

電子回路教育用としての回路シミュレータの評価

青木博夫*・太田公典**・百瀬成空***

Evaluation of Simulators for the Education of Electronic Circuit

Hiroo AOKI Kiminori OHTA Noritaka MOMOSE

キーワード：シミュレータ，アナログ，デジタル，回路教育

1. はじめに

電子回路シミュレータ，特に SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) は 1970 年代にカリフォルニア大学バークレイ分校で，半導体集積回路の設計用に開発されたソフトウェアである。アナログ回路の設計にあたり，従来のような実験回路を組み測定器を使用する方法に対し，電子回路シミュレータは容易に実験結果を得ることができ，時間・費用ともに大幅な節約が可能となった。さらに昨今ではパソコンの性能が飛躍的に向上したことを背景に，回路設計のツールとしてパソコン用のソフトウェアもそろってきており，企業ではシミュレータを用いた設計・開発が主流となっている。

また電子回路シミュレータは教育・学習の場で使用されている例^{1)~3)}もあるが，後述する Pspice を用いているものが多い。しかしながら回路シミュレータソフトは，数多くの種類のものが市販されている。そこで筆者らは，代表的なソフト 4 本について，解説書^{4)~8)}などを参考にそれぞれの特性（操作性，解析能力，解析の精度，素子の種類，販売価格など）を解析・比較し，実際に教育に用いるのに相応しいソフトを選択し，使用する上で考慮すべき点を検討した。

2. 使用ソフト

- MicroSim Schematics Evaluation Ver.8.0 (略称 PSpice) MicroSim Corporation
- B²SPICE Ver.2 そらコンピュータ・プロダクツ
- Micro-Cap V/CQ 版 CQ 出版社
- Electronics Workbench Interactive Image Technologies Ltd.

* 電気工学科教授

** アルバイン技研㈱

*** 信州大学工学部

原稿受付 2000 年 10 月 30 日

3. シミュレーション

3-1 アナログ回路

アナログでは 1 石固定バイアス増幅回路を用いた。1 石固定バイアス回路を用いた理由は，回路が単純でかつ無帰還回路であるため，トランジスタのモデルパラメータの影響がそのまま現れると予想したからである。増幅回路については，ゲインと位相の周波数特性をシミュレートし，実際に製作した回路の測定結果と比較した。ここで用いたトランジスタは東芝製の 2SC1815 であり，増幅度 β に関しては，実際のトランジスタにおいても値に相当の幅があること，および直接計測することにより得られるパラメータであることから，実際にトランジスタをテスト (MICRONIX 社 MDM-431) を用いて測定して得られた値 154 に統一して使用した。

この 4 つのシミュレータの解析結果を表 1 に示す。Micro-Cap を除いて他の 3 つはほぼ似た値を示した。ここでゲインは中域の値であり，「C あり」または「C なし」とはトランジスタのコレクタ，ベース間に与えたの静電容量の有無のことである。C の値として，オシロスコープのプロープによる静電容量に相当する値約 100pF の値を用いた。ゲインは「C あり」，「C なし」にかかわらず，実測値とかなり近い値を示した。高域遮断周波数については，「C なし」では実際の測定結果とシミュレータの結果との間でかなりの差が見られたが，「C あり」では，実測値と近い値を示した。

各シミュレータ間で出力結果に差が出る原因は，図 1 に示すように，シミュレータに登録されているトランジスタのモデルの違い，および表 2 に示すパラメータ (例として 2N2222) の値の違いにあると考えられる。表中パラメータを表す文字がシミュレータによって異なるものがあるが，これはマニュアルの表現をそのまま用いたからである。この表より Micro-Cap の

表1 固定バイアス回路の解析結果の比較

		ゲイン [dB]	高域遮断周波数[kHz]
実測値		49.5	144
Cあり	Pspice	49.5	159
	B ² SPICE	49.5	162
	Micro-Cap	51.5	81
	Electronics Workbench	50.8	147
Cなし	Pspice	49.5	5957
	B ² SPICE	49.5	5754
	Micro-Cap	51.5	2300
	Electronics Workbench	50.6	5570

