

1 . 回路シミュレータSPICEの概要	
1 - 1 SPICEとは	1
1 - 2 SPICEの種類	2
2 . SIMetrix/SIMPLIS の使い方	
2 - 1 概 要	5
2 - 2 使用上の注意	5
2 - 3 SIMetrix/SIMPLIS のスタート	6
2 - 4 回路図の作成方法	8
2 - 5 SIMetrixによるDC解析	15
2 - 6 SIMetrixによる過渡解析(Transient Analysis)	17
2 - 7 SIMetrixによるAC解析	18
2 - 8 SIMetrixによるマルチステップ解析	20
2 - 9 SIMetrixによるモンテカルロ解析	21
2 - 10 解析データのEXCELへの読み込み方法	23
2 - 11 SPICEモデルの組み込み方法	41
3 . SIMetrixによるディスクリート回路のシミュレーション	
3 - 1 エミッタ共通増幅回路	28
3 - 2 差動増幅回路	30
3 - 3 低雑音増幅回路	31
4 . SIMetrixによるOPアンプ回路のシミュレーション	
4 - 1 OPアンプのDC特性	38
4 - 2 OPアンプのAC特性	39
4 - 3 OPアンプのスルーレート(過渡特性)	40
4 - 4 入力容量の影響	41
4 - 5 容量負荷の影響	42
4 - 6 アクティブフィルタ	45
5 . SIMetrixからSIMPLISへ	
5 - 1 まずはSIMetrixでバックコンバータの回路図作成	47
5 - 2 SIMetrixによる過渡解析の実行	52
5 - 3 SIMetrixの回路図をSIMPLISの回路図に変更	59
5 - 4 SIMPLISで過渡解析の実行	60

5 - 5	SIMPLISでAC解析の実行	6 1
5 - 6	SIMPLISでマルチステップ解析	6 3
5 - 7	SIMPLISの使い方の注意	6 5
5 - 8	グラフの移動	6 6
6 . バックコンバータのシミュレーション		
6 - 1	概 要	6 8
6 - 2	負帰還設計	7 2
6 - 3	負帰還設計結果をシミュレーションで検証	7 6
6 - 4	出力インピーダンスのシミュレーション	7 7
6 - 5	過渡応答のシミュレーション	7 9
7 . 電圧モードブーストコンバータ		
7 - 1	概 要	8 0
7 - 2	負帰還設計	8 3
7 - 3	負帰還設計結果をシミュレーションで検証	8 6
7 - 4	出力インピーダンスのシミュレーション	8 8
7 - 5	過渡応答のシミュレーション	8 9
8 . 電流モードブーストコンバータ		
8 - 1	概 要	9 0
8 - 2	負帰還設計	9 2
8 - 3	負帰還設計の検証と再設計	9 5
8 - 4	出力インピーダンスのシミュレーション	1 0 0
8 - 5	過渡応答のシミュレーション	1 0 1
9 . 力率改善回路(P F C)		
9 - 1	概 要	1 0 2
9 - 2	電流負帰還設計とシミュレーションによる検証	1 0 5
9 - 3	電圧負帰還設計とシミュレーションによる検証	1 0 8
9 - 4	出力インピーダンスのシミュレーション	1 1 2
9 - 5	電源電流の過渡応答シミュレーション	1 1 4
9 - 6	実測データ	1 1 6

## 1 . 回路シミュレータSPICEの概要

### 1 - 1 SPICEとは

SPICEは Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis の略です。集積回路設計のためのシミュレーション・プログラムとしてカルフォルニア大学バークレー校で1960年代の後半に開発されました。もともとはIC設計用として開発されたものですが現在では電子回路の検証用ツール、電子回路シミュレータとして広く使用されています。

またこのSPICEはアメリカの税金で開発されたことからSPICE自身はフリーのソフトウェアです。このSPICEを核として回路図エディタやシミュレーション結果のグラフ表示ソフトウェアを組み合わせ、各種のSPICE商品が販売されています。

今回使用するLTspiceは米国のリニアテクノロジー社が自社の半導体のPRのため開発したSPICEで、無料で配布されています。

#### ・プロのアナログ回路設計にはSPICEは必須のアイテム

パーソナルコンピュータが普及し、インターネットを始めとするコンピュータ応用技術により世の中の仕組みが大きく変わっています。感と経験の世界であったアナログ回路設計の分野も例外ではありません。一世代前のアナログ回路設計者の机の上は鉛筆・消しゴム・電卓だけでしたが現在ではパーソナルコンピュータが所狭しと並んでいます。

現在のアナログ回路設計者にはインターネットで情報を収集し、各種EDAツールを使いこなして短時間に完成度の高い回路設計を行うことが要求されています。そしてこれらを使いこなせないアナログ回路設計者は第一線から退いていきました。

アナログ回路設計はデジタルとは異なり、奥が深く、一人前のアナログ技術者になるには多くの歳月と経験が必要と言われてきました。確かにアナログ回路を組み上げ、不具合に遭遇し、回路変更やパーツの定数を変更しながら特性の変化を計測し、データを整理し、経験を積んでいくには多くの時間が必要です。しかしSPICEの登場によってこれらの作業がコンピュータ上で短時間に、しかも個人レベルで使用できるようになりました。

SPICEの利用は回路設計の効率化・高信頼化に役立つばかりではなく、アナログ回路設計技術のマスタに必要な年月を大きく短縮する可能性を秘めています。

#### ・SPICEを効果的に使用するには

SPICEは自動回路設計ソフトウェアではありません。SPICEは回路動作の検証をすばやく正確に行う道具でしかありません。したがってSPICEを使うことによって得られる効果はSPICEを使用する技術者のスキルによってまったく異なったものになります。

回路図には実際の回路が全て忠実に反映されているわけではなく、配線の際に生じる回路図に書かれていないコイルやインダクタンスなどが存在します。またSPICEのモデルも完璧ではありません。このため回路図を忠実にSPICEに設定し、シミュレーションしても現実の特性や動作とは異なる場合が多く生じます。

#### ・シミュレーションの前に結果を想定する

SPICEでシミュレーションを行うには、まず自分なりの結果を想定し、その想定とシミュレーション結果と比べる必要があります。

自分の想定とは異なった結果の場合にはその違いの原因を追及することが重要です。自分の考えの誤りに気がつけば自分のスキルが向上します。

#### ・シミュレーション結果と現実の回路特性を比較する

シミュレーションと現実の回路の特性が異なった場合にSPICEに設定した回路のどこに不備があったかが判明し、対策できれば次のシミュレーションはより正確になります。

## 1 - 2 SPICEの種類

SPICEにはたくさんの種類が市販されており、それぞれ特徴があり、短所もあります。

プロの電子技術者にはライバルが全世界に存在します。SPICEをあれこれ比較するよりも、ライバルよりも素早く効率的・効果的にSPICEを回路設計に活かすかが重要です。

現在次に挙げるSPICEが比較の手軽に入手できます。

### PSpice



販売元がMicroSim, OrCAD, Cadenceと変わりバージョンアップが頻繁ですが、全世界で解説本も多く、アナログ回路設計ではデファクト・スタンダードになっています。

