



電圧モードDCDCコンバータにおける 位相補償の調整手順

H.Yoshitake
2010/07/21



始めに

- 昨今の環境問題に呼応して、電子機器に使用される電源の電力変換効率にも関心が高まっています。
- これまでシリーズ電源を使用していた機器においても、変換効率の良いスイッチング電源を採用する事例が増えてきています。
- しかしスイッチング電源は典型的なフィードバック制御回路です。異常発振を防止するための位相補償が必須ですが、その調整は思いの外やっかいです。
- しかも、位相補償そのものに関しては色々な文献や資料がありますが、開発現場での実際の調整手順に関するアドバイスは殆ど無いのが現状です。
- そこでアナログ回路シミュレータであるSpiceを用いて、位相調整用CRの定数のひな形をシミュレーションによって導出する手順を説明致します。
- その後に実機にて微調を行えば、非常にスムーズに位相調整が出来ます。



シミュレーションの準備

- 位相調整はSpiceシミュレータのACシミュレーションによって行います。
 - PWM制御方式による、電圧モードの降圧コンバータでのシミュレーション回路です。
 - 電圧モードでも、昇圧型、反転型では実測と乖離が大きく、使えません。
 - 電流モードでは全く異なりますので、使えません。

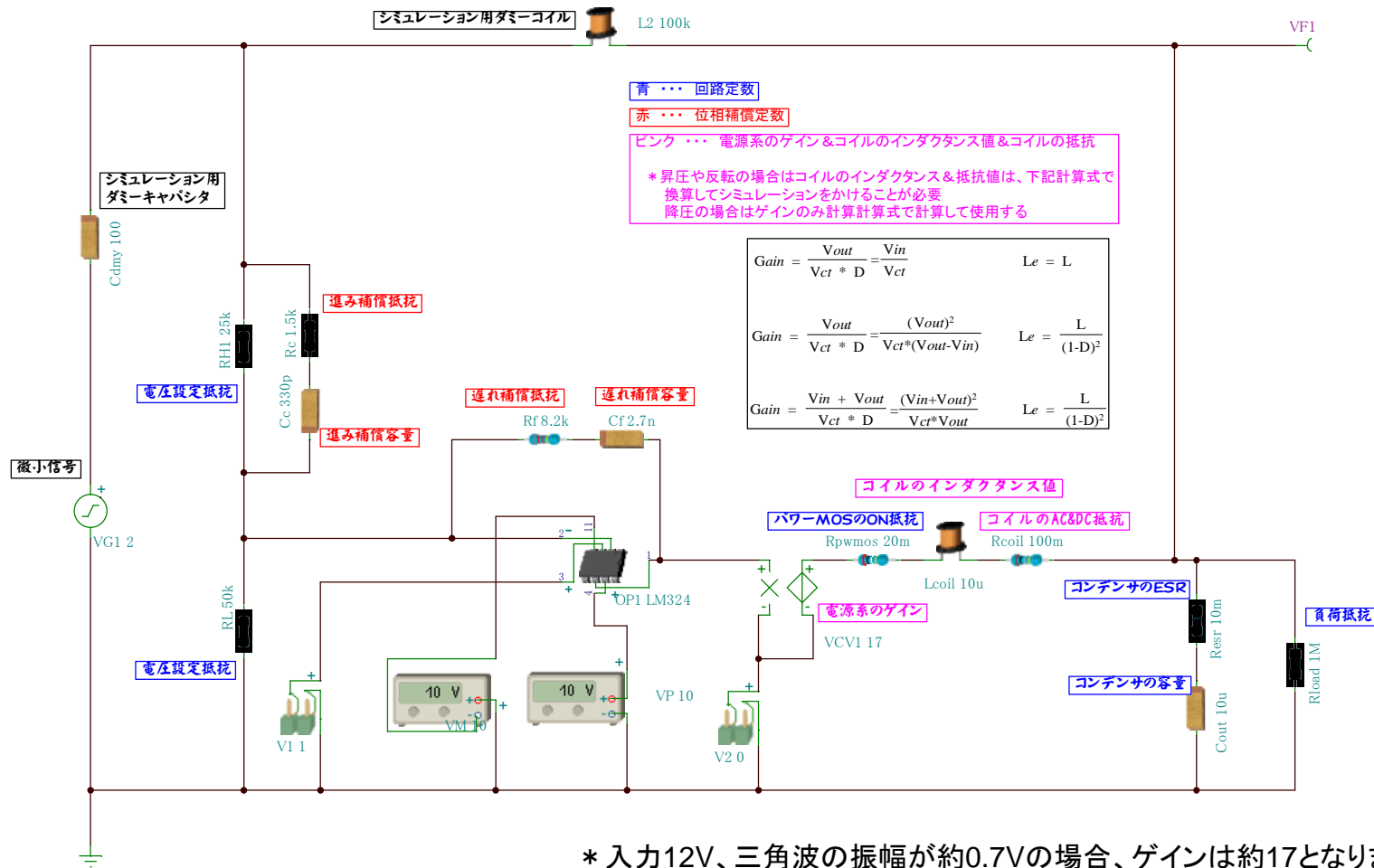
- シミュレーションを行うに当たり、事前に次の項目を確認して下さい。
 - PWM用の三角波の振幅 → 重要です。制御部のゲインに関係します。
 - 回路中のVCVIがPWM制御部のゲインで、「入力電圧 ÷ 三角波の振幅」となります。
 - 出力コンデンサのESR(寄生抵抗) → 重要です。位相を決める最大要因です。
 - 小さいほど位相調整が難しくなります。セラミックコンデンサでは数mΩ ~ 数十mΩです。
 - コイルの鉄損を決める寄生抵抗
 - 通常はデータシートに記載されていません。入手出来なければ、推測値を使います。
 - 電圧設定用の抵抗値
 - ノイズ防止の観点や、調整の難易度の点から、上側の抵抗値が20~80KΩが望ましい。