表2 トランジスタパラメータの比較 (2N2222)

パラメータ	Pspice		B ² Spice		MicroCap		WorkBench	
	Symbol	Value	Symbol	Value	Symbol	Value	Symbol	Value
pn 接合部飽和電流	Is	1.43E-14	IS	3.06E-14	IS	5.02E-13	Is	1.16E-14
順方向ゲイン係数	Bf	255.9	BF	220	BF	198.855	βf	200
逆方向ゲイン係数	Br	6.092	BR	4	BR	2	βr	4
コレクタオーム性抵抗	Rc	1	RC	0.12	RC	1.01E-06	rc	0.619
BE間ゼロバイアス時接合容量	Cje	2.20E-11	CJE	2.70E-11	CJE	3.93E-11	Ce	1.95E-11
BC間ゼロバイアス時接合容量	Cjc	7.31E-12	CJC	9.12E-12	CJC	3.13E-11	Cc	9.63E-12
BE間接合電位	Vje	0.75	VJE	0.75	VJE	0.7	ϕe	0.75
BC間接合電位	Vjc	0.75	VJC	0.4089	VJC	0.699997	ϕc	0.75
順方向通過時間の理想値	Tf	4.11E-10	TF	3.25E-10	TF	4.94E-10	τF	4.54E-10
逆方向通過時間の理想値	Tr	4.69E-08	TR	1.00E-07	TR	2.15E-07	τR	1.02E-07
BE間接合指数係数	Mje	0.377	MJE	0.33	MJE	0.499227	me	0.333
BC間接合指数係数	Mjc	0.3416	MJC	0.3508	MJC	0.499832	mc	0.333
初期電圧	Vaf	74.03	VAF	104	VAF	100	VA	98.5
BE間漏れ飽和電流	Ise	1.43E-14	ISE	7.50E-15	ISE	1.99E-13	Ise	1.70E-13
BE間漏れ放出係数	Ne	1.307	NE	1.41	NE	1.43741	Ne	2

pn 接合部飽和電流とコレクタオーム性抵抗の値が他の3つより大きく異なっていることがわかる。

3-2 デジタル回路

デジタルでは非同期式 JK-FF10 進カウンタを評価対象とした。これは非同期式だと、デバイスでの遅延時間が結果に明確に現れるからである。またデジタル回路では理論的な結果が分かっているため、実際の回路は作製しなかった。デジタル回路の出力は基本的には0と1の2値なので、アナログほど値に差が見られなかった。しかし波形の立上がりおよび立下りの際に発生する遅れ時間を含めて解析できるか否かでシ

ミュレータの能力に差が見られた。さらに PSpice は HIGH と LOW の2値に加えて、不定値 X、立上がり中、立下り中の3種類の出力も用意されており、デジタル回路の細かい解析、動作の確認ができるので、他のシミュレータと比べてもずば抜けて良いと言える。

4. 性能評価

4-1 評価基準

以下の5つの評価項目に対し、優れている順に4, 3, 2, 1の基本点を与え、さらにその基本点に項目毎に決めた重みを乗じ、その項目における点数をとし

た。なお基本点と重みは筆者らの主観で決めたものである。これらの点数を合計して、最も点数の高かったシミュレータを実用性の高いシミュレータとして選出す

る。重み等については後述する。各項目の最後に示してある数字はその項目につけた点数である。なお文中、P は Pspice, B は B²Spice, M は Micro-Cap, E は