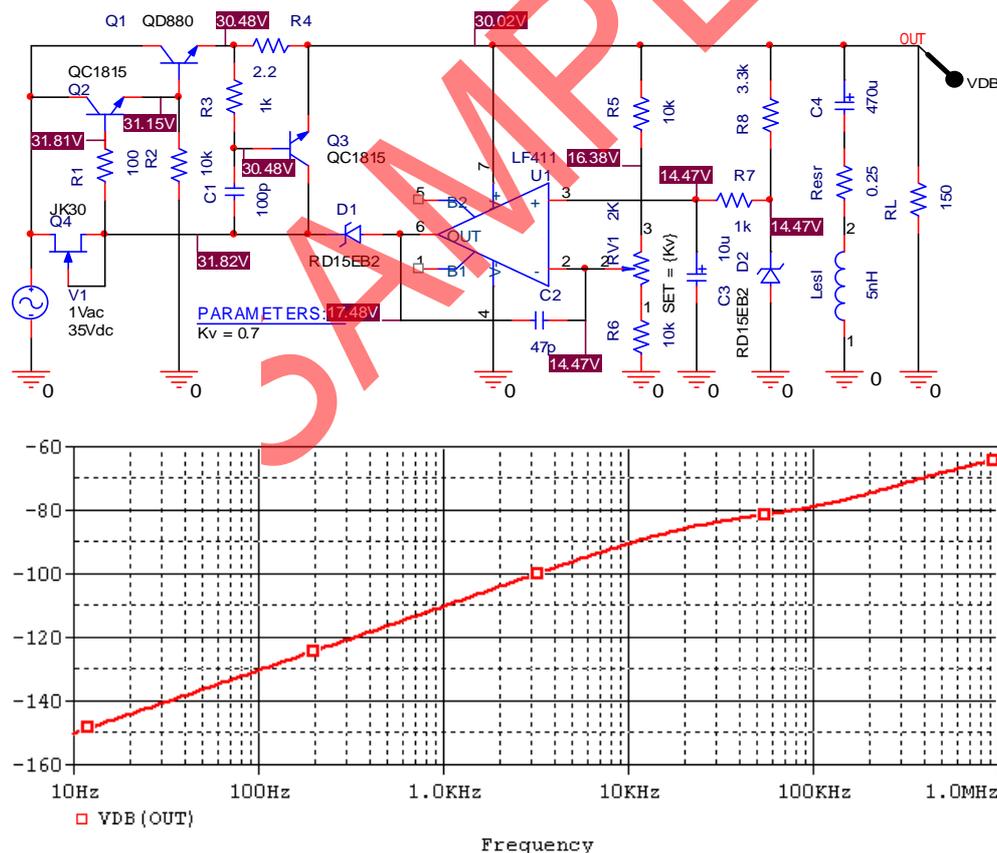
製品は高価ですが個人レベルでは評価版が使えます。評価版では使用規模の制限があり、バージョンによってその制限が異なっています。

アクティブ・フィルタなどOPアンプ応用回路のシミュレーションにはVer9.2が、トランジタなどのディスクリート回路にはVer10以降の評価版が適しています。

Ver9.2は「電子回路シミュレータPSpice入門編 CQ出版」、Ver15.7は「デザインウェーブマガジン2008年2月号 CQ出版」に付録で収録されています。

最新の評価版はCadence社のホームページから無料でダウンロードできます。

下記はPSpiceのAC解析でリップルリジェクション特性をシミュレートした例です。AC解析が完了すると回路各部分の直流バイアス電圧や電流が表示され便利です。



## LTSpice

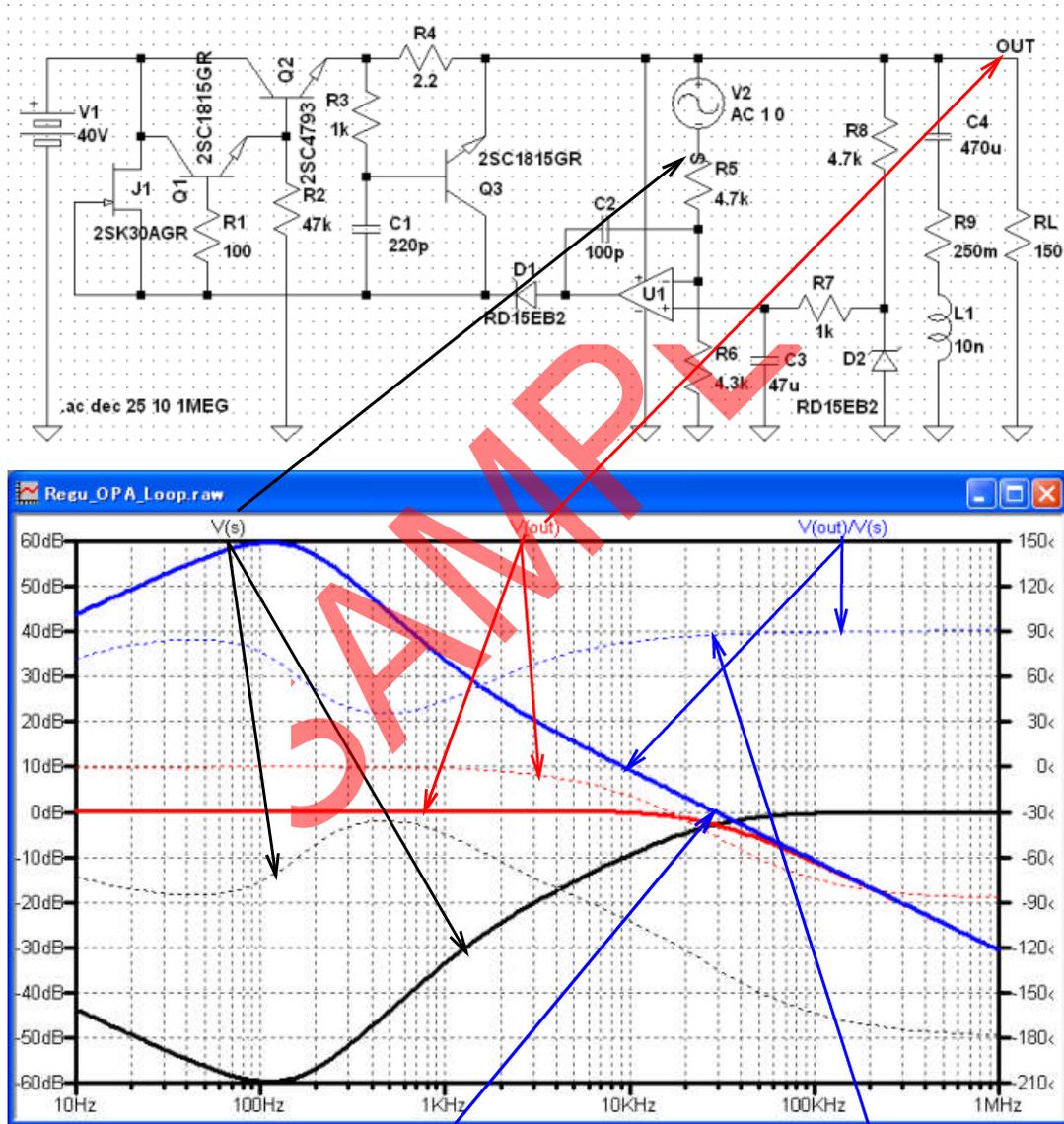
リニアテクノロジー社が自社のICの販売促進のために無料で配布しているシミュレータです。同社のホームページからダウンロードでき、回路規模の制限がないのが特徴です。

リニアテクノロジー社が販売しているほとんどのOPアンプや電源用ICのモデルライブラリが収録されています。他社のICを組み込むことも可能です。

スイッチング状態でのAC解析は直接できませんがDFT機能を備えています。このためスイッチング状態での特定の周波数の利得・位相を求めることができます。

電子回路の独習には最適なシミュレータで「電子回路シミュレータ LTSpice 実践入門 編 CQ出版」にも付録のCDに収録されています。

下記はリニアレギュレータの負帰還の安定性をシミュレーションした例です。



ループ利得が1になる周波数が約30kHzで、そのときの位相余裕が約90°であることが解ります。

## SIMetrix/SIMPLIS

本セミナーで使用するSPICEです。 SIMetrix/SIMPLIS は SIMetrix というシミュレータと SIMPLIS という異なったアルゴリズムのシミュレータを一つの回路図エディタで切り換えて使用します。

