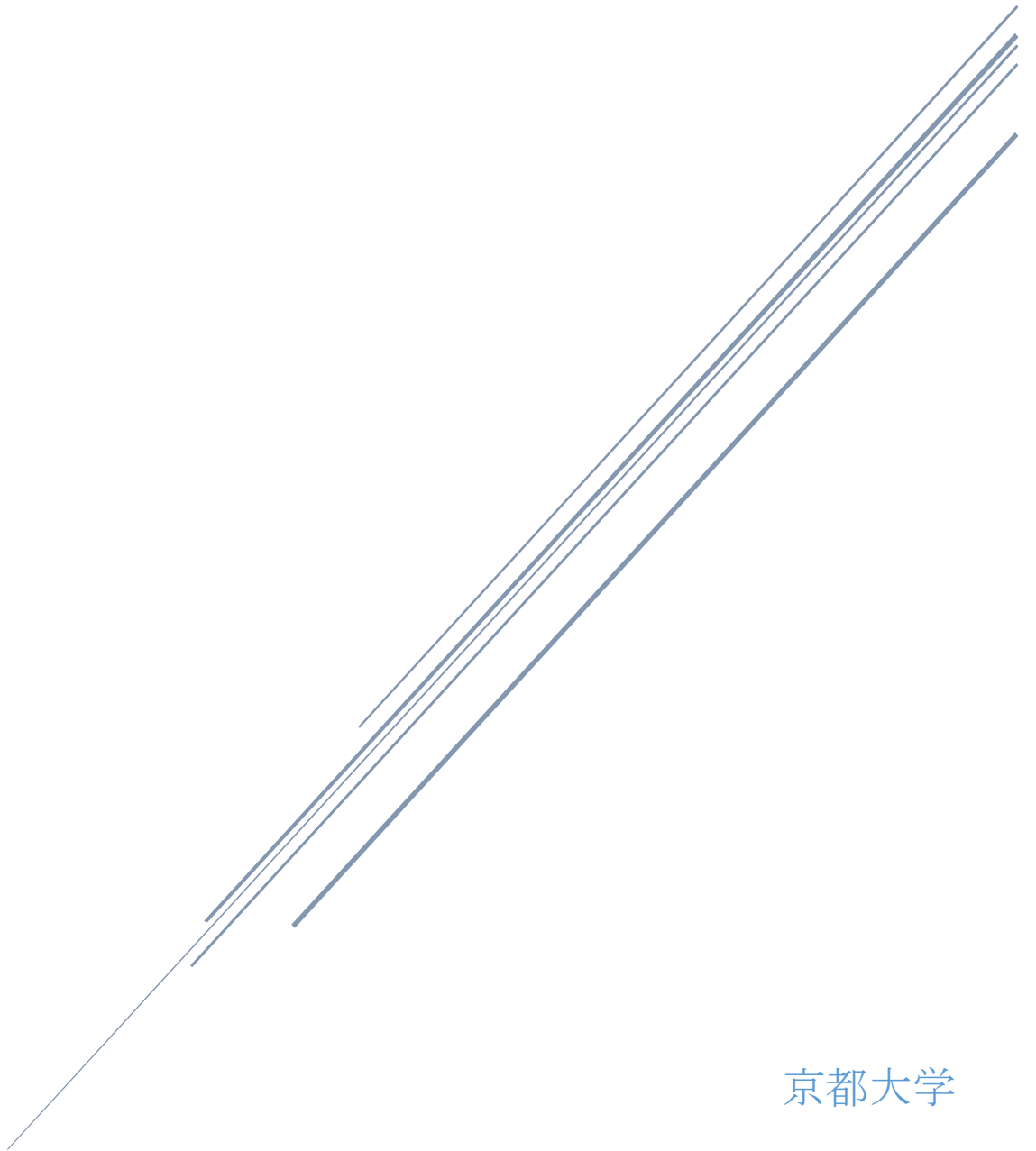


LTspice ガイド

電気電子回路演習編 Ver. 1.4.1.20190329



京都大学
電気電子工学科

1	インストールと初期設定	2	6 Tutorial: CR 回路の解析	28
1.1	ソフトウェアのダウンロード	2	6.1 回路図の作成	28
1.2	インストール	2	6.2 回路定数の設定	29
1.3	初期設定	3	6.3 過渡解析	30
2	事前課題の実行手順	5	6.4 DC 解析	31
2.1	オペアンプを用いた LED 駆動回路	5	6.5 AC 解析	31
2.2	LCR 直列回路の過渡解析	7	付録	33
2.3	LCR 直列回路の AC 解析	9	A LTspice からのデータ出力	33
2.4	RC 回路の伝達関数	11	B Excel によるデータ取込	34
2.5	トランジスタ増幅回路の解析	11	C 電流制御電源を含む回路の AC 解析 ..	38
2.6	移相型発振回路の解析	13	D オペアンプの使い方	39
3	LTspice の構成	14		
3.1	画面構成	14		
3.2	メニューバー	14		
3.3	ツールバー	15		
4	回路図の作成	16		
4.1	回路素子の配置	16		
4.2	配線	17		
4.3	回路図の修正	18		
4.4	素子定数の設定	18		
4.5	電源の設定	20		
4.6	変数の利用	20		
4.7	素子モデルの指定	21		
5	シミュレーションの設定	22		
5.1	過渡解析 (Transient)	22		
5.2	DC 解析 (DC Sweep)	24		
5.3	AC 解析 (AC Analysis)	25		
5.4	ステップ解析	26		

1 インストールと初期設定

1.1 ソフトウェアのダウンロード

下記ウェブサイトから Windows, または Mac OS 版の LTspice をダウンロードする。(注意) 以下のスクリーンショットは全て Windows 版のものである。

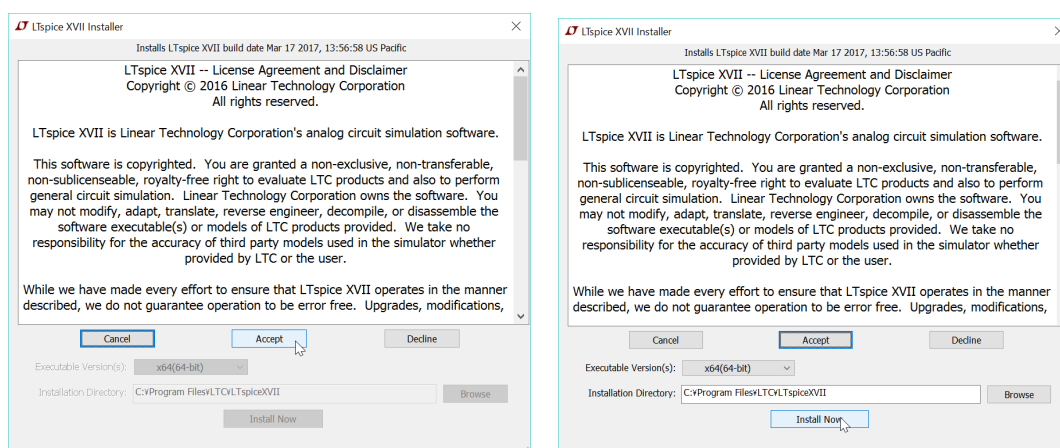
<http://www.linear-tech.co.jp/designtools/software/>



1.2 インストール

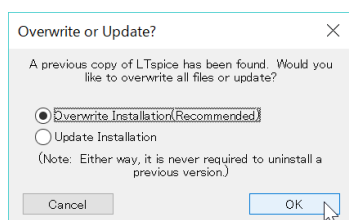
ダウンロードしたファイルを実行し以下の手順に沿ってインストールする。

1. LTspiceXVII.exe を実行する。Windows 10 などの場合、ユーザーアカウント制御のダイアログが表示されるので **はい(Y)** を押す。すると、License Agreement/Disclaimer が表示されるので、**Accept** を押す。

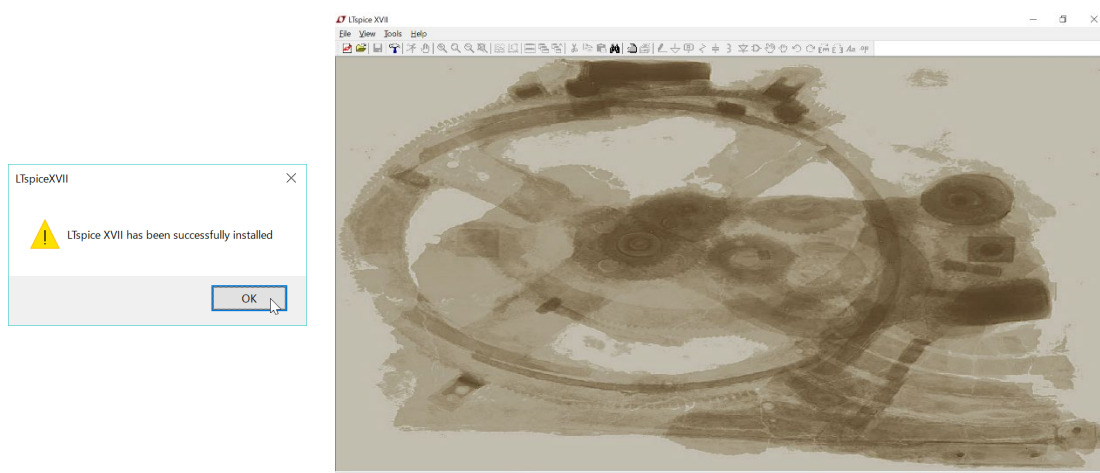


2. 次に、インストール場所を設定する。通常は変更しなくても良いが、変更する場合は **Browse** を押して、適当なディレクトリを選択する。インストール場所が問題なければ、**Install Now** を押す。

3. もし以前のバージョンが存在する場合、上書きするかアップデートするか聞かれる。今回の演習で初めて利用する場合は **Overwrite** を選択する。

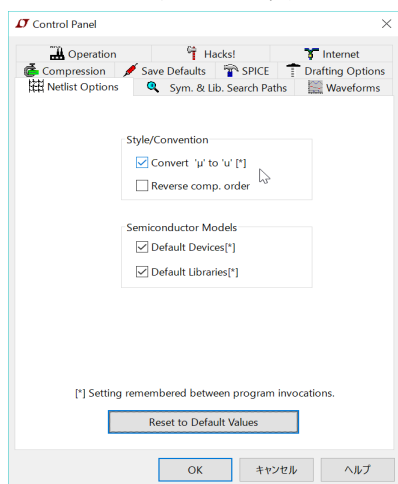


4. 以下のダイアログが表示されれば、インストールは完了。**OK** を押すと、LTspice が起動する。

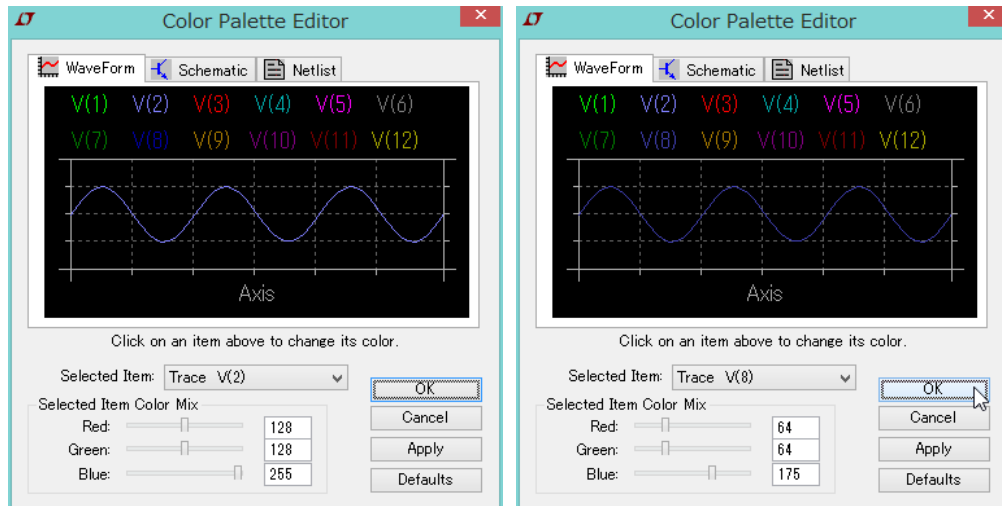


1.3 初期設定

LTspice を初めて起動する場合は、Tools メニューの Control Panel を押す。コントロールパネルの Netlist Options タブを表示させ、Style/Convention の Convert 'μ' to 'u' [*] のチェックボックスをオンにする。（設定不要の場合もあります。グラフなどで文字化けしたら試してみましょう）



Tools メニューの Color Preferences ではグラフや回路図，ネットリストに使用される色をカスタマイズできる．例えば，グラフの青が暗くて見づらい場合は，少し明るめに調整する．



2 事前課題の実行手順

ここでは、事前課題の流れについて説明する。LTspice の使い方は、本ガイドの後半に詳しい説明があるので、適宜参照されたい。また、6 節の「[Tutorial: CR 回路の解析](#)」で一度練習することを勧める。

2.1 オペアンプを用いた LED 駆動回路

2.1.1 回路図の作成

1. File メニューから New Schematic を選ぶ。
2. 抵抗, LED の配置. 抵抗は Resistor ボタン, または Edit メニューの Resistor を選択することで配置できるようになる。回転させる場合は, Ctrl+R を押す。部品の位置が決まったら左クリックで配置し, 右クリックまたは ESC で部品選択をキャンセルする。LED はダイオードで代用する。Diode ボタンで部品選択し, 適当な場所に配置する。
3. 電圧源の配置. 電圧源(電池)は Component ボタンを押すと表示されるメニューから voltage を選択する。フォトトランジスタは電流源で代用する。電圧源と同様にしてメニューを表示し, current を選択, 配置する。
4. オペアンプの配置. オペアンプは, Component ボタンから表示されるメニューの Opamps ディレクトリにある opamp2 を用いる。
5. 電位基準点(グラウンド)を配置する。Ground ボタンをクリックし, 適当な場所に配置する。
6. 配線で結合する。Wire ボタンをクリックし, 直線毎に描画していく。このとき, 回路部品の上を通過するように線を引いても構わない。自動的に短絡しないように処理される。
7. ラベルを作成する。Label Net ボタンを押し, 空欄に in と入力する。OK を押し, オペアンプの非反転端子(+端子)にラベル in を貼る。同様にしてオペアンプの出力端子に out というラベルを貼る。ここまで作業すると [図 2.1](#) の様な回路図が完成するので, 適当な場所に保存する。

