

リニアレギュレータシリーズ

BAxxCC0 シリーズの
出力セラミックコンデンサを使用した回路

BAxxCC0 シリーズは、大容量積層セラミックコンデンサ(MLCC)や低 ESR アルミ電解コンデンサが一般的ではなかった時代に設計された IC で、出力コンデンサの ESR（等価直列抵抗）値を利用してループの位相補償を行っています。そのため、出力コンデンサの ESR 値には安定動作する範囲があり、出力コンデンサに超低 ESR であるセラミックコンデンサや、低 ESR 型アルミ電解コンデンサを使用すると位相補償ができなくなり異常発振を起こしてしまいます。標準型アルミ電解コンデンサは、一般的に低温で容量が減少し ESR が上昇する特性を持っています。また経年変化で電解液がドライアップし ESR が上昇するため部品の選択に苦労を伴います。セラミックコンデンサは容量と ESR の変動に優れたものがあるため、ESR の問題を解決することで安定した使用が可能になります。このアプリケーションノートでは出力にセラミックコンデンサを使用して安定に位相補償できる回路を提案します。

BAxxCC0 シリーズの位相補償

出力形式が NPN 型のレギュレータはコレクタ接地で構成されているため出力インピーダンスが低く、ループゲイン内に存在するパワー段によるポール（セカンドポール P_2 、パワーポール P_{PWR} とも呼ぶ）は高い周波数に発生します。このタイプの LDO は低い周波数にポールを持たないため、IC 内部で低い周波数にポール（ファーストポール P_1 ）を発生させて位相補償します（Figure 1）。

Figure 1 では 100Hz にファーストポール P_1 があり、周波数が上昇するに従ってゲインは -20dB/dec で低下します。セカンドポール P_2 は 1MHz にあり、これ以降ゲインは -40dB/dec で低下します。次に位相変化を見ると、ファーストポール P_1 で -90°の位相遅れが生じ、セカンドポール P_2 で更に -90°の位相遅れが生じます。安定性の判断には 0dB における位相マージンを見ますが、0dB クロスオーバー周波数 f_c は 95kHz で、84°の位相マージンが得られています。また、セカンドポール P_2 の周波数が 1MHz と高いため、このポールによる位相遅れが、クロスオーバー周波数 f_c に与える位相遅れへの影響が小さいためループが安定と判断できます。

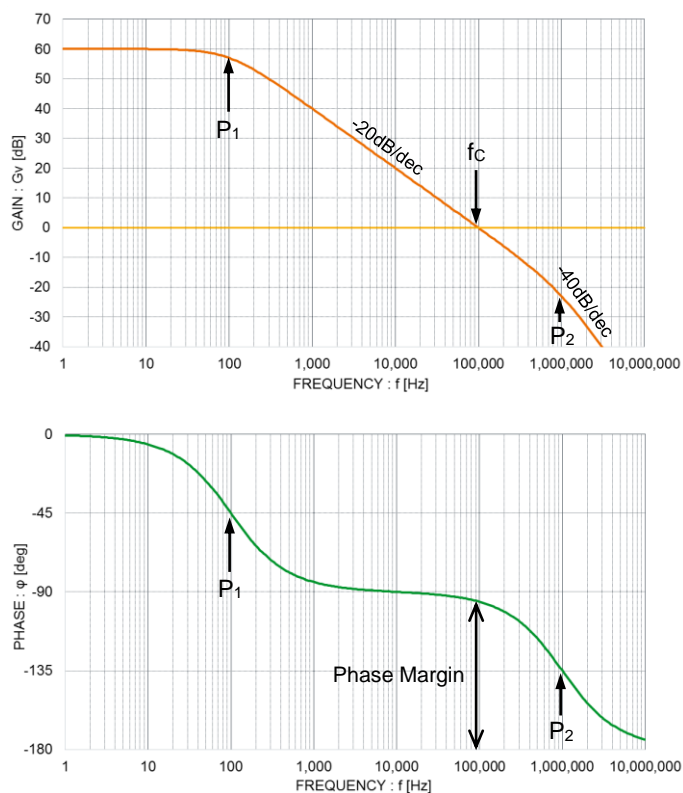


Figure 1. NPN 型 LDO のボード線図

BAxxCC0 シリーズの出力型式は PNP トランジスタのエミッタ接地で構成されているため、出力インピーダンスは数十 kΩと高くなっています (Figure 2)。

