

Introduction

Intro 5.0/CQ でできる解析のいろいろ

～20石以上のトランジスタ・アンプやスイッチング電源も高速解析～

注意1

本書では、とくに断らない限り、評価版シミュレータ SIMetrix/SIMPLIS Intro 5.0/CQ を Intro 5.0/CQ、SIMetrix/SIMPLIS Intro 4.5b を Intro 4.5b と呼びます。また、Intro 5.0/CQ の SIMetrix 部を SIMetrix 5.0/CQ、SIMPLIS 部を SIMPLIS 5.0/CQ と呼びます。Intro 4.5b の SIMetrix 部を SIMetrix 4.5b、そして SIMPLIS 部を SIMPLIS 4.5b と呼びます。

注意2

付属 CD-ROM には、Intro 5.0/CQ と Intro 4.5b の二つの評価版シミュレータが収録されていますが、4.5b のアップ・バージョンである Intro 5.0/CQ のインストールをお勧めします。

Intro 4.5b を収録したのには、次の二つの理由があります。

- (1) 本書の制作期間中に、SIMetrix/SIMPLIS Intro(評価版)のバージョンが 4.5b から 5.0 に上がり、デバイス・モデルの大幅追加や真空管シンボルの追加などが行われて、CQ 版である Intro 5.0/CQ が完成しました。この関係で**本書の解説の多くは Intro 4.5b を使用しています**。Intro 4.5b と Intro 5.0/CQ の違いは 1.4 節の説明のとおりです。
- (2) 1.4 節(p.48)に説明があるとおり、Windows 95/98/Me をお使いの方は、Intro 5.0/CQ を利用することができません。1.4 節の違いを理解したうえで、SIMetrix/SIMPLIS の評価版を使用したいという方のために Intro 4.5b を収録しました。解析エンジンや解析できる回路の規模などは同じです。第 8 章を参照すれば、デバイス・モデルも拡充することが可能ですから、Intro 5.0/CQ と同等の解析を行うことが可能です。

付属 CD-ROM に収録されている Intro 5.0/CQ の特徴

シミュレーションできる回路規模が大きい

一般に評価版シミュレータは回路規模制限があります。

制限が比較的緩い PSpice や Micro-Cap でも、使用できるバイポーラ・トランジスタ (BJT) は、

- ・ PSpice ver. 9.2 評価版(OrCAD Family Release 9.2 Lite Edition): 10 個
- ・ Micro-Cap ver.7 評価版 : 約 20 個

です。

SIMatrix 5.0/CQ で使える BJT は公式には 18 個ですが、実際には 20 数個使えます。例えば、図 1 に示す拙著「解析 OP アンプ & トランジスタ活用」p.133 の超低ひずみ率アンプ (BJT 20 個 + JFET 2 個 + ダイオード 13 個 + 抵抗 32 個 + コンデンサ 6 個 + ポテンショメータ 1 個 + 電圧源 3 個) の回路をそのままシミュレーションできます。

JFET も公式には 29 個に制限されますが、実際は最大 50 数個使えます。

アナログ・ノード数は以下の制限があります。

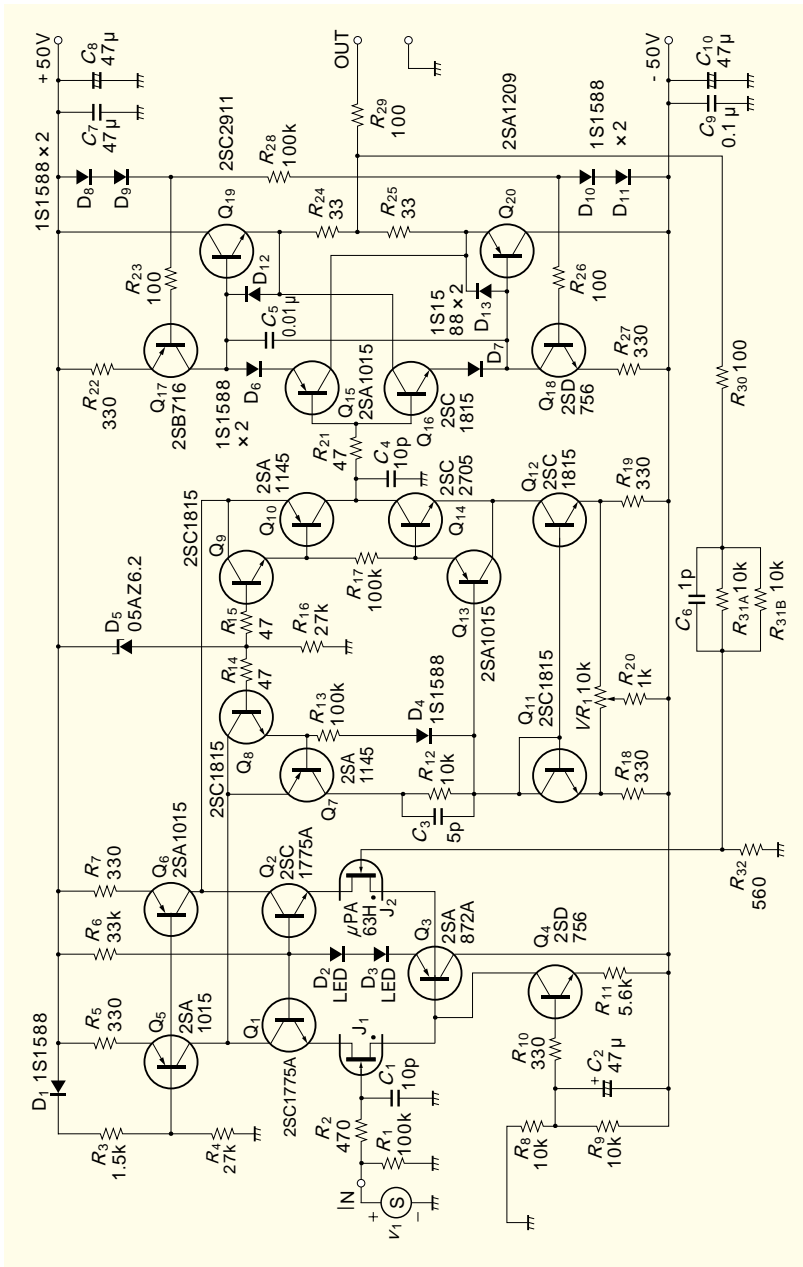
- ・ SIMatrix 5.0/CQ..... 120 個
- ・ PSpice ver.9.2 評価版 64 個
- ・ Micro-Cap ver.7 評価版..... 約 100 個

