

パワーデバイス

熱抵抗 R_{thJC} の測定方法と使い方

このアプリケーションノートは、ディスクリート半導体デバイスのジャンクションからケースへの熱抵抗を測定する方法と、その使い方について説明しています。

ジャンクションからケースへの熱抵抗とは

「ジャンクションからケース」への熱抵抗は、JEDEC Standard JESD51 の定義では、「半導体デバイスの動作部分からチップの実装領域に最も近いパッケージ（ケース）の外周面までの熱抵抗で、その外周面が適切に放熱されている場合に、その外周面とヒートシンクの温度差が最小と抑えられる。」とあります。図で表すと Figure 1 のようになります。

これは、半導体の発熱ジャンクションからケース表面までの 1 次元放熱経路を持つ半導体デバイスの「ジャンクションからケース」への熱抵抗の再現可能な測定方法の詳細と規定を明示しています。1 次元とは、熱の流れの方向が線に従うことを意味します。しかし、その熱の流れる方向は 3 次元に拡散する能力があります。

ジャンクションからケースへの熱抵抗は、半導体デバイスの重要な熱特性の 1 つであり、この面を高性能ヒートシンクに接触させることにより、ケース表面で可能な限り最良の冷却条件下で熱性能限界を示します。この値は低いほど熱性能が良いことを示します。

シンボルは R_{thJC} または Θ_{JC} です。ギリシャ文字が使える場合は $R_{\theta JC}$ または θ_{JC} です。ロームのディスクリート製品では、主に R_{thJC} と $R_{\theta JC}$ を使用しています。

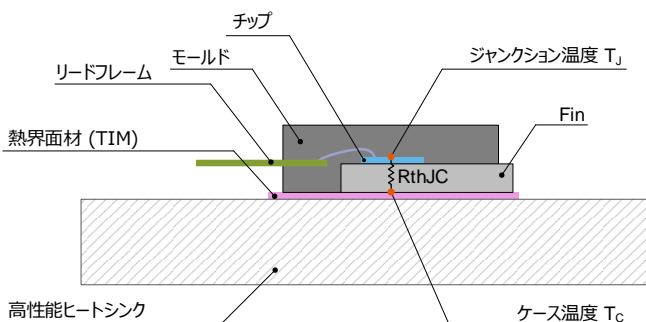


Figure 1. JESD51 で R_{thJC} の定義を図示した一例

MIL-STD-883E によるテスト方法

MIL-STD-883E の METHOD 1012.1 は熱特性テストの定義と手順が記載されており、「ジャンクションからケース」への熱抵抗についても記載されています。この標準は 1980 年に作成されたもので、今となっては問題点が多く含まれているため時代遅れのものになっています。

つぎにテスト方法の概要を説明します。Figure 2 にテスト装置の一例を示します。テストする半導体デバイスを水冷式の銅ヒートシンク上に置き、接触するケース表面温度を直接熱電対で測定します。ケースがヒートシンクに適切に接触するように上から圧力をかけます。ヒートシンクと接触したケース温度を測定するために、ヒートシンクに穴を開けて熱電対を貫通させます。熱電対の先端は溶接し、導線は電気的に絶縁されている必要があります。図では熱プローブアセンブリの部分です。熱電対の先端はケースと直接機械的に接触している必要がありますので、所定の力で接触するように圧力調整機構を備えます。信頼性の高い熱接触を実現するために、このインターフェースにはシリコングリースが使用されています。ケース温度 T_C の測定位置について、定義では次のように書かれています。「ケース温度とは、マイクロ電子チップが搭載されているパッケージ上の指定されたアクセス可能な基準点の温度です。」また、手順の項では次のように書かれています。「熱電対は、デバイスケースの底部中央のできるだけ近くで、チップまたはサブストレートの真下に取り付けます。」

