download する項目です。

((注意)) Linux 系の OS の場合は、Wine 上で動作できます。詳細は、検索してください。

((注意))_LTspice XVII が公開されています。IV との違いは、Download サイト[1]に記述されています。

VXII は、頻繁に update[2]され、まだ、Bug が多く存在するようです。

このために、2016 度版では、LTspiceIV を使用しています。

[2]<http://www.linear.com/designtools/software/>

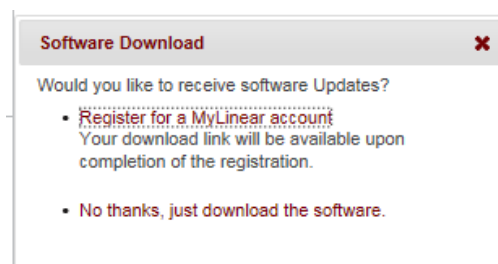


Fig.1 Download 選択ウインド

D-2) Spice モデル(ライブラリ)について

a)2002 年 5 月号 特集*初めての回路シミュレーション

<http://www.cqpub.co.jp/toragi/download/2002/TR0205A/TR0205A.htm>

その他のサイト

b) SPICE Model Links

http://ltwiki.org/?title=SPICE_Model_Links

D-3) TL074 (ACTIVE) クワッド 低雑音 JFET 入力 汎用オペアンプ

<http://www.tij.co.jp/product/jp/tl074>

PSpice ライブラリを Download する。

モデル (1)

タイトル	カテゴリ	種類	サイズ (KB)	日付	表示回数
TL074, TL074A, TL074B PSpice Model	PSpice Model	ZIP	0 KB	2002年 1月 10日	855 回表示

Fig.2 選択ウインド

ライブラリ(モデル)の追加方法について、以下のサイトも詳しいです。

LTSPICE 入門 (連載 18)

<http://www.eleki-jack.com/KitsandKids2/2008/06/ltspice18spice1.html>

OP アンプ・MOS-FET などは、Sub キット化されたモデルとして提供される。

しかし、トランジスタやダイオードなどは、ライブラリファイルの一部として提供されることが多い。

((注意))最近は、暗号化された SPICE ファイルもあります。

LTspice 上での実験データの表示について

[目的] 実験データを LTspice で表示する。

[方法と手順] 回路図を右に示す。

抵抗 R1 を 1ohm して、出力端子：

bv_table を接続する。

電源 V1 に、出力端子：vctrl を接続する。

重要な点は、include するファイルの中身です。SPICE 命令を用いて、任意電圧制御電圧源：Bvco を定義する。電圧 V の vctrl を参照電圧として定義する。実験データの入力電圧と出力電圧値を、Table として、入力する。

ファイル名を LimitterSi.lib として、同じフォルダに保存する。

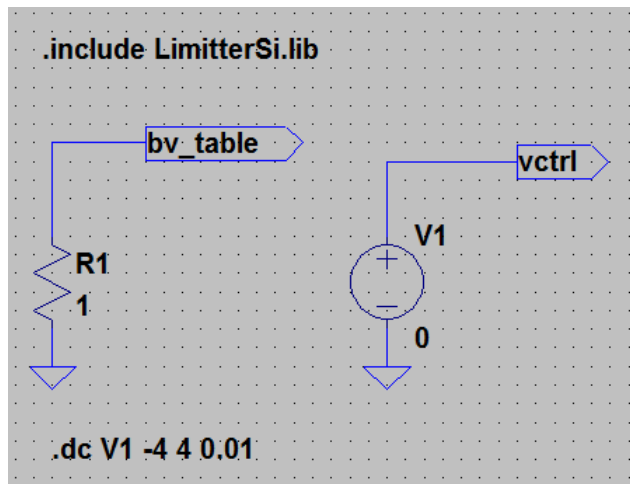


Fig.1 回路図

```

1 *↓
2 *↓
3 Bvco bv_table 0 V=TABLE(V(vctrl),↓
4 +-4.01,-0.549,↓
5 +-3.51,-0.542,↓
6 +-3.01,-0.534,↓
7 +-2.5,-0.524,↓
8 +-2,-0.511,↓
9 +-1.5,-0.492,↓
10 +-1,-0.463,↓
11 +-0.83,-0.447,↓
12 +-0.67,-0.425,↓
13 +-0.5,-0.389,↓
14 +-0.33,-0.312,↓
15 +-0.16,-0.168,↓
16 +0.15,0.165,↓

