

スイッチングレギュレータシリーズ

降圧コンバータに使用する パワーインダクタの留意点

No.16027JAY19

降圧コンバータに使用するインダクタは、各メーカーから数多くのインダクタが販売されており、その中からどれを選択したら良いのかと言う問題によく出くわします。このアプリケーションノートでは、パワーインダクタの特徴と留意点について説明します。

パワーインダクタの種類

降圧コンバータに使用するパワーインダクタは大きく 3 種類に分けられます。フェライト巻線型は、ドラム型のフェライトコアに線を巻いただけの開磁型と、その外側をフェライトポピンで覆った閉磁型(シールド型)があります。開磁型は小型でインダクタンスの飽和が起きにくい性能は優れていますが、直流抵抗が開磁型よりも大きくなる上、磁束がインダクタの外に漏れるため他の回路に悪影響を及ぼす可能性があります。このフェライト巻線型は、降圧、昇圧、反転型 DC/DC コンバータで最も一般的に使用され、特に車載のようなノイズ軽減要求が高いところでは閉磁型が使用されています。

メタルコンポジット型は、金型にコイルを挿入し、計量された磁性粉を入れ、高圧プレスで一体成形したものです。メタルコンポジットコアは、フェライトコアと比較して約 2 倍の飽和磁束密度があるため、1/4 の体積で同じエネルギーを蓄積できます。ただし、一般的にはフェライトよりも透磁率が低いため、同じインダクタンス値を得るには巻き数を多くする必要があります。小型で大電流用途に向いていますが、インダクタンス値はフェライト巻線型に比べて小さいものしかありません。また直流電圧耐圧が 30V と低い物が

あるため注意が必要です。

積層型は、フェライトシートに導体金属を印刷したものを重ね合わせてコイルを形成したもので、非常に小型化できます。大きなインダクタンス値や大電流向けは作れませんが、高周波でスイッチング動作する小電流向け DC/DC コンバータにはインダクタンス値が小さくて済むため使用できます。

カタログに書かれている項目

メーカーのカタログにはインダクタンス値、許容差の他に主要な電気的特性が記載されています。Table 2 は太陽誘電製のフェライト巻線型インダクタのカタログ記載例です。

直流抵抗

直流抵抗は、巻き線(銅線)の抵抗で、大電流時の効率に影響を与えます。抵抗によりインダクタ電流の 2 乗に比例した発熱がインダクタで発生しますので、抵抗値が高いと発熱によるエネルギーロスが増え、変換効率が低下します。直列抵抗が低いインダクタはサイズが大きくなり、コスト上昇にもなりますので、効率を上げることとトレードオフの関係にあります。メタルコンポジット型はフェライト巻線型に比べて同じインダクタンス値を得るために巻き線(銅線)の巻き数を多くする必要があります。直流抵抗が大きい傾向にあります。

項目	フェライト巻線型	メタルコンポジット型	積層型
構造	フェライトコアに銅線を巻き線	金属粉末と巻き線を一体成形	フェライトシートに導体金属を印刷し重ね合わせたもの
インダクタンス値	大(おおよそ $\geq 4.7\mu\text{H}$)	中(おおよそ $\leq 4.7\mu\text{H}$)	小(おおよそ $\leq 4.7\mu\text{H}$)
直流抵抗値 DCR	小	大	大
Q	大	小	小
定格電流値	中	大	小
飽和時の直流重畳特性	インダクタンス値が急激に減少	飽和しにくいのでインダクタンス値は穏やかに減少	インダクタンス値が急激に減少
高温時の特性	悪い	良い	良い
用途	降圧、昇圧、反転 中電流 おおよそ $\leq 1\text{MHz}$	降圧 大電流、低電圧 おおよそ $\geq 1\text{MHz}$	降圧 小電流 おおよそ $\geq 3\text{MHz}$