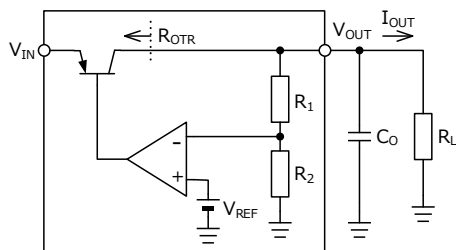


Figure 2. BAxxCC0 シリーズ LDO 回路図

このため、負荷抵抗と出力容量に依存する低い周波数に負荷ポール P_L が発生します。このポールの周波数は次式で計算できます。

$$P_L = \frac{1}{2\pi \cdot R_O \cdot C_O} \text{ [Hz]}$$

C_O : 出力コンデンサ [F]

R_O : 出力ノードのインピーダンス [Ω]

$$R_O = \frac{1}{\frac{1}{R_L} + \frac{1}{R_1 + R_2} + \frac{1}{R_{OTR}}} \text{ [Ω]}$$

R_L : 負荷抵抗 [Ω]

R_1, R_2 : 抵抗分割回路 [Ω]

R_{OTR} : トランジスタの出力インピーダンス [Ω]

但し、 $R_L \ll (R_1, R_2, R_{OTR})$ の時は次式で計算できます。

$$P_L = \frac{1}{2\pi \cdot R_L \cdot C_O} \text{ [Hz]}$$

Figure 3 にボード線図を示しますが、ファーストポール P_1 の他に上式より負荷ポール P_L が低い周波数に現れます。この 2 つのポールにより 2 次の位相遅れが発生するため、クロスオーバー周波数 f_c では位相遅れが -180° に達しループが発振を起こします。つまり、この型式の LDO ではループにゼロを追加し、 $+90^\circ$ の位相進み補償を行わないと安定動作できません。

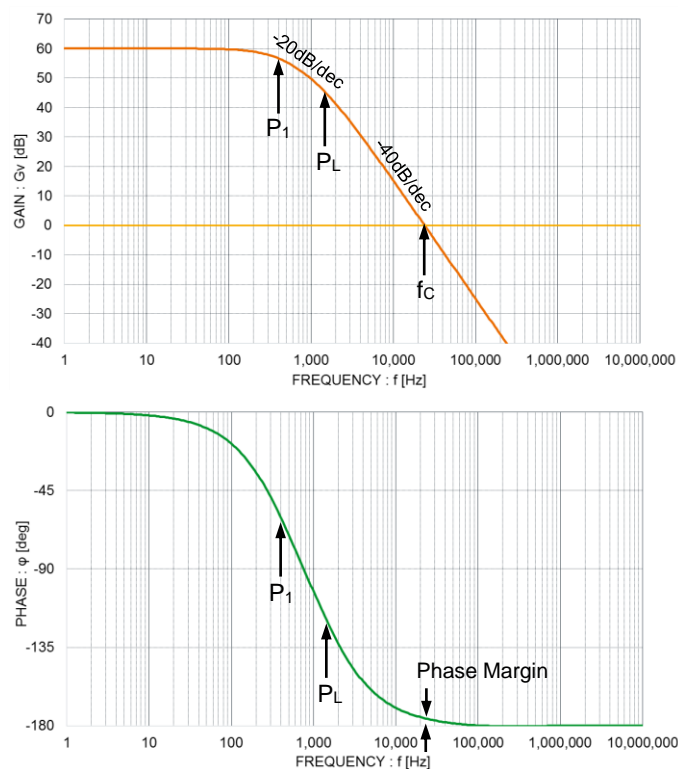


Figure 3. PNP 型 LDO ボード線図
位相補償無し

出力コンデンサの ESR を用いた位相補償

位相遅れを低減するゼロの追加は出力コンデンサが持っている ESR によって実施します。Figure 4 にコンデンサの簡単な等価回路を示します。標準型アルミ電解コンデンサでは ESR に数Ω～数十Ωの値を持っています。一方セラミックコンデンサでは ESR が数 mΩ と超低抵抗な値になります。ESL は等価直列インダクタンスで、コンデンサのリードや電極の配線インダクタンス成分です。値が数 nH ～数 μH と小さいため 1MHz 以下の位相補償に影響を与えることはありません。

