

スイッチングレギュレータシリーズ

スイッチングレギュレータの出力平滑用に用いる

コンデンサの種類と注意点

昨今のスイッチングレギュレータの出力平滑用に用いるコンデンサとして、温度特性の安定性や実装面積削減のために、積層セラミックコンデンサを推奨することが一般的になっています。その一方で、低価格で大容量のアルミ電解コンデンサや、導電性高分子ハイブリッドアルミ電解コンデンサに置き換えて使用するケースも増えてきています。このアプリケーションノートでは各種コンデンサを出力平滑用として用いる時の注意点として、出力電圧リップルと一巡伝達関数の Gain-Phase 特性のシミュレーション結果を用いて説明します。

コンデンサのインピーダンス特性

理想的なコンデンサは静電容量成分のみですが、実際のコンデンサは抵抗成分やインダクタ成分を持ち、これらによって決まるインピーダンス特性はコンデンサの種類や温度によって大きく変化することに注意が必要です。

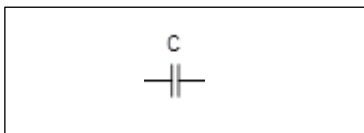


Figure 1. 理想的なコンデンサ

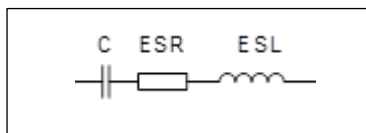


Figure 2. 寄生成分を考慮したコンデンサの等価回路

C: 静電容量
ESR: 等価直列抵抗
ESL: 等価直列インダクタンス

また、Figure 2 の等価回路のインピーダンス $|Z|$ は次式で表され、その周波数特性は Figure 3 のグラフとなります。

$$Z = ESR + j2\pi f \times ESL + \frac{1}{j2\pi f \times C}$$
$$|Z| = \sqrt{ESR^2 + \left(2\pi f \times ESL - \frac{1}{2\pi f \times C}\right)^2}$$

周波数が低い領域では静電容量によるインピーダンスが支配的で、高周波領域ではインダクタンスによるインピーダンスが支配的になります。

また、共振周波数 F_r は次式によって決まり、 F_r 以下の周波数では容量性によってインピーダンスは低下しますが、それ以上の周波数帯域になると誘導性になり、周波数の増加とともにインピーダンスも大きくなります。

$$F_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

F_r : 自己共振周波数

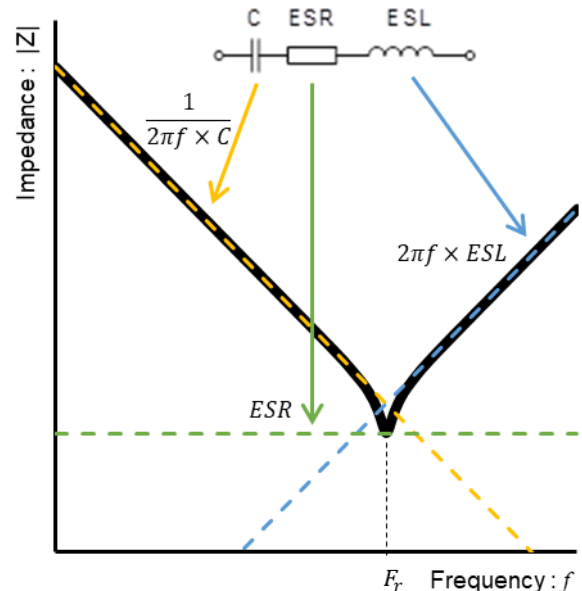


Figure 3. コンデンサのインピーダンス特性

コンデンサのインピーダンス特性に関する詳細はアプリケーションノート：[バイパスコンデンサのインピーダンス特性](#)をご確認ください。

セラミックコンデンサのインピーダンス特性

Figure 4 にセラミックコンデンサのインピーダンス特性の一例を示します。
今回例として挙げる製品の温度特性は X7R であるため、静電容量の変化は規格上 -55℃～125℃において±15%の変化率です。これは後述するアルミ電解コンデンサ、導電性高分子ハイブリッドコンデンサと比較して相対的に小さいです。また ESR も同温度変化においての変化量は非常に小さく、これも他の製品と比べて非常に小さいといえます。ESL も 200pH 程度と小さく、温度依存はほとんどありません。このようにインピーダンス特性としては非常に安定しておりますが、DC 電圧バイアスによる容量変化が大きいこと、音鳴き、また、温度サイクルや衝撃によりクラックが発生しやすいという点には注意が必要です。