- 補足
 - 三角波の振幅はICのデータシートで、三角波のピーク電圧及びボトム電圧と書かれていることが多いと思われます。



AC特性 Spiceシミュレーション回路例

電圧モードDCDCコンバータの位相特性の計算のSpiceシミュレーション回路





回路の説明

- VCVIIはPWM制御部のゲインです。IC依存性があります。
 - ゲイン(VCVIの値)は「入力電圧 ÷ 三角波の振幅」となります。
 - 入力12V、三角波の振幅が約0.7Vの場合、ゲインは約17となります。
 - ゲインは入力電圧に比例します。全入力電圧範囲内で調整が必要です。
 - 入力電圧が高くなるとゲインが上がり、位相余裕が少なくなります。

- 位相調整用の素子
 - 回路図中に赤で記載した4つの抵抗及びコンデンサです。
 - この4つの素子の定数を最適化することで位相調整を行います。
 - 電圧設定用抵抗と、これら素子で出来る時定数を調整することが位相調整です。

- 電圧設定用の抵抗
 - 電圧設定用の抵抗は、上側、下側の比が同じならば出力電圧は同じとなります。
 - しかし位相調整素子と作る時定数がかわりますので、位相定数が変わります。

- エラーアンプ
 - エラーアンプは汎用のOp-Ampでも、理想Op-Ampでも可です。
 - 動(過渡)特性は全く異なりますが、位相調整のACシミュレーションには関係有りません。