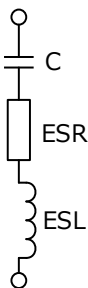


Figure 4. コンデンサの簡単な等価回路

ESR による位相補償は Figure 5 のように出力コンデンサの寄生素子のため通常は回路図に表されることはありません。ゼロ周波数は次式で計算できますが、出力コンデンサの定数（容量と ESR）が直接ゼロ周波数に関わってくるため、出力コンデンサの特性は非常に重要な要素になります。

$$ZERO = \frac{1}{2\pi \cdot C_O \cdot ESR} \text{ [Hz]}$$

C_O : 出力コンデンサ [F]

ESR : 出力コンデンサの ESR [Ω]

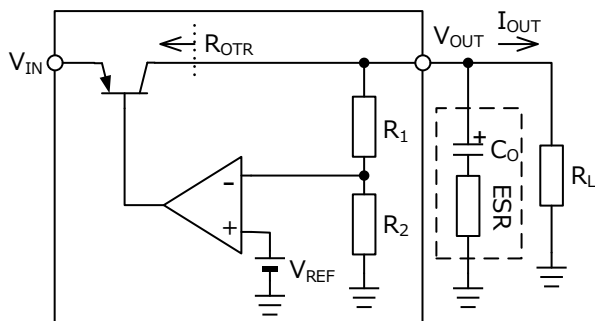


Figure 5. ESR による位相補償

Figure 3 のボード線図にゼロを追加します。C_O=22μF、ESR=1Ωと仮定するとゼロ周波数は 7.2kHz になります。このゼロを追加したボード線図を Figure 6 に示します。Figure 3 同様にファーストポール P₁

と負荷ポール P_L により低い周波数に 2 つのポールがあるため 2 次の位相遅れが発生します。ZERO を 7.2kHz に置くことで +90° の位相進みが挿入され、ファーストポール P₁ と負荷ポール P_L で生じる位相遅れを低減できました。この結果ループの帯域が広くなり、0dB クロスオーバー周波数が 23kHz から 64kHz へ移動し、位相マージンは 52° 確保できました。また、パワーポール P_{PWR} はクロスオーバー周波数よりも高い位置にあり位相遅れへの影響は小さいです。ゲイングラフの傾きは、それぞれのポールとゼロの周波数が近いため、-20dB/dec や -40dB/dec のように正確な直線は現れず、それぞれの傾きが合成された曲線になっています。

