

第1章

SPICEの基礎

1.1 PSpiceとSPICEの関係

● SPICEの歴史

SPICEは、1970年代初めに米国カリフォルニア大学バークレー校(UCB)において、ICの設計検証を目的としてD.O.Pederson教授と学生たちによって開発された回路シミュレーション・プログラムです。

SPICEという名前は、Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis(集積回路を重要視したシミュレーション・プログラム)から取られました。

組み込まれている回路素子などを使ってシミュレーションしたい回路を入力し、任意のポイントの電圧や電流値を計算することができます。

CANCER, SPICE1, SPICE2(FORTRAN言語), SPICE3(C言語)と開発が続けられ、SPICE2はG6バージョン(1983年), SPICE3はF4バージョン(1993年)で、バークレー版の開発は終了しています。

● PSpiceはSPICEを元に開発されたソフトウェアの一つ

SPICEはパブリック・ドメイン・ソフトウェアとしてソース・コードが公開されました。

1980年代の半ば頃には、SPICE2の最終版であるSPICE2G6のソース・コードをベースに、波形表示機能をはじめとするいろいろな改良が加えられた商用SPICEがさまざまなベンダから発売され始めました。

PSpiceは、パソコン用としては最初の商用SPICEです。

バークレー版SPICEは、最終版でも回路図エディタが付いておらず、コマンド・ライ

ン入力で、ヒューマン・インターフェースの点では使いにくいものでした。コマンド・ライン(またはCUI:キャラクタ・ユーザ・インターフェース)とは、コンピュータに行わせたい作業をキーボードからコマンドとして入力する形式のことです。出力はテキスト・データで、波形グラフもキャラクタ(文字)により表示されます。

回路図の入力は、回路図をネット・リストと呼ばれるテキスト・ファイルの表現にする必要がありました。シミュレーションの設定や実行も適切な文字列を打ち込むようになっていました。

2009年2月現在、市販のSPICEシミュレータの多くは、パークレー版のSPICE2やSPICE3に、以下のような改良と機能拡張を行っています。

- 回路図入力機能を持つ
- 精細で高機能なグラフ出力を持つ
- 素子パラメータを変えて自動的に繰り返し解析できるパラメトリック解析が可能
- 素子のパラメータを統計的に変えて解析するモンテカルロ解析が可能
- アナログ/デジタル混在のシミュレーションが可能
- 機能を数式で表すアナログ・ビヘイビア・モデル(マクロモデル)を使って解析できる

SPICEはアナログ回路シミュレータのデファクト・スタンダードとなっており、60年代後半からの開発を考えると40年以上たった今でも、ICやディスクリート回路の設計に利用され続けています。

1.2 SPICEの基本的な解析機能

SPICEの解析機能の種類

簡単にSPICEで実行できるシミュレーションの種類をまとめておきます。

稿末Appendixの表Aに、「各種SPICEシミュレータで使用できるドット・コマンドのリスト」を載せました。機能ごとに分けてあります。SPICEに対する命令(コマンド)は、端的にシミュレータでできることを示していますので、こちらもあわせて参照してください。なお、以下で示されている図は、すべてPSpiceの例です。

SPICEの標準的な解析

カリフォルニア大学パークレー校で開発されたオリジナルのSPICEの主な解析方法と

第2章

信号源に関するテクニック

SPICEシミュレータで行える解析には、大きくDC解析、AC解析、過渡解析の3種類があります。DC解析で使用する信号源の設定項目は、直流の電圧値または電流値だけです。AC解析で使用する信号源の設定項目は、電圧または電流の振幅と位相だけです。

これらに対し、過渡解析では時間的に変化するあらゆる波形が必要となるので、設定項目も多様です。シミュレータには多くの種類の信号源が用意されています。シミュレーションを的確に行うには、適切な信号源の設定が必要不可欠です。本章の実例を参考に、必要な入力信号を作成してください。

2.1 シミュレーションの目的にあった信号源を選ぶには

SPICEシミュレーションの解析の種類は、大きく分けてDC/AC/過渡解析の三つです。これらの解析に合わせて信号源も適切なものを選ばないと、狙いどおりの解析はできません。それでは、信号源をどのように使い分ければよいのでしょうか？