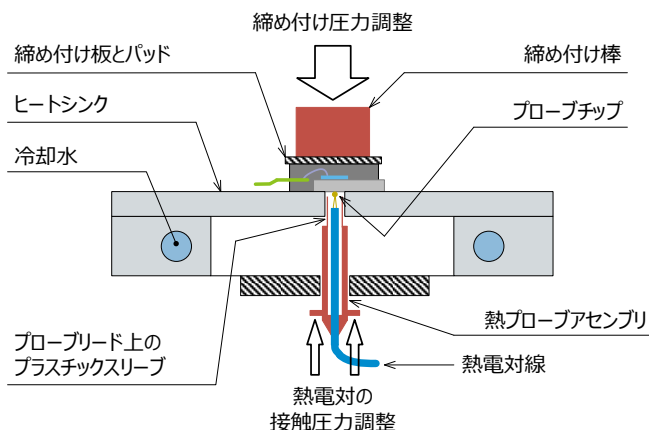


Figure 2. MIL-STD-883E METHOD 1012.1 における
テスト装置の一例、ケース温度を測定する

MIL-STD-883E によるテストの問題点

それでは、このテスト方法の問題点について説明します。熱電対によるケース温度の測定はエラーを起こしやすいため、測定結果は再現性がよくありません。まず、ケースには温度分布があるため、熱電対とケースの接点がケースの最大温度ではない場合があります。次に、熱電対の先端がヒートシンクに対して十分に断熱されていないため、ワイヤやヒートシンクから冷却されてしまい、ケース温度の読み取り値が低くなる可能性があります。さらに、ヒートシンクに空けられた熱電対用のドリル穴の影響があります。この影響はデバイスが小さいほど大きくなります。他にも使用する熱電対やヒートシンクの性能により測定環境に違いがあるため、各半導体ベンダー間の誤差が大きくなります。

この規格で説明されている熱電対測定では、デバイスがケースからヒートシンクへ適切に放熱される間に、ジャンクション温度 T_J 、ケース温度 T_C 、および加熱電力損失 P_H を決定する必要があります。ジャンクションからケースへの熱抵抗は、次式を用いて計算されます。ケース温度の測定誤差が大きいため R_{thJC} の誤差も大きくなります。

$$R_{thJC} = \frac{T_J - T_C}{P_H} \quad [^{\circ}\text{C}/\text{W}] \quad (1)$$

この測定では、前述のように熱電対を使用してケースの温度を正確に測定することが困難であり、また、ケースの表面はヒートシンクに密着しています。従いまして、異なる測定環境では、 R_{thJC} 値が逸脱する可能性があります。

測定位置で誤差が発生する例を Figure 3 に示します。A 点と B 点では 1mm しか離れていませんが、5.1 $^{\circ}\text{C}$ の温度差がでています。 P_H が 50W であった場合の熱抵抗を計算すると次のようになります。

A 点で測定時

$$R_{thJC_A} = \frac{170.3 - 138.2}{50} = 0.642 \text{ } ^{\circ}\text{C}/\text{W}$$

B 点で測定時

$$R_{thJC_B} = \frac{170.3 - 133.1}{50} = 0.744 \text{ } ^{\circ}\text{C}/\text{W}$$

