

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 . LTspiceの使い方	
2 - 1 LTspice のダウンロード	3
2 - 2 使用上の注意	6
2 - 3 回路図の作成方法	8
2 - 4 D C 解析	17
2 - 5 A C 解析	19
2 - 6 過渡解析(Transient Analysis)	21
2 - 7 ステップ解析	25
2 - 8 モンテカルロ解析	28
2 - 9 信号源の種類と使い方	30
2 - 10 モデルライブラリの追加方法	41
2 - 11 LTspiceの解析結果をEXCELで表示するには	46
3 . 各種受動(パッシブ)素子のモデリング	
3 - 1 浮遊成分(回路図には書かれない抵抗・コンデンサ・コイル)	49
3 - 2 抵抗	50
3 - 3 コンデンサ	55
3 - 4 コイル	57
3 - 5 トランス	58
3 - 6 電送線路	64
4 . 各種半導体のモデリング	
4 - 1 ダイオード	70
4 - 2 トランジスタ	75
4 - 3 接合型FET	87

5 . 負帰還技術	
5 - 1 負帰還の概要	9 6
5 - 2 負帰還の動作を数式で表す	9 7
5 - 3 シミュレーションで負帰還の各特性を確認する	9 8
5 - 4 4つの負帰還方式	1 0 1
5 - 5 安定な負帰還を施すために	1 0 2
6 . OPアンプ	
6 - 1 OPアンプ概要	1 0 5
6 - 2 直流特性	1 0 7
6 - 3 交流特性	1 1 0
6 - 4 入力容量の影響	1 1 4
6 - 5 容量負荷の影響	1 1 5
6 - 6 OPアンプ増幅回路の実測値とシミュレーション値の比較	1 1 9
7 . 雑音	
7 - 1 熱雑音	1 2 1
7 - 2 OPアンプで発生する雑音	1 2 3
7 - 3 非反転増幅回路で発生する雑音を計算で求める	1 2 5
8 . 電源回路	
8 - 1 整流回路	1 2 6
8 - 2 リニアレギュレータ	1 3 0
9 . 応用回路	
9 - 1 JFET低雑音増幅器	1 3 6
9 - 2 $\pm 25V4A$ パワーアンプ	1 4 3
9 - 3 FVコンバータを使用したDCモータの回転速度制御	1 5 2

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。

現在下記のSPICEが比較的手軽に入手できます。



LTspice：本セミナーで使用するSPICEです。

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ます。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。CQ出版社の「電子回路シミュレータ LTspice 入門編」および「実践入門編」に付録で収録されています。

「電子回路シミュレータ LTspice 実践入門編」は付録に収録されている日本のディスクリート素子を使用し、ディスクリート回路入門者向けに解説しています。

PSpice：販売元がMicroSim,OrCAD,Cadenceと代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。評価版なので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ります。

Ver9.2の評価版はノード数が64、トランジスタやFETが10個に制限されています。しかしSUBCKTの数の制限がないので簡単なOPアンプのモデルを使用するとOPアンプを数個使用した高次のアクティブ・フィルタなどOPアンプ応用回路のシミュレーションができます。

Ver10の評価版からはSUBCKTの数が2個に制限されました。このため2個以上OPアンプを使用する回路のシミュレーションができなくなりました。代わりにトランジスタFETなどの素子が20個まで使用できるようになったので、ディスクリート回路のシミュレーションにはVer10以降の評価版が適しています。

PSpiceVer9.2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ダウンロードできます。

SIMetrix/SIMPLIS：グラフ機能などはPSpiceに劣りますが、SIMPLISはスイッチング状態でのループ特性がシミュレーションでき、PSpiceにはない優れた特長です。

評価版はCQ出版社の「電子回路シミュレータ SIMetrix/SIMPLISによる高性能電源回路の設計」に付録で収録されています。またSIMetrix社のホームページからもダウンロードできます。

MICRO-Cap：PSpiceと同様な回路シミュレータですが評価版の「パソコン用電子回路シミュレータMicro-Cap7/CQ版」の解説書は他の物に比べ非常に詳しく、充実しています。

2. LTspiceの使い方

2 - 1 LTspiceのダウンロード と 初期設定

Google で Linear Technology を検索



LTspice をダウンロード



LTspice はリニアテクノロジーのホームページから無料でダウンロードできます。無料ですが回路規模の制限がないので自宅で回路の勉強するには最適なSPICEです。リニアテクノロジーの精密にモデリングされたOPアンプやスイッチング電源用のICがライブラリに収納されているので当然ながらリニアテクノロジーのICの評価にも便利です。

3. 各種受動(パッシブ)素子のモデリング

3-1 浮遊成分(回路図には書かれない抵抗・コンデンサ・コイル)