使用できる OP アンプの数は、OP アンプのサブ・サーキット・モデルの回路規模に左右されます。標準的な汎用 OP アンプ (TL071, LF353, LF411 など) ならば、PSpice ver.9.2 評価版は 2 ~ 3 個です。Micro-Cap ver.7 評価版も 2 ~ 3 個です。SIMatrix 5.0/CQ は 3 ~ 4 個です。

SIMatrix 5.0/CQ はアナログ・ビヘイビア・モデルが使えるので、規模制限を超える複雑な回路でも、適当なアナログ・ビヘイビア・モデルに置き換えればシミュレーション可能です。

SIMatrix 5.0/CQ は、信号源 (電圧源および電流源) の数に制限がありません。アナログ回路には BJT や FET の定電流回路がよく使用されますが、これを電流源に置き換えれば実質的に規模制限を緩くできます。ツェナー・ダイオードも、電圧源に置き換えれば同様のメリットがあります。

図1 (1) 付属CD-ROMに収録されているIntro 5.0/CQは20石以上のトランジスタ・アンプも解析できる
 [1] 解析 OPアンプ&トランジスタ活用(CQ出版)から抜粋]



解析可能な回路やデバイスの種類が多い

SIMetrix 5.0/CQは、アナログ回路 デジタル回路 デジタル・アナログ混載回路の解析ができます。

そして、これらの回路図を描くためのデバイス・シンボル(回路図記号)が170種類あります。これは製品版の340種類より少ないですが、PSpice評価版やMicro-Cap評価版にひけをとりません。

CQ出版発行の棚木義則編著「電子回路シミュレータPSpice入門編」や拙著「はじめてのトランジスタ回路設計」に掲載の全回路を描画して解析でき、遠坂俊昭編著「電子回路シミュレータSPICE実践編」に掲載の回路も数例を除き描画、解析できます。

付属CD-ROMには、本書掲載回路の回路図ファイルとともに、上記3冊の掲載回路をSIMetrix 5.0/CQで書き直した回路図ファイルも収録しています。

SIMetrix 5.0/CQは、シンボル・エディタの使用が許されているので、シンボルの自作も可能です。

利用できるデバイス・モデルが多い

シミュレーションするためには、回路シミュレータにデバイス・モデルを組み込む必要があります。回路シミュレータが優秀でも、デバイス・モデルがなければ絵に描いた餅です。

付属CD-ROMに収録の二つのシミュレータIntro 4.5bとIntro 5.0/CQのうち、前者に組み込まれたデバイス・モデルは貧弱です。しかし、後者に組み込まれたデバイス・モデルはとて多く、OPアンプ約850種類、NチャネルMOSFET約1100種類、PチャネルMOSFET約250種類などを含みます。

これらは半導体メーカ提供の純正モデルです。BJTも約1900種類あります。ただし、国産BJTはありません。また、多数の国産BJTのデバイス・モデルが組み込まれた評価版シミュレータも存在しますが、そのモデル・パラメータの値は必ずしも適正ではありません。

付属CD-ROMには、「回路シミュレータPSpice入門編」のモデル・ライブラリtoragi.libと国産定番トランジスタの自作モデル・ライブラリtk.libを収録しました。

自作やウェブサイトから入手したデバイス・モデルは、ユーザ自身が回路図のシンボルと結合しなければなりません。他社の回路シミュレータは、この結合方法が複雑で手間がかかりますが、SIMetrix 5.0/CQはドラッグ&ドロップするだけで結合できます。そのため、ウェブサイトで大量に公開されているPSpice形式やHSPICE形式のデバイス・モデル

ルを簡単に取り込めます。私は5000種類以上のデバイス・モデルを組み込んで利用しています。

真空管のシンボルが用意されている

半導体全盛の今日でも依然として真空管アンプは人気があるようです。

意外に思われるかもしれませんが、真空管アンプにも多量の負帰還をかけることができます。何を隠そう、負帰還は真空管アンプのひずみ率を劇的に改善する目的で、H. S. Blackが1927年に考案した技術です。そして、負帰還の安定性を考察できる「周波数応答法」はトランジスタが発明される以前の1930年代にもう確立しています。当今は、そのような理論を軽視した真空管アンプが幅を利かせていますが、回路シミュレータは真空管アンプの負帰還設計や動作解析にも活用できます。

付属CD-ROMに収録されているIntro 5.0/CQには真空管やトランスのシンボルが用意されているので真空管アンプのシミュレーションができます。Intro 4.5bの真空管シンボルは「ヒータつき三極管」だけですが、Intro 5.0/CQには「ヒータなし二極管」「ヒータなし三極管」「ヒータなし四極/五極管」のシンボルが追加されました。

真空管のデバイス・モデルはシミュレータに組み込まれていません。中林歩氏およびMr. Norman Korenのご厚意により、その真空管モデルを本書付属のCD-ROMに収録させていただきました。ウェブサイト上で真空管のデバイス・モデルが多数公開されています。とりわけ中林氏の作成された真空管モデルの精度は傑出しています。

解析事例のいろいろ

ここで、付属CD-ROMに収録されているIntro 5.0/CQでどんなことができるのか、実例をいくつか紹介しましょう。

SIMetrix と SIMPLIS の特質

Intro 5.0/CQ(SIMetrix/SIMPLIS Intro 5.0/CQ)は、SIMetrix 評価版(SIMetrix 5.0/CQ)とSIMPLIS 評価版(SIMPLIS 5.0/CQ)という二つの電子回路シミュレータを組み合わせたものです。