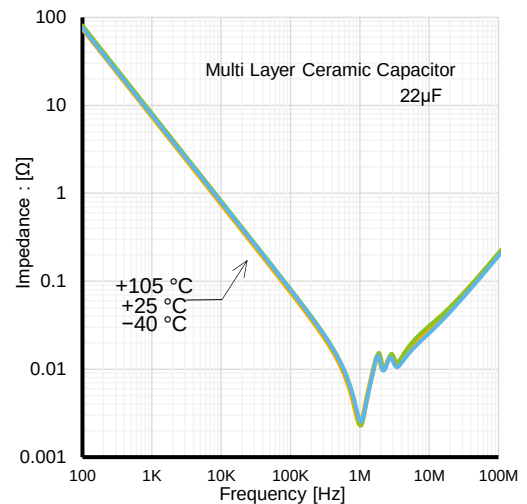


Figure 4. セラミックコンデンサのインピーダンス特性例

アルミ電解コンデンサのインピーダンス特性

アルミ電解コンデンサは、セラミックコンデンサに比べて安価に大きな静電容量を得ることができますが、下記の特性に注意が必要です。

Figure 5 に電解コンデンサのインピーダンス特性の一例を示します。
-40℃の低温度下においてインピーダンスが大幅に増加しているのがグラフから確認できます。

これはアルミ電解コンデンサが低温時に静電容量の減少及び、ESR が増加する特徴を持っているため、インピーダンスとしてこのような特性が観測されます。自己共振周波数付近の 100kHz でのインピーダンスを ESR とすると、ESR は 30mΩ@105℃に対して 1.2Ω@-40℃の変化を生じます。後述しますが、この変化は出力電圧リップルや位相特性に大きく影響を与えることとなります。ESL は温度により変化はほとんどありませんが、5nH とセラミックコンデンサに比べて大きな値となり、これも出力電圧リップルに影響を与えます。

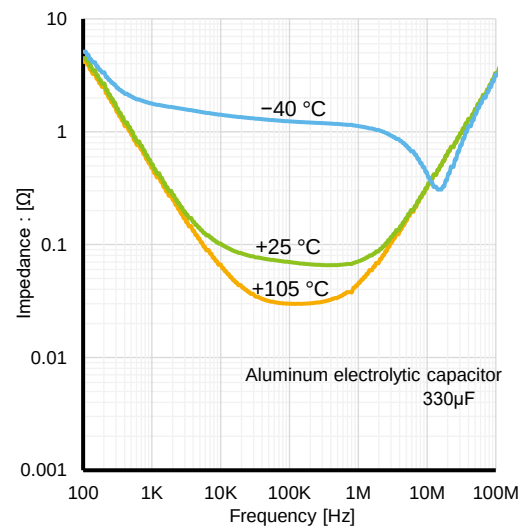


Figure 5. 電解コンデンサのインピーダンス特性例

導電性高分子ハイブリッドコンデンサのインピーダンス特性

導電性高分子ハイブリッドコンデンサは電解質に導電性高分子と電解液を融合させたコンデンサで、大容量で ESR も低く抑えられています。また、一般的に数百μF の容量値を得るためにセラミックコンデンサを並列接続するよりも安価です。Figure 6 に導電性高分子ハイブリッドコンデンサのインピーダンス特性の一例を示します。

静電容量は同温度変化において 30%程度の変化で、ESR も 12mΩ～18mΩ程度の変化です。ESL は温度による変化はほとんどなく、約 600pH です。ESR がセラミックコンデンサに近い値であり、大きな静電容量を必要とする場合には電解コンデンサに比べて安定した性能を得られます。