SIMetrixは解析エンジンがSPICEなのでPspiceやLTspiceと同様な機能です。これに対しSIMPLIS はSPICEとは異なるアルゴリズムで解析を行い、**スイッチング状態でのAC解析ができ**、これはPspiceやLTspiceにはない機能です。

スイッチングレギュレータは電源入力周波数が50/60Hz、負帰還のループ利得が1になる周波数が数kHz程度、そしてスイッチング周波数が100kHz程度と一つの回路で扱う時間の乖離が非常に大きくなります(このように速い動作と遅い動作が混在したシステムを Stiff な System と呼びます)。

このため長い時間を非常に細かいステップで解析しなくてはならず、非常に長い解析時間が必要となります。したがってシミュレータの解析時間が大きな問題になります。

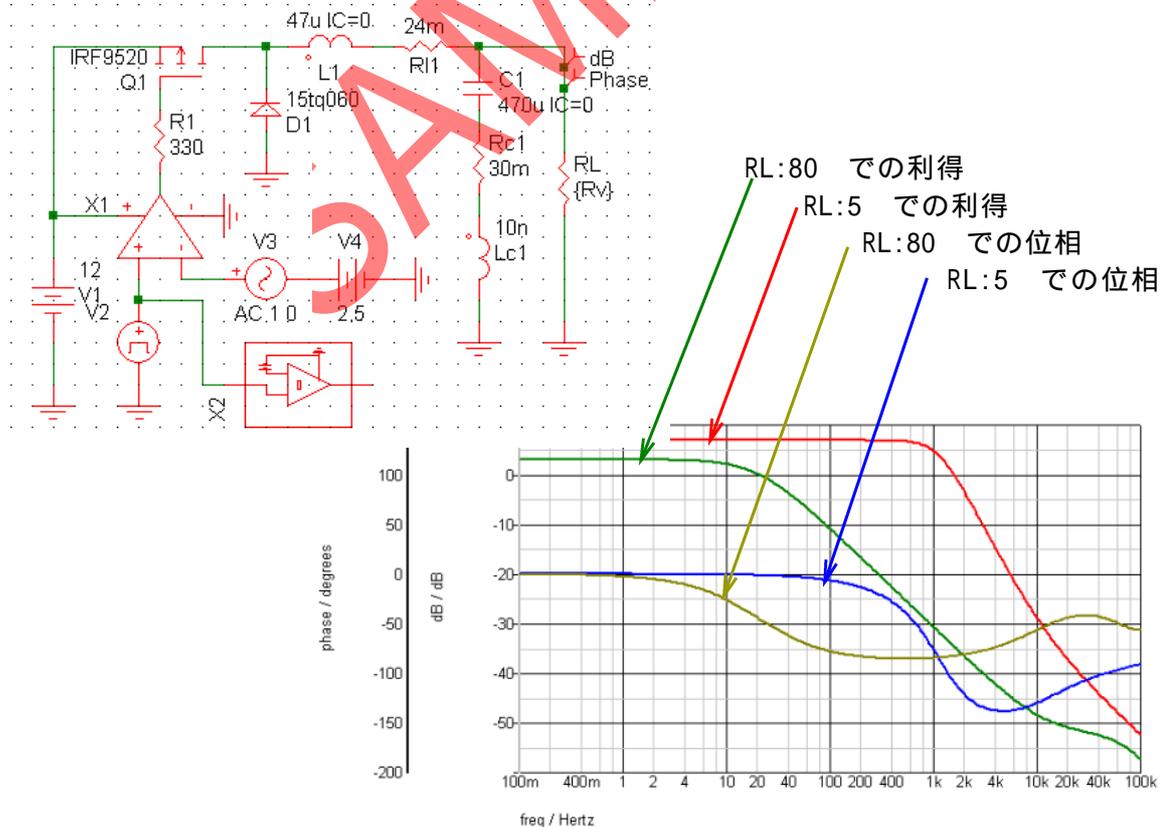
SIMetrix/SIMPLISは比較的解析時間が早く、波形の細かい応答はSIMetrixで、マクロ動作はSIMPLISでと使い分けすることができます。

そして最大の特徴は SIMPLIS を使用するとスイッチング状態でのAC解析が可能で負帰還のループ特性がシミュレーションでき、PspiceやLTspiceにはない機能です。

以上のことからSIMetrix/SIMPLISはスイッチングレギュレータの解析には最適なシミュレータと言えます。

評価版はSIMetrix社のホームページからダウンロードでき、「電子回路シミュレータ SIMetrix/SIMPLIS CQ出版」にも付録で収録されています。

下記は SIMPLIS を使用し、スイッチングレギュレータの負荷抵抗を変えて、利得・位相 - 周波数特性の変化をシミュレーションした例です。



## 2 . SIMetrix/SIMPLISの使い方

### 2 - 1 概 要

SIMetrix/SIMPLISはそれぞれ特長を持った2つのシミュレーションから構成されています。この2つのシミュレータは同じ回路図エディタを使用し、回路図エディタ上でスイッチ選択できます。

SIMetrixはSPICEを解析エンジンとしていますので他のシミュレータPSpice, LTspice, MicroCap等と同等の機能を持ち高速で動作します。

SIMPLISはSPICEとは異なったアルゴリズムで動作しており、スイッチング状態でのAC解析が高速に行えます。このためスイッチング電源の設計には不可欠なシミュレータです。

しかしSIMPLISはトランジェント解析で波形の細かい動作まで再現するのは苦手なので、スイッチング波形の細かな変化の様子をシミュレーションしたい場合はSIMetrixを使います。

### 2 - 2 使用上の注意

姿勢を正しくして使用しましょう

シミュレータに夢中になると時間を忘れてしまいます。長い間不自然な姿勢でいると頸骨等を痛めますので注意してください。

目的を明確にし、結果を推測してからシミュレーションを行いましょう。

自分の推測とシミュレーション結果の違いを考察することで回路設計のスキルが向上します。

こまめに使用しましょう

たまに使用すると面倒に感じてしまいます。ちょっとした回路の疑問がわいたらSPICEで確認する習慣を付けましょう。いきなり仕事に使用しても効果的が上がりません。

実測とシミュレーション結果を常に比較しましょう。

浮遊容量や浮遊インダクタンスなど回路図に現れないパラメータが大きく影響する場合があります。実測とシミュレーションの違いの理由を明確にすることで、よりシミュレーションの確度が上がります。

モデルは完全ではありません

付属している素子のモデルは完全ではありません。どこまで正確にモデリングされているかの正確な認識が大切です。

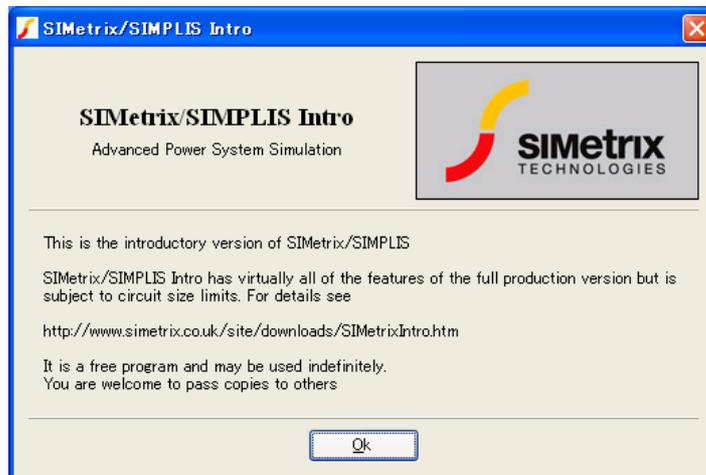
SPICE で使用できる単位

m	M	milli	ミリ	$10^{-3}$	k	K	kilo	キロ	$10^3$
u	U	micro	マイクロ	$10^{-6}$	meg	MEG	mega	メガ	$10^6$
n	N	nano	ナノ	$10^{-9}$	g	G	giga	ギガ	$10^9$
p	P	pico	ピコ	$10^{-12}$	t	T	tera	テラ	$10^{12}$
f	F	femto	フェムト	$10^{-15}$					
a	A	atto	アト	$10^{-18}$					