SIMetrixは、アナログ回路やデジタル回路を解析できる汎用のSPICEシミュレータです。その点ではPSpiceなどと同じなのですが、高速で収束性が良いので、PSpiceなど

の一般的なSPICEシミュレータが苦手とするスイッチング回路(スイッチング電源, D級アンプ, スイッチト・キャパシタ・フィルタ, 変調器など)も短時間で解析し, 結果を表示してくれます。

SIMPLISはスイッチング電源回路などを解析するときに使うシミュレータです。SIMetrixとSIMPLISはまったく別のシミュレータですが, 回路図エディタを共有しており, 2種類のシミュレータを切り替えながらシミュレーションできます。

ほとんどの回路はSIMetrixで解析できるので, 本書では, とくに断らないかぎり, SIMetrix 5.0/CQを使ったシミュレーション方法を紹介します。

発振回路の過渡解析例 オシロスコープで波形を見るような感覚

図2に示すのは, SIMetrix 5.0/CQの回路図エディタで描いた正弦波発振回路です。接合型FETの2SK30ATM(Y)とバイポーラ・トランジスタ2SC1815を使っています。発振波形の振幅は R_7 の値によって大きく変わります。

回路図に電圧プローブを配置して過渡解析を実行(Run)すると, あたかもオシロスコー

図2 2SK30ATM(東芝)と2SC1815(東芝)を使った正弦波発振回路(ツインT型)
発振周波数は1kHzで設計している

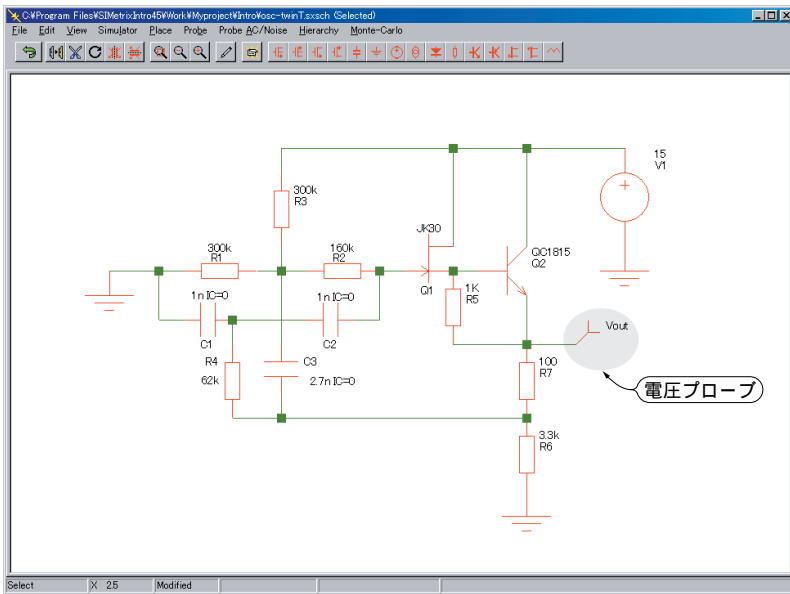
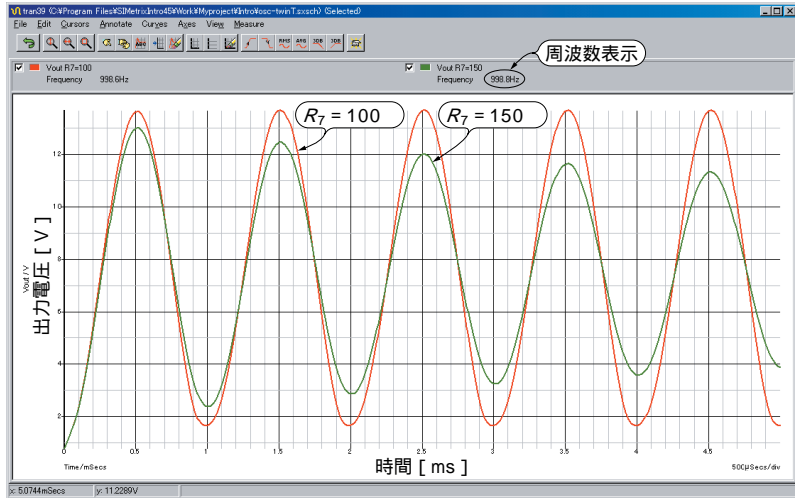


図3 図2の回路の出力電圧波形

表示波形の周波数も表示される



ブで波形を見るかのように、解析結果のグラフ(図3)が表示されます。グラフの縦軸スケールは自動調整されています。スケールを変更したり、発振周波数を表示することもできます。

図3に示すのは、過渡解析においてマルチステップ解析を実行し、 R_7 の値を100と150に切り換えたときの出力電圧波形です。 R_7 を150にすると発振波の振幅が指数関数的に減少しゼロに収束します。オシロスコープで実際の出力波形を観測しても振幅減少の経過は捉えにくいのですが、シミュレーションは図3のように経過がよくわかります。

増幅器のAC解析例 周波数特性のシミュレーション

SIMetrix 5.0/CQにはシミュレーションできる回路規模に制限がありますが、その制限は緩く、トランジスタは20個も使えます(PSpice評価版は最大10個)。