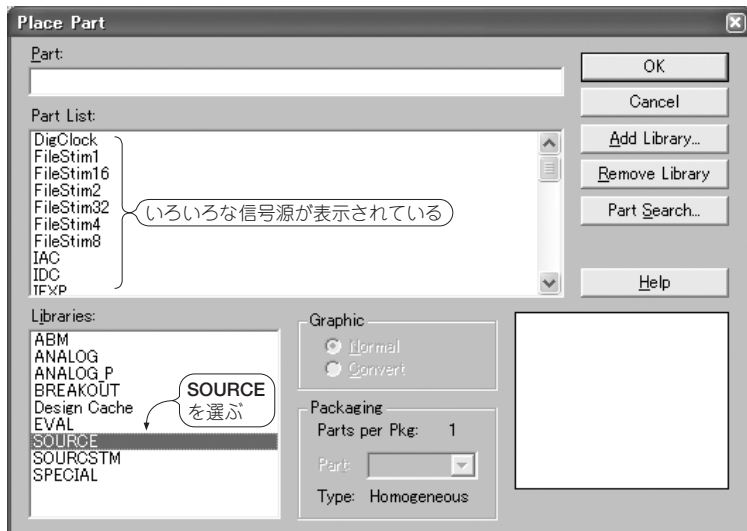
■ 実際の信号源を見る

信号源が入っているライブラリをのぞいてみましょう。適当な回路図を開いてください。[Place]-[Part]をクリックして、図2-1のようにSOURCEライブラリを選択します。

Part Listの欄に、表2-1に示すような信号源がアルファベット順にリストされます。以下の説明では、この表2-1を参考にしてください。

● SPICEシミュレータでは電源と信号源は同じものを使用

現実の世界では、安定化電源とファンクション・ジェネレータは全く別の装置です。



〈図2-1〉 [Place] - [Part] でSOURCEライブラリを選択するといろいろな信号源が現れる

しかし、SPICEシミュレータでは、電源と信号源は本質的に区別されていません。回路を動かすための「電源」や入力波形を発生させるための「信号源」として同じ独立電圧源 V や独立電流源 I を使用します。

表2-1で、例えばアナログ回路用の直流電圧源 VDC がありますが、これは回路全体に電圧を供給する電源としても、DC電圧信号としても使用されます。

● 電源/信号源の原型は電圧源と電流源の二つだけ

表2-1のアナログ回路用の電源/信号源を見てください。 I で始まるものが電流源で14個、 V で始まるものが電圧源で14個あります。

実は、SPICEの電源/信号源は、基本の記述(ステートメント)上は独立電圧源と独立電流源の二つしかありません。14個ずつあって混乱しそうですが、同じ電圧源や電流源の内部設定を変えているだけに過ぎません。その内部の設定には、DC解析の設定、AC解析の設定、過渡解析の設定の3種類の設定があります。これら計28個の電源/信号源は、シンボルを変えて設定を特定の解析用にカスタマイズしてあるということもできます。

第3章

回路素子に関する基礎テクニック

電子回路シミュレータを効率良く使いこなし、信頼できる解析結果を得るためには、モデルについての知識が必要です。SPICE 回路シミュレータにおけるモデルとは、回路素子の特性を定義したものです。部品定数だけの場合もあれば、SPICE のコマンドと各種特性を表すパラメータ値の集まりの場合もあります。独立したモデル・ファイルをユーザが扱う場合は、テキスト・ファイル形式ですので扱いは容易です。PSpice 付属のテキスト・エディタや一般のテキスト・エディタで内容の修正やコピーができます。

本章では、モデルの基礎知識や使い方、そして半導体の基本であるダイオードとバイポーラ・トランジスタのモデルについて少し詳しく解説します。

3.1 SPICE が扱う 3 種類のモデル

■ 取り扱い方と構造から分類する

表3-1に示すのは、SPICE シミュレータ自体に標準で組み込まれているデバイスの種類の一覧です。PSpice 評価版には、24種類のデバイスのタイプがシミュレータ本体に最初から組み込まれています。これら24種類を、モデルとして見た場合の扱い方と構造の違いによって次の3種類に分類します。なお、「組み込み基本モデル」は筆者の造語です。

