

Analog Dialogue

LTspice活用への第一歩

著者: Gabino Alonso、戦略的マーケティング・ディレクタ

回路設計においては、そのスピードが鍵となって成否が決まる ケースは少なくありません。回路の詳細、妥当性、制約について 素早く理解することができれば、実験室で試作やテストを行う前 に、設計に改良を加え、最適な部品を選定することが可能になり ます。[LTspice[®]] は、アナログ・デバイセズが提供する高性能 の回路シミュレータです。このソフトウェアを利用することによ り、回路図の作成、各種パラメータのプローブ、性能の解析を実 施することができます。回路図エディタや波形ビューワといった ツールを利用できるだけでなく、いくつかの基本的なコマンドを 習得することで簡単に使用できる高度な機能が数多く用意されて います。

LTspiceには、マクロモデルのライブラリと受動部品のライブラ リが用意されています。前者のライブラリは、アナログ・デバイ セズのパワー・マネージメント製品やシグナル・チェーン製品の ほとんどを網羅しています。LTspiceでは、マクロモデルのモデ リングにプロプライエタリな手法を採用しています。それにより、 高速かつ正確なシミュレーション結果を生成できるようにしてい ます¹。この特徴は、スイッチング電源の設計において特に重要 な意味を持ちます。LTspiceを使えば、他の多くのシミュレーショ ン・ツールよりも早く適切な結果が得られるため、最小限の時間 で設計作業を繰り返すことが可能になるからです。微調整を加え ながら連続的にシミュレーションを実行することにより、回路に 対する制約と性能の限界を確認することができ、回路に対する直 感力を身に着けられるようになります。

LTspiceは、当社のお客様とエンジニアリング・コミュニティに 対して無償で提供されています*。ただ、無償のツールだからと いって、見くびらないでください。LTspiceは、市場に提供され ている多くのシミュレーション用のソリューションよりも高い性 能を発揮します。恣意的な制約が設けられていて、結局使い物に ならないなどということはありません。シミュレーションの対象 となる回路の規模や階層を制限するのは、PCのリソースとユー ザの時間だけです。複雑な回路の構築、カプセル化、抽象化など も問題なく実施できます。

LTspiceのインストールと更新

LTspiceは、Windows[®]またはMac[®] OS X上で動作します。イ ンストール用のファイルは、analog.com/jp/LTspiceからダウ ンロードできます。

モデル、ソフトウェア、サンプルを最新の状態に保つために は、LTspiceのリリースとの同期を確立しておくことが重要で す。これについては、LTspiceの「Tools」メニューで「Sync Release」を選択することで対応できます(図1)。



図1. [Tools] メニューにおける「Sync Release」の選択。 この操作を行うことにより、モデル、ソフトウェア、サンプルを アップデートし、最新の状態に維持することができます。

既存の回路の再利用

新しいシミュレーション・ツールを使用するにあたり、回路をゼロから作成しなければならないとします。そうすると、そのツールを導入すること自体、億劫に感じられてしまうかもしれません。 白紙の状態から作業を開始するのではなく、既存の回路図を再利用したり、シミュレーションでその性能を確認したりすることで、 LTspiceに慣れ親しみながら作業を進める方がはるかに楽です。 LTspiceでは、回路図のデータは拡張子が「asc」のファイルとして保存されます。LTspice上で再利用できる回路図としては、 主に以下の3つが挙げられます。

- ▶ LTspice で提供されているデモ用回路
- ▶ LTspice と共にインストールされるテスト回路
- ▶ LTspice と共にインストールされる教育用のサンプル

デモ用回路のダウンロード

特定のソリューションに興味がある場合は、LTspiceのページから「デモ回路集のページ」にアクセスしてください。このページ では、アナログ・デバイセズが提供する包括的なサンプル集を 確認することができます。各サンプルは、製品や評価用ボード のページで「ツール」のセクションにアクセスすることでも入手 できます。デモ用回路はアプリケーション・エンジニアリングに よって検証済みであり、ほとんどの設計に対する確かな出発点 となります。その多くは、評価用ボードに実装されている回路を ベースにしています。