2.1.2 回路定数の設定

回路定数を設定するには、部品を何も持っていない状態でカーソルを素子の上に移動させ右クリックする。ここでは、 $R_1 = 100\text{ k}\Omega$, $R_2 = 100\text{ }\Omega$, $V = 3\text{ V}$, $I = 10\text{ }\mu\text{A}$ とする。入力には単位を省いた数値を入力する。ダイオードは、回路記号右下の D を右クリックし, LED

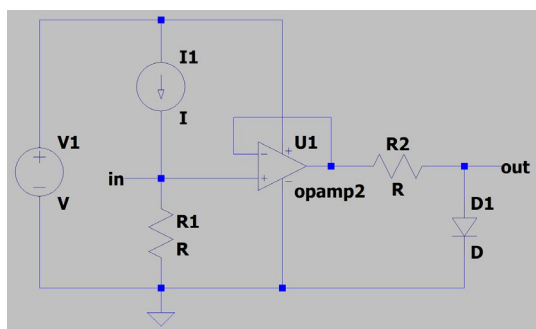


図 2.1 回路図を作成し終えた状態

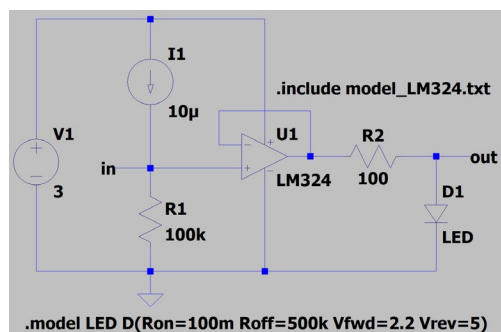


図 2.2 回路素子の設定が終わった状態

と書き換える。SPICE Directive ボタン(メニューの左端)を押し、以下を記入する。

`.model LED D(Ron=100m Roff=500k Vfwd=2.2 Vrev=5)`

OK ボタンを押して適当な場所に配置する。`.model` の先頭のドットを忘れないようにする。オペアンプは外部ファイルを必要とする。`model_LM324.txt` というファイルを Panda の「授業資料>実験キットの内容」ページからダウンロードし、現在作成中のファイルと同じ場所に置く。LTspice 上で SPICE Directive ボタンを押し、`.include model_LM324.txt` と記入し適当な場所へ配置する。最後に、オペアンプの `opamp2` を LM324 へ書き換える。完成図は図 2.2 を参照のこと。

2.1.3 直流解析

1. Simulate メニューから Edit Simulation Cmd を選ぶ。
2. DC Sweep タブを選び、シミュレーションのためのパラメータを入力する。ここでは、以下のように設定する。

Name of 1st source to sweep	I1
Type of sweep	Linear
Start value	0
Stop value	30u
Increment	1u

OK を押すと、コマンドを回路図上へ配置できるようになるので、適当な場所へ配置する。以後、シミュレーション条件を変更する場合は、`.dc I1 0 30u 1u` のようなシミュレーションコマンドの上で右クリックすればよい。

3. シミュレーションを実行するには、Simulate メニューから Run を選ぶ。Run を選択すると直ちにシミュレーションが開始され、結果を表示する画面が追加される。初期状態では何も表示されていないが、回路図において、配線上にカーソルを移動させると、基準電位に対する電位差がグラフに表示される。また、素子上にカーソルを移動させるとアイコンが電流プローブへと変化し、素子に流れる電流を選択できる。

2.1.4 解析結果の可視化

ここでは、オペアンプのボルテージフォロワとしての動作を確認する。オペアンプの入力電圧 $V(in)$ 、出力電圧 $V(out)$ をグラフに表示させる。ボルテージフォロワとして動作していれば、両者は重なるはずである。どのくらいの電圧までボルテージフォロワとして動作しているだろうか？

2.1.5 電源電圧の変更

オペアンプに供給する電圧を +15V に変更する。電圧源を追加し、オペアンプの電源入力を 3V の電圧源から、新たに追加した電圧源へと繋ぎかえる。上記と同様に直流解析を行い、違いを観察する。

2.1.6 結果の保存

結果のグラフやデータを保存したい場合は、次節の 2.2.5, 2.2.6 を参照のこと。

2.2 LCR 直列回路の過渡解析

2.2.1 回路図の作成

1. File メニューから New Schematic を選ぶ.
2. 抵抗を配置する. Resistor ボタンをクリックすると, 部品を配置できるようになる. ここで左に 90 度回転させたいので, Ctrl+R を 3 回押す. 部品を適当な場所に配置する. 配置後は, 右クリックまたは ESC で部品選択をキャンセルする. Resistor ボタンが表示されていない場合は, Edit メニューから Resistor を選択する.
3. インダクタを配置する. Inductor ボタンをクリックし, 回転させ, 適当な場所に配置する.
4. 容量を配置する. Capacitor ボタンをクリックし, 適当な場所に配置する.
5. 電位基準点(グラウンド)を配置する. Ground ボタンをクリックし, 適当な場所に配置する.
6. 配線で結合する. Wire ボタンをクリックし, 直線毎に描画していく. このとき, 回路部品の上を通過するように線を引いても構わない. 自動的に短絡しないように処理される.
7. ノードにラベルを貼る. 容量の電位を指定しやすくするために, インダクタンスと容量の間にラベルを追加する. Label Net ボタンを押し, 「node_C」のような適当な名前を入力する. OK ボタンを押し, インダクタンスと容量の間に接続する. [図 2.3 参照](#).

2.2.2 回路定数の設定

回路定数を設定するには, 部品を何も持っていない状態でカーソルを素子の上に移動させ右クリックする. ここでは, $R = 3\ \Omega$, $L = 1\ \text{H}$, $C = 1\ \text{F}$ とする. 入力には単位を省いた数値を入力する.

2.2.3 過渡解析

1. Simulate メニューから Edit Simulation Cmd を選ぶ.
2. Transient タブを選び, シミュレーションのためのパラメータを入力する. ここでは, 以下のように設定する.

Stop Time	20
Time to Start Saving Data	0
Maximum Timestep	10m

OK を押すと, コマンドを回路図上へ配置できるようになるので, 適当な場所へ配置する. 以後, シミュレーション条件を変更する場合は, `.tran 0 20 0 10m` のようなシミュレーションコマンドの上で右クリックすればよい.

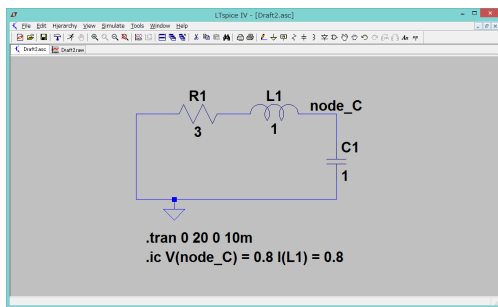


図 2.3 回路図を作成し終えた状態

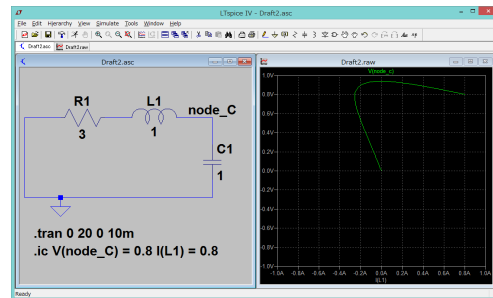


図 2.4 相平面プロット

3. 初期条件を設定する. SPICE Directive ボタンをクリックし, 以下のコマンドを記述する. (注: 初期条件(initial condition)を表す「ic」の直前のドット「.」は必須である)

`.ic V(node_C) = 0.8 I(L1) = 0.8`

4. シミュレーションを実行するには, Simulate メニューから Run を選ぶ. Run を選択すると直ちにシミュレーションが開始され, 結果を表示する画面が追加される. 初期状態では何も表示されていないが, 回路図において, 配線上にカーソルを移動させると, 基準電位に対する電位差がグラフに表示される.

2.2.4 解析結果の可視化

1. シミュレーションが終われば, 回路の各点のデータを可視化できる. 回路図の配線上では電圧プローブ, 素子上では電流プローブのアイコンになるので, 適宜クリックする. デフォルトでは, 時間を横軸としたグラフが作成される. また, シミュレーション結果表示画面をアクティブにして右クリックし, Add Trace を選択することでも表示データを追加することが出来る. 表示データを削除するには, グラフ上部の変数名を右クリックし, ダイアログ下部の Delete this Trace ボタンをクリックする.

2. 相平面プロットは横軸を時刻 (time) から他の物理量へ変更することで描画可能である. グラフの横軸のラベルをクリックすると, Horizontal Axis ダイアログが表示されるので Quantity Plotted を time から $I(L1)$ に変更する. Add Trace で $V(node_C)$ を選べば, 回路を流れる電流を横軸, 容量の電圧を縦軸とした相平面 (i, v) プロットとなる. [図 2.4 参照](#).

2.2.5 グラフの出力

所望のグラフが得られたら, シミュレーション結果表示画面をアクティブにした状態で, メニューバーの Tools を選択する. 出力には, 以下の 2 通りの方法がある.

1. Copy bitmap to Clipboard

グラフがクリップボードに記憶されるので, 適当な画像処理ソフト(例えば, ペイント)を起動し, 貼り付ける. その後, 改めてファイルへ保存する.

2. Write plot to a .emf file

グラフを Enhanced Metafile という形式で保存する．ベクトル形式なので，曲線で描画するグラフなどにはこちらのフォーマットが適している．編集には，ドロー系の画像処理ソフトを用いる．例えば，Inkscape など．（注：旧版の LTspiceIV では，Windows Metafile (.wmf) 形式が採用されていた）

2.2.6 解析結果の出力

結果表示ウィンドウをアクティブにして，File メニューを表示させると，結果保存用のメニューが表示される．ここでは，データを出力したいので，Export data as text を選ぶ．Export では，すべてのデータをテキストファイルで出力することが出来る．ダイアログが表示されたときは，現在表示中のデータが選択済みの状態となっている．適宜，出力したいデータを選択して，OK を押す．データはタブ区切りの txt ファイルで出力される．したがって，gnuplot などそのまま可視化することが可能である．

2.3 LCR 直列回路の AC 解析

2.3.1 回路図の作成(手順 1, 3 - 8 は [2.2.1](#) と同じ)

1. File メニューから New Schematic を選ぶ．
2. 電源を配置する．Component ボタンを押し，voltage を選択して適当な場所に配置する．
3. 抵抗を配置する．
4. インダクタを配置する．
5. 容量を配置する．
6. 電位基準点(グラウンド)を配置する．
7. 配線で結合する．
8. ノードにラベルを貼る．完成図は[図 2.5 参照](#)．

2.3.2 回路定数の設定 ([2.2.2](#) と同じ)

回路定数を $R = 3\Omega, L = 1\text{H}, C = 1\text{F}$ とする．入力には単位を省いた数値を入力する．

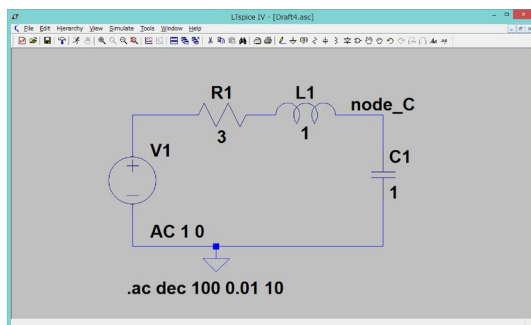


図 2.5 回路図を作成し終えた状態

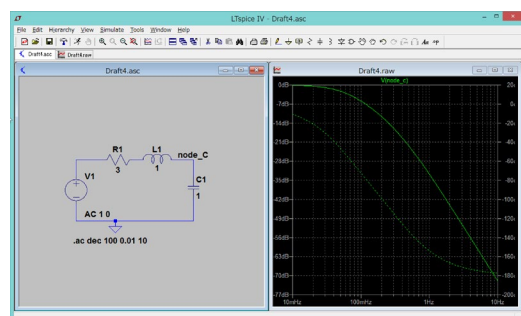


図 2.6 周波数特性プロット

2.3.3 電源の設定

AC 解析のためには、電源を交流電源に設定しておく必要がある。電源の上で右クリックし、Advanced ボタンを押す。表示されたダイアログの右側、”Small signal AC analysis(.AC)” における AC Amplitude を 1, AC Phase を 0 とし、OK ボタンを押す。

2.3.4 AC 解析

1. Simulate メニューから Edit Simulation Cmd を選ぶ。
2. AC Analysis タブを選び、シミュレーションのためのパラメータを入力する。ここでは、以下のように設定する。

Type of Sweep	Decade
Number of points per decade	100
Start Frequency	0.01
Stop Frequency	10

OK を押すと、コマンドを回路図上へ配置できるようになるので、適当な場所へ配置する。以後、シミュレーション条件を変更する場合は、.ac dec 100 0.01 10 のようなシミュレーションコマンドの上で右クリックすればよい。

3. シミュレーションを実行するには、Simulate メニューから Run を選ぶ。Run を選択すると直ちにシミュレーションが開始され、結果を表示する画面が追加される。初期状態では何も表示されていないが、回路図において、配線上にカーソルを移動させると、基準電位に対する電位差がグラフに表示される。

2.3.5 グラフの出力(2.2.5 と同じ)

所望のグラフが得られたら、目的に合わせ適宜フォーマットを選択して保存する。

2.3.6 理論値との比較

特徴的な点、例えば、位相が 90° ずれる点の周波数や、振幅のピークの有無などを理論式と比較する。どんな条件で振幅が 0dB を超えるか？ グラフを重ねて描きたい場合は、以下のデータ出力の方法を参考にし、エクセルなどを用いてグラフ化する。

2.3.7 解析結果の出力

結果表示ウィンドウをアクティブにして、File メニューを表示させると、結果保存用のメニューが表示される。ここでは、データを出力したいので、Export を選ぶ。Export では、すべてのデータをテキストファイルで出力することが出来る。出力フォーマットは、Cartesian: re im を選ぶこと。Ploar: (dB, deg) は取り扱いがかなり面倒になる。

ダイアログが表示されたときは、現在表示中のデータが選択済みの状態となっている。適

宜, 出力したいデータを選択して, OK を押す. データは変数毎にタブ区切りの txt ファイルで出力される. しかしながら, 複素変数の実部と虚部はコンマ区切りとなっている. エクセルでインポートする際は, タブとコンマを区切り文字に指定して読み込むこと.