Table 1. 各パワーインダクタの特徴

●NRH2410シールドタイプ

形名	EHS	公称インダクタンス [μH]	インダクタンス許容差	自己共振周波数 [MHz] (min.)	直流抵抗 [Ω] (±20%)	定格電流 ※) [mA]		測定周波数[kHz]
						直流重畳許容電流 : Idc1 Max.	温度上昇許容電流 : Idc2 Max.	
NRH2410T R68NN 4	RoHS	0.68	±30%	120	0.060	2,200	1,570	100
NRH2410T 1R0NN 4	RoHS	1.0	±30%	106	0.070	1,800	1,410	100
NRH2410T 1R5MN	RoHS	1.5	±20%	94	0.110	1,550	1,160	100
NRH2410T 2R2MN	RoHS	2.2	±20%	77	0.150	1,290	970	100
NRH2410T 3R3MN	RoHS	3.3	±20%	56	0.220	1,000	770	100
NRH2410T 4R7MN	RoHS	4.7	±20%	50	0.290	880	670	100
NRH2410T 6R8MN	RoHS	6.8	±20%	43	0.410	750	570	100
NRH2410T 100MN	RoHS	10	±20%	32	0.690	550	450	100
NRH2410T 150MN	RoHS	15	±20%	27	1.02	470	370	100
NRH2410T 220MN	RoHS	22	±20%	22	1.47	390	300	100

Table 2. 太陽誘電カタログ

(出典: 太陽誘電インダクタカタログ 2016)

直流重畳許容電流

直流重畳許容電流は、インダクタに流す電流に対してインダクタンス値がどのように変動するかを表した電流値です。Table 2 の例では、インダクタンス値が初期値より 30%減少した時の直流電流値を記載していますが、この条件はメーカーやインダクタのシリーズによりまちまちですので、他のインダクタと比較する時には注意する必要があります。

特性例を Figure 2 に示します。インダクタに直流電流が流れると、電流の増加に伴ってフェライトで磁気飽和が始まり透磁率の低下によるインダクタンス値の低下が発生します。メタルコンポジット型はフェライト巻線型に比べて飽和磁気密度が高いため、電流が増えてもインダクタンス値は Figure 3 のように穏やかに減少します。

直流重畳許容電流値は、Figure 1 に示すインダクタ電流のピーク電流値に対して仕様が満足しているか判断します。インダクタ仕様に対してマージンをもったインダクタを選択してください。

温度上昇許容電流

温度上昇許容電流は、インダクタに流す電流に対してインダクタがどのように発熱するかを表した電流値です。特性例を Figure 4 に示します。Table 2 の例では、インダクタの温度が 40°C 上昇

した時の直流電流値を記載していますが、測定基板の放熱性の違いや測定位置の違いなど、条件はメーカーやインダクタのシリーズによりまちまちですので、他のインダクタと比較する時には注意する必要があります。

温度上昇許容電流は、Figure 1 に示すインダクタ電流の平均電流値に対して仕様が満足しているか判断します。インダクタ仕様の Max. 値に対してマージンをもったインダクタを選択してください。

温度特性

降圧コンバータ回路のインダクタンス値が変化するとリップル電流も変化します。Figure 5 および Figure 6 にフェライト巻線型とメタルコンポジット型インダクタの温度特性を示します。フェライト巻線型は磁性材料の温度特性が大きく、特に高温下での直流重畳特性が劣化します。メタルコンポジット型は、磁気飽和と温度特性共に優れている金属磁性材料を使用しているため、インダクタンス値の温度変化が小さくなります。フェライト巻線型は自己発熱による温度上昇でインダクタンス値が減少するため、電流のピーク値が増加、更に温度上昇、更にインダクタンス値が減少といった悪循環を起こしやすいです。