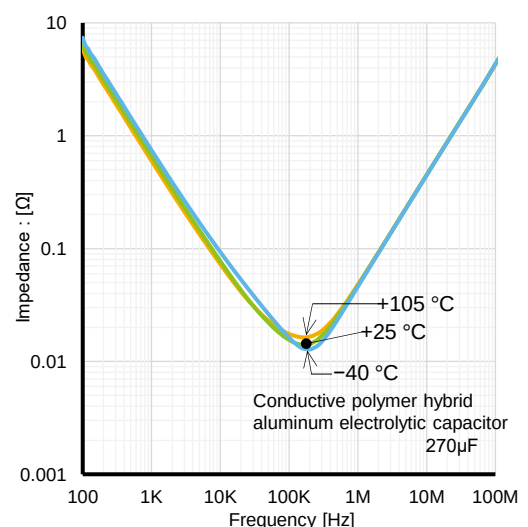


Figure 6. 導電性高分子ハイブリッドコンデンサのインピーダンス特性例

各種コンデンサを使用時の出力電圧リップル及び一巡伝達関数の Gain-Phase 特性

セラミックコンデンサ、アルミ電解コンデンサ、導電性高分子ハイブリッドコンデンサの 3 種類のコンデンサについてスイッチングレギュレータの出力平滑用コンデンサに適用したときの出力電圧リップルと一巡伝達関数の Gain-Phase 特性をシミュレーションで算出します。

(シミュレーションには [ROHM Solution Simulator](#) を使用しています。)

スイッチングレギュレータの各種設定及び、シミュレーション回路図を以下に示します。

設定条件：

- ・ スwitchングレギュレータ IC : BD90640EFJ-C
- ・ 入力電圧 : 12V / 出力電圧設定 : 5.0V / 負荷電流 : 1.5A / スwitchング周波数 : 500kHz
- ・ 出力平滑用コンデンサ :

	静電容量 (-40°C/25°C/105°C)	ESR (-40°C/25°C/105°C)	ESL (-40°C/25°C/105°C)
セラミックコンデンサ(2 個並列使用)	22 μ F/22 μ F/22 μ F	1m Ω /1m Ω /1m Ω	200pH/200pH/200pH
アルミ電解コンデンサ	311 μ F/354 μ F/381 μ F	1.2 Ω /0.07 Ω /0.03 Ω	5nH/5nH/5nH
導電性高分子ハイブリッドコンデンサ	215 μ F/245 μ F/268 μ F	13m Ω /14m Ω /16m Ω	600pH/600pH/600pH