図4に示すのは、トランジスタを18個以上使った増幅回路です⁽¹⁾。 C_2 は発振を防ぐための位相補償容量です。

図5は、 C_2 の値を2p~10pFまで2pF刻みで変えたときの周波数特性をAC解析とマルチステップ解析でシミュレーションしたものです。

図4は電圧増幅アンプですが、もちろんパワー・アンプのシミュレーションもできます。

図4(1) 18石のトランジスタ・アンプ

個別部品で製作した高速、高出力、広帯域、低ひずみ率アンプ

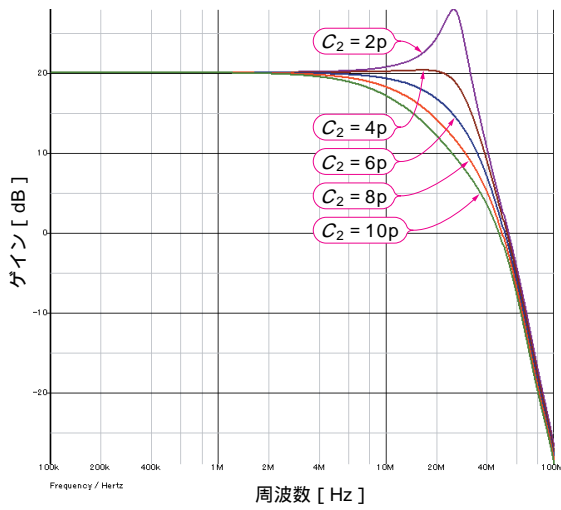
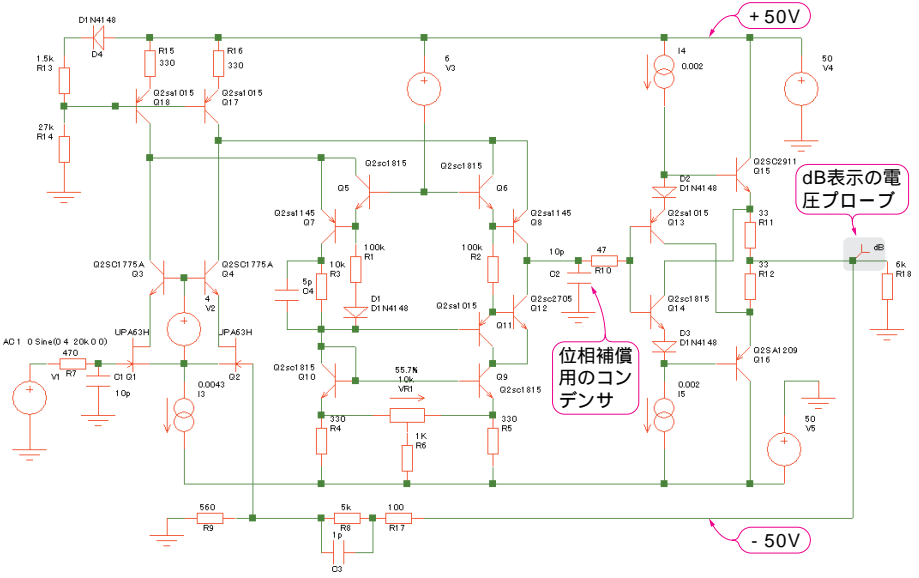


図5 図4の回路の入出力ゲインの周波数特性が表示される
 C_2 を変化させたときの周波数特性を表示している

パワー・アンプは、発振すると出力段の(バイポーラ)トランジスタを破壊することがあります。SPICE を利用できなかった昔は、不適当な位相補償で発振を招き、高価なパワー・トランジスタをよく壊したものです。

フーリエ解析の例 波形に含まれる周波数成分解析

図4に示したアンプの出力電圧のフーリエ解析結果を図6に示します。カーソル機能により基本波(20kHz)の片ピーク振幅は40.42V、第2次高調波成分は45.21μVと読み取れます。したがって第2次高調波ひずみ率 D_2 は0.000111%です。第3次高調波ひずみ率 D_3 は0.000110%です。2次と3次を合わせた高調波ひずみ率 D は、

$$D = \sqrt{D_2^2 + D_3^2} = 0.000157\%$$

と算出されます。実測の高調波ひずみ率は0.00017%です⁽²⁾。シミュレーション結果は実際と良く合っています。

図6 図4のアンプの出力電圧波形に含まれる高周波成分が表示される
ひずみ率解析に有効である

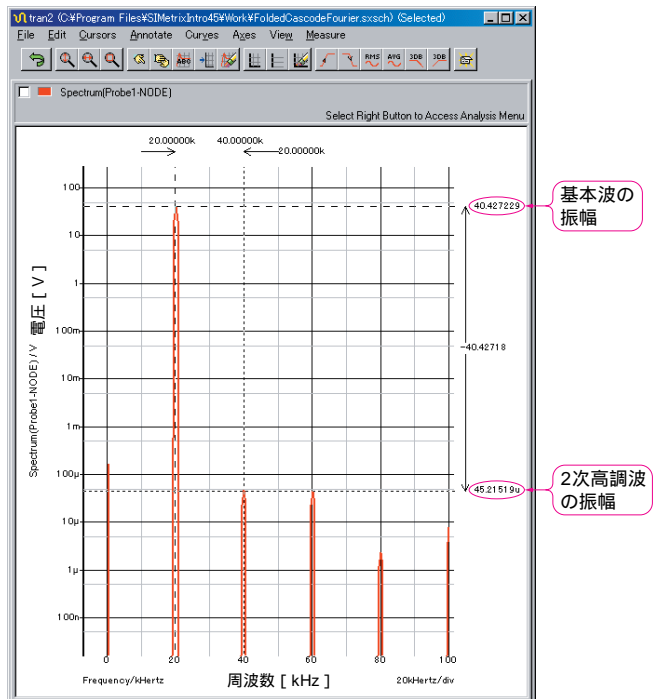
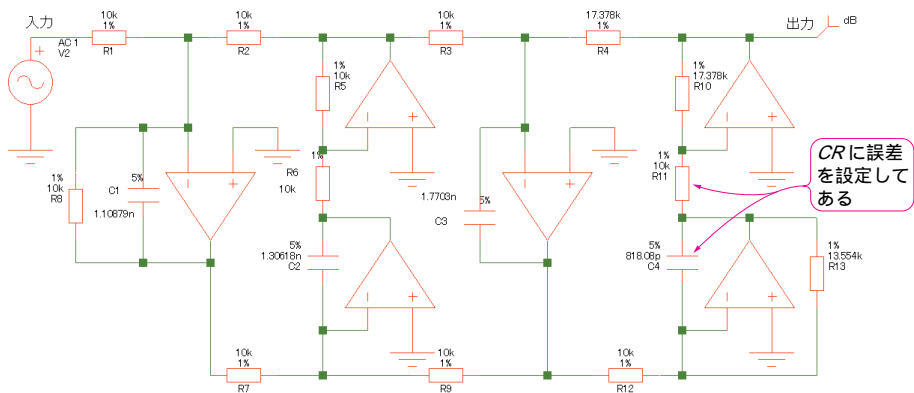