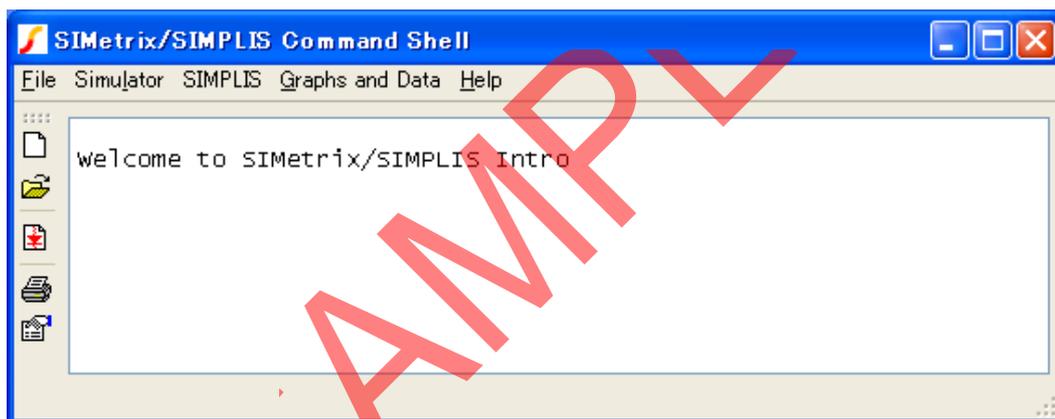
M:ミリ MEG:メガ U:マイクロ に注意

## 2 - 3 SIMetrix/SIMPLIS のスタート

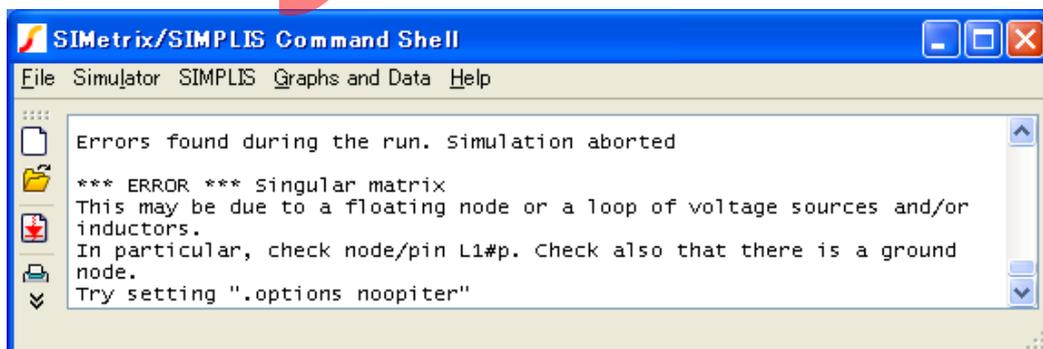
右のアイコンをダブルクリックすると  
下記のスタート画面が表示されますので[OK]をクリックします。



[OK]をクリックすると下記のコマンドシェルが表示されます。  
コマンドシェルにはシミュレーションの実行状態やエラー情報が表示されます。



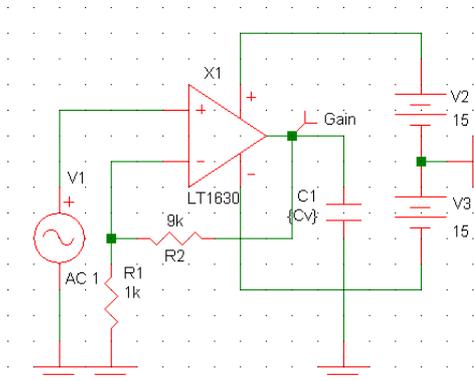
エラー表示例



## 容量負荷対策

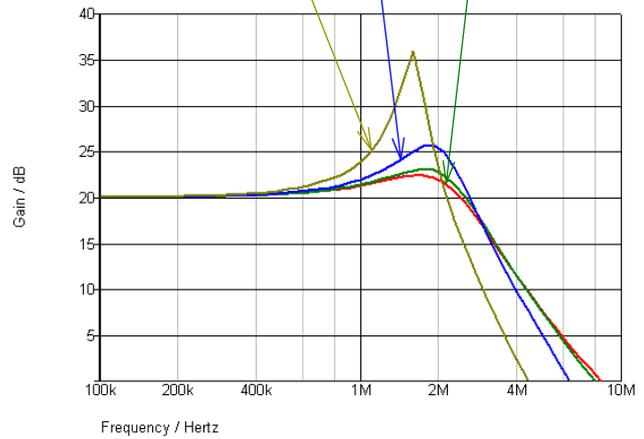
### 容量負荷対策無し

[LT1630\_CL\_NoCmp\_AC]



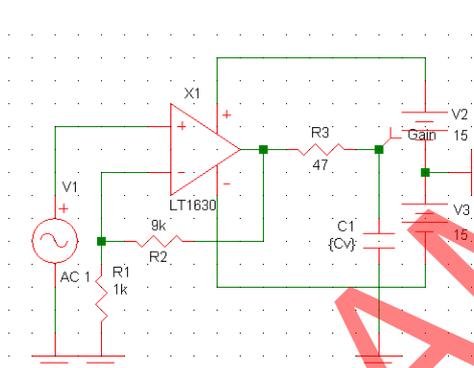
### 容量負荷

C1 3.2n 1n 316p 100p

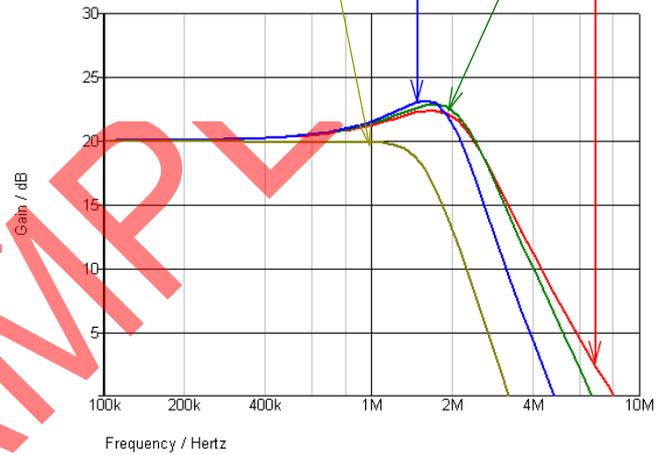


### 出力と容量負荷との間に抵抗47Ωを挿入

[LT1630\_CL\_CmpA\_AC]



