



電子回路シミュレータ

LTspice

設計事例大全

アナログ／計測から基板／高周波まで、プロの完成データに学ぶ

トランジスタ技術編集部 編

Transistor Gijutsu



DVD-ROM付き

電子回路シミュレータLTspiceXVII
150超のオリジナル回路ファイル式
LTspiceXVII 操作ムービー
設計アシスト・ツール
ほか

このPDFは、CQ出版社発売の書籍

「電子回路シミュレータLTspice設計事例大全」の一部見本です。

内容・購入方法については、下記のWebサイトをご覧ください。

内容： <https://shop.cqpub.co.jp/hanbai/books/49/49571.html>

CQ出版社

見本

第1章

受動素子のふるまいをシミュレーションで
おさらい

3大基本部品「抵抗/コンデンサ/ コイル」の基礎

● シミュレータはホントのことを波形で教えてくれる

「抵抗、コンデンサ、コイル」といえばエレキの3大基本部品です。これらはとてもシンプルな部品ですが、そのふるまいを正確にイメージするのはたいへんです。自分の理解度など怪しいものです。

抵抗、コンデンサ、コイルの性質は教科書に公式で示されています。本章ではシミュレーション上でも期待どおりにふるまうかどうかを確認して、理解度をチェックします。

使うシミュレータは付属DVD-ROMに収録されているLTspiceです。

理論的に計算した値は、そもそも理論からスタートしているのですから、結論も正しいはずですが、理論の陰に潜む大きな大前提(仮定)を忘れていたり、計算過程で勘違いをして正しい結果を導き出せていない可能性もあります。

LTspiceで確認した結果と、理論的に導き出した結果とを比較して、自分が想定している許容範囲のなかであれば、どちらも正しい結果を得られたという結論を下してよいでしょう。LTspiceで実際に動かしてみると、あたりまえのことを確かめ、納得することに喜びを感じます。

本章では、電子回路の教科書を再びいちからなぞるような説明はしません。公式や定理の「根底に流れる概念」を身に付けてほしいと思います。一つ一つの概念が、単に独立したものではなく組み合わせることで、その実用的な意味が深まっていくことも実感してもらいたいと思います。

理論的に導き出した計算結果が、実際の回路とどれほど一致するかの検証には、実機の評価と近似的に結果が一致する電子回路シミュレータLTspiceを使って比較します。

■ 抵抗はオームの法則どおりに動く

抵抗 R に電流 I_R を流すと、その両端に次式で表される電圧 V_R が発生します。

$$V_R = RI_R \cdots \cdots \cdots (1-1)$$

この式を「オームの法則」と呼んでいます。

重要なことは、抵抗値 R を比例係数としたときに、独立変数が I_R 、従属変数が V_R という点です。比例係数の R は、 I_R には依存しないということが大前提です。

ダイオード特性のように、電流の変化に対し電圧の変化が単純に正比例していない素子や、電流の正の側と負の側とでこう配が異なるものは、オームの法則に則っているとは言いません。一部の参考書では、式(1-1)を変形した次のような式もみられます。

$R = V_R/I_R$ 、 $I_R = V_R/R$ をひっくりめてオームの法則と呼んでいる例も見受けられますが、本来のオームの法則は式(1-1)の形だけです。

オームの法則は、 $y = ax$ の形の関数であることから、あえてシミュレータでの確認は行いません。

1-1——基礎① コンデンサに直流電流を与えたときの電圧変化

● 教科書で習った公式を復習

コンデンサの両端の電圧を V_C 、コンデンサの容量を $C[F]$ とし、さらにそのコンデンサに流れ込む電流を $I_C[A]$ とすると次の法則が成り立ちます。

$$V_C = \frac{1}{C} \int I_C dt \cdots \cdots \cdots (1-2)$$

I_C は、充電するとき“+”の値、放電するとき“-”の値になります。

式(1-2)は「直流や交流など、どのような条件の電流値であっても、そのコンデンサに対する過去の電流変化の積分値(現在値＝初期値)さえわかれば、コンデンサ両端の電圧がわかる」といっています。交流信号では、電流の瞬時値と初期状態がわかれば計算できます。

$$\int I_C dt = Q$$

ただし、 Q ：電気量(電荷の総量)