この例では測定位置が僅か 1mm ずれると熱抵抗に 16%の誤差が生じる結果となり、測定位置の指定が重要であることが判ります。

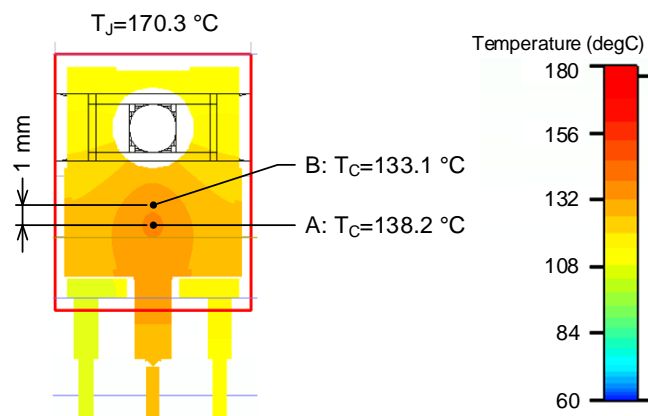


Figure 3. ケース裏面の温度分布
僅かな測定位置の違いでも温度差が生じる

JEDEC Standard によるテスト方法

JEDEC Standard JESD51-14 は 2010 年に作成され、Transient Dual Interface (TDI) テスト法を用いて、ジャンクションからケースへの熱抵抗測定を、熱電対によるケース温度の測定なしで実現しています。これにより、RthJC 測定の再現性が向上し、企業間の測定データのエラーが改善されます。これは、MIL-STD に代わり現在使われている一般的な手法です。

まず測定原理の概要ですが、ケース表面が適切にヒートシンク（コールドプレート）で冷却されている間に、時間 $t=0$ から開始する定電力 P_H で加熱される半導体デバイスの熱インピーダンスまたは $Z_{\theta JC}$ 関数 $Z_{\theta JC}(t)$ は、次のように定義されます。

$$Z_{\theta JC}(t) = \frac{T_J(t) - T_J(t=0)}{P_H} \quad [^{\circ}\text{C}/\text{W}] \quad (2)$$

つまり、熱インピーダンスはジャンクション温度の時間依存変化 $T_J(t)$ を加熱電力 P_H で割ったものに等しくなります。ケースの冷却条件が変更されても、コールドプレートへの接触があるケースで温度が上昇し始めるまでは、熱インピーダンスに影響を与えません。ただし、ケースとコールドプレート間の接触抵抗が異なる測定では、定常状態での総熱抵抗が変化するため、異なるインピーダンス曲線が測定されます。この接触抵抗が異なる 2 つの熱インピーダンス測定を行って、これら 2 つの曲線の分離点での累積熱抵抗は、RthJC ($R_{\theta JC}$ 、 θ_{JC}) として定義されます。測定原理の詳細は JESD51-14 をご参照ください。

以上のように、コールドプレートとケース表面間で異なる接触抵抗（冷却条件）を使用して、ジャンクション温度の過渡測定のみに基づいています。ケース温度 T_C の熱電対を使用した測定に関するテクニックを必要としないため、それらに関連するすべてのエラーが排除されます。この方法は、ジャンクション温度の測定のみ依存しています。

次にテスト方法の手順の概要を説明します。まずテスト対象デバイス（Device under test: DUT）のジャンクション温度を測定するため、あらかじめ DUT の温度パラメータを取得します。DUT が MOSFET の場合は、そのボディーダイオードを使用し、これをセンシングダイオードとします。なおデバイスの種類によって測定する位置は異なります。pn 接合の順方向電圧の温度特性が概ね $-2\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ で変化することを利用して、DUT 内に存在する pn 接合の温度特性をあらかじめ測定する事でジャンクション温度を推定することができます。

測定回路を Figure 4 に示します。センシングダイオードに電流を印加し順方向電圧を測定します。このとき、SiC MOSFET などのワイドバンドギャップデバイスでは V_{GS} を逆バイアスで与えるなど、デバイス特性に適した測定パラメータの選択が必要です。発熱源のデバイスは恒温槽などの温調器を使用して、 25°C からデバイスの最大ジャンクション温度まで変化させ、各温度での順方向電圧を測定します。温度を変化し

たとき、チップ（ジャンクション）へ熱が伝わるのに時間が掛かるため、順方向電圧が安定するまで時間を置きます。この測定はジャンクションを含めデバイス全体の温度が同じであることを前提にしています。

