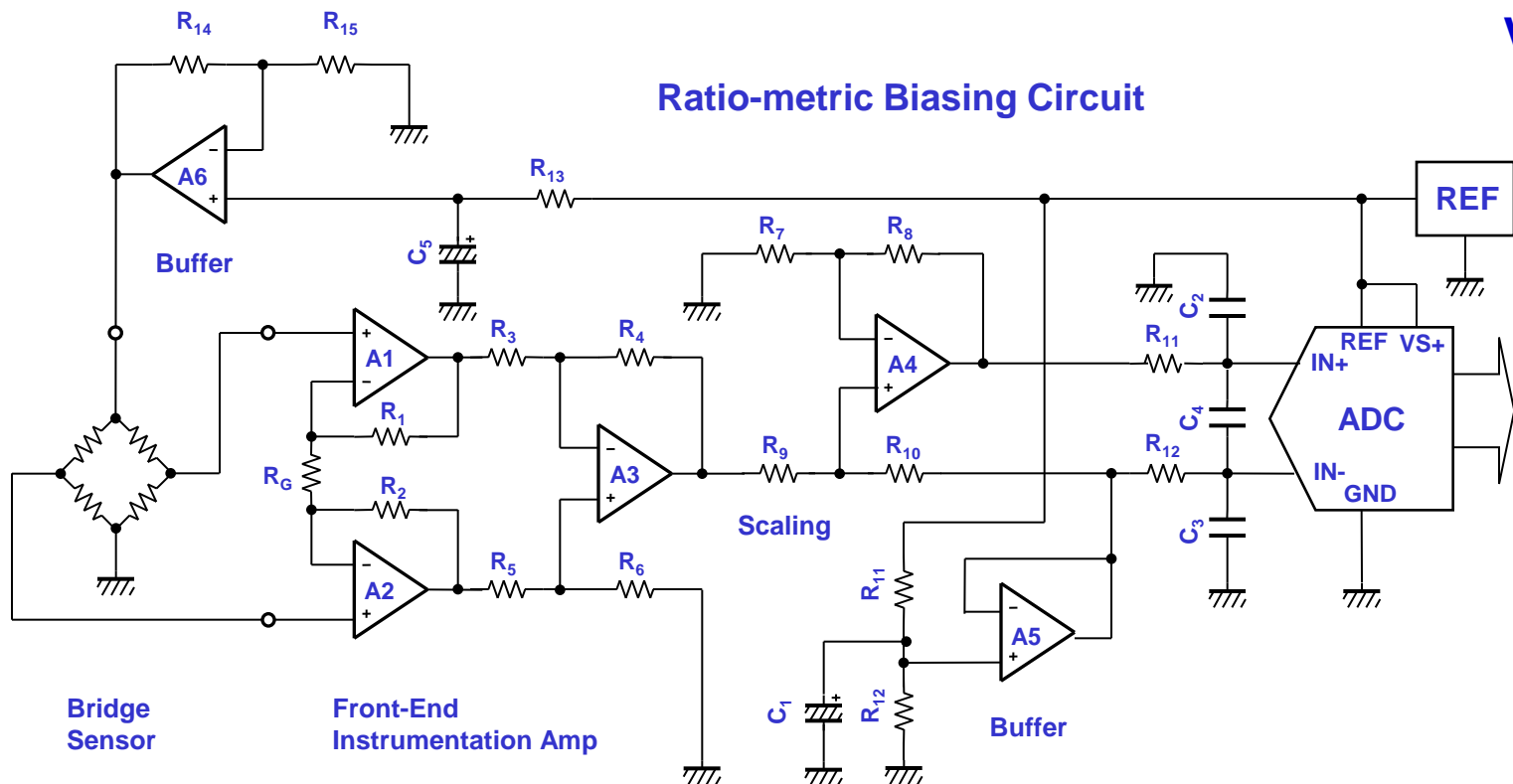


Let's learn Signal Chain

セッション 5 : オペアンプ性能のシミュレーション(前半)

Ver.-2



セッション・インデックス(前半)

✦ S5.1 入力部:DC性能のシミュレーション

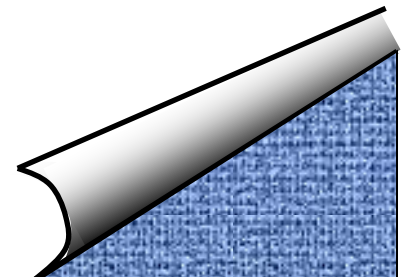
- (1) 入力バイアス電流 I_B ・オフセット電流 I_{Os}
- (2) 入力オフセット電圧 V_{Os}

✦ S5.2 入力部:AC性能のシミュレーション

- (1) 同相モード・ゲイン対周波数
- (2) CMR(同相モード除去)対周波数を見る

✦ S5.3 ゲイン段:AC性能のシミュレーション

- (1) 反転アンプの周波数特性
- (2) 反転アンプのゲイン 対 周波数特性
- (3) 反転アンプの位相 対 周波数
- (4) 波形で見る位相シフト
- (5) 反転アンプのゲイン 対 位相特性
- (6) 開ループ・ゲインを見る



✚ S5.1 入力部:DC性能のシミュレーション

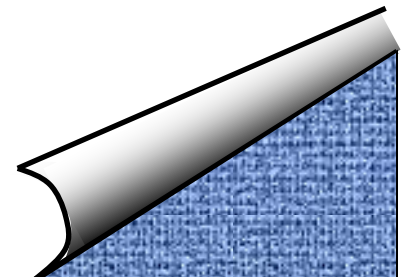
- (1)入力バイアス電流 I_B ・オフセット電流 I_{OS}
- (2)入力オフセット電圧 V_{OS}

✚ S5.2 入力部:AC性能のシミュレーション

- (1)同相モード・ゲイン対周波数
- (2)CMR(同相モード除去)対周波数を見る

✚ S5.3 ゲイン段:AC性能のシミュレーション

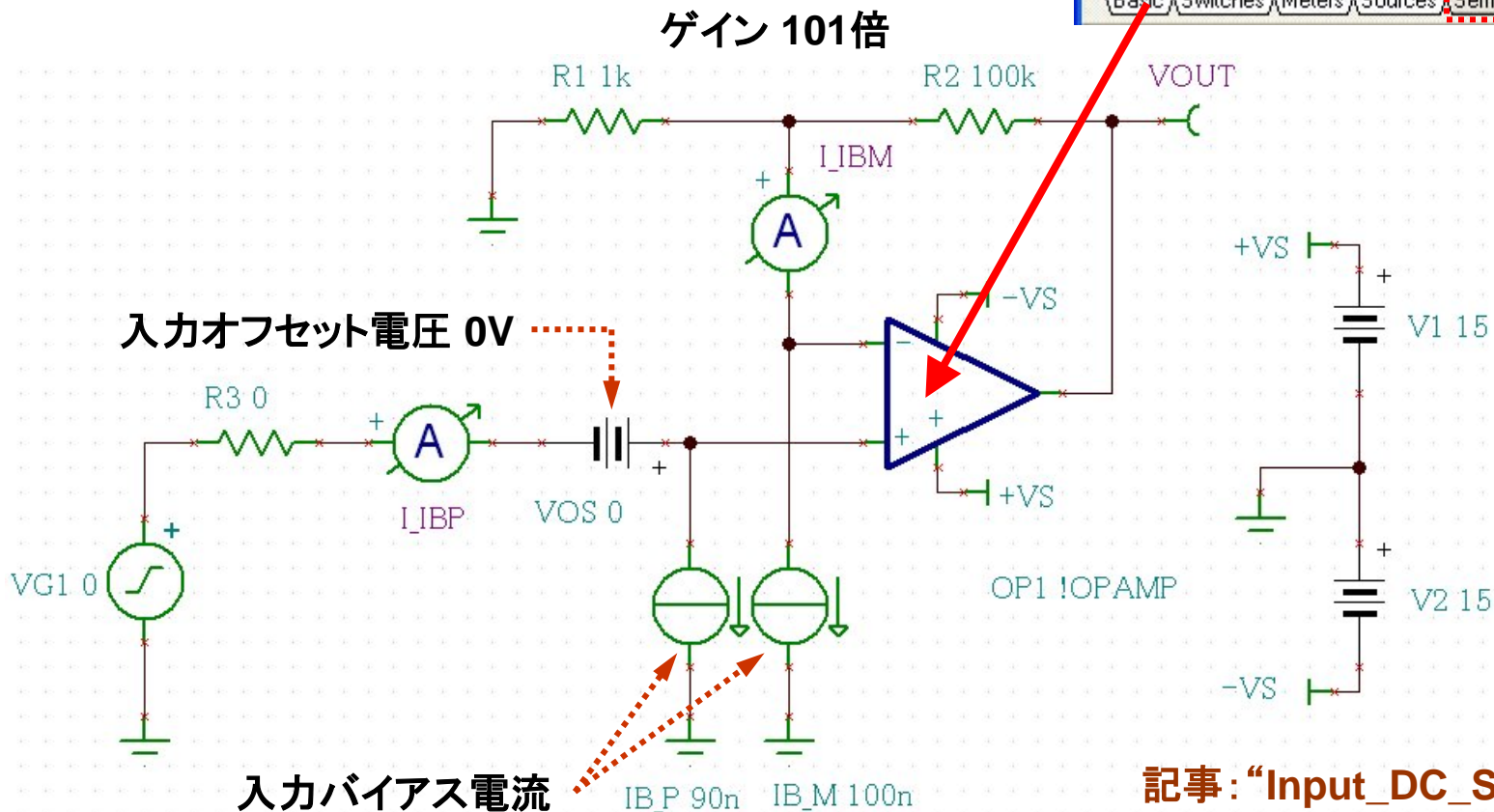
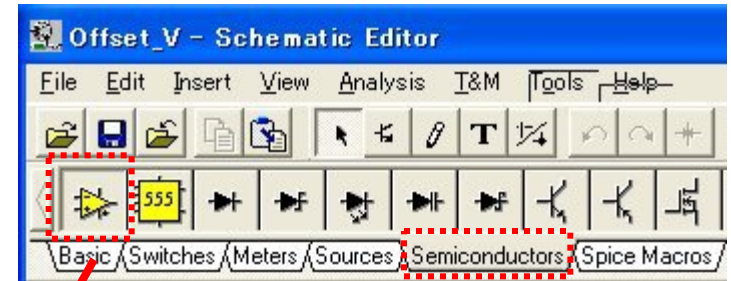
- (1)反転アンプの周波数特性
- (2)反転アンプのゲイン 対 周波数特性
- (3)反転アンプの位相 対 周波数
- (4)波形で見る位相シフト
- (5)反転アンプのゲイン 対 位相特性
- (6)開ループ・ゲインを見る



入力部DC性能のシミュレーション: 評価回路

下図の回路を作成してください。

オペアンプは、“Semiconductors”タブにあるオペアンプ選択ボックスのものを使用します。



記事: “Input_DC_Sim” でセーブ

入力バイアス電流 I_B ・オフセット電流 I_{OS} : 解析開始

① “DC Analysis”メニューから
“Table of DC Results”を選択

② 表が出現する

I_IBM	99.999997nA
I_IBP	90.000003nA
I_R1[0,1]	50.349464pA
I_R2[1,7]	-99.949648nA
I_R3[4,8]	1.0E+100A
I_VG1[4,0]	-90.000003nA
VOUT	999.491445uV
VP_1	-5.034946nV
VP_2	15V
VP_3	-15V
VP_4	0V
VP_5	-5.034946nV
VP_6	0V
VP_7	999.491445uV
VP_8	0V
VP_9	0V

③ “Other Voltage”のチェックをはずす。

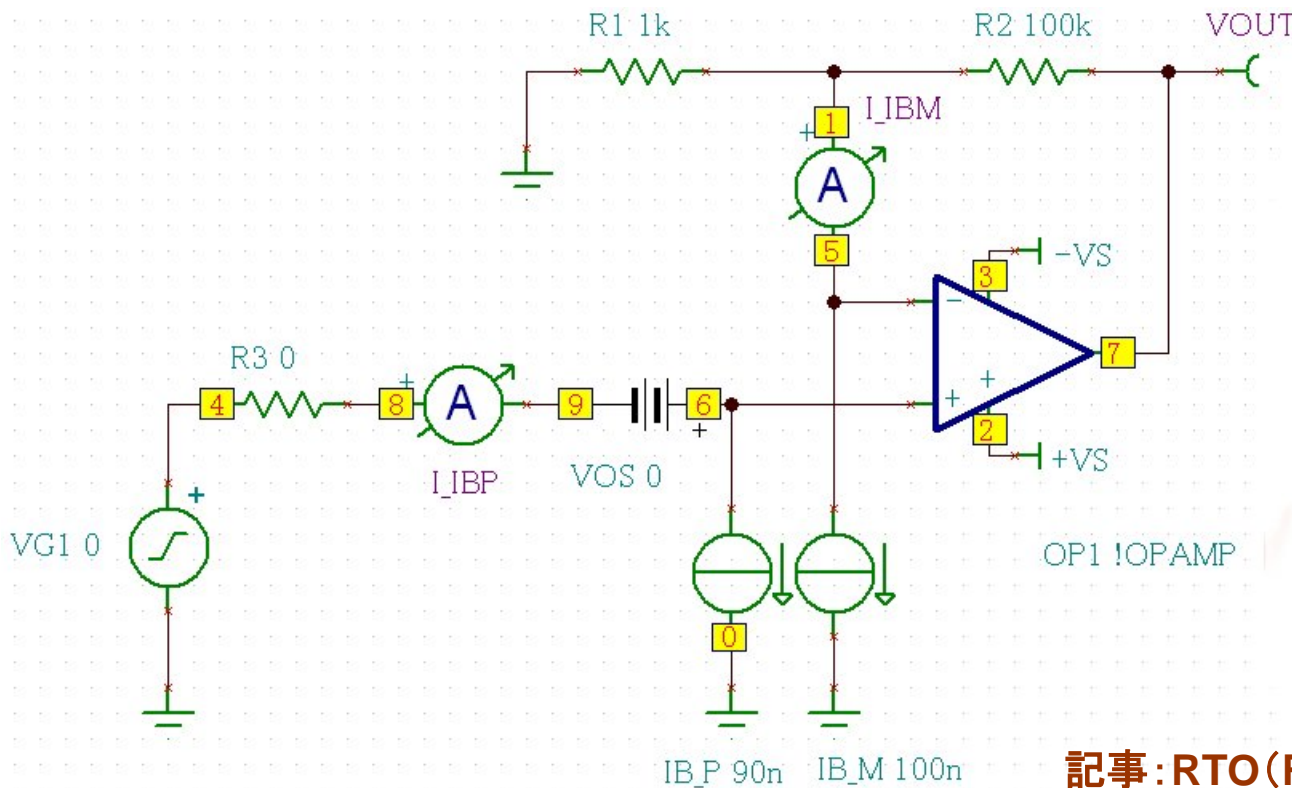
④ 必要に応じて数値を“txt”ファイルで吐き出す。

入力バイアス電流 I_B の影響: 解析結果

入力オフセット電圧0Vにおける出力誤差

入力バイアス電流による誤差 RTO

ゲイン 101倍



Excelで加工した表

Nodes	Values
I_IBM	100nA
I_IBP	90nA
VOUT	9.9949mV
VP_1	-50.0123nV
VP_2	15V
VP_3	-15V
VP_4	0V
VP_5	-50.0123nV
VP_6	0V
VP_7	9.9949mV
VP_8	0V
VP_9	0V

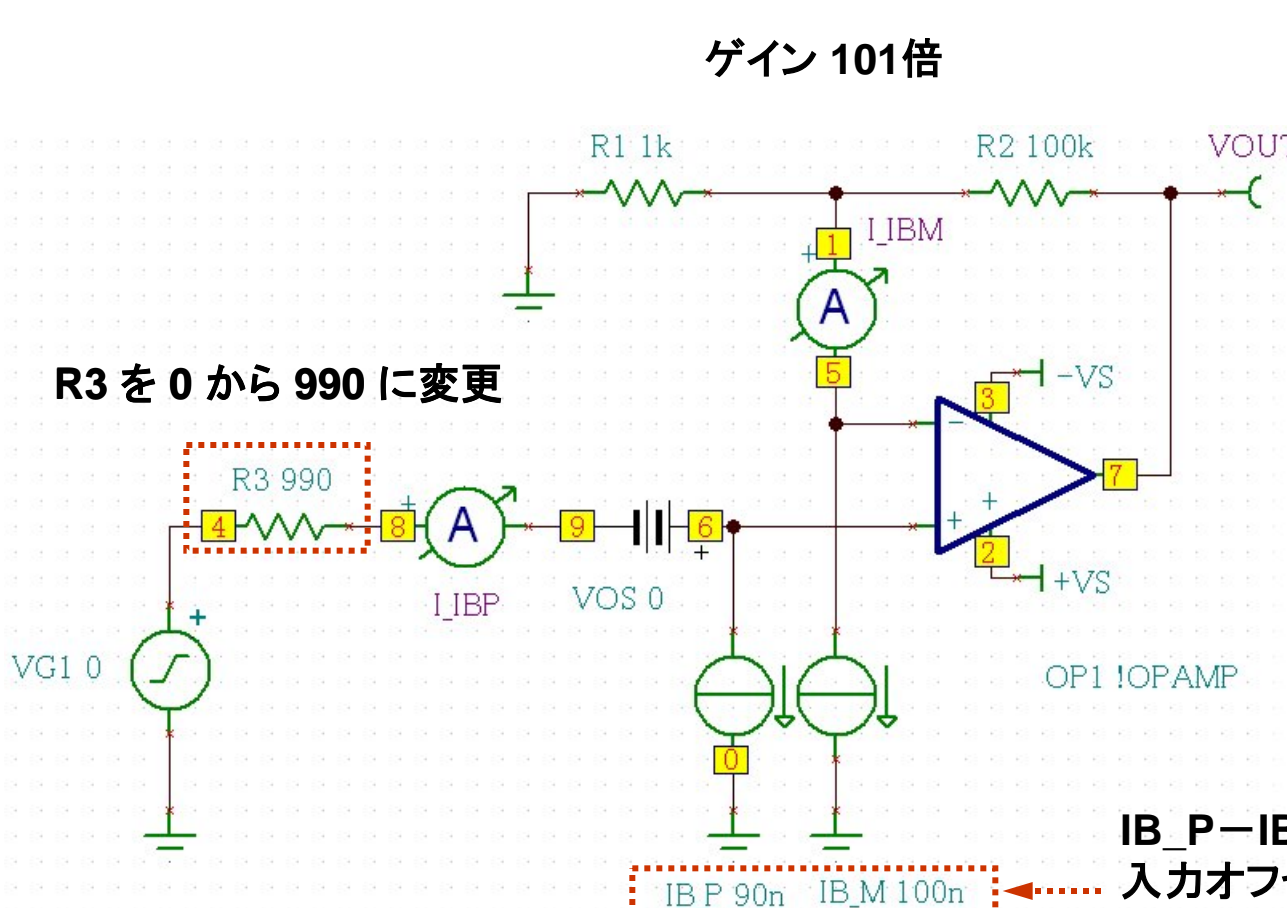
記事: RTO (Refer to Output) = 出力換算

入力バイアス電流 I_B : 軽減抵抗の効果

入力バイアス電流の影響を軽減した結果

R3 990Ω追加による効果 RTO
 残りの誤差成分は入力オフセット電流

ゲイン 101倍



Nodes	Values
I_{IBM}	99.9999nA
I_{IBP}	90nA
VOUT	1.0004mV
VP_1	-89.105uV
VP_2	15V
VP_3	-15V
VP_4	0V
VP_5	-89.105uV
VP_6	-89.1uV
VP_7	1.0004mV
VP_8	-89.1uV
VP_9	-89.1uV