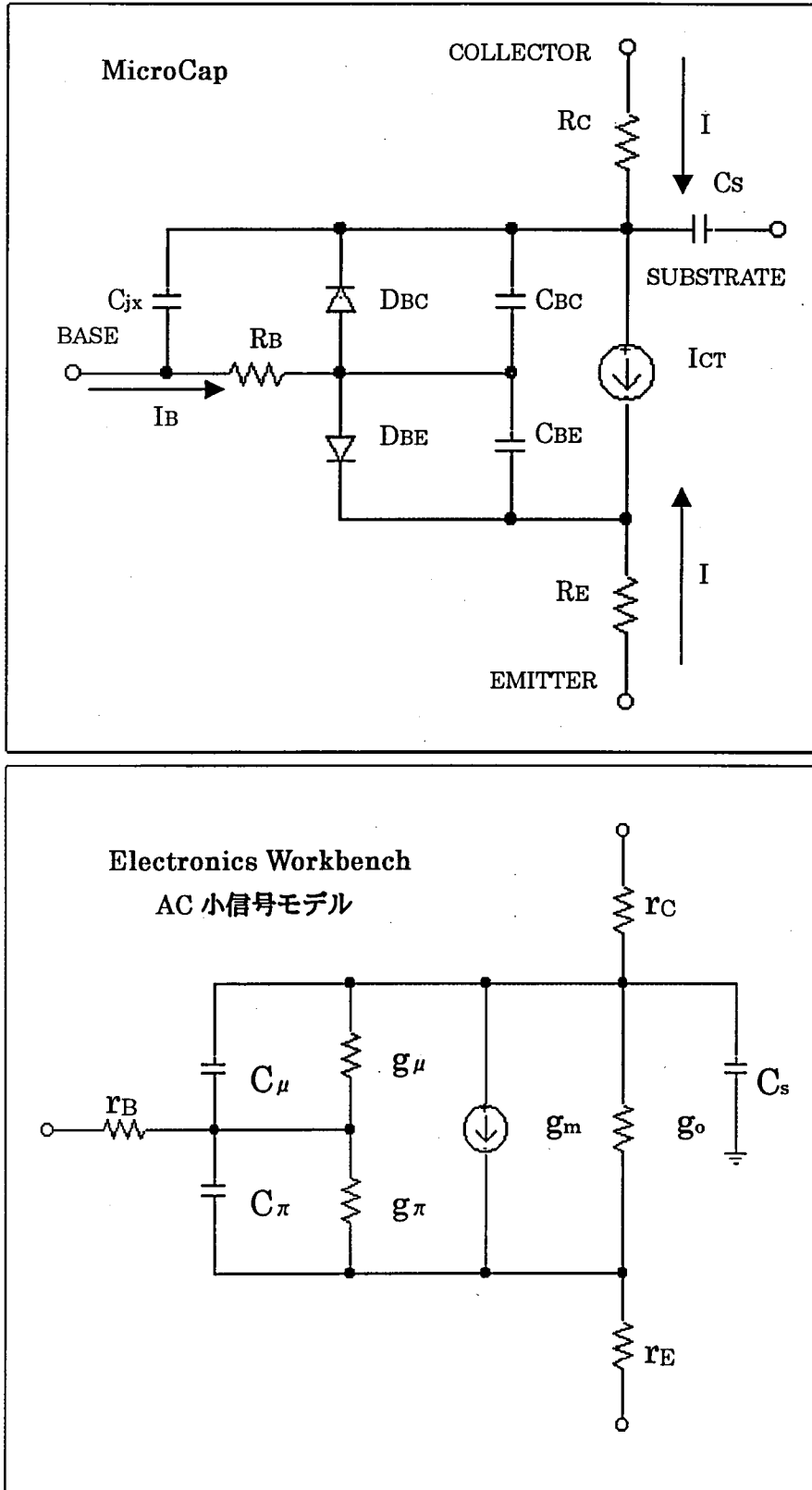


図1 パイポーラトランジスタのモデル

Electronics Workbench の略号である。

4-2 作図

●部品の選び方、置き方(アイコン、部品リスト)