図7 抵抗やコンデンサの値をばらつかせて周波数特性の変動幅を調べることができる

4次のリープフログ型ロー・パス・フィルタのシミュレーション。チェビシェフ特性，通過帯域DC ~ 15.92 kHz，通過帯リプル0.1 dBで設計している



モンテカルロ解析例 素子値ばらつきが回路の特性に与える影響を調べる

図7は，4次チェビシェフ特性のリープフログ leapfrog 型ロー・パス・フィルタです⁽³⁾

(4) . 設計の通過域は0 ~ 15.92 kHz，設計の通過域リプルは0.1 dBです .

実際のCやRの値は必ず誤差があります . モンテカルロ解析は，この素子値の誤差が回路全体の特性(周波数特性など)をどのように変化させるかをシミュレーションします . 各抵抗の誤差を $\pm 1\%$ ，各コンデンサの誤差を $\pm 5\%$ として周波数特性をモンテカルロ解析すると，図8のグラフが得られます .

図8の縦軸のスケールは，上のグラフが0.1 dB/div.，下のグラフが10 dB/div.です . 素子値の誤差によりゲインが変動していますが，各曲線のリプルは設計値(0.1 dB)とほぼ同じです . リープフログ型フィルタは，LCフィルタを模擬しているので，周波数特性が素子値のばらつきの影響を受け難いのです .

数式で動作を定義した部品「ビヘイビア・モデル」を使う

図9に示すのは，アナログ乗除算器をビヘイビア・モデルで表わしたRMS-DC変換回路(真の実効値電圧計)です . ビヘイビア・モデルとは，回路の入出力の関係を表わしたものです . ビヘイビア・モデルはユーザが定義できます .

図9では，乗除算器のビヘイビア・モデルを次のように定義しています .

$$V_{out} = V(N1) * V(N2) / V(N3)$$

図8 図7の回路の周波数特性

部品の誤差によるばらつきの影響が解析され表示される

縦軸目盛り
0.1dB/div.

縦軸目盛り
10dB/div.

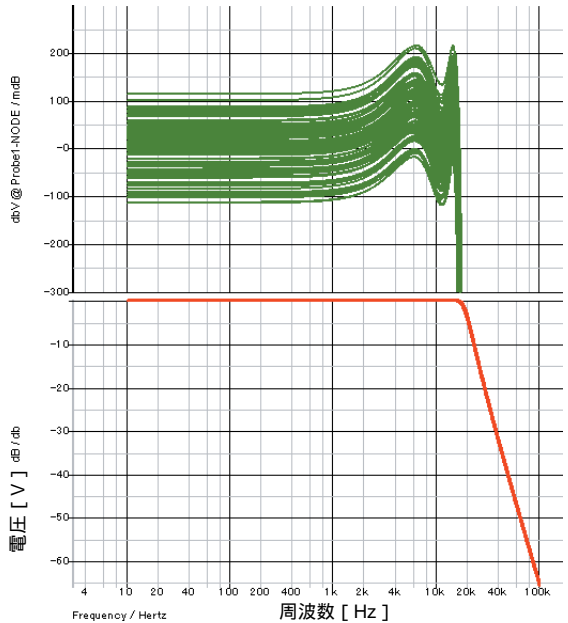
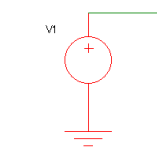


図9 真の実効値電圧計のシミュレーション

ビヘイビア・モデル(動作を数式によって表した部品)を使っている

周波数: 1kHz
振幅: 1/2/3/4V_{RMS}

Sine (0 {1.414*amp} 1k 0 0)



部品の特性を数式を使って表現してある
これをビヘイビア・モデルと呼ぶ

10μF,
初期電圧
= +1mV

ただし, V_{out} : 乗除算器の出力電圧

乗除算器の出力電圧をRCロー・パス・フィルタで平滑してDC電圧を抽出し,それを乗除算器の入力端子N3にフィードバックします.入力電圧を V_1 ,ロー・パス・フィルタの出力DC電圧を DC_{out} とすると,

$$DC_{out} = \sqrt{V_1^2}$$

または,

$$DC_{out} = -\sqrt{V_1^2}$$

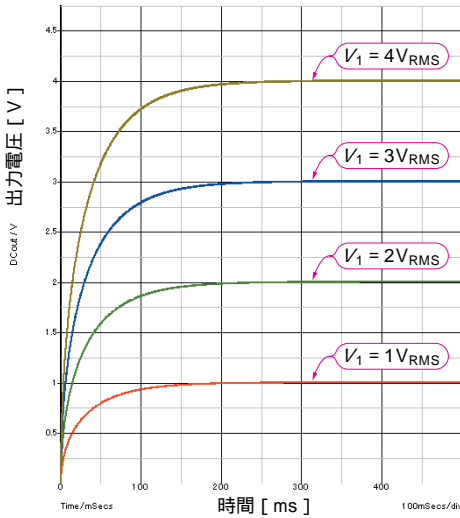


図10 図9の回路の入力電圧 (V_1)を変えながら出力電圧の時間変化を解析し表示させたところ出力の DC_{out} を表示している．入力電圧のRMS値に等しいDC電圧に収束するのがわかる