2.4 RC 回路の伝達関数

2.4.1 回路図の作成(手順 2.3.1 と同じ)

完成図は図 2.7 参照.

2.4.2 回路定数の設定 (値以外は 2.3.2 と同じ)

R, C の値を適当に設定する. 例えば, $R = 3, C = 1$ とする.

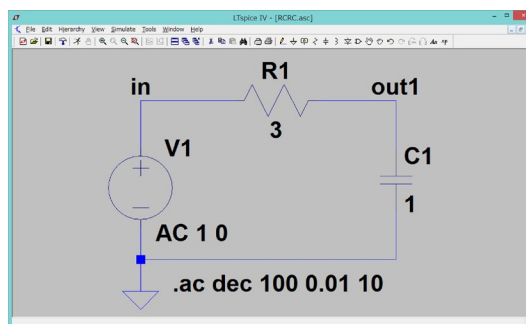


図 2.7 RC 回路の例

2.4.3 電源の設定 (手順 2.3.3 と同じ)

2.4.4 AC 解析 (手順 2.3.4 と同じ)

2.4.5 グラフの出力(2.3.5 と同じ)

2.4.6 RC 回路の追加

図 2.8 のように RC 回路を追加する. 手順 2.4.2 — 2.4.5 を実行し, 結果を確認する. 1 段目と 2 段目の回路定数を同じとした場合, 変えた場合など, いくつか試してみることに.

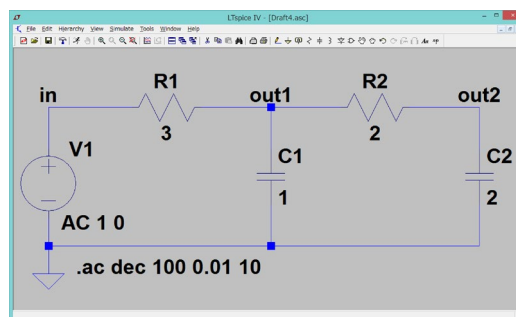


図 2.8 2 段 RC 回路の例

2.4.7 零点を含む回路の作成

図 2.9 のような回路を作成する. 手順 2.4.2 — 2.4.5 を実行し, 結果を確認する. ここでも回路定数を様々に変えて特性の変化を検討すること.

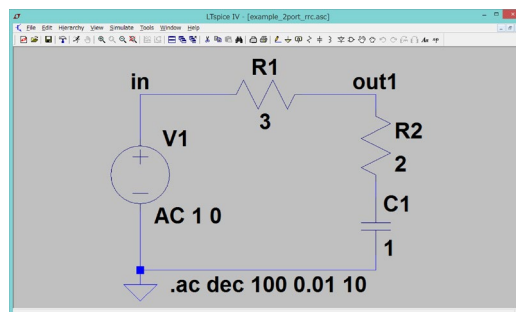


図 2.9 零点を含む回路の例

2.5 トランジスタ増幅回路の解析

2.5.1 テキスト図 10.4 の回路作成

1. 電圧源, 抵抗, GND を配置する.

2. トランジスタを追加する．トランジスタは Component の npn を選択する．完成図は図 2.10 参照．

2.5.2 回路定数の設定

テキストを参考に， $R_1 = 8\ \Omega$ とする．

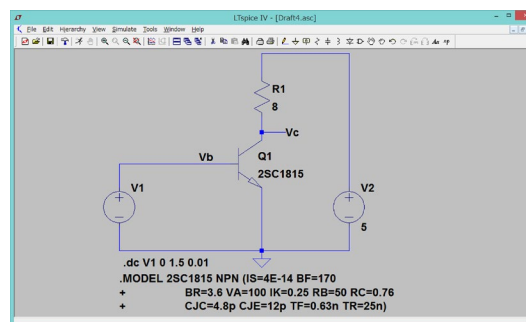


図 2.10 テキスト図 10.4 の回路

2.5.3 電源の設定

出力側の電源(図 2.10 の場合は，V2)は 5 V

の直流電源，すなわち， $V_{CC} = 5\text{ V}$ と設定する．入力側の電源 V1 は値を消去しておく．

2.5.4 トランジスタの設定

モデルパラメータの設定方法については，本書の [4.7 節](#)を参照せよ．

2.5.5 DC 解析

DC 解析(DC sweep)タブにおいて，1st source に，V1, Linear, 0, 1.5, 0.01 の順に値を設定する．

2.5.6 グラフの出力

コレクタ電位(V_c)やコレクタ電流，ベース電流などをグラフに表示し，保存する．

2.5.7 テキスト図 10.11 の回路作成

続いて，テキスト図 10.4 の回路を複製し，その回路に R2 と C1 を追加する．

2.5.8 回路定数の設定

テキストを参考に， $R_2 = 10\text{ k}\Omega$, $C_1 = 0.1\ \mu\text{F}$ とする．他の素子は，そのままの値でよい．

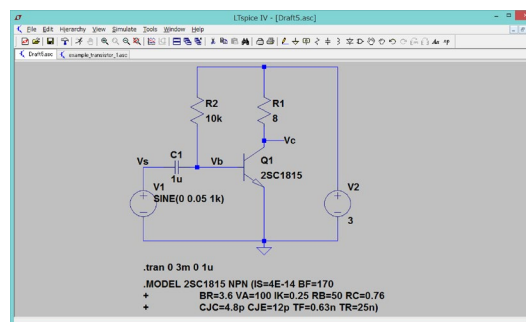


図 2.11 テキスト図 10.11 の回路

2.5.9 電源の設定

入力電源は，Functions 領域の中から

SINE を選び，DC offset を 0, Amplitude を 0.05, Freq. を 1k とする．

2.5.10 過渡解析

解析終了時刻(Stop time)を 3m, 記録開始時刻(Time to start saving data)を 0, 最大刻み幅(Maximum timestep)を 1u とする．

2.5.11 グラフの出力

2.5.6 と同様に、各部波形を可視化する。

2.6 移相型発振回路の解析

2.6.1 テキスト図 12.2 の回路作成

トランジスタ、電圧源、抵抗、キャパシタ、GND を配置し、配線する。また、ラベルも適当に貼る。完成図は図 2.12 参照。

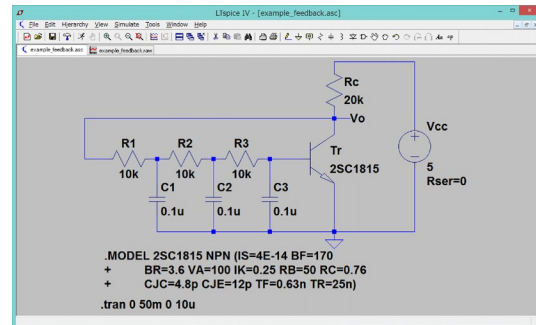


図 2.12 テキスト図 12.2 の回路

2.6.2 回路定数の設定

テキストを参考に、 $R = 10 \text{ k}\Omega$, $C = 0.1 \text{ }\mu\text{F}$, $R_C = 20 \text{ k}\Omega$ とする。

2.6.3 電源の設定

電源は 5 V の直流電源、すなわち、 $V_{CC} = 5 \text{ V}$ と設定する。

2.6.4 トランジスタの設定

2.5.4 と同様にトランジスタを 2SC1815 とする。

2.6.5 過渡解析

解析終了時刻(Stop time)を 50m 、記録開始時刻(Time to start saving data)を 0 、最大刻み幅(Maximum timestep)を 10u とする。

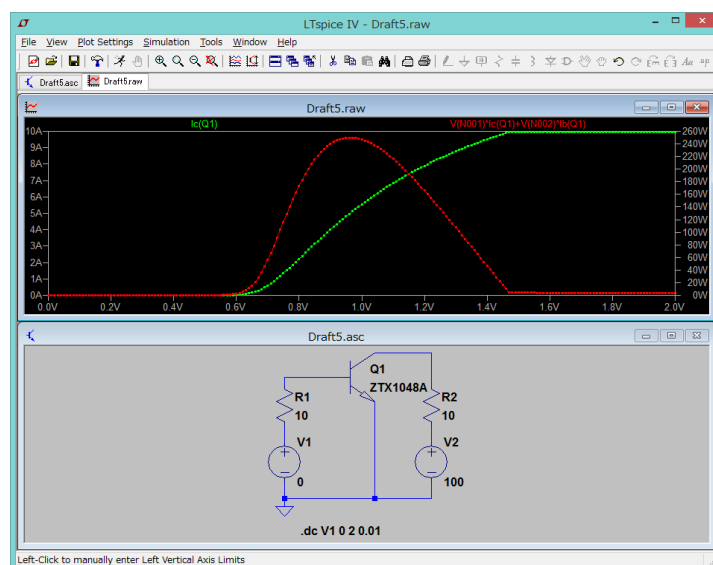
2.6.6 グラフの出力

コレクタ電位(図 2.12 の回路では V_o のラベルが貼ってある)をグラフに表示させ、保存する。何 Hz で発振しているか? また、 C や R を増減させると、発振周波数はどうなるか?

3 LTspice の構成

3.1 画面構成

LTspice の基本画面構成は以下の通りである¹。画面上部はメニューバー、およびよく使う機能がまとめられたツールバーからなる。メイン画面は回路図画面とシミュレーション結果表示画面に分かれている。それぞれの画面はツールバー下のタブで切り替え可能である。また、画面の配置も自由に変更することが出来る。



3.2 メニューバー

LTspice のメニューバーは、回路図画面とシミュレーション結果表示画面とで異なっていることに注意が必要である。回路図画面では、以下の 8 個のメニューが存在する。

File	Edit	Hierarchy	View	Simulate	Tools	Window	Help
------	------	-----------	------	----------	-------	--------	------

- File

ファイルの新規作成や保存など

- Edit

回路図作成用メニュー。素子配置や配線、シミュレーションコマンドの設置など。

- Hierarchy

サブサーキットの作成など。今回の演習では使用しない

- View

回路図の拡大や縮小，Netlist などを表示する

- Simulate

シミュレーション設定や実行を行う

- Tools

回路図の保存(BMP 形式，EMF 形式)や環境設定などを行う

¹ Mac OS 版では、左上に Run, Halt, Control Panel の 3 アイコンしか表示されない。以下で説明するメニューは、Mac OS のメニューバーや右クリック時のポップアップメニューに存在するので適宜探してください。

- Window
画面の配置などを調整する
- Help
マニュアルを表示する

一方、シミュレーション結果表示画面では、7 個のメニューが表示される。

File	View	Plot Settings	Simulation	Tools	Window	Help
------	------	---------------	------------	-------	--------	------


- File
シミュレーション結果の保存やグラフ描画の設定保存
- View
波形図の拡大や縮小
- Plot Settings
波形図の表示を調整する
- Simulate
シミュレーションを実行する
- Tools
波形図の保存(BMP 形式, EMF 形式)や環境設定などを行う
- Window
画面の配置などを調整する
- Help
マニュアルを表示する



3.3 ツールバー

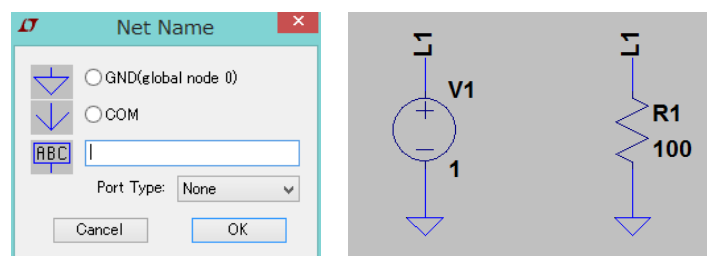
	新規作成		ファイルを開く		上書き保存		環境設定
	シミュレーションの実行				シミュレーションの停止		
	拡大		視点移動		縮小		フィット
	波形表示		自動縮尺				
	ウィンドウの水平配置				前後配置		すべて閉じる
	複製		削除		貼り付け		検索
	印刷設定		印刷				
	配線		グラウンド		ラベル		
	抵抗器		キャパシタ		インダクタ		ダイオード
	その他素子		移動		変更		
	取り消し		やり直し		右 90 度回転		左右反転
	テキスト		spice 命令				


4 回路図の作成

4.1 回路素子の配置



回路素子は、メニューバーの **Edit** または、ツールバーの  から配置することが出来る。

-  **グラウンド(Ground)**: 回路の基準電位点。最低 1 個は必要。
-  **ラベル(Label Net)**: 回路のノードに名前を付ける。ボタンを押すと、以下のようなダイアログが表示されるので、名前を適当に入力して **OK** を押す。