```

Fig.2 LimitterSi.lib の上部

```

13 +-0.5,-0.389,↓
14 +-0.33,-0.312,↓
15 +-0.16,-0.168,↓
16 +0.15,0.165,↓
17 +0.32,0.332,↓
18 +0.49,0.499,↓
19 +0.66,0.665,↓
20 +0.82,0.833,↓
21 +0.99,1,↓
22 +1.49,1.501,↓
23 +2,2.002,↓
24 +2.5,2.503,↓
25 +3,3.004,↓
26 +3.5,3.506,↓
27 +4,4.007,↓
28 [EOF]

```

Fig.3 LimitterSi.lib の下部

((注意))行の先頭の + は、ファイルが連続していることを示すので必要です！

この任意電圧制御電圧源を、電圧 V1 で制御することになる。

解析には、DC 解析を実行する。

Sweep 範囲は、実験データと同じ範囲にする。

Step は、実験データと同じにする必要はない。

[解析結果]

解析実行後に、bv_ctrl 端子をクリックする。右のグラフの様に、実験データが表示されます。

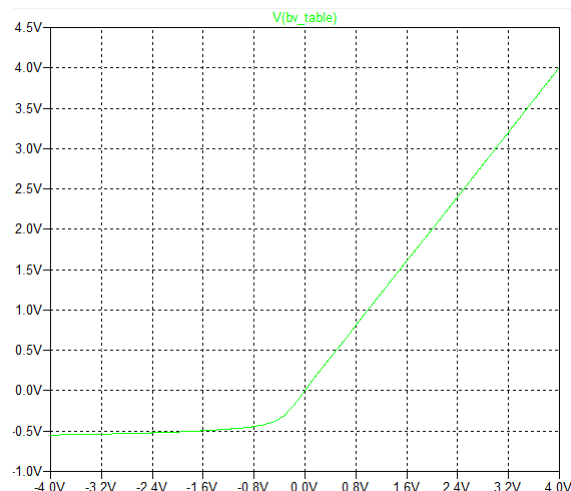


Fig.4 実験データの表示

付録 A2

CSV ファイルの読み込みについて

[目的]

オシロスコープの出力データ CSV ファイルを読み込み、LTspice でグラフ表示する。

[手順と結果]