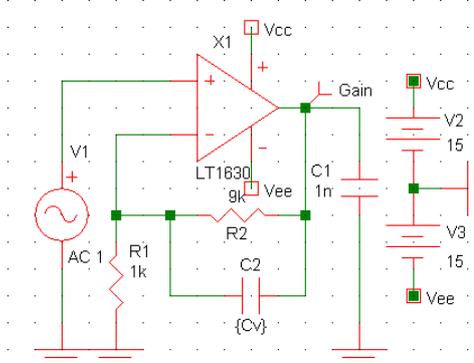
### 容量負荷 C1 3.2n 1n 316p 100p



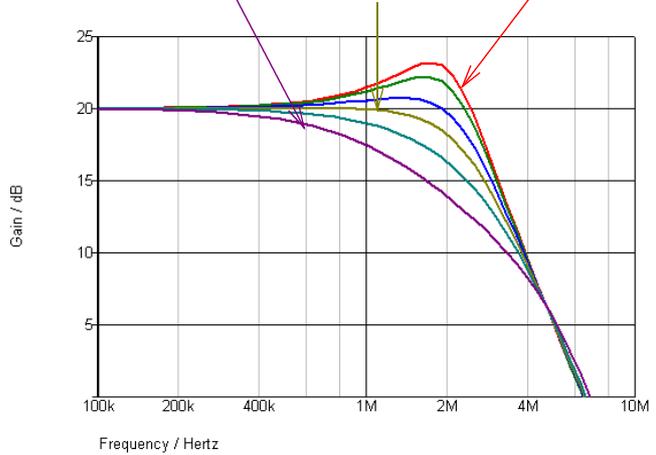
### 帰還抵抗に並列にコンデンサを挿入し、帰還信号の位相を進ませる

[LT1630\_CL\_CmpB\_AC]

容量負荷 1n



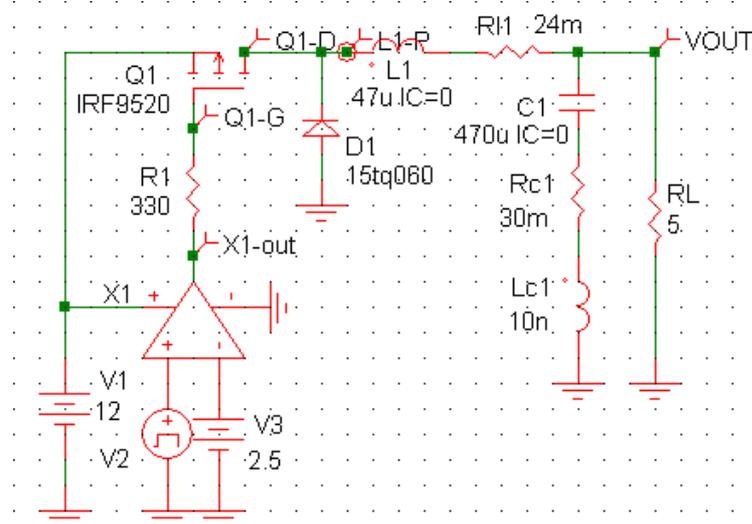
補正容量 C2 15p 10p 7p 5p 3p 2p



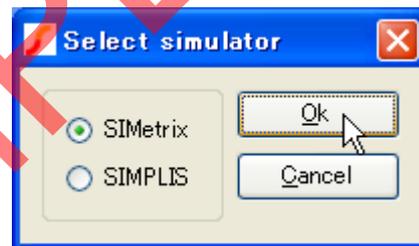
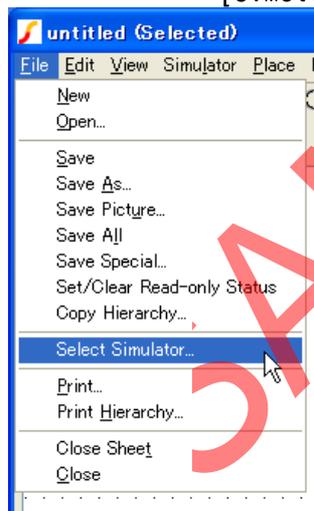
## 5 . SIMetrixからSIMPLISへ ( Buck Converter )

### 5 - 1 まずはSIMetrixでバックコンバータの回路図作成

下記のバックコンバータを例題として、回路図の作成順序を説明していきます。

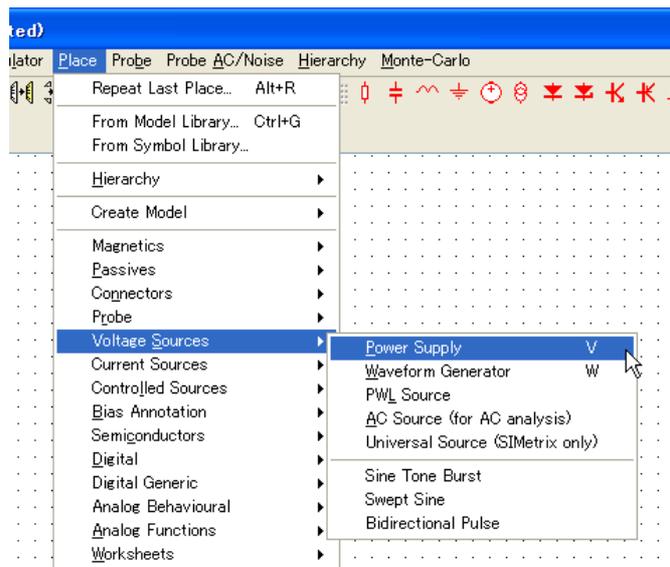


使用するシミュレータの指定をするため[File][Select Simulator]をクリックし、  
[SIMetrix] にチェックマークをつけ[OK]をクリックします。



使用頻度の高い部品はツールバーにあるアイコンで取り出せますが、他の部品は[Place]のコマンドをクリックして選択します。

電池のマークの電圧源は [Voltage Sources][Power Supply]で取り出します。

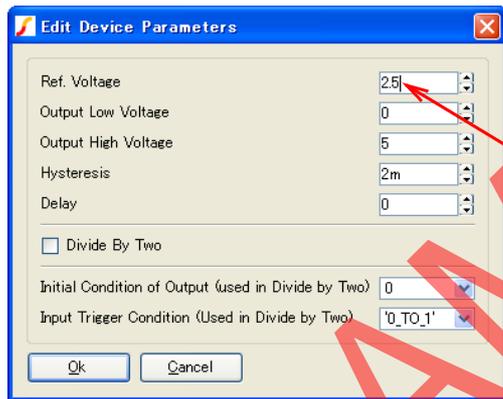
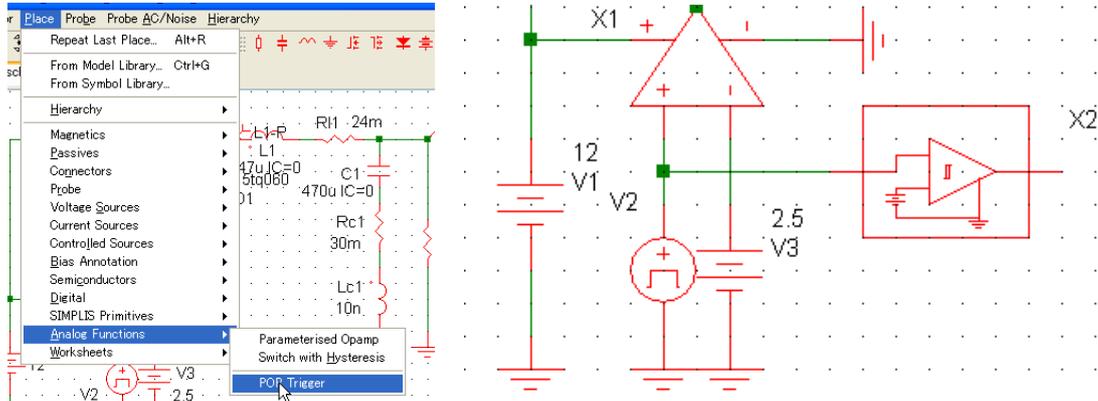