電子回路を実現するには各種部品をプリント基板に実装し、複数のプリント基板をリード線で接続します。このときプリントパターンやリード線には**直流抵抗**や**浮遊容量**と呼ばれるコンデンサ成分、そして**浮遊インダクタンス**と呼ばれるインダクタ成分が発生します。しかしこれらの成分は特殊な場合を除き、回路図に書かれることはありません。

実際の回路が動作するときには当然ながらこれらの成分が回路動作に大きな影響を与えることがあります。したがって影響する場合はシミュレーション回路にこれらを設定しなくては実際の動作と等価のシミュレーション結果が得られません。

実際の電子回路のこれらの成分をシミュレーション回路に正確に全てを盛り込むことは冗長でありまた不可能です。したがって浮遊成分が回路動作に影響を与える箇所がある場合はこれを見抜き、シミュレーション回路に盛り込むスキルが必要です。

軟銅単線の直流抵抗

$$R(\text{ }/m) = \frac{0.022}{d^2}$$

d: 直径(mm)
直径1mm長さ10cmでは約1.7m。

プリントパターンの直流抵抗(銅箔35umの場合)

$$R(m) = \frac{l}{W} \times 0.5$$

W: 幅(mm) l: 長さ(mm)
幅1mm長さ10cmでは約5m。

導線間の容量

$$C(pF/cm) = \frac{K \times 0.555}{\cosh^{-1}(\frac{l}{d})}$$

K: 比誘電率 l: 線間(mm) d: 直径
直径1mm、線間1.4mm、長さ10cmでは約6.3pF

プリントパターン間の容量

$$C(pF) = \frac{K \times A}{11.3 \times d}$$

A: 面積(cm²) K: 比誘電率 d: 距離(cm)
K: 4.73の基板の場合、1mm²では0.026pF、1cm²では2.6pF。

導線のインダクタンス

$$L(uH) = 2 \times 10^{-4} \times l \times [2.3 \log(\frac{4l}{d}) - 0.75]$$

d: 直径(mm) l: 長さ(mm)
直径0.5mm、長さ5mmでは約3nH

プリントパターンのインダクタンス

$$L(uH) = 0.0002 \times l [\ln \frac{2L}{(W+H)} + 0.2235 (\frac{W+H}{L}) + 0.5]$$

W: 幅(mm)
l: 長さ(mm)
H: 厚さ(um)
W: 1mm、H: 35um、l: 10mmでは約7nH

4 各種半導体のモデリング

4 - 1 ダイオード

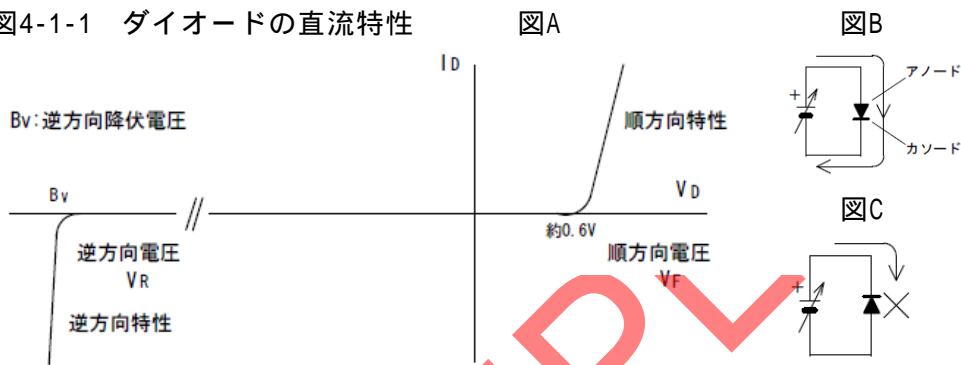
ダイオードの基本動作

ダイオードの基本動作は電流を片方向にだけ流すことです。

ダイオードの電流 - 電圧特性グラフを下記に示します。図Aの右半分はダイオードに電圧を下図Bの方向に印加した場合の特性で順方向特性と呼ばれ電流が流れます。そして左半分は下図Cの方向で電圧を印加した場合の逆方向特性で電流が流れません。

ダイオードの種類によって若干電圧値は異なりますが順方向では0.6V程度以上電圧を加えると急激に電流が流れ始めます。また逆方向でもダイオードの逆耐電圧(B_V)を超えると急激に電流が流れ、そのまま放置するとダイオードが破壊してしまいます。