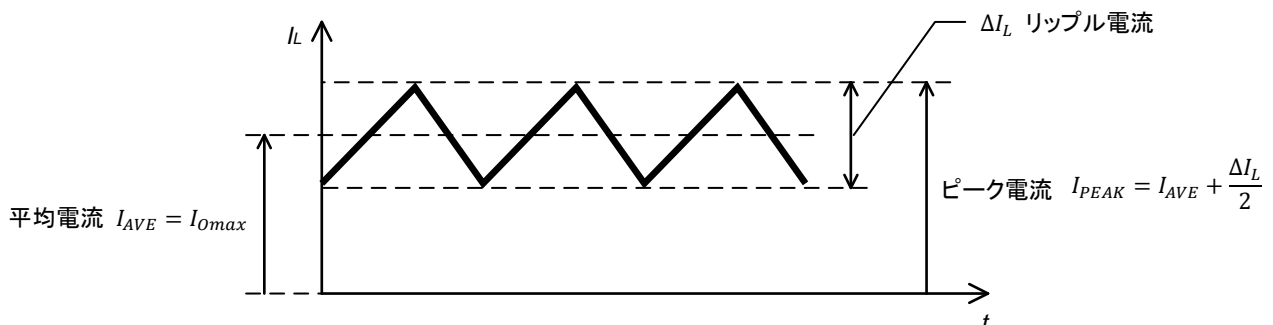


Figure 1. インダクタ電流

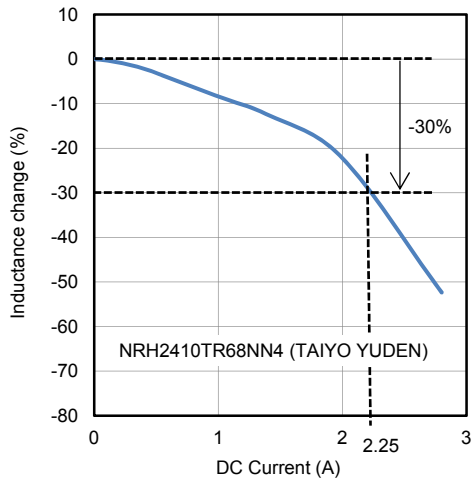


Figure 2. 直流重畳特性、Table2 の例

(出典: 太陽誘電技術資料 2015 年)

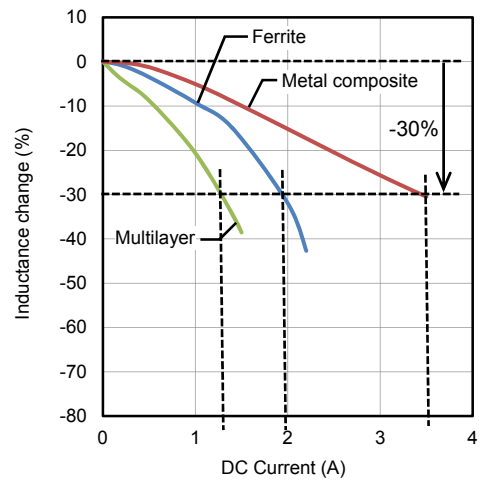


Figure 3. 直流重畳特性、構造別

フェライト巻線: NRH2410T1R0 (TAIYO YUDEN)
 メタルコンポジット: MAKK2520T1R0 (TAIYO YUDEN)
 積層: CKP25201R0-T (TAIYO YUDEN)

(出典: 太陽誘電技術資料 2015 年)

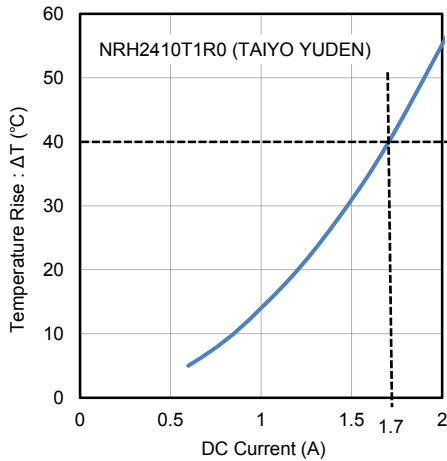


Figure 4. 温度上昇特性、Table2 の例

(出典: 太陽誘電技術資料 2015 年)