$I_{B_P} - I_{B_M} = -10nA$
 入力オフセット電流

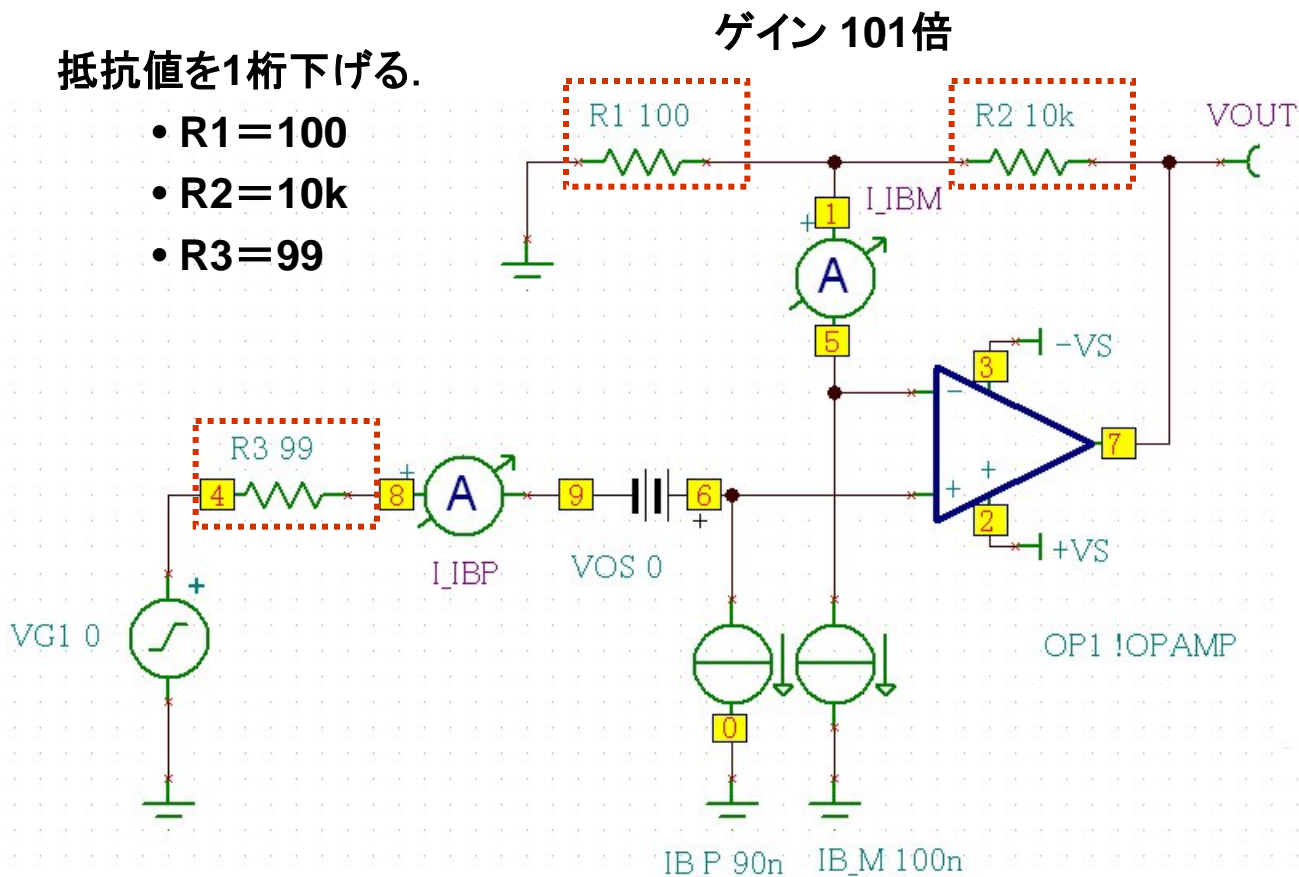
入力バイアス電流 I_B : ゲイン設定抵抗の変更

入力バイアス電流の影響と周辺抵抗の値は比例関係

R1, R2, R3 を1桁下げた効果 RTO

抵抗値を1桁下げる.

- R1=100
- R2=10k
- R3=99



Nodes	Values
I_IBM	100nA
I_IBP	90nA
VOUT	100.039uV
VP_1	-8.9105uV
VP_2	15V
VP_3	-15V
VP_4	0V
VP_5	-8.9105uV
VP_6	-8.91uV
VP_7	100.039uV
VP_8	-8.91uV
VP_9	-8.91uV

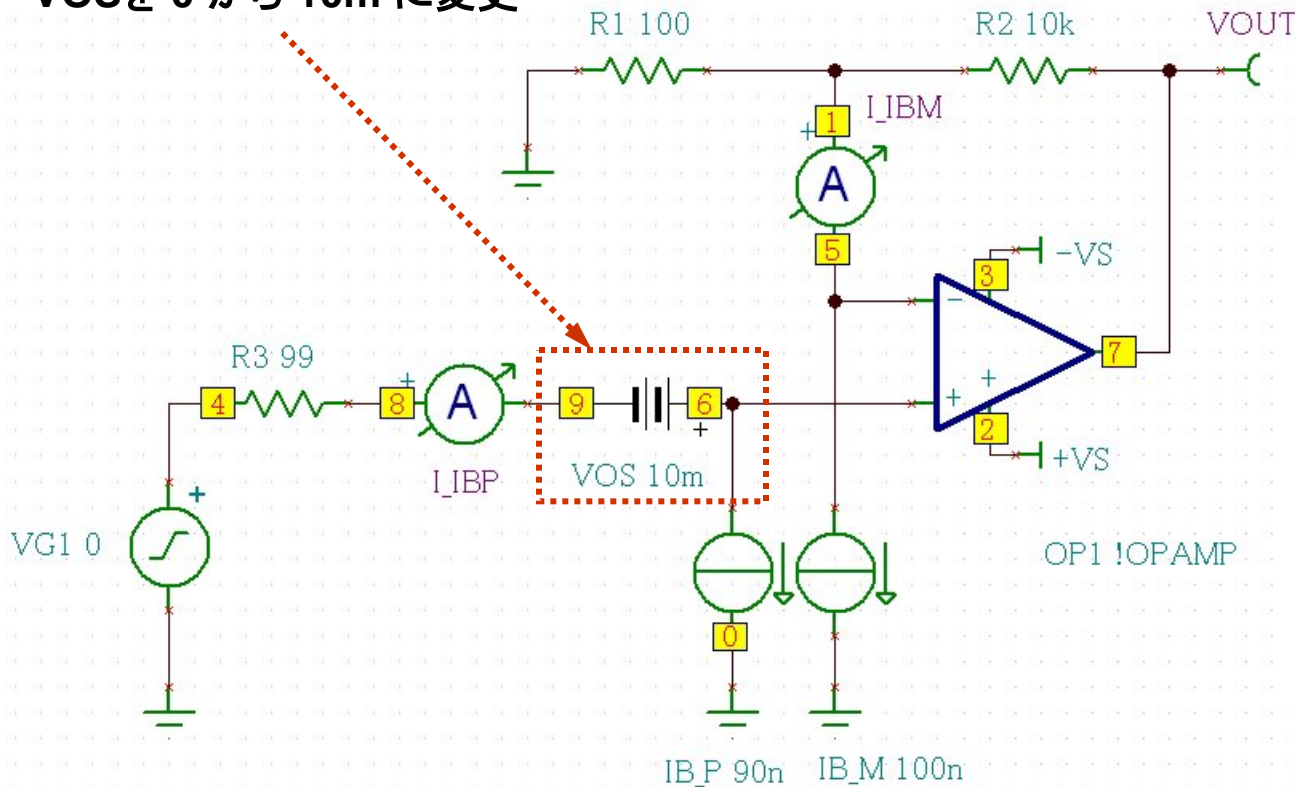
入力オフセット電圧 V_{OS} : $V_{OS} = 10\text{mV}$ を与える

高ゲイン回路では入力オフセット電圧が最も大きな誤差要因

V_{OS} がわずか 10mV でも論外の値となる

オフセット電圧を加える.
VOSを 0 から 10m に変更

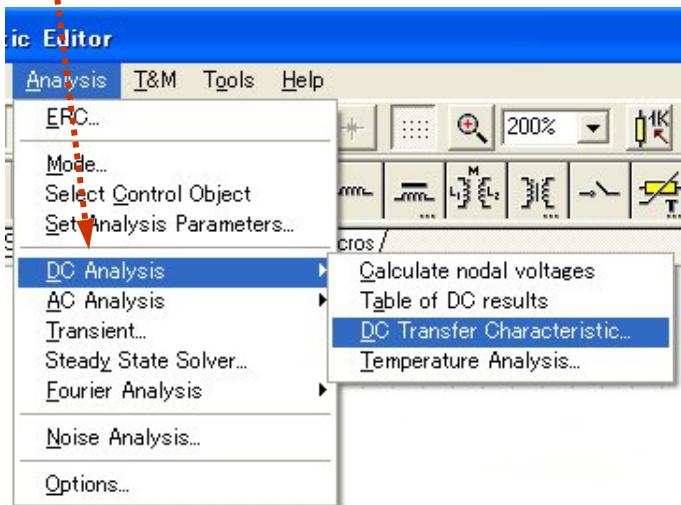
ゲイン 101倍



Nodes	Values
I_IBM	100.0075nA
I_IBP	90.0025nA
VOUT	1.0096V
VP_1	9.986mV
VP_2	15V
VP_3	-15V
VP_4	0V
VP_5	9.986mV
VP_6	9.9911mV
VP_7	1.0096V
VP_8	-8.9103uV
VP_9	-8.9103uV

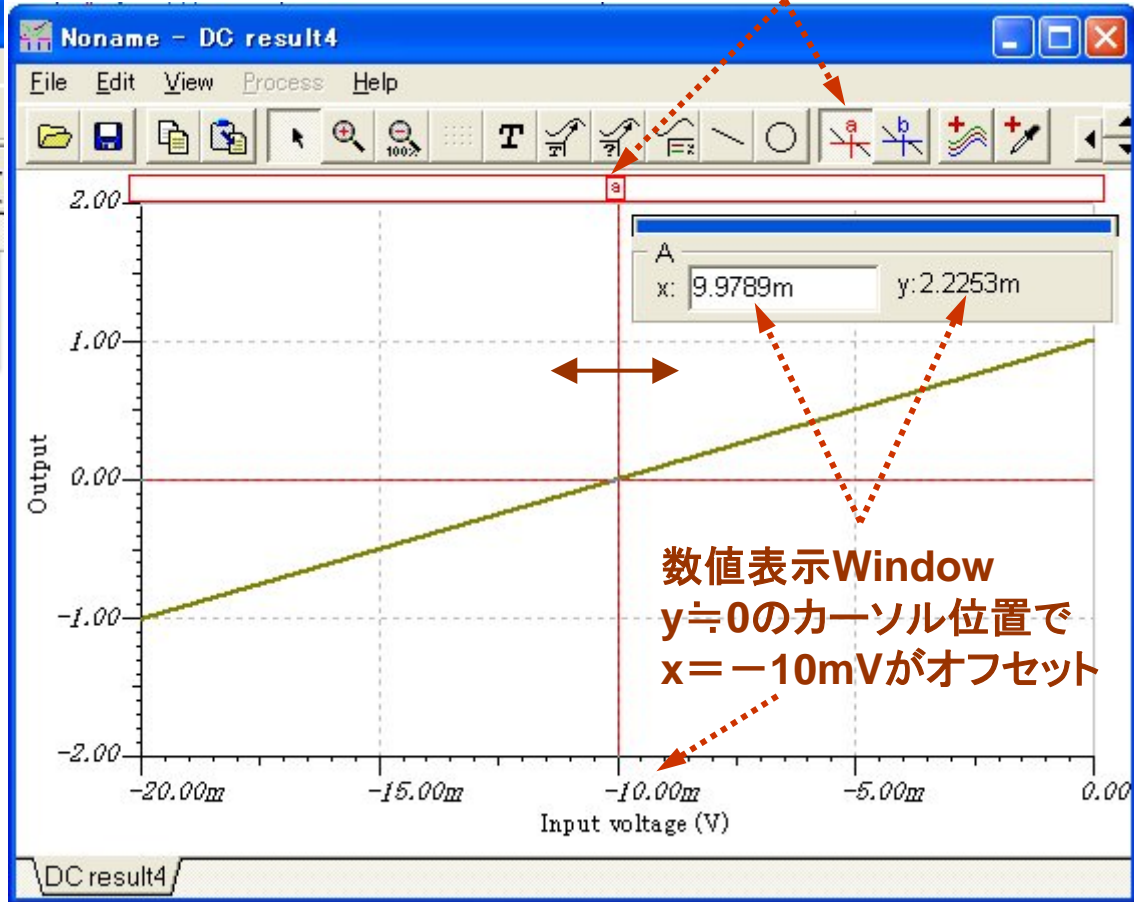
入力オフセット電圧 V_{OS} : 定義に従い V_{OS} を求める

① “DC Analysis” → “DC Transfer Characteristics”

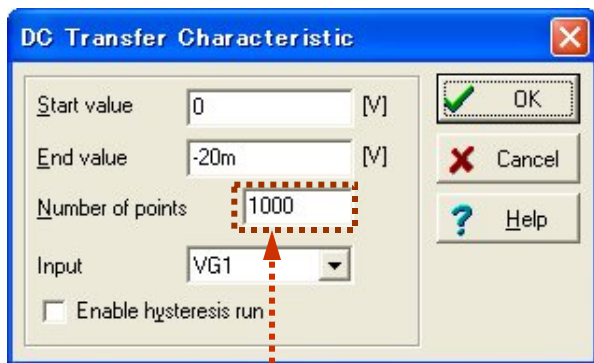


③ 解析結果Window

“a”カーソル・ボタンを押してここをドラッグするとカーソルが動く。



② VG1の設定



..... X軸の解析データ数. 微妙な解析は1000に設定(カーソル移動が滑らかになる).

✚ S5.1 入力部:DC性能のシミュレーション

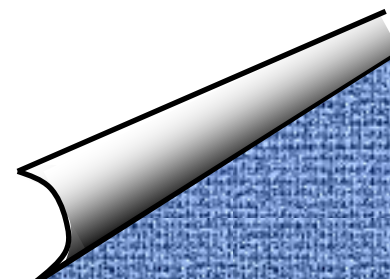
- (1) 入力バイアス電流 I_B ・オフセット電流 I_{OS}
- (2) 入力オフセット電圧 V_{OS}

✚ S5.2 入力部:AC性能のシミュレーション

- (1) 同相モード・ゲイン対周波数
- (2) CMR(同相モード除去)対周波数を見る

✚ S5.3 ゲイン段:AC性能のシミュレーション

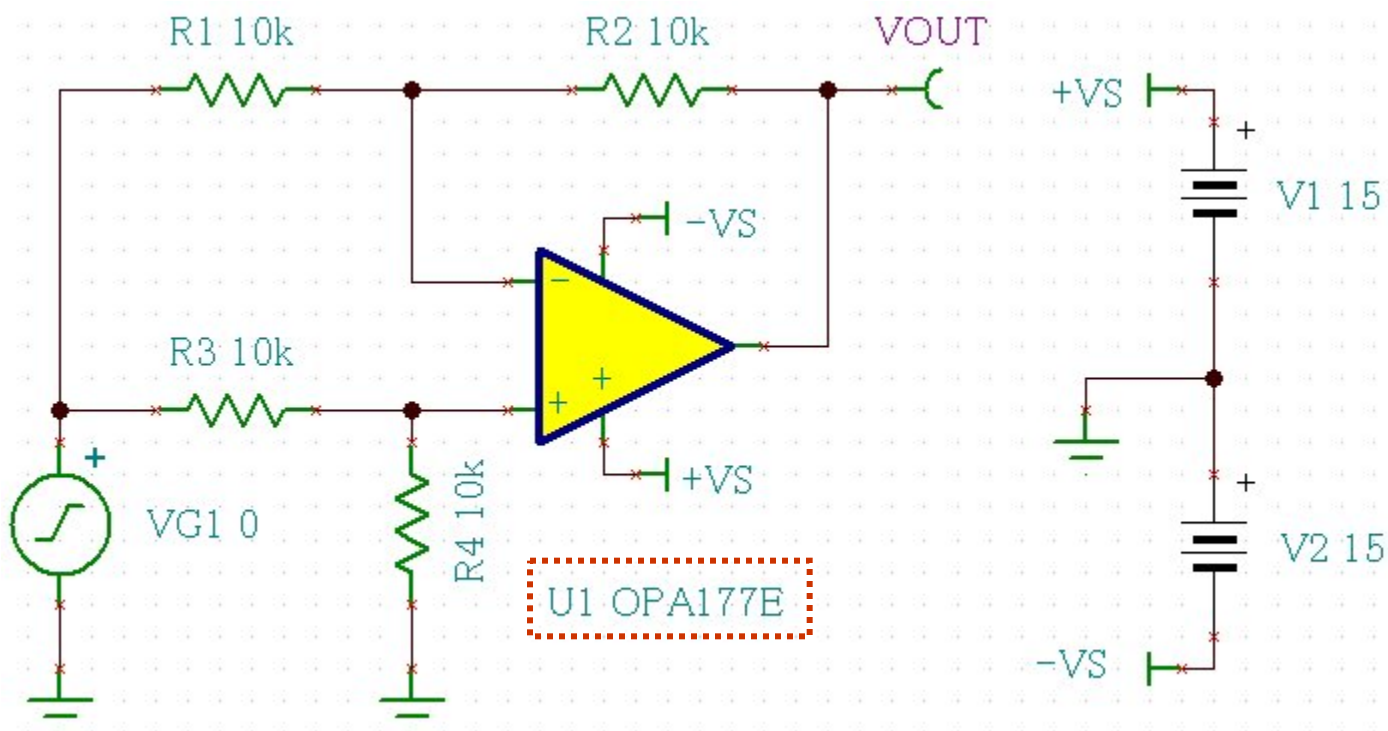
- (1) 反転アンプの周波数特性
- (2) 反転アンプのゲイン 対 周波数特性
- (3) 反転アンプの位相 対 周波数
- (4) 波形で見る位相シフト
- (5) 反転アンプのゲイン 対 位相特性
- (6) 開ループ・ゲインを見る



同相モード・ゲイン 対 周波数：評価回路

“Def_Amp_M”を開き、下図のように改造してください。

オペアンプをOPA177Eに変更。



記事：“Def_Amp_CMRR”でセーブ

同相モード・ゲイン 対 周波数: AC解析結果

① “Analysis”→“AC Analysis”→“AC Transfer Characteristic...”を実行.