Voltage を選択して、以下の回路を構成する。

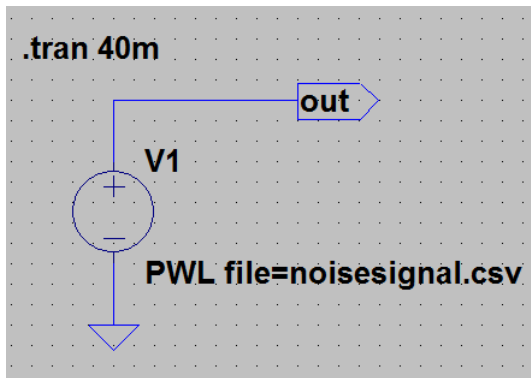


Fig.1 回路図

V1 をクリックして、Advance ボタンをクリック
Independent Voltage Source ウィンドが開くので、

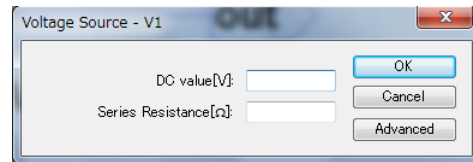


Fig.2 電源設定

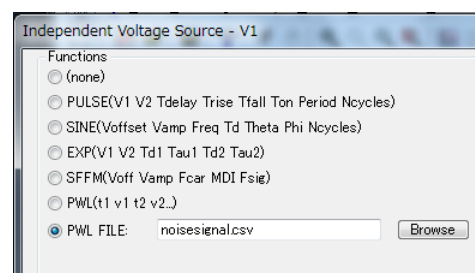


Fig.3 Advanced 設定

PWLFILE を選択して、
右の Browse ボタンをクリックして
ファイルを選択する。

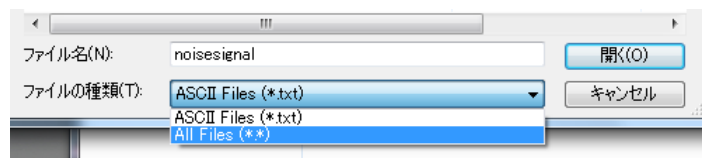


Fig.4 ファイルの種類

表示するファイルの種類を変更する。
入力信号となる noisesignal.csv を読み込む。

解析には、Transient タブの過渡解析を実行する。

ここでは、Stop Time のみを入力する。

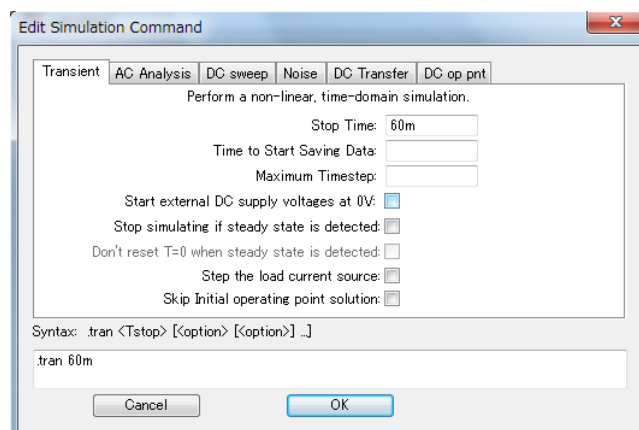


Fig.5 Transient 解析

解析を実行する。

波形を表示させるために、
Output ノードをクリックする。

右のグラフが表示される。

負の時間は表示されないことがわかる。
(LTspice では、負の時間は表示できない。)
入力ファイルを変更する。

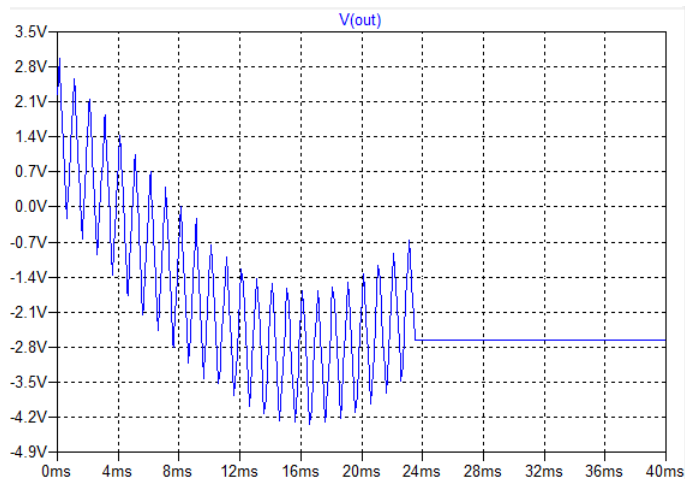


Fig.6 実行結果表示

Excel を用いて、データをシフトする。

最初の値が、-0.0264 である。
この値に+0.0264 を加算する。
データをシフトして、
すべて、正の値にする。

IMABS			
	A	B	C
1	-2.64E-02	1	=A1+\$A\$1
2	-2.64E-02	1	
3	-2.64E-02	1	
4	-2.64E-02	1	
5	-2.64E-02	1	
6	-2.63E-02	1	
7	-2.63E-02	1	
8	-2.63E-02	1	
9	-2.63E-02	1	
10	-2.63E-02	9.80E-01	
11	-2.62E-02	1	
12	-2.62E-02	1	
13	-2.62E-02	1.02	