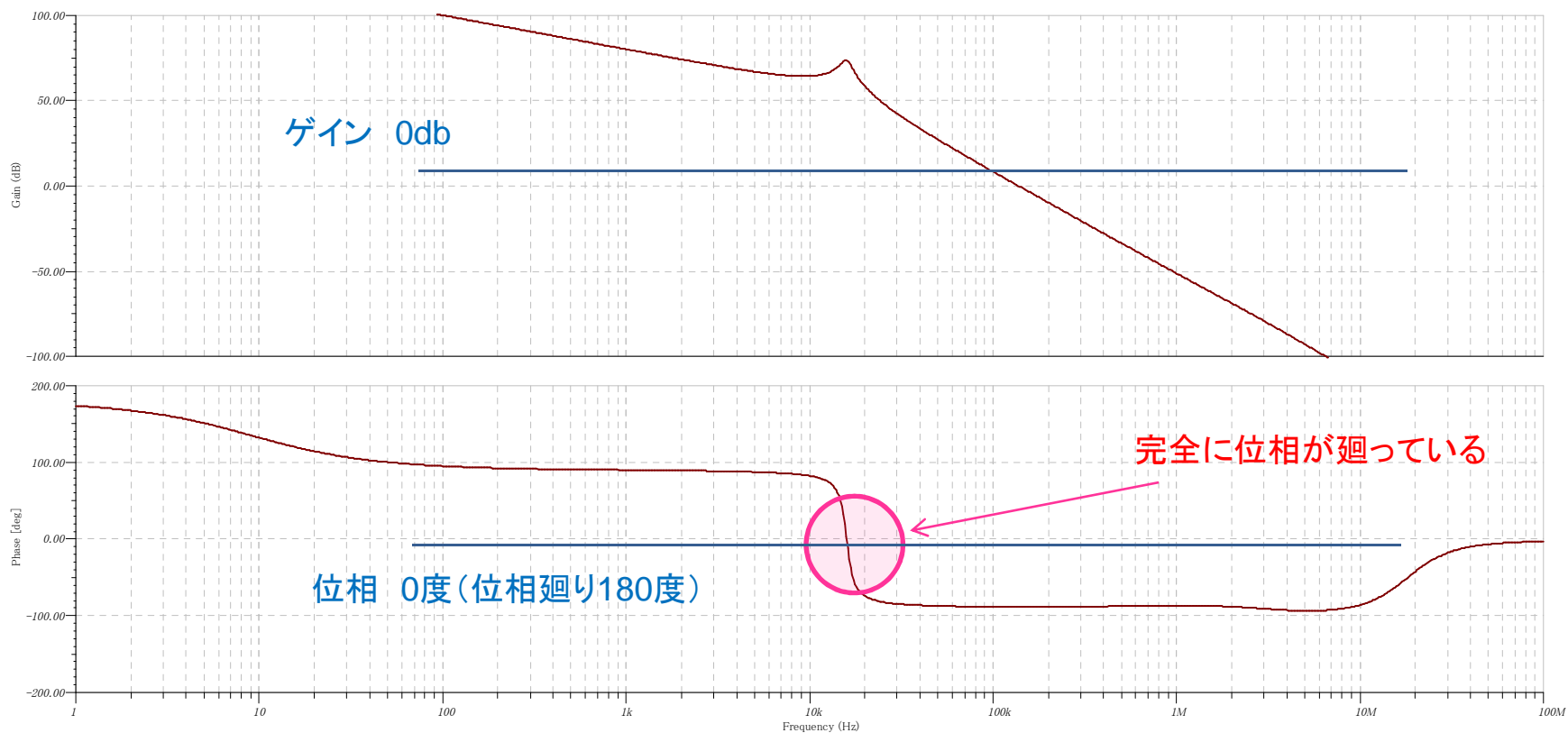
調整手順

- 次の順番で定数を決めていくと、調整が簡単になることが多いと思われます。
 - 1) C_f の調整
 - ベースとなる電源系のゲインを設定する
 - 2) R_f の調整
 - f_t (ユニティーゲイン周波数)前後の位相を持ち上げる
 - 3) C_c の調整
 - 2)で位相の持ち上げが足りない分を補償する
 - 4) R_c の調整
 - f_t 周波数前後及びそれ以上の高周波数領域のゲインを落とし、広域を安定させる