デモ用回路の使い方

自分が必要とするデモ用回路は、製品ページやデモ用回路のデー タベースで製品やアプリケーションを検索することによって探し 出すことができます。必要なものが見つかったら、拡張子がasc のファイルをローカル・ディレクトリにダウンロードして展開し てください。

Product		Demonstration Circuit
Product	Posted Date	sensor
LTC2058	4/1/2019	LTC2058 Demo Circuit - Carbon Monoxide Sensor
LTC2066	3/20/2019	LTC2066/LT5400 Demo Circuit - RTD Sensor Circuit with ±1°C Precision
LT5400	3/20/2019	LTC2066/LT5400 Demo Circuit - RTD Sensor Circuit with ±1°C Precision
LTC6115	3/15/2019	LTC6115 Demo Circuit - Current and Voltage Sensor Monitor Circuit for 16-Bit $\Delta\Sigma$ ADC
LTC2063	7/14/2017	LTC2063 Demo Circuit - µPower Precision Oxygen Sensor
LTC2063	7/14/2017	LTC2063/LT5400 Demo Circuit - RTD Sensor Circuit with ±1°C Precision
LT5400	7/14/2017	LTC2063/LT5400 Demo Circuit - RTD Sensor Circuit with ±1°C Precision
LTC2997	2/26/2015	LTC2997 Demo Circuit - High Accuracy, Analog Output, Temperature Sensor
LTC6081	11/10/2014	LTC6081 Demo Circuit - Shock Sensor Amplifier (Accelerometer)

図 2. デモ用回路のダウンロード

関心のある製品に対応するデモ用回路が見つからなかった場合に は、テスト回路を設計の出発点として使用するとよいでしょう。

テスト回路の表示

アナログ・デバイセズは、数多くのパワー・マネージメント製品 やシグナル・チェーン製品を提供しています。LTspice用のモデ ルが用意されている製品については、ほとんどの場合、それに 対応するテスト回路も提供されています。それらのテスト回路は [Jig」(治具) と呼ばれます。アナログ・デバイセズのモデル化 チームは、そのJigを使って製品のマクロモデルのテストや評価 を行っています。つまり、Jigは、モデルの作成作業の出発点と して使用されているということです。但し、それらのテスト回路 は、最終製品向けのものとして使用するべきではありません。テ スト回路の主な用途は、マクロモデルにおいて特定の故障が発生 する条件について評価することです。工場のアプリケーション・ エンジニアによる検証は必ずしも行われていませんし、多くの場 合、簡略化された回路や理想的な受動部品などが使用されていま す。それでも、ゼロからスタートするよりは、テスト回路から作 業を始める方が楽でしょう。

デバイス/コンポーネントのJigファイルの使い方

テスト回路のデータは、Jigファイルとして保存されています。 Jigファイルは以下の手順によって開くことができます。

- ▶ LTspice を起動します。
- ▶ 「File」→「New Schematic」を選択するか、「ctrl」+「N」キー を押します。すると、白紙の回路図が表示されます。
- ▶ [Edit] → [Component] を選択するか、[F2] キーを押します。すると、そのコンポーネントに対応するダイアログが表示されます。
- ▶ コンポーネントのウィンドウで、製品を検索するための最も簡 単な方法は、その品番をテキスト・ボックスに入力することで す(図3)。品番の文字列を入力していくと、リストに表示さ れる候補は絞られていきます。リストの中で、探している製品 を見つけたら、それを選択します。すると、無効だった「Open this macromodel's test fixture」ボタンが有効になります。



図3. 製品の検索方法。テキスト・フィールドに 関心のある製品の品番を入力します。

同ボタンをクリックすると、マクロモデルのテスト回路が表示 されます(図 4)。もう1つ、「OK」をクリックしてモデルの シンボルを回路図に追加するという方法もあります。それにより、回路図を自分で作成することができます。