図4-1-1 ダイオードの直流特性



このようにダイオードは印加した電圧に比例した電流が流れず、印加電圧(V_D)に対し流れる電流(I_D)特性が上図のようになり、**非線形素子**と呼ばれます。

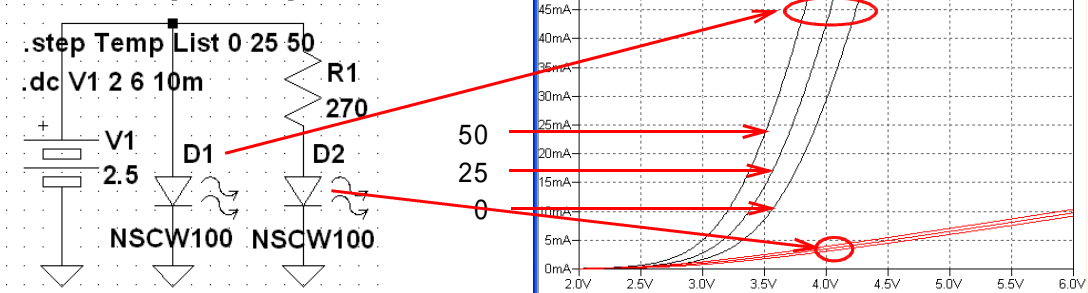
抵抗や電球などは印加した電圧に比例した電流が流れるので線形素子です。したがって電球の場合には多少電圧が変動しても流れる電流の変動の割合が電圧と同じ量になり直接電圧を印加して使用できます。

一方ダイオードの場合には0.6V付近を超えると急激に電流が流れ始め、電圧の変動に対し電流の変動がとて大きく、また温度により0.6V付近の変曲点の変動が不安定です。

発光ダイオード(LED)も同様な特性を持ちます。このためLEDを出力インピーダンスの低い、電圧源で点灯させるときには、多少の電圧の変動があっても電流が急激に変化しないように下図に示す抵抗(R_1)を直列に挿入して使用します。

抵抗がない場合、25、3.5Vで14mAの電流が流れています。グラフの傾きが急なため電圧が僅かに変動しただけで電流が急変します。また電圧が3.5Vで一定であっても温度が変動すると電流も大きく変動してしまいます。これに対し270の抵抗を挿入すると、温度変動や電圧の変動があっても電流の変動は小さく抑えられます。

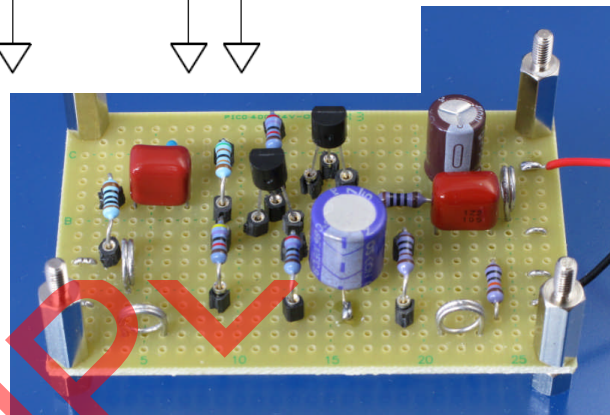
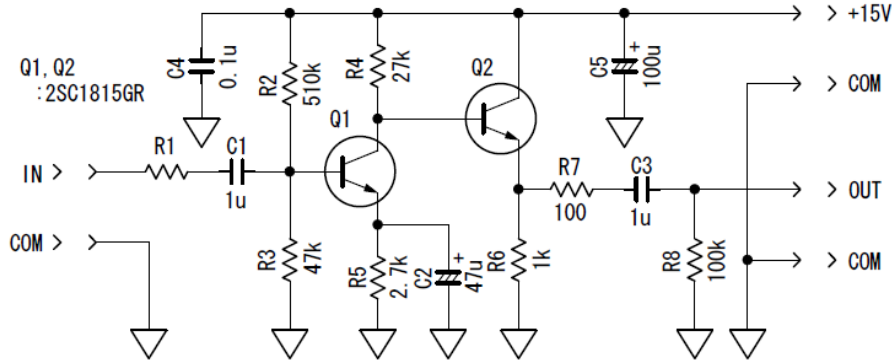
LEDの駆動 [LED_Drv] 図4-1-2