## 5 - 5 SIMPLISでAC解析の実行

SIMPLISでAC解析するには、[POP Trigger]を回路図に配置する必要があります。

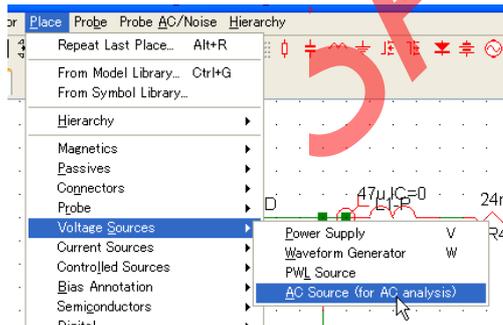
SIMPLISではこの[POP Trigger]の周期を利用して解析を行うことでスイッチングしている状態でのAC解析が可能になります。

[Place][Analog Functions]から[POP Trigger]を取り出し、回路図に貼り付け、スイッチング周波数を決定している三角波に接続します。

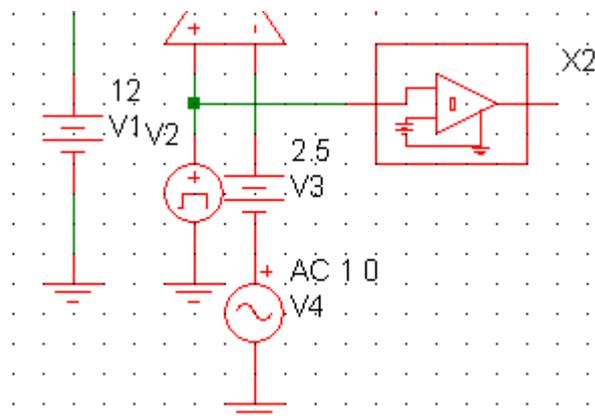


POP Trigger を選択状態にし、[Edit Part]をクリックして設定画面を開きます。

三角波のレベルに合わせ[Ref Voltage]を2.5Vに設定します。



AC解析のための信号源を[Place][Voltage Sources][AC Source(for AC Analysis)]から取り出しV3の直流電源に直列に挿入します。

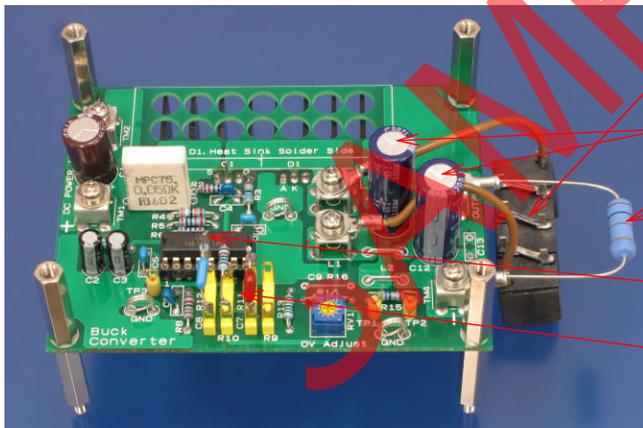
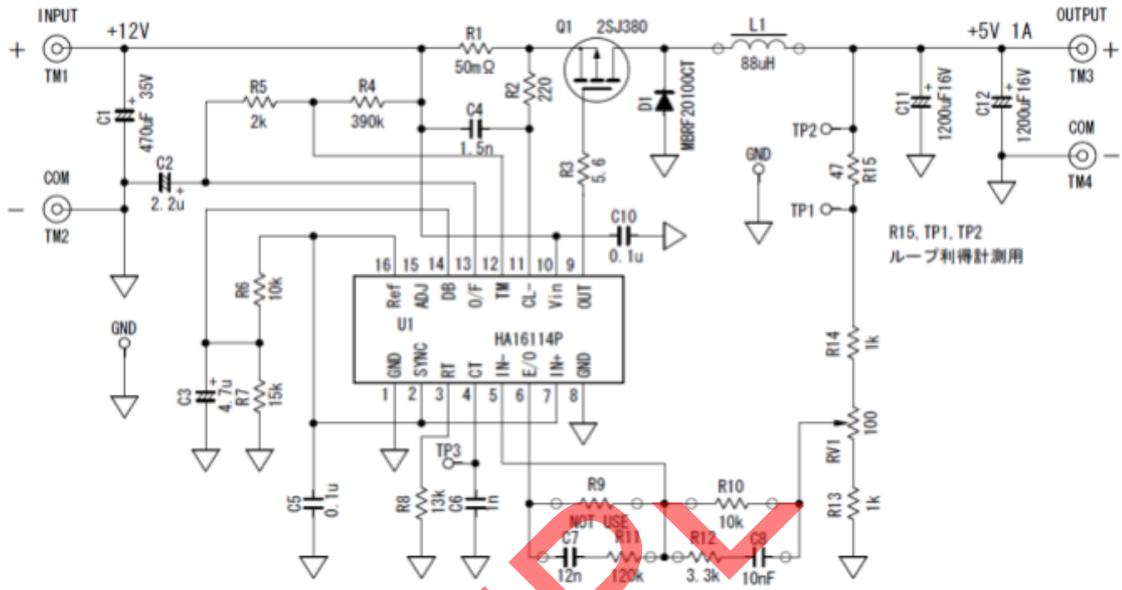


## 6 . バックコンバータのシミュレーション

### 6 - 1 概 要

下記は入力12V定格出力5V1Aのバックコンバータです。  
SIMetrix/SIMPLISを用いてこの回路の負帰還設計を行います。

#### セミナー用バックコンバータ



- 出力コイル 22uH × 4
- 出力コンデンサ LXY1200uF16V × 2
- 負荷抵抗 100     定格負荷は5
- 制御IC HA16114P
- 誤差増幅器用CR

