

この資料は英語版を翻訳したもので、内容に相違が生じる場合には原文を優先します。こちらの日本語版は参考用としてご利用ください。設計の際には、最新の英語版で内容をご確認ください。

2009 年 12 月

AN-358-2.0

概要

IC のプロセスの微細化および FPGA の集積度の向上につれて、消費電力の管理が重要になってきています。設計者は、市場が要求するすべての機能を低消費電力でどのように提供するかという問題を抱えています。多くの FPGA デザインでは、電力は 3 番目または 4 番目に重要な問題とされてきましたが、今日の 90 nm 以下のデザインではとても重要な検討事項です。デバイスの消費電力が増加するにつれて、発生する熱も増加します。この熱を放逸させ、動作温度を最適な範囲内に維持する必要があります。

アルテラのデバイス・パッケージは、熱抵抗を最小限に抑えて最大の許容損失が得られるように設計されています。ただし、アプリケーションによってはさらに多く電力を放逸するものもあり、このようなアプリケーションにはヒート・シンクなどの外部熱対策が必要です。このアプリケーション・ノートでは、熱伝導能力の管理についてガイドを提供します。

熱放逸

デバイスから熱を放逸させる方法には、放射、伝導、および対流の 3 つがあります。PCB デザインでは、ヒート・シンクを使用して熱放逸を改善しています。ヒート・シンクの熱エネルギー伝送能力は、ヒート・シンクと周囲空気間の熱抵抗が小さいことに起因します。

熱抵抗は物質の熱放逸能力の尺度であり、熱放逸能力とは熱を異種媒体間の境界を越えて伝達する能力のことです。表面積が大きく空気循環の良好なヒート・シンクから最良の熱放逸が得られます。

ヒート・シンクは、デバイスの温度を規定推奨動作温度以下に維持するのに役立ちます。ヒート・シンクを使用すると、デバイスからの熱がジャンクションからケースに、ケースからヒート・シンクに流れ、最後にヒート・シンクから周囲に放出されます。目標は熱抵抗を低減することです。設計者は熱回路モデルと計算式を使用して熱抵抗を算出することによって、デバイスの温度管理にヒート・シンクが必要かどうかを判断することができます。これらの熱回路モデルは、オームの法則を使用した抵抗回路に類似しています。