・モデリングしたBJTの検証

小信号用トランジスタ2SC1815GRをモデリングし、シミュレーションと実際の試作回路の特性を比較してみました。下記が設計した回路とその写真です。

2SC1815GRモデリングの検証回路



作成したトランジスタモデルの検証が目的なのでトランジスタの接合容量の影響が出やすい回路にしました。

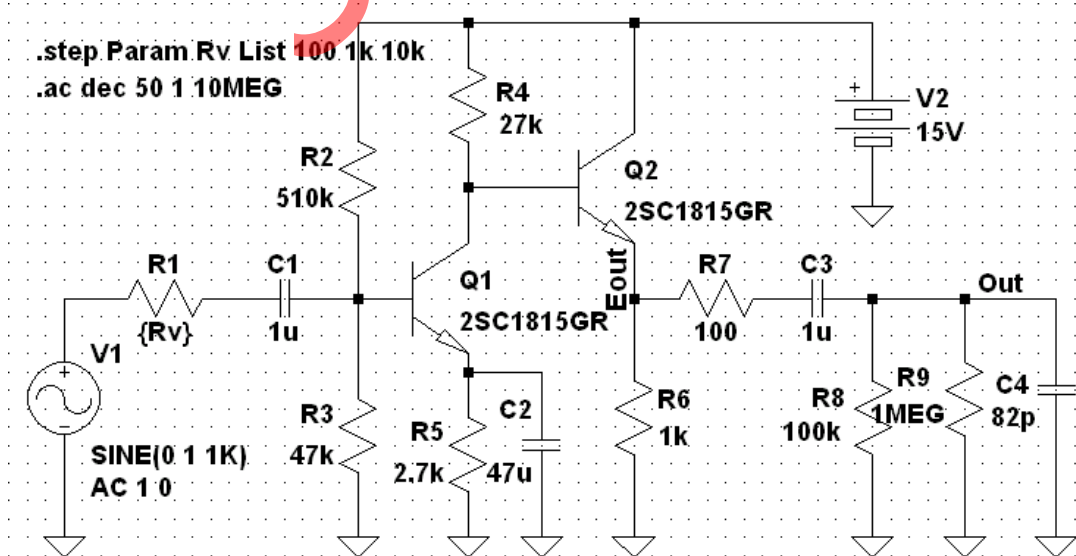
このためC2を挿入し、部分帰還を排除しています。こうすると交流利得が裸のトランジスタ特性で決定されます。また負荷の計測器による浮遊容量の影響を避けるためにQ2のエミッタ・フォロア回路を挿入しました。R7は容量負荷によりQ2がパラシティック発振するのを防いでいます。

直流動作点としてはQ2のエミッタ電位が電源電圧の半分の7.5V、Q1のコレクタ電流が250 μ Aになるように定数を設計しました。

作成したトランジスタモデル

```
.model Q2SC1815GR NPN(Is=10f Bf=283 Ikf=3 Nk=1.5Br=5 Vaf=100↓
+ Rc=1 Re=0.01 RB=10 Tr=5n Tf=500p↓
+ Cjc=5p Vjc=0.2 Mjc=0.2 Cje=15p Vje=0.75 Mje=0.33)↓
```

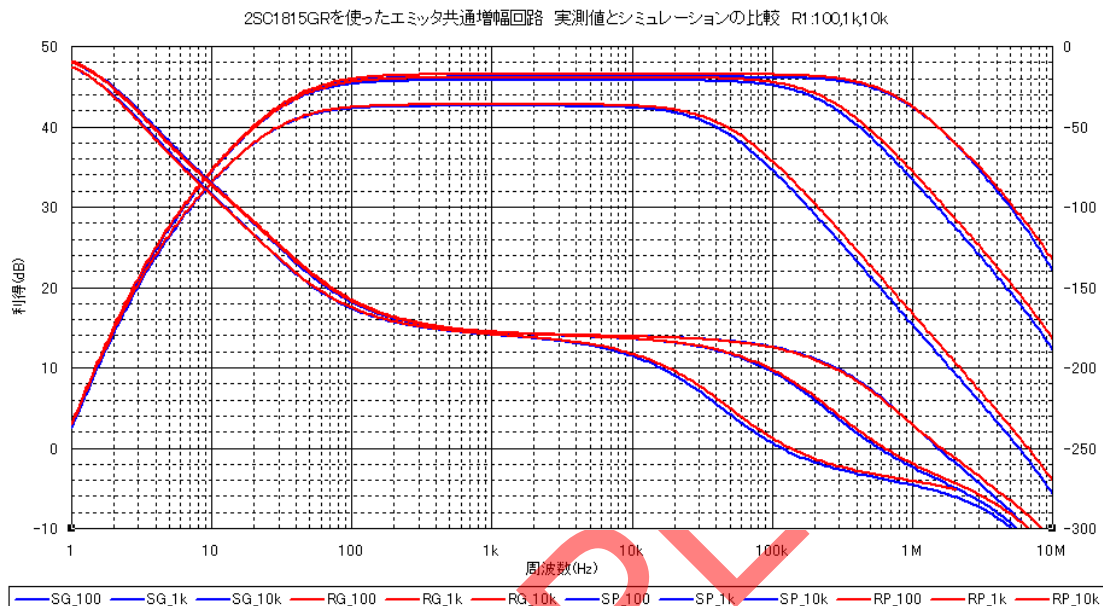
AC解析のためのシミュレーション回路



高域の遮断周波数に一番影響を及ぼすのがQ1のCjc(ベース - コレクタ間容量)が利得倍される、ミラー効果による入力容量です。この入力容量と信号源抵抗でほぼ高域遮断周波数が決定されます。この影響を調べるためにR1を挿入し、その値を100 1k 10k に変化させ、利得 - 周波数特性の変化を調べます。