- (1) 組み込み基本モデル
- (2) デバイス・モデル
- (3) サブサーキット

これら3種類のモデルがどのようなものかを一つずつ説明します。

〈表3-1〉各種SPICEシミュレータに組み込まれているデバイス

種 類	シミュレータ 記号	OrCAD 9.2 Lite Editon (PSpice 評価版)	SIMatrix/SIMPLIS Intro5.0/CQ	Micro - Cap7/CQ
デジタル素子, 入出力	A	Uを使用	○	Uを使用
GaAs FET	B	○	Zを使用	○
任意電源	B	E, Gで代用	○	E, Gで代用
コンデンサ	C	○	○	○
ダイオード	D	○	○	○
電圧制御電圧源 VCVS	E	○	○	○
電流制御電流源 CCCS	F	○	○	○
電圧制御電流源 VCCS	G	○	○	○
電流制御電圧源 CCVS	H	○	○	○
独立電流源	I	○	○	○
JFET	J	○	○	○
インダクタ結合/伝送線路結合	K	○/○	○/-	○/-
インダクタ	L	○	○	○
MOSFET	M	○	○	○
デジタル入力	N	○	Aを使用	○
デジタル出力	O	○	Aを使用	○
有損失伝送線路	O	Tで代用	○	Tで代用
バイポーラ・トランジスタ	Q	○	○	○
抵抗	R	○	○	○
電圧制御スイッチ	S	○	○	○
伝送線路	T	○	○(無損失)	○
デジタル基本部品	U	○	Aを使用	○
デジタル信号源デバイス	U	○	Aを使用	○
一様分布 RC 線路	V	-	-	-
独立電圧源	V	○	○	○
電流制御スイッチ	W	○	○	○
サブサーキット・コール	X	○	○	○
IGBT	Z	○	○	-
GaAs FET	Z	Bを使用	○	Bを使用
MES FET	Z	-	-	-

① 組み込み基本モデル…[表3-1の該当デバイス] C, E, F, G, H, I, K, L, R, S, T, V, W

SPICEシミュレータの回路図エディタ上で素子の回路図シンボルを選んで配置し、このシンボルに定数やパラメータ値を指定するだけで、すぐに解析をスタートできるモデルです。入力する必要があるのは、抵抗値や容量値、インダクタンス値、電圧値、電流値な

第4章

回路素子に関する活用テクニック

本章では、PSpice に外部から入手したモデルを組み込む、オリジナルの素子を作成する、アナログ・ビヘイビア・モデルを使うなど、ワンランク・アップしたシミュレーション素子の活用法を紹介します。

4.1 ウェブから入手したトランジスタ・モデルを使う —— デバイス・モデルの場合

PSpice 評価版には自分の使いたいデバイスのモデルが入っていないことも少なくありません。しかし、あきらめなければ解決方法がないわけではありません。

本節では、トランジスタ (2SC2412K) を例に、デバイス・モデルを入手して PSpice で動作させるまでの手順を説明します。

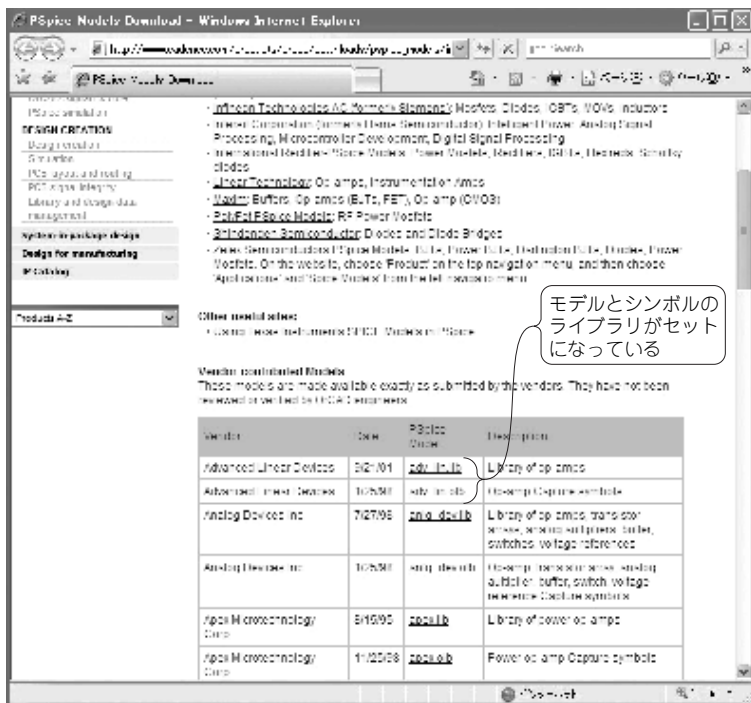
入手したデバイス・モデルは、現在の回路図でのみ使用することをイメージしています。ダウンロードしたモデルを別の回路図でも繰り返し使う場合は、オリジナルのライブラリを作成したほうが便利です。その例は 4.5 節で解説しています。