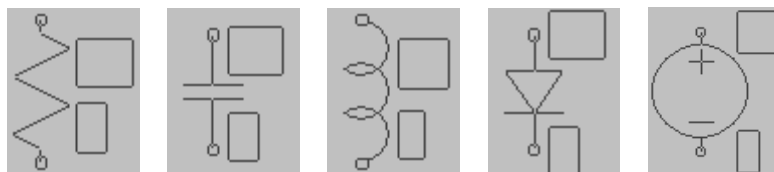
マウスカーソルが  の様に変化するので、ラベルを配置したいノードに配置する。ラベルには以下のような利用法がある。





- ノードに名前を付けて、分かりやすくする。
シミュレーション結果の識別には、ノードのラベルが用いられる。従って、自分で分かりやすいラベルを付けておくと、後でシミュレーション結果を検討するときに便利である。
- 離れたノード間を接続して配線の複雑化を避ける。
ラベルはネットリスト上でのノードの名前であるから、同じ名前のノードは接続されているとして扱われる。すなわち、図のような回路も可能である。ただし、回路図としての見やすさは著しく下がるため、上記のような使い方は配線が複雑になりすぎるような場合に限ると良い。

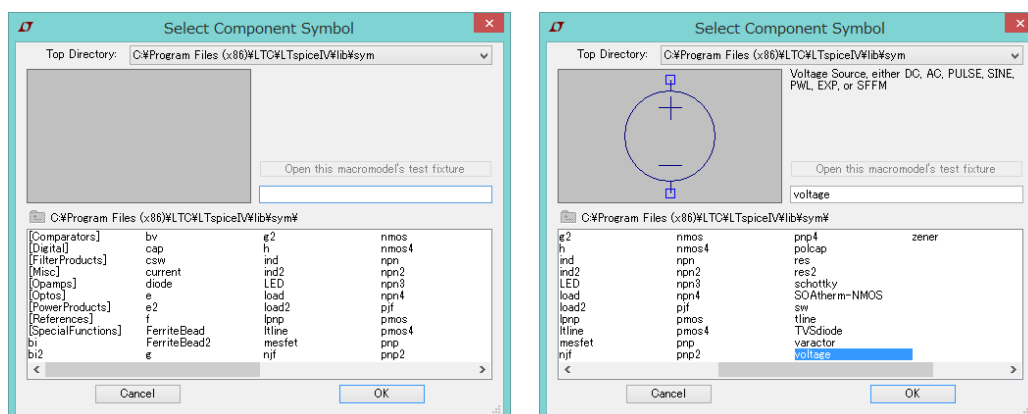
-  **抵抗器(Resistor)**: 抵抗器を配置。ボタンを押すと、マウスカーソルが以下のように変化するので、適当な場所へ配置する。右クリックで部品選択が解除されるまでは、左クリックで何度も部品を配置することが出来る。また、初期状態では抵抗器が縦向きになっているが、 ボタンを押すか、**Ctrl+R** で右に 90 度回転させることが出来る。

また、 ボタン、または **Ctrl+E** で左右反転させることも出来る。この操作は他の部


品は位置に置いても共通である．画面左下のステータスバーに簡易ヘルプが出るので適宜参照する．



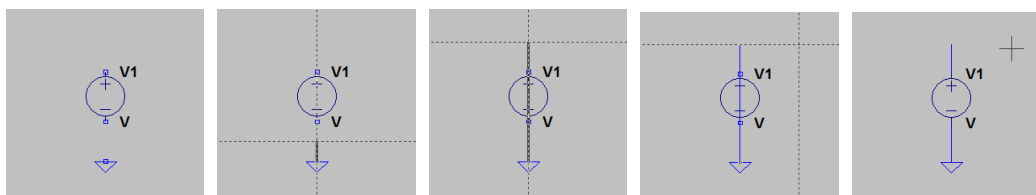
-  キャパシタ(Capacitor) の配置
-  インダクタ(Inductor) の配置
-  ダイオード(Diode) の配置
-  回路素子 (Component) の配置. 上記の抵抗器など以外の回路素子を配置するときに使用する．例えば，電圧源などは，**voltage** という名前で用意されている．配置の方法は抵抗などの素子と同じである．



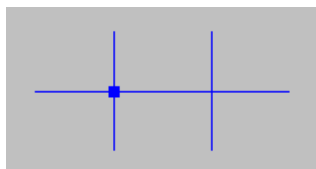
4.2 配線

 ボタンをクリックすると，マウскарソルが破線となり，回路素子のノード同士を結ぶことが出来る．ノード点以外を左クリックするとその点が折れ点となり，配線を曲げることが出来る．角度は 90 度単位であるが，**Ctrl** を押しながらかであればより細かく調整することが出来る．配線を終わるときは右クリックする．

回路素子を繋いでいくとき，以下のように配線操作を簡略化することが出来る．







配線が交差する場合、接続されている点には ■ が表示される。以下の例では、水平な配線に対して、左の垂直配線は接続されているが、右の垂直配線は接続されていない。配線を接続したい場合には、配線病が中に接続したい配線上で左クリックするか、配線上を始点として、配線すればよい。



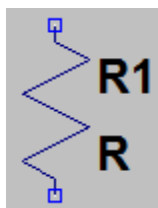
4.3 回路図の修正

作成した回路図に変更を加える場合、以下の操作が可能である。何れの場合も操作を終了する場合は右クリック。

-  ボタン，または Delete キー，Edit メニュー内 Cut
 - 対象素子・配線を単純削除する。他のソフトウェアにおける切り取り(Cut)とは挙動が異なり，削除された素子・配線はクリップボードに送られないことに注意。
-  ボタン，または Ctrl+C キー，Edit メニュー内 Duplicate
 - 対象素子・配線を複製する。範囲指定も可能。コピーした瞬間，貼り付けモードとなる。一度貼り付けると再びコピーモードへ移行する。
-  ボタン，または Edit メニュー内 Move
 - 対象素子・配線を単純に移動させる。範囲指定も可能。
-  ボタン，または Edit メニュー内 Drag
 - 対象素子・配線を移動させるが，各素子間の接続は保持する。範囲指定可能。

4.4 素子定数の設定


配置し終えた回路素子の各種値は，回路素子上を右クリックすることで現れるダイアログを通して行う。回路素子には，右クリックから設定できる箇所が3つある。ここでは，以下の抵抗器を例にとって説明する。

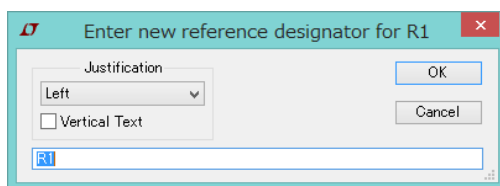


上図は，抵抗器を回転させずには位置した場合の回路図上の表示である。左半分が素子本


体であり、□ はノードを表している。右上部の R1 はこの抵抗器のラベルを表している。また、右下部には抵抗器の値が表示されるが、初期状態では R となっている。

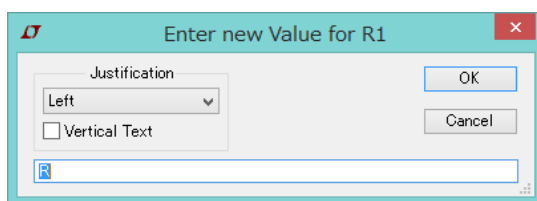
- ラベルの設定

マウスカursorを素子右上部のラベル上へ移動させると、 のようなアイコンに変わるので、右クリックすると、以下のようなダイアログが表示される。ダイアログ下部に好きな名前を入力すれば、それが新しい名前となる。ただし、スペースなどは使用できない。もし入力した名前に禁止文字が入っている場合は警告されるので適宜修正する。




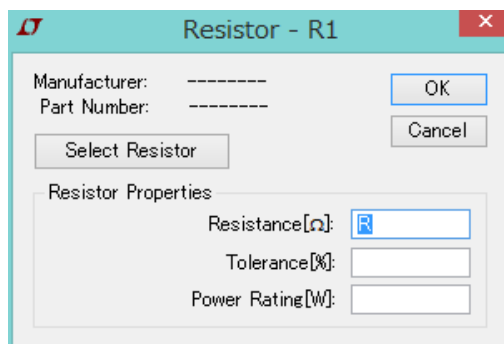
- 値の簡易設定

マウスカursorを素子右下部へ移動させると、上記と同様に  となる。ここで右クリックすると、以下のダイアログが表示され、抵抗器の値を設定できる。




- 素子の詳細設定

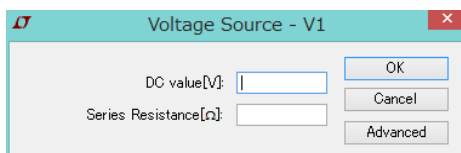
素子上にマウスカursorを移動させると、これまでと違い、 の様なカーソルになる。ここで右クリックした場合は、より詳細を設定できるダイアログが表示される。抵抗器の場合は、抵抗値(Resistance[Ω]) の他に、許容誤差(Tolerance[%])、電力定格(Power Rating[W]) なども設定できる。また、**Select Resistor** ボタンからは、あらかじめ用意された抵抗器の設定を呼び出すことが出来る。



4.5 電源の設定

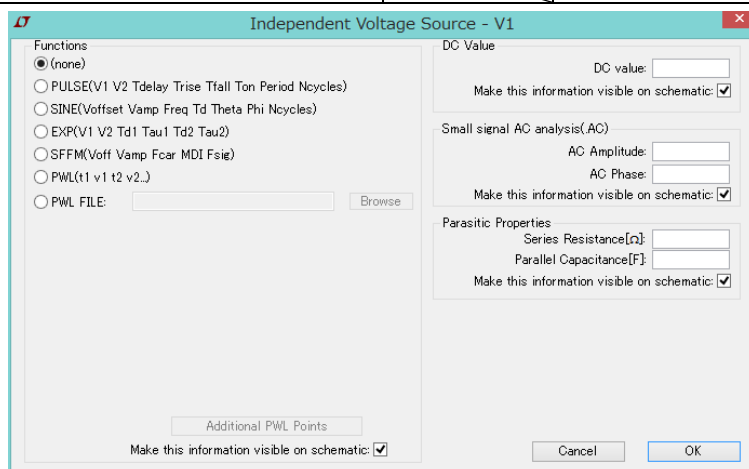
電源は抵抗器などの素子と同様に、ラベルと値、詳細設定が行える。ここでは詳細設定について説明する。電源上にカーソルを移動させ、のようなカーソル表示にし、右クリックすると以下のようなダイアログが表示される。このダイアログでは、直流電圧(DC value[V])と直列の内部抵抗(Series Resistance[Ω])を設定できる。

交流電源などは、**Advance** ボタンを押し、詳細設定画面で設定する。



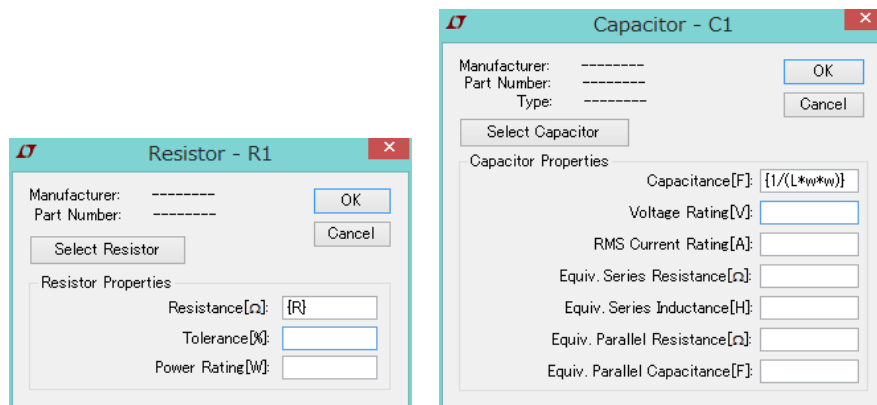
詳細設定画面では、電圧源の振る舞いを細かく設定することが出来る。Functions フィールドでは電源の種類を以下のなかから選ぶことが出来る。

(none)	直流	SFFM	
PULSE	パルス電源	PWL	
SINE	正弦波電源	PWL FILE	
EXP			



4.6 変数の利用

素子の指定には、値を直接入力する方法と、変数を介して指定する方法とがある。変数を利用する場合、使用したい記号を中括弧 { } で囲む。括弧内には数式を入力することも出来る。例えば、LCR 共振回路において、共振周波数を指定してシミュレーションしたい場合、インダクタの素子値を {L} とし、キャパシタの素子値を {1/(L*w*w)} とする。ここで、w は共振角周波数である。シミュレーションでは、値の指定が必要なので、.param ディレクティブで指定する。上記の例では、.param R=10k や .param L=1 w=2*pi*10 のようにして指定する。ここで、「pi」は機械精度の円周率を表す。ヘルプによると pi = 3.14159265358979323846 である。



4.7 素子モデルの指定

LTspice にはよく使われる能動素子があらかじめ用意されていないことが多い。その場合は、使用したい素子のデータシートなどを参照し、`.model` ディレクティブを用いて、自ら素子を定義する必要がある。例えば、2SC1815 は以下のように定義する。

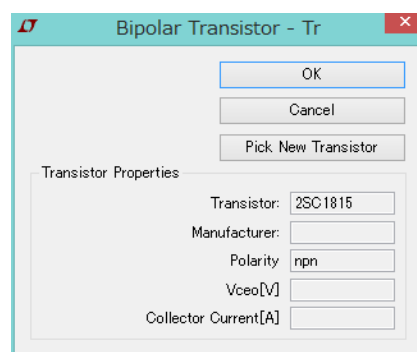
```
.model 2SC1815 NPN (IS=4E-14 BF=170 BR=3.6 VA=100 IK=0.25 RB=50
RC=0.76 CJC=4.8p CJE=12p TF=0.63n TR=25n)
```

