

リニアレギュレータシリーズ、スイッチングレギュレータシリーズ

周波数特性分析器 (FRA) による 位相余裕測定方法

リニアレギュレータ IC やスイッチングレギュレータ IC の位相余裕を測定する時に、既存測定器であるオシロスコープやネットワーク・アナライザを用いる方法がありますが、信号を帰還ループ内へ注入するための回路はトランスを用いて信号源をフローティングにする必要があります。トランスの特性が低周波までフラットなものが少なく、またスイッチングレギュレータでは、出力波形に含まれるスイッチング周波数を取り除かないと正しい結果が得られません。このアプリケーションノートでは、エヌエフ回路設計ブロック社の周波数特性分析器 (Frequency Response Analyzer 以下 FRA) を使い、簡単に位相余裕を測定する方法を紹介しています。

既存測定器による測定方法

Figure 1 はオシロスコープと信号発生器を用いた測定のセットアップ例を示します。帰還ループ内に正弦波信号を注入するためトランスを用いて信号源をフローティングにしています。

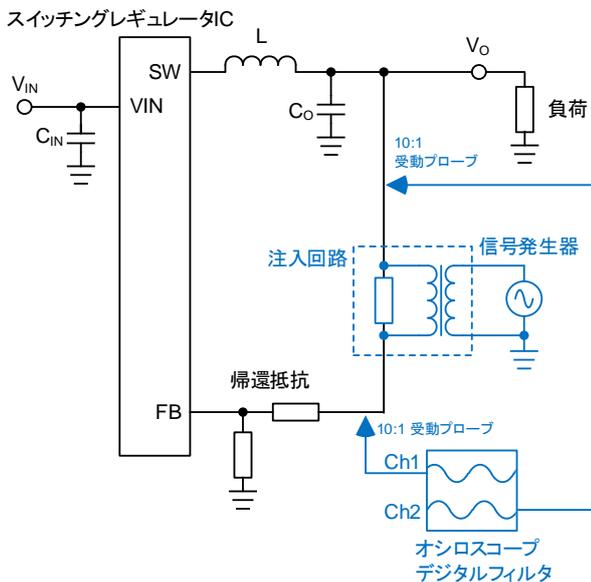


Figure 1 オシロスコープによるセットアップ例

オシロスコープの Ch1 でループの入力を、Ch2 でループの出力をモニタします。波形にはスイッチングレギュレータ IC で発生するスイッチングノイズが重畳するため、オシロスコープのデジタルフィルタで LPF をかけ、完全に除去する必要があります。入力と出力の波形の振幅が一致する (CH1 - CH2 = 0dB) まで信号発生器の周波数を変化させます。このときの Ch1 と Ch2 の位相差が位相余裕の値になります。正弦波の振幅と位相は、オシロスコープの測定機能から読み取ります。

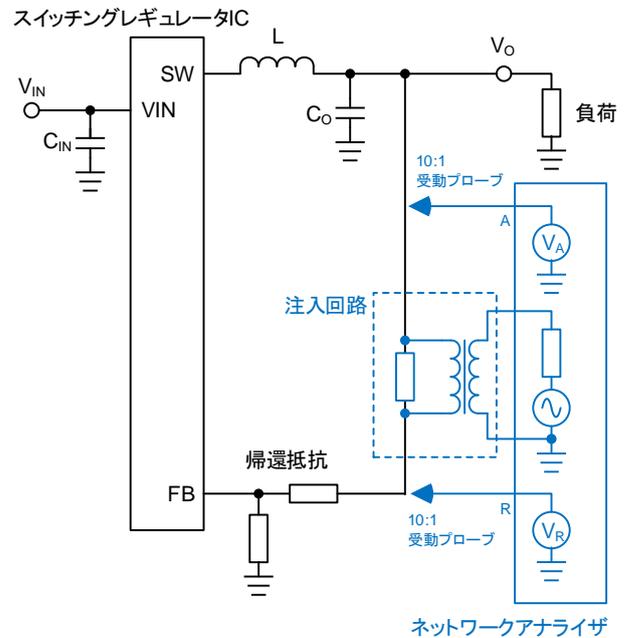


Figure 2 ネットワーク・アナライザによるセットアップ例

Figure 2 はネットワーク・アナライザを用いた測定のセットアップ例を示します。オシロスコープでの例と同様、ネットワーク・アナライザに搭載されている信号発生器を、トランスを用いて帰還ループ内に正弦波信号を注入します。ネットワーク・アナライザの入力 R をループの入力へ、入力 A をループの出力へ接続し、A/R を測定することで位相余裕を求めます。広範囲な周波数帯域を測定する場合はトランスの周波数特性の影響が出るので注意が必要です。