Fig.7 Excel で内容変更

加算後のファイルを開いて、
解析を実行すると以下のグラフが得られる。

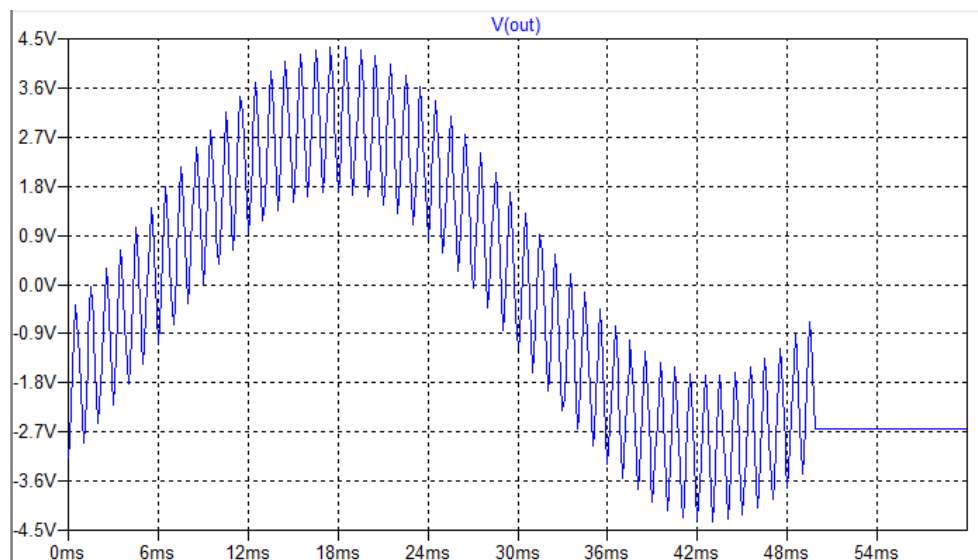


Fig.8 変更後の実行結果

同様に、処理した出力信号の波形を表示する。

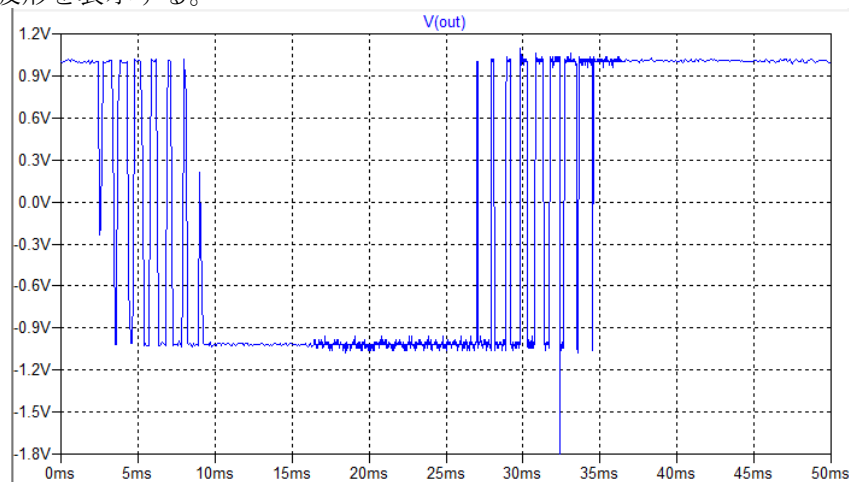


Fig.9 2ch の信号表示

最後に、

入力信号と出力信号を同時に表示させる。

以下の様に、2つの電源に別々のファイルを読み込ませる。

過渡解析を実行する。

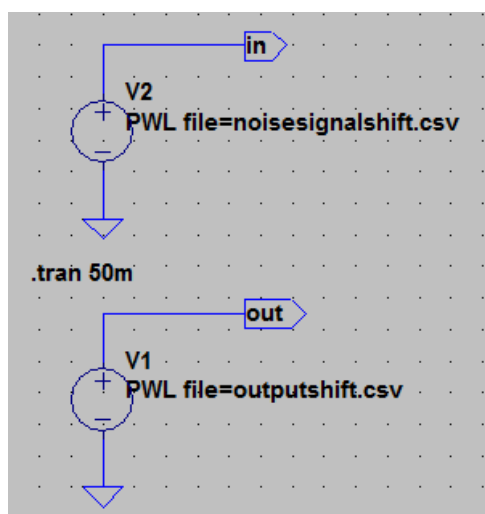


Fig.10 回路図

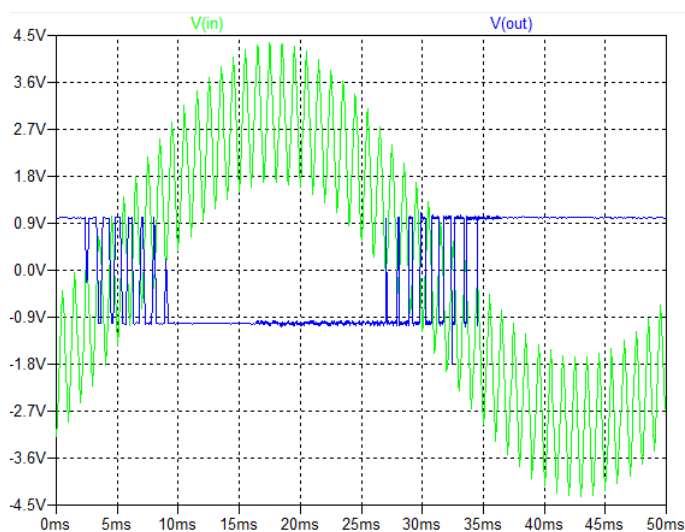


Fig.11 同時に表示させたグラフ

In 端子と out 端子をクリックすると、オシロスコープと同じグラフが得られる。

参考サイト：

1)<http://www.slideshare.net/TsuyoshiHorigome/ss-11817753>

付録 A3

ダイオードと負荷線について

[目的]

直列抵抗 10k の時の負荷線との交点電圧を LTspice を用いて確認する。

[結果]