図 1 に、ヒート・シンク付きデバイスとヒート・シンクなしデバイスの熱回路モデル、およびパッケージの上部を通る熱伝導パスも示します。

図 1. 熱回路モデル

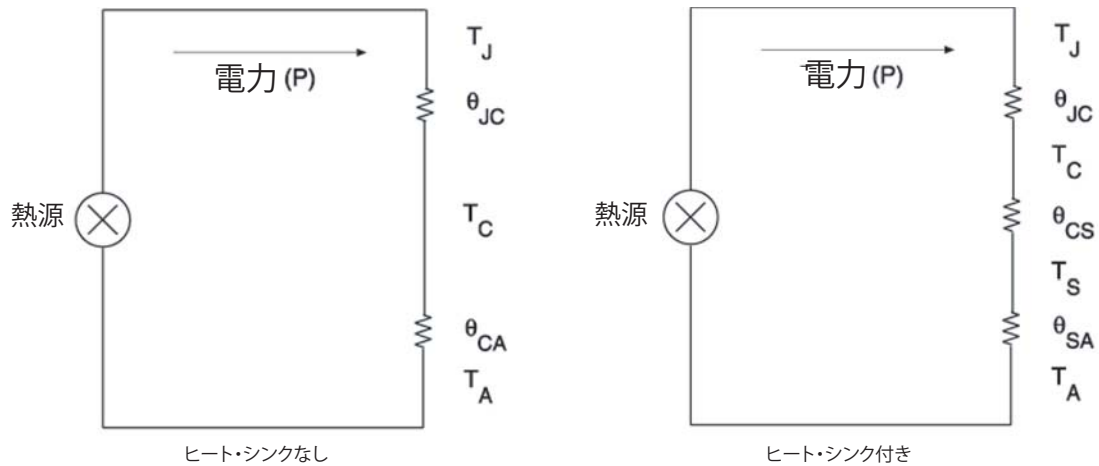


表 1 は熱回路のパラメータを定義します。デバイスの熱抵抗は、図 1 に示す熱回路モデルから算出された熱抵抗値の合計によって決まります。

表 1. 熱回路のパラメータ

パラメータ	名称	単位	説明
θ_{JA}	接合部から周囲空気までの熱抵抗	$^{\circ}\text{C/W}$	データ・シートに規定
θ_{JC}	接合部からケースまでの熱抵抗	$^{\circ}\text{C/W}$	データ・シートに規定
θ_{CS}	ケースからヒート・シンクまでの熱抵抗	$^{\circ}\text{C/W}$	サーマル・インタフェース・マテリアルの熱抵抗
θ_{CA}	ケースから周囲空気までの熱抵抗	$^{\circ}\text{C/W}$	
θ_{SA}	ヒート・シンクから周囲空気までの熱抵抗	$^{\circ}\text{C/W}$	ヒート・シンク・メーカーによって規定
T_J	接合温度	$^{\circ}\text{C}$	デバイスの推奨動作条件に基づいて規定された接合温度
T_{JMAX}	最大接合温度	$^{\circ}\text{C}$	デバイスの推奨動作条件に基づいて規定された最大接合温度
T_A	周囲温度	$^{\circ}\text{C}$	コンポーネント周辺の局所周囲空気の温度
T_S	ヒート・シンクの温度	$^{\circ}\text{C}$	
T_C	デバイス・ケースの温度	$^{\circ}\text{C}$	
P	消費電力	W	動作しているデバイスの合計消費電力。この見積り値を使用して、ヒート・シンクを選択する。

表 2 に、ヒート・シンク付きデバイスとヒート・シンクなしデバイスの熱抵抗計算式を示します。

表 2. デバイスの熱計算式

デバイス	計算式
ヒート・シンクなし	$\theta_{JA} = \theta_{JC} + \theta_{CA} = (T_J - T_A) / P$
ヒート・シンク付き	$\theta_{JA} = \theta_{JC} + \theta_{CS} + \theta_{SA} = (T_J - T_A) / P$

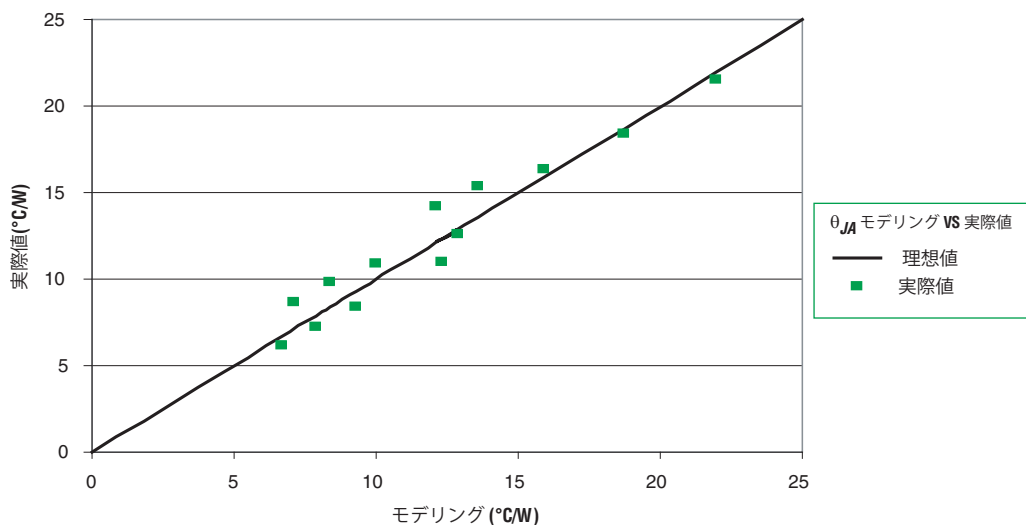
熱抵抗

かつては有限要素モデルを使用してパッケージされたデバイスの熱抵抗を予測していました。以下のリストに、このモデルを簡単に説明します。

- 三次元的
- 対称性のあるため、パッケージの 1/4 をモデルにする
- ダイの活性表面に熱流束を均一に分布させる
- 複合材料に均一な熱伝導率を使用する
- 実験式を用いて、露出した外部表面に熱伝導係数を割り当てます。