図4. マクロモデルのテスト回路

教育用のサンプルを利用する

LTspiceには、シミュレーションと回路設計の方法を学べるように作成された教育用のサンプルが含まれています。LTspiceをインストールすると、C:\Program Files\LTC\LTspiceXVII\ examples\Educationalにそれらのサンプルが格納されます。

📕 contrib	- ISO7637-2_example.asc	
FRA	- ISO16750-2_example.asc	-√ relax.asc
PAsystem		- Royer.asc
	LM78XX.asc	- SampleAndHold.asc
-🔨 160.asc		- SOAtherm-Tutorial.asc
⊣ √ 1563.asc	-🔨 LM741.asc	- SoftDiodeRecovery.asc
⊣ √ astable.asc	⊣ √ logamp.asc	🔨 S-param.asc
-√ audioamp.asc	🕂 LoopGain.asc	-🤇 stepAC.asc
🕂 BandGaps.asc		🕂 stepmodelparam.asc
⊣ <br< td=""><td></td><td>⊣ stepnoise.asc</td></br<>		⊣ stepnoise.asc
⊣Ç Clapp.asc		-🤇 steptemp.asc
-🤇 Cohn.asc	-🕻 MonteCarlo.asc	-√ Transformer.asc
⊣Ç colpits.asc	-🔨 NE555.asc	-√ Transformer2.asc
-🕻 colpits2.asc	-🗸 noise.asc	- TransmissionLineInverter.asc
⊣ ⊂ curvetrace.asc	⊣ √ NoiseFigure.asc	🕂 TwoTau.asc
⊣🤇 dimmer.asc	→ Notch.asc	⊣ UniversalOpamp2.asc
	-🤇 opamp.asc	⊣ varactor.asc
	- CP2.asc	-🗸 varactor2.asc
⊣Ç GFT.asc	≺ passive.asc	∹ √ varistor.asc
	🕂 phaseshift.asc	-🔨 Vswitch.asc
⊣ ← Hartly.asc	⊣ ⊂ phaseshift2.asc	⊣🤇 wavein.asc
⊣ ⊂ Howland.asc	-🤇 phono.asc	⊣🤇 waveout.asc
-√ IdealTransformer.asc		⊣ ✓ Wien.asc

図5. 教育用のサンプル。LTspiceをインストールすると PC上に保存されます。

回路図エディタの使用方法

LTspiceは、回路図を迅速に作成できるように設計されていま す。ただ、どのような回路図エディタでも、使い方を習得するま でにはある程度の時間がかかります。LTspiceでは、基本的なメ ニューとショートカット・キーさえ覚えれば、非常に容易に回路 図を作成/編集することができます。[Edit] メニューを選択す るか、回路図の背景部分を右クリックすることにより、回路図を 編集するためのすべてのコマンドとコンポーネントにアクセスす ることが可能になります。 本稿では、回路図エディタを使用して回路をゼロから作成する方法については触れません。それについては、詳しい参考資料が用意されています。LTspiceで回路を作成する方法を学ぶ手段としては、教育用のビデオが最適でしょう。そのうちのいくつかを、後ほど「その他の参考資料」のセクションで紹介します。

コンポーネントの属性の編集

ほとんどのオブジェクトは、右クリックすることで属性を変更で きるようになっています。回路素子によっては、エディタのウィ ンドウが表示され、そこでパラメータを変更できるようになって いるものもあります(図6)。

Resistor - Rload	
Manufacturer: Part Number:	ОК
Select Resistor	Cancel
Resistor Properties	
Resistance[Ω]:	1
Tolerance[%]:	
Power Rating[W]:	