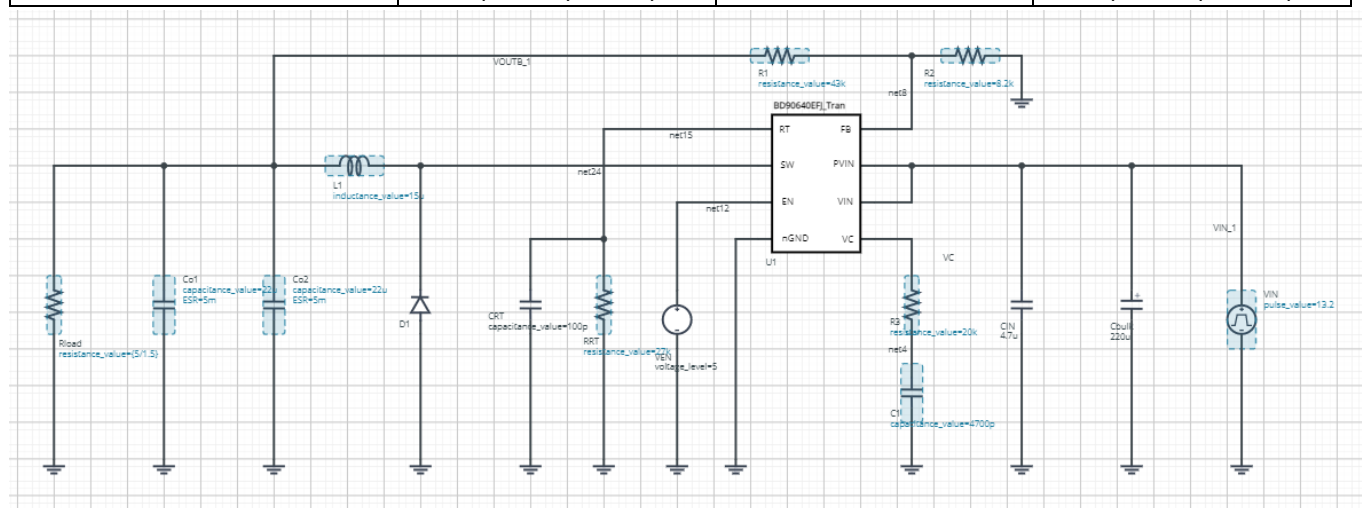


Figure 7. 出力電圧リップル シミュレーション回路図

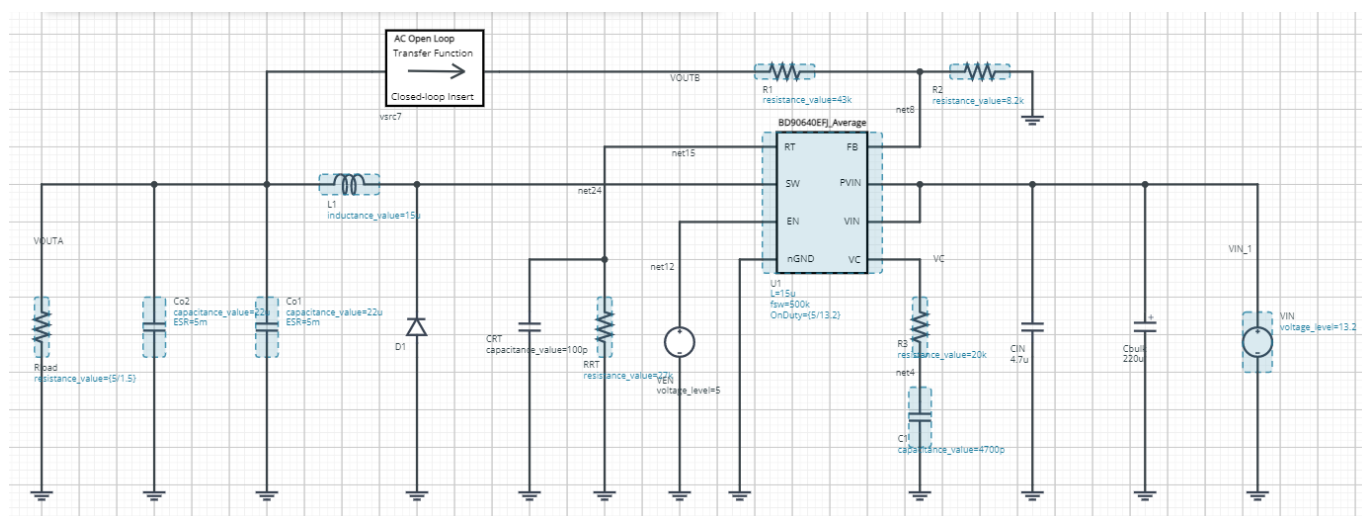


Figure 8. 一巡伝達関数の Gain-Phase 特性 シミュレーション回路図

セラミックコンデンサ使用時の特性

Figure 4 の特性をもつセラミックコンデンサを使用した出力電圧リップルシミュレーションを Figure 9 に示します。

Figure 4 において、スイッチング周波数 500kHz でのインピーダンス $|Z|$ は容量成分が支配的なため、正弦波に近い出力電圧リップル波形となります。その領域での $|Z|$ は温度変化も小さいため、出力電圧リップルも全温度範囲で一定で 2mV 程度です。

Figure 10 に一巡伝達関数の Gain-Phase 特性を示しますが、こちらも温度依存なく安定しており、全温度範囲で Phase margin 66°を確保しています。