モデリングによって得られた値は、アルテラ・ウェブサイト (www.altera.com) で提供される熱抵抗値にはほぼ一致します。図 2 に、モデリングと実際測定値の相関関係を示します。平均差は 10%未満であり、JEDEC JESD51-X シリーズ基準 (www.jedec.org) に準拠します。

図 2. モデルによる予測値 Vs 実際測定値



プリント基板について

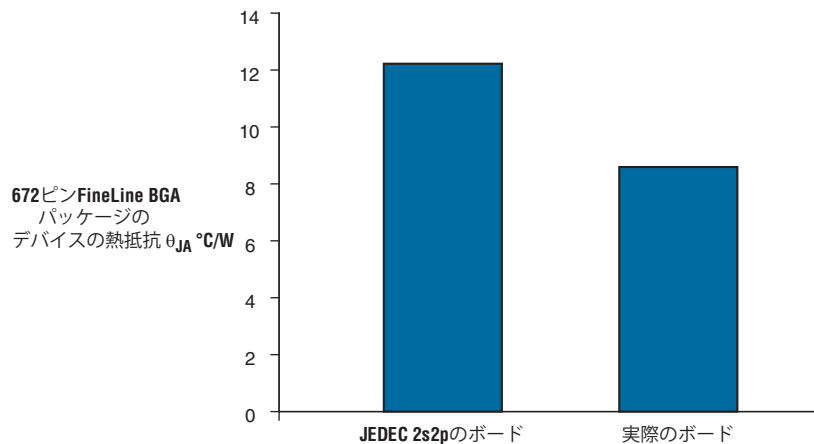
応用の条件（例えば、ボードのサイズおよび構造）は JEDEC 規格と異なる可能性があります。したがって、アルテラでは、熱に厳しい実条件に基づいて熱抵抗の評価を行うことを推奨しています。表 3 に、実際の応用におけるボードの例を示します。このボードは JESD51-9 規格で規定された JEDEC 2s2p テスト・ボードと異なる特性を持っています。

表 3. 実際の応用におけるボード・パラメータ

体積 (mm)	200 × 200 × 1.6
レイヤ数	10
レイヤの厚さおよび銅 (Cu) の被覆率	25 μm 、 50%

図 3 には、ボードの違いが熱抵抗に大きな影響を与えることを示します。JEDEC 2s2P ボードを使用する場合、672 ピン FineLine BGA® パッケージ内の EP2S15 デバイスは静止空気において 12.2 °C/W の θ_{JA} を持っています。表 3 で説明するボード例を使用すると、 θ_{JA} は静止空気において 8.6 °C/W となります。大きいボード・サイズおよび増加したレイヤによって、より小さい θ_{JA} が得られます。

図 3. ボードの違いによる熱抵抗に対する影響



ヒート・シンク使用の判断

以下の計算式を使用して接合温度を算出することにより、ヒートシンクの必要性を判断することができます。

$$T_J = T_A + P \times \theta_{JA}$$

算出された接合温度 (T_J) が規定最大許容接合温度 (T_{Jmax}) を超える場合に、ヒート・シンクが必要です。

次の 2 つの式を使用してヒート・シンクを選択します。

$$\theta_{JA} = \theta_{JC} + \theta_{CS} + \theta_{SA} = (T_J - T_A) / P$$

$$\theta_{SA} = (T_{Jmax} - T_A) / P - \theta_{JC} - \theta_{CS}$$

ページ 2 の表 1 に、これらの式に使用される用語を定義します。

ヒート・シンクの必要性の判断例

以下の手順は、ヒート・シンクが必要かどうかを判断するために使用できる方法を示します。表 4 に、動作条件をリストします。

表 4. 動作条件

パラメータ	値
電力	20 W
最大 T_A	50 °C
最大 T_J	85 °C
空気流量	400 feet/ 分
空気流量を 400 feet/ 分とした場合の θ_{JA}	4.7 °C/W
θ_{JC}	0.13 °C/W