なので、次のよく知られた公式も導き出せます。

$$Q = VC \cdots \cdots \cdots (1-3)$$

見本

第2章

反転/非反転型，差動/計装型から 入出力ゲインの式まで OPアンプ増幅回路の基本

● アナログ回路の特性は入力と出力の関係式で表せる

他の機器からの信号を受け取ったり，センサからの微小信号を受け取ったりするアナログ回路には，OPアンプがたくさん使われています。

本章では，OPアンプを使用した4つの応用回路，反転アンプ，非反転アンプ，差動入力アンプ，計装(計測)アンプを紹介します。

LTspiceのような電子回路シミュレータを使えば，入出力の波形を見ることが出来ます。しかし任意の波形を入力したときの出力を予測できなければ特性を把握したとは言えません。

アナログ回路の特性は，入力に対してどのような出力になるのかを式で表すことができます。この式を「伝達式」といいます。

伝達式を求められれば，自分が設計した回路の品質を把握でき，問題がおきたときに不具合がどこにあるのか見つけやすくなります。

● シミュレーションでも入力と出力の関係式を確認

単純な回路ならば手計算で伝達式を求められるのですが，複雑な回路になればLTspiceのような電子回路シミュレータを使うのが楽です。ここではLTspiceをツールとして使い，伝達式を導出する方法を紹介します。

シミュレータは各ノードの電流や電圧値を計算します。解析データの形式はさまざまで，指定することでノードのDC値一覧表，グラフ，波形など，回路を読み取る上で便利な形式を選べます。

このような機能を活用すれば，OPアンプのように内部のふるまいが分からない回路を使っている場合でも，伝達式の導出が可能です。

〈編集部〉

2-1——基礎① 増幅回路の1番バッタ「反転アンプ」

■ 手計算で入力と出力の関係式を求める

● 答えから…反転アンプの入力と出力の関係

図2-1に、OPアンプの基本回路である反転アンプを示します。もっともシンプルなタイプのOPアンプ回路です。入出力の関係を表す式(伝達式)は次のようになります。

$$V_O = -\frac{R_F}{R_I} V_I \cdots \cdots (2-1)$$

反転アンプでは、OPアンプの非反転入力端子をグラウンド電位に固定し、信号を入力しません。

● OPアンプのふるまい

図2-1に示す反転アンプ回路の伝達式を求めるには、OPアンプの基本的な動作について

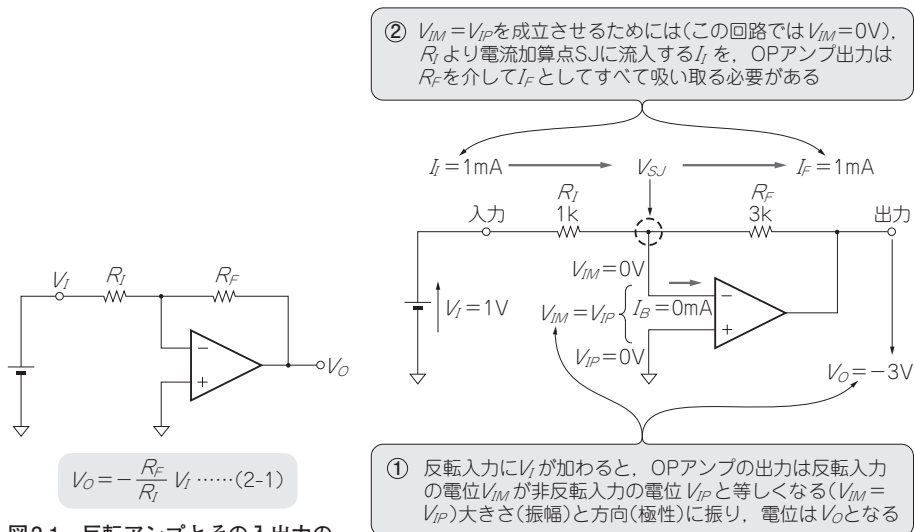


図2-1 反転アンプとその入出力の関係式

以前、出題してみたら、期待していたより正答率が悪かった

図2-2 理想OPアンプの基本的動作

負帰還が理想的に動作した結果として、電流加算点の電圧がゼロになる

見本

第3章

しくみをディスクリート回路で完全理解 トランジスタで解析！ OPアンプのふるまい

現在は、さまざまなOPアンプICが販売されています。負帰還をかけたOPアンプでは、下記2点のいやらしいトラブルがあります。

- (1) オフセット電圧
- (2) 発振

OPアンプICはブラック・ボックスとなっており、外付け部品でやみくもに対策を行い、真の原因が迷宮入りしてしまうことも、少なくないのではないのでしょうか。

ここでは、ディスクリートのトランジスタを使ってOPアンプを作り、オフセットと発振のメカニズムを解説します。対策方法を身に付け、アナログ・センスをアップしましょう。