FRA による測定方法

Figure 3 に FRA5087 の外観、Figure 4 に FRA を用いた測定のセットアップ例を示します。FRA に搭載されている信号発生器は筐体からアイソレーションされている (Figure 5) ため、正弦波信号を帰還ループ内に直接注入することができます。これによりトランスの特性を考慮することなく評価ができます。

1. 信号注入箇所は、ループ内の信号伝達方向を見たときの入力インピーダンス Z_{IN} が高く、逆方向を見たときの出力インピーダンス Z_O が低いポイントを選択します。リアレギュレータや DC/DC スイッチングレギュレータの場合、帰還抵抗の手前と出力 V_O の間に信号を注入します。

注入方法は抵抗を用いて、信号源出力を注入抵抗 R_i の両端に接続します。 $Z_{IN} \gg R_i \gg Z_O$ の条件を満たす抵抗 R_i を用いることで元々のループ特性を乱すことなく測定することが可能です。抵抗値はエヌエフ回路設計ブロック社では $50\Omega \sim 100\Omega$ を推奨しています。

2. 注入抵抗 R_i の両端からシールド線で信号を取り出し FRA の CH1、CH2 に接続します。FRA5087 の CH1、CH2 入力インピーダンスは $1M\Omega (C=25pF \pm 5pF)$ 、許容最大入力 AC+DC で $\pm 350V$ 、絶縁耐圧 $250V_{rms}$ です。ほとんどの場合は直結できます。FRA5087 は $10MHz$ までの電圧と位相を測定できますが、高い周波数で位相を精度良く測定するときは、各チャンネル入力に接続する信号ケーブルを同一種、同一長にしてください。高電圧で測定する場合は、接続する信号ケーブルの絶縁耐圧にも注意してください。また、オプションのループゲイン測定アダプタ (Figure 6) を使用することで、接続がさらに簡単になります (Figure 7)。

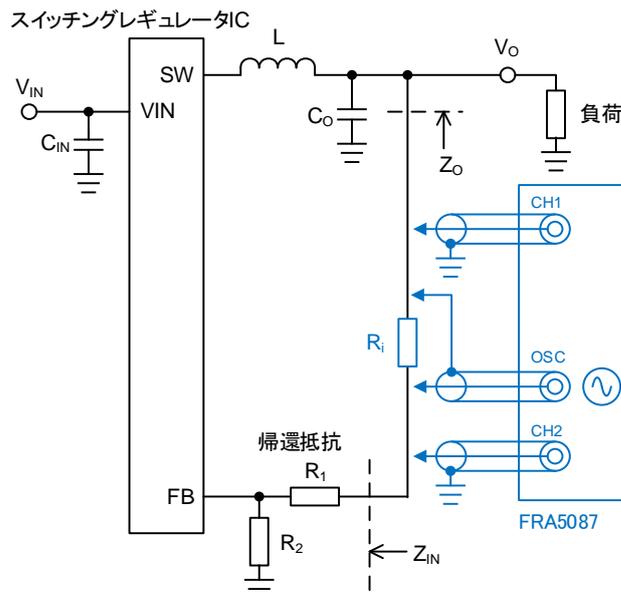


Figure 4 FRA によるセットアップ例



Figure 5 各端子は筐体と端子間が電氣的に絶縁されている

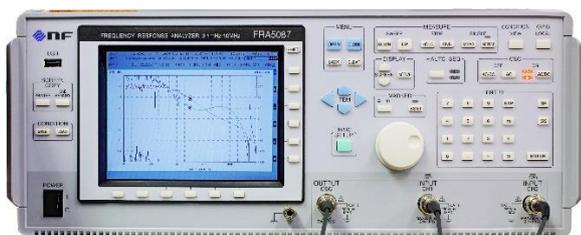


Figure 3 FRA5087 外観

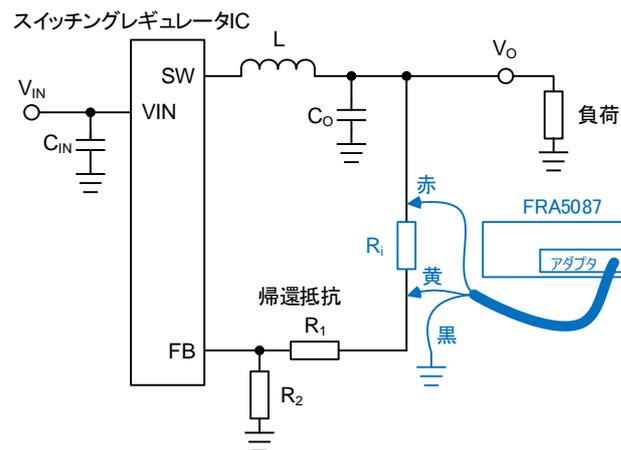


Figure 7 アダプタを使用したセットアップ例



(写真: エヌエフ回路設計ブロック)