位相補償 ステップ-0 位相補償無い場合

位相補償無い場合は平滑用のコイルと出力コンデンサで出来る共振周波数で完全に位相が回っている

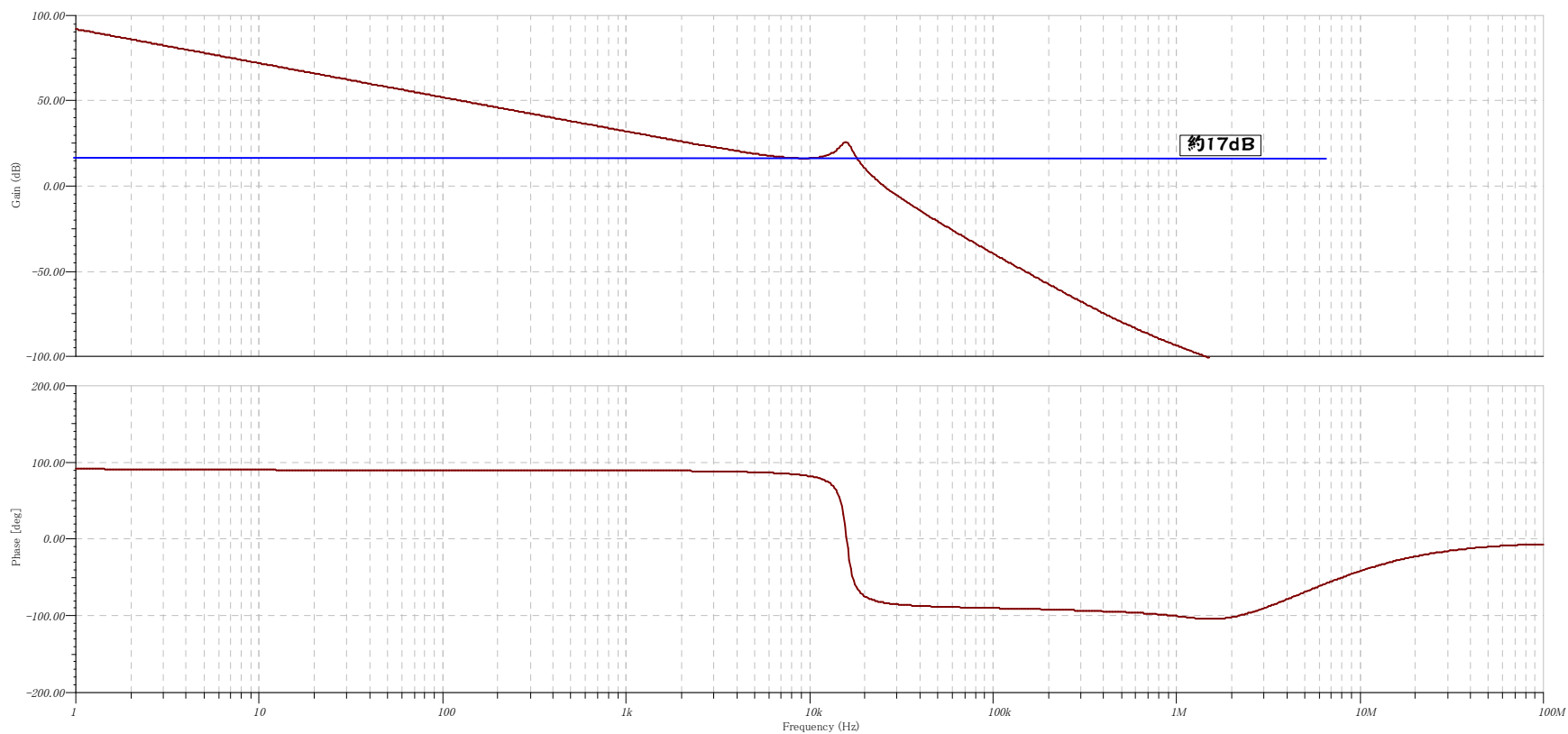


$C_f=1\text{pF}$ 、 $R_f=1\Omega$ 、 $C_c=1\text{pF}$ 、 $R_c=1\Omega$ *この値ならば位相補償無しと等価