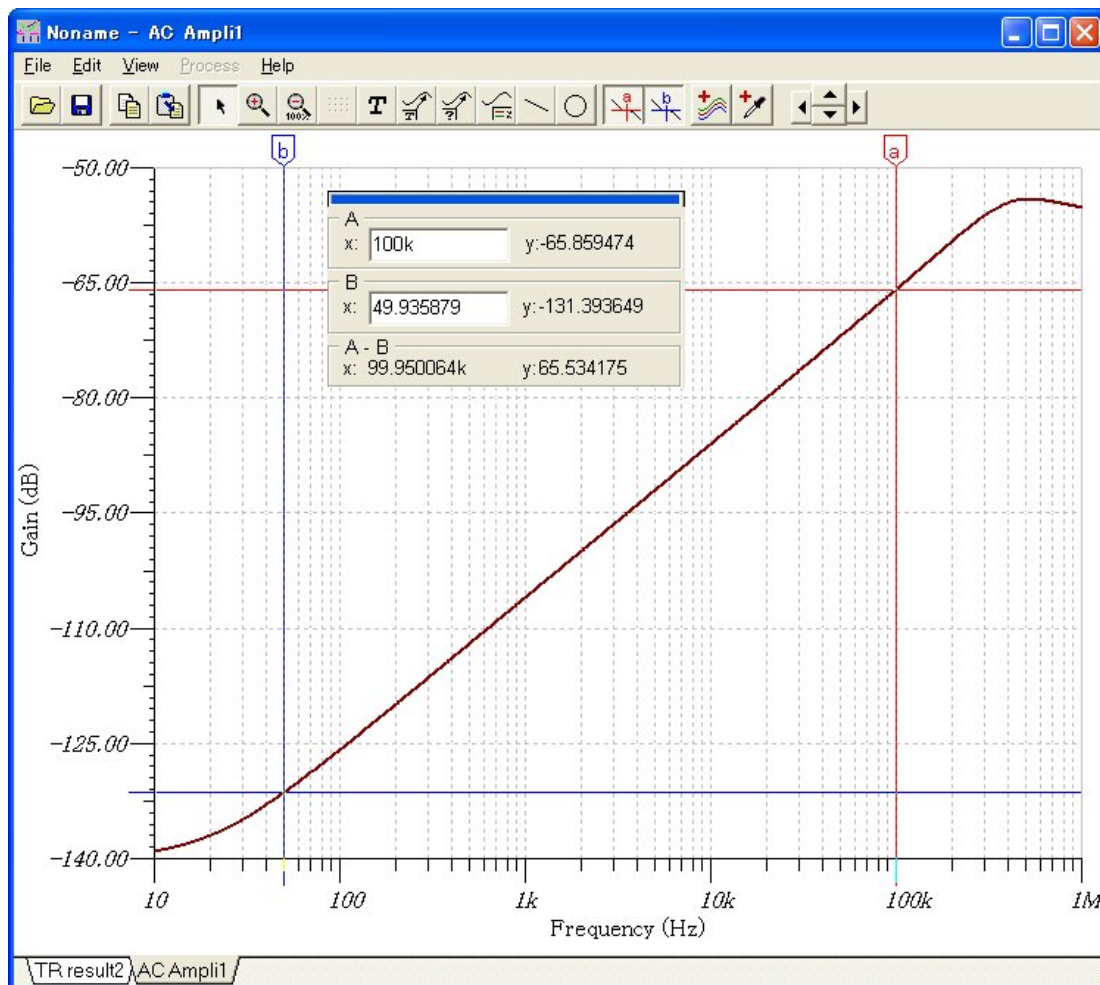
② 表示範囲の設定 10~1MHz

Start frequency	10	[Hz]
End frequency	1M	[Hz]
Number of points	100	
Sweep type	<input type="radio"/> Linear	<input checked="" type="radio"/> Logarithmic
Diagram	<input checked="" type="checkbox"/> Amplitude	<input type="checkbox"/> Nyquist

50Hzと100kHzの差

A	x: 100k	y: -65.859474
B	x: 49.935879	y: -131.393649
A - B	x: 99.950064k	y: 65.534175

同相モードゲインが **65.5dB** 上がる.

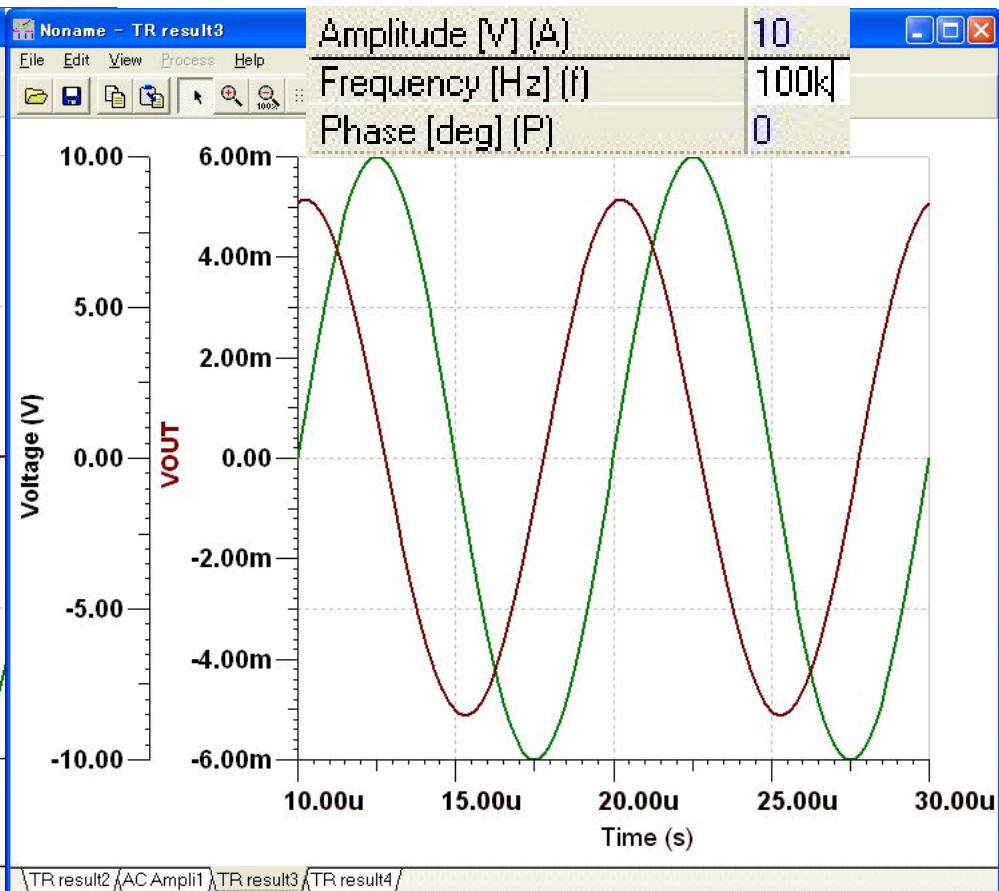
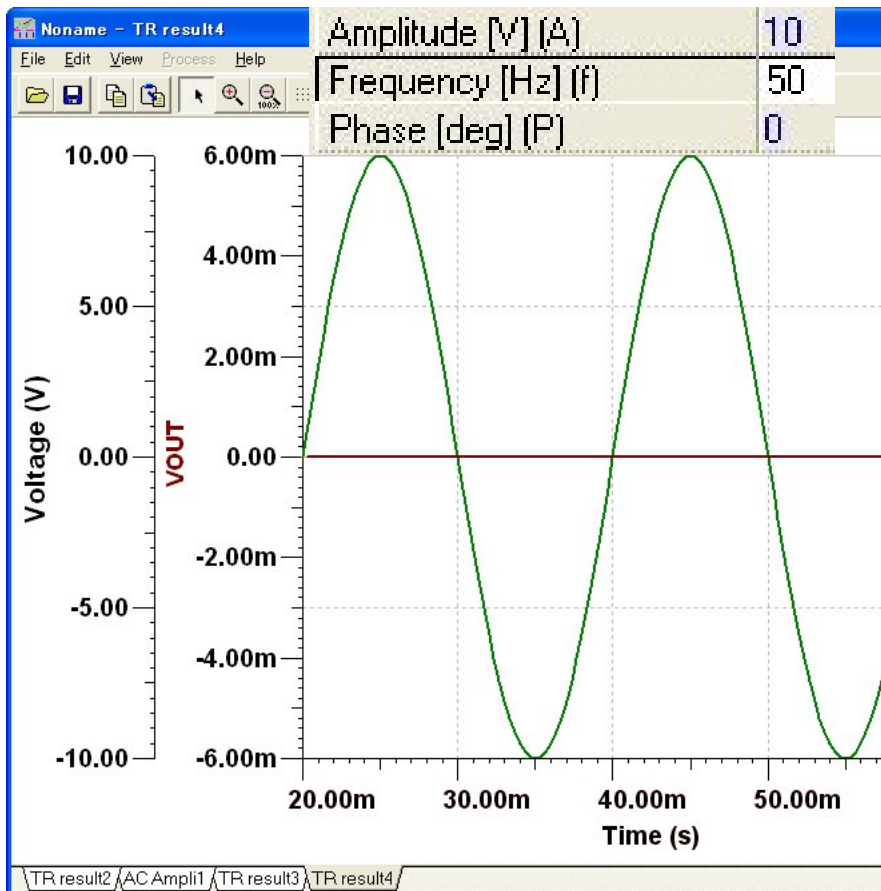


同相モード・ゲイン対周波数, 波高値の差

50Hzと100kHz波高値の差を波形で見る(同一目盛りを使用).

50Hz時の入力対出力波形

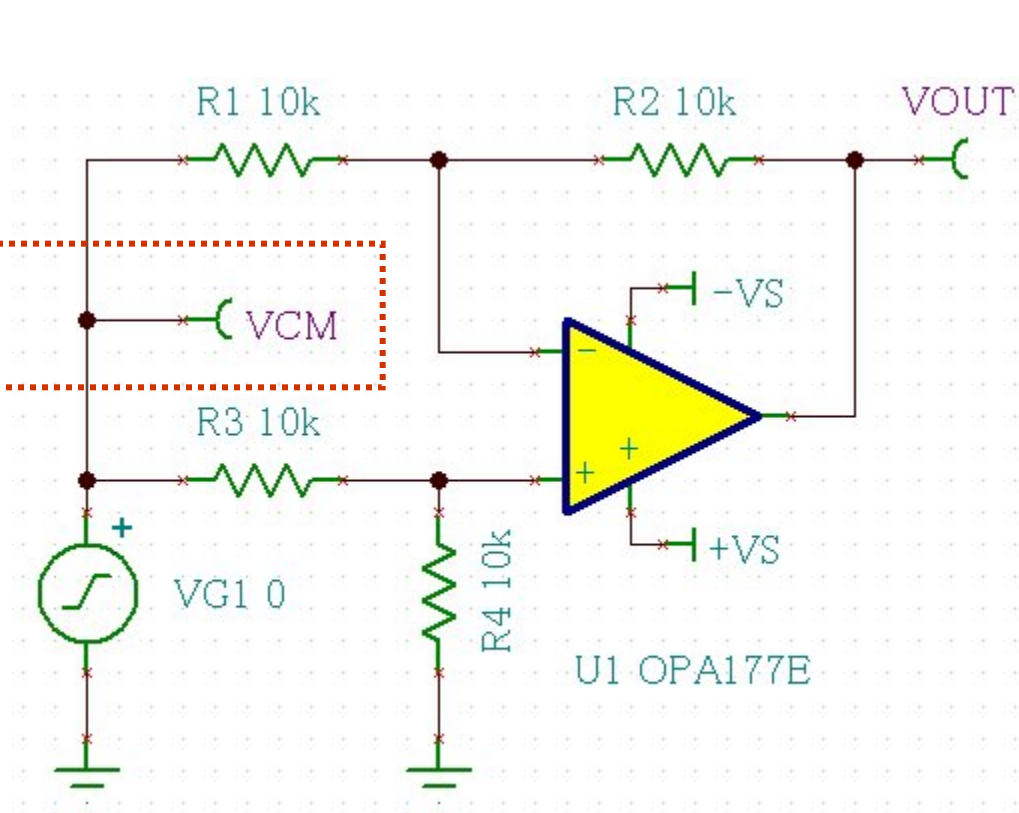
100kHz時の入力対出力波形



CMR (同相モード除去) 対 周波数を見る: 評価回路

回路に電圧モニタ・ピン(VCM)を追加.

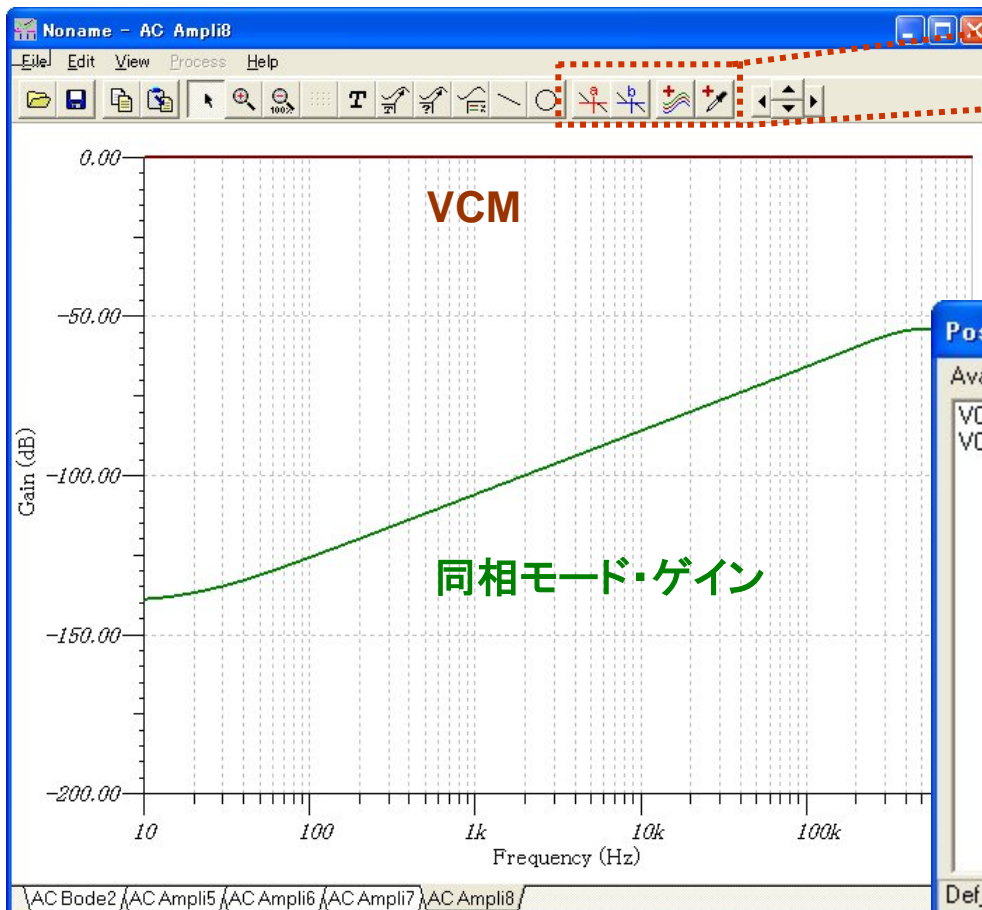
これにより, CMRのカーブを表示させる設定が楽になる



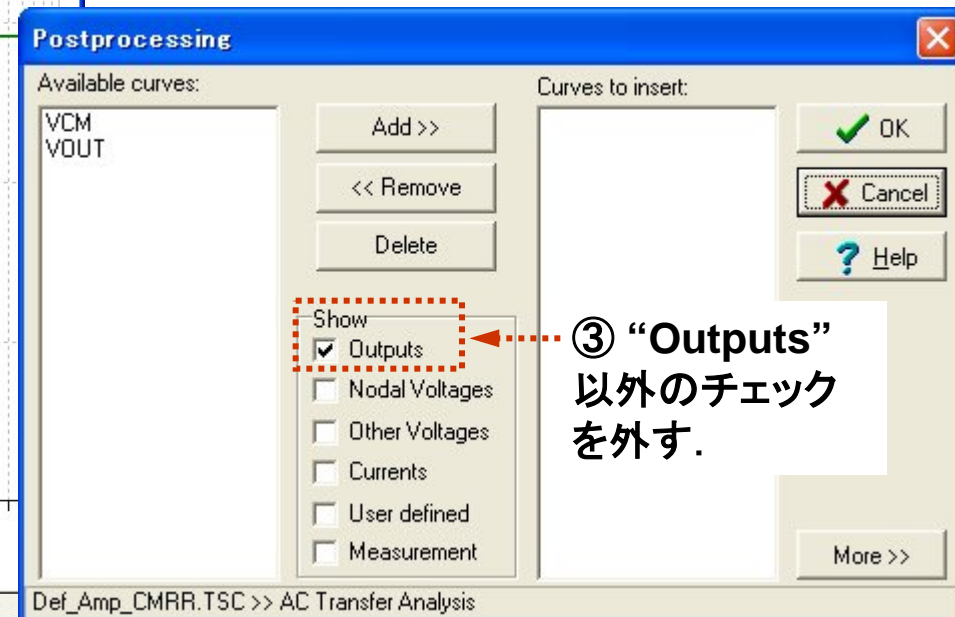
CMR (同相モード除去) 対 周波数を見る: カーブ追加の操作 (1)

CMRカーブの表示は既存データ間の演算処理で行う

① “Analysis” → “AC Analysis” → “AC Transfer Characteristic...” を再実行.

