



AN-1432 アプリケーション・ノート

ハイパワー IC の実用的な熱モデリングと測定

著者: Benjamin Babjak, Rachel Corey White, Adam Bray

はじめに

集積回路 (IC) の温度を正確かつ高精度で温度監視することは、さまざまなアプリケーションにおいて不可欠なことです。しかし、IC の温度測定は簡単ではありません。デバイス全体で温度が均一ではない上に、周囲温度にだけ依存するものではないからです。動作中の IC 内のシリコンの動作領域は電力を消費し、その結果として自己発熱します。

温度の状態が不適切な場合、つまり温度が高過ぎたり低過ぎたりする場合は、安全な動作や性能に悪影響を及ぼすおそれがあります。温度が高過ぎると経年劣化の進行が早まるので、メタル・マイグレーションのような変質や、ボンディング・ワイヤがダイ・パッドから分離するといった不具合を招く可能性が大きくなります。また、高温はアナログ性能、動作速度、部品同士のタイミング整合などに悪影響を与える可能性があり、さらに、ラッチアップなどの動作不良を招く場合もあります。

このような理由から、これまで部品温度はデバイス故障や全体的な信頼性を予測するための判断材料と見なされてきました。特に、デバイスの電源オン/オフによって生じる温度変化の頻度および温度差と故障の間には、一定の関係があります。したがって、温度を正確に予測することは、性能と整合性を向上させる上で不可欠です。

このアプリケーション・ノートでは、基本となる原理の概要、制定された規格、さらにはテスト対象デバイス (Device Under Test: DUT) 内にあるダイオードの順方向電圧降下といった回路の温度感知パラメータ (Temperature-Sensitive Parameter: TSP) を使用するジャンクション温度の予測手法を示すことによって、直感的な理解が得られるようにしています。以降では IC の温度テスト方法を説明し、現在広く使われている高速 A/D コンバータ (ADC) に関するテスト結果を示します。

目次

はじめに.....	1	結果.....	6
改訂履歴.....	2	実用的なセットアップ – 恒温槽モデル.....	7
熱モデルの背景の概要.....	3	モデル.....	7
静的モードとケース温度.....	4	計算.....	8
動的モードと温度感知パラメータ.....	4	結果.....	8
ダイオードベースの温度計測装置 (TMU)	4	参考文献.....	9
温度と TSP の関係の確立.....	6		

改訂履歴

10/2016—Revision 0: Initial Version

熱モデルの背景の概要

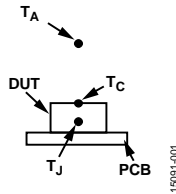


図 1. 能動部品による簡単な熱システム

理想的な熱セットアップを図 1 に示します。DUT は、保護層、つまり金属またはプラスチックのパッケージもしくはケースに密封されています。DUT はプリント基板 (PCB) 上に取り付けられており、シリコンの動作領域はパッケージ内のいずれかに位置しています。動作領域の温度はジャンクション温度 (T_J) と呼ばれ、パッケージ上面の温度はケース温度 (T_C) と呼ばれます。このシステムの周囲は空気で囲まれており、周囲温度は T_A で一定です。

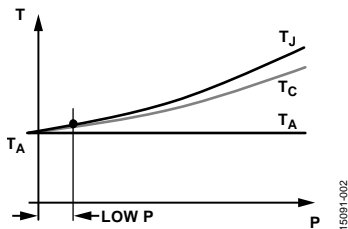


図 2. 温度上昇と消費電力増加の関係

図 2 に示すように、消費電力の増加とジャンクション温度の上昇は密接に関係しています。この関係を正確に示そうとすると複雑な場合が多く、非線形の可能性もあって、因果関係も単純ではありません。

以下は非線形の場合の一例です。消費電力が増加すると DUT が自己発熱するので、ジャンクション温度が上昇します。しかし、温度が上昇すると半導体の導電率が上がり、消費電力はさらに増加します。これは熱暴走と呼ばれる正帰還で、深刻な事態をもたらすおそれがあります。

非線形動作の例は CMOS デバイスに見られます。動的 (スイッチング) 電流への影響はクロック速度によるものが大きく、温度変化による影響は比較的小さいのですが、静的 (リーク) 電流はトランジスタのオフ状態に直接依存し、オフ状態はトランジスタのスレッシュホールド電圧によって決定されます。さらに、スレッシュホールド電圧は温度に依存します。したがって、電力と温度の間の指数的関係は、静的電流に支配される回路に多く見られます。

実用性を高めるために、このアプリケーション・ノートでは線形近似を使用しますが、この簡素化の妥当性については、それぞれのケースごとに慎重に評価する必要があります。

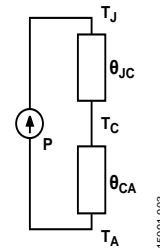


図 3. 熱回路モデル

線形手法を使用すると、多くの類似点を電気回路に置き換えることが可能になり、熱システムをモデル化するために熱抵抗などの概念を導入することができます。このようなモデルを図 3 に示します。

$$P = \frac{T_J - T_C}{\theta_{JC}} = \frac{T_C - T_A}{\theta_{CA}} = \frac{T_J - T_A}{\theta_{JA}}$$