回路図を示す。

抵抗 R1 に流れる電流を減少させるために、

電源 Vd を挿入する。そして、

挿入した電源 Vd の電圧で動作する

電圧制御電源 E1 を定義する。

電源の倍率は、1 倍とする。

交点の計算には、SPICE 命令を用いる。

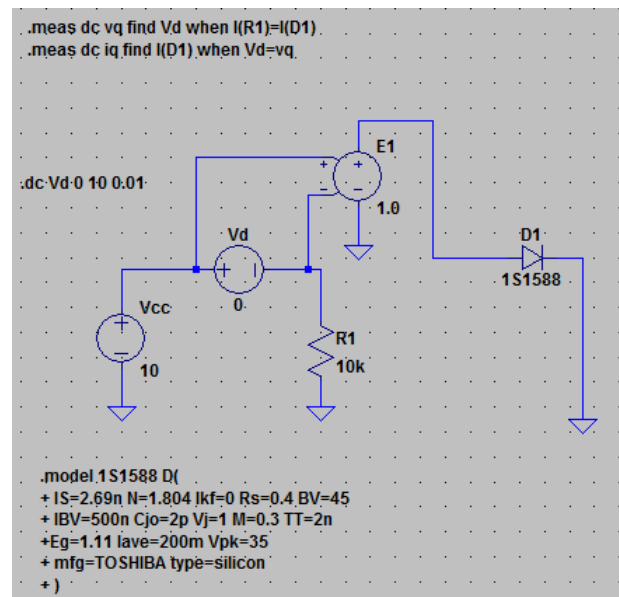


Fig.1 回路図

電源 Vd を変化させる DC 解析を実行する。解析を実行後に、R1 と D1 の電流を表示することで右図が得られる。

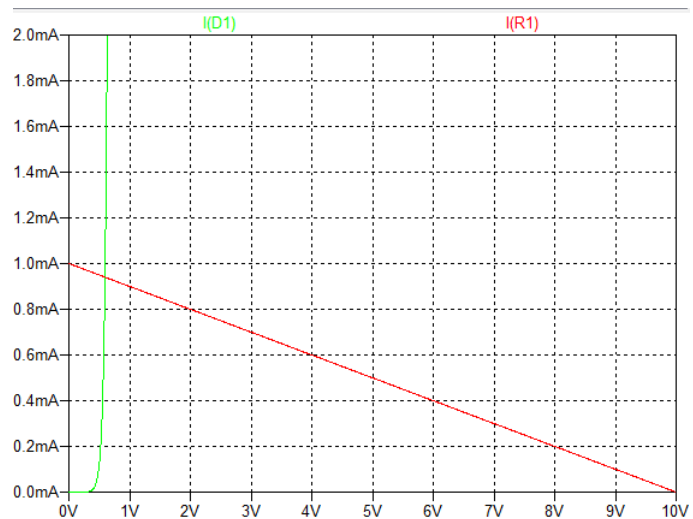


Fig.2 IV 特性

SPICE 命令の結果は、Error Log に出力されている。

メニューの View 中の

SPICE Error Log を選択する。

表示されたファイル中の計算結果を示す。

交点が、(V,I)=(0.596V, 0.94mA)である

ことが確認できる。

```
vq: vd=0.59572 at 0.59572
iq: i(d1)=0.000940428 at 0.59572
```

Fig.3 Error-Log ファイル

次に、実験データを使用して、負荷線との交点をもとめる。

回路図を示す。

実験データは、ファイル diodedata.lib

に記述する。Spice 命令の include 文で読み込む。

端子 bv_table と GND 間発生する電圧で、端子 vctrl で動作する任意電圧制御電源としてファイルに記述する。

残りの回路部分は、

Diode モデルの計算と同様である。

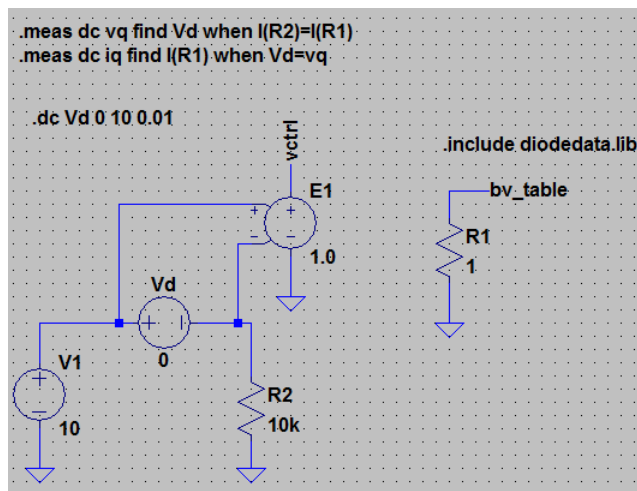