Figure 6 ループゲイン測定アダプタ

3. 基本設定は BASIC SETUP キーで行います。



Figure 8 BASIC SETUP キー

4. スイープ周波数範囲の上限と下限を設定します。

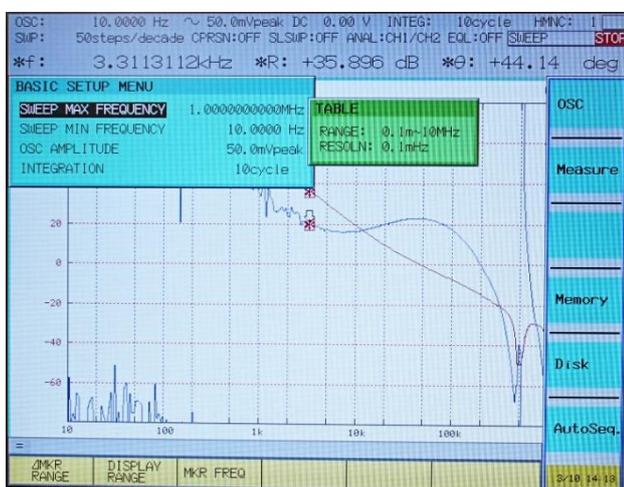


Figure 9 上限周波数設定画面

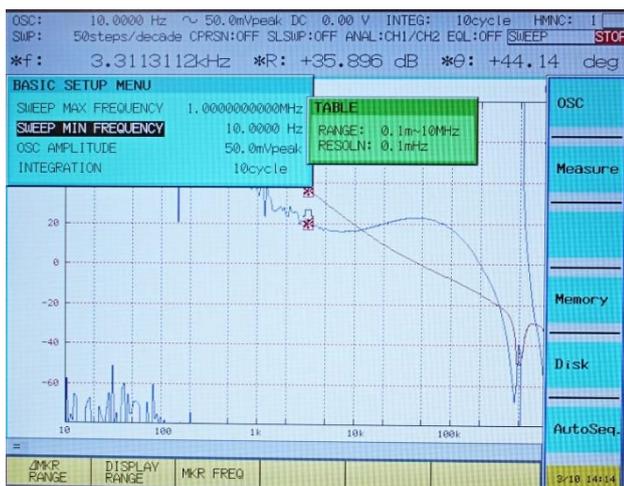


Figure 10 下限周波数設定画面

5. ループが線形動作する範囲で発振器出力レベルを決めます。発振器出力レベルを設定し (Figure 11)、出力をオンにします (Figure 12)。発振器出力メニュー値を変更したときは、AC/DC ON キーを再度押すまで実際の出力値は変更されませんので注意してください。発振器出力レベルの決め方は後述します。

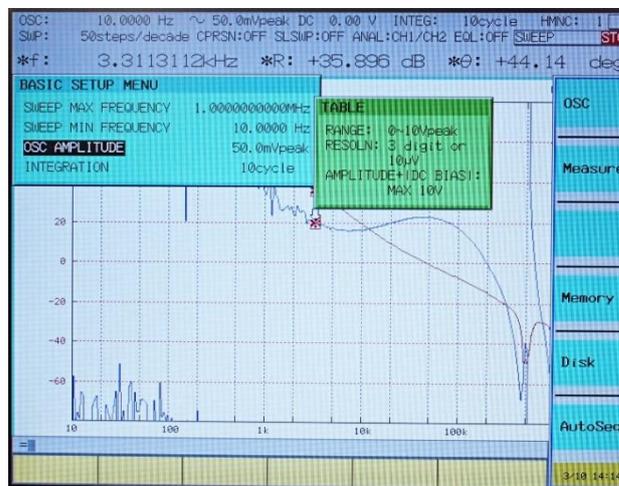


Figure 11 発振器出力設定画面



Figure 12 発振器出力 ON キー

6. SWEEP DOWN キーを押して測定を開始します。



Figure 13 SWEEP DOWN キー

7. マーカノブでマーカを移動させ位相余裕を読み取ります。GAIN (赤色の線) が 0dB となる位置にマーカを移動します。マーカ表示の *θ の部分が位相余裕の値になります。