R9,C4は計測器の入力抵抗と浮遊容量をモデルしています。

実測値とシミュレーションの比較



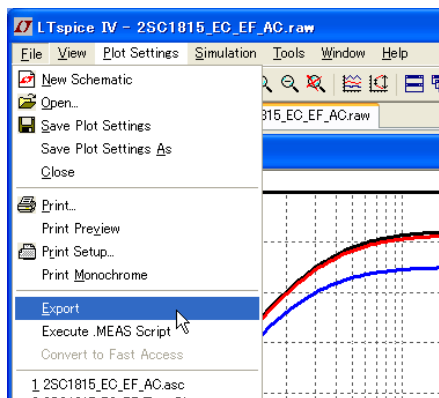
AC解析で得られた特性の数値での比較

	実測値		シミュレーション	
	Gain(at1kHz)	fc(-3dB)	Gain(at1kHz)	fc(-3dB)
R1 100	46.43dB	775kHz	46.18dB	854kHz
R1 1k	46.01dB	270kHz	45.79dB	249kHz
R1 10k	42.62dB	49.34kHz	42.58dB	43.74kHz

上図が利得・位相 - 周波数特性の比較グラフ、そして上表が数値での比較です。

低域の遮断周波数はR5とC2、そして入出力のデカップリング・コンデンサC1,C3の受動素子で決定されるためシミュレーションの値と実測値とがうまく一致します。

高域の遮断周波数は主にR1とQ1の入力容量で決定され、モデリングした浮遊容量の正確さが判断できます。R1が10k のときが一番乖離が大きいですですがそれでも誤差13%程度なので素子のバラツキを考えれば実用的には十分かと思えます。

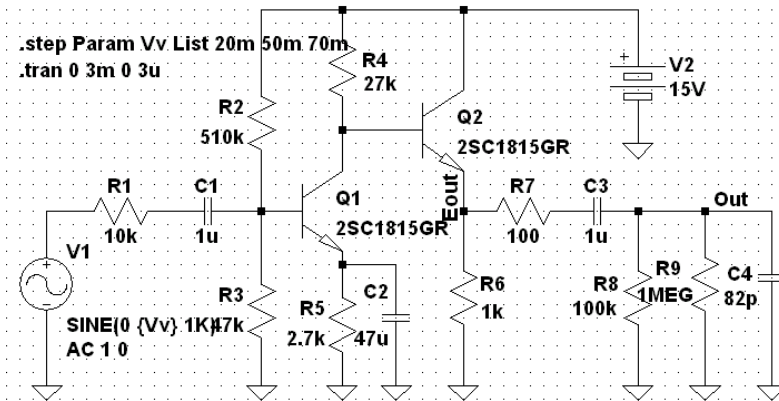


LTspiceは左図に示すようにグラフ画面を選択状態にして [File] [Export] を選択すると解析結果をテキストデータに変換することができます。

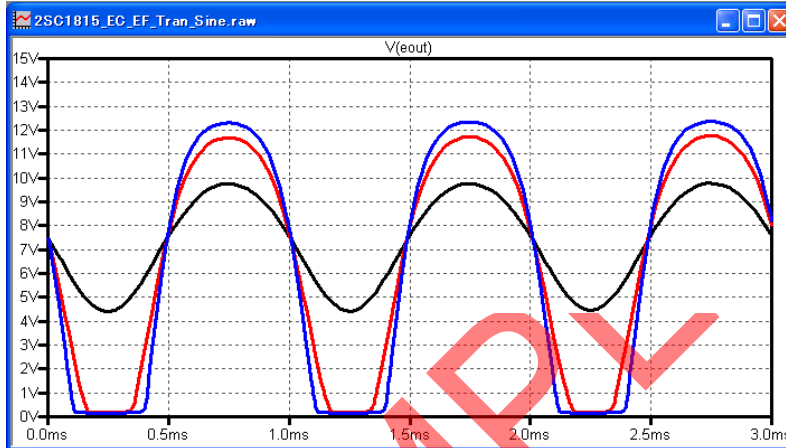
しかし残念ながらこのテキストデータは直接EXCELで読み込むことができません。

アナログナレッジのホームページのお役立ち実験室のお役立ちソフトにLTspiceで作成したテキストデータをEXCELで読み込むことができるCSVファイルコンバータがダウンロードできますのでご利用ください。