〈編集部〉

3-1—— ディスクリートの OP アンプで解析

● OPアンプはブラック・ボックス…ディスクリート回路で原因を徹底解明

リニア・アンプの実現には、OPアンプICを使うことが代表的です。IC内部の定数の誤差などは、負帰還によって理想とみなせるレベルまで抑制されるため、ICの外側から見た応用回路全体の特性は、ほとんど計算通りになります。

入力オフセット電圧は負帰還によって改善不可能な問題です。また負帰還の安定性を保ち、いかに発振させないかが、理想的な動作の前提条件となります。

これら2点の大部分は、IC内部の回路特性で決まります。

適当なOPアンプICが存在しない場合は、ディスクリートで同様な回路を構成することもあります。その場合、ICと同様な設計作業が必要です。

ここではOPアンプと同じ回路構成の簡単なディスクリートOPアンプを例に、入力オフセット電圧と負帰還の安定性を解析し、その原因解明と対策をしてみます。

● OPアンプICの回路をディスクリートに置き換える

電源電圧 $\pm 5\text{V}$ で $50\ \Omega$ の信号ラインなど重めの負荷に対し、 $1\text{V}_{\text{RMS}} (\doteq 2.8\text{V}_{\text{P-P}})$ 程度の信号を扱えるようなアンプを製作してみます。

回路設計は既存の回路例をひな形として、定数を置き換えるところから始めると簡単です。

汎用リニア・アンプのひな形として、もっとも現実的なのはOPアンプICの等価回路だと思います。半導体のばらつきと温度特性に由来する調整要素を素子の相対的なバランスと負帰還によって解消してくれるからです。

基本要素をまとめて簡素化すると図3-1のようになります。これはトランジスタを3石使って図3-2のような回路で実現できます。多少複雑に見えますが、都合4本の抵抗値を決めればとりあえず動作します。

R_{C2} と R_{E2} は適当な抵抗 $1\text{ k}\Omega$ 、 $100\ \Omega$ を使い、そこから決まる V_{B2} を算出します。 R_{C1} と I_{EE} は、 I_{C1a} を 1mA として算出しています。トランジスタの V_{BE} は品種によらず 0.7V と仮定し、 h_{FE} を十分大きいものとして I_B を無視しています。電源電圧はレギュレータで正確な電圧を供給することを前提としています。

● 直流バイアスをシミュレーションする

図3-2の回路で信号を入力しない時の各部の電圧、電流が直流バイアスです。設計目標として $V_{\text{OUT}} = 0\text{V}$ を目指します。

ここでシミュレータの出番です。トランジスタにはLTspiceの標準モデル・ライブラリ

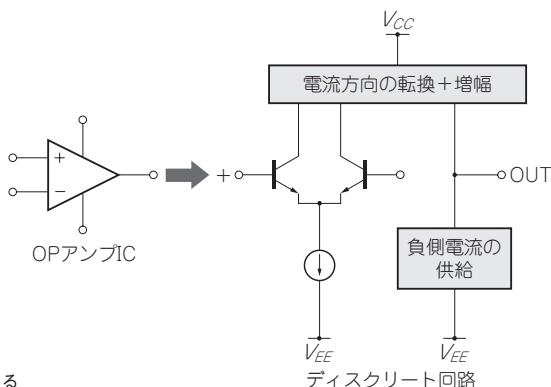


図3-1 OPアンプIC内の基本回路

OPアンプICをディスクリートに置き換える

見本

第4章

音源をばらして空間でミックス! 左右6アンプの 3ウェイ・ディバイダ・オーディオを作る アナログ・フィルタ回路

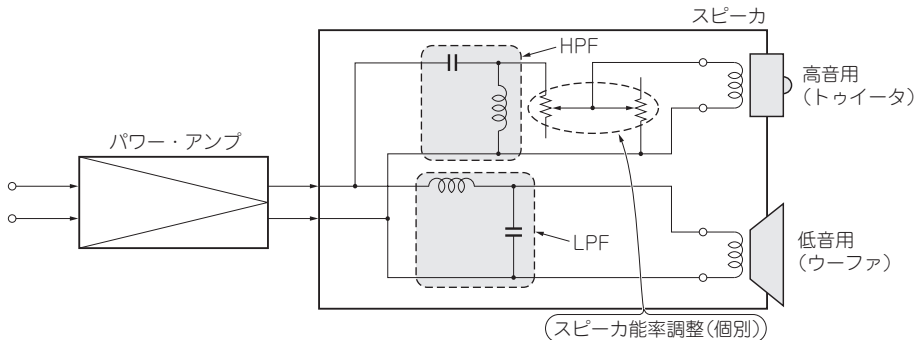


図4-1 オーディオ用スピーカの内部にはディバイダと呼ばれるフィルタが入っている (2個の再生ユニットをもつ2ウェイ・スピーカの例)
内部に帯域分割用のLCフィルタがある