が成り立ちます．すなわち DC_{out} は V_1 の実効値電圧です．シミュレーションしてみましょう．

V_1 を 1 kHz の正弦波として，マルチステップ解析で V_1 の振幅を $1/2/3/4 V_{RMS}$ に設定し過渡解析を実行すると，図10のグラフが表示されます． DC_{out} が $1/2/3/4 V_{DC}$ に収束しているのがわかります．なお， DC_{out} が負になるのを防ぐため， C_2 に正の初期電圧を与える必要があります．初期電圧の値を $+1 \text{ mV}$ にしていますが，正符号の任意の値でOKです．

SPICE系シミュレータが苦手なスイッチング電源のシミュレーション

図11に示すのは，入力電圧 $V_3 = 36 \text{ V}$ を出力電圧 $V_{out} = 48 \text{ V}$ に昇圧するDC-DCコンバータです．この回路はIntro 5.0/CQに付属する100種類あまりのサンプル回路の一つです（ファイル名：Startup.sxsch）．

$L_1 = 200 \mu\text{H}$ に接続されたパワー MOSFET (インターナショナル・レクティファイアー社のIRF530) をON/OFFさせ，そのデューティ比をUC3842 (テキサス・インスツルメンツ社のPWMコントローラIC) で制御し，出力電圧を安定化します．

図11の回路は，SIMPLIS 5.0/CQとSIMetrix 5.0/CQの両方でシミュレーションできます．どちらのシミュレータを使っても解析結果はほとんど同じです．SIMPLIS 5.0/CQに

図 11 昇圧型DC-DCコンバータのシミュレーション

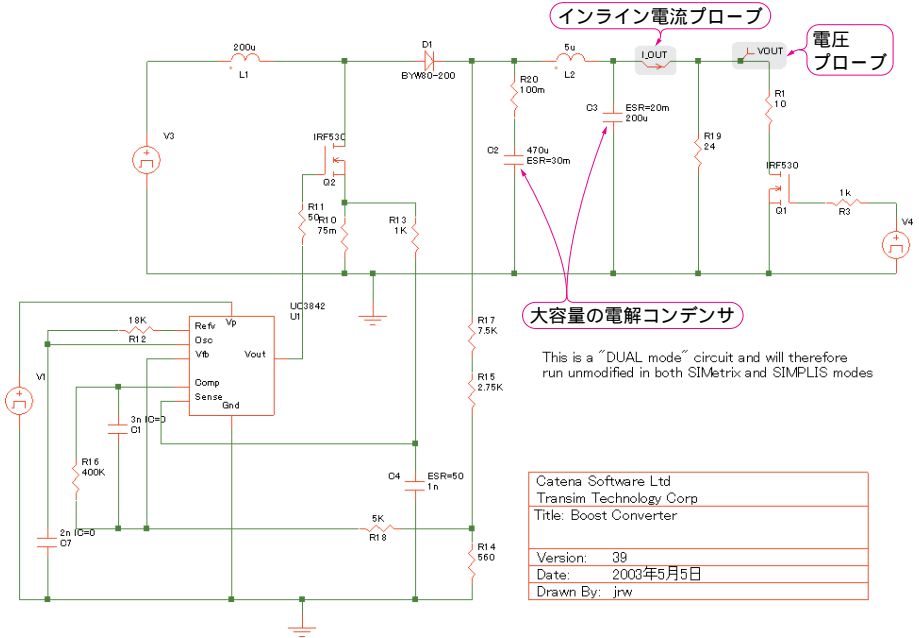
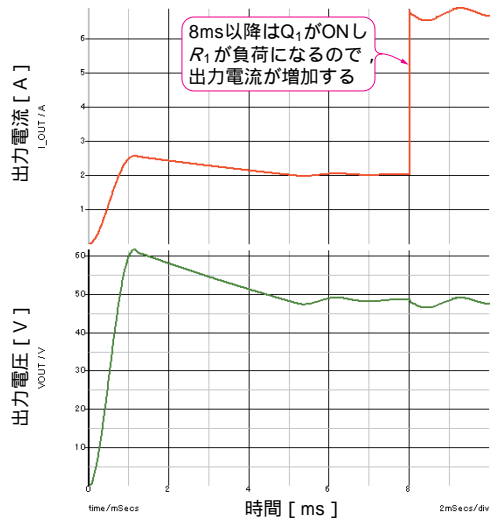


図 12 図 11 の回路を SIMPLIS で過渡解析した結果 (解析に要する時間はほんの数秒)



よる過渡解析結果を図 12 に示します。解析に要する時間は SIMPLIS 5.0/CQ が数秒、SIMetrix 5.0/CQ は数分です。

SIMetrix は、SPICE シミュレータの中でトップ・クラスの高速度性を誇りますが、それでもスイッチング回路のシミュレーションはかなり長い時間を要します。SPICE の過渡解析は、非線形方程式をニュートン法という繰り返し計算(逐次近似)で解くため、どうしても遅くなります。

SIMPLIS(SIMulation for Piecewise-Linear System, 区分解線形システムに向くシミュレーション)は、指数関数などの非線形関数を折れ線近似で線形関数の集合に変換し、線形方程式を解くので計算回数が少なく、解がすぐに収束します。その結果 SIMPLIS は、SIMetrix に比べて 10 ~ 50 倍高速です。

ただし、SIMPLIS は解析の種類が少なく、そして精度は少し劣ります。私は、通常 SIMetrix で解析し、スイッチング電源回路などのシミュレーションで補完的に SIMPLIS を使っています。

SPICE 系シミュレータが苦手なスイッチト・キャパシタ・フィルタのシミュレーション
モノリシック IC は高精度の抵抗を作り込むのが難しいので、昔はモノリシック IC で高精度フィルタを実現するのは不可能でした。しかし現在は、MOS 容量と MOS トランジスタを組み合わせた「スイッチト・キャパシタ回路」で高精度フィルタを作ることができます。