図6. 抵抗のパラメータ

抵抗、コンデンサ、インダクタ、ビーズ、ダイオード、バイポー ラ・トランジスタ、MOSFET、JFETといったコンポーネントに ついては、モデルのデータベースが用意されています。そこから、 必要なモデルを選択することができます。各種コンポーネントの 包括的なモデル・ライブラリを利用することで、現実の製品に近 いコンポーネントを使用した回路図を迅速に作成/編集すること が可能になります(図7)。正確に一致するモデルが見つからない 場合、当座は似たような仕様のモデルを代わりに使用しておき、 使用したいモデルを後でコンポーネントのデータベースに追加す るといった対応も図れます。



図7. ライブラリに含まれるコンポーネントの選択

ー部のコンポーネントには、より詳細な設定が行えるようオプ ションが用意されています。図8に示したのは、電圧源の基本的 なパラメータについて設定するためのテキスト・ボックスです。

Voltage Source - V1	×
DC value[V]:	OK Cancel Advanced

図8. 電圧源の基本的なパラメータを設定するための テキスト・ボックス

ここで「Advanced」をクリックすると、図9のようなウィンド ウが表示されます。これを使用すれば、より詳細にパラメータを 設定することができます。

T GITC GOTTS		DC Value
🔘 (none)		DC value:
 PULSE(V1 V2 Tdelay Trise Tfall Ton Period Noycles) 		Make this information visible on schematic:
SINE(Voffset Vamp Freq Td Theta Phi	Ncycles)	
EXP(V1 V2 Td1 Tau1 Td2 Tau2)		Small signal AC analysis(.AC)
SFFM(Voff Vamp Fcar MDI Fsig)		AC Amplitude:
PWL(t1 v1 t2 v2)		AC Phase:
O PWL FILE:	Browse	Make this information visible on schematic:
		Parasitic Properties
Vinitial[V]:	0	Series Resistance[Ω]:
Von[V]:	5	Parallel Capacitance[F]:
Tdelay[s];	0	Make this information visible on schematic: 🔽
Trise[s]:	1u	
Tfall[s]:	1u	
Ton[s]:	10m	
Tperiod[s]:	20m	
Novcles	3	

図9. 電圧源のパラメータを詳細に設定するためのウィンドウ

単位の入力

LTspiceでは、ウィンドウのフィールドにパラメータの値を入力 する際には、標準的な表記を使用します。例外として、10⁶を指 定する場合には、MEG (またはmeg) という表記を用います。 また、10⁻³ (ミリ)を表す場合には、mの代わりに大文字のMを 使用します。詳細については表1をご覧ください。例えば、「1フ ラッド」と指定したい場合に「1F」と入力してはなりません。「1F」 は「1フェムト・ファラド」を表します。「1ファラッド」を指定 したい場合には、単に「1」と入力してください。

表1. LTspiceにおける単位の接頭辞

文字	意味
Tまたはt	テラ (1012)
Gまたはg	ギガ (10 ⁹)
MEGまたはmeg	メガ(106)
Kまたはk	キロ (103)
Mまたはm	ミリ (10-3)
Uまたはu (LTspiceがµに置換)	マイクロ (10-6)
Nまたはn	ナノ (10 ^{.9})
Pまたはp	ピ⊐ (10 ⁻¹²)
Fまたはf	フェムト (10-15)

回路図の表示の変更

回路図エディタにおける回路図の表示は、マウスやスクロール・ ホイールによる回路図のパン、拡大、縮小によって変更すること ができます。また、「View」メニューのオプションを使用するこ とでも表示の変更が可能です。例えば、回路図をクリックしてド ラッグすると、パンが実行されます。「Space」キーを押すと、 回路図の全体表示に戻ります。

シミュレーション用のコマンド

デモ用回路、テスト回路、教育用のサンプルのファイルには、シ ミュレーション用のコマンドがあらかじめ定義されています。し たがって、編集を加えることなくシミュレーションを実行できま す。LTspiceには、トランジェント解析、小信号AC線形解析、 DCスイープ解析、ノイズ解析、DC動作点解析、小信号DC伝 達関数解析などを実施するためのコマンドが用意されています。