● モデルの入手方法

▶ 米国ケイデンス・デザイン・システムズ社のウェブ・ページからダウンロード

ケイデンス社 OrCAD 部門のウェブ・ページ⁽³⁾には、図 4-1 のように SPICE モデルを入手できる半導体メーカーや電子部品メーカーのサイトへのリンク、PSpice 専用のモデルとシンボルのセットが用意されています。

ここでダウンロードできるのは、複数の部品のモデルが登録されているモデル・ライブラリと呼ばれるファイルで、拡張子は **lib** です。



〈図4-1〉 OrCADのウェブ・ページからトランジスタやダイオード，OPアンプなどのモデルをダウンロードできる

libとolbファイルをセットでダウンロードすると組み込みが楽になる

このライブラリは，PSpice以外のシミュレータならばモデル・パラメータなどの違いに注意は必要ですが，多くの場合，変更なく使うことができるはずです。

拡張子がlibのファイルと並んで置いてある拡張子がolbのファイルは，PSpice専用の回路図シンボル(PSpiceではパーツと呼ぶ)が登録されているライブラリです。

モデル・ライブラリ(libファイル)とシンボル・ライブラリ(olbファイル)のセットであれば，PSpiceに簡単に組み込むことができます。その方法は，参考文献(1)に解説がありますので，ここでは省略します。

▶ 半導体メーカーのウェブ・ページからダウンロード

半導体や電子部品メーカー各社のウェブ・ページで，SPICEシミュレータに使える部品のモデルを無償で公開している場合があります。

これらのサイトにある部品のモデルはPSpice専用のモデルとは限らず，メーカーや製品

第5章

解析と結果表示の基礎テクニック

本章では、回路シミュレータを使った各種解析方法や、解析結果の表示テクニックの中で、よく使うものや基礎的なものについて解説します。応用的な内容や、複雑な手順が必要なものについては第6章にまとめました。

5.1 回路の直流電圧と電流を知る——バイアス・ポイント解析

DC バイアス・ポイント (DC 動作点) 解析は、第1章の1.2節で述べたように、SPICE 回路解析の最初に必ず行われる解析です。信号が入力され回路がダイナミックに動作している状態ではなく、動作初期の静的なバイアス状態を表示します。解析の利用例を以下に示します。

● DC バイアス・ポイント解析により回路図に電圧と電流を表示する

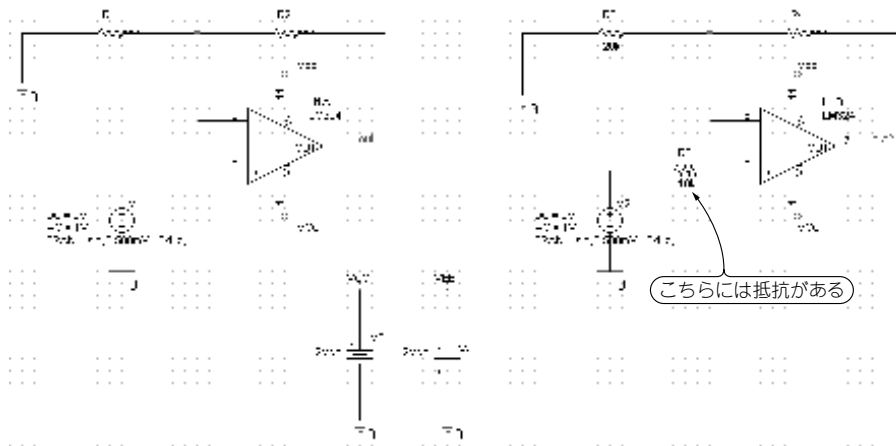
図5-1の回路図を作成します。二つとも OP アンプの非反転増幅回路ですが、右側の回路では非反転入力ピンに R_3 と R_4 の並列抵抗に等しい値の抵抗 R_5 を接続します。