P:アイコンメニューから入る。部品リストは、部品名の羅列で、アイコンなどが用意されていないので、選んだ部品の画像は表示されるが、一つ一つ見ていかなければならない。しかし、部品リスト画面で部品の頭文字を入力すると一覧表の中から目的の部品のところへジャンプできるので、この機能を活用すればいくらかは便利になる。また、よく使うデバイスは10個まで登録され、取り出しやすくなる。また、ミラー回転(鏡に写した様に向きを変える)も可能。(8)

B:右クリックで部品の簡単な一覧が出てくるので、そこから選択できる。ただし、連続入力が不可能で、同じ素子を回路図に置こうとしても、いちいちデバイスの選択画面に入らなくてはならない。また、電圧計や電流計をいちいち回路につなげなくてはならないのが PSpice などよりも面倒である。ミラー回転はできる。(2)

M:全て英語表記なので読めないと苦勞する。配置と同時に抵抗などの値を入力しなければならない。部品の回転もメニューアイコンでできるが、範囲の指定が必要である。部品リストは

Ctrl + 1 ~ 4 キーで表示されるので便利である。Component には、Analog Primitives (受動, 能動, 各種電源など), Analog Library (各種半導体素子), Digital Primitives (論理ゲート各種, FF 各種, DAC, ADC など), Digital library (各種 TTL) があるが、やはり英語表記なのでよく分からない。(4)

E: 全て日本語表示なので分かりやすい。配置したときはそれぞれのデバイスの初期値になっている。配置はメニューアイコンからドラッグする事で行われる。回転も可能だが回転の方向が一方通行であり、ミラー回転(反転)ができない。部品リストは受動, 能動, FET, 制御, ハイブリッド, インジケータ, ゲート, 組合せ, 順次, IC のアイコンで種類が選択可能。(6)

●部品間の結線の仕方

P: 自動的に縦横を合わせた配線をしてくれる。逆に言えば斜めの配線はこのソフトではありえない。また、連続配線も可能。(4)

B: 自動的に縦横は合わせられない。一回部品と線を結んだら、部品または線を移動するときに、それに接続されたものも一緒についてくるので、再接続の必要がない。(3)

M: 配線はドラッグで行い斜めの配線もできる。配線(接続)後、デバイスを移動させても線がついてこない。線もいちいち移動させる必要がある。(1)

E: 接続したい端子間をドラッグすれば自動的に縦横を合わせて結んでくれる。難点は線と線をつなぐとき、いちいち接点を配置しないといけない事である。1つの接点には4本まで接続可能。(2)

●ノード番号の表示

P: 手動で設定すれば表示可能。逆にいえば自動的にやってくれない。設定さえすれば、グラフの解析画面でもそのノード番号が適応される。(4)

B: 表示可能。回路図が変更されればそれに合わせて自動的にノード番号も変更される。(8)

M: 自動的に表示可能。このソフトではノード番号がグラフの解析に必要となる。(8)

E: ノード番号を表示する機能はない(0)

4-3 デバイス設定(振幅・周波数などの設定)

●交流電源

P: 配置してあるデバイスをダブルクリックするだけで設定が可能。直流分, 振幅, 周波数, 位相差のどれもが設定可能。ちなみに, AC 電源のほかに SIN 電源(正弦波を発生させるもの)やパルス電源などといった専用の波形を出すデバイスも用意されている。また, 直・交流波形の選択もできる万能電源も用意されている。(8)

B: 直流か交流かを設定することで, 交流電源にすることができる。配置してあるデバイスをダブルクリックするだけで設定が可能。直流分, 振幅, 周波数, 位相差のどれもが設定可能。難点としては, 1つの設定画面内に AC 解析用と波形観測用それぞれ AC の設定項目があり, それぞれの意味を把握しないで使用をしようとするややこしくなる。(2)

M: 画面右下にあるボタンをクリックすることでテキスト設定画面に入れ, テキスト形式で設定可能。周波数, 振幅, 直流成分, 位相, 信号源抵抗, 指数関数の反復周期, 指数時定数を設定することが可能。しかし, 周波数と振幅のみの変更で十分に使える。(6)