行を途中で改行したい場合は、改行後の行頭に「+」を付すことでひとまとまりの命令と解釈される。

```
.model 2SC1815 NPN (IS=4E-14 BF=170 BR=3.6 VA=100 IK=0.25 RB=50 RC=0.76
+ CJC=4.8p CJE=12p TF=0.63n TR=25n)
```

「`.model`」の後に書かれているのが素子名である。自分で分かれば自由に名前を付けることが出来る。素子値の設定では、この素子名を指定する。

2SC1815 と同じ特性を持ちながら極性の異なるトランジスタ² 2SA1015 の定義は以下の通りである。

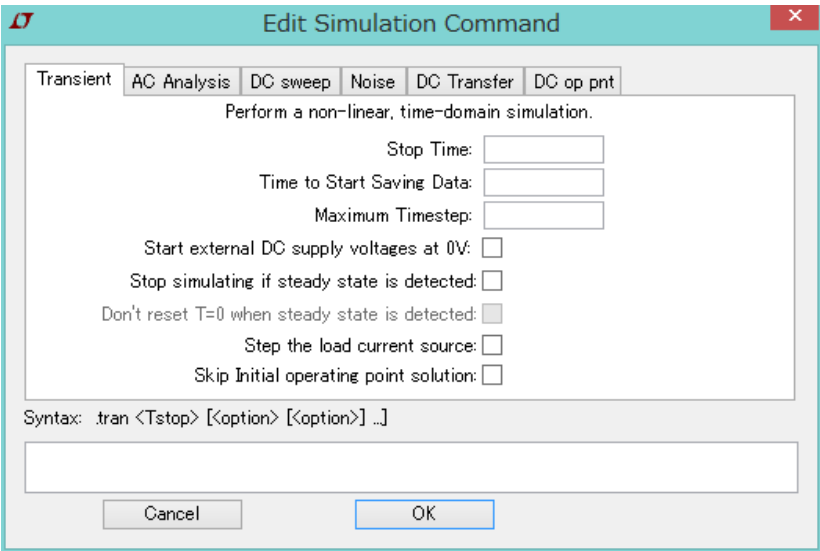


```
.model 2SA1015 PNP (IS=4E-14 BF=170 BR=10 VA=100 IK=0.22 RB=30 RC=1.4
+ CJC=9.6p CJE=24p TF=0.63n TR=25n)
```

² Complementary to 2SC1815 のように表現される。

5 シミュレーションの設定

Simulate メニューから Edit Simulation Command を選ぶと、以下のようなダイアログが表示される。ここでは過渡解析 (Transient)、交流解析 (AC Analysis)、直流解析 (DC Sweep) について説明する。



5.1 過渡解析 (Transient)

Edit Simulation Command ダイアログで Transient タブを選択する。各パラメータの意味は以下の通りである。


Stop Time	シミュレーションを終了させる時刻
Time to Start ...	データ記録を開始する時刻。周期定常状態のデータが必要な場合など、シミュレーション初期のデータが不要な場合は指定する。
Maximum Timestep	時刻刻みの最大値。大きくすると計算が速くなるが、急峻な変化に追従できないことがある。

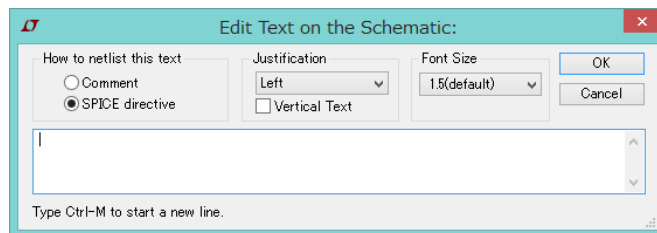
以下のオプションは通常チェックする必要はない。詳しくは LTspice のヘルプ .TRAN Modifiers を参照のこと。

Start external...	<p>.TRAN Modifiers の startup を挿入。計算の最初で全ての電源を OFF にする場合はチェックする。</p> <p>Solve the initial operating point with independent voltage and current sources turned off. Then start the transient analysis and turn these sources on in the first 20 us of the simulation.</p>
Stop simulating...	<p>.TRAN Modifiers の steady を挿入。定常状態になったら計算を停止させる場合はチェックする。</p> <p>Stop the simulation when steady state has been reached.</p>

Don't reset...	.TRAN Modifiers の nodiscard を挿入. 上記オプションを選択した上で、定常状態に到達する前のデータを消去しない場合はチェックする. Don't delete the part of the transient simulation before steady state is reached.
Step the load...	.TRAN Modifiers の step を挿入. ステップ応答を計算する場合はチェックする. Compute the step response of the circuit.
Skip Initial...	.TRAN Modifiers の uic を挿入. 初期状態を回路の直流動作点ではなく、ユーザの設定とする場合はチェックする. Skip the D.C. operating solution and use user-specified initial conditions.

ダイアログにおいて、Stop Time を 10m, Time to Start Saving Data を 1m, Maximum Timestep を 1u とした場合、「.tran 0 10m 1m 1u」のようにシミュレーションコマンドが自動的に作成される。OK を押すとコマンドを配置できるようになるので、回路図の適当な場所に貼り付ける。

続いて、初期条件を設定する。ツールバーの  SPICE Directive を選択する。



ダイアログ左上の ☐ SPICE directive をオンにして、初期条件を以下の書式で書く。

<code>.ic V(n001)=0 I(L1)=10m</code>

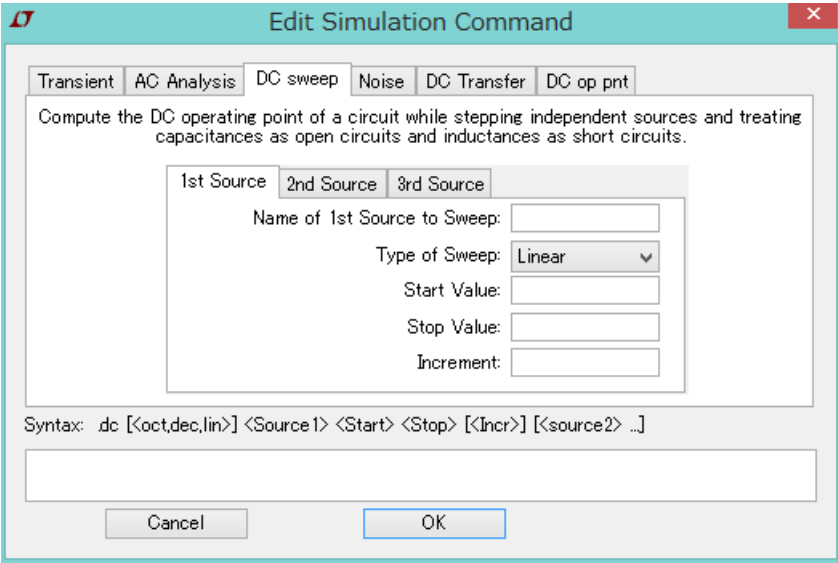
最初の「.ic」は、初期条件を記述していることを示す。先頭のピリオドを忘れないようにする。その後は、各ノードの電圧や、インダクタに流れる電流の初期値を設定する。書式は以下の通りである。

電圧	V(ノード名) = 初期電圧
電流	I(インダクタ名) = 初期電流

例では、ノード「n001」の初期電圧が 0, インダクタ「L1」を流れる初期電流が 10 mA となっている。

5.2 DC 解析 (DC Sweep)

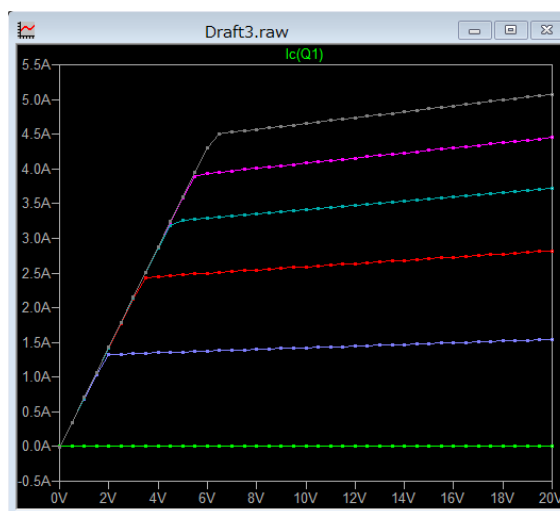
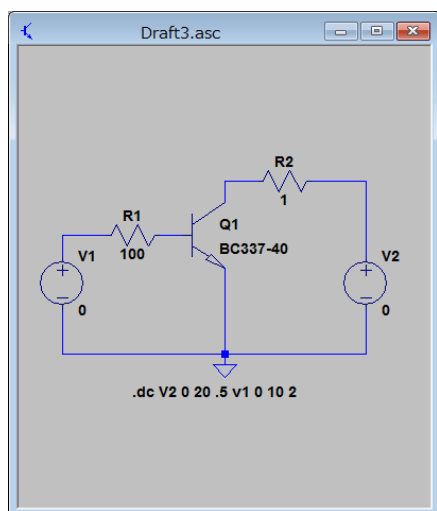
Edit Simulation Command ダイアログで DC Sweep タブを選択する.



電圧または電流を変化させる電源は 3 つまで指定できる. 各タブにおける各パラメータの意味は以下の通りである.

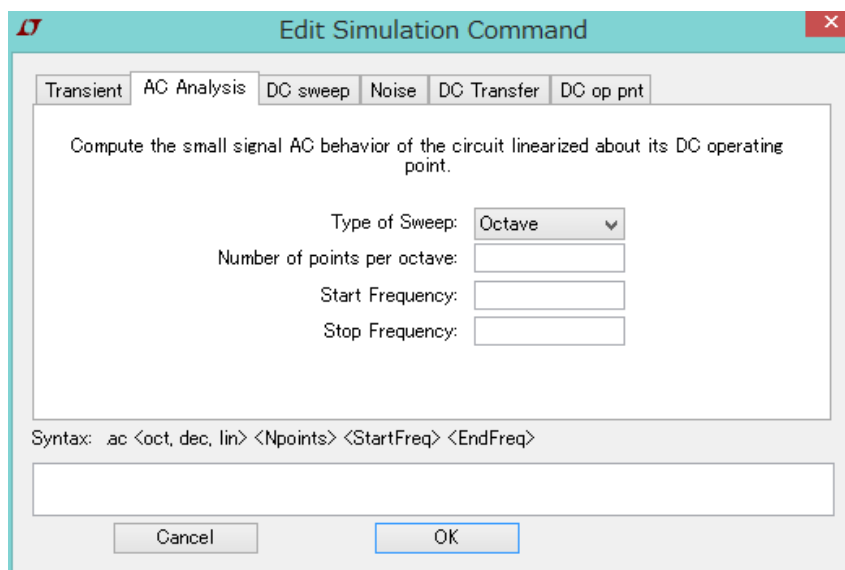
Name of 1 st /2 nd /3 rd Source to Sweep	電圧を変化させたい電源の名前
Type of Sweep	変化のさせ方. Linear: 線形, Octave: 対数 (Log ₂), Decade: 対数(Log ₁₀), List: リスト
Start Value	初期値
Stop Value	最終値
Increment/Number of Points per...	Type of Sweep が Linear の場合は, 増分 Octave, Decade の場合は, 分割数

値は, 1st Source から順に変化する. すなわち, まず 1st Source の電圧または電流を Start Value から Stop Value まで指定された方法で変化させる. 次に, 2nd Source を 1 ステップ変化させ, 再度 1st Source を Start Value から Stop Value まで変化させる. 2nd Source が最終値まで到達したら, 3rd Source を 1 ステップ変化させ, 上記を繰り返す. このようにして, 複数の電源の値を変化させる. 以下は, トランジスタの静特性をシミュレートした例である. 1st Source には V2, 2nd Source には V1 が指定されており, ベース電圧をパラメータとした V_{CE}-I_C 特性(出力特性) が得られている.



5.3 AC 解析 (AC Analysis)

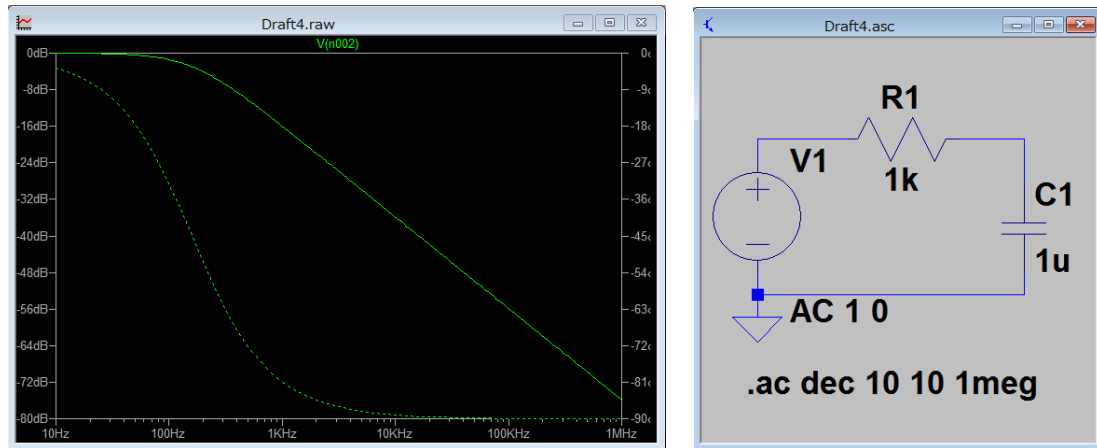
Edit Simulation Command ダイアログで AC Analysis タブを選択する.



各パラメータの意味は以下の通りである.