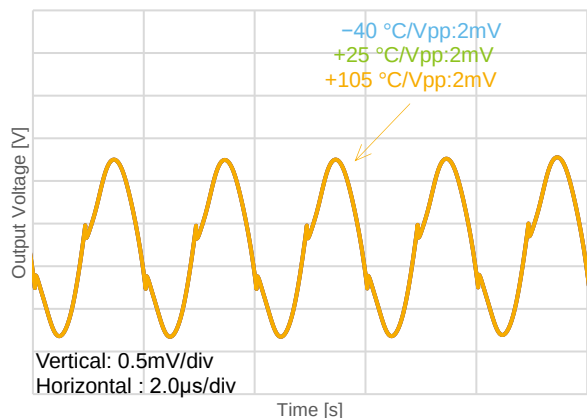


Figure 9. セラミックコンデンサ使用時の出力電圧リップル

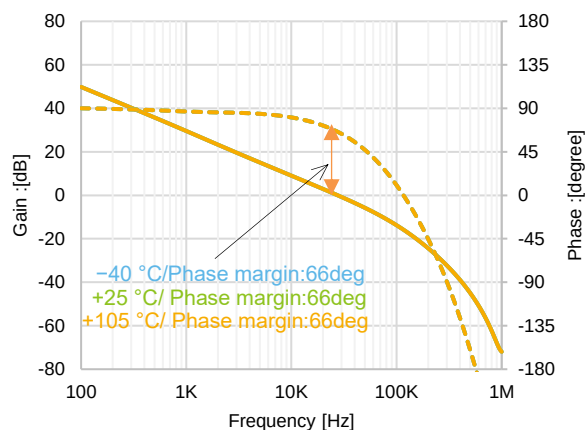


Figure 10. セラミックコンデンサ使用時の一巡伝達関数の Gain-Phase 特性

電解コンデンサ使用時の特性

Figure 5 の特性をもつ電解コンデンサでは、スイッチング周波数 500kHz でのインピーダンス $|Z|$ は抵抗成分 ESR が支配的なため、出力電圧リップルにも抵抗成分によるリップルが顕著に現れ、Figure 11 に示すように三角波の形状となります。25℃では 16mV 程度の出力電圧リップルですが、低温-40℃では ESR が増大するため、リップルも 331mV と非常に大きな電圧変動となり、電源 IC の後段に接続される MCU や SoC の電圧規格を超えてしまう可能性があります。

このインピーダンス $|Z|$ の変化は一巡伝達関数の Gain-Phase 特性にも大きな影響を及ぼします。Figure 12 の-40℃の特性のみ位相余裕が 0°を下回っており安定性が確保できていない状態です。これは、出力コンデンサの静電容量 C と ESR で構成される位相進み Fz が、低温-40℃で ESR が増大することで、低い周波数に移動し、一巡伝達関数の Gain-Phase 特性の低い周波数でゲインが持ち上がることが原因です。そのため、この場合では全温度範囲で安定性を確保できるように位相補償回路を見直す必要があります。一般的な対策としては、制御 IC の位相補償回路の見直しや、電解コンデンサにセラミックコンデンサを並列に接続することなどがあげられます。-40℃では安定性が確保できず、出力電圧が発振して出力電圧リップルの比較ができないため、Figure 11 の出力電圧リップルの波形の算出には全温度条件で安定動作をする条件に位相補償回路を調整しています。

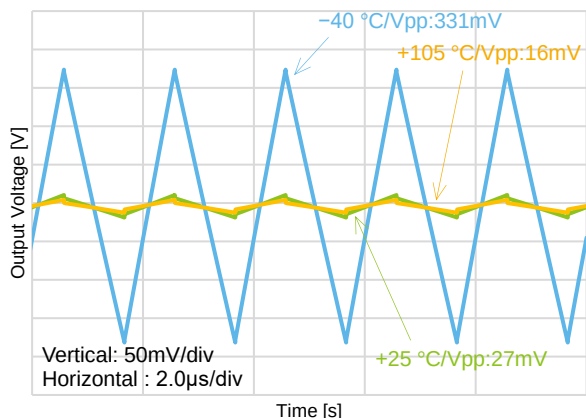


Figure 11. 電解コンデンサ使用時の出力電圧リップル
(位相補償回路調整後)