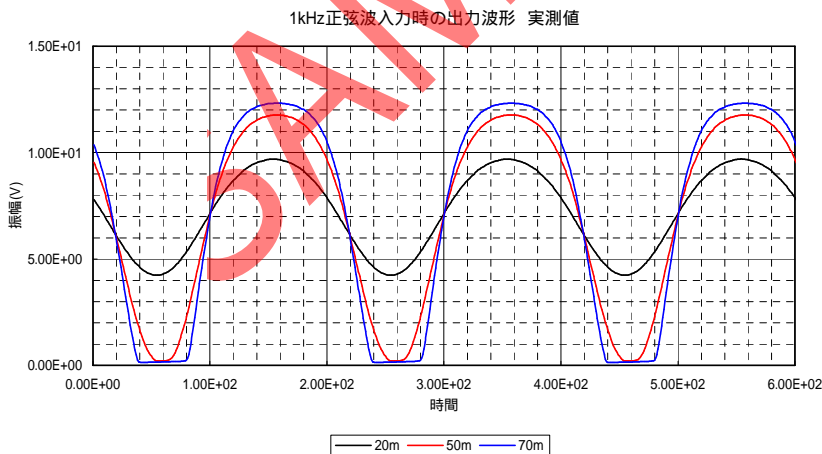
過渡解析のためのシミュレーション回路 正弦波信号入力



1kHz正弦波入力時の出力波形シミュレーション結果 V1:20mV, 50mV, 70mV



1kHz正弦波入力時の出力波形実測値 入力電圧:20mV, 50mV, 70mV0-p



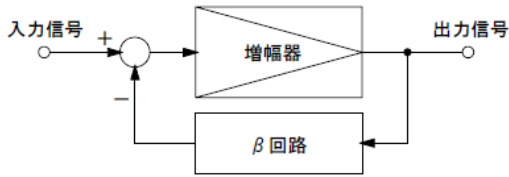
上図は1kHzの正弦波20mV, 50mV, 70mV0-pを入力したとき、Q2のエミッタで観測した出力波形の様子です。下図はデジタルオシロで観測した波形をエクセルに取り込み、グラフ化したものです。X軸の数値はデータ点数で100点が500usになっています。

エミッタ共通増幅回路では入力電圧に対してコレクタ電流が指数的に変化します。このためコレクタ電流の大きい下側の波形は利得が大きくなり、コレクタ電流が少ない上側の波形は利得が少なくなります。この結果出力波形が大きくなると偶数次のひずみが大きく目立ってきます。

実測波形とシミュレーション波形では下側の波形クリップの様子が若干異なっていますが全体的には似た波形になっています。

5 負帰還技術

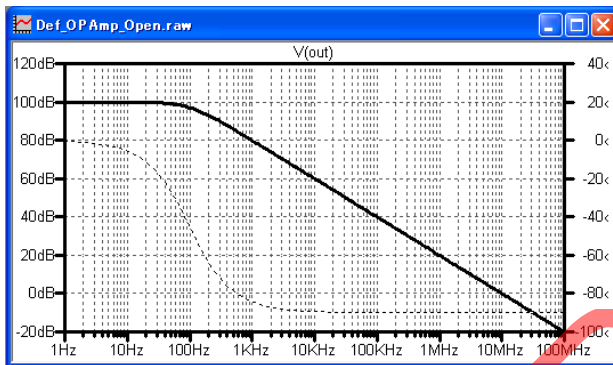
5 - 1 負帰還の概要



負帰還は左図に示すように増幅器の出力信号を回路を通して入力に戻し、入力信号との差を増幅し、増幅器の出力波形を入力波形により忠実に増幅する手法です。

この負帰還をOPアンプを使って実際の回路に書き直したのが下図の非反転増幅器と反転増幅器です。このように通常回路は抵抗等の受動素子による分圧回路で構成されます。

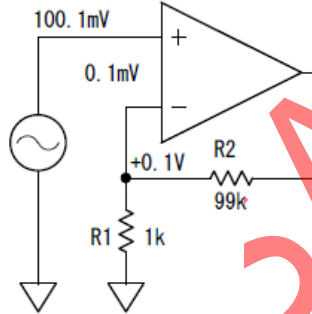
説明で使用するOPアンプの負帰還を施さないときの裸利得 - 周波数特性



直流利得 100dB 100,000倍
 -3dB低下周波数 100Hz
 1kHzでの利得 80dB 10,000倍
 100kHzでの利得 40dB 100倍
 GainBandWidth(利得帯域幅積) 10MHz
 高域遮断周波数 $GBW \div \text{設定利得}$

非反転増幅器

回路各部分の電圧は出力電圧が直流+10Vのときの値

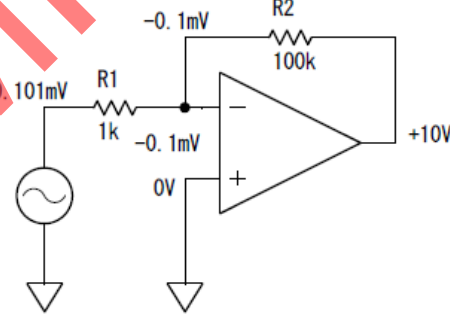


出力電圧を利得で割ったのが+入力間の電圧

$$\text{利得} = \frac{+10\text{V}}{100.1\text{mV}} = 99.9000999 \approx 100 = \frac{R1+R2}{R1}$$