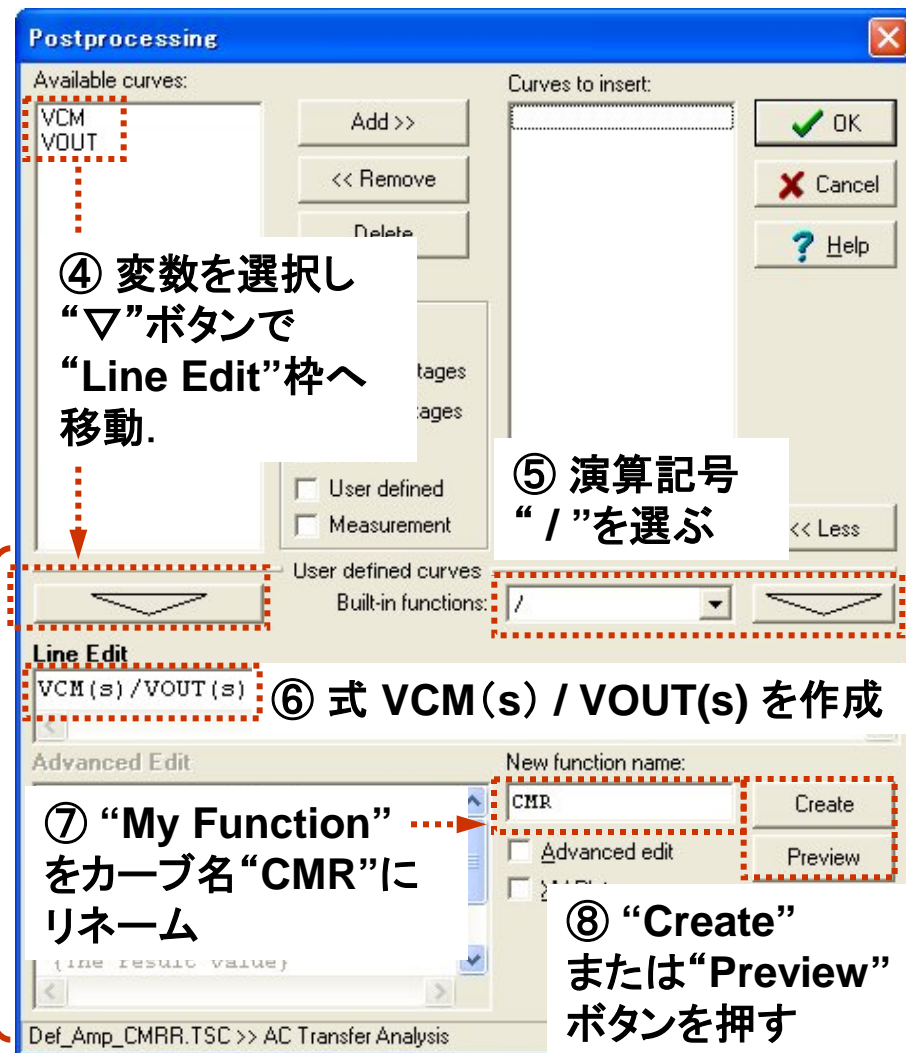
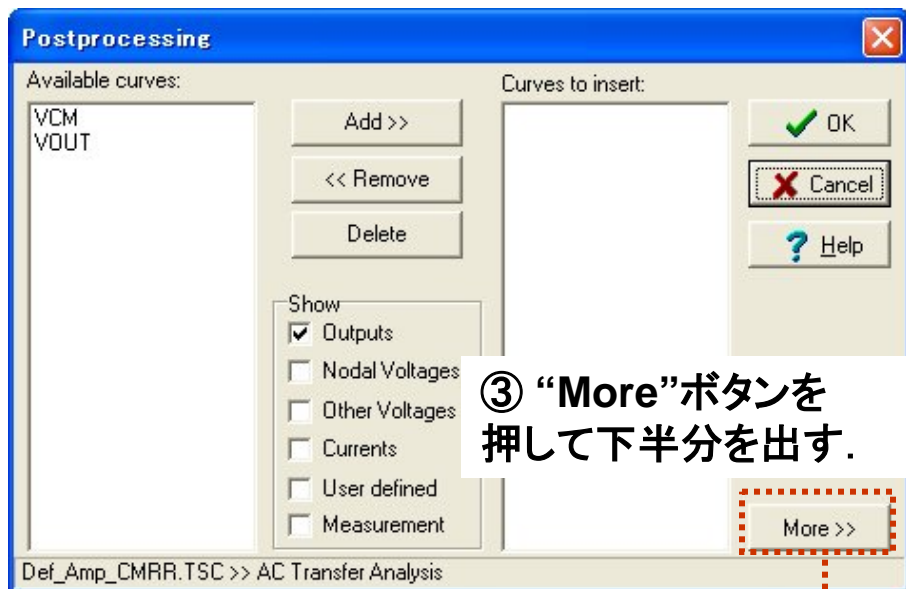


② “Add Curve” ボタンを押して下図の “Post processing” を表示させる



③ “Outputs” 以外のチェックを外す.

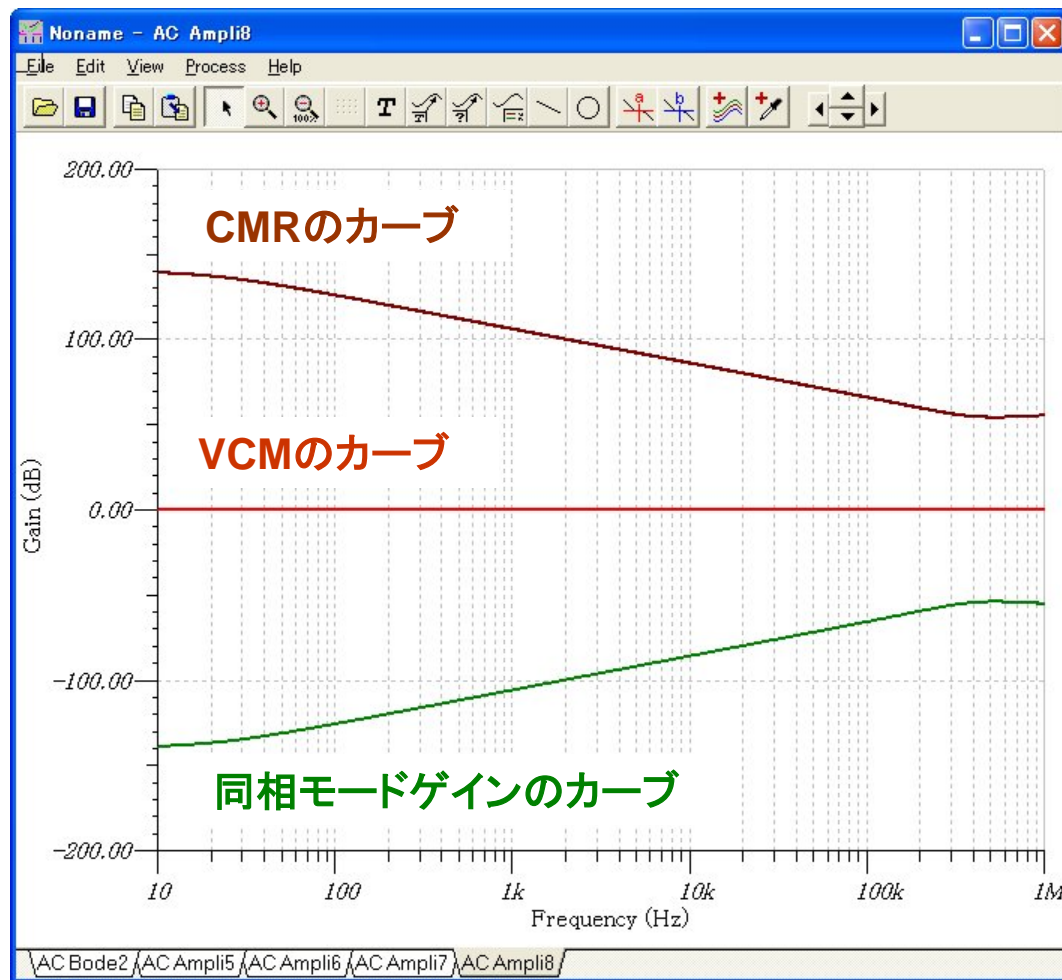
CMR (同相モード除去) 対 周波数を見る: カーブ追加の操作 (2)



CMR (同相モード除去) 対 周波数を見る: カーブ追加の操作 (3)

出現したグラフ.

- ⑨ CMRのカーブを残し他のカーブを削除.
- ⑩ 最後に目盛りを整えて終了.

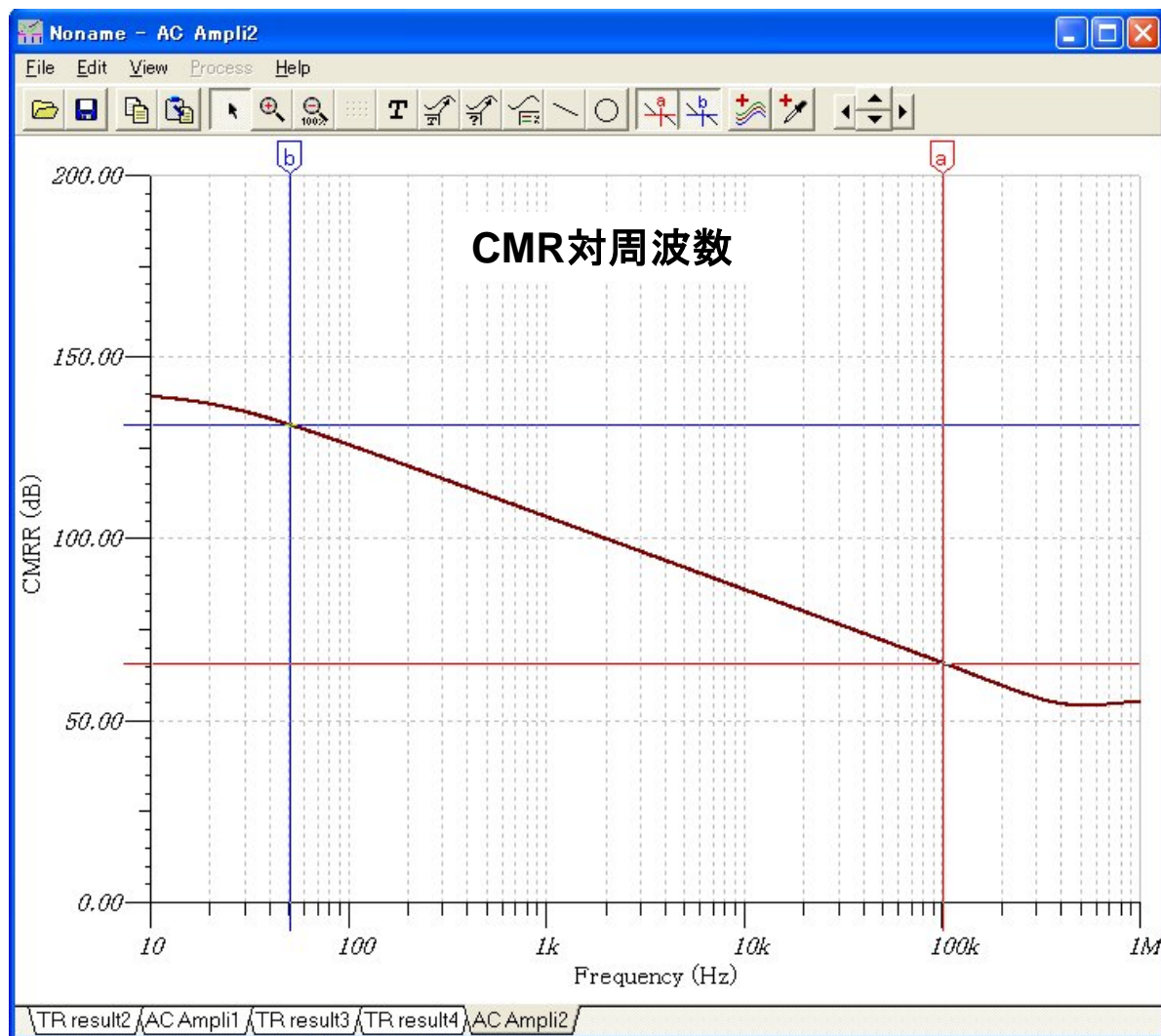


CMR (同相モード除去) 対 周波数を見る: 追加されたCMRカーブ

V_{CM} が 50Hz と 100kHz
における CMR の比較

A	x: 101.088603k	y: 65.762721
B	x: 50.73751	y: 131.27395
A - B	x: 101.037865k	y: -65.511229

131.3dB が 65.8dB と
65.5dB 下がっている



✚ S5.1 入力部:DC性能のシミュレーション

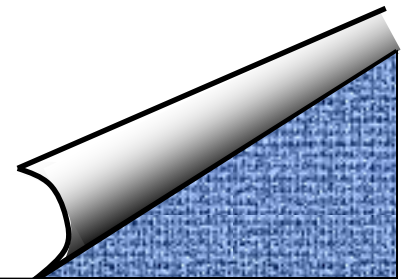
- (1) 入力バイアス電流 I_B ・オフセット電流 I_{OS}
- (2) 入力オフセット電圧 V_{OS}

✚ S5.2 入力部:AC性能のシミュレーション

- (1) 同相モード・ゲイン対周波数
- (2) CMR(同相モード除去)対周波数を見る

✚ S5.3 ゲイン段:AC性能のシミュレーション

- (1) 反転アンプの周波数特性
- (2) 反転アンプのゲイン 対 周波数特性
- (3) 反転アンプの位相 対 周波数
- (4) 波形で見る位相シフト
- (5) 反転アンプのゲイン 対 位相特性
- (6) 開ループ・ゲインを見る



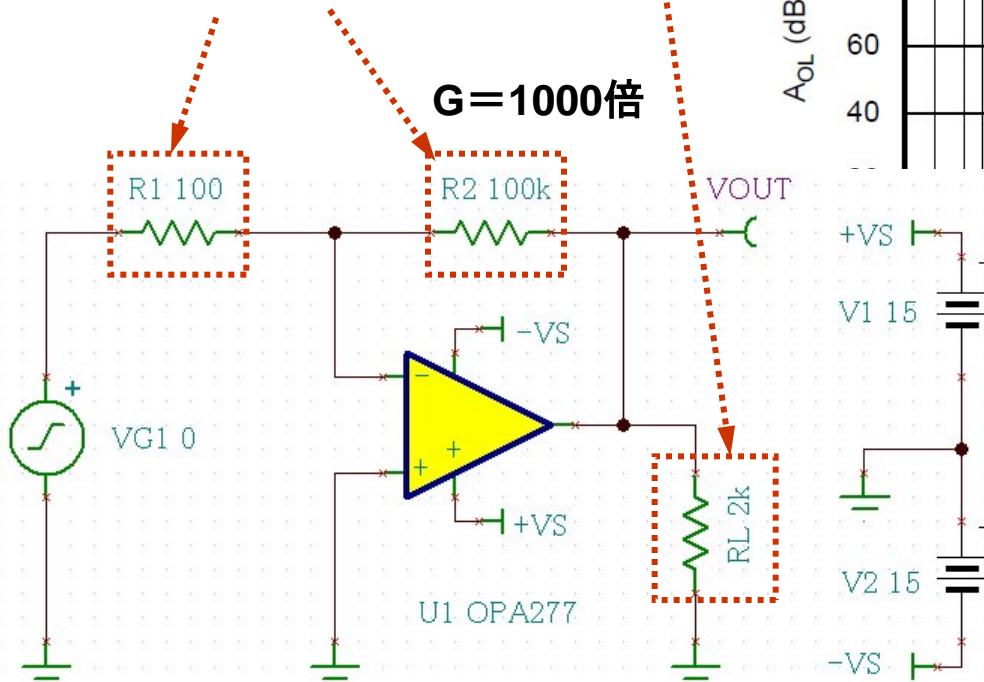
反転アンプの周波数特性: 評価回路

At $T_A = +25^\circ\text{C}$, $V_S = \pm 15\text{V}$, and $R_L = 2\text{k}\Omega$, unless otherwise noted.