位相補償 ステップ-1 Cfの定数設定

Cfを1pF~0.1uFの範囲で小さい値からだんだん大きくし、下図の様に共振周波数の左側にあるボトムでのゲインが、約17dB位になる値を探す

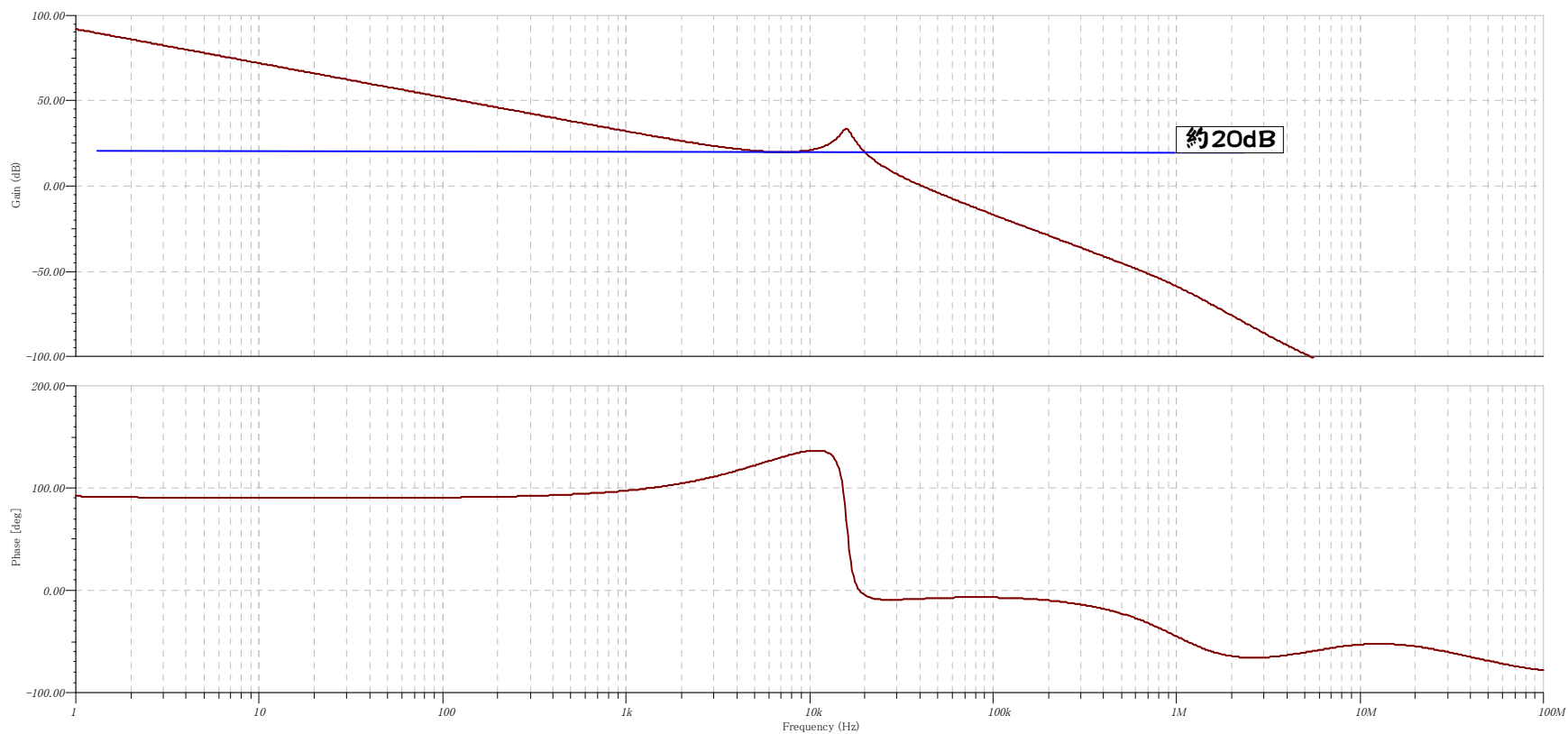


$C_f=2700\text{pF}$ 、 $R_f=1\Omega$ 、 $C_c=1\text{pF}$ 、 $R_c=1\Omega$



位相補償 ステップ-2 R_f の定数設定

R_f を $1k\Omega \sim 50k\Omega$ の範囲で小さい値からだんだん大きくし、下図の様に共振周波数の左側にあるボトムでのゲインが、約20dB位になる値を探す