- 5 ページでの接合温度計算式を使用して、記載された動作条件での接合温度を計算します。

$$T_J = T_A + P \times \theta_{JA} = 50 + 20 \times 4.7 = 144 \text{ °C}$$

接合温度 144 °C は規定最大接合温度 85 °C より高いため、ヒート・シンクが必要です。

- 5 ページでのヒート・シンクから周囲空気までの計算式および 0.1 °C/W の θ_{CS} (これは、選択された熱インターフェイス・マテリアルのデータシートに述べたように、熱抵抗の評価) を使用して、所要のヒート・シンクから周囲空気までの熱抵抗を計算します。

$$\theta_{SA} = (T_{Jmax} - T_A) / P - \theta_{JC} - \theta_{CS} = (85 - 50) / 20 - 0.13 - 0.1 = 1.52 \text{ °C/W}$$

- 熱抵抗要求値 1.52 °C/W に適合するヒート・シンクを選択します。ヒート・シンクは物理的にもアプリケーションに適合するものでなければなりません。

ヒート・シンクを選択するには、アルテラはサプライヤ数社のヒート・シンクを検討します。この例には Alpha Novatech 製ヒート・シンク (Z40-12.7B) を使用しています。

400 feet / 分の空気流量での Z40-12.7B の熱抵抗は 1.35 °C/W です。したがって、熱要件は要求値 1.52 °C/W 未満なので、このヒート・シンクは有効であると考えられます。

このヒート・シンクを使用して、

$$T_J = T_A + P \times \theta_{JA} = T_A + P \times (\theta_{JC} + \theta_{CS} + \theta_{SA}) = 50 + 20 \times (0.13 + 0.1 + 1.35) = 81.6 \text{ °C}$$

81.6 °C は指定された最高接合温度 85 °C より低いです。

ヒート・シンクの評価

ヒート・シンク・サプライヤから提供されるヒート・シンクの熱抵抗値が正確であることが、適切なヒート・シンクを選択する際に重要です。有限要素モデルと実測値の両方を使用して、サプライヤのデータが正確かどうかを検証しています。

有限要素モデル

有限要素モデルは、ヒート・シンクをパッケージに含むアプリケーション例を示します。

アルテラは、4つのアルテラのデバイスを使用して、2つの Alpha Novatech 製ヒート・シンクについて熱抵抗値をテストしました。表 5 は、モデルで予測した熱抵抗値と、サプライヤのデータシートから算出された熱抵抗値がほぼ一致することを示しています。

表 5. 400 feet/ 分の空気流量での θ_{JA}

ヒート・シンク	パッケージ	モデリングの θ_{JA} (°C/W)	データシートの θ_{JA} (°C/W)
Z35-12.7B	1,020 ピン FineLine BGA パッケージのデバイス	2.6	2.2
Z35-12.7B	1,020 ピン FineLine BGA パッケージのデバイス	2.3	2.1
Z40-6.3B	1,020 ピン BGA パッケージのデバイス	3.3	3.0
Z40-6.3B	1,020 ピン BGA パッケージのデバイス	3.0	2.8

測定値

熱抵抗は JEDEC Standard JESD51-6 に準拠して測定されます。アルテラは、以下の Alpha Novatech 製ヒート・シンク UB35-25B、UB35-20B、Z35-12.7B、Z40-6.3B の熱抵抗値を測定しました。上記ヒート・シンクについては、Alpha Novatech Web サイト (www.alphanovatech.com) をご覧ください。上記ヒート・シンクには、サーマル・テープ (Chomerics T412) があらかじめ貼付されています。サーマル・インタフェース・マテリアルの評価は 7 ページの「サーマル・インタフェース・マテリアル」に記載されています。