Fig.4 回路図

DC 解析を実行する。

IV 特性のグラフを表示して結果を確認する。

```
*
*
Bvco bv_table 0 V=Table(V(vctrl),
+0.10087, 1.30709E-08,
+0.199, 1.00545E-07,
+0.289, 1.106E-06,
+0.356, 4.424E-06,
+0.397, 1.03562E-05,
+0.423, 1.77965E-05,
+0.441, 2.60412E-05,
+0.454, 3.47887E-05,
+0.465, 4.37372E-05,
+0.474, 5.28869E-05,
+0.503, 0.000100244,
+0.521, 0.000148707,
+0.534, 0.000197672,
+0.544, 0.000246939,
+0.552, 0.000296408,
+0.56, 0.000345876,
+0.571, 0.000445315,
+0.588, 0.000644697,
+0.606, 0.000944523)
```

Fig.5 diodedata.lib の内容

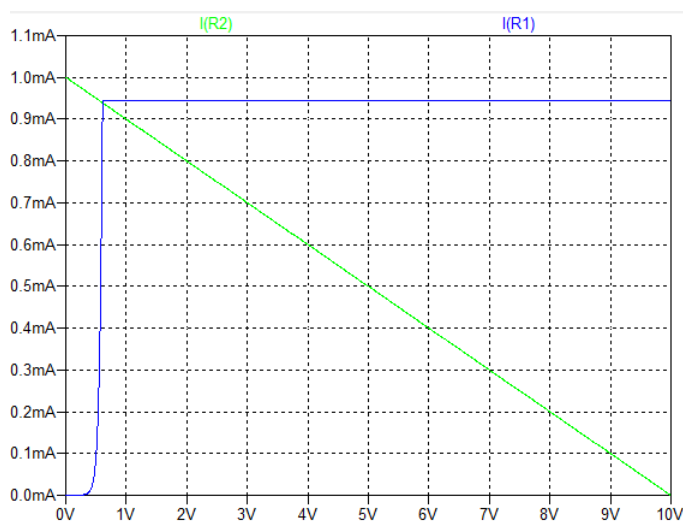


Fig.6 IV 特性

ErrorLog ファイルを開いて、

交点の電圧を確認する。

IV 特性グラフにおいて、
青いグラフの折れ曲がり、
データが存在しないためである。

```
vq: vd=0.609453 at 0.609453
iq: i(r1)=0.000939055 at 0.609453
```