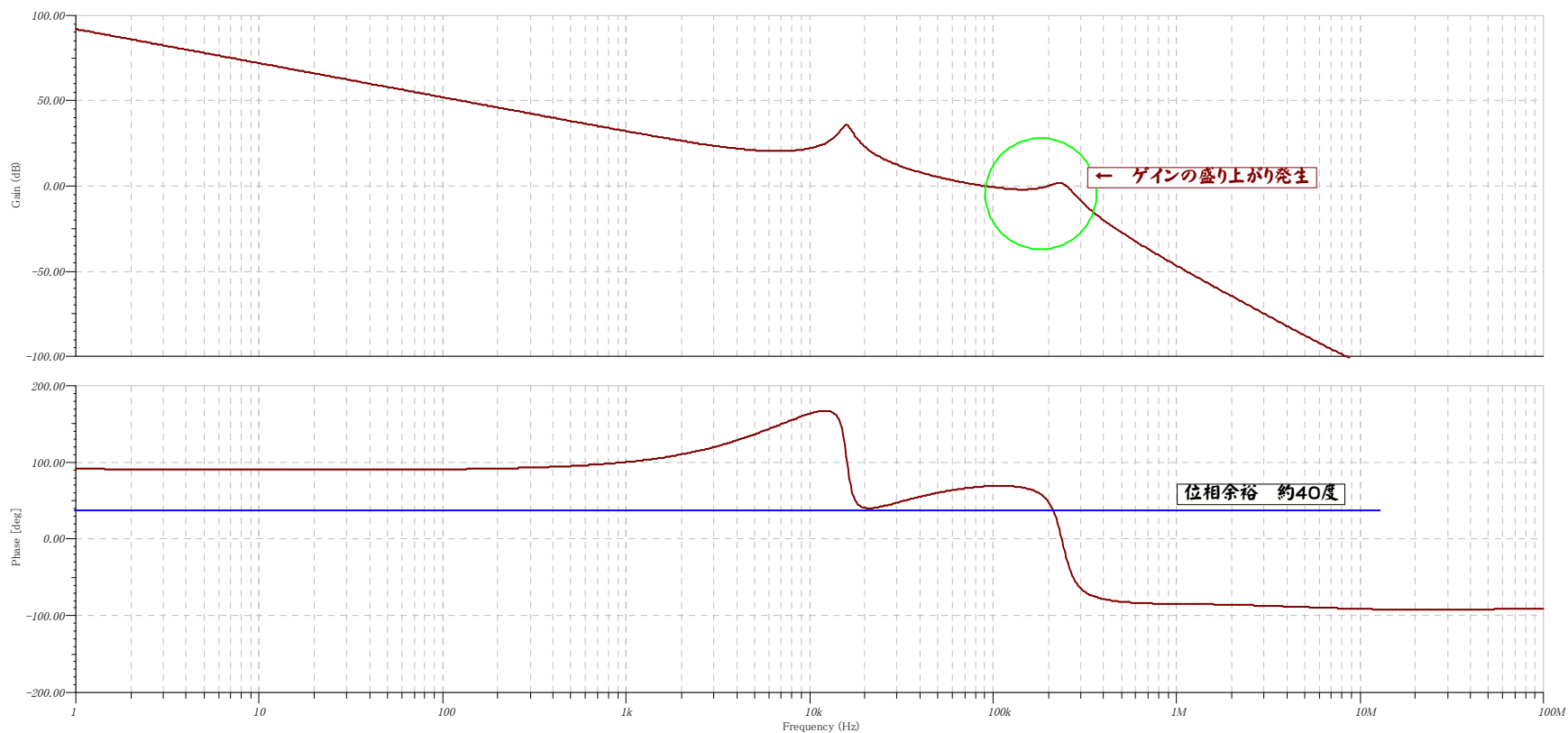


$C_f=2700pF$ 、 $R_f=8.2K\Omega$ 、 $C_c=1pF$ 、 $R_c=1\Omega$



位相補償 ステップー3 C_c の定数設定

C_c を10pF~2000pFの範囲で小さい値からだんだん大きくし、下図の様に共振周波数での位相余裕が約30度位になる値を探す

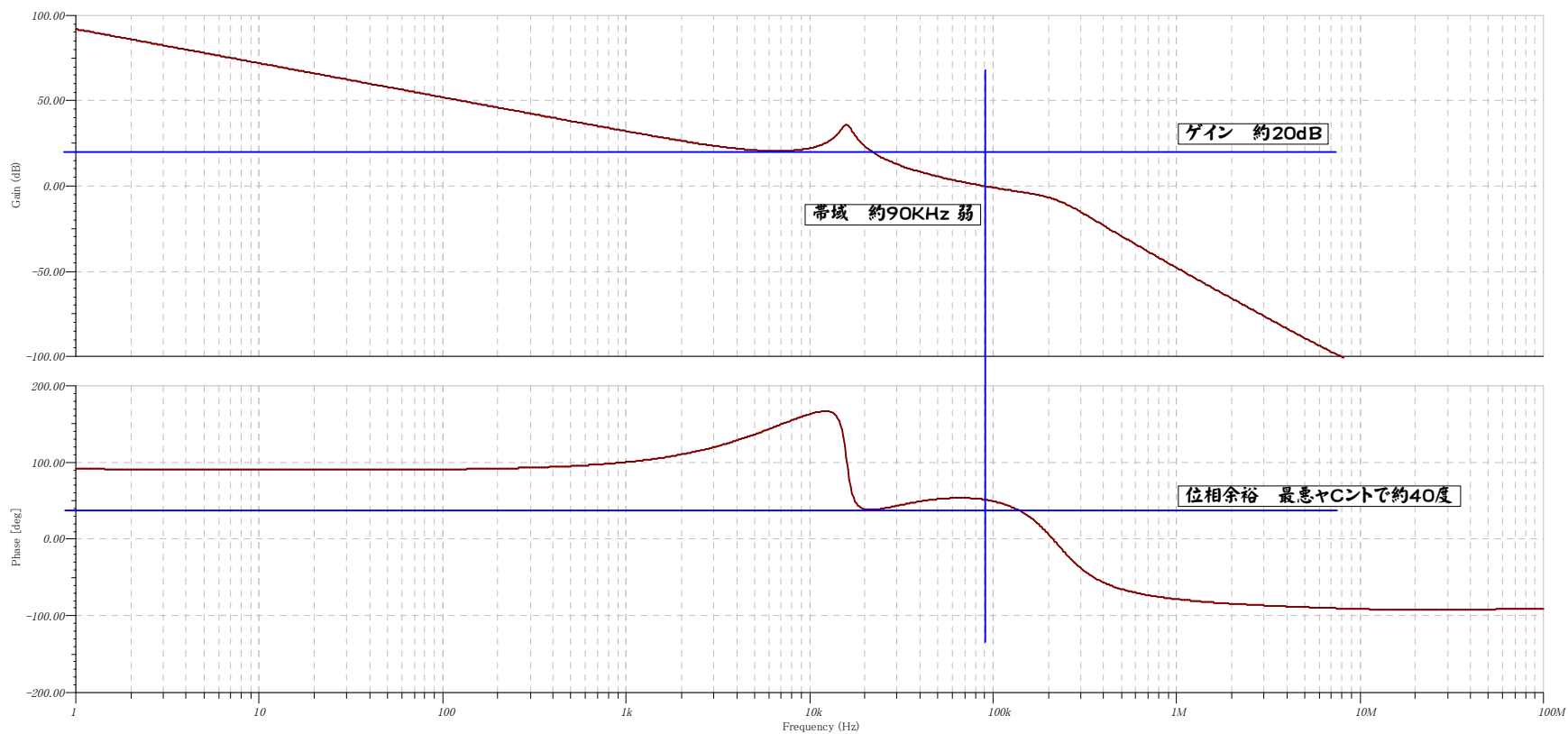


$C_f=2700\text{pF}$ 、 $R_f=8.2\text{K}\Omega$ 、 $C_c=330\text{pF}$ 、 $R_c=1\Omega$