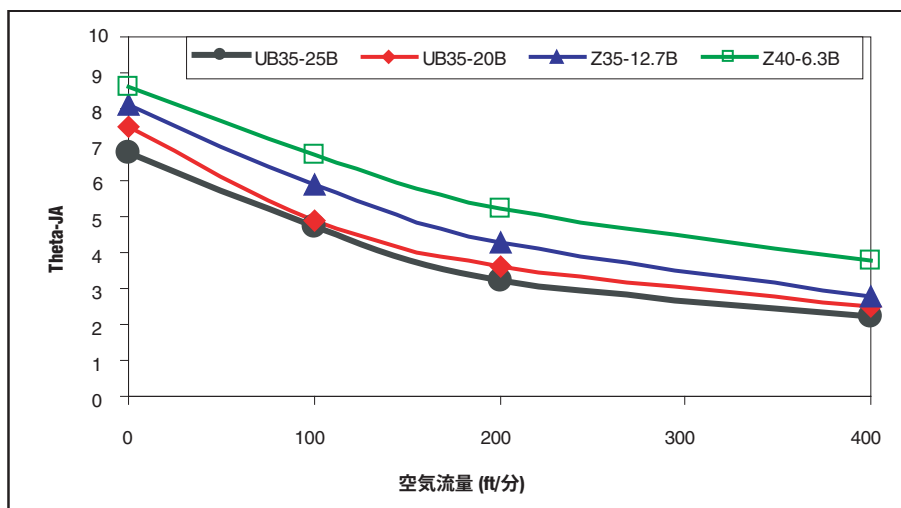
ヒート・シンクを測定するには、表 6 に示すようにアルテラの 4 つのデバイスが使用されます。表に実測値とサプライヤのデータシートに記載されている熱抵抗値の間に高い相関性が見られました。

表 6. 400 feet/ 分の空気流量での θ_{JA}

ヒート・シンク	実際の θ_{JA} (°C/W)	データ・シートの θ_{JA} (°C/W)
UB35-25B	2.2	2.2
UB35-20B	2.5	2.4
Z35-12.7B	2.8	2.6
Z40-6.3B	3.8	3.4

図 4 に、空気流量が θ_{JA} に与える影響を示します。

図 4. θ_{JA} に空気流量の影響



サーマル・インタフェース・マテリアル

サーマル・インタフェース・マテリアル (TIM) は、ヒート・シンクをパッケージ表面に取り付けるのに使用される媒体です。TIM は、パッケージからヒート・シンクまで、最小となる熱抵抗のパスを提供する働きをします。以下では、TIM について説明します。

グリース

ヒート・シンクをパッケージに接着するのに使用されるグリースは、シリコン・オイルまたは炭化水素オイルで、各種充填剤を含有しています。グリースは、各種マテリアルのうち最も古くから使用されており、ヒート・シンクを取り付けるのに最も広く使用されています。表 7 に、グリースを使用することで、長所と短所をリストします。

表 7. グリース

長所	短所
熱抵抗が小さい (0.2 ~ 1 C cm ² /W)。	扱いにくく、粘性が高いため塗りにくい。
	機械的なクランピングが必要 (300 kPa 以内の圧力をかける)。
	電源のオン / オフ・サイクルが繰り返されるアプリケーションでは、シリコン・ダイが加熱、冷却されるたびに、ダイとヒート・シンクの間からグリースが押し出される「ポンプアウト」が起こります。その結果、時間が経過するにつれて熱伝導能力が低下し、周辺のコンポーネントを汚染するおそれもあります。

ゲル

ゲルは、最近開発された TIM です。ゲルはグリースと同様に塗布されると、硬化して部分的に架橋構造になります。このためポンプアウトの問題が解消されます。表 8 に、ゲルを使用することで、長所と短所をリストします。

表 8. ゲル

長所	短所
熱抵抗が小さい (0.4 ~ 0.8 C cm ² /W)。	機械的なクランピングが必要。

伝熱性接着剤

一般的な伝熱性接着剤は、充填剤を含有し、エポキシまたはシリコン・ベースの調合物で、優れた接着力を持っています。表 9 に、伝熱性接着剤を使用することで、長所と短所をリストします。