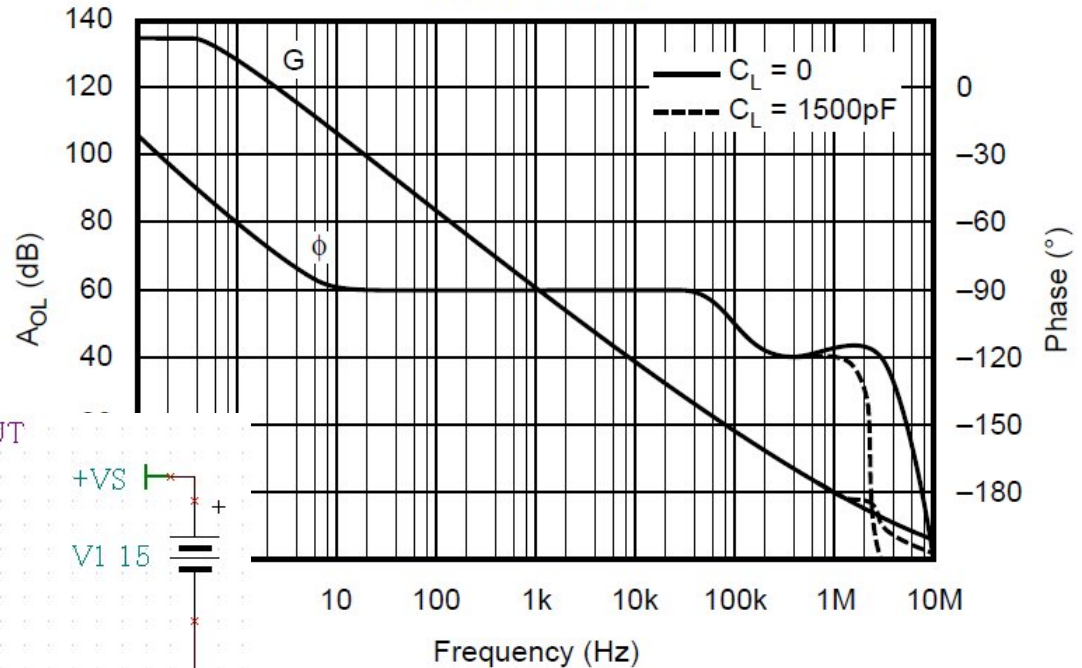
“Inv_Amp.TSC”を開き,
下図のように改造してください。

負荷条件をデータ・シートに合わせる。

定数を100と100kに変更



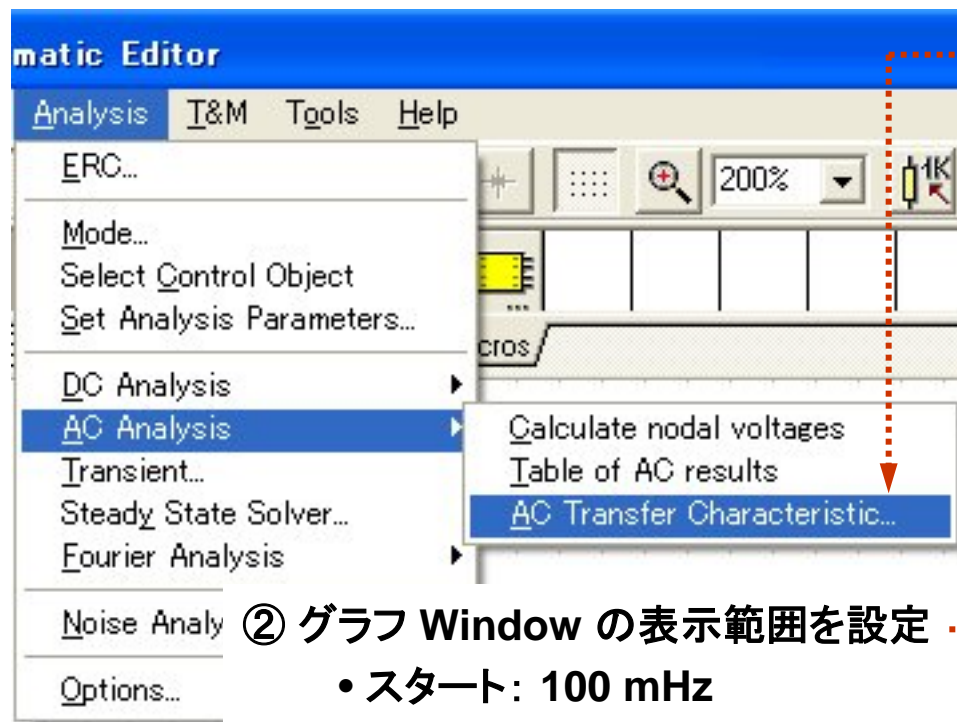
OPA277のボード線図



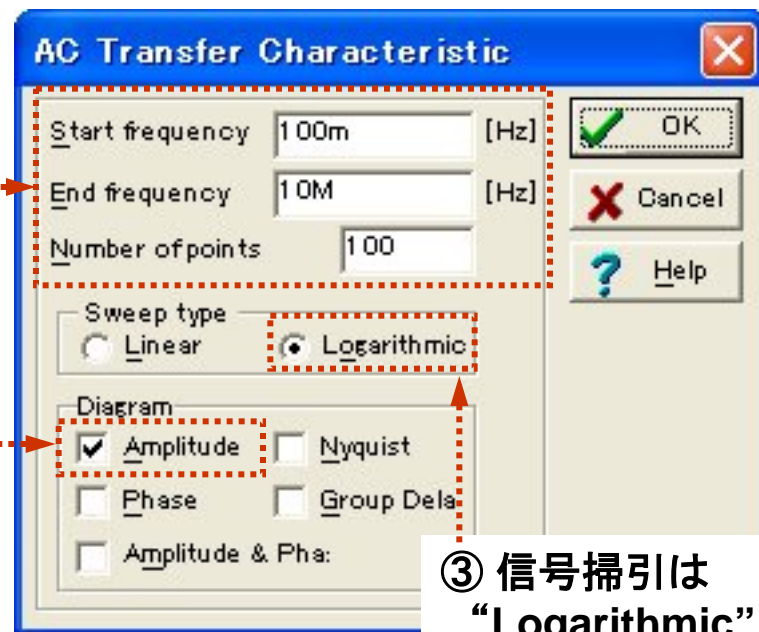
記事: “Inv_Amp_AOL_ACL”でセーブ

反転アンプの周波数特性: 表示内容の設定

AC伝達特性の解析を行う方法と、開始時の条件設定.



① “Analysis”メニューから
“AC Transfer Characteristic...”を選択



② グラフ Window の表示範囲を設定

- スタート: 100 mHz
- ストップ: 10 MHz
- ポイント数: 100 (データの数)

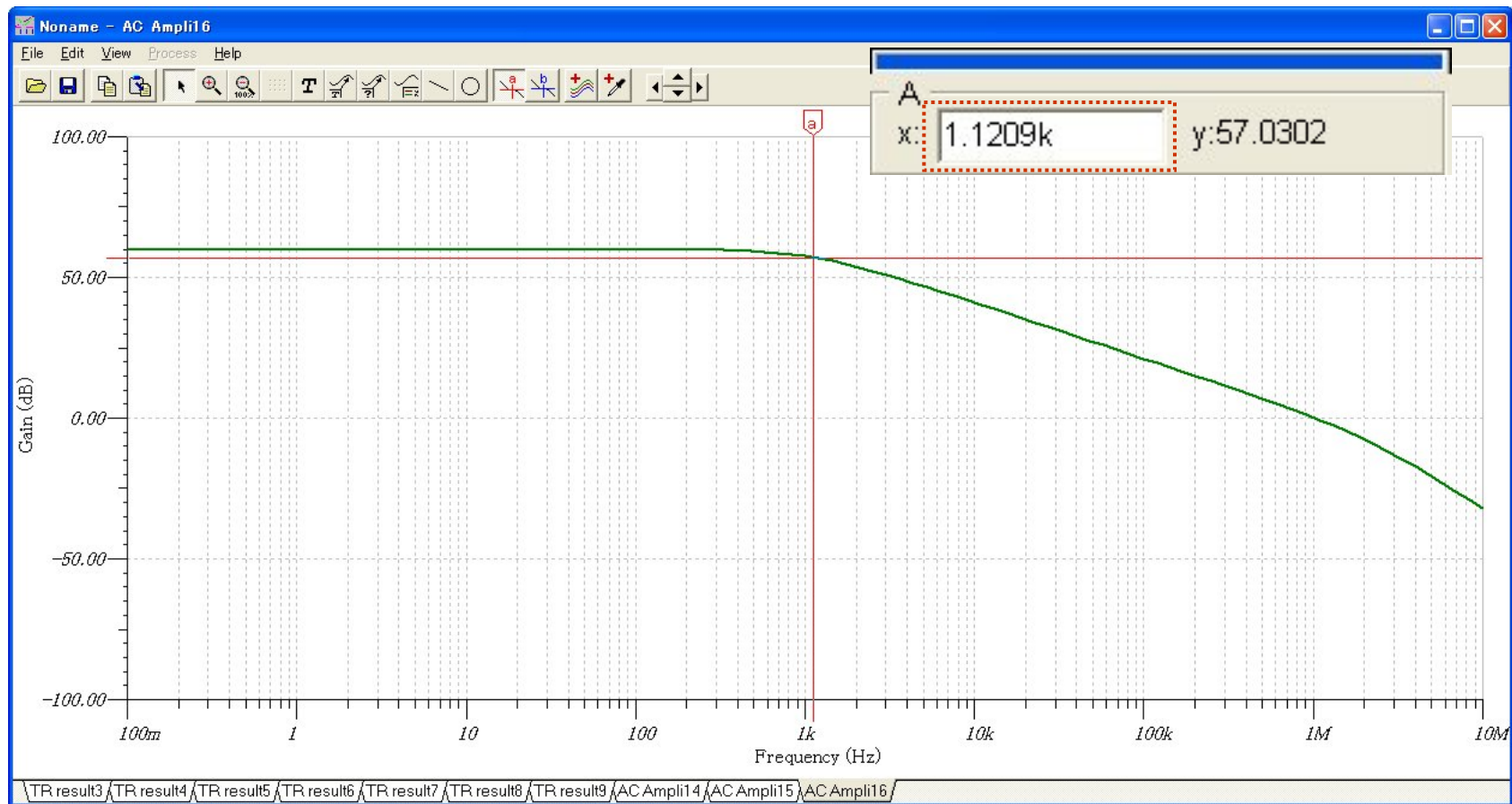
④ 表示内容として“Amplitude”を選択

③ 信号掃引は
“Logarithmic”
を選択

反転アンプのゲイン 対 周波数特性: 解析結果

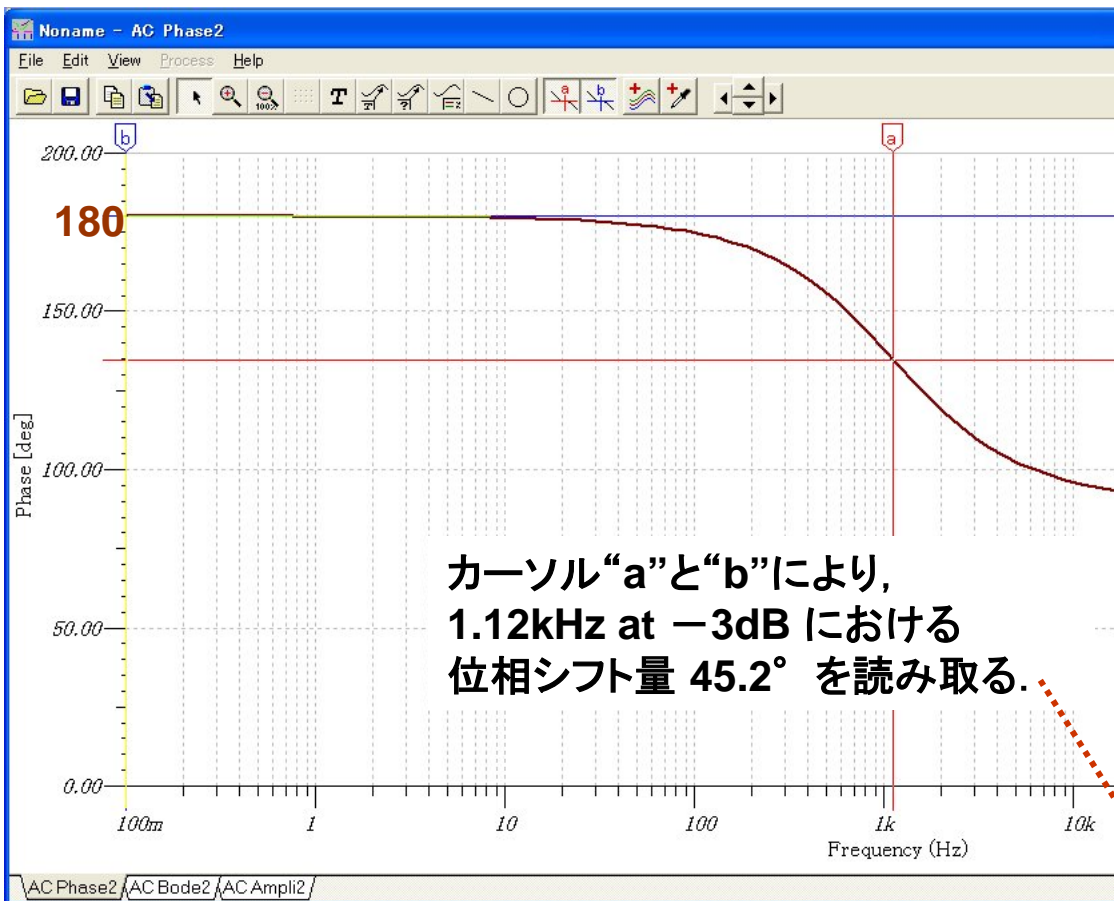
閉ループ・ゲインの読み取り

カーソル“a”により, 閉ループ・ゲイン 60dB における帯域幅 1.12kHz at -3dB を読み取る.



反転アンプの位相 対 周波数:解析結果

① “Analysis”メニューから “AC Transfer Characteristic...”を再実行



カーソル“a”と“b”により、
1.12kHz at -3dB における
位相シフト量 45.2° を読み取る。

AC Transfer Characteristic

Start frequency 100m [Hz]

End frequency 10M [Hz]

Number of points 100

Sweep type
 Linear Logarithmic

Diagram
 Amplitude Nyquist
 Phase Group Dela
 Amplitude & Pha:

OK Cancel Help

④ “Phase”を選択

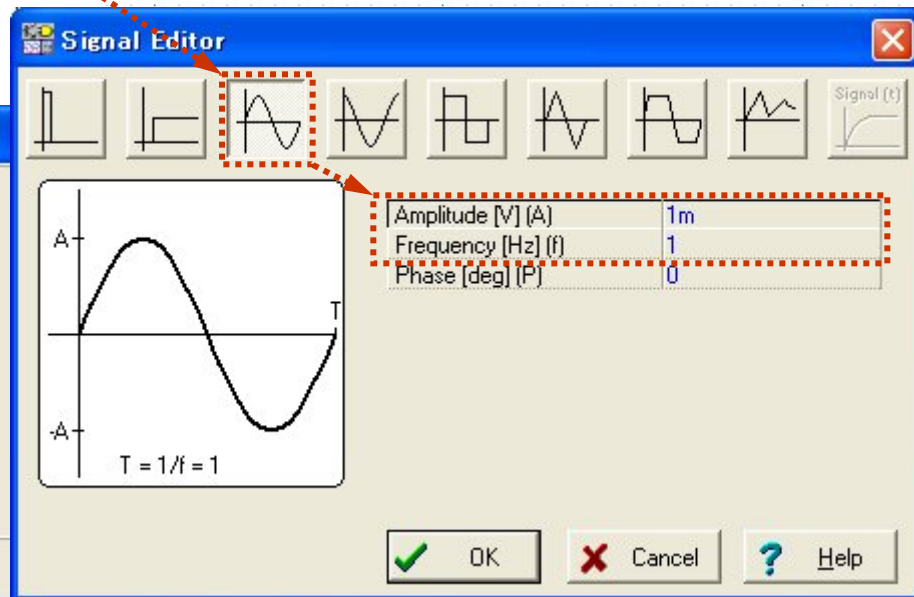
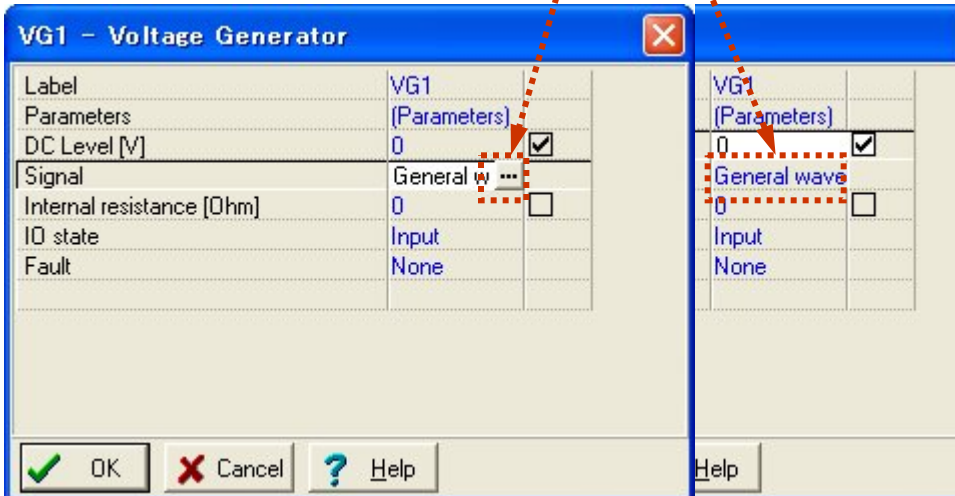
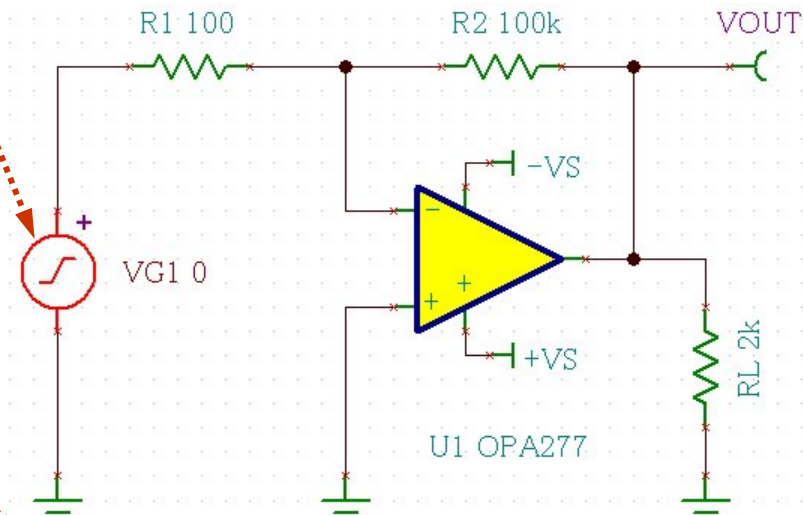
A	x: 1.1202k	y: 134.8088
B	x: 100m	y: 179.9949
A - B	x: 1.1201k	y: -45.186