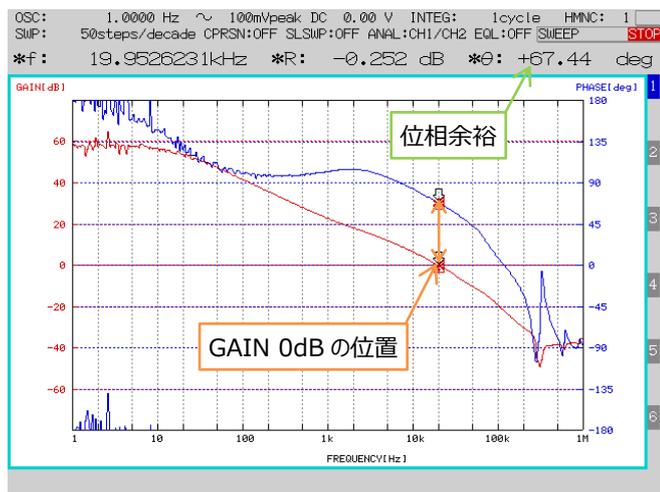


Figure 14 マーカで位相余裕を読み取る

8. マーカノブでマーカを移動させ利得余裕を読み取ります。PHASE (青色の線) が 0deg となる位置にマーカを移動します。マーカ表示の *R の部分が利得余裕の値になります。

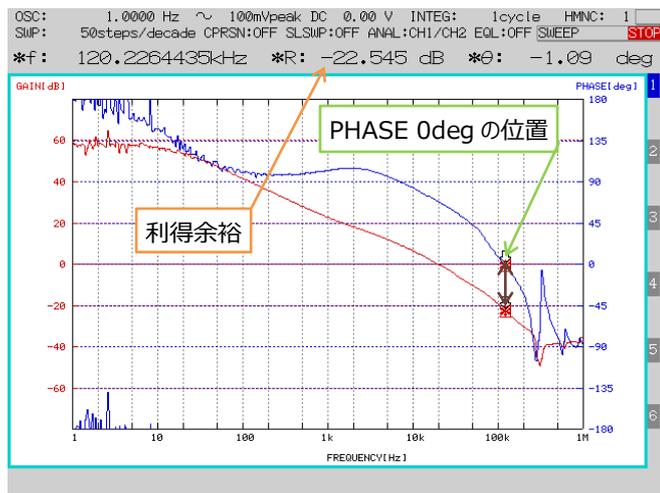


Figure 15 マーカで利得余裕を読み取る

9. 発振出力レベルの決め方

ループが線形動作する範囲で発振出力レベルを決める必要があります。Figure 16 のようにオシロスコープで出力 V_o をモニタします。ループへの注入レベルが適切なきは Figure 17 のように正弦波が観測されます。注入レベルが過大なときは Figure 18 のように歪んだ波形が観測されます。これでは正しい位相特性が測定できません。

次に発振出力レベルを 10mVpeak~500mVpeak まで変化させたときの位相特性を Figure 19~Figure 28 に示します。注入レベルが小さいとノイズに埋もれてしまい測定ができなくなります。注入レベ

ルが過大になるとループが飽和するため特性が変化してしまいます。この例で見ると、位相マージンのみを見る目的であれば、数十 kHz のデータが読み取れば良いので、適正な発振出力レベルは 10mVpeak~100mVpeak ということになります。200mVpeak では高域の特性に変化が現れているためループの飽和が始まっていると判断できます。また、低域のループ特性まで評価したい場合の適切な発振出力レベルは 60mVpeak~100mVpeak ということになります。