Type of Sweep	変化のさせ方. Octave: 対数(Log ₂) , Decade: 対数(Log ₁₀), Linear: 線形, List: リスト
Number of Points per.../Number of points	Type of Sweep が Octave, Decade の場合 は, 1 桁あたりの分割数 Linear の場合は, 全体の分割数
Start Frequency	初期周波数
Stop Frequency	最終周波数

AC 解析では、交流電源の周波数を変化させる。そのため、電源は AC 電源である必要がある。例えば、voltage コンポーネントを配置した場合、素子の Advanced メニューにおいて、Small signal AC analysis (.AC) の AC Amplitude と AC Phase を設定しておく。以下は、RC 直列回路の解析例である。電圧源 V1 の周波数が、10Hz から 1MHz まで 1 桁あたり 10 分割で変化させられている。

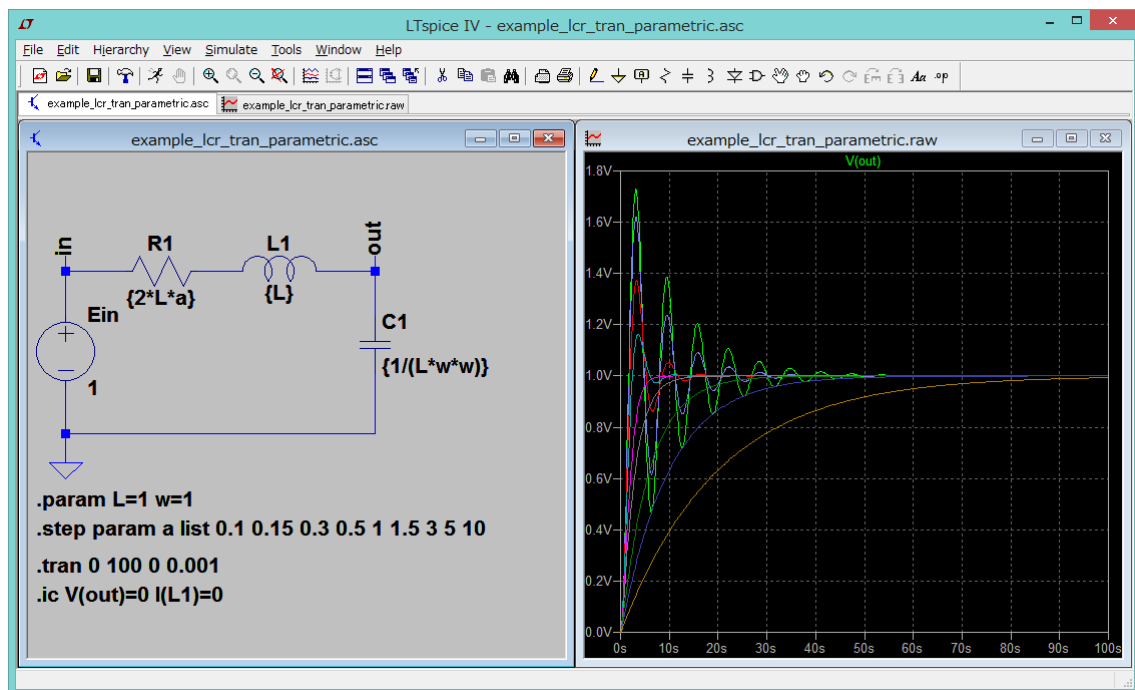


5.4 ステップ解析

素子の値などを変えながらシミュレーションしたい場合、.step ディレクティブを用いる。例えば、LCR 共振回路において、 $\alpha = R/2L$ を変化させながらシミュレーションしたい場合、以下のように .step ディレクティブを書く。

```
.step param a list 0.1 0.15 0.3 0.5 1 1.5 3 5 10
```

「.step param」は回路素子の値を変えることの宣言である。続いて、「a」が変化させるパラメータである。「list」は続く数値リストにしたがってパラメータを変えることを表す。したがって、上記のディレクティブでは、パラメータ a を 0.1, 0.15, ..., 10 と順に変化させてシミュレーションを繰り返すことを表す。実際の実行例を以下に示す。

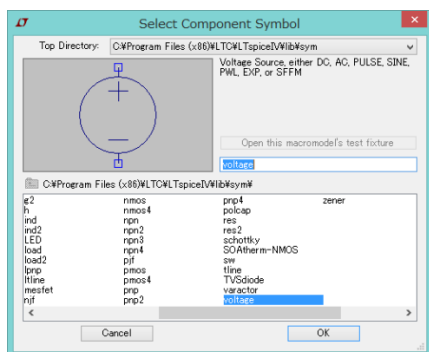


上記の例ではやや込み入ったグラフとなっているが、 α の変化によって電圧波形に定性的な違いが生じることが分かる。

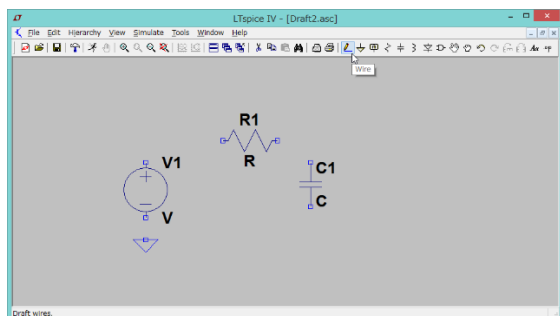
6 Tutorial: CR 回路の解析

6.1 回路図の作成

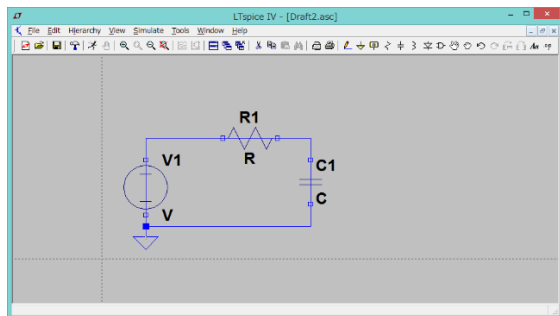
1. File メニューから New Schematic を選ぶ.
2. 電源を配置する. Component ボタンから voltage を選ぶ.



3. 適当な箇所に電源を配置する. 配置後は, 右クリックまたは ESC で部品選択をキャンセルする.
4. 抵抗を配置する. Resistor ボタンをクリックすると, 部品を配置できるようになる. ここで左に 90 度回転させたいので, Ctrl+R を 3 回押す. 部品を適当な場所に配置する.
5. 容量を配置する. Capacitor ボタンをクリックし, 適当な場所に配置する.
6. 電位基準点(グラウンド)を配置する. Ground ボタンをクリックし, 適当な場所に配置する.



7. 配線で結合する. Wire ボタンをクリックし, 直線毎に描画していく. このとき, 回路部品の上を通過するように線を引いても構わない. 自動的に短絡しないように処理される.



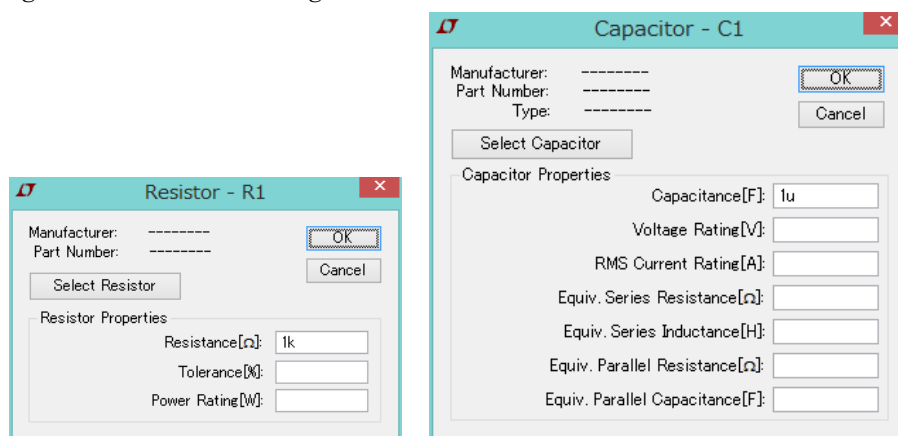
6.2 回路定数の設定

1. 回路定数を設定するには、部品を何も持っていない状態でカーソルを素子の上に移動させ右クリックする。ここでは、 $R = 1\text{ k}\Omega$, $C = 1\text{ }\mu\text{F}$ とする。入力には単位を省いた数値を入力する。抵抗の場合 1000 または 1k を入力する。容量は 0.0000001 または 1u を入力する。‘k’ や ‘u’ は接頭辞で以下の表に示すものがある。

k	10^3	meg	10^6	g	10^9	t	10^{12}		
m	10^{-3}	u	10^{-6}	n	10^{-9}	p	10^{-12}	f	10^{-15}

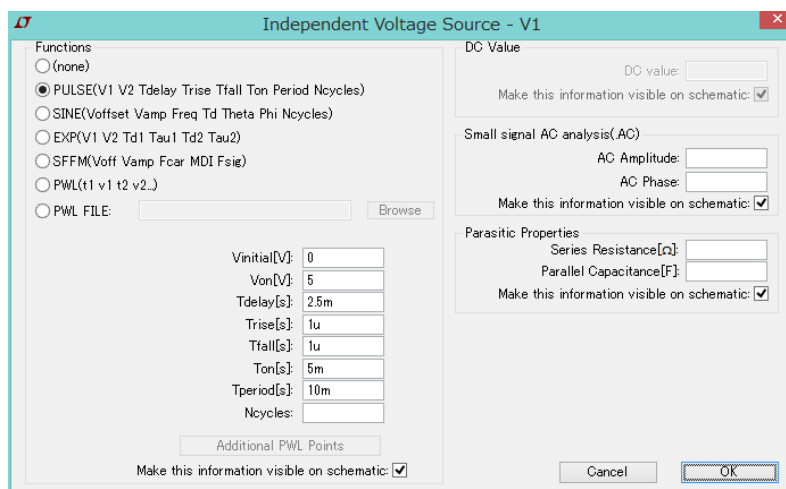
LTspice では接頭辞の大文字・小文字は区別されないので、m と M は同じ扱いとなる。

Mega を表すためには meg とする。



2. 続いて、電源の設定を行う。ここでは、パルス電源を作成する。素子を右クリックして現れたダイアログの Advance ボタンを押すと、詳細設定ダイアログが表示される。Functions から PULSE を選択する。電源の詳細パラメータを設定する。ここでは、以下のように設定する。

Vinital[V]	0	Von[V]	5	Tdelay[s]	2.5m	Trise[s]	1u
Tfall[s]	1u	Ton[s]	5m	Tperiod[s]	10m	Ncycles	

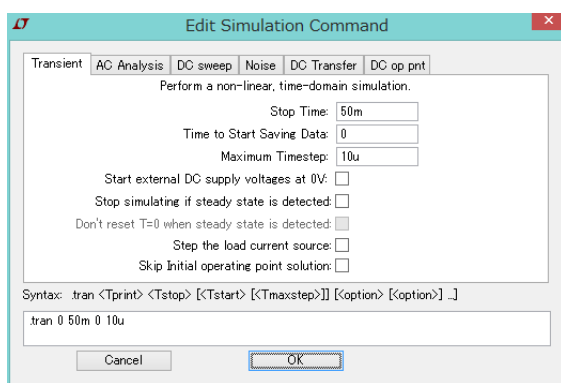


6.3 過渡解析

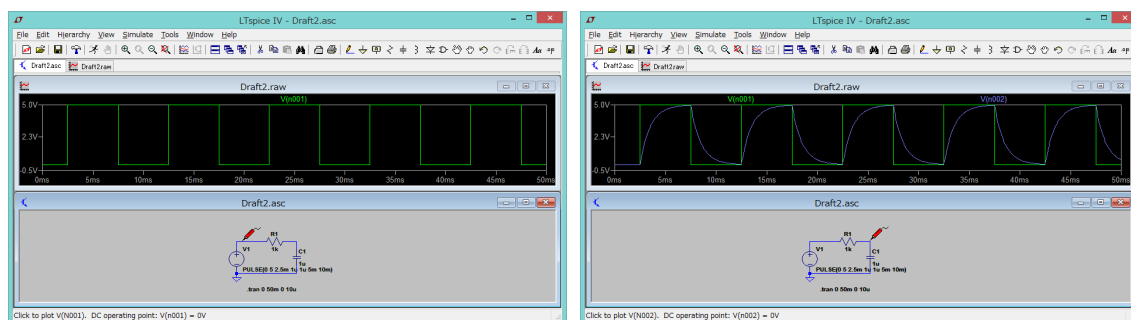
1. **Simulate** メニューから **Edit Simulation Cmd** を選ぶ.
2. **Transient** タブを選び, シミュレーションのためのパラメータを入力する. ここでは, 以下のように設定する.

Stop Time	50m	Time to Start Saving Data	0	Maximum Timestep	10u
-----------	-----	---------------------------	---	------------------	-----

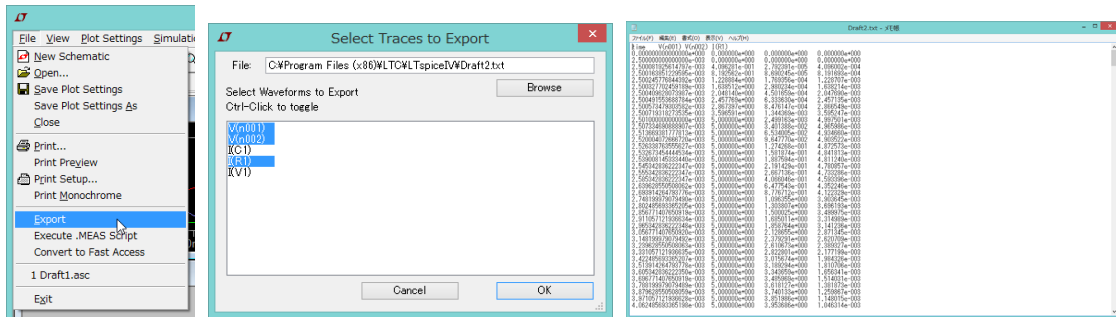
OK を押すと, コマンドを回路図上へ配置できるようになるので, 適当な場所へ配置する. 以後, シミュレーション条件を変更する場合は, `.tran 0 50m 0 10u` のようなシミュレーションコマンドの上で右クリックすればよい.