位相補償 ステップー4 R_c の定数設定

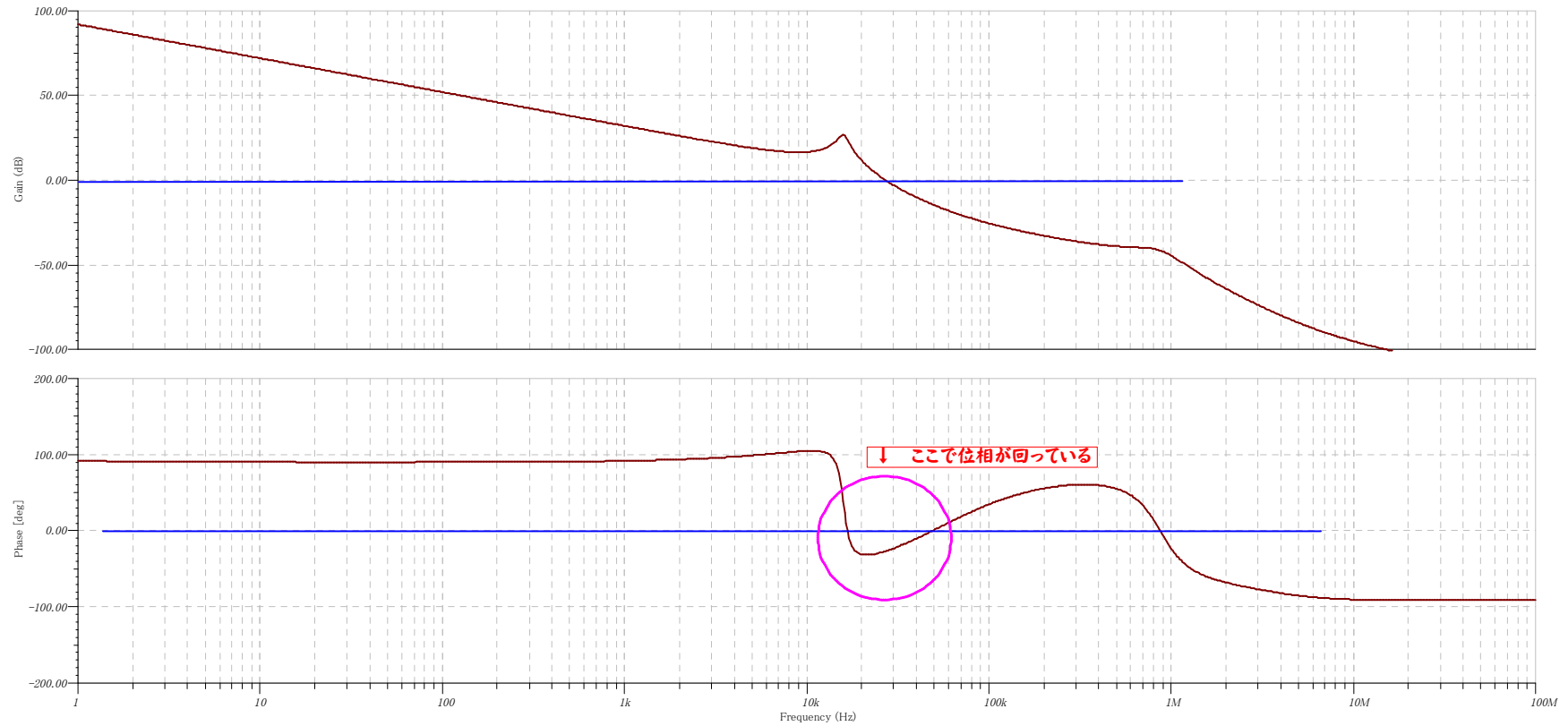
R_c を100~10k Ω の範囲で小さい値からだんだん大きくし、下図の様に共振周波数の右側でのピークを無くし、ゲインカーブが単調減少するように調整する



$C_f=2700\text{pF}$ 、 $R_f=8.2\text{K}\Omega$ 、 $C_c=330\text{pF}$ 、 $R_c=1.5\text{K}\Omega$