- オーディオ帯域を分割して帯域ごとに専用のスピーカを用意すると良好な特性が得られる
スピーカには20～20kHz程度までフラットな音圧特性が要求されます。

この広い周波数範囲を1つのスピーカでカバーすることはとても難しいので、低域用（ウーハ）、中域用（スコーカ）、高域用（ツイータ）などの複数の専用ユニットを使用し、広帯域に渡ってフラットな音圧特性を実現しています。周波数分割の数も2分割（2ウェイ）から5分割（5ウェイ）程度まで存在します。

- 普通はLCフィルタを使って帯域分割するが理想的な特性は難しい

信号の周波数分割は通常、図4-1に示すようにパワー・アンプとスピーカの間にLCネットワークを挿入して行います。スピーカ・ボックスの中にはLCネットワークが入っています。

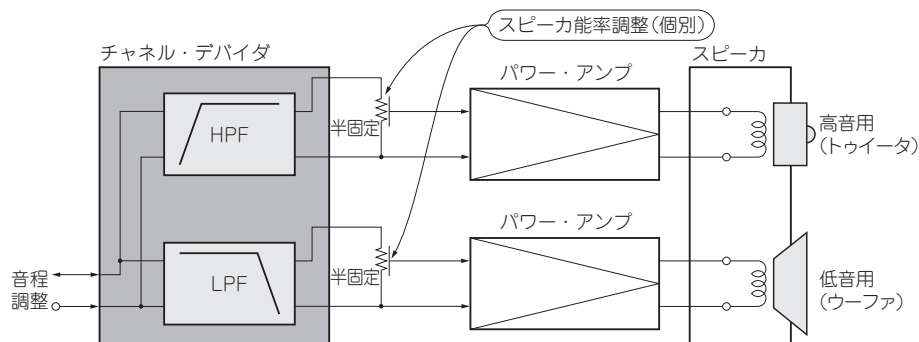


図4-2 高/中/低域用の再生ユニットごとにパワー・アンプを用意する贅沢なマルチウェイ・ディバイダ・オーディオ・システム
より良い特性を求めるならチャンネル・ディバイダを使う

しかし、スピーカのインピーダンスは周波数によって変化し、 LC ネットワークで理想的な周波数分割を行うのは困難です。

● チャンネル・ディバイダを使えば理想的な周波数分割ができて微調整も容易

高級なシステムでは、図4-2に示すようにパワー・アンプの前段にチャンネル・ディバイダと呼ばれる周波数分割フィルタを挿入し、スピーカの数だけパワー・アンプを用います。1つのスピーカに1つのパワー・アンプを割り当てることができるので、低インピーダンスでスピーカを駆動できます。 LC フィルタによりインピーダンスが高くなった状態で駆動する状態よりも良い条件です。

信号の周波数分割も、プリアンプとパワー・アンプの間なので任意の一定インピーダンスで行えます。より理想的な周波数特性が実現できます。またそれぞれのスピーカを駆動するレベルだけではなく、分割する周波数の微調整も容易になります。

4-1 ミックス時の周波数特性がフラットになる帯域分割フィルタの検討

■ 1次フィルタで検討

● 1次のチャンネル・ディバイダ回路

図4-3は1次のLPFとHPFを使用したクロスオーバー周波数1kHzの2分割のチャンネル・

見本

第5章

受信は良好? つなぐだけでは信号が伝わらないGHzワールドへようこそ 高周波回路作り 初めの一步 「インピーダンス・マッチング」

● 高周波では当たり前! つなぐときは必ず「インピーダンス・マッチング」

GPSなどGHz帯の無線通信機器が急ピッチで一般化しています。特に、Bluetooth、Wi-Fi、など利用が増えている2.4GHz帯の高周波回路設計は避けて通れない技術分野といえるでしょう。