記事: 反転アンプなので位相シフトは180° からスタート。

波形で見る位相シフト: 信号設定

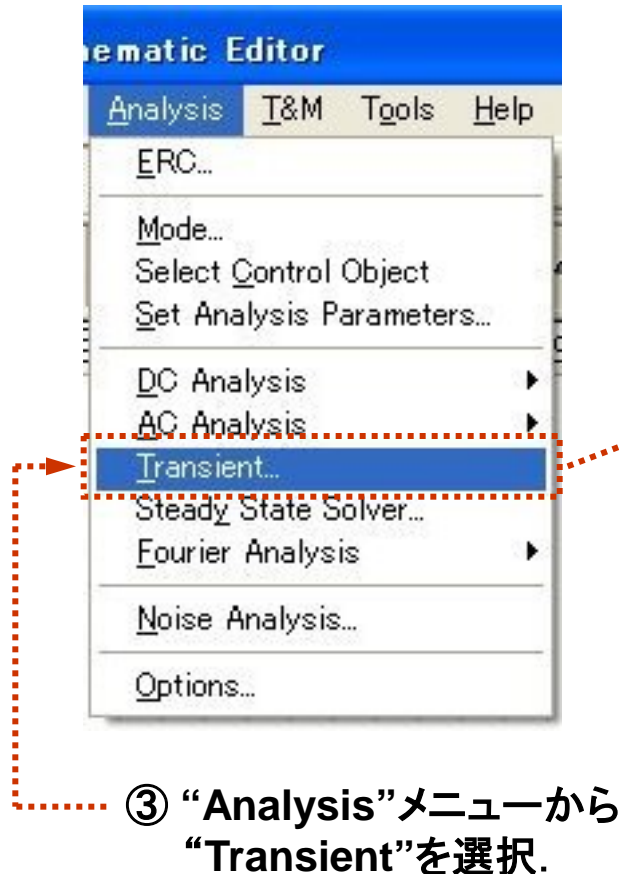
波形の振幅と周波数の設定

- ① VG1 を左Wクリックし、設定ダイアログを開く。
- ② “Signal” 行の “waveform” をクリック。
- ③ 現れた “waveform” 右横 “...” をクリック。
- ④ 2番目に開くダイアログからサイン波形ボタンを押し
• 信号振幅: 1mV
• 周波数: 1Hz に設定。

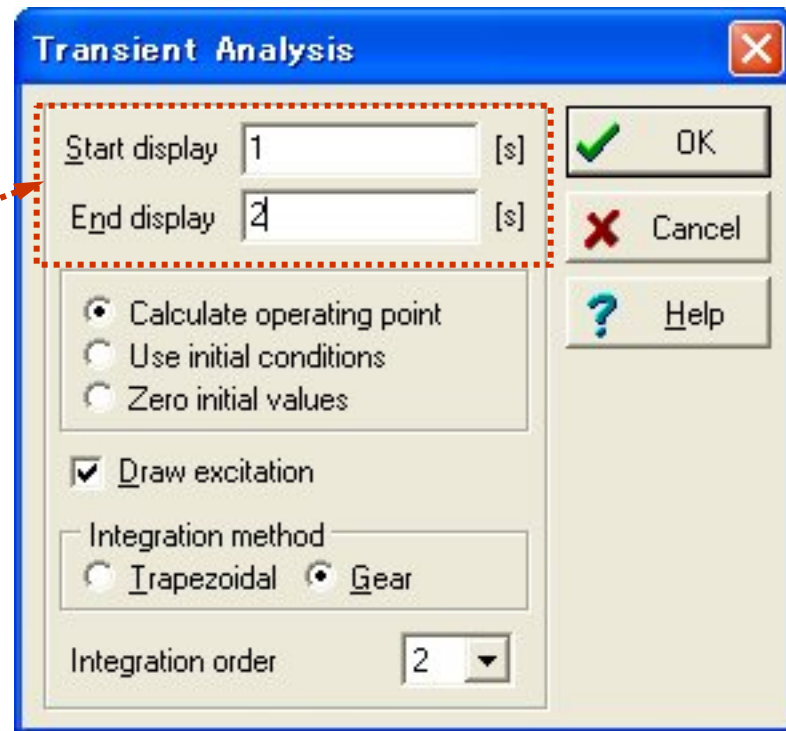


波形でみる位相シフト: 表示範囲の設定

過渡解析の開始とグラフ Window の表示範囲の設定



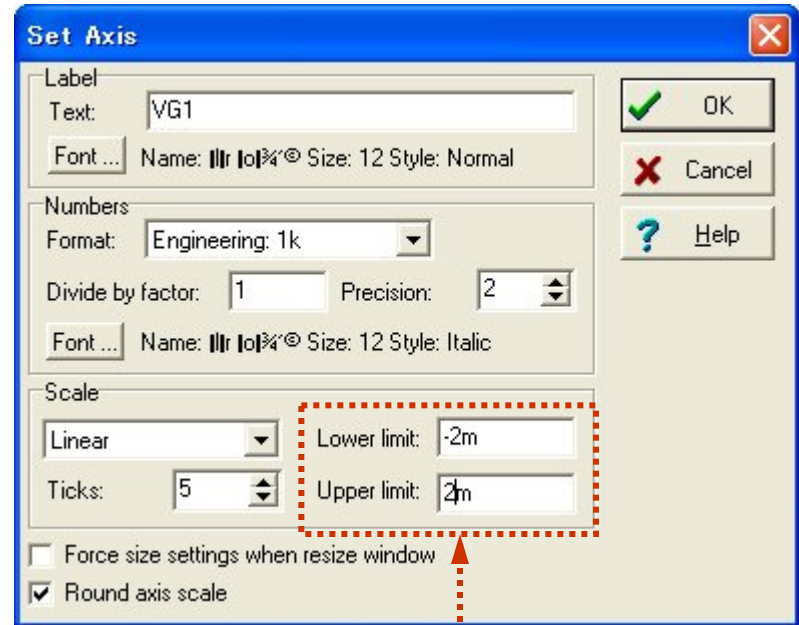
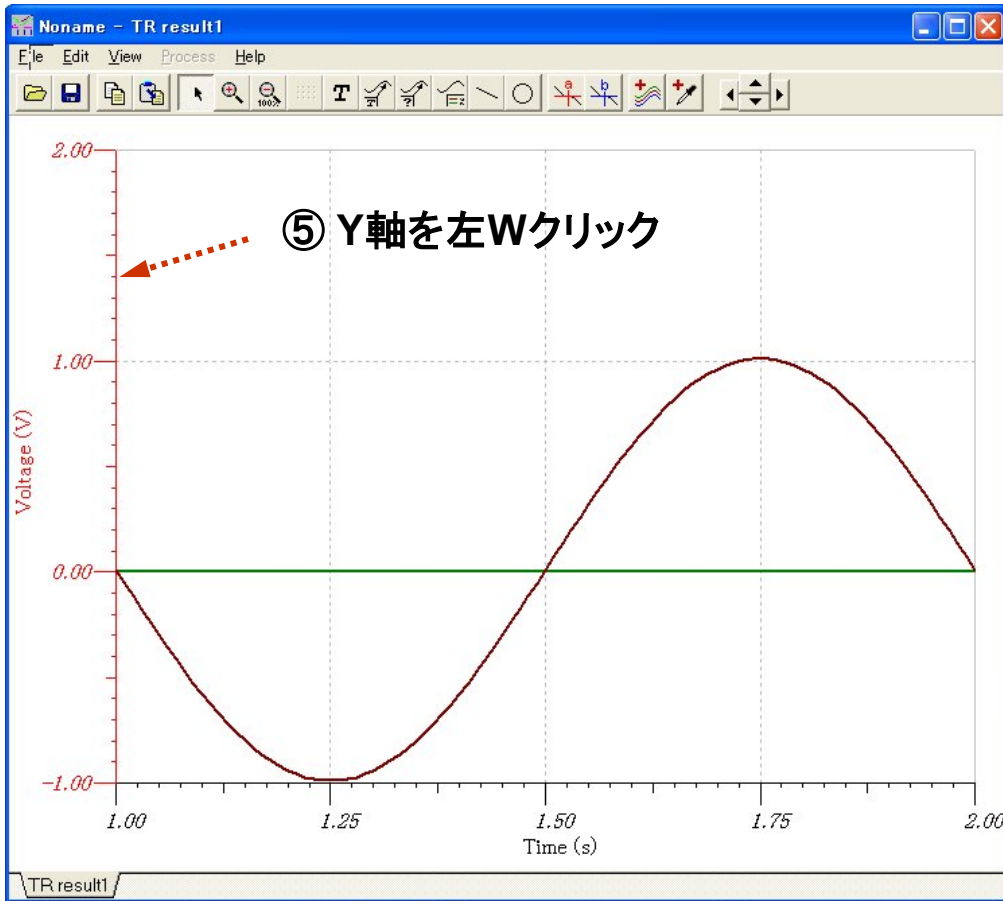
- ④ 開いたダイアログからグラフ Window の表示範囲を設定.
- スタート: 1 (s)
 - ストップ: 2 (s)



波形で見る位相シフト: 波形の調整

Y軸(電圧)のレンジを調整し上下非対称の波形を整える。

現れた解析結果のグラフ



⑥ 開いたダイアログの“Scale”で調整.

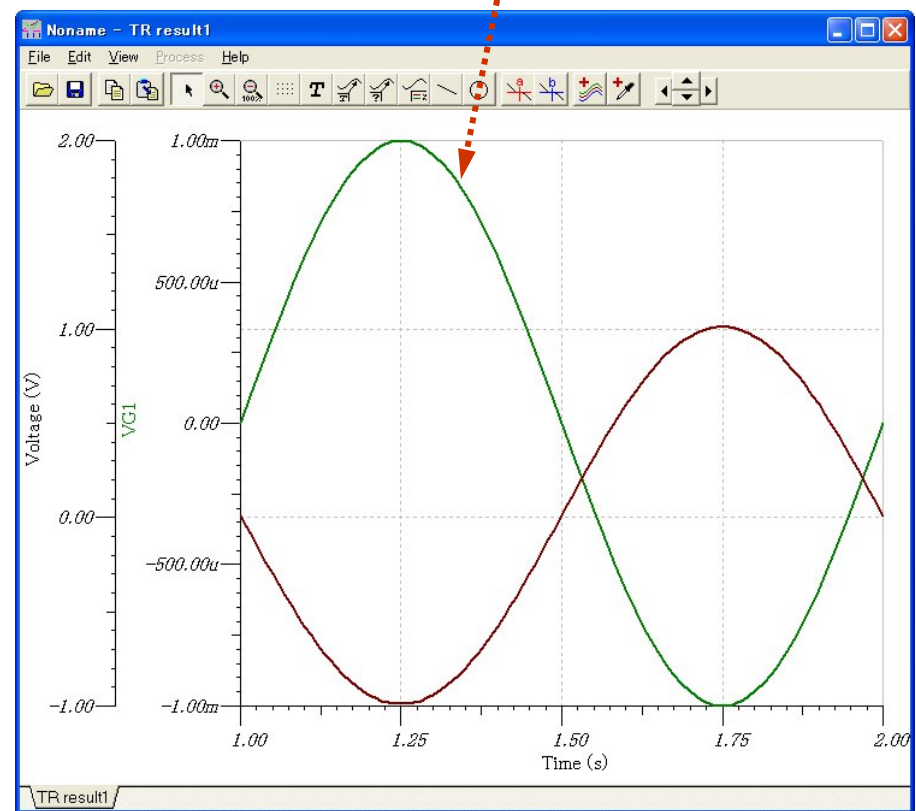
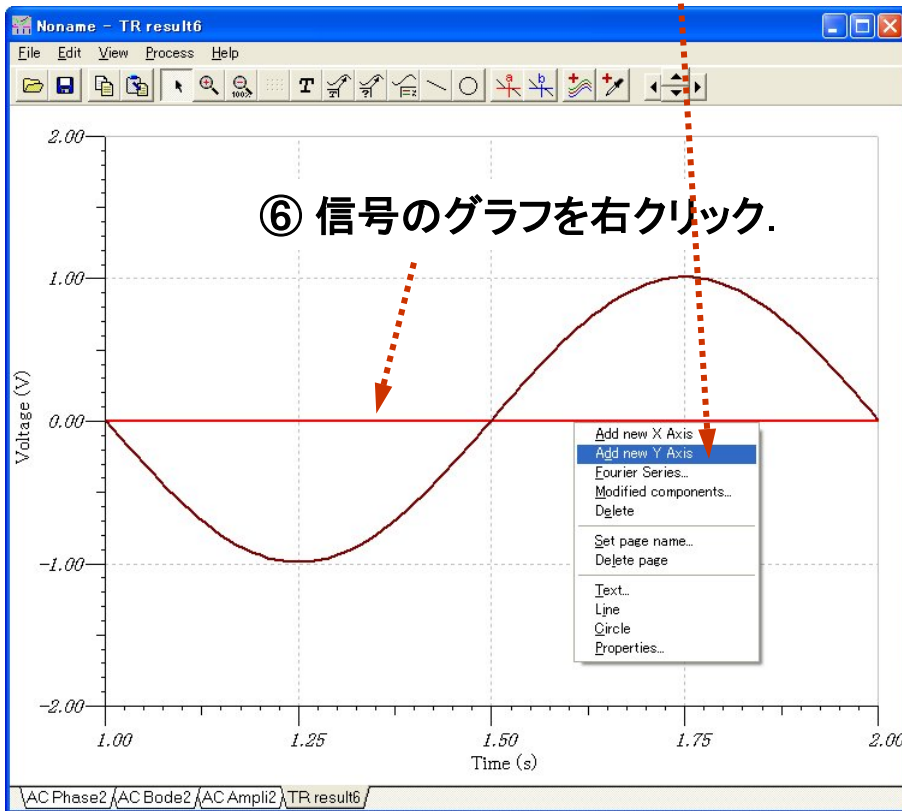
- “Lower limit”: -2 (V)
- “Upper limit”: 2 (V)

波形で見る位相シフト: Y軸の追加

Y軸を追加し信号波形が見えるようにする。

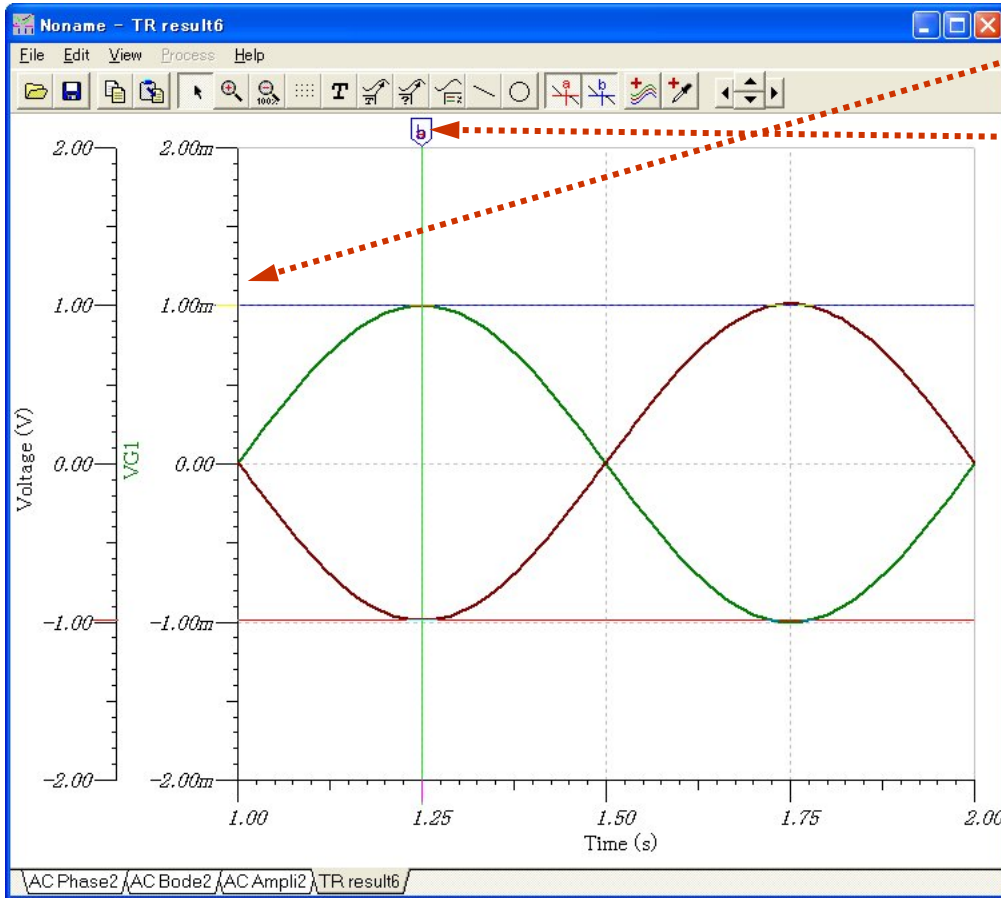
⑦ 開いたメニューから
“Add new Y Axis”を選択。

信号波形(緑)が現れる



波形で見る位相シフト: 1Hzにおける位相差

1Hzにおける位相差を読み取る.