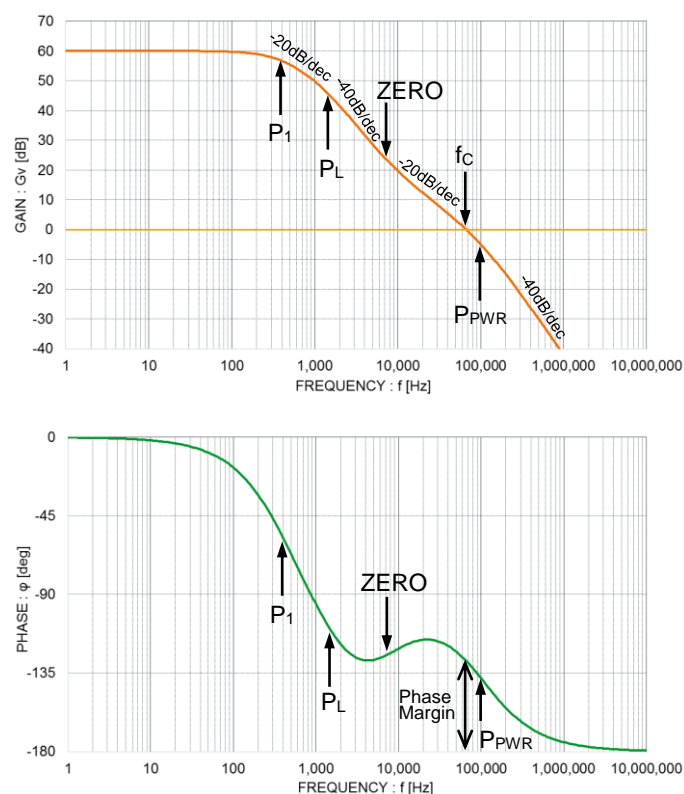


Figure 6. PNP 型 LDO ボード線図

ESR による補償 C_O=22μF、ESR=1Ω

ESR と安定性

実際にアルミ電解コンデンサを使用すると、コンデンサのシリーズによって ESR が違ったり、温度特性で ESR が変化したりするなど、ゼロ周波数に関わる重要なパラメータが変化します。ESR が変化しすぎると位相マージンが小さくなり異常発振を起こすため、IC のデータシートには ESR の安全動作領域グラフを提供しています。次に安全動作領域を超えて、低 ESR、高 ESR になると位相補償できなくなる理由について説明します。

低 ESR

Figure 6 では ESR が 1Ω の出力コンデンサで位相補償を行いました。これを ESR が 0.1Ω のコンデンサで位相補償したボード線図を Figure 7 に示します。ESR が低くなったことで、ZERO 周波数は 72kHz へ上がります。ファーストポール P_1 と負荷ポール P_L の 2 つのポールにより位相遅れが -180° 発生した後にゼロによる位相補償を行っているため、位相を十分戻すことができず位相マージンがなくなるためループが不安定になります。

低 ESR 型アルミ電解コンデンサではこの状態になります。また、超低 ESR であるセラミックコンデンサでは ZERO 周波数がさらに高くなるため、Figure 3 のように位相補償無しの状態と同じになります。

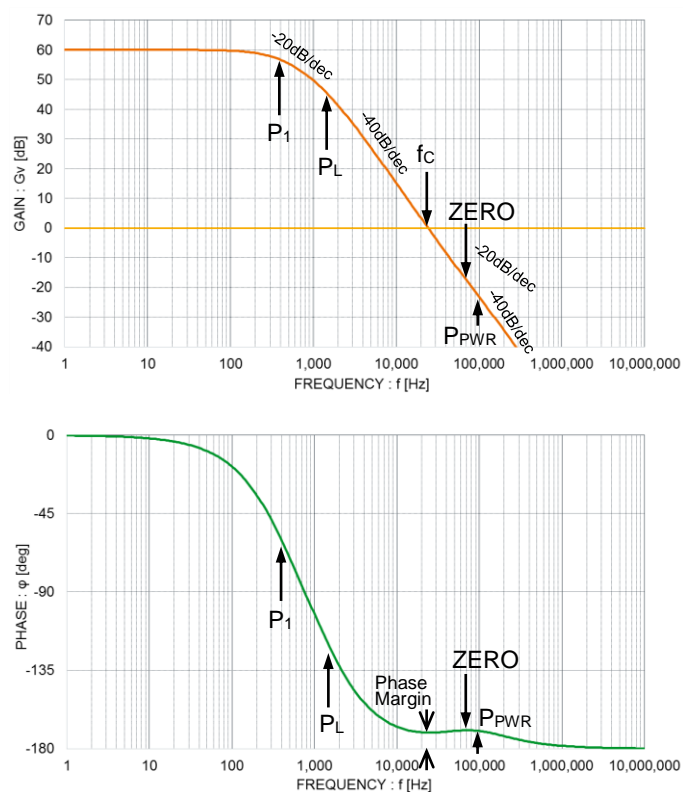


Figure 7. 低 ESR による補償
 $C_0=22\mu\text{F}$ 、 $\text{ESR}=0.1\Omega$

高 ESR

次に ESR を 20Ω に増やしたときのボード線図を Figure 8 に示します。ESR が 1Ω (Figure 6) のときに比べて、ゼロ周波数が 7.2kHz から 360Hz へ下がりました。これに伴って 0dB クロスオーバー周波数は 64kHz から 374kHz へ上昇しています。ファーストポール P_1 と負荷ポール P_L の 2 つのポールによる位相遅れは、ゼロにより位相進み補償ができています。しかし 0dB クロスオーバー周波数の上昇により、それよりも低い周波数にパワーポール P_{PWR} があるため、このポールによる位相遅れが生じます。その結果、位相マージンは 15° に減少し動作が不安定になります。