E: ファンクションジェネレータと各種交流電源がある。デバイスをダブルクリックすることで周波数, 電圧, 位相が設定可能。(4)

●デジタル電源の設定

P: オンタイム・オフタイムの設定のできるクロック信号源, 何秒間だけオンにするなどの特殊な信号設定のできるコマンド型信号源, HIGH のみ, LOW のみ等の信号源も用意されていて便利である。(8)

B: (デジタル解析ができない)(0)

M: HIGH, CLEAR の設定は割と簡単だが, CLK の設定は分かりにくいのでサンプル回路からコピーするとよい。(6)

E: CLK はワードジェネレータの CLK を使用する。解析スタートと同時に CLEAR がかかる。HIGH 信号は+5Vを用いる。(4)

●トランジスタ

P: デバイスのリストは海外製のデバイスのデータしかなく, もし日本で使っているデバイスを使おうとするならば, 自分で登録しなくてはならない。登録の手順も複雑で, このシミュレータの大きな弱点になっている。既存のパラメータを変更する事も, 手順が複雑で手間がかかる。(4)

B: このソフトも海外製のデバイスデータしかなく, 日本製デバイスを使う際には, 自分で登録する必要がある。新規登録の手順もあまりにも複雑である。既存のモデルやパラメータの部分変更は, 回路図上のトランジスタをダブルクリックすることで可能である。(4)

M: パラメータの変更はテキスト形式で可能。ライブラリに元々あるモデルは豊富。日本のモデルも入っている。新規登録もテキスト形式で出来るので簡単である。しかし, Micro-Cap 専用のパラメータを使用しているため資料などの値を入力すると誤差が出る。新規登録は初期値が登録されている。(6)

E: 簡単な操作でパラメータの変更は可能。しかもパラメータは日本語表記であるので非常に分かりやすい。ただし日本製のモデルは入っていない。新規登録も可能。(8)

4-4 解析の設定

●解析の種類

P: DC 解析 (入力-出力特性), AC 解析 (周波数特性), 時間特性 (波形の観測) など, さまざまな解析を同時に行うことが可能。また, それぞれの解析を選んだ中で, さらに詳しい設定も行える。ただし全て英語表記でありそれらを理解するまでが大変である。しかしながらそれさえわかっただけで, このソフトの使いやすさが分かるであろう。また, このシミュレータには回路図につけることによって解析の結果が得られるプローブが用意されていて, それらを用いることでさまざまな解析 (プローブをおいたところの電位, デシベル値, 位相など) を簡単に行わせることができる。パラメータの解析も可能。電圧, 電流に限らず, 各素子の値 (コンデンサの容量やコイルのインダクタンス等) でもパラメータを取ることができる。(12)

B: DC 解析, AC 解析, 時間特性などの解析を同時に行うことが可能。詳しい設定も行える点も PSpice にひけを取らない。しかしこれもやはり英語表記であり理解するまでに時間がかかる。パラメータ解析は, DC 解析でのみ可能。すなわち, 周波数特性などのパラメータ表示はできない。また, コンデンサやコイルなどの値をステップさせることもできない。このシミュレータではデジタル回路の解析はできない。もちろん AND や NOT などのゲートも用意されていない。このシミュレータの最大の欠点である。(9)

M: トランジェント解析, AC 解析, DC 解析のどれもが可能である。デジタル回路の解析も可能である。デジタルは, トランジェント解析 (波形の観測モード) で行う。パラメータの解析はできない。(9)

E: 解析の設定はない。解析したい事に合わせて必要な計測器を結線する。接続した計測器次第で解析モードが決まるパラメータ解析はする事ができない。(6)

4-5 解析能力

●実際の回路との比較

P: 中域でのゲイン, 帯域幅, 低域での位相差・ゲインの特性ともに最も実際の回路と近い値を出した。(12)