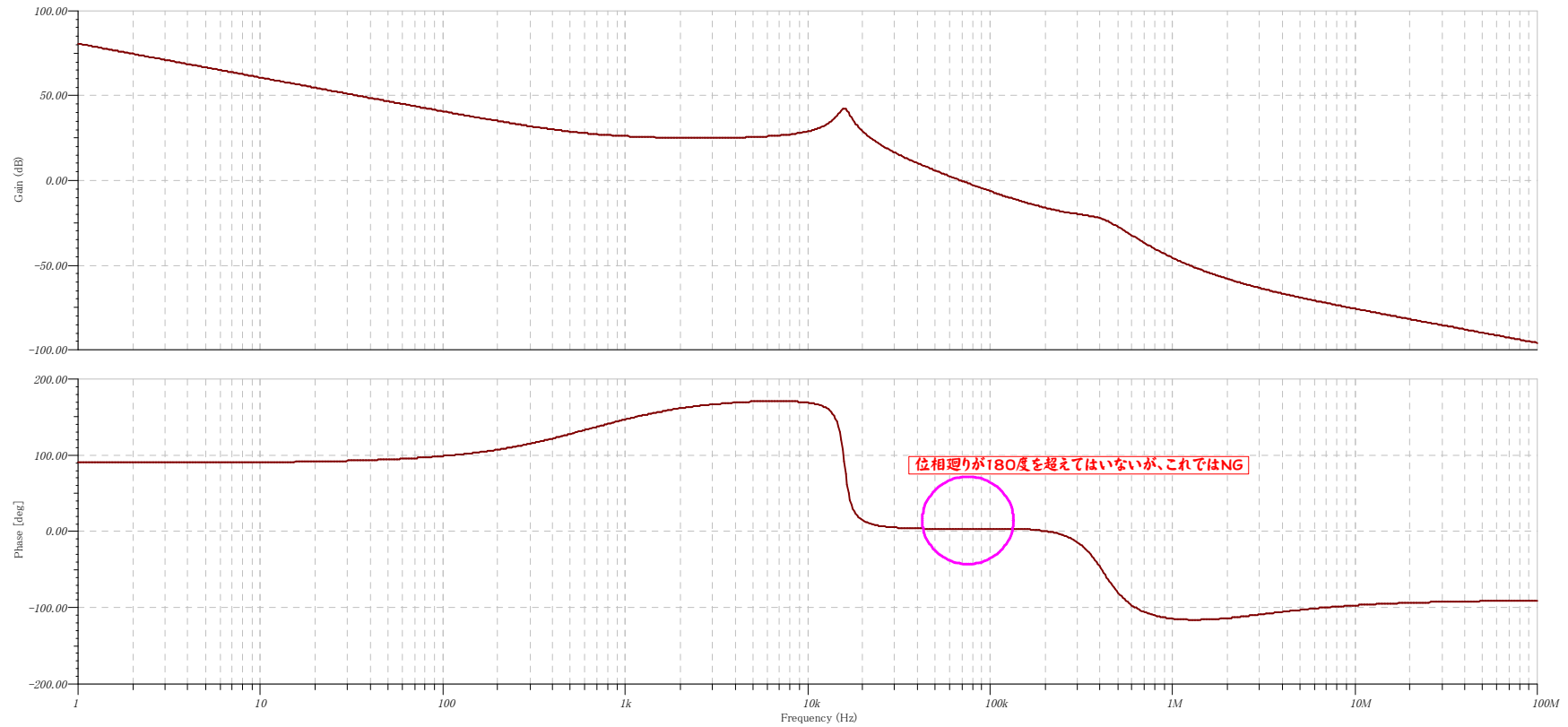


位相補償がNGの例-(1)





位相補償がNGの例-(2)





(補足)LCの共振周波数

- LCの共振周波数やQ値は素子の定格値による計算から外れる
 - セラミックコンデンサにはバイアス依存性が有る
 - 耐圧10Vの製品に10Vの電圧を印可すると、容量が数十%低下する
 - 同じくセラミックコンデンサにはエージング効果が有る
 - 始めて電圧印可してから数時間後位までは、容量が数十%高く、その後落ち着く
 - コイルのインダクタンス値には電流依存性が有る場合がある
 - 飽和しにくいタイプのコイルでは、負荷電流が少なくなるとインダクタンス値が高くなる
 - 共振周波数でのQ値は、コイルのAC抵抗の影響が大きい
 - コイルの抵抗はDC抵抗(銅線の抵抗)よりもAC抵抗の方が大きい場合が多い
- このような理由により、実測した位相特性のカーブでの共振周波数は、シミュレーション値とずれが出ます。



(補足) 電圧設定抵抗の絶対値の影響

- 電圧設定用の抵抗の絶対値と位相補償容量で時定数を作り、位相を調整する
 - 電圧設定用抵抗の絶対値を変えると、位相補償はやり直しになる
 - 理由は下記のように、位相調整の時定数が変わるため
 - 抵抗値を大きくすれば容量を小さくできるので、メリットも大きい
 - 位相補償の条件出しが簡単になることが多い
 - コンデンサの充放電に要する時間が短くなり、応答性の改善にもつながる
 - 抵抗に流れる電流が少なくなり、省電力化出来るので、携帯機器ではメリットが大きい
 - 抵抗値を大きすぎると、ノイズによる誤動作の懸念がでてくる
 - 通常の使用ではHiサイド、Rowサイド共に100K Ω 以内を推奨
 - コイルの漏れ磁束から引き起こされる、電磁誘導による誤動作の可能性が高まる
 - カップリングによる大振幅ラインからのノイズの重畳する可能性が高まる



最後に

- これまで述べた手順で、シミュレーションにて位相定数の初期値を出せます。
- この定数をもとに、実際の基板で微調整を行うのが、最も手軽な調整方法です。
- FRA(周波数応答解析器)があれば、位相特性を直接測定できますので、微調も短時間で行えます。
- しかしFRAが無い場合は、負荷応答時のオーバーシュート、アンダーシュートの波形で位相特性(余裕)を推測しながら調整します。
- 但し位相特性は小信号特性であり、大きな負荷変動時の応答特性を表す特性ではありません。オーバーシュート、アンダーシュートでのリングング波形は位相余裕が関係しますが、その絶対値は制御系の大信号特性で決まります。
- 従って電源系のゲインを高く、帯域を広く取れば、ある程度応答特性と相関があります。しかし、必ずしも応答特性が速いとは言えないことを前提に位相調整を行って下さい。