アルミ電解コンデンサは一般的に低温で ESR が上昇する特性を持っています。また経年変化で電解液がドライアップするため ESR が上昇します。このような状態では ZERO 周波数が低下し動作が不安定になることが考えられます。

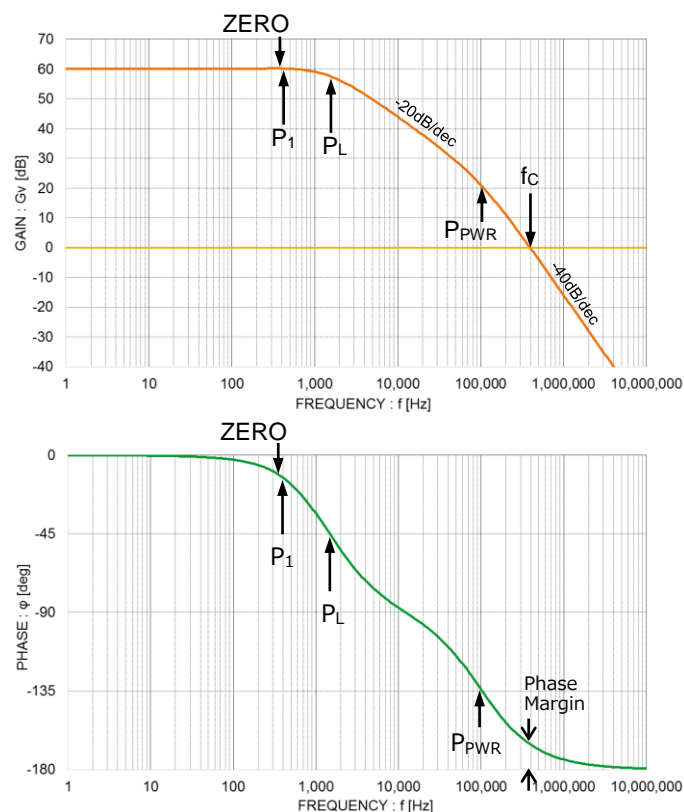


Figure 8. 高 ESR による補償
 $C_0=22\mu\text{F}$ 、 $\text{ESR}=20\Omega$

セラミックコンデンサを使用した回路

X5R、X7R 特性のセラミックコンデンサは温度特性、経年変化とともにアルミ電解コンデンサよりも優れているため、安定動作が出力コンデンサの特性に左右される IC では良い選択になります。セラミックコンデンサは ESR が数十 mΩ以下と大変低いため、そのまま使用すると位相補償ができず発振を起こします。セラミックコンデンサに外付け抵抗を直列に接続することで、ESR が安定したコンデンサとして使うことができます。

BA00CC0WFP を用いて Figure 9 の評価回路で、ESR に相当する出力抵抗 R_O を変化させたときのボード線図を、FRA（周波数特性分析器）を使用して実測しました。ボード線図より位相マージンとゲインマージンを読み取ったグラフが Figure 10、Figure 11 で、出力電流を変数として表しています。さらに位相マージンが 30° 以上かつゲインマージンが 10dB 以上となる出力抵抗を表したグラフが Figure 12 です。このグラフより、出力抵抗 R_O を 1Ω にすることで、出力セラミックコンデンサ使用時に安定動作することが判ります。