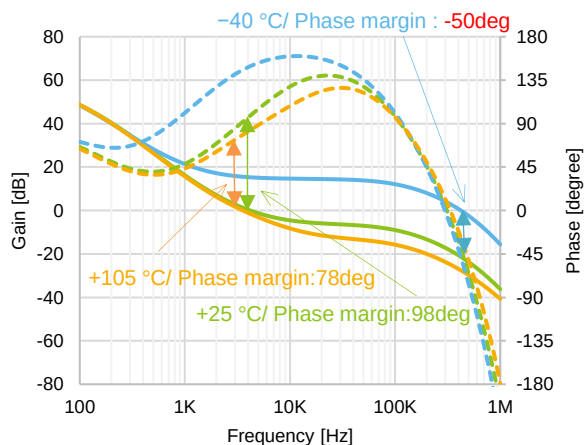


Figure 12. 電解コンデンサ使用時の一巡伝達関数の Gain-Phase 特性

導電性高分子ハイブリッドコンデンサ使用時の特性

Figure 6 で示すように、導電性高分子ハイブリッドコンデンサでも電解コンデンサと同様にスイッチング周波数 500kHz でのインピーダンスは抵抗成分が支配的なため、出力電圧リップルは三角波の形状になりますが、その値は最大でも 7mV と小さな値で、温度依存もほとんどありません。一巡伝達関数の Gain-Phase 特性においてもセラミックコンデンサと同様、安定した特性を得られます。

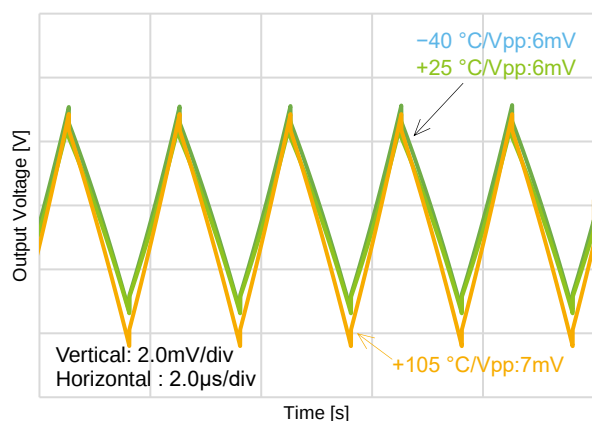


Figure 13. 導電性高分子ハイブリッドコンデンサ使用時の出力電圧リップル

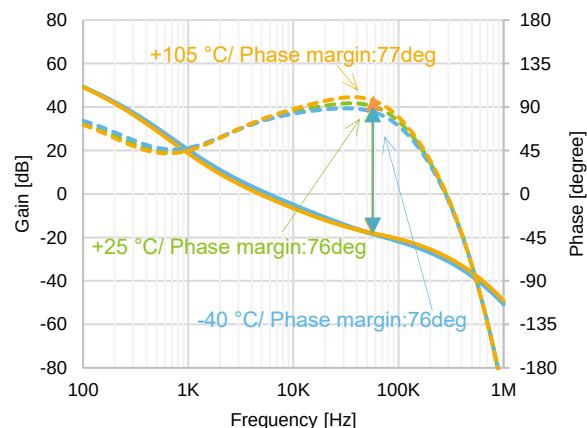


Figure 14. 導電性ハイブリッドコンデンサ使用時の一巡伝達関数の Gain-Phase 特性

まとめ

- ・コンデンサは種類毎にインピーダンスの周波数特性及び温度特性が異なる。
- ・出力電圧リップルや一巡伝達関数の Gain-Phase 特性は使用する出力平滑用コンデンサのインピーダンスの周波数特性及び温度特性の影響を受ける。
- ・アルミ電解コンデンサを適用する場合、温度によるインピーダンス変化が大きいため注意が必要。

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/>