本章では、表5-1の一般的なスペックのロー・ノイズ・アンプ(LNA: Low Noise Amplifier)を例に、多くの無線通信機器/受信機の高周波回路を作るための第一歩「インピーダンス・マッチング技術」を説明します。 f_T が25GHzの高周波バイポーラ・トランジスタ(NXPセミコンダクターズ、BFG425W)を使います。

▶ 高周波信号はインピーダンス・マッチングしないと伝わってくれない

高周波信号は、安易につないでも信号が伝わりません。

回路どうしや回路と部品をつなぐときはいつも「インピーダンス・マッチング」という処理(回路)が必要です。これはミキサや周波数ダブラ(通倍器)を作ったり、アンテナとアンプをインターフェースするときにも必要となる重要な技術です。

▶ 反射した信号は熱になる

高周波回路では、信号源が出力する電力が少しでも反射して戻ってこないように、入力

表5-1 本章のテーマ「インピーダンス・マッチング」のターゲット回路(LNA)の仕様

項 目	条 件	値
ゲイン	2.45GHz	15dB 程度
ゲイン・フラットネス	2.4G ~ 2.48GHz	1dB 以下
$ S_{11} $	2.4G ~ 2.48GHz	- 10dB 以下
$ S_{22} $	2.4G ~ 2.48GHz	- 10dB 以下
NF	2.4G ~ 2.48GHz	3dB 以下
P_{1dB}	2.45GHz	10dBm 程度
OIP_3	2.45GHz	20dBm 程度

回路に受け取らせる工夫が必要です。入力側で完全に受け取れなかった電力は、信号源側へ戻り（反射）、信号源内部の抵抗によって熱になるため、反射電力は最小限にする必要があります。信号源の抵抗値と負荷の抵抗値を一致させると、信号源が出力できる最大電力が負荷側へ伝わります。

● LNAの設計データを付属DVD-ROMに収録しています

実用的なLNAを作るためには、インピーダンス・マッチングに加えて次のような技術も必要です。

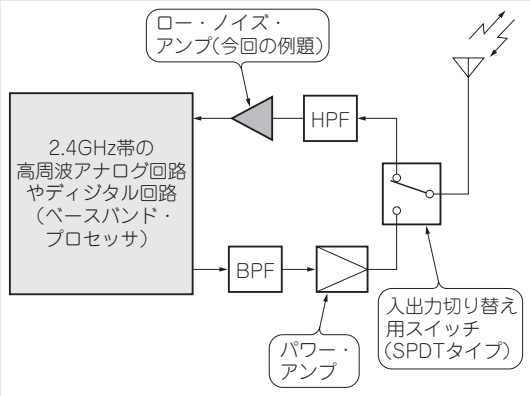
C o l u m n (5 - I)

集積化のおかげ！誰でもワイヤレス機器を作る時代

2.4G～2.5GHzの周波数帯域（無線通信機器の場合、バンド・エッジを考慮して2.405G～2.4835GHz）は、ISM(Industrial Science Medical)帯と呼ばれ、電子レンジなどの生活家電機器や無線LAN、Bluetoothなどさまざまな無線通信機器で使用されています。

図5-Aに示すのは、典型的な2.4GHz帯トランシーバのブロック図です。近ごろは、高周波LSIの集積化が進んでいるため、少しの外部部品で無線機能を装置に組み込むことができます。図5-Bのように、SPDTスイッチやパワー・アンプ、ロー・ノイズ・アンプのすべてが集積化されたIC（高周波フロントエンド内蔵IC）も存在します。

図5-A 最近の2.4GHz帯無線トランシーバは、集積度の高いワンチップICと少しのアナログ回路（アンプとフィルタ）で構成されている



ISBN978-4-7898-4957-9

C3055 ¥3200E

CQ出版社



9784789849579



1923055032002



定価：本体3,200円(税別)

電子回路シミュレータ

LTspice

設計事例大全

アナログ/計測から基板/高周波まで、プロの完成データに学ぶ

●本書は「電子回路シミュレータLTspice設計事例大全」として、アナログ回路の基本的な部分から、本格的な高周波回路やパワーエレクトロニクス/電源回路、基板に至るまで、幅広い設計ノウハウをLTspiceを使って解説しています。

●付属DVD-ROMには、LTspiceソフトウェア本体とプロが作成した150超の完成データ、およびLTspiceの操作ムービを収録しています。ツールをインストールして回路ファイルを読み込めば、自宅のパソコンでその道のプロが入力した生の回路データが動き出します。

見本