Fig.7 Error-Log ファイル

付録 B

発振周波数を計算する

[目的] 信号波形の周波数を計算する。

[方法と結果]

spice の measure 命令を用いる。

When で出力端子 spout が 0.5V になる時刻を探索して、
変数名 time1 に代入する。

Option の cross は、タイミングを指定する。

cross=1 は、閾値を 1 番目に横切る時に設定している。

```
.measure tran time1 when v(spout)=0.5 cross 1.  
.measure tran time2 when v(spout)=0.5 cross 2  
.measure tran freq param 1/(time2-time1)
```

図 B1 measure 命令

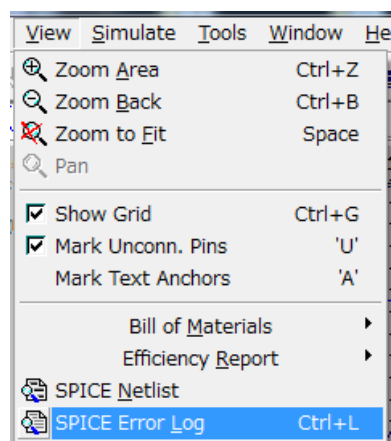


図 B2 SPICE Error Log 表示

計算を実行後に

SPICE Error Log ファイルを開く。

```
Direct Newton iteration for .op point succeeded.
```

```
time1: v(spout)=0.5 AT 0.206873  
time2: v(spout)=0.5 AT 0.209821  
freq: 1/(time2-time1)=339.104
```

図 B3 Log ファイルの中身

次の方法でも、計算できます。

```
.measure tran tcyt trig v(out) val=0.5v rise=1 targ v(out) val=0.5v rise=2
```