一般的にはリップル電流が最大直流出力電流の30%程度になるようにインダクタンスの値を決定することが多いようです。ここではインダクタンスを88uHとしました。

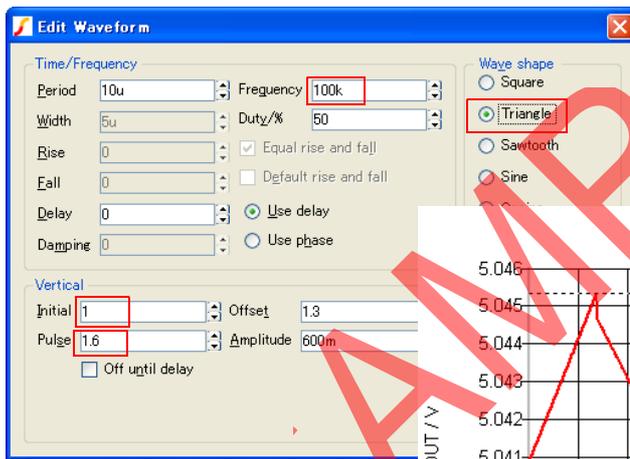
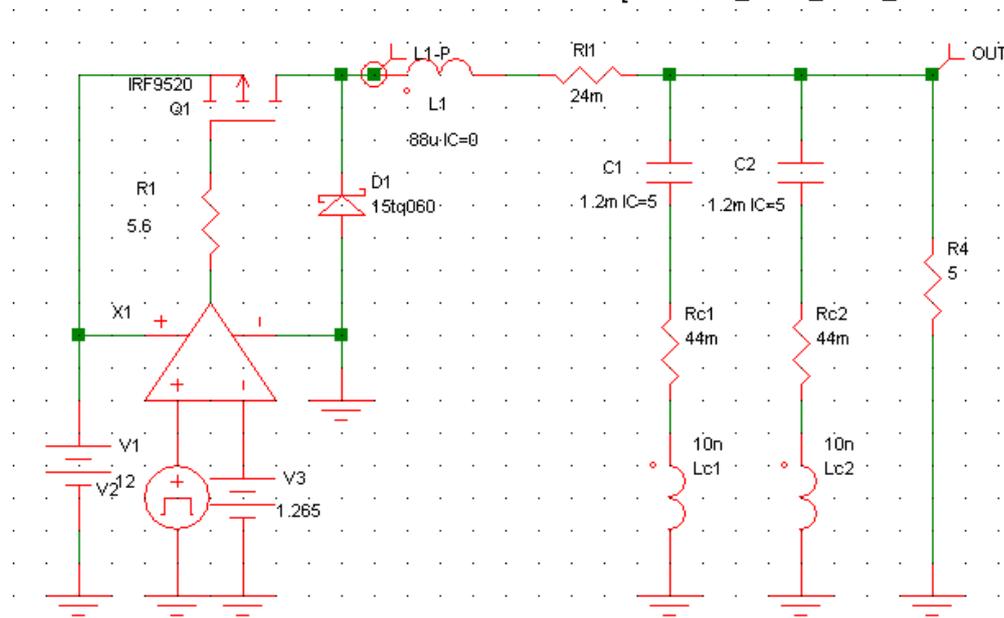
$$\text{リップル電流 } I_L = \frac{(V_{IN} - V_{SAT} - V_{OUT})T_{ON}}{L} = \frac{(12V - 0.5V - 5V) \times 5\mu s}{88\mu H} = 370mA$$

VIN: 入力電圧     VSAT: 制御MOSFETのON電圧     VOUT: 出力電圧     TON: ON時間

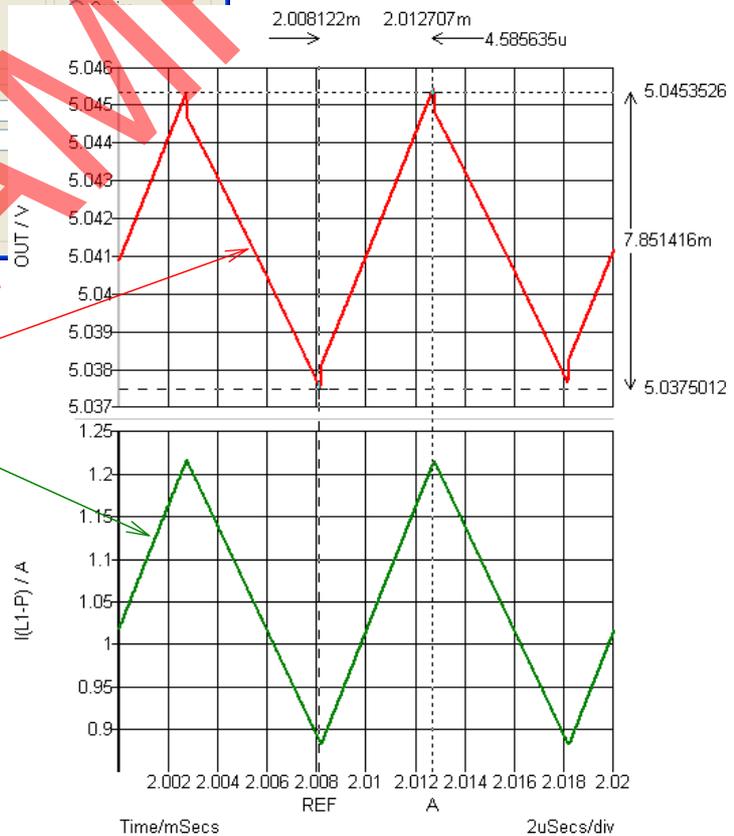
出力コンデンサのESRをRCESR: 22m とすると

$$\text{出力リップル電圧は } V_0 = I_L \times RCESR = 8mV$$

まずはSIMetrixで出力リップル電圧とコイルに流れる電流をシミュレーションします。  
[BackCon\_Cont\_Tran\_SIMetrix]



V2は 三角波、100kHz  
1V ~ 1.6V に設定



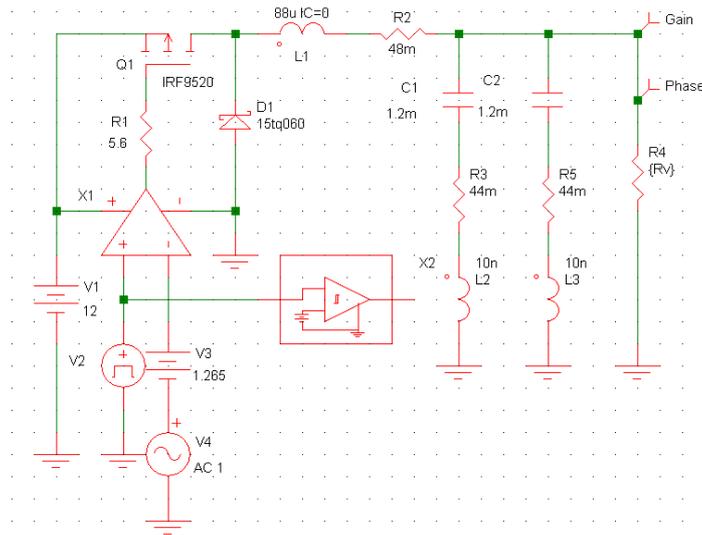
出力リップル電圧7.85mVp-p

コイルに流れるリップル電流  
330mA p-p

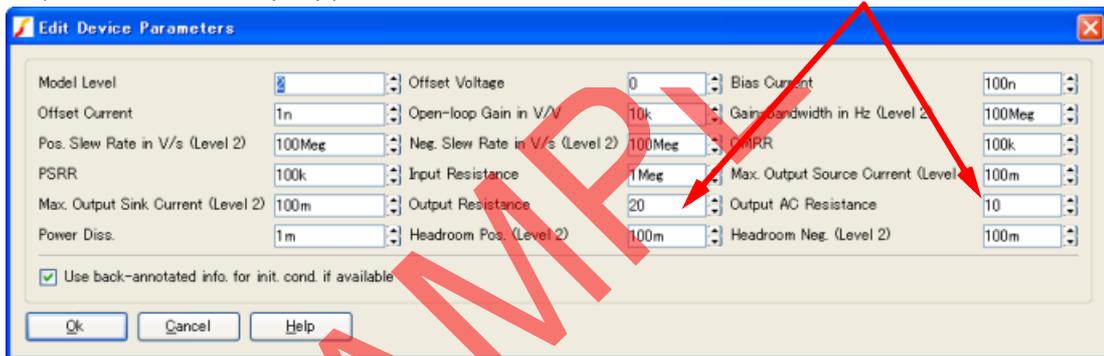
設計値と大差ない結果が  
得られています。

## 6 - 2 負帰還設計

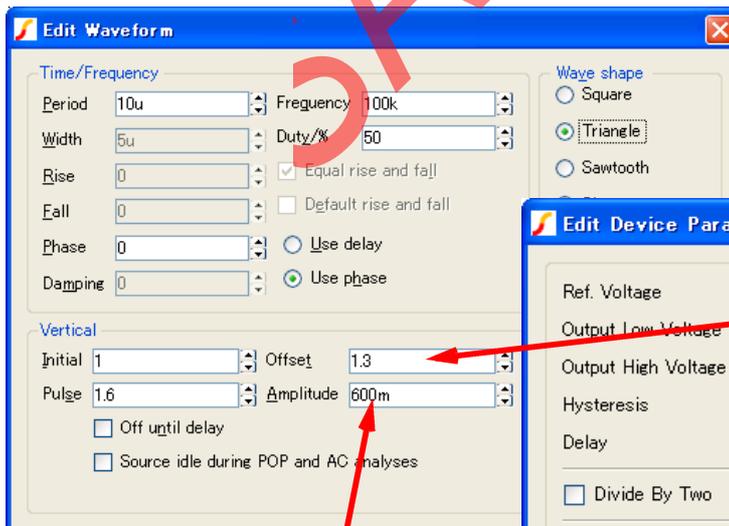
制御部分の利得・位相 - 周波数特性をシミュレーション [BackCon\_Cont\_AC\_SIMPLIS]