反転増幅器

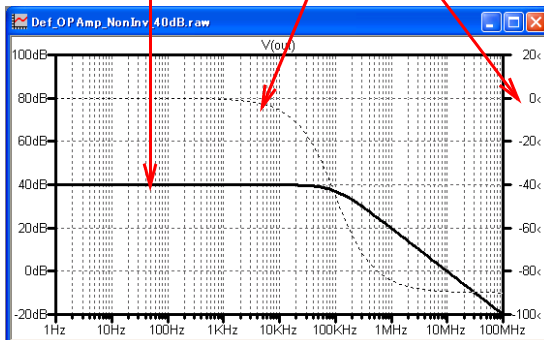
100.001uA



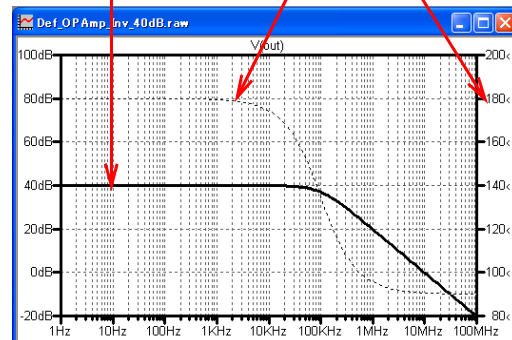
$10\text{V} \div 100,000 = 0.1\text{mV}$

$$\text{利得} = \frac{+10\text{V}}{-100.101\text{mV}} = -99.89910191 \approx -100 = -\frac{R2}{R1}$$

Gain Phase 0°

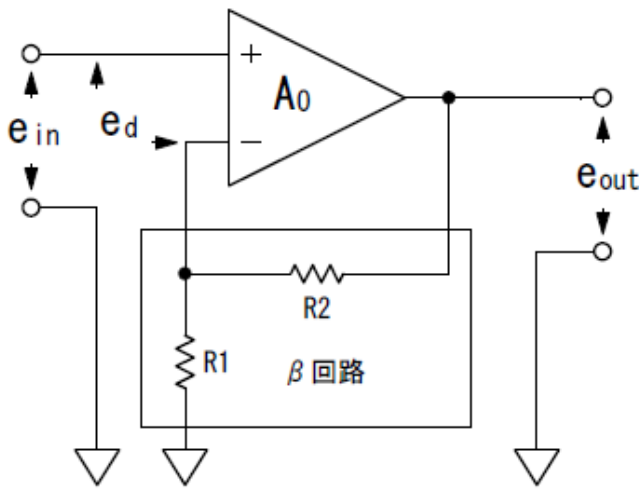


Gain Phase 180°



5 - 2 負帰還の動作を数式で表す

e_{in} :入力電圧 e_d :OPアンプの±入力間電圧 e_{out} :出力電圧



$$e_d = e_{in} - e_{out}$$

$$e_d \cdot A_o = e_{out}$$

上2式より

$$(e_{in} - e_{out}) \cdot A_o = e_{out}$$

$$e_{out} = \frac{A_o}{1 + A_o} \times e_{in}$$

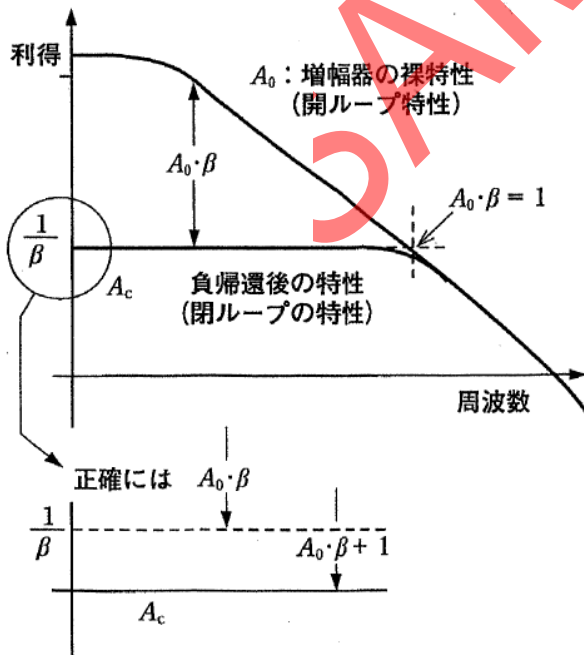
$$A_c = \frac{A_o}{1 + A_o}$$

$$A_o \gg 1 \text{ ならば } e_{out} \approx \frac{e_{in}}{1 + \frac{R_2}{R_1}}$$

$$= \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

A_o :増幅器の裸利得(開ループ利得) $\frac{R_2}{R_1}$:回路の利得(帰還率)
 A_c :仕上がり利得(閉ループ利得) $1 + A_o \cdot \frac{R_2}{R_1}$:負帰還量 A_o :ループ利得