表 9. 伝熱性接着剤

長所	短所
熱抵抗が小さい (0.15 ~ 1 C cm ² /W)。 機械的なクランピングが不要。	再作業ができない。

熱テープ

熱テープは、ポリイミド・フィルム、ファイバグラス・マット、アルミニウム箔などの支持基材上に充填剤入り感圧接着剤 (PSA) を塗布してコーティングしたものです。表 10 に、熱テープを使用することで、長所と短所をリストします。

表 10. 熱テープ

長所	短所
アセンブリが容易。 機械的なクランピングが不要。	熱抵抗が大きい (1 ~ 4 C cm ² /W)。 一般に、表面が平坦でないパッケージには適しません。

エラストマー・パッド

エラストマー・パッドは、扱いやすい固体状の重合シリコン・ゴムです。パッドの標準的な厚さは 0.25 mm で、大部分のパッドにはガラス繊維織物が組み込まれていて扱いやすくなっています。さらにこのパッドは、グリースと同様に無機充填剤を含有しています。エラストマー・パッドは、アプリケーションに必要な正確な形状にダイ・カットされて供給されます。表 11 に、エラストマー・パッドを使用することで、長所と短所をリストします。

表 11. エラストマー・パッド

長所	短所
アセンブリが容易。	機械的なクランピングが必要。 適切なインタフェースを実現するために、高圧 (最大 700 kPa) が必要です。 熱抵抗が大きい (1 ~ 3 C cm ² /W)。

相変化物質

相変化物質は、通常 50 ~ 80 ° C で融解し、低温熱可塑性接着剤（ワックスが主流）です。動作温度が融点を超えると、相変化物質は接着剤としての効力を失い、機械的なサポートが必要になります。このため、相変化物質は常に約 300 kPa を加圧するクランプと一緒に使用されます。表 12 に、相変化物質を使用することで、長所と短所をリストします。

表 12. 相変化物質

長所	短所
熱抵抗 (0.3 ~ 0.7 C cm ² /W)。	機械的なクランピングが必要 (300 kPa 以内の圧力をかける)。 再作業が困難

ヒート・シンクのアタッチメント

ヒート・シンクのアタッチメントでは 3 つの基本種類があります。

- 機械のアタッチメント
- サーマル・エポキシ
- サーマル・テープ
 - 機械のアタッチメントは、グリースまたは相変化物質などのサーマル・インタフェース材料を使用する能力と同様に優れた機械的信頼性を提供して、大幅に低いサーマルのインピーダンスをイネーブルします。
 - 困難な再編成で信頼性と安全な接着を作成しますので、サーマル・エポキシは、恒久的なアタッチメントの方法と考えられます。エポキシで接続されたヒート・シンクを削除 / 再編成することができますが、デバイスが損傷する可能性があります。
 - サーマル・テープは、エポキシより比較的安価で再編成しやすいです。しかし、テープは低い信頼性および弱いヒート・シンクを提供します。特により大きいヒート・シンクを使用するときです（それは機械のアタッチメントに関連して使用されない場合）。

推奨されるヒート・シンクのアタッチメント方法

機械のアタッチメントは、アルテラの FPGA にヒート・シンクをアタッチすることが強く推奨されます。狭い面積のため、熱伝導性のテープまたはエポキシの使用はもう有効なオプションではありません。これは、アルテラの蓋なしのパッケージには本当です。