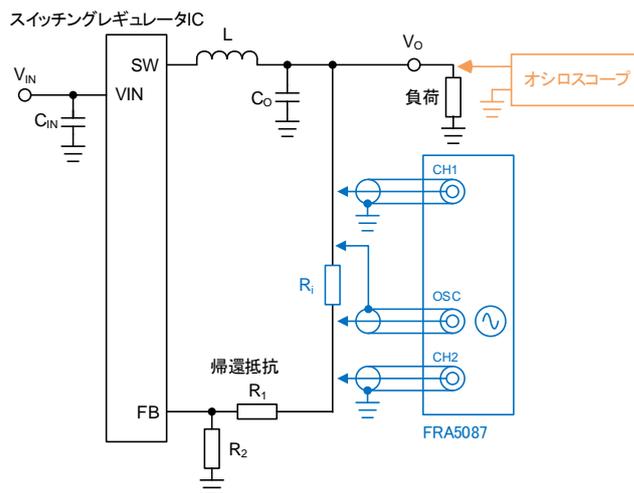


Figure 16 オシロスコープで出力をモニタ

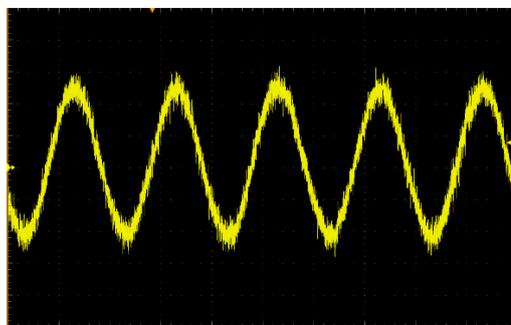


Figure 17 注入レベルが適切で線形動作している出力波形

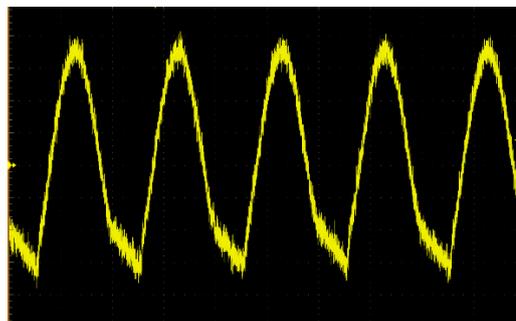


Figure 18. 注入レベルが過大で線形動作していない出力波形

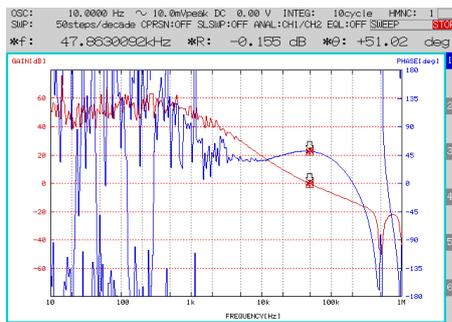


Figure 19 発振出力レベル 10mVpeak

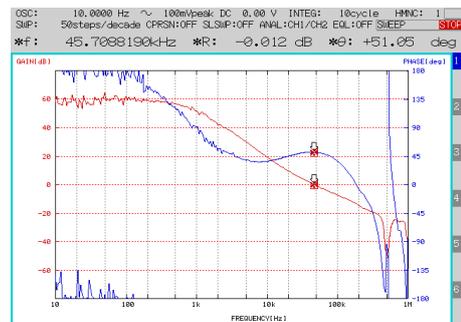


Figure 24 発振出力レベル 100mVpeak

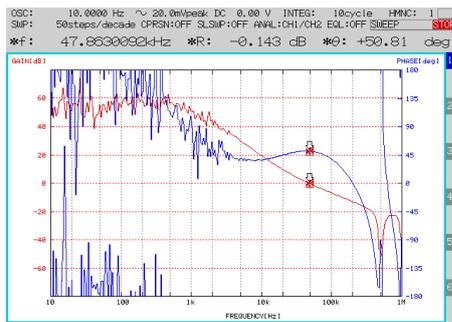


Figure 20 発振出力レベル 20mVpeak

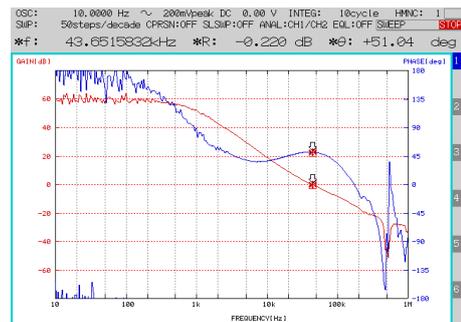


Figure 25 発振出力レベル 200mVpeak

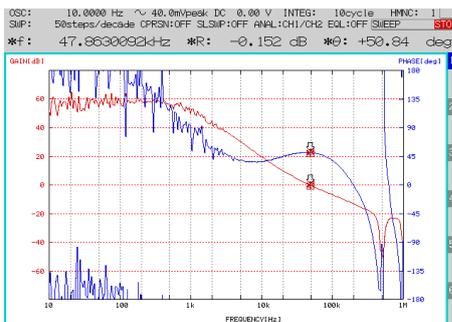


Figure 21 発振出力レベル 40mVpeak

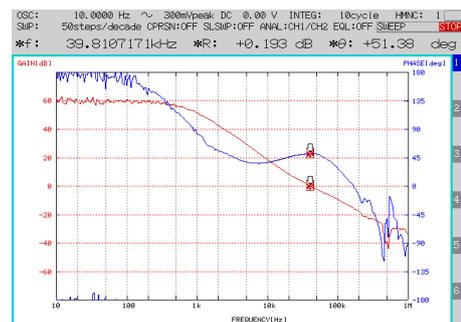


Figure 26 発振出力レベル 300mVpeak