コマンドの追加、編集

コマンドの追加、編集を行いたい場合には、「Simulate」メニュー から「Edit Simulation Cmd」を選択します。すると、図10に 示したダイアログが表示されます。このダイアログは、各種の解 析に対応するタブで構成されています。各タブには、パラメータ を設定するためのフィールドが用意されています。各種解析に関 する詳しい情報は、「F1」キーを押すと表示されるヘルプ・ファ イルで確認できます。



図10. コマンドの編集

シミュレーションの実行

回路図を選択または作成したら、「Simulate」メニューの「Run」 を選択します。すると、回路図エディタ上の情報を基に、同じファ イル名で拡張子が「net」のネットリスト・ファイルが生成され ます。LTspiceは、このネットリストに対してシミュレーション を実行します^{**}。ネットリストの内容を表示するには、「View」 メニューの「SPICE Netlist」を選択します。

波形の表示 回路図のプローブ

「Run」コマンドを実行した後に回路を解析するには、カーソルを 使用して回路図のワイヤ/ノードを直接プローブするか、「Plot Settings」の下の「Add Trace」(または「Visible Trace」)を 使用します。すると、波形ビューワにトレースが表示されます。

グラウンド基準の電圧のグラフを表示する

モニタしたいワイヤ/ノードにカーソルを合わせると、カーソル が赤色の電圧プローブの形に変わります(図11)。この状態で、 ワイヤ/ノードをクリックすると、グラウンドを基準とする電圧 が表示されます(図12)。



図11. 電圧プローブの形のカーソル



図12. 電圧プローブによる測定結果

電位差のグラフを表示する

電位差のグラフを表示するには、カーソルが電圧プローブの形 になった状態でモニタしたいワイヤ/ノードをクリックし、その まま基準となるワイヤ/ノードまでカーソルをドラッグします。 すると、赤色だったプローブのカーソルが黒色に変わります。こ の状態でマウスのボタンを放すと、電位差が表示されます(図 13)。



図13. 電位差の測定結果

電流のグラフを表示する

2本のワイヤが接続されているコンポーネントの電流をモニタしたい場合には、以下のような操作を行います。

- ▶ コンポーネント本体の上にカーソルを合わせます。
- ▶ カーソルが電流プローブの形に変わります(図14)。
- ▶ コンポーネント本体をクリックします(図15)。



図 14. 電流プローブの形のカーソル



図 15. 電流プローブによる測定結果

3本以上のワイヤが接続されているコンポーネントにおいて、いずれかのピンを流れる電流をモニタしたいケースもあるでしょう。その場合、以下の操作によりグラフを表示することができます。

- 対象となるピンの上にカーソルを合わせます。
- ▶ カーソルが電流プローブの形に変わります。
- 対象となるピンをクリックします。

波形ビューワ内の表示 波形のズーム

波形ウィンドウでは、マウスによるズーム操作が行えます。波形 ウィンドウの特定の領域を拡大するには、対象とする領域を囲む 枠をドラッグ操作によって描きます(図16)。



図16. 波形の拡大

測定値を簡単に取得する

対象とする領域を囲む枠を描いてマウスのボタンを押したままに すると、その枠のサイズが(X座標とY座標の単位で)波形ビュー ワの左下隅に表示されます。これを応用すれば、測定値を簡単に 確認することができます。マウスのボタンを放す前に枠を最小化 すれば、拡大表示は実行されません。



図 17. 測定値の取得

トレースの削除

波形ビューワにおいて、個々のトレースを削除したいケースもあ るでしょう。その場合、波形ビューワの最上部で、削除したいト レースのラベルを右クリックして「Delete this Trace」を選択 します。あるいは、波形ビューワ上をクリックしてウィンドウを アクティブにし、「Plot Settings」メニューの「Delete Traces」 を選択します(または「F5」キーを押します)。カーソルがハサ ミの形に変わったら、波形ビューワの最上部で、削除したい任意 のトレースのラベルをクリックします。右クリックするか「Esc」 キーを押すことで、削除機能は終了します。