解析は、バイアス・ポイント解析を設定します。[PSpice]-[New Simulation Profile...] で解析設定を作ります。bp などの任意の解析名を付けて [OK] をクリックし、次の設定画面で図5-2のように **Bias Point** を選び、[OK] をクリックします。

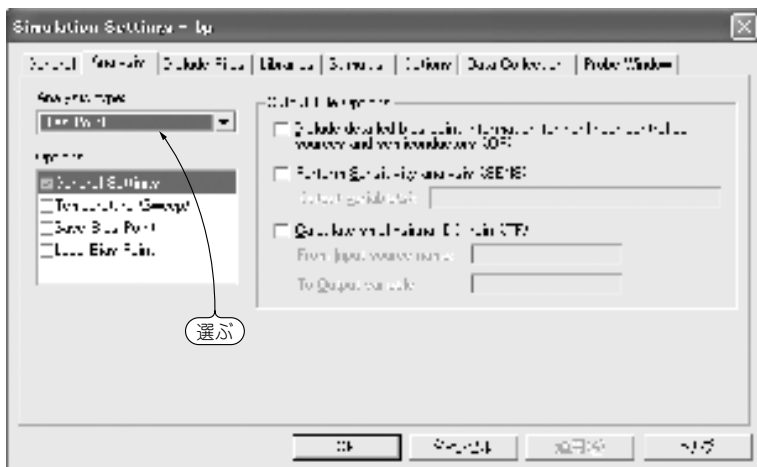
Output File Options のチェック・ボックスは空欄のままかまいません。

メニュー・バーから [PSpice]-[Run] で解析を実行します。解析を実行しても、バイアス・ポイント解析の場合は表示されるグラフはありません。解析を実行した PSpice のウィンドウは閉じます。

回路図に戻り、メニュー・バーから [PSpice]-[Bias Points]-[Enable Bias Voltage



〈図 5-1〉 簡単な OP アンプ回路で直流動作をチェックする
LM324 は PSpice の評価版に含まれている OP アンプ・モデル



〈図 5-2〉 解析設定で Bias Point を選ぶ
メニュー・バーから [PSpice]-[New Simulation Profile] と選び、開いた画面で解析名を bp など適当に付けて [OK] をクリックすると、この画面が出てくる

Display] をクリックするか、ツール・バーの [V] ボタンをクリックすると、回路図中のバイアス電圧が表示されます。さらに、ツール・バーの [I] ボタンもクリックして、電流も表示させた結果を図 5-3 に示します。

第6章

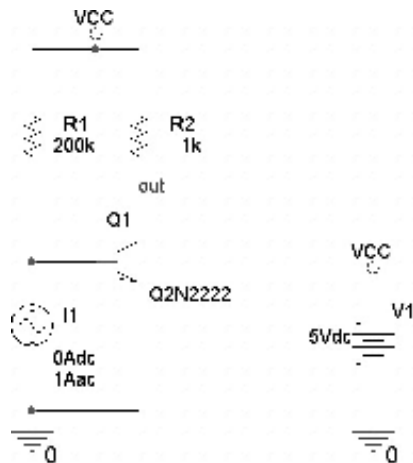
解析と結果表示の活用テクニック

第5章に引き続き、本章では回路シミュレータを使った各種解析の方法や、解析結果の表示テクニックを解説します。本章で解説している内容は、第5章の基礎的な解析方法をマスタしている必要があるものが少なくありません。必要に応じて、第5章も参照してください。