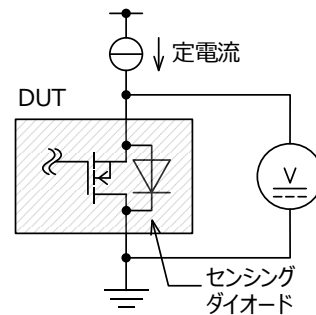


Figure 4. DUT 内にあるダイオード素子の順方向電圧測定回路

測定結果の一例を Figure 5 に示します。素子の寸法や材料が違っても多少特性は変わりますが、温度特性は概ね $-2\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ の一次関数グラフを示しています。この傾きを K ファクタと呼びます。

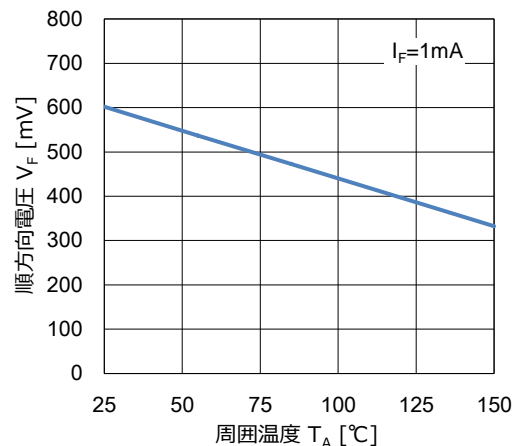


Figure 5. DUT 内に存在するダイオード素子の順方向電圧温度特性の一例

過渡熱測定装置を使用して熱インピーダンスを測定します。Figure 6 にテスト環境の一例を示します。冷却水で温度管理された銅製コールドプレートの上に DUT を装着します。

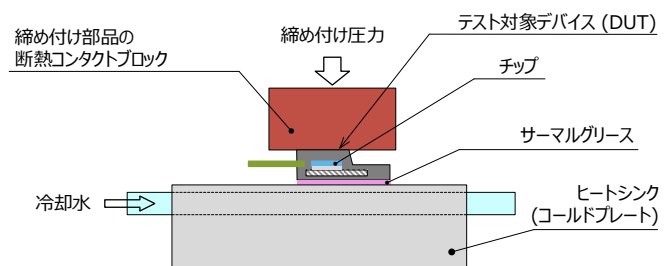


Figure 6. TDI 法のテスト環境の一例

このとき Figure 7 のように DUT とコールドプレート間にサーマルグリースが「なし」と「あり」のものを 2 種類測定します。

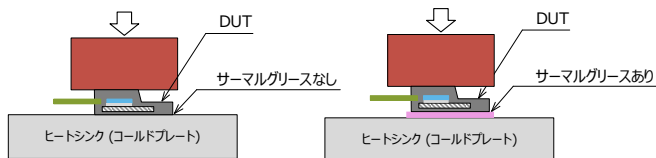


Figure 7. DUT とコールドプレート間にサーマルグリースが「なし」と「あり」のものを 2 種類測定する

熱インピーダンスの測定手順は次のようになります。ここでは一般的なシリコンの MOSFET を使用した場合で説明します。SiC MOSFET などのワイドバンドギャップデバイスでは、加熱方法とセンシングダイオードの測定方法に、適切な回路構成と測定パラメータをデバイスごとに選択する必要があります。

1. DUT 内の加熱素子に一定の加熱電流 I_H を供給し、チップの温度を上昇させます。加熱素子は MOSFET の場合ではボディダイオードが使用できます。Figure 8 の A 点が加熱電流を供給開始した地点です。ジャンクション温度が一定になるまで加熱を続けますが、ジャンクション温度の変化はセンシングダイオードの順方向電圧をモニターします。
2. ジャンクション温度が高温で安定したら加熱電流 I_H の供給を停止し、順方向電圧測定電流 I_M へ急峻に切り替えます。Figure 8 の B 点が電流を切り替えた地点です。ここから順方向電圧が低温定常状態になるまで時系列でデータを記録します (Figure 8 中のグラフ)。
3. 記録した順方向電圧のデータを、K ファクタに基づいて温度へ変換します (Figure 8 下のグラフ)。これが過渡冷却曲線です。