トレースを1本だけにしたい場合には、対象となるワイヤ、ノード、コンポーネント、またはピンをダブルクリックします。する と、それ以外のすべてのトレースが波形ビューワから削除されま す。 ウィンドウをクリックしてアクティブにした状態で、「Plot Settings」メニューのオプションを参照するか、波形ビューワを 右クリックすると、波形ビューワのその他の機能を確認すること ができます。

その他の機能

LTspiceには、高度なシミュレーション機能や高度な解析機能も 用意されています。それらを使えば、定常状態の検出、電源をオ ンにした際の過渡応答やステップ応答の解析、効率や電力の計算 といったことが行えます。波形ビューワや高度なシミュレーショ ン手法の詳細については、次のセクションに示すリソースを参照 してください。

その他の参考資料

LTspiceの詳細については、analog.com/jp/LTspiceからアク セスできる技術記事やビデオを参照してください。以下に挙げる ビデオでは、回路図エディタと波形ビューワの基本的な使い方を 詳しく紹介しています。

LTspiceIVの回路図エディタ

LTspice IV:波形ビューア

LTspice全般に関する疑問点については、[F1] キーを押すと表示されるヘルプ・ファイルを参照してください。それ以外にも、 EngineerZone®のLTspice関連のオンライン・フォーラムや、 LTspiceのユーザ・グループに参加することで情報を得ることが できます。ディスカッションのスレッドや、チュートリアル、シ ミュレーションの例などにより、多彩な情報が得られます。ソフ トウェアのバグやデバイスのモデルが抱える問題を見つけた場合 には、ぜひLTspice@analog.comまでメールでご連絡ください。 ご自身のアプリケーションについて、アナログ・デバイセズの製 品をベースとしたシミュレーションを実施した際に疑問が生じる こともあるでしょう。そのような具体的な質問については、担当 のフィールド・アプリケーション・エンジニアに直接お問い合わ せください。

ぜひ、シミュレーションの作業を楽しんでください。

*自社製品の設計、プロモーション、デモ、開発、販売を行う半 導体メーカーは、このプログラムの対象外です。半導体メーカー がそうした用途でLTspiceを使用したい場合には、アナログ・デ バイセズから特別な許可を得る必要があります。

**アナログ・デバイセズの製品のマクロモデルは、LTspiceに固 有のプロプライエタリな記述言語を使用して実装されています。 そのため、他のSPICEプラットフォーム上では使用できません。

参考資料

¹ Michael Engelhardt [SPICE Differentiation (SPICE における 微分法)] Analog Devices、2019年



著者について

Gabino Alonso (gabino.alonso@analog.com) は、アナログ・デバイセズのPower by Linear[™]グルー プで戦略的マーケティング・ディレクタを務めています。アナログ・デバイセズに入社する前は、Linear Technology (現在はアナログ・デバイセズに統合)、Texas Instruments、カリフォルニア・ポリテクニッ ク州立大学で、マーケティング、エンジニアリング、オペレーション、教育など、多岐にわたる業務を担当 していました。カリフォルニア大学サンタバーバラ校で電気工学とコンピュータ工学の修士号を取得してい ます。

アナログ・デバイセズ株式会社

©2020 Analog Devices, Inc. All rights reserved. 本紙記載の商標および登録商標は、各社の所有に属します。 Ahead of What's Possibleはアナログ・デバイセズの商標です。 お住いの地域の本社、販売代理店などの情報は、analog. com/jp/contact をご覧ください。

オンラインサポートコミュニティEngineerZoneでは、アナ ログ・デバイセズのエキスパートへの質問、FAQの閲覧がで きます。



VISIT ANALOG.COM/JP