図 13 は、2 次バターワース特性ロー・パス・フィルタを実現したスイッチト・キャパシタ・フィルタです。S1 ~ S8 は $R_{on} = 1\text{k}$, $R_{off} = 1\text{G}$ のアナログ・スイッチです。抵抗は一つもありません。

マルチステップ解析で入力信号 V_1 の周波数を 5 kHz / 15.92 kHz / 50 kHz に設定したときの、出力電圧 V_{out} の過渡解析結果を図 14 に示します。-3 dB カットオフ周波数 15.92 kHz のロー・パス・フィルタになっていることがわかります。

FM 復調回路のシミュレーション

FM 復調回路を図 15 に示します。

V_1 はユニバーサル電圧源による FM 信号です。ユニバーサル電圧源は、DC 電圧/AC 電圧/パルス波/正弦波/雑音波のどれか、あるいはテキスト入力により、FM 波(SFFM)/指数関数波(EXP)/折れ線波(PWL)を発生できます。

図13 2次のスイッチ・キャパシタ・フィルタ

パワースペクトル特性, カットオフ周波数 15.92 kHz で設計している

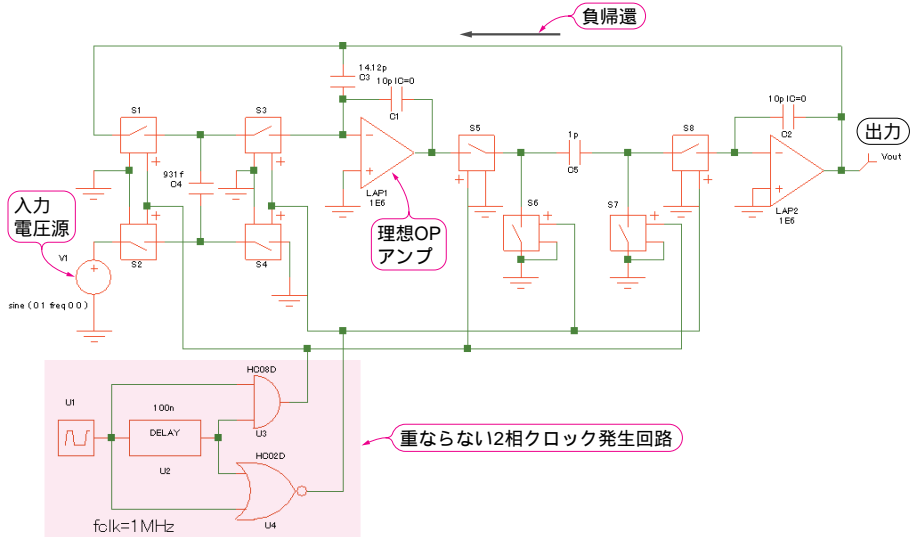


図14 図13の回路の過渡解析結果

V_{out} の波形とそのRMS値が表示されている。入力振幅は1V_{p-p}, つまり707mV_{RMS}。カットオフ周波数の15.92kHzではその2/2倍の500mV_{RMS}になっている

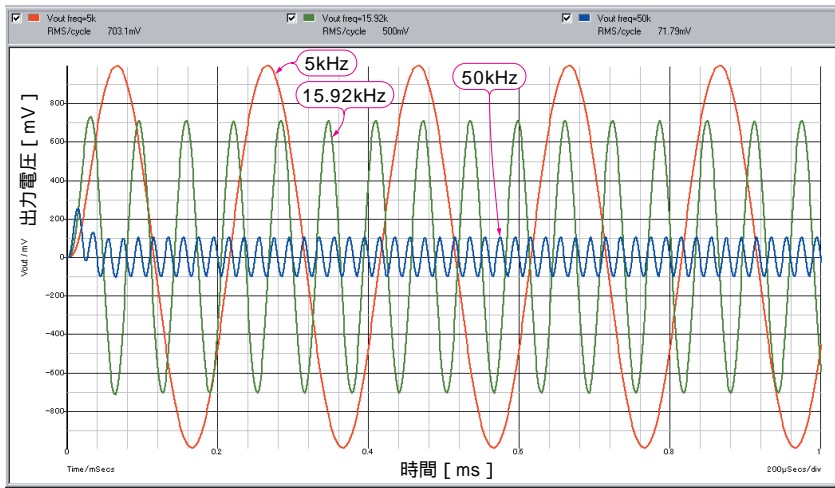
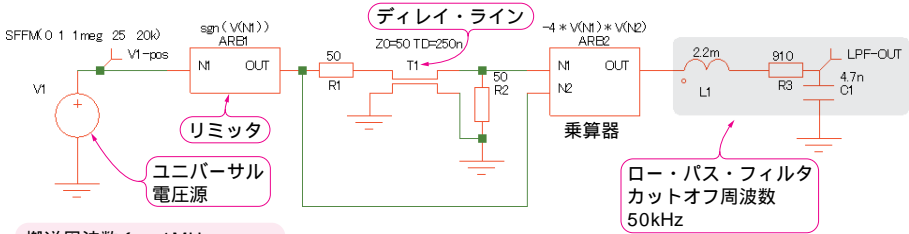


図 15 FM 復調回路

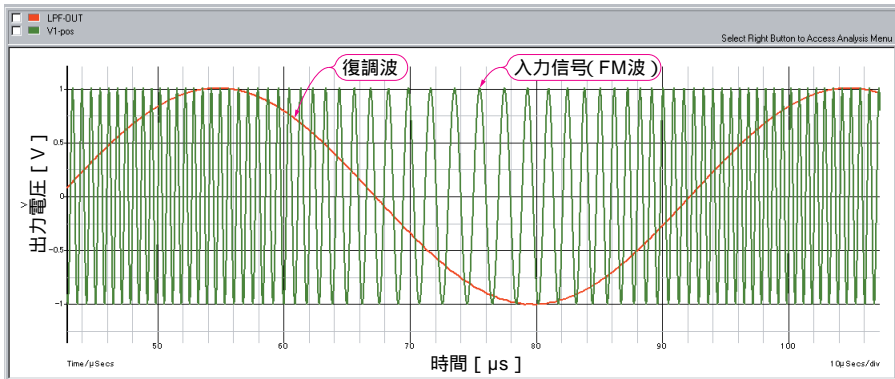
ユニバーサル電圧源で FM 波を作っている



搬送周波数 $f_c = 1\text{MHz}$
 変調周波数 $f_m = 20\text{kHz}$
 最大周波数偏移 $f = 500\text{kHz}$
 変調指数 $= f/f_m = 25$