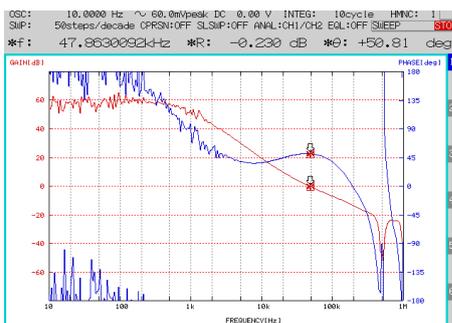


Figure 22 発振出力レベル 60mVpeak

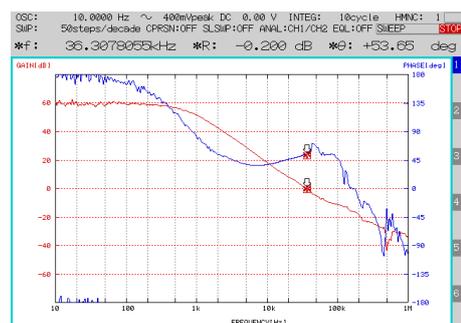


Figure 27 発振出力レベル 400mVpeak

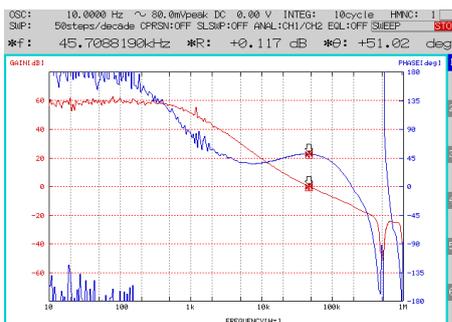


Figure 23 発振出力レベル 80mVpeak

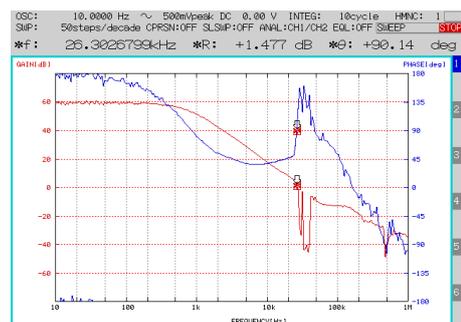


Figure 28 発振出力レベル 500mVpeak

安定性の判断

位相余裕、利得余裕とステップレスポンスの関係を Table 1 に示します。位相余裕、利得余裕とステップレスポンスはトレードオフの関係にあるため、どのような電源特性が必要かにより判断基準が変わります。

ステップレスポンスにリングングが現れない電源が必要な場合は、位相余裕 60 deg 以上、利得余裕 10dB 以上の特性が得られるように IC の位相調整をする必要があります。ただしこの場合、負荷応答特性は遅くなります。

位相余裕	利得余裕	状態	
		ステップレスポンス	リングング
20 deg	3 dB	速い	大きい
30 deg	5 dB	速い	やや大きい
45 deg	7 dB	速い	多少あり
60 deg	10 dB	やや遅い	なし
72 deg	12 dB	遅い	なし