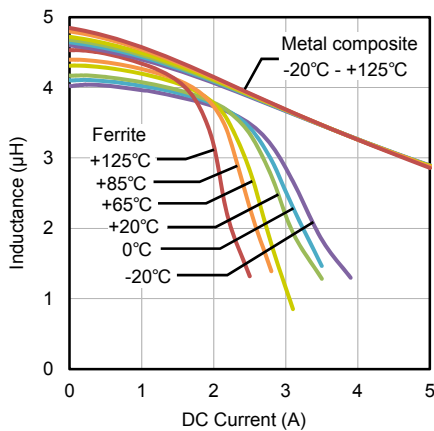


Figure 5. 温度特性

フェライト巻線: NRS5014T4R7 (TAIYO YUDEN)
 メタルコンポジット: MDPK5050T4R7 (TAIYO YUDEN)

(出典: 太陽誘電技術資料 2015 年)

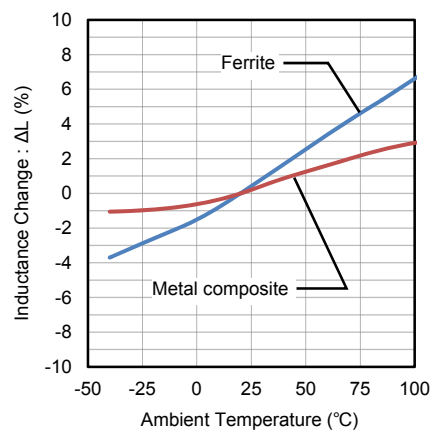


Figure 6. 温度特性

フェライト巻線: NRS5014T4R7 (TAIYO YUDEN)
 メタルコンポジット: MDPK5050T4R7 (TAIYO YUDEN)

(出典: 太陽誘電技術資料 2015 年)

インダクタンス値低下による問題の発生

前述のようにインダクタに直流電流を流すと磁気飽和によりインダクタンス値が減少しますが、使用するインダクタの許容電流が実際に流れるピーク電流値に対してマージンがない場合は、電流の急増により制御が不安定になる場合があります。

インダクタの許容電流がピーク電流に対して十分マージンがある場合は、電流が増加してもインダクタンス値の低下が小さいため、設計どおりの制御が行われます。

マージンがない場合は、Figure 7 のように電流増加による磁気飽和でインダクタンス値が低下し、インダクタンス値の減少によりピーク電流が更に増加します。これにより過電流保護が動作し出力が停止する場合があります。電流増加の速度が速すぎた場合は、過電流保護の動作が間に合わず、IC が破壊する場合があります。

ピーク電流の増加でインダクタンス値が急激に低下しないように、インダクタの許容電流の特性に注意してインダクタンスを選択する必要があります。

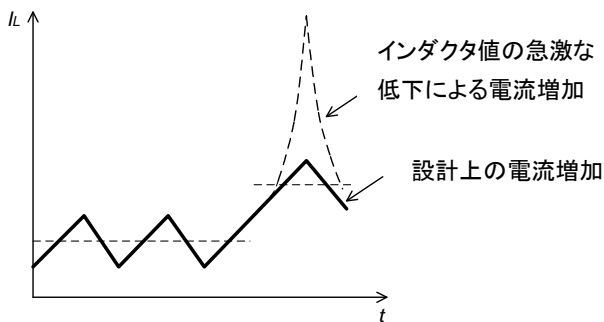


Figure 7. インダクタンス値低下による電流増加

パワーインダクタの損失

インダクタの損失はカタログに記載されている直列抵抗 R_{dc} がありますが、これは大電流域での効率に影響します。スイッチング周波数が数 MHz と高くなると交流電流に対する抵抗 R_{ac} も重要な要素になります。これは全電流域で効率に影響します。このデータは一般に公開されていることが少ないためインダクタ供給者から入手する必要があります。