X1(Parameterised Opamp)の設定 AC出カインピーダンスはDCより小さな値にする

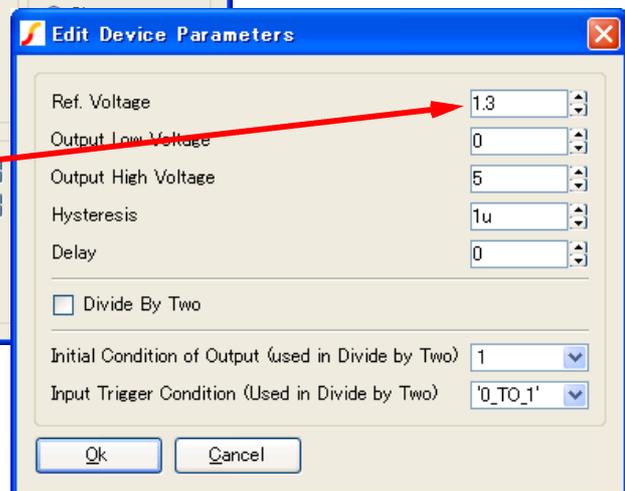


V2の設定



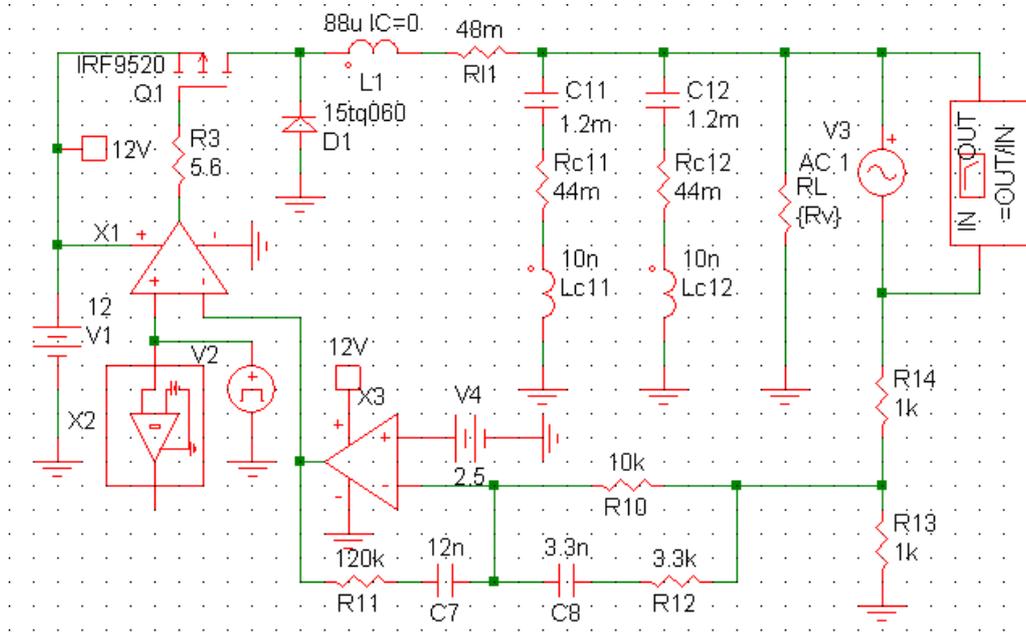
600mVp-p

X2の設定

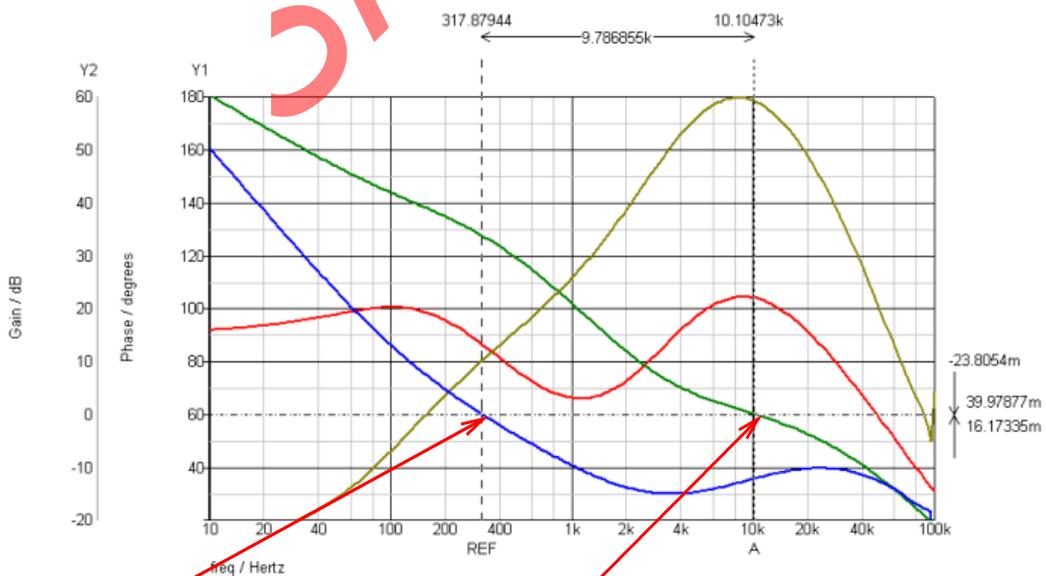
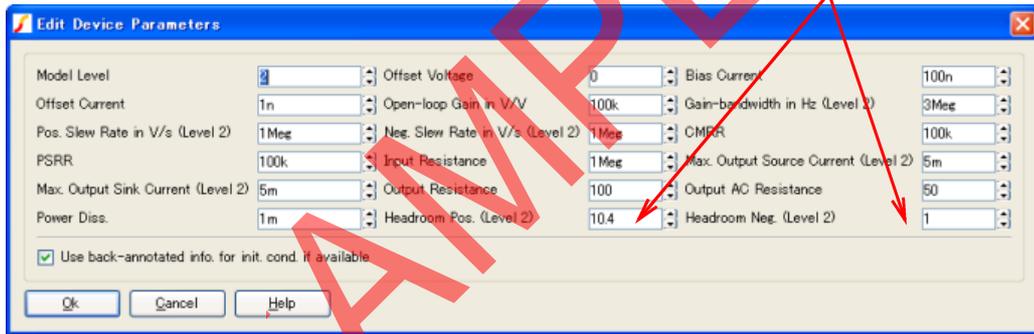


### 6 - 3 負帰還設計結果をシミュレーションで検証

設計した誤差増幅器でループ特性をシミュレーション [BackCon\_Loop\_AC\_SIMPLIS]



X3の設定値、X3の出力電圧範囲がV2の振幅範囲を超えないようにヘッドルームを設定



DCMでは318Hzで位相余裕約80°、CCMでは10.1kHzで位相余裕105°