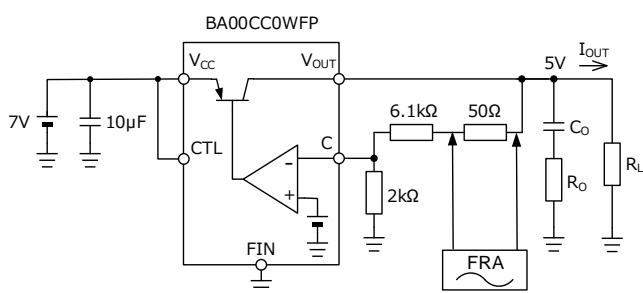


Figure 9. 安定動作評価回路

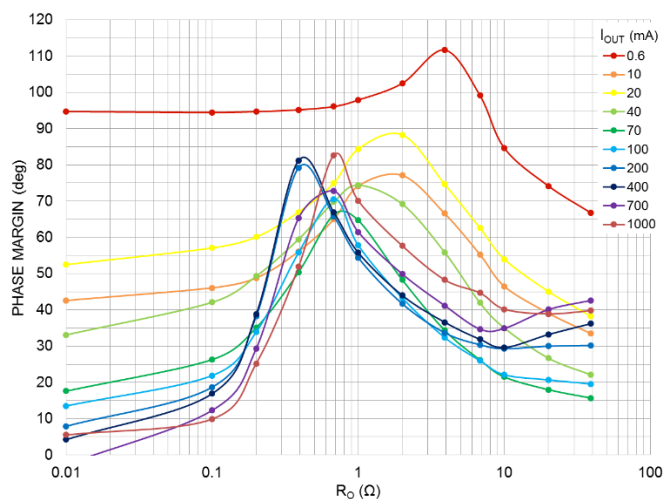


Figure 10. 位相マージン vs R_O

$C_O = 22\mu\text{F}$ (実効容量 $19.5\mu\text{F}$)

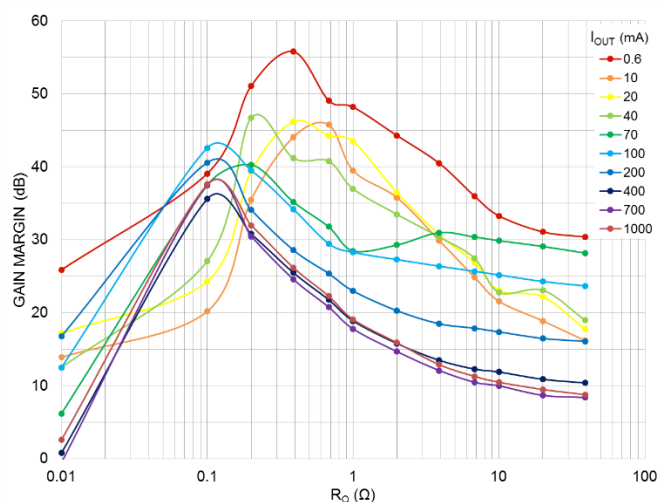
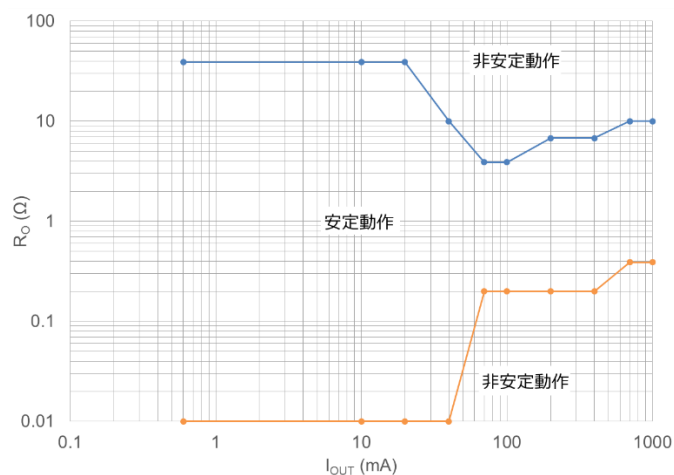
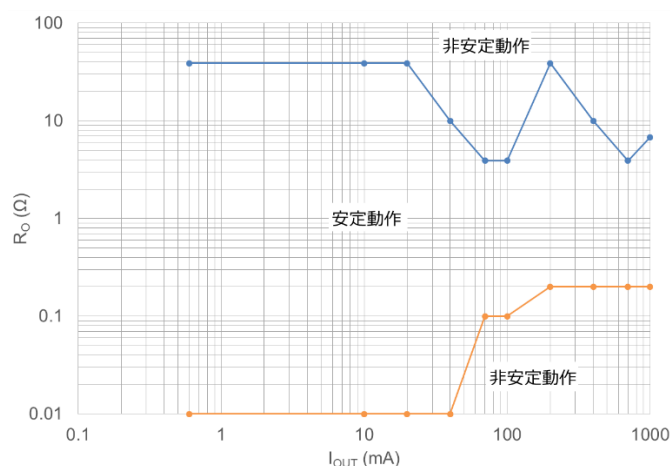
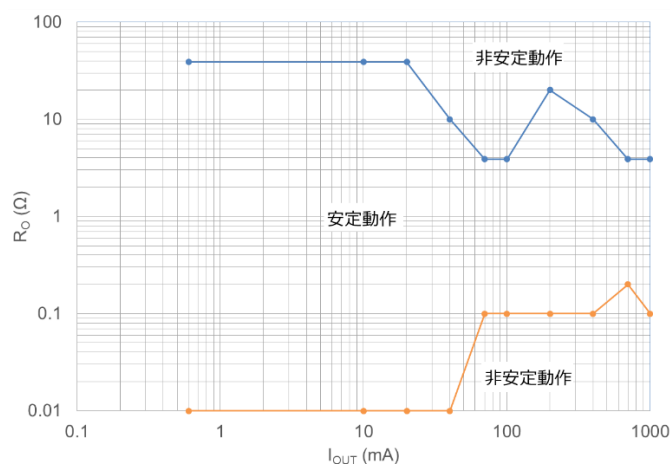