6.1 回路のノイズ特性を知るには——ACノイズ解析

抵抗やトランジスタなど、ほとんどの回路素子は雑音を発生します。PSpiceでは、そのノイズの周波数特性を解析できます。

図6-1のようなトランジスタ1石の電流増幅回路を例に、ノイズ特性を見てみましょう。



〈図6-1〉
簡単な回路を例に雑音特性を
解析してみる

Q1は、EVALライブラリ内のQ2N2222を使用します。

ノイズ解析は、AC解析のオプションとして行われるので、AC電圧源または、図6-1の例のようにAC電流源が必要です。

SPICEモデルでは、抵抗とすべての半導体デバイスがノイズ解析におけるノイズ発生源となります。一方で、SPICEのコンデンサやコイル、電源などのモデルはノイズを発生しません。

SPICEモデルに組み込まれているノイズは、半導体から発生するショット・ノイズ、フリッカ・ノイズ(1/f雑音)、抵抗(半導体内のものも含む)から発生する熱雑音(ジョンソン・ノイズ)の3種類です。

● ノイズ解析の設定と出力ファイルへの出力

メニュー・バーより[PSpice]-[New Simulation Profile]とクリックして、シミュレーション名をnoiseなどとして[create]をクリックします。表示される解析設定画面で、図6-2のように設定します。

最初に、AC解析の設定を行います。次に、Noise AnalysisのEnabledをチェックし、ノイズ解析の設定を行います。

出力ノイズを算出したいノードの電圧変数をOutput Voltageに入力します。V(node1, [node2])という形式で入力してください。



〈図6-2〉ノイズ特性を見るための解析設定の例

第7章

回路図作成のテクニック

本章では、回路図を描くときのテクニックとして、回路図を複数ページにまたがって描く方法や、回路図に表示する独自のシンボルの作り方などを紹介します。

7.1 回路図の配線をスムーズに描くには

回路図に部品を配置して結線をするとき、PSpiceの標準の回路図エディタ Capture は、若干くせがあるように感じます。慣れないと、意図しないところに配線が表示され結線してしまうことがあります。以下に、配線についてのおさらいをしておきたいと思います。

● Capture での配線方法

(1) ワイヤ配線モードにする

メニュー・バーより [Place]-[wire] を選択するか、ツール・パレットからワイヤ・ツール・ボタン(図7-1)を選択します。すると、カーソルが矢印から十字形に変わり、図7-2のようなワイヤ配線モードになります。

(2) 配線の開始

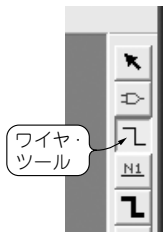
ワイヤの始点でマウスのボタンをクリックします。パーツの場合は、ピンの先端の四角にカーソルを合わせてクリックします。

(3) 移動と方向転換

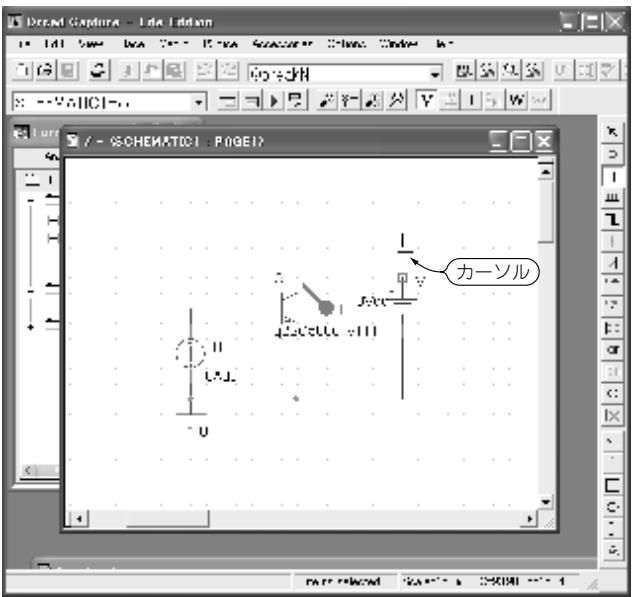
マウスを移動すると、ワイヤが描かれます。方向を90度転換する場合は、マウスの左ボタンを1回クリックしてから向きを変えます。最初の方向転換のみクリック不要です。