図 16 図 15 の過渡解析結果

20 kHz 正弦波が復調されている



FM 波の搬送周波数は 1 MHz で、20 kHz 正弦波で変調しています。瞬時周波数は 1 MHz を中心に $\pm 500\text{kHz}$ 変化します。

リミッタで振幅 $\pm 1\text{V}$ の FM 方形波に変換し、ディレイ・ライン(特性インピーダンス 50 の同軸ケーブル)で FM 方形波を 250 ns 遅延させます。ディレイ・ラインの入力電圧と出力電圧を乗算器で掛け合わせ LPF で平均化すると、ディレイ・ラインの入出力電圧の位相差に比例した電圧が発生します。

位相差は瞬時周波数に比例するので、FM 信号が復調されます。瞬時周波数が 1 MHz のときは位相差が 90° になり、LPF 出力電圧はゼロになります。FM 信号 V_1 と LPF 出力電

図 17 出力 200 W の D 級パワー・アンプのシミュレーション(5)

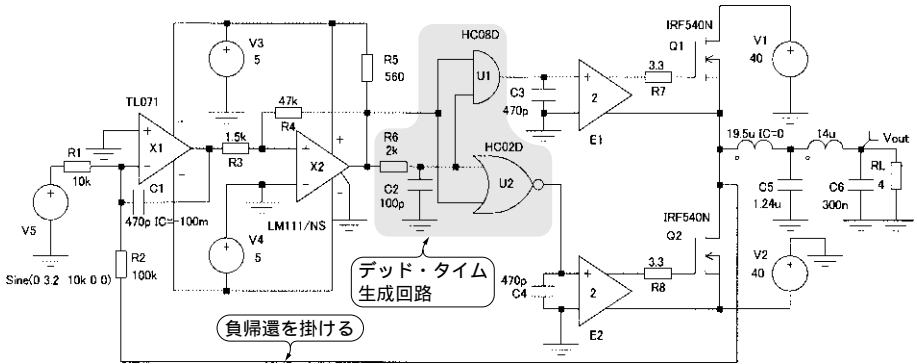
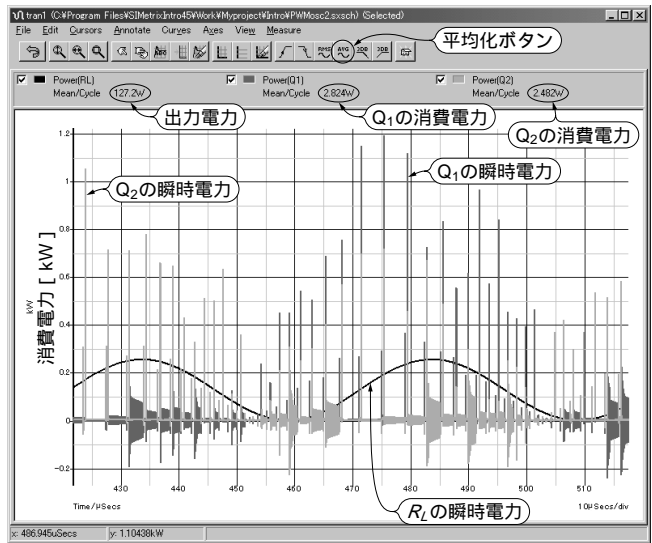


図 18 図 17 の回路の過渡解析結果

出力トランジスタ Q_1 、 Q_2 、負荷 R_L の瞬時電力がグラフ表示されている。平均値を表示できるので、効率を求めるのも簡単



圧の過渡解析結果を図 16 に示します。LPF 出力電圧は、オフセットのない 20 kHz 正弦波になっています。

D 級パワー・アンプのシミュレーション

図 17 に示すのは PWM 方式の D 級パワー・アンプです。LM111 はナショナル セミコンダクター社のコンパレータ LM311 の軍用規格品です。LM311 のデバイス・モデルは公開

されていないのでLM111を使いましたが、実際の回路はLM311で問題ありません。出力段のパワー MOSFET(IRF540N)は、電圧制御電圧源 E1 と E2 でドライブしています。E1, E2 のゲインは2倍です。負荷抵抗 R_L は4 Ω です。

D級アンプのポイントは電力効率です。電力効率を計算するには、出力段パワー MOSFET(Q_1 と Q_2)の消費電力を知らねばなりません。SIMetrix 5.0/CQは、デバイスの瞬時電力 $[p(t) = v(t) \times i(t)]$ と平均電力(消費電力)を簡単にシミュレーションできます。

図18は過渡解析によって求めた Q_1 の瞬時電力波形、 Q_2 の瞬時電力波形、負荷抵抗 R_L の瞬時電力波形です。入力信号が周波数 10 kHz の正弦波なので、 R_L の瞬時電力は 20 kHz の正弦波です。

ツール・バーの平均化ボタンをクリックすると、瞬時電力の平均値すなわち消費電力が表示されます。 Q_1 、 Q_2 の瞬時電力の最大値は 1 kW を超えています。消費電力はそれぞれ 2.824 W、2.482 W です。一方、 R_L の平均電力すなわち出力電力は 127.2 W です。したがって出力段の電力効率は、

$$= \frac{127.2}{127.2 + 2.824 + 2.482} \quad 96 \%$$

と算出されます。電力効率はとても高いことがわかります。