Figure 8 にパワーインダクタの等価回路モデルを示します。交流抵抗のデータ (Figure 9) はこの R_{dc} と R_{ac} を合成した値で提供されます。周波数が低いときは R_{ac} の値が小さいため R_{dc} が支配的になりますが、周波数が高くなるに伴い R_{ac} が増加します。

交流電流に対する損失は Figure 10 に示すように、巻き線による銅損 (表皮効果、近接効果) と磁性体の鉄損 (ヒステリシス損、渦電流損、残留損) により発生します。

巻き線抵抗は直流電流による損失です。巻き線 (銅線) の抵抗成分で損失に影響を与え大電流時にはインダクタの損失の大部

分を占めます。

表皮効果は高周波電流が導体を流れるとき、電流密度が導体の表面で高く、中心で低くなる現象です。周波数が高くなるほど電流が表面に集中します (例: 銅線 100kHz 表皮の深さ 0.21mm、1MHz 表皮の深さ 0.066mm、10MHz 表皮の深さ 0.021mm)。

近接効果は隣接する導体に交流電流を流した場合に電流の向きが同じならば反発力が働き、電流の向きが逆ならば吸引力が働き導体内の電流が偏る現象です。

ヒステリシス損はコアが磁界の向きを変えるとききの損失です。ヒステリシスループで表され、その大きさはループに囲まれた部分の面積に比例します。交流の場合、失われるエネルギーはループを回る回数に比例するので、損失は周波数に比例します。

$$P_h = k_h f B_m^{1.6}$$

P_h : ヒステリシス損

f : 周波数

B_m : 最大磁束密度

k_h : 比例定数

渦 (うず) 電流損は、導電性を持つコアに巻いたコイルに交流電流を流すと、磁束の変化に伴って渦電流が流れます。この電流がコア材の電気抵抗で発熱し損失が発生します。損失は周波数の 2 乗に比例します。

$$P_e = k_e \frac{(t f B_m)^2}{\rho}$$

P_e : 渦電流損

t : 鉄板の厚さ

f : 周波数

B_m : 最大磁束密度

ρ : 磁性体の抵抗率

k_e : 比例定数

残留損はヒステリシス損と渦電流損以外の損失です。各インダクタメーカーは銅損、鉄損を低減した製品の開発を進めています。

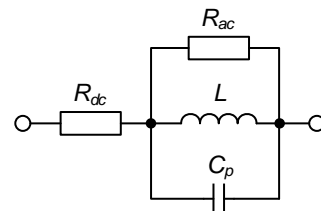


Figure 8. パワーインダクタの等価回路モデル

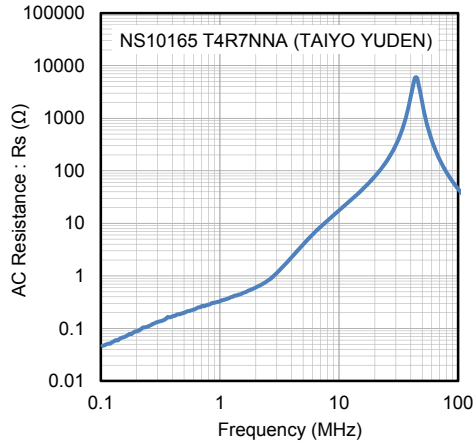


Figure 9. 交流抵抗の周波数特性

(出典: 太陽誘電技術資料 2015 年)

インダクタの選択手順

多数あるインダクタの中から種類を選びます。各インダクタの特徴を Table 1 に示しましたが、もう少し具体的な数値を Figure 11 に示します。この図はあくまで一手段ですので、選択の手がかりとして使用してください。