(4) 配線の終了

接続する相手側のパーツのピン端でクリックすると、現在の配線が終了します。



〈図7-1〉ワイヤ配線モードに入るワイヤ・ツール・ボタン



〈図7-2〉ワイヤ配線モードはカーソルが十字になっている

配線が続いている状態で別のワイヤ上をクリックすると、二つのワイヤが接続され、その配線は終了します。

(5) 未接続配線の終了方法

何もないところで現在の配線を終わらせるには、終点としたい箇所でダブルクリックするか、または右クリックして現れるポップアップ・メニューから **End Mode** を選択します。ワイヤは選択状態を示すピンク色で表示されます。ワイヤ配線モードは続いているので、十字カーソルのままです。(2)に戻って新たな配線を開始することもできます。

(6) ワイヤ配線モードの終了

ワイヤの配線終了後、右クリックして現れるポップアップ・メニューから **End Mode** を選択するか、Esc キーを押します。これでワイヤ配線モードが完全に終了し、カーソルは矢印に戻ります。

7.2 複数ページの回路図を描くには

一つの回路図を複数ページにまたがって描きたいときの手順を説明します。例えば、回



第8章

PSpiceの数式表記/コマンド/
ステートメント

SPICEは、PSpiceなどの商用SPICEにおいて、それまでのコマンド入力からグラフィカルな回路図入力になりました。しかし、SPICEシミュレータの解析の基本部分が大きく変えられた訳ではないので、内部では従来からのコマンドを処理して動いています。したがって、本章で紹介しているSPICEのコマンドや構文を覚えると、便利なグラフィカル・ユーザ・インターフェースを使ってどのコマンドを設定しているかが見えてきます。一歩進んだ使いこなしのために、本章を参考にしてください。

8.1 数値の表し方

PSpiceシミュレータを活用する場合に欠かせない数値のルールについてまとめます。ここで紹介するルールは、以降の節で紹介しているコマンドや素子のステートメント、対話形式で入力する数値についても適用されます。

シミュレーションがエラーしてしまったり、予想とまったく違った結果であるという場合、単純に数値の記述が間違っていることもよくありますので、注意が必要です。

● 記述例

- 実数表記

12 -44 1.0 6.7 3.14159

- 浮動小数点を使った表記

1E-14 ($= 1.0 \times 10^{-14}$)

2.54E3 ($= 2.54 \times 10^3$)

47e3 ($= 47 \times 10^3$)

- 工学的な表記

2.7k 22pF 10.5mA 1MEGHz

● 記述ルール

- kやmなどの補助記号が使える

表8-1に示したスケール・ファクタが使用できます。数字とスケール・ファクタの間にスペースは入れられません。

- 単位は省略可能

単位記号のV(ボルト), A(アンペア), s(秒), Hz(ヘルツ), ohm(オーム), F(ファラド), H(ヘンリー)などの単位記号は省略可能です。別の言い方をすると、スケール・ファクタの後に文字があっても無視されます。

- 数値の後ろのスケール・ファクタ以外の文字は無視される

数値の後にスケール・ファクタ以外の文字があっても無視されます。したがって、

10 10V 10Volts 10Hz

はすべて同じ数値 10 と解釈されます。そのため、変な話ですが、電流を設定する変数に〇〇Vと入力してもエラーは出ません。

- 大文字と小文字は区別されない

M, mA, msec, mmhosはすべて同じスケール・ファクタのミリ(m)と解釈されます。また、例えば、

1000 1000.0 1000Hz 1e3 1.0e3 1kHz 1K

はすべて同じ数値です。

スケール・ファクタ	読み方	値
f	フェムト	10^{-15}
p	ピコ	10^{-12}
n	ナノ	10^{-9}
u	マイクロ	10^{-6}
m	ミリ	10^{-3}
mil	ミル	25.4×10^{-6}
k	キロ	10^3
Meg	メガ(メグ)	10^6
G	ギガ	10^9
T	テラ	10^{12}

〈表8-1〉
PSpice (SPICE) で使用可能な
スケール・ファクタ