B: 中域でのゲイン, 低域での周波数・ゲインの特性は実際の回路と近い値を出している。帯域幅については PSpice には少し劣るがそれでも実際の回路とかけ離れているとまでは言えない。(9)

M: 低域でのゲインが落ちている。中域でのゲインも高めである。高域は伸びが足りない。この4つのシミュレータの中では最も実測値とかけ離れている。(3)

E: 中域のゲインはやや高め, 周波数域はほぼ実際の回路に等しい。(6)

この項目の評価は, 実際の回路で起こる現象を考慮に入れて解析をした結果をもとに評価したものである。この点を考慮せずに解析をすると, 実測値とかなり離れた値となってしまう, 上のような評価にはならない。同じ回路状況で比較をする, できるだけ多くのソフトが実測値と近い値を示す回路状況で解析をする, この2点をこの項目の評価する際のポイントとした。

●グラフの設定 (レンジ, 軸, 分割)

P: レンジ幅の設定は, 解析前にも解析後にも設定が可能。もちろんシミュレータに任せてしまう (オート) こともできる。グラフを1画面に複数枚分割して表示することも可能。そして他のシミュレータにない機能として, 1つのグラフに複数のレンジを置くことで, 複数のグラフを同一グラフ上でそれぞれの最適な表示で同時に表示できることである。これは同じレンジで表示すると片方のグラフの値が小さすぎて見えなくなるといった不都合を解消できる, 他のシミュレータと比較して優れた機能である。(8)

B: レンジ幅の設定は解析前でも解析後でも可能である。もちろん初期状態では, 自動でグラフのレンジを設定してくれる。1枚のグラフ画面に複数のグラフを表示させることはできるが, 複数枚のグラフ画面を分割して表示することはできない。(4)

M: グラフ設定画面上で, レンジ範囲やグラフの分割が可能である。1枚のグラフに複数のグラフを表示させる事も, 複数枚のグラフ画面を分割して表示させる事もできる。もちろん解析後でもグラフの追加, グラフ画面の分割といった設定も可能である。(6)

E: グラフ画面での表示はない。オシロスコープ, ボーデプロッタの画面上で解析結果を確認することになる。表示も他のシミュレータと比べて大雑把であり, せっかくの解析能力が活かされていない。オシロスコープやボーデプロッタのレンジ設定は可能である。(2)

●デジタル回路における遅れ時間の表示

P: デジタル解析での状態の表示は HIGH, LOW, X (HIGH と LOW の不定), 立上がり, 立下りの5種類用意されている。これは他のシミュレータと比べて細かい解析ができるという点で優れている面と言えるであろう。(8)

B: デジタル解析はできない (0)

M: 遅れ時間を発生させるデバイスを使用した時のみ表示。しかし遅れ時間のパラメータの設定が分かりにくい。(4)

E: はっきりとした遅れ時間は表示されない。(2)

●グラフの機能(計算, 値の直読, 位相のレンジ幅)

P: 位相の表示が -180 度~+180 度までしか表示されないといったことがない。また, グラフ上でマウスのドラッグにより範囲を指定してやれば, その範囲だけを表示するように拡大もされ便利である。(12)

B: 位相の表示が -180 度~+180 度までしか表示されないため, 180 度を超えると位相が進んでいるのか遅れているのか分からなくなってしまう。また, 位相を使った式を用いると, degree 表示ができず, radian 表示(しかも π 表示がないので, $-6.28 \sim +6.28[\text{rad}]$)しかできず, かなり分かりにくい。(9)

M: 値の直読可能。位相のレンジ幅変更可能。ノード番号を使った簡単な計算式で位相差などのグラフも表示できる。(6)

E: 計算式(位相差)などはグラフ表示出来ない。値の直読は可能。位相も直読可能。(3)

4-6 その他

●印刷

P: グラフも回路図も印刷可能。回路図は自分で印刷範囲を指定してやれば, 用紙サイズにフィットしたサイズで印刷ができる。(3)