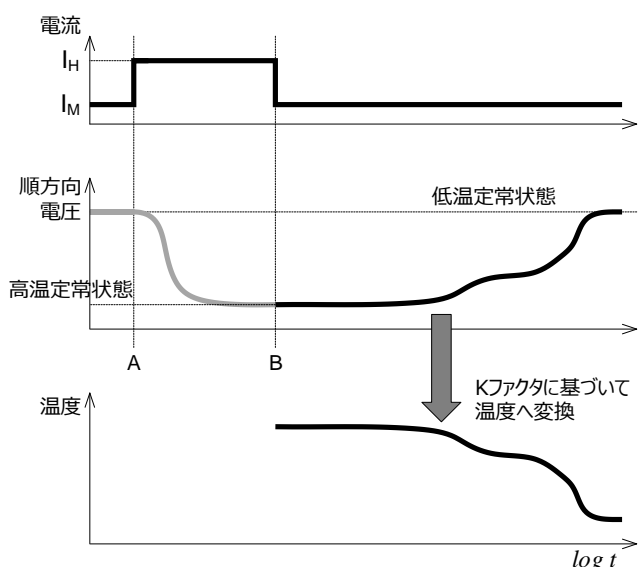


Figure 8. 過渡冷却曲線の測定

4. 過渡冷却曲線のデータを数値演算して構造関数に変換します。

構造関数はデバイス構造の伝熱経路を、熱抵抗と熱容量の一次元の熱回路で表現したもので、デバイスの熱構造を可視化できます。構造関数の一例を Figure 9 に、その一次元 RC 熱回路網を Figure 10 に示します。また、このときのデバイス構造を Figure 11 に示します。

過渡熱測定装置で得られる構造関数は 3 次元の温度分布の影響や熱抵抗と熱容量を細分化したネットワークとして表現されているため、Figure 11 のデバイス構造にあるチップとダイボンディング間など、それぞれの境界はそれほど明確ではなく、Figure 10 の各素子が Figure 11 の各要素に存在する熱抵抗と熱容量に 1 対 1 で対応している訳ではありません。しかし、ここでは構造関数の理解のため便宜上境界を設けて説明しています。