機械のアタッチメントは、次の利点があります。

- グリースや相変化物質のような高いパフォーマンスのサーマル・インタフェース材料を使用することができます。
- 再編成はしやすくなります。

共通の機械アタッチメントの方法にはプッシュピン、Z-Clip、および Clip-On が含まれています。

機械アタッチメントの例

次の図に、機械アタッチメントの方法の例を示しています。

図 5 に、プッシュピン・アタッチメントの方法を示します。

図 5. プッシュピン・アタッチメント

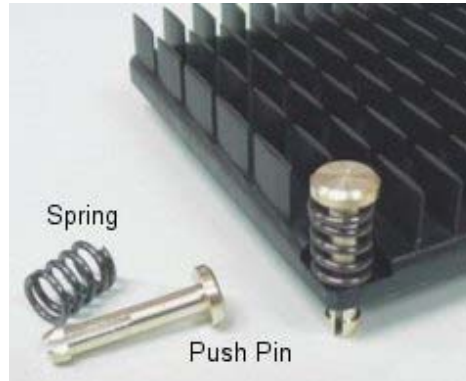


図 6 に Z-Clip アタッチメントの例を示します。

図 6. Z-Clip アタッチメント



図 7 に Clip-On アタッチメントの例を示します。

図 7. Clip-On アタッチメント



蓋なしのパッケージ・ベンダはダイ・チップングを防ぐために圧縮性泡パッドを使用します。

サブストレート上のチップ・コンデンサーとヒート・シンクの接触の回避方法

ヒート・シンクはコンデンサーがパッケージの表に配置されている状態でヒート・シンクが電氣的短絡を発生するのを防ぐ方法を含める必要があります。

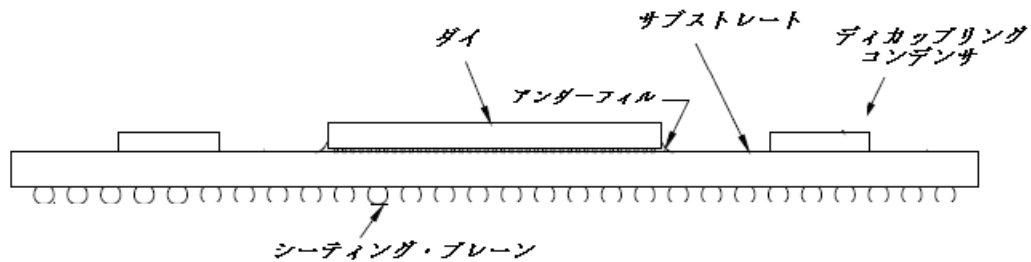
- 1つの推奨した方法は、ヒート・シンクの上に小さい圧縮性泡パッドを使用することです。これらのパッドは、ヒート・シンクのダイ上でのロッキングまたは傾斜からを防止します。ヒート・シンクが傾いて、コンデンサーに接触することを防ぐだけでなく、インストール時にヒート・シンクをやわらげて、ヒート・シンクがダイの角を欠くか、または割る可能性を防ぎます。これらのパッドは、表面実装コンポーネントのない表面でチップ・サブストレートに接触するように配置される必要があります。
- ヒート・シンクはよく陽極酸化されます（絶縁性の表面）。一部のケースでは、顧客は EMI/ 接地の理由でむき出し仕上げまたは導電性仕上げを要求します。この場合、パッドか絶縁体の使用は重要です。
- レールまたは Z- 停止付きのヒート・シンクはチップ・サブストレートに接触するように、ヒート・シンクのベースに機械加工されます。レールは傾斜を最小にし、そしてヒート・シンクがコンデンサーではなく、サブストレートに接触することを確保します。
- 他の適当な方法では、ヒート・シンクのベースで電氣的に絶縁されたガスケット材を使用することが含まれています。もう 1つの方法は、ヒート・シンクのベースにおいてダイとの接触を許すのにセンター切抜きのある絶縁体シートを使用することです。

また、ヒート・シンク・サプライヤーと連携して、ヒート・シンク・アタッチメント用の PCB 上のホールまたはスロットに対応するための説明に従いことが強く推奨されます。ヒート・シンクのベンダのリストについては、13 ページの「ヒート・シンクのベンダ」を参照してください。

パッケージ断面図（蓋なしのパッケージ）

蓋なしのパッケージのヒート・シンク・アタッチメントを設計する際に、サブストレート上のダイおよびデカップリング・コンデンサ（あるデバイスで）のそれぞれの高さを考慮する必要があります。図 8 は蓋なしのパッケージの断面図です。パッケージ情報について詳しくは、「*Altera Device Package Information Data Sheet*」を参照してください。

図 8. 蓋なしのパッケージの断面図



パッケージ・ロードの仕様

表 13 に蓋のないパッケージの静荷重の仕様を提供します。ヒート・シンクの組み立て、出荷の状態、または正常使用の状態には、この機械的な最大負荷限界を超えないようにする必要があります。また、機械システムまたはコンポーネントのテストでは、最大限を超えてはなりません。