図 B4 rise オプションを使用

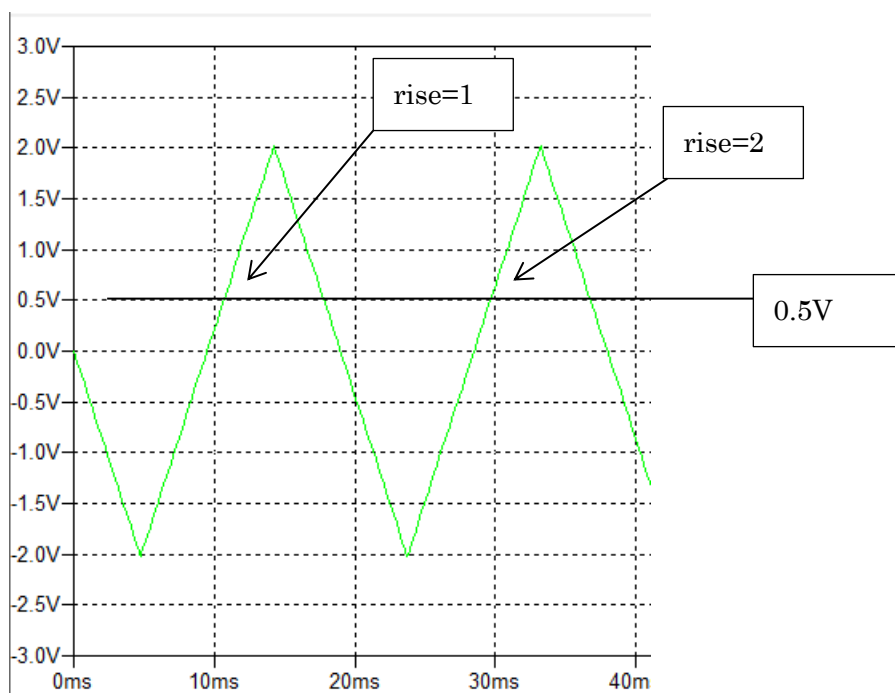


図 B5 グラフとパラメータの関係

付録 C

LTspice において XY 表示をする。

[目的] グラフを X-Y 表示することで、
電通大の校章であるリサージュ図形を作成する。

[方法と結果] 回路図を右に示す。

解析方法は、過渡解析を実行する。

解析終了後に、端子 y をクリックして波形を出力する。

x 軸をクリックして、Quantity Plotted 欄に、x 端子の電圧
V(x)を入力して、OK ボタンをクリックする。

以上で、X-Y ができていることが確認できる。

次に、

アナログのオシロスコープ同様な色合いに
変更する。

グラフ画面のメニューの Tools の
Color Preference を選択する。

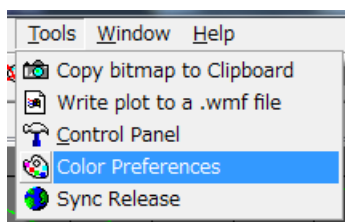


図 C3 Tools メニューの項目

Color Palette Editor が開くので、変更する項目を
Selected Item 欄から選択する。選択後に、スライダー
を変更して色を変化させる。

アナログ・オシロスコープの色合いにした結果を
以下に示す。

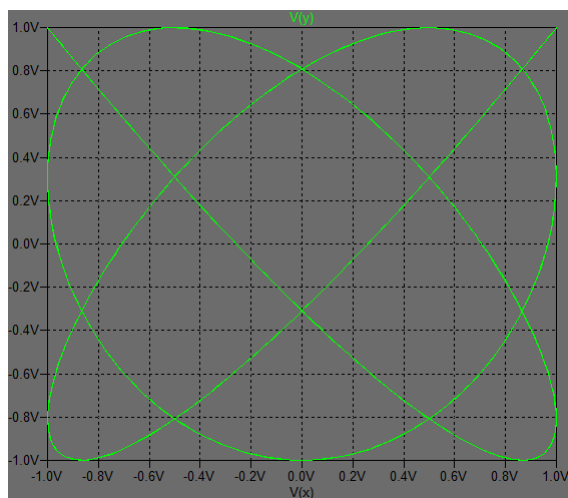


図 C5 リサージュ図形

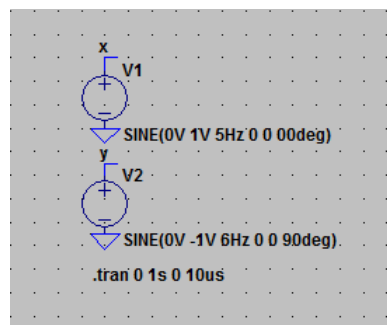


図 C1 回路図

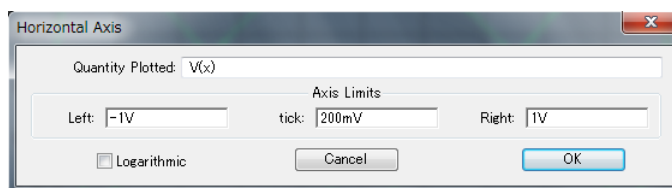


図 C2 軸設定ウィンド

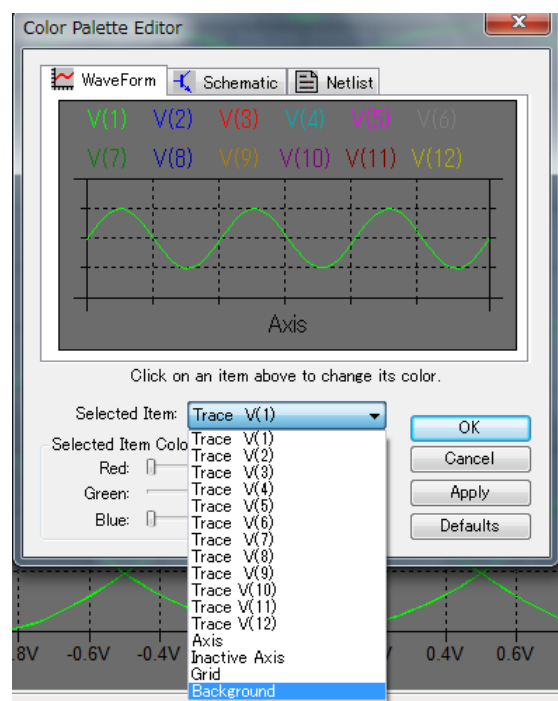


図 C4 Select Item の中身