B: グラフも回路図も印刷可能。回路図は画面上に表示されているサイズそのまま印刷されるので, 自分で適当な画面サイズに拡大する必要がある。(2)

M: 回路, グラフのそれぞれで印刷可能。クリップボードでコピー可能。(4)

E: 回路, グラフのそれぞれで印刷は可能。しかし拡大縮小ができず。目盛りがないので読みにくい。(1)

●ファイルの構造

P: 回路図のファイル, デバイスのパラメータのファイル(デバイス情報が複数個入って, 「ライブラリーファイル」と呼ぶ), それをシミュレータ本体に登録するときに見えるファイルと, かなりたくさんのファイルの種類から成っている。それゆえに, デバイスのシミュレータへの登録は複雑なものになるのであろう。また, 他のマシンにその回路を持っていくことも難しい。多くあるファイルのどれかひとつでも不都合が生じると動作しないからだ。(1)

B: 回路図のファイルのみがユーザーが難なく扱えるファイルである。デバイスのファイルは作成できなかった。(2)

M: それほど複雑ではない。(3)

E: いたって簡単。(4)

●互換性

P: デバイスのパラメータの情報形式は, 他の PSpice 系のシミュレータにも流用することができる。よって, 本ソフトのデータを他ソフトに流用したとき, ほぼ一致した結果が得られた。(4)

B: PSpice と同様, データのやり取りは可能。PSpice のパラメータをこのソフトに持ってきて解析を行っても, 近い結果が得られた。(4)

M: ファイルのやり取りはできるが, 他のシミュレータに Micro-Cap のパラメータを流用すると結果が大きく変わってしまった。Micro-Cap は独自の等価回路・パラメータを用いているため他のソフトとの互換性は見られない。(2)

E: 他のソフトとの互換性はまったく無い。よってファイルのやり取り(テキスト形式などでも)はできない。もしも他のシミュレータのパラメータを利用したいのなら, 一つ一つ手作業で打ち込んでいくという方法で可能。(1)

●価格

P: 評価版は無料。ただし正規版を購入すると数十万になる。このソフトは評価版と製品版とで使用できる部品点数のは制限があるが, 機能にほとんど差がないため無料である評価版を用いた。(4)

B: 55,000 円 (1)

M: 15,000 円 (3)

E: 47,600 円 (2)

●言語

P: 完全に英語表記である。エラーメッセージもグラフの表題も英語表記なので, 少しでも普段と違う現象が起きるとお手上げといった事になってしまう。(2)

B: これも英語表記である。ただし, グラフのタイトルや凡例などは日本語表記が可能なので, 見やすいグラフを作ることぐらいならできる。(6)

M: 完全に英語表記。エラーメッセージもグラフの表題も英語表記つまりファイルの名前も英語で入力する必要がある。(2)

E: 日本語表記。パラメータなども日本語表記なのでわかりやすい。(8)

●マニュアル

P: 評価版には簡単なものは付属している。正規版を購入することでついてくるのだが, あまりにも高価なため簡単に購入するといったこともできない。このシミュレータ最大の弱点である。ヘルプファイルも英語表記のため, 英語が分からなければお手上げである。

(2)

表3 各シミュレータの性能比較

評価項目		重み	Pspice	B ² Spice	MicroCap	WorkBench
作図	部品の選び方・置き方	2	8	2	4	6
	部品間の結線の仕方	1	4	3	1	2
	ノード番号の表示	2	4	8	8	0
デバイス 設定	用意されているデバイスの数	2	8	4	4	4
	交流電源の設定	2	8	2	6	4
	デジタル信号源の設定	2	8	0	6	4
	トランジスタの設定	2	4	4	6	8
	新規デバイスの登録	2	6	2	4	8
解析の設定	解析の種類	3	12	9	9	6
解析能力	実際の回路との比較	3	12	9	3	6
	グラフの設定	2	8	4	6	2
	デジタル回路における遅れ時間の表示	2	8	0	4	2
	グラフの機能	3	12	9	6	3
その他	印刷	1	3	2	4	1
	ファイルの構造の容易さ	1	1	2	3	4
	パラメータの互換性	1	4	4	2	1
	価格	1	4	1	3	2
	言語	2	2	6	2	8
	マニュアル	2	2	4	6	8
合計点			118	75	87	79