インダクタンス値は、IC の Datasheet に指定されているか、算出方法を参考に導き出します。

各メーカーのカタログから、必要な電気的特性とサイズが満足できるものを探します。

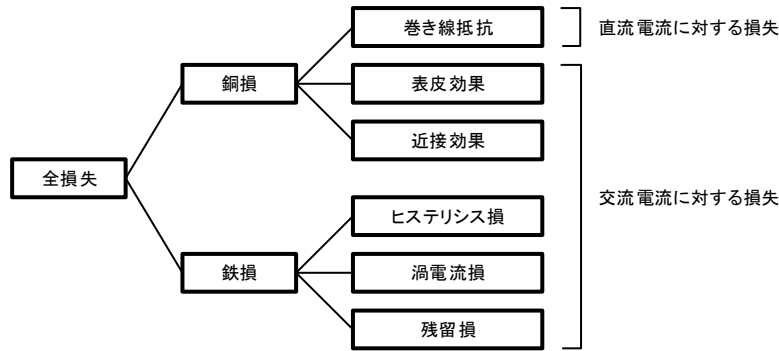


Figure 10 インダクタの損失

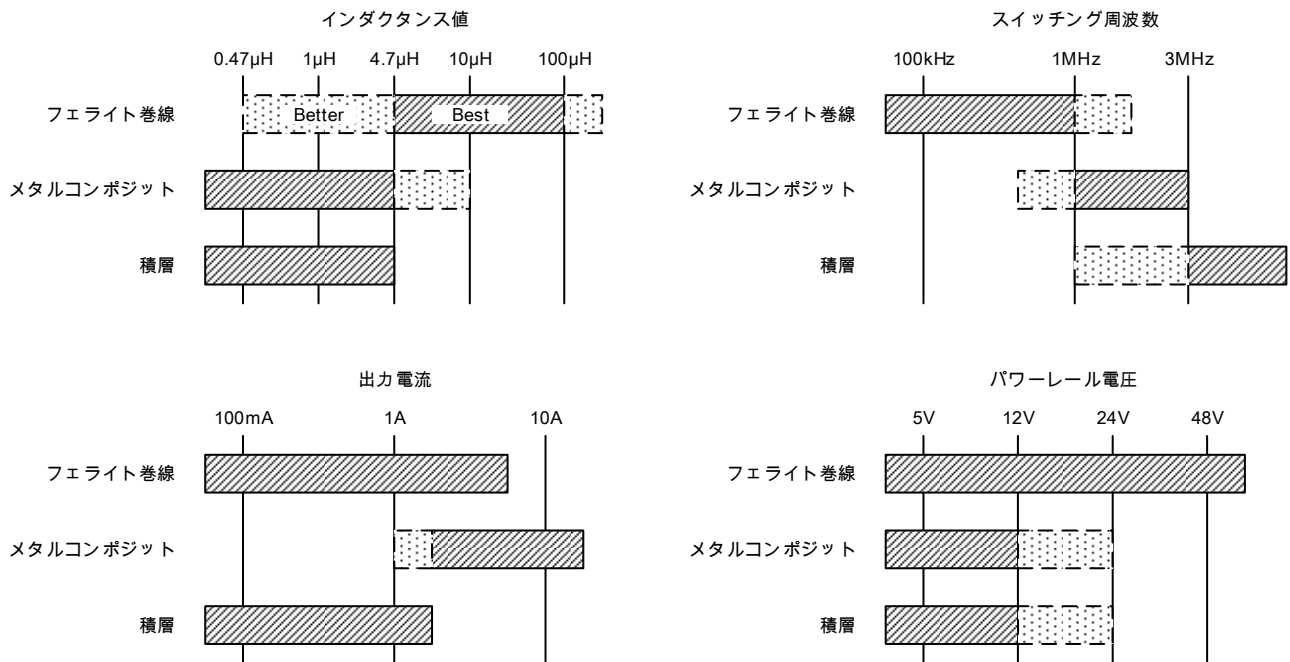


Figure 11 インダクタの種類を選択するためのイメージ

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) 本製品は、一般的な電子機器（AV機器、OA機器、通信機器、家電製品、アミューズメント機器など）および本資料に明示した用途への使用を意図しています。
- 7) 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おられません。
- 8) 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
- 9) 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
- 10) 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。
- 11) 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。
- 12) 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。
- 13) 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。
- 14) 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/>