上式が示すように負帰還を施すと、利得が負帰還量だけ減衰します。
 そのかわり、 $A_o \gg 1$ の場合には利得が A_o によらず $\frac{R_1}{R_1 + R_2}$ によって決定されます。



A_o は半導体等の能動素子によって決定される利得のために周囲温度により値が変動したり、非直線性(歪み)が多く含まれます。

一方 $\frac{R_2}{R_1}$ は抵抗等の受動素子によって決定される分圧比のため、周囲温度による変動や非直線性が極僅かしかありません。

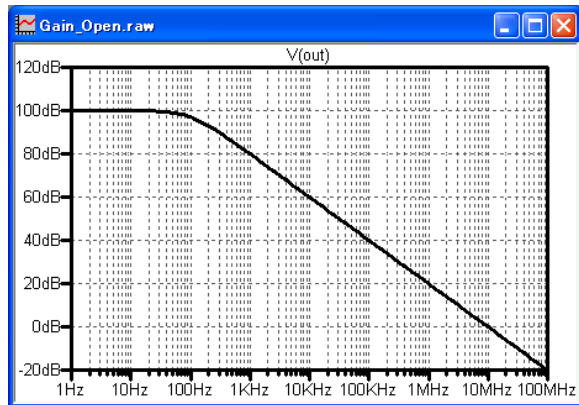
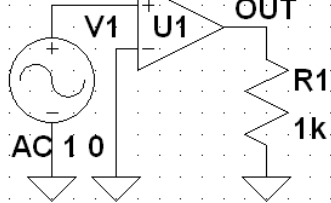
したがって負帰還を施すと回路の特性が安定な $\frac{R_1}{R_1 + R_2}$ によって決定されるため、利得の変動や歪みが A_o の量に比例して改善されます。

また負帰還の方式により、入力インピーダンスや出力インピーダンスが A_o の量に比例して変化します。

5 - 3 シミュレーションで負帰還の各特性を確認する

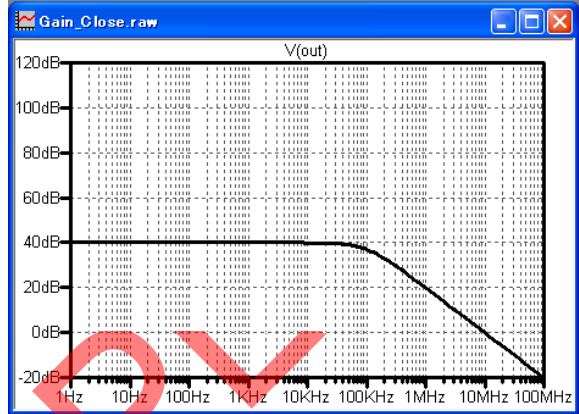
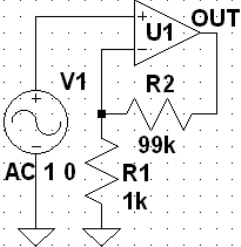
- A_o : 増幅器の裸利得 (開ループ利得) [Gain_Open]

.LIB opamp.sub
.ac dec 25 1 100MEG



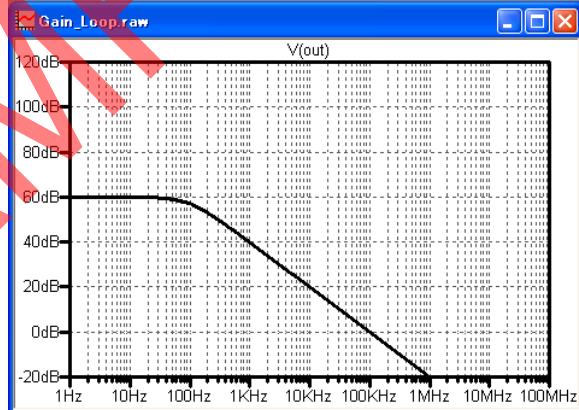
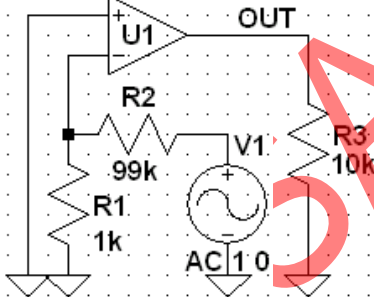
- A_c : 仕上がり利得 (閉ループ利得) [Gain_Close]

.LIB opamp.sub
.ac dec 25 1 100MEG



- $A_{o\cdot}$: ループ利得 [Gain_Loop]

.LIB opamp.sub
.ac dec 25 1 100MEG



- 開ループ利得 A_o
- ループ利得 $A_{o\cdot}$
(正確には $1 + A_{o\cdot}$)
- 閉ループ利得 A_c