- ⑧ 信号の y 軸を $\pm 2\text{mV}$ に調整し波高値を合わせる.
- ⑨ カーソル“a”を出力波形の最小値に, “b”を信号波形の最大値に合わせる

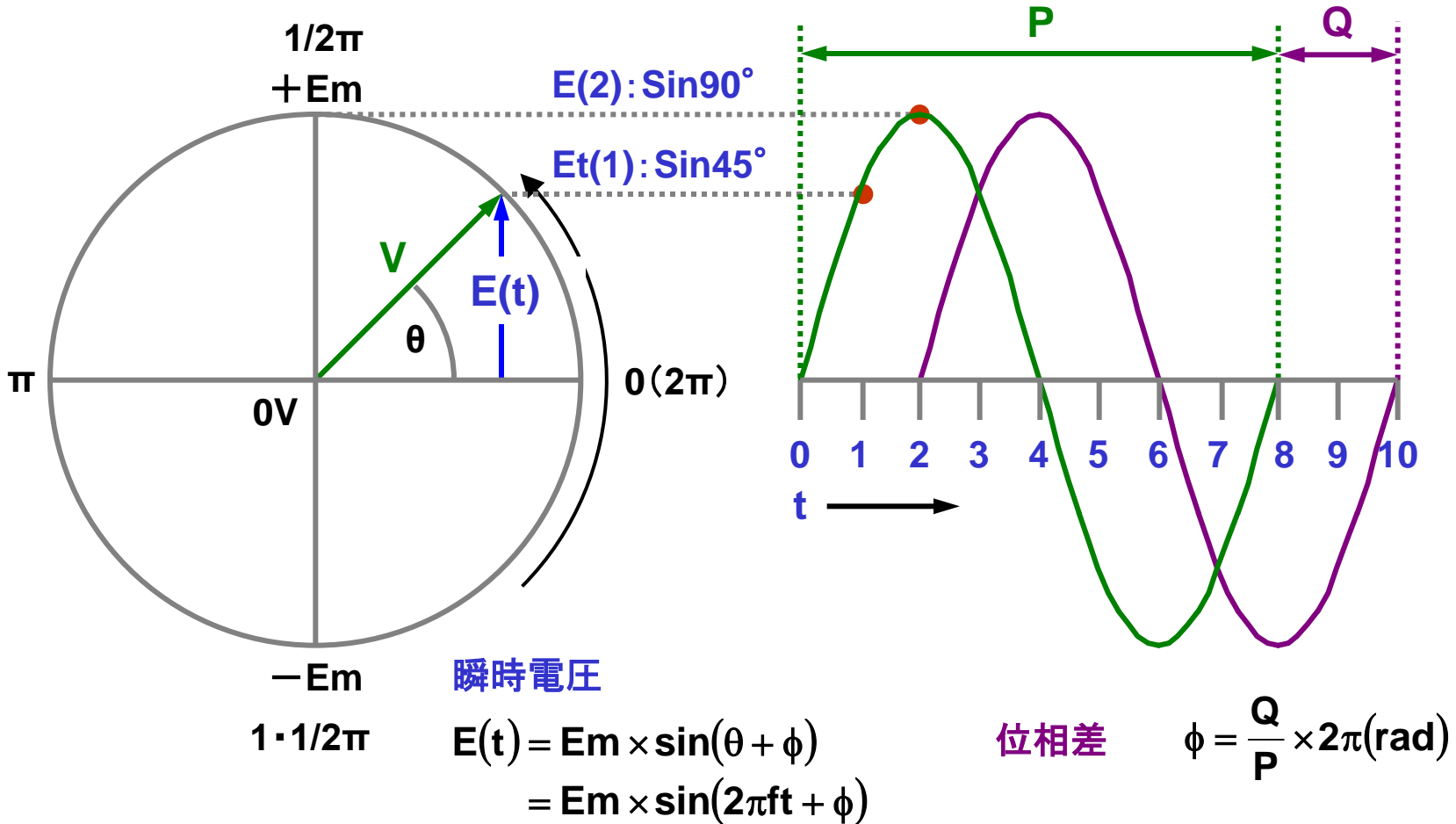
A	x: 1.25	y: -989.4533m
B	x: 1.25	y: 1000u
A - B	x: 0	y: -990.4533m

時間差0秒で両者の最大・最小値が
交わり, 時間遅れのない位相差 -180°
(反転)が確認できる.

記事: 出力振幅の誤差10mVは波形の上下非対称(歪)によるもの.

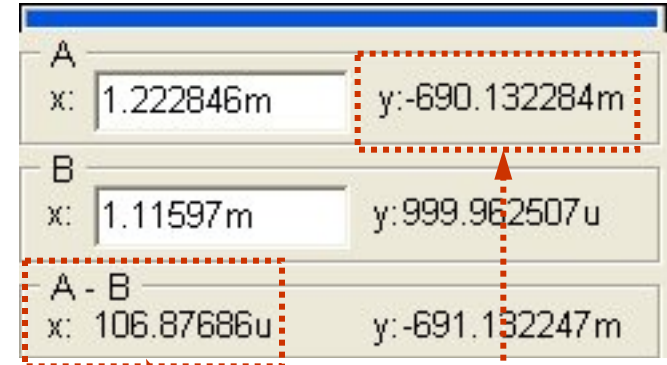
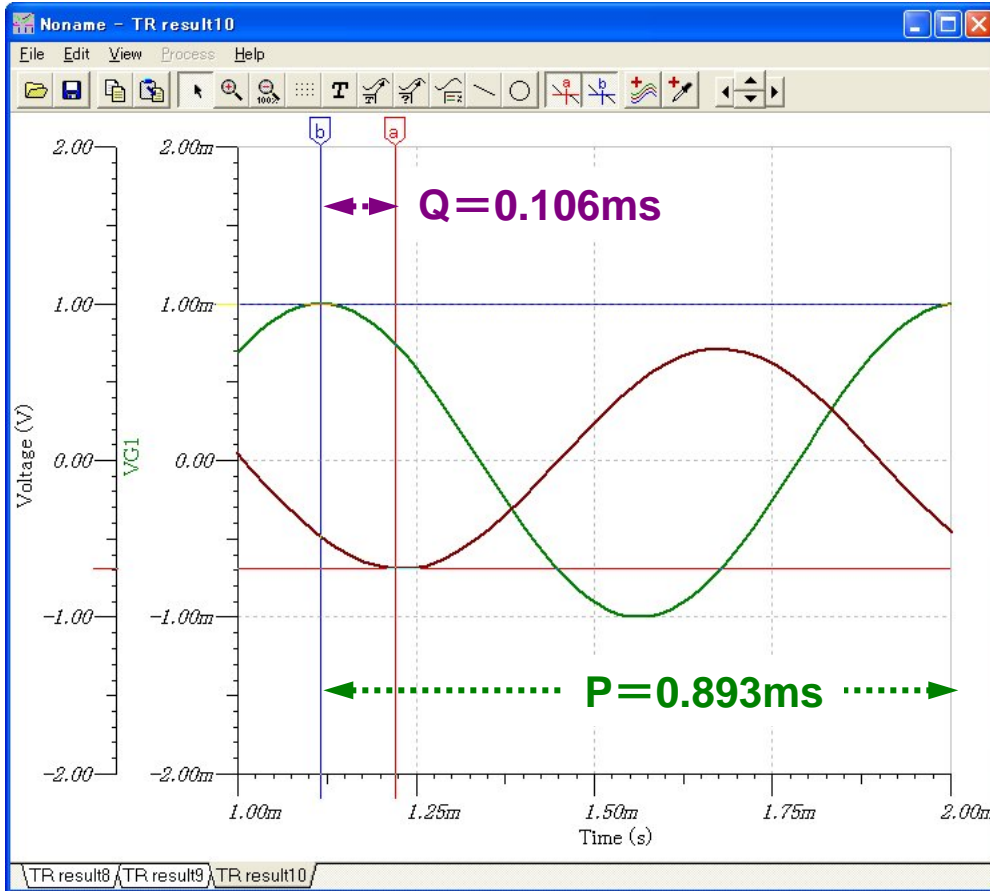
波形で見る位相シフト: サイン波の瞬時値と位相

サイン波とは単位円を等速で回転するベクトルVが描く軌跡.



波形で見る位相シフト: 1.12kHzにおける位相差

1.12kHzにおける位相差を読み取る.



時間差 0.106ms
換算位相差は...
下式から $\Phi = 42.7^\circ$
(正しくは 45°)

振幅変化の
dB換算は...
下式から -3.1dB

$$\phi = \frac{Q}{P} \times 2\pi(\text{rad}) \quad \Delta A = 20\text{Log}\left(\frac{A_2}{A_1}\right)(\text{dB})$$

$A_1 = 989.5\text{mV}$ at 1Hz

$A_2 = 690\text{mV}$ at 1.12kHz

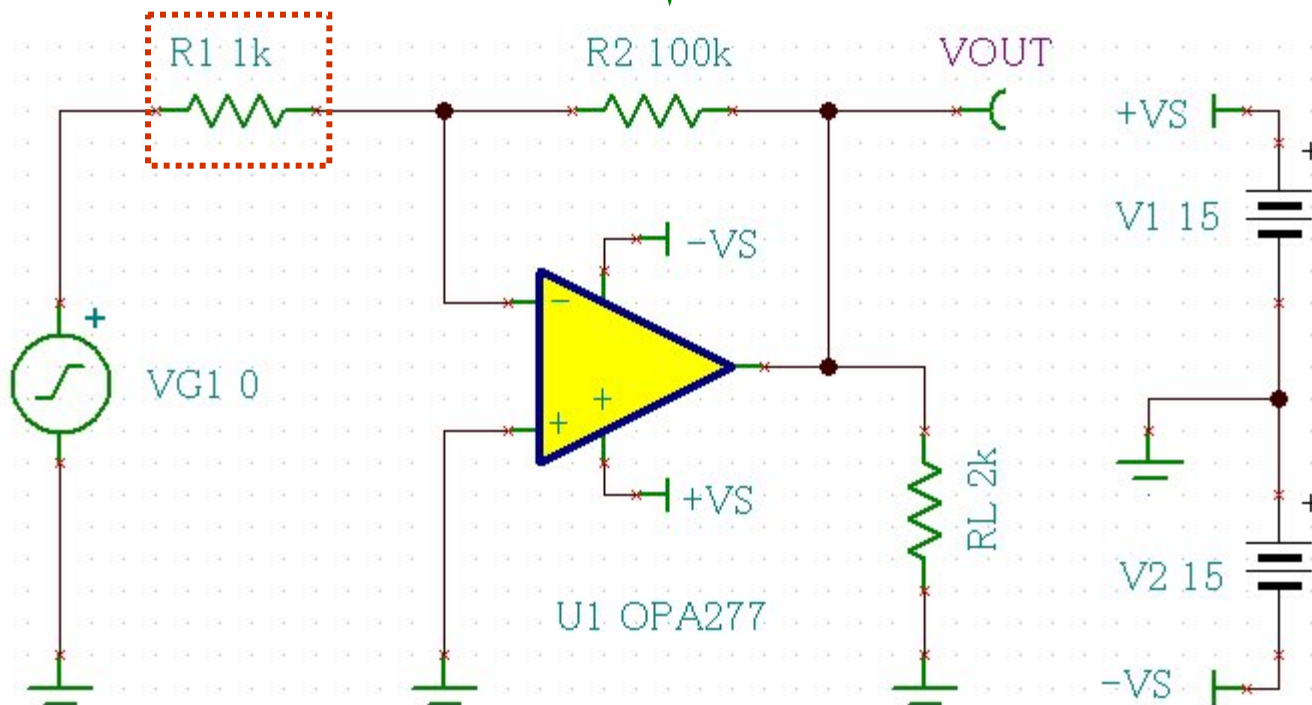
反転アンプのゲイン 対 位相特性, 評価回路

パラメトリック解析によりゲイン対位相特性を見る。

R2の値を変えてゲインを1倍～1000倍に振る

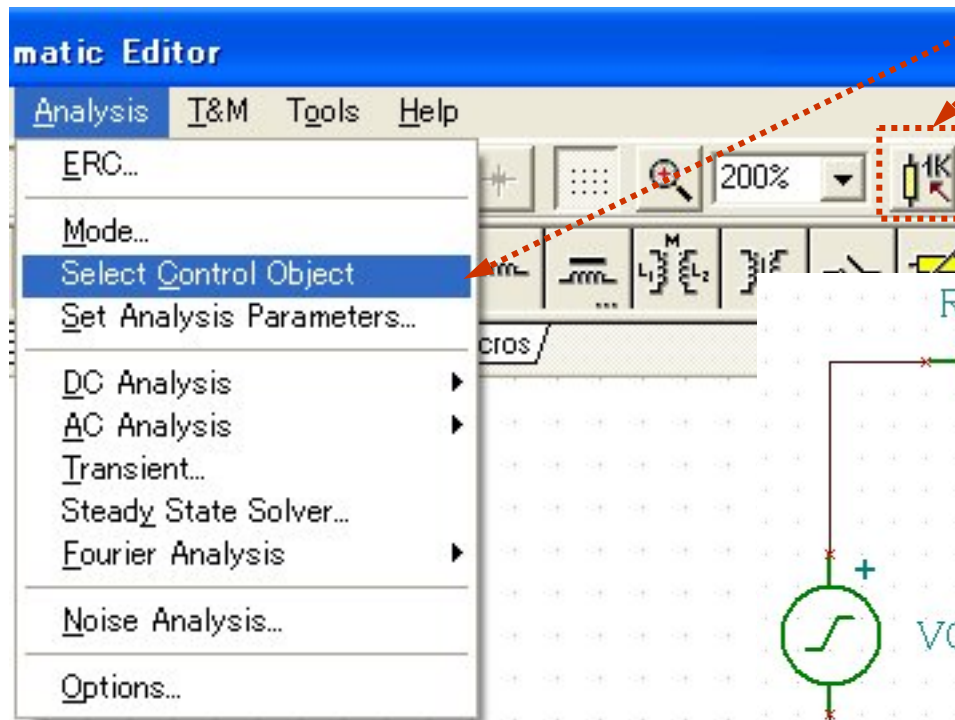
1k = 0dB (1倍)
10k = 20dB (10倍)
100k = 40dB (100倍)
1M = 60dB (1000倍)

R1を1kに変更



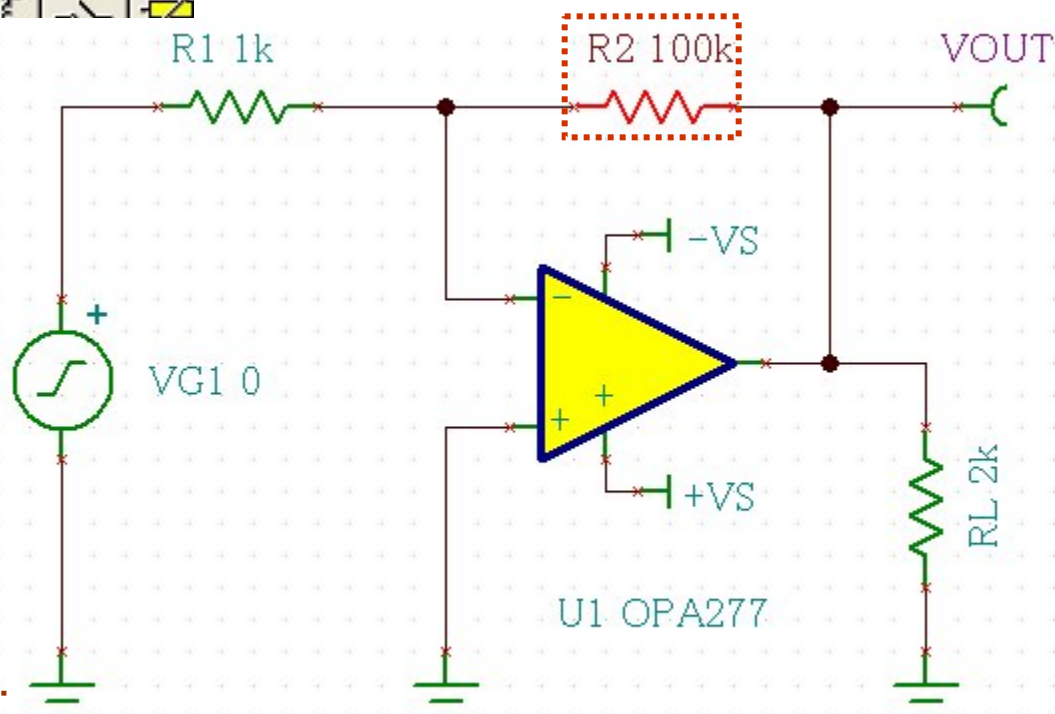
反転アンプのゲイン 対 位相特性, 評価回路

抵抗定数をステップで変える操作.



① “Analysis”メニューから
“Select Control Object”を選ぶか,
またはショート・カット・ボタンを押す.