Table 1 位相余裕、利得余裕とステップレスポンスの関係

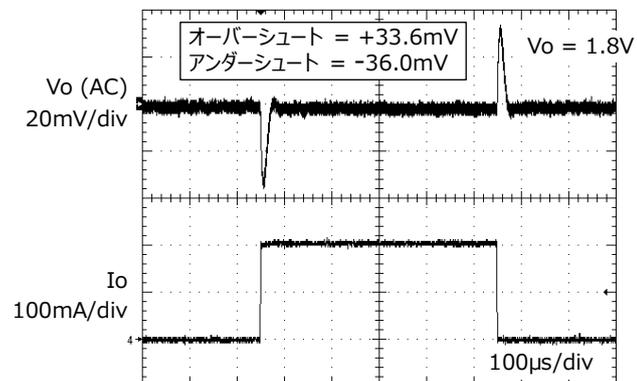
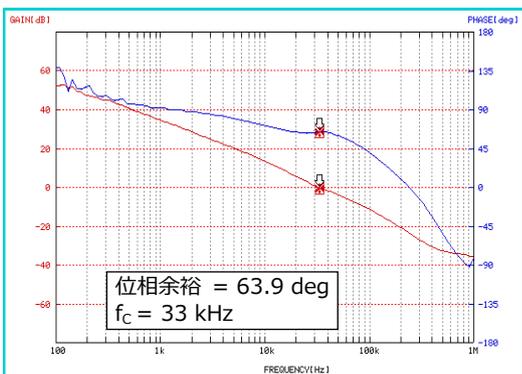
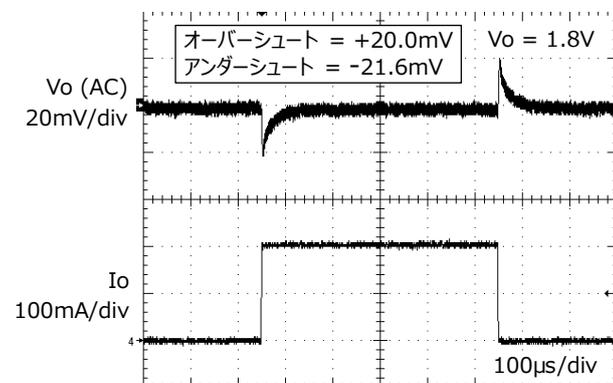
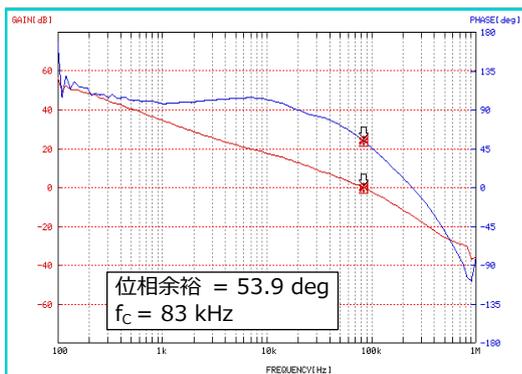
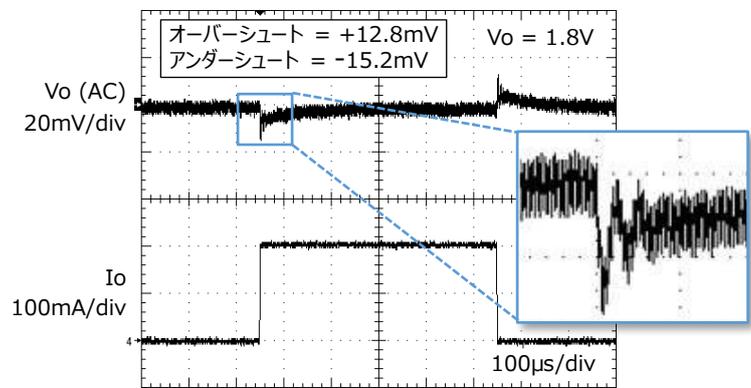
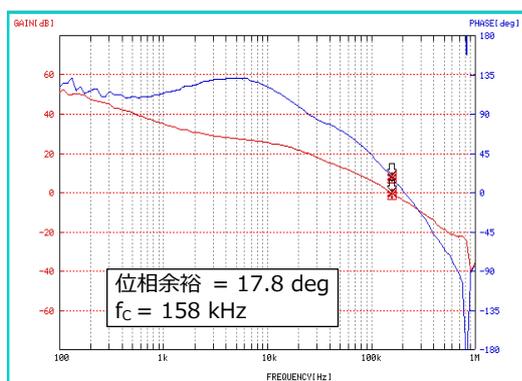


Figure 29 位相余裕とステップレスポンス特性の実測例

負荷応答特性に高速性が必要ならば、位相余裕 45 deg 程度を目指して IC の位相調整をします。ただしこのときは、温度特性やばらつきを考えたワースト値で位相余裕 30 deg 以上、利得余裕 5dB 以上が得られることを考える必要があります。これよりも余裕が小さいと異常発振する可能性があります。