Figure 11. ゲインマージン vs R_O

$C_O = 22\mu\text{F}$ (実効容量 $19.5\mu\text{F}$)

Figure 13、Figure 14 は出力容量を $22\mu\text{F}$ から $44\mu\text{F}$ ($22\mu\text{F} \times 2$) および $94\mu\text{F}$ ($47\mu\text{F} \times 2$) へ増やしたときの同特性です。この場合も 1Ω の抵抗で安定動作することが判ります。

Figure 12. R_O vs I_{OUT} $C_O = 22\mu\text{F}$ (実効容量 $19.5\mu\text{F}$)位相マージン 30° 以上、ゲインマージン 10dB 以上Figure 13. R_O vs I_{OUT} $C_O = 22\mu\text{F} \times 2$ (実効容量 $39\mu\text{F}$)Figure 14. R_O vs I_{OUT} $C_O = 47\mu\text{F} \times 2$ (実効容量 $68.1\mu\text{F}$)

以上の安定動作評価は、供給側電源には直流安定化電源装置を使用しているためインピーダンスが十分に低く、負荷は純粋な抵抗を使用した場合の結果です。実際には供給側電源のインピーダンスが高い場合や、負荷にインダクタンス成分を持つ場合があり、この評価の定数では動作が不安定になる可能性があります。必ず実機で発振など不安定動作が無いことを十分確認してください。供給側のインピーダンスが高い場合、それを補うために IC 入力のコンデンサを大きくすることは、安定動作を得るために有効です。

出力セラミックコンデンサを使用した回路を Figure 15 に示します。出力抵抗 R_O は、複数の出力コンデンサに対して 1 個で十分です。負荷電流にリップルがない静かな電流の場合は、抵抗の定格電力は 0.1W (1608 サイズ) で十分です。定常的に負荷リップル電流がある場合は、出力抵抗 R_O の定格電力 P_{RO} は負荷リップル電流の平均値で決まり、次式で計算します。

$$P = I_{RIPPLE}^2 \times R_O \quad [W]$$

 P : 抵抗で発生する電力損失 $[W]$ I_{RIPPLE} : 負荷リップル電流の平均値 $[A]$ R_O : 出力抵抗 $[\Omega]$

$$P_{RO} \geq P \times 2 \quad [W]$$

抵抗の定格電力 P_{RO} は、抵抗で発生する電力損失 P の 2 倍以上のものを選択します。

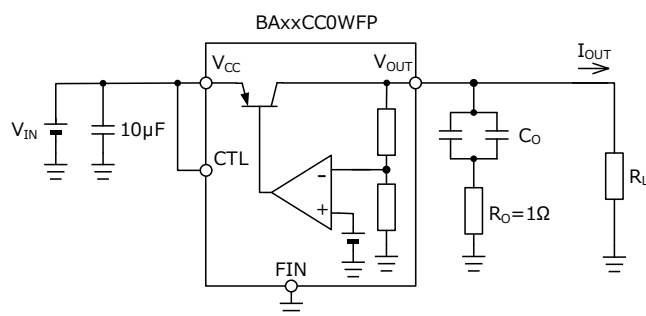


Figure 15. 出力セラミックコンデンサを使用した回路

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のですが、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でご使用ください。
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/>