熱的および機械的な対策の場合、機械的なリファレンスまたは耐力の表面としてパッケージ・サブストレートを使用してはなりません。ヒート・シンク・クリップのプリロード計算にポスト・リフロー・パッケージの高さを使用することができます。

表 13. パッケージ・ロードの仕様

パラメータ	Max	説明
スタティック	700 Kpa	(1)、(2)、(3)

表 13 の注:

- (1) これらの仕様はパッケージに垂直な方向での均一の圧縮荷重に適用します。
- (2) ヒート・シンク保持クリップから許容される最大ロード。熱伝導のために、ヒート・シンクからパッケージに十分な力を確保するように、最小ロードも達成される必要があります。
- (3) この情報はデザイン特性評価用であり有限なテストに基づいています。ロードの制限は、パッケージ用のみです。

ヒート・シンクのベンダ

以下はヒート・シンクのベンダのリストです。

- Alpha Novatech (www.alphanovatech.com)
- Malico Inc. (www.malico.com.tw)
- Aavid Thermalloy (www.aavidthermalloy.com)
- Wakefield Thermal Solutions (www.wakefield.com)
- Radian Heatsinks (www.radianheatsinks.com)
- Cool Innovations (www.coolinnovations.com)
- Heat Technology, Inc. (www.heattechnology.com)

サーマル・インタフェース・マテリアルのベンダ

以下はインタフェース・マテリアルのベンダのリストです。

- Shin-Etsu MicroSi (www.microsi.com)
- Lord Corporation (www.lord.com)
- Laird Technologies (www.lairdtech.com)
- Chomerics (www.chomerics.com)
- The Bergquist Company (www.bergquistcompany.com)

結論

90-nm 以下のデバイスは熱抵抗を最小限に抑えて最大の電源分配が得られるように設計されますが、アプリケーションにはヒート・シンクなどの外部熱対策が要求される場合があります。このアプリケーション・ノートでは、アプリケーションに熱要件を決定するために必要な情報を提供します。使用されるプリント基板の特性の評価、ヒート・シンクの必要性の判断、ヒート・シンクの使用の判断、および最適なサーマル・インタフェース材料の選択は考慮する必要がある要素です。

表 14 に、本資料の改訂履歴を示します。

改訂履歴

表 14. 改訂履歴

日付	バージョン	変更内容
2009 年 12 月	v2.0	<ul style="list-style-type: none">■ 8-1/2 x 11 ページ・フォーマットに変換。■ 「ヒート・シンクの必要性の判断例」、「推奨されるヒート・シンクのアタッチメント方法」、「機械アタッチメントの例」、「サブストレート上のチップ・コンデンサーとヒート・シンクの接触の回避方法」、「パッケージ断面図（蓋なしのパッケージ）」、および「パッケージ・ロードの仕様」を追加。
2007 年 2 月	v1.1	「概要」、「熱抵抗」、および「ヒート・シンクの評価」を更新。 変更履歴を追加。
2004 年 9 月	v1.0	初版



101 Innovation Drive
San Jose, CA 95134
www.altera.com
Technical Support
www.altera.com/support

Copyright © 2009 Altera Corporation. All rights reserved. Altera, The Programmable Solutions Company, the stylized Altera logo, specific device designations, and all other words and logos that are identified as trademarks and/or service marks are, unless noted otherwise, the trademarks and service marks of Altera Corporation in the U.S. and other countries. All other product or service names are the property of their respective holders. Altera products are protected under numerous U.S. and foreign patents and pending applications, maskwork rights, and copyrights. Altera warrants performance of its semiconductor products to current specifications in accordance with Altera's standard warranty, but reserves the right to make changes to any products and services at any time without notice. Altera assumes no responsibility or liability arising out of the application or use of any information, product, or service described herein except as expressly agreed to in writing by Altera Corporation. Altera customers are advised to obtain the latest version of device specifications before relying on any published information and before placing orders for products or services.



I.S. EN ISO 9001