B: 日本語マニュアルが付いている。ただし素子にどんな等価回路を用いているかといった情報までは載っていない。ヘルプファイルは英語表記であった。

(4)

M: 日本語マニュアルが付いている。素子一つ一つに細かな説明がついている。しかしパラメータの設定は分かりにくい。トランジスタの等価回路も記述されている。ヘルプファイルは英語表記であった。(6)

4-7 集計表

点数を一覧にまとめ、シミュレータの性能を比較したのが表3である。「解析の種類」「実際の回路との比較」「グラフの機能」の3項目を、最もシミュレータにおいて重要な要素であると考えて重みを3にしてある。また、0点のついている項目は、その項目の評価が不可能であることを表している。B²Spiceにはデジタル解析をする機能がないため、それに関する項目には点数がつけられない、というわけである。また、Electronics Workbenchにはノード番号を表示する機能がないため、この項目も0点である。

「実際の回路との比較」の項目は、1石固定バイアス回路に静電容量を付加した状態で解析を行った結果を

評価の対象とした。この回路においては、中域でのゲインと高域遮断周波数に注目した。優劣を付け難いために、同じ点数を付けたといった特例もある。

ここで問題は、評価を行ったのが実験者の3人だけであるということから、主観的に評価している恐れが多分にあり得るということである。しかし、最も優れたものを1つ選択するというのであれば、Pspiceが他の3つに比べて大きく点差をつけていることから、Pspiceの優位性は確立したものと考えられる。

5. おわりに

以上の解析結果より、一口に回路シミュレータと言っても、操作性を始めそれぞれ特徴を有することが分かった。回路シミュレータは、元々企業などでの回路設計用に開発されたものであるが、電気電子回路の現象の解析能力が高いので、これを用いて回路教育に適用することは大いに有益であると考えられる。しかし学習に用いるには、シミュレータの操作法に関する知識や応用力を多分に要求されるため、いきなり自学自習で使いこなそうとしてもうまくいかないであろう。操作法やそれぞれの項目で必要な解析の仕方を指導してやるこ

とで、座学や実際の回路実験よりも効率よく理解することができると考えられる。今後は、どの電気電子系のカリキュラムに、回路シミュレータが適用できるか見極め、それに応じた教材の開発を行っていきたい。

参考文献

- 1) 黒田 徹：「はじめてのトランジスタ回路設計」，CQ 出版社 (1999)
- 2) JOHN KEOWN 著 町 好雄 監訳：「SPICE による電子回路設計 回路シミュレータ PSpice 入門」，東京電機大学出版局 (1998)
- 3) 波方 肇：「SPICE による電子回路シミュレーション」，新潟職業能力開発短期大学校 HP 内 (URL：<http://cmos.niigata-pc.ac.jp/~namikata/>)
- 4) Jon A.Engelbert, 著 佐藤 悟 訳：「B²SPICE Ver.2 日本語マニュアル」，Beige Bag Software そらコンピュータ・プロダクツ (1998)
- 5) 「Micro-Cap V/CQ 版取扱説明書」，CQ 出版社 (1999)
- 6) 角 和夫, 井上 敦, 佐藤 勝：「特集 電子回路シミュレータ活用マニュアル」，トランジスタ技術 SPECIAL No.56 CQ 出版社 (1996)
- 7) 増山文夫：「特集 電子回路シミュレータの本格活用法」，トランジスタ技術 SPECIAL No.62 CQ 出版社 (1998)
- 8) 「Electronics Workbench ユーザーズガイド」，Interactive Image Technologies (1995)