Figure 29 に位相余裕とステップレスポンス特性の実測例を示します。上段は位相余裕 17.8 deg 時の波形ですが、負荷応答性が良い（出力電圧のオーバーシュート、アンダーシュートが小さい）ですがリングングが観測できます。ばらつきによっては異常発振が発生することが考えられます。中段は位相余裕 53.9 deg 時の波形ですが、出力波形にリングングは無く、負荷応答特性も出力電圧に対して +1.1%、-1.2% と良好です。下段は位相余裕 63.9 deg 時の波形ですが、出力波形にリングングは無く安定ですが、負荷応答特性が出力電圧に対して +1.87%、-2.0% に悪化しています。負荷応答特性を問わない電源であれば、中段の特性より位相特性が安定しているため、こちらの特性を採用しても問題ありません。

FRA の詳しい使用方法は、エヌエフ回路設計ブロック社の取扱説明書をご覧ください。

参考資料：

- (1) 周波数特性分析器 FRA5097 取扱説明書 2010（エヌエフ回路設計ブロック）
- (2) 周波数特性分析器 技術解説集 2010（エヌエフ回路設計ブロック）
- (3) 周波数特性測定によるスイッチング電源の安定性評価 2011（エヌエフ回路設計ブロック）
- (4) LF ネットワーク・アナライザによる DC-DC コンバータ特性評価 2008（Agilent Technologies、現：Keysight Technologies）

ご 注 意

- 1) 本資料の記載内容は改良などのため予告なく変更することがあります。
- 2) 本資料に記載されている内容は製品のご紹介資料です。ご使用に際しては、別途最新の仕様書を必ずご請求のうえ、ご確認ください。
- 3) ロームは常に品質・信頼性の向上に取り組んでおりますが、半導体製品は種々の要因で故障・誤作動する可能性があります。
万が一、本製品が故障・誤作動した場合であっても、その影響により人身事故、火災損害等が起こらないようご使用機器でのディレーティング、冗長設計、延焼防止、バックアップ、フェイルセーフ等の安全確保をお願いします。定格を超えたご使用や使用上の注意書が守られていない場合、いかなる責任もロームは負うものではありません。
- 4) 本資料に記載されております応用回路例やその定数などの情報につきましては、本製品の標準的な動作や使い方を説明するものです。
したがって、量産設計をされる場合には、外部諸条件を考慮していただきますようお願いいたします。
- 5) 本資料に記載されております技術情報は、製品の代表的動作および応用回路例などを示したものであり、ロームまたは他社の知的財産権その他のあらゆる権利について明示的にも黙示的にも、その実施または利用を許諾するものではありません。上記技術情報の使用に起因して紛争が発生した場合、ロームはその責任を負うものではありません。
- 6) 本資料に掲載されております製品は、耐放射線設計はなされていません。
- 7) 本製品を下記のような特に高い信頼性が要求される機器等に使用される際には、ロームへ必ずご連絡の上、承諾を得てください。
・輸送機器（車載、船舶、鉄道など）、幹線用通信機器、交通信号機器、防災・防犯装置、安全確保のための装置、医療機器、サーバー、太陽電池、送電システム
- 8) 本製品を極めて高い信頼性を要求される下記のような機器等には、使用しないでください。
・航空宇宙機器、原子力制御機器、海底中継機器
- 9) 本資料の記載に従わないために生じたいかなる事故、損害もロームはその責任を負うものではありません。
- 10) 本資料に記載されております情報は、正確を期すため慎重に作成したものです。万が一、当該情報の誤り・誤植に起因する損害がお客様に生じた場合においても、ロームはその責任を負うものではありません。
- 11) 本製品のご使用に際しては、RoHS 指令など適用される環境関連法令を遵守の上ご使用ください。
お客様がかかる法令を順守しないことにより生じた損害に関して、ロームは一切の責任を負いません。
本製品の RoHS 適合性などの詳細につきましては、セールス・オフィスまでお問合せください。
- 12) 本製品および本資料に記載の技術を輸出又は国外へ提供する際には、「外国為替及び外国貿易法」、「米国輸出管理規則」など適用される輸出関連法令を遵守し、それらの定めにしたがって必要な手続を行ってください。
- 13) 本資料の一部または全部をロームの許可なく、転載・複写することを堅くお断りします。



ローム製品のご検討ありがとうございます。
より詳しい資料やカタログなどご用意しておりますので、お問合せください。

ROHM Customer Support System

<http://www.rohm.co.jp/contact/>