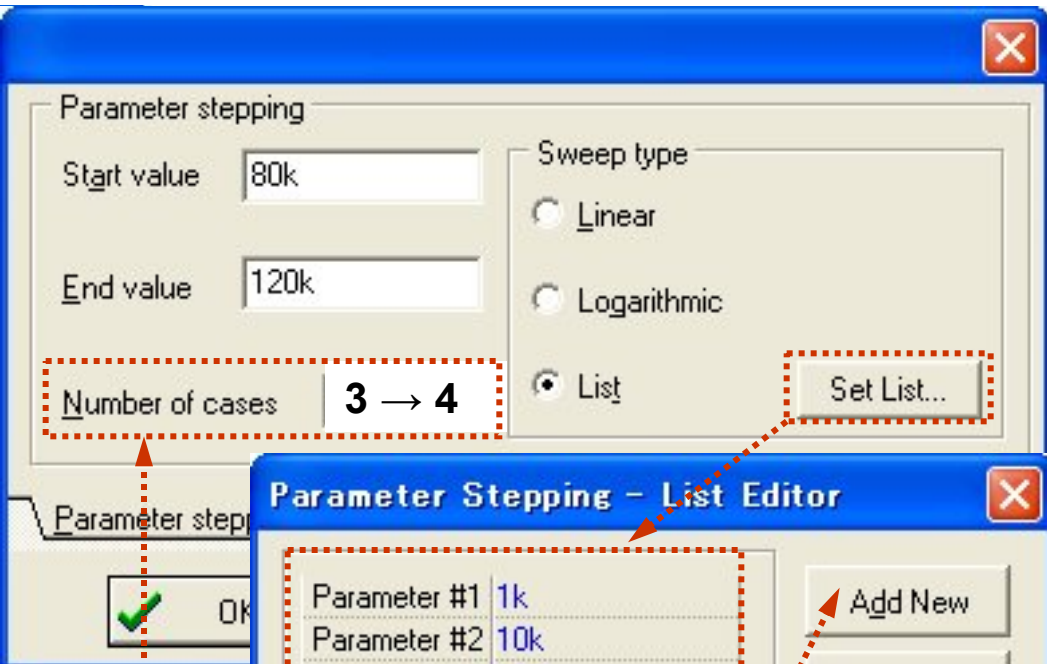
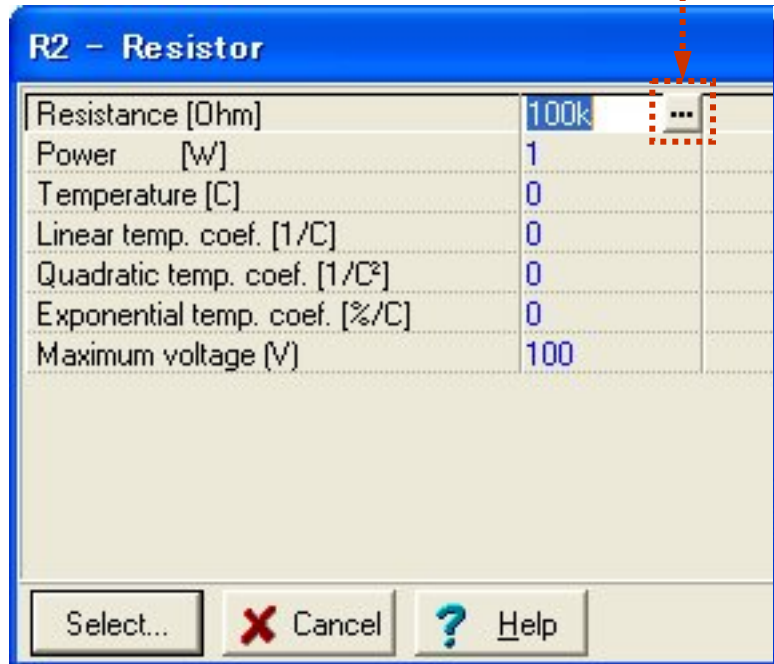
② ターゲットを選んで左クリック



記事: 部品定数の他, 温度などにも適用可.

反転アンプのゲイン対位相特性:定数リストの作成

- ③ ターゲット(R2)のパラメータ設定ボタンを押す。 ④ “List”方式を選び“Set List”ボタンを押す



参考: “Add New”ボタンでリストの行数を増やせる。
“Number of Cases”の数は自動的に行数と一致。

⑤ 設定値リストの作成

反転アンプのゲイン 対 位相特性: 表示内容の設定

Automatic Editor

Analysis I&M Tools Help

ERC...
Mode...
Select Control Object
Set Analysis Parameters...

DC Analysis
AC Analysis
Transient...
Steady State Solver...
Fourier Analysis

Noise Analysis...

Options...

Calculate nodal voltages
Table of AC results
AC Transfer Characteristic...

AC Transfer Characteristic

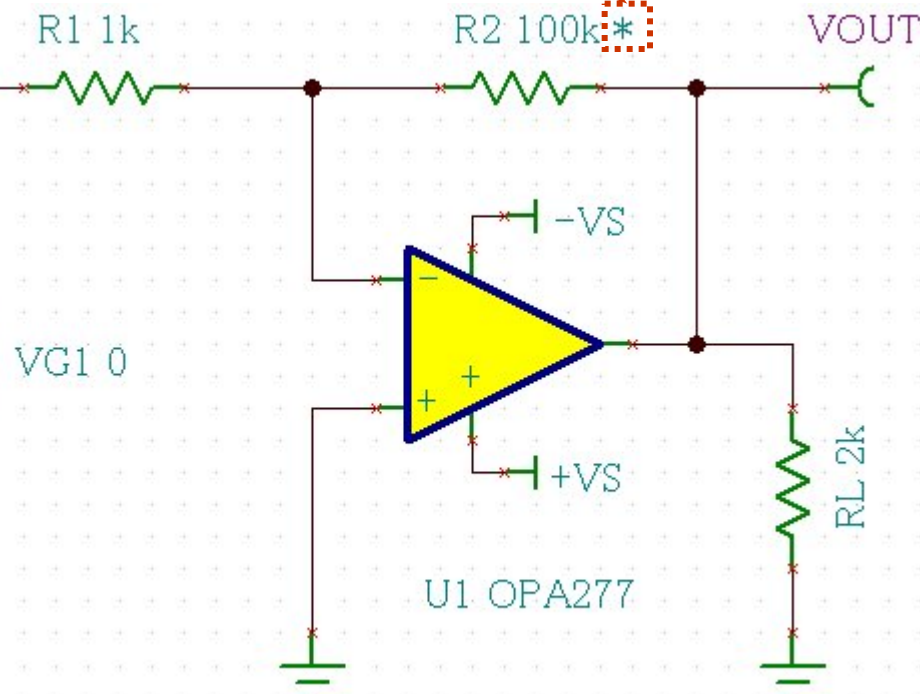
Start frequency 100m [Hz]
End frequency 10M [Hz]
Number of points 100

Sweep type
 Linear Logarithmic

Diagram
 Amplitude Nyquist
 Phase Group Dela
 Amplitude & Pha:

⑦ “Amplitude & Pha”を選択

⑥ 値の右横に“*”が付いているか確認



反転アンプのゲイン 対 位相特性: 解析結果

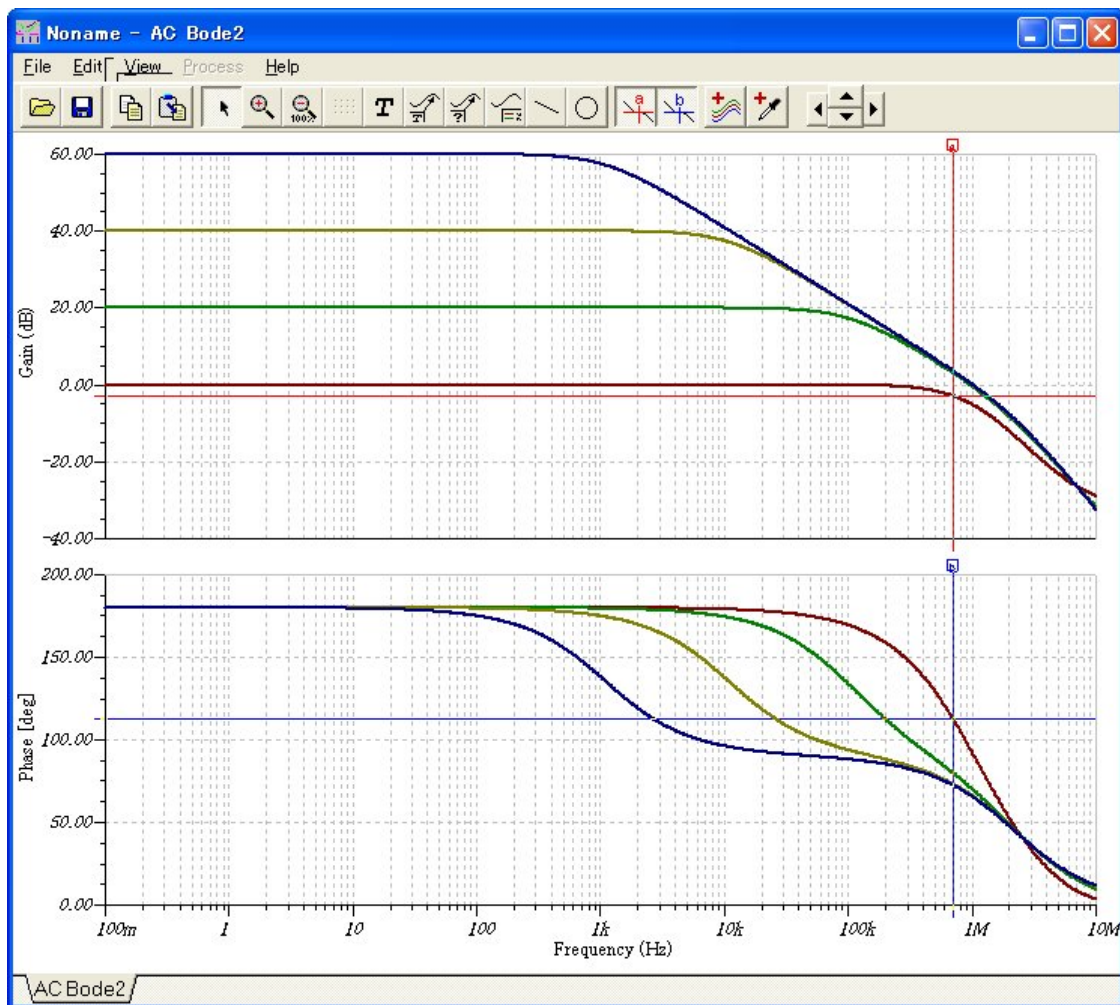
ゲインに比例して, 位相シフトが増大.

出現したグラフ Window

**G=1, -3dBにおける
周波数 対 位相シフト量**

A	x: 707.128478k	y: -2.976019
B	x: 707.128478k	y: 112.375207
A - B	x: 0	y: -115.351227

周波数帯域幅(-3dBまで)に関し
G=60dB(1000倍)では 1.12kHz
G=0dB(1倍)では, 707kHz
... と格段に広がる.

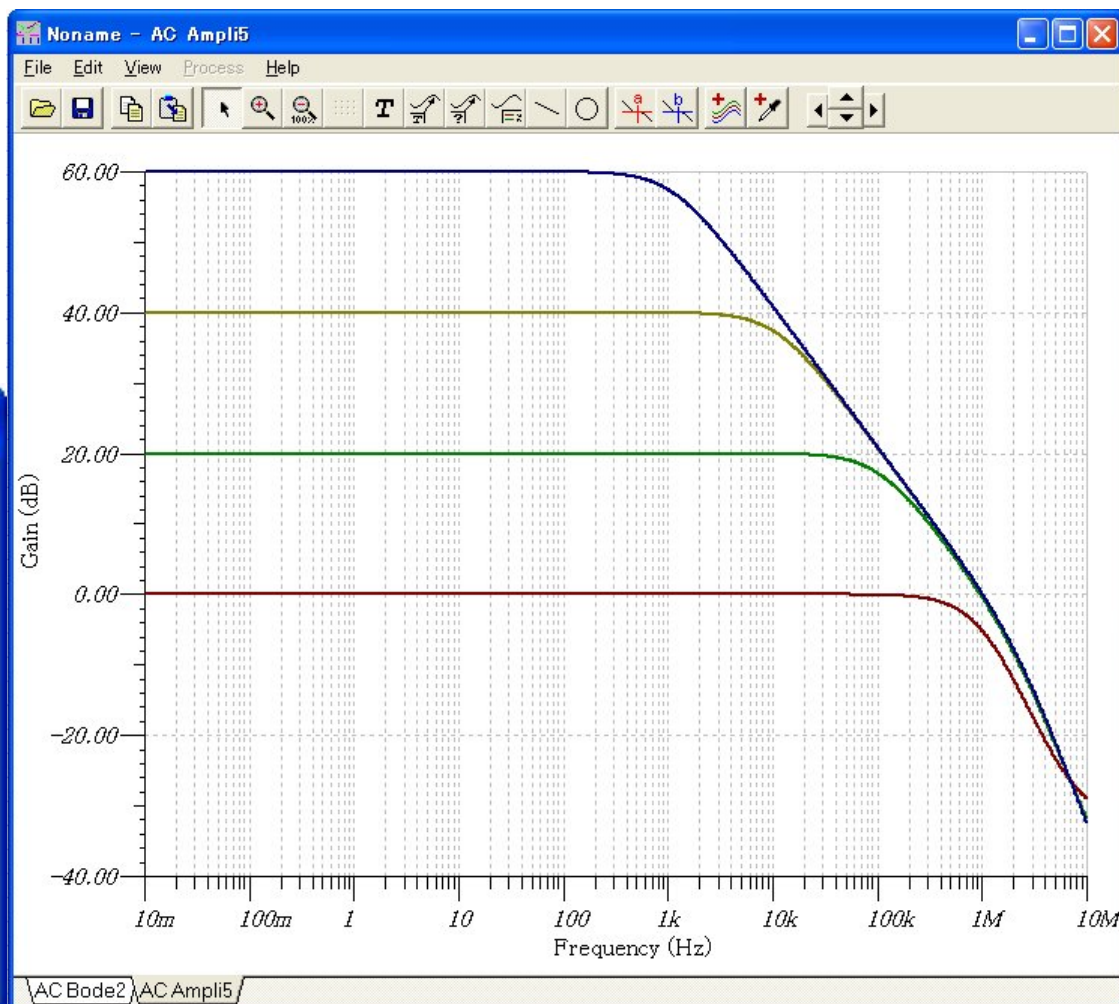
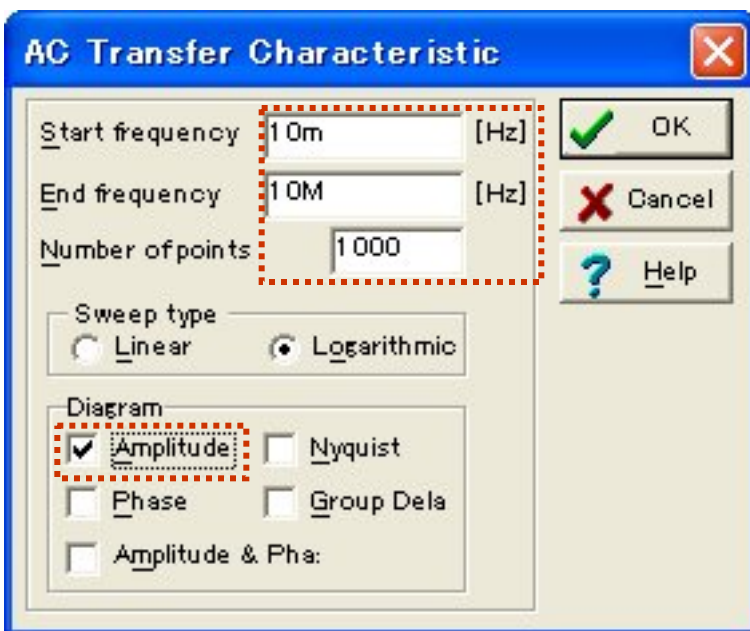


開ループ・ゲインを見る:閉ループ・ゲイン対周波数を再解析

下記条件で再解析を行う。

① グラフ Window の表示範囲を設定

- スタート: 10 mHz
- ストップ: 10 MHz
- ポイント数: 1000 (データ数)
- “Diagram”: “Amplitude”



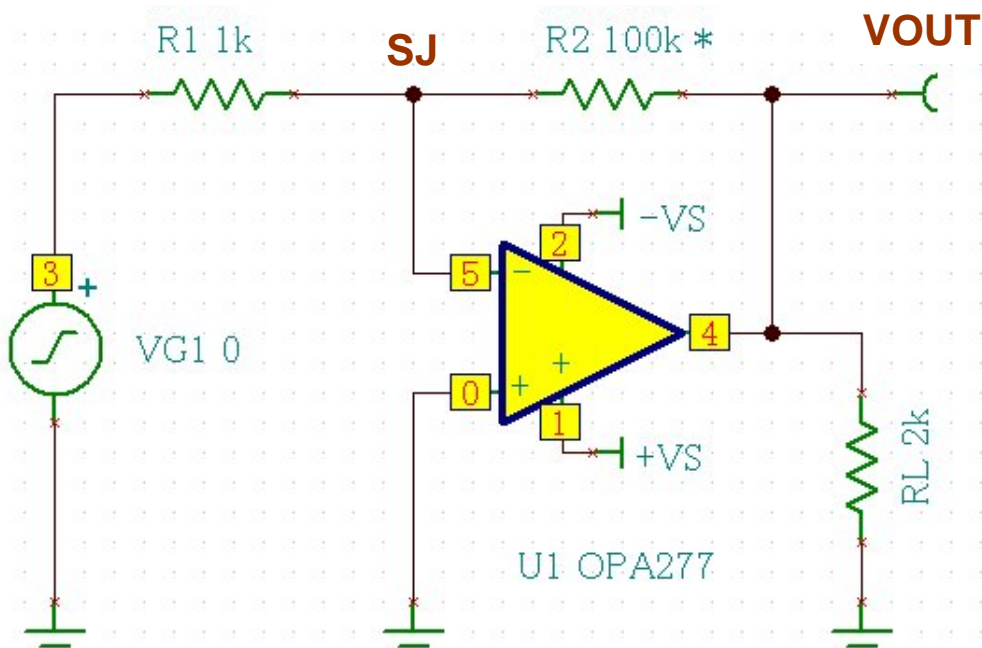
開ループ・ゲインを見る：“Add Curves”の式を設定

開ループ・ゲインは SJ と VOUT の振幅の比から求まる。

② “Add curves”ボタンを押してノード番号を表示させる。



③ “Add curves”により開いたダイアログから “More” ボタンを押す、ノード番号を参照しながら式を設定する → $VOUT[4] (s) / VP_5[4] (s)$



④ “Preview”ボタンを押す

記事: $VOUT[4]$ と $VP_5[4]$ は
ACL=60dBにおけるノード振幅

開ループ・ゲインを見る: 追加された開ループ・ゲインのカーブ

開ループ・ゲインは閉ループ・ゲインを変えても一定.

出現したグラフ Window

- 開ループ・ゲインは負荷が一定であれば、閉ループ・ゲインを変えても変わらない.
- これを確認するため、ゲイン20dBでの開ループ・ゲインをAOL_20dBとして追加してください.