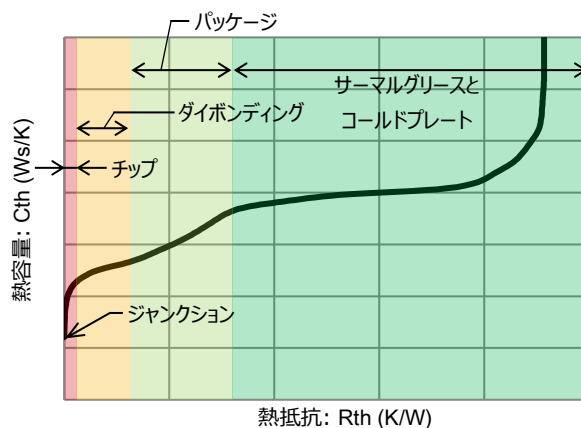


Figure 9. 構造関数の一例

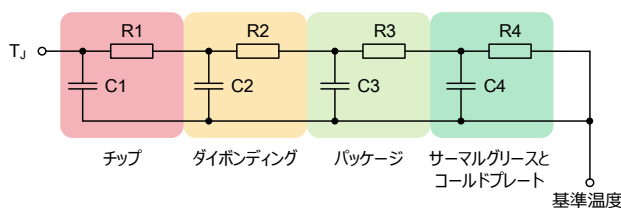


Figure 10. 一次元 RC 熱回路網

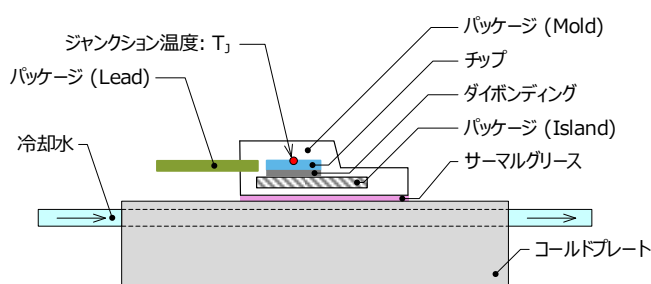


Figure 11. デバイス構造の一例

この測定を、サーマルグリースが「なし」と「あり」のもので実施します。両者の測定結果を構造関数に変換し重ね合わせたものを Figure 12 に示します。グリースがなしのものは、ケースとコールドプレート間の接触熱抵抗が高いことが読み取れます。このようにグリースの有無により、途中から曲線が分岐します。分岐するポイントはケースとサーマルグリースの界面を表していますので、ジャンクションから分岐するポイントまでの熱抵抗が RthJC になります。

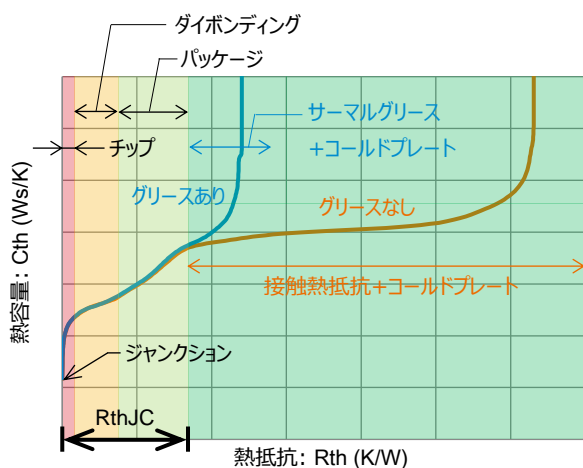


Figure 12. サーマルグリースが「なし」と「あり」の場合の構造関数を重ね合わせたグラフ

以上のように、ケース表面とコールドプレート間で異なる接触抵抗を使用して、ジャンクション温度の過渡測定のみに基づいているため、ケース表面温度 T_c は熱電対を用いて測定するテクニックを必要としません。そのため、それらに関連するすべてのエラーが排除されるため、この方法では測定精度が良い熱抵抗が得られます。ロームのディスクリート製品では JESD51-14 に準拠して RthJC 測定を実施しています。

RthJC の使い方

RthJC は異なるパッケージ間の放熱性能比較に使用できます。例えば、ある機器に実装されているデバイスを他の互換性があるデバイスに置き換える場合に、それぞれの RthJC の値からジャンクション温度が相対的に何°C 変化するか求める用途に使用します。

間違った使い方としてよくあるのは、ヒートシンクと接触するパッケージ表面の温度 T_c を熱電対で測定し、式(3)を使ってジャンクション温度を求める方法です。

$$T_j = R_{thJC} \times P + T_c \quad [^\circ\text{C}] \quad (3)$$

JESD51-14 の RthJC で定義している T_c に相当する温度測定点は物理的には存在していません。ケースの適当な位置を T_c として T_j を求める方法として、式(3)を使用しないようご注意ください。

* 文書中に出てくる「ヒートシンク」と「コールドプレート」は同義語で、各 Standards で使用されている用語を使用しています。

参考資料

- [1] JESD51-1:1995, *Integrated Circuit Thermal Measurement Method - Electrical Test Method*
- [2] JESD51-14:2010, *Transient Dual Interface Test Method for the Measurement of the Thermal Resistance Junction to Case of Semiconductor Devices with Heat Flow Through a Single Path*
- [3] MIL-STD-883E, METHOD 1012.1, *Thermal Characteristics*, 4 November 1980

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/>