3. シミュレーションを実行するには, **Simulate** メニューから **Run** を選ぶ. **Run** を選択すると直ちにシミュレーションが開始され, 結果を表示する画面が追加される. 初期状態では何も表示されていないが, 回路図において, 配線上にカーソルを移動させると, 基準電位に対する電位差がグラフに表示される.



4. シミュレーション結果を保存するには, 結果表示ウィンドウをアクティブにして, **File** メニューを表示させると, 結果保存用のメニューが表示される. ここでは, データを出力したいので, **Export** を選ぶ. **Export** では, すべてのデータをテキストファイルで出力することが出来る. ダイアログが表示されたときは, 現在表示中のデータが選択済みの状態となっている. 適宜, 出力したいデータを選択して, **OK** を押す. データはタブ区切りの **txt** ファイルで出力される. したがって, **gnuplot** などそのまま可視化することが可能である.



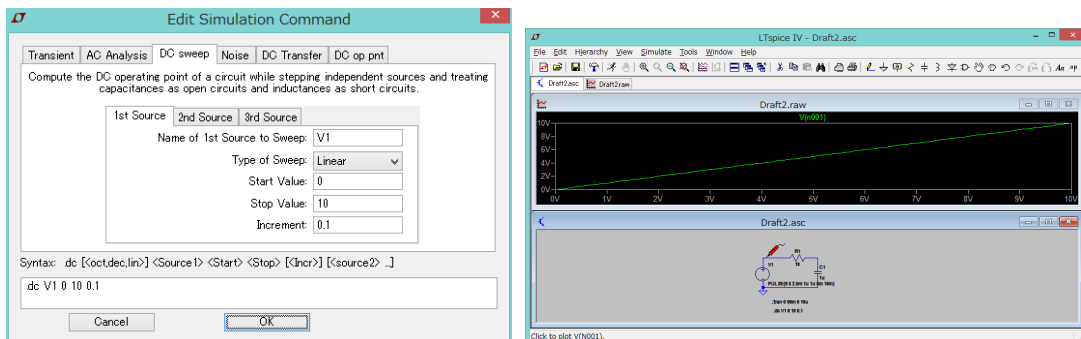
6.4 DC 解析

1. Simulate メニューの Edit Simulation Cmd を選び、DC Sweep タブを選択する。電圧を変化させたい電源の名前、ここでは“V1”を Name of 1st Source to Sweep に入力する。その他の値は、以下の様に設定する。

Name ...	V1	Type of Ssweep	Linear	Start Value	0	Stop Value	10	Increment	0.1
----------	----	----------------	--------	-------------	---	------------	----	-----------	-----

2. 回路図上にシミュレーションコマンドを配置すると、.tran のコマンドは、先頭にセミコロンが追加され、自動的にコメントアウトされる。

3. シミュレーションを実行すると、CR 回路の直流特性が出力される。



6.5 AC 解析

1. 電圧源の設定をする。電圧源上で右クリックし、設定ダイアログを表示させる。AC Amplitude を 5 V に設定し、AC Phase は 0 とする。設定を反映させると、電圧源に AC 50 のような文字列が追加される。

2. 電源の設定が終わったら、Edit Simulation Cmd により、AC 解析のための設定を行う。

AC Analysis タブを表示させ、以下のように設定する。

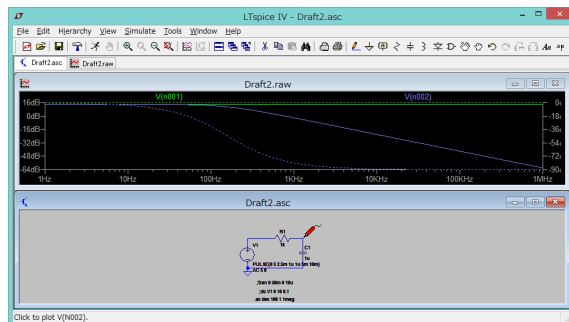
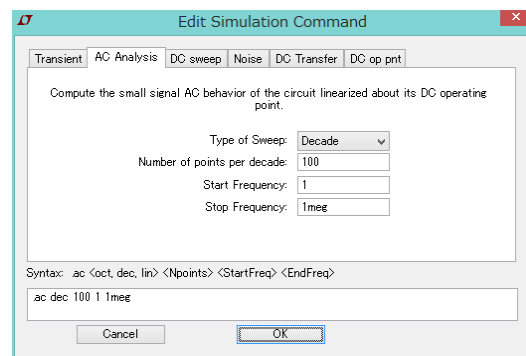
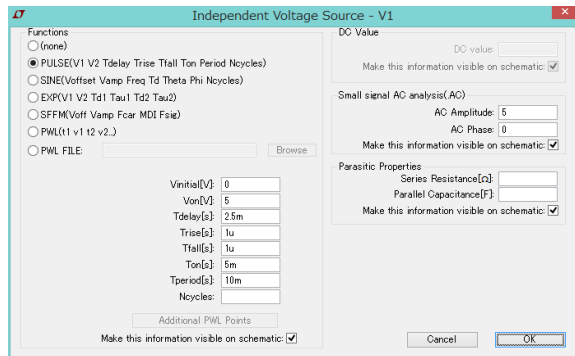
Type of Ssweep	Decade	Number of ...	100	Start Frequency	1	Stop Frequency	1meg
----------------	--------	---------------	-----	-----------------	---	----------------	------

3. コマンドを回路図上に配置すると、その他のコマンドはコメントアウトされる。シミュレーションを実行すると、結果表示画面になる。AC 解析では、横軸に $\log_{10} f$ 、縦軸に

$10 \log_{10} \frac{v^2}{1^2 V^2} = 20 \log_{10} \frac{v}{1V}$ としたグラフが表示される。いまは、AC 電源の電圧を $5V$ とし

たので、 $20 \log_{10} \frac{5V}{1V} = 20 \log_{10} 5 \approx 13.98 \text{ dB}$ が電源電圧に対応する。実際、 $V(n001)$ の電圧

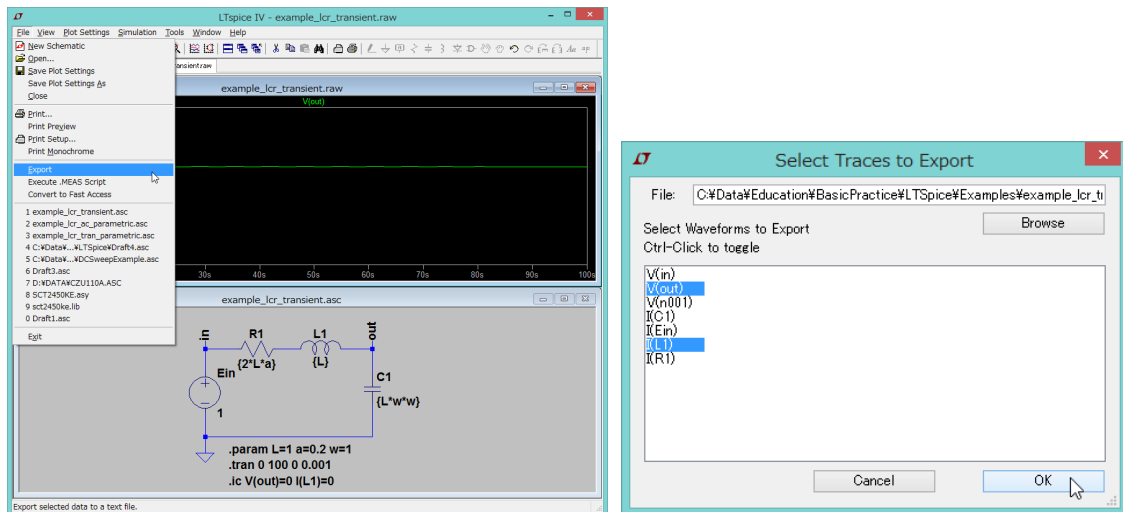
は、 13.98 dB で一定になっていることが分かる。一方、容量にかかる電圧 $V(n002)$ は、周波数が低いときは電源電圧を一致するが、周波数が高くなると小さくなる。また、位相もずれていくことが分かる。このように、回路の周波数特性を調べるときには AC 解析を用いる。



付録

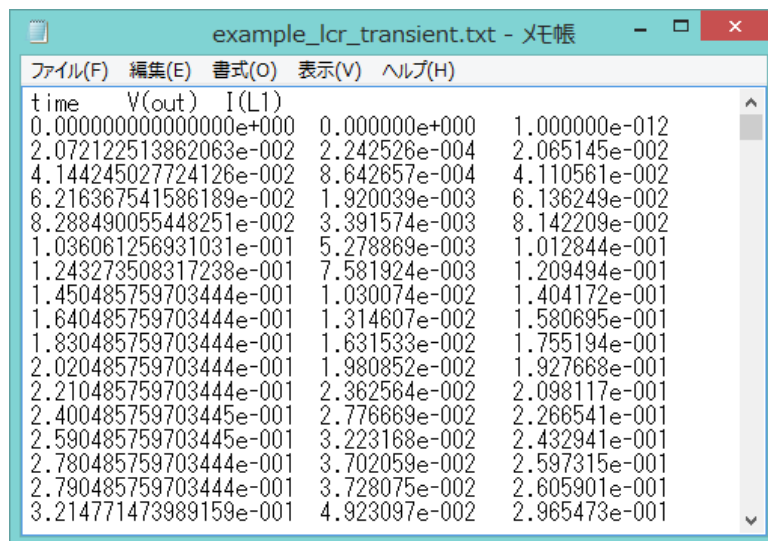
A LTspice からのデータ出力

1 グラフウィンドウをアクティブにした状態で **File** メニューから **Export** を選択する。



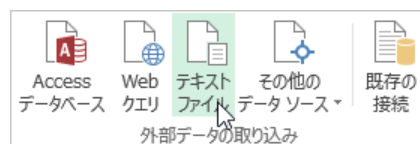
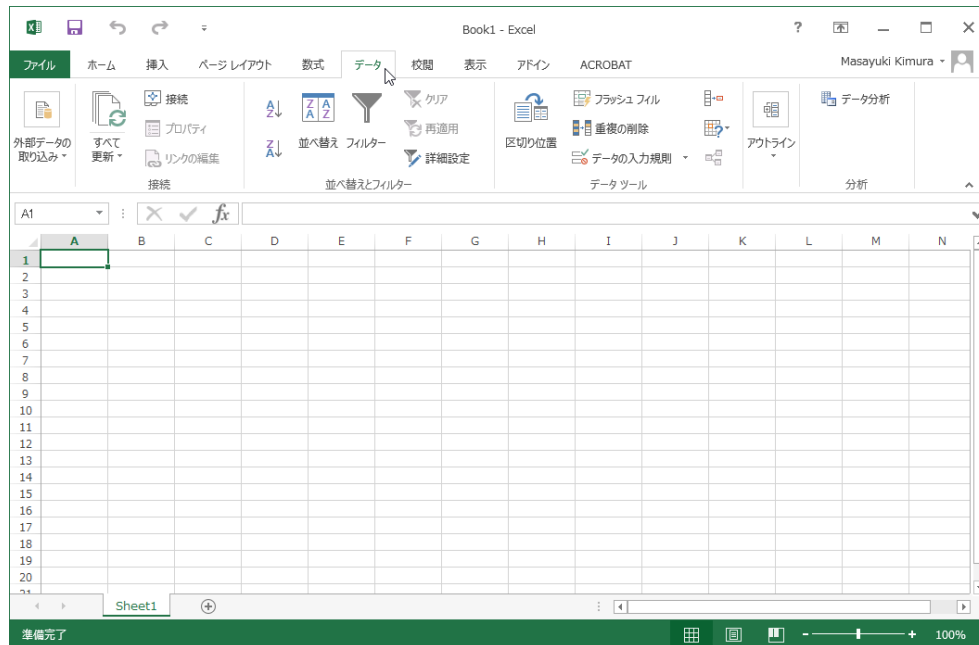
2 出力したいデータを反転させて指定する。Ctrl キーを押しながら複数を同時選択することも可能。

3 出力されたデータは、テキストファイルとしてシミュレーションに用いたファイルと同じ場所に保存される。拡張子は **txt** である。以下の図は、テキストエディタで開いた場合である。第1列は時刻(time), 第2列は電圧(V(out)), 第3列は電流(I(L1)) であることが分かる。それぞれの列は Tab で区切られている。



B Excel によるデータ取込

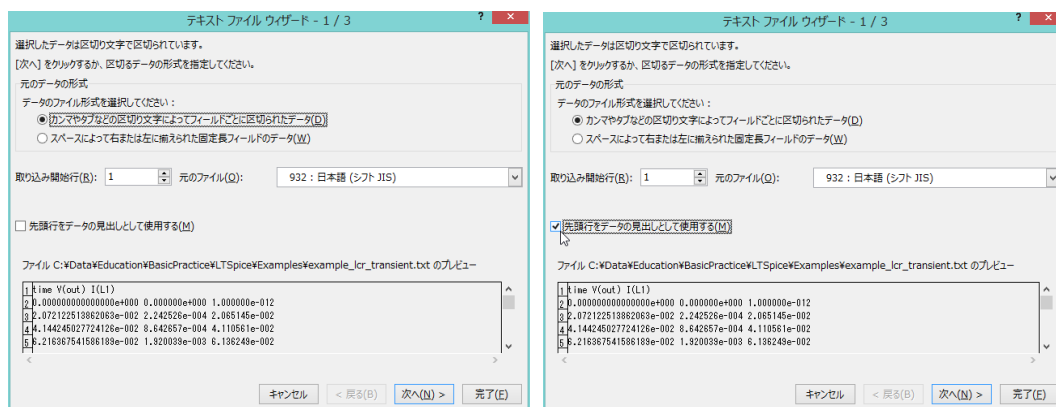
- 1 メニューから **データ** タブを選択し、**外部データの取り込み** から **テキストファイル** を選択する。



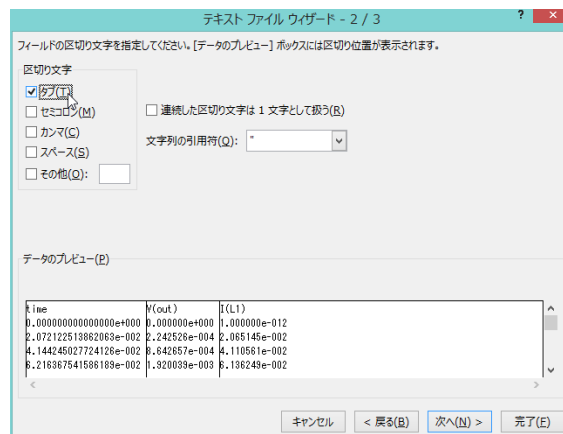
- 2 ファイル選択ダイアログで取り込みたいファイルを選択する。

- 3 テキストファイルウィザードが起動するので、適宜取り込み方法を指定する。

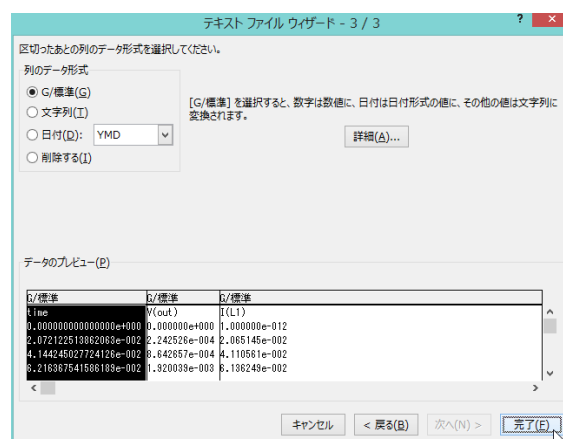
- 3.1 データのファイル形式として「カンマやタブなどの...」を指定する。先頭行はデータではないが見出しとして使用すると便利なので、「先頭行を...」のチェックボックスをオンにする。 **次へ**



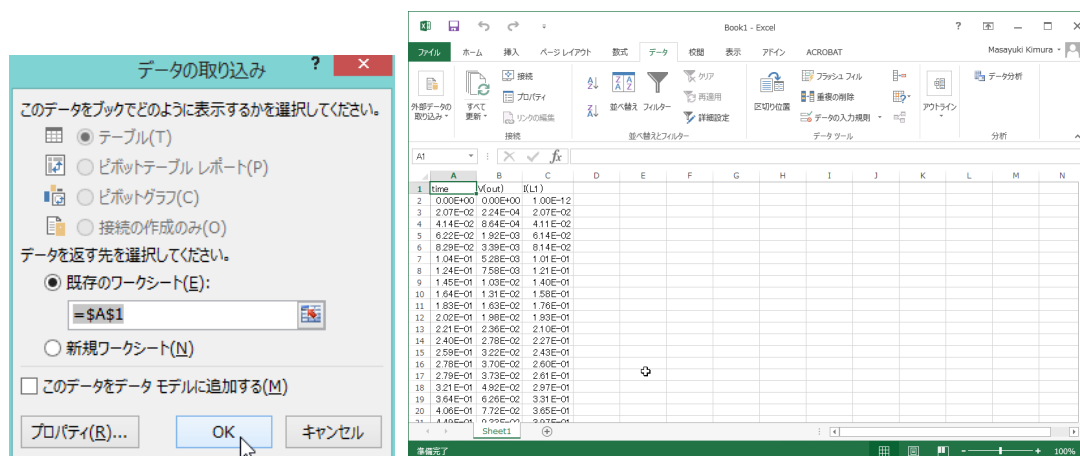
3.2 区切り文字としてタブを選択する。データのプレビューを適宜参照しながら区切り文字を設定する。 次へ



3.3 列のデータ形式を列毎に指定する。通常はデフォルトのままで構わない。 完了

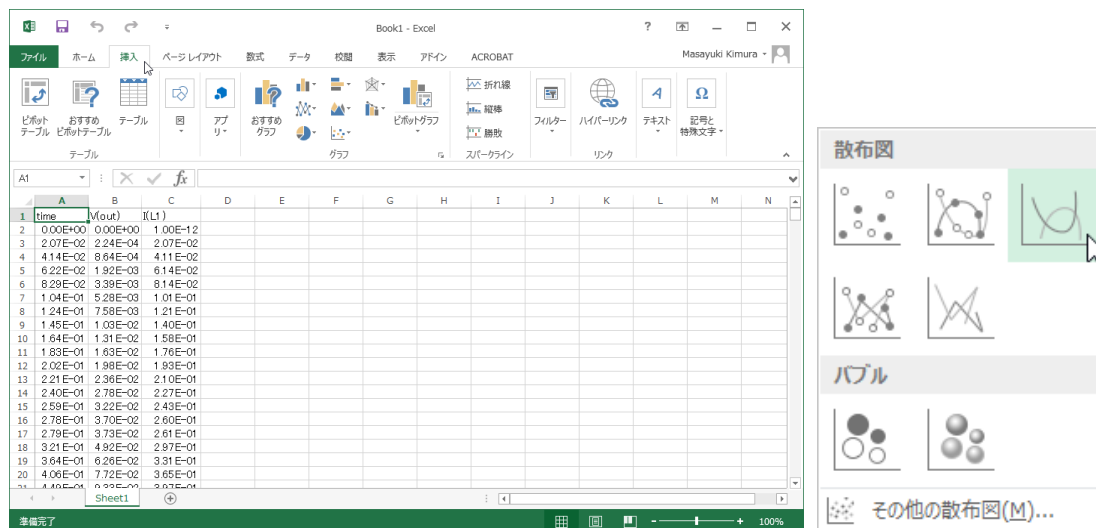


3.4 データの取込先を選択する。

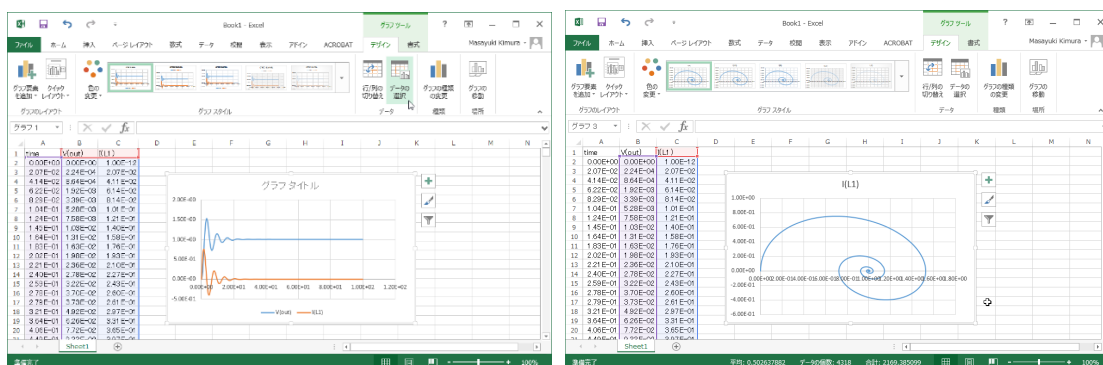


Excel によるグラフの作成

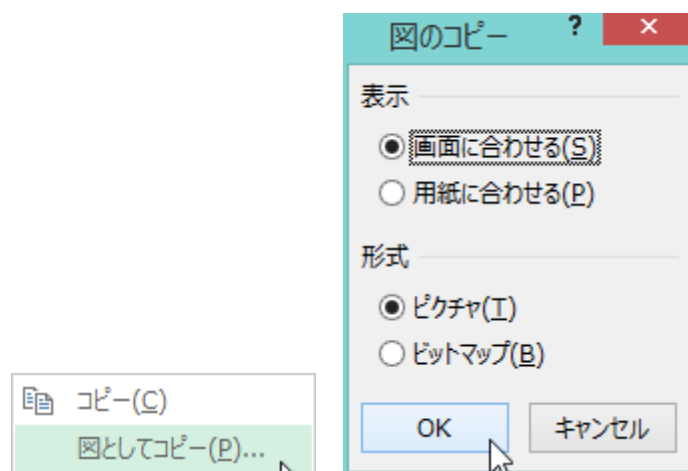
1 メニューから **挿入** タブを選択し、 **散布図** を選択する．ここではシミュレーション結果をプロットするために、点を描画せずに曲線のみを表示するグラフを選択する．グラフの体裁はグラフ化したいデータの特性に合わせて適宜選択すること．



2 おそらく自動的に以下のようなグラフが作成される．このままでよい場合は、そのままグラフの体裁を整える．横軸を電圧(V(out)) 縦軸を電流(I(L1)) にとりたい場合は、**グラフツール** **デザイン** **データの選択** を用いて、それぞれ 系列 X の値、系列 Y の値を指定する．



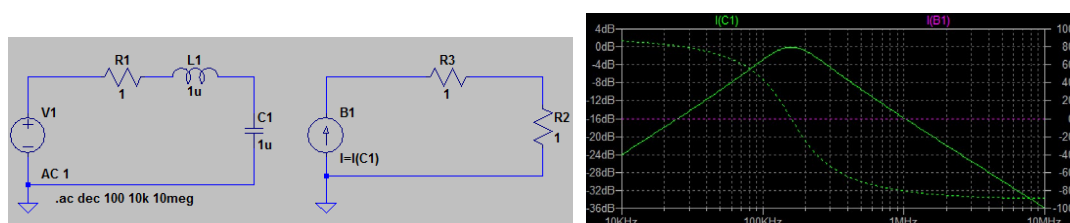
- 3 作成したグラフを図として保存するには、グラフを選択した状態で、メニューの **ホーム** から **コピー** メニューを表示させ、 **図としてコピー** を選択する。形式はピクチャのほうが、容量が小さく印刷が綺麗な場合が多い。コピーしたらクリップボードにデータが格納されているので、適当なグラフィックエディタやワードなどに貼って保存する。ピクチャ形式の場合、inkscape などのベクトルグラフィックスが扱えるソフトを用いる。



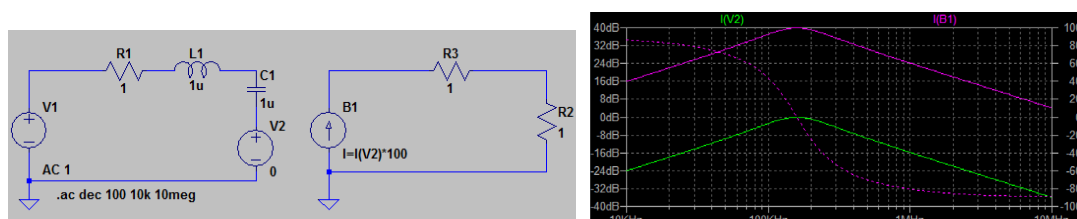
C 電流制御電源を含む回路の AC 解析

トランジスタの等価回路モデルなどでは、しばしば電圧制御電流源や電流制御電流源などが現れる。これを LT Spice でシミュレーションしようとする、AC 解析においてうまく行かないことがある。本節では、そのようなトラブルの回避方法について述べる。

下図のように Arbitrary Behavioral Current Source (B2) を用いた回路を考える。左の回路は LCR 直列共振回路に電圧源が接続されたものである。右の回路は抵抗の分圧回路になっており、電流源は左回路のコンデンサに流れる電流をそのまま流す設定 $I=I(C1)$ となっている。下図左は AC 解析の結果である。緑は $I(C1)$ であり、回路の共振周波数で最大値を取っていることが分かる。桃色は電流制御電流源の電流 $I(B1)$ である。当然、緑と重なるグラフが期待されるが、この場合は全ての周波数で一定となっており、期待する出力が得られていないことが分かる。



この現象を回避するためには、以下のように電圧源を使った電流計測を行う必要がある。下図では、電圧を 0 と設定した直流電源をコンデンサに直列に挿入し、電流制御電流源の設定を $I=I(V2)*100$ のように、電圧源を流れる電流を用いて記述する。結果的にコンデンサを流れる電流を 100 倍して右回路へ流すことと等価となる。AC 解析の結果は下図右である。挿入した電圧源を流れる電流は、失敗例と同様に共振周波数に最大値を持つような変化を示している。電流源から出力される電流も同様の変化を示していることが分かる。また、大きさは緑+40dB となっており、100 倍されていることが分かる。



この手法は、電流制御電流源(Linear current dependent current source, F) や、電流制御電圧源(Linear current dependent voltage source, H) へも応用可能である。一方、電圧制御電圧源(Voltage dependent voltage source, E) や電圧制御電流源(Voltage depended current source, G) については特に上記のような問題は発生しない。

D オペアンプの使い方

オペアンプ NJM4565DD を LTspice 上でシミュレーションするには、Spice モデルが必要となる。ファイルは、回路演習の授業資料-SPICE モデル一覧にあるので、適宜入手する。本節では、NJM4565DD 用の SPICE モデル、**model_NJM4565.lib** を用いた方法を概説する。

1. LTspice のファイル *.asc ファイルと**同じ場所**に、model_NJM4565.lib を置く。
2. LTspice の SPICE Directive ボタンを押し、以下を入力して適当な場所に配置する。

.include model_NJM4565.lib

3. オペアンプの配置は、Component ボタンから行う。ダイアログボックスのパーツリストの右端に [Opamps] というディレクトリがあるので、そこへ移動する。
 4. リストから opamp2 を選択し、配置する。
 5. 配置した opamp2 上で右クリックし、Value 項目を **njm4565_s** とする。
- 以上で、配置した opamp2 は NJM4565DD として動作するはずである。