ここで、消費電力 (P) は電流源に相当します。回路ノードは温度 (T_J , T_C , T_A) の設定された構造点を表し、電圧ノードのように動作します。熱抵抗 (θ_{JC} , θ_{CA}) は負荷に相当します。温度と電力の関係が直線的なので、熱抵抗値は一定になります。

半導体製造装置材料協会 (SEMI)、米国電子工業会 (EIA)、電子機器技術評議会 (JEDEC) などの各種標準化機構によれば、ある構造内の 2 点間の熱移動経路が曖昧でなく、明確に定義されている場合は、ギリシャ文字シータ (θ) を使用して、その経路の熱抵抗を表すことができます。しかし、熱が別の経路でも伝わり、経路別の消費電力ではなく総消費電力しか分からないような状況も、数多く存在します。このような場合は、この不確定要素を表すためにギリシャ文字プサイ (Ψ) を使用します。例えば、図 3 のモデルは、熱は動作領域からケースにだけ伝わり、そこから周囲の空気へ放熱されることを示しています。しかし、熱は PCB へも伝わるのが考えられ、その場合はそこからも放熱されます。したがって、ケースを通じた経路は、技術的には次のようにしか定義できません。

$$\frac{T_J - T_A}{P} = \Psi_{JA} \approx \theta_{JA}$$

モデルを単純化するために、別の経路はないものと仮定し、 θ を使用します。

なお、過渡的動作を考慮し、これをモデル化するために同じラインに沿って熱容量を定義することもできますが、このようなモデルを考えるには複雑なシステム同定が必要になります。これは、このアプリケーション・ノートの範囲を超える内容であるので省略します。

静的モードとケース温度

従来、ジャンクション温度は、図 1 に示すように T_J と T_C の差が無視できる程度であるものとして、熱電対などを使用し、ケース温度を直接測定することによって推定されてきました。その基礎となる前提は、 P と θ_{CA} の値が小さいことです。 P 、 T_C 、 T_A を測定すれば、全体的な θ_{JA} を求めることができます。これは、EIA/JEDEC 規格 "Integrated Circuits Thermal Measurement Method—Electrical Test Method (Single Semiconductor Device)" (集積回路の熱測定法 - 電気テスト法 (単一半導体デバイス)) では、静的モード法と呼ばれています。

この方法では、熱電対の配置に細心の注意が求められるため、再現性のある結果が得られないことがあります。さらに、電力が増加するにつれて T_C と T_J が発散しやすくなります。近年、新しい ADC では、マルチ・チャンネル化やデジタル・シグナル・プロセッシング (DSP) ブロックなどデバイスが全体的に複雑さを増しているため、消費電力も増加し続けています。これらの新しい IC には低消費電力モードがないことがあるので、この方法を用いることはできません。

動的モードと温度感知パラメータ

最近のデバイスは、EIA/JEDEC 規格に概要を示す動的モード法に従っており、専用の温度計測装置 (TMU) を備えています。これらの特殊な回路は温度依存の電圧値などの温度感知パラメータ (TSP) を備え、ジャンクション温度や熱抵抗を推定するために使われます。

静的モード法では測定値を 1 つしか使わないのに対し、この方法では 2 つの測定値を使用します。システムは 1 つの定常状態から別の定常状態へ移行します。

$$P_1 - P_2 = \frac{T_{J1} - T_A}{\theta_{JA}} - \frac{T_{J2} - T_A}{\theta_{JA}} = \frac{T_{J1} - T_{J2}}{\theta_{JA}}$$

$$\Delta P = \frac{\Delta T_J}{\theta_{JA}}$$

規格の仮定を利用して、 T_J と TSP の関係が線形であることを示します。

$$T_J = KV_{TSP} + T_0$$

ここで、 V_{TSP} は TSP、 K は線形係数、 T_0 線形モデルの切片です。

以上から、温度解析は以下のように書き直すことができます。

$$\begin{aligned} \Delta P &= \frac{\Delta T_J}{\theta_{JA}} = \frac{T_{J1} - T_{J2}}{\theta_{JA}} = \frac{KV_{TSP1} + T_0 - KV_{TSP2} - T_0}{\theta_{JA}} \\ &= \frac{K(V_{TSP1} - V_{TSP2})}{\theta_{JA}} = \frac{K\Delta V_{TSP}}{\theta_{JA}} \end{aligned}$$

動的モード法を使用すれば、熱電対配置の問題と低消費電力モードがないという問題を直ちに緩和することができます。得られる結果は、より再現性が高く正確です。さらに、JEDEC 規格 "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" (単一経路を流れる熱流を使用して半導体デバイスの接合部・ケース間の熱抵抗を測定するためのトランジェント・デュアル・インターフェース・テスト法) に示す概要に従い、 θ_{JC} と、周囲環境の熱容量および熱抵抗を、組み込まれた TSP だけを使って測定することができます。

ただし、この解析は、TSP の特性評価に対するジャンクション温度の精度に依存します。つまり、 K を正確に推定する必要があります。規格では、このために低消費電力モードでの温度スイープを推奨しています。しかしこれは、静的モードを使わないこととした重大な理由の 1 つ、つまり低消費電力モードがないという事実と矛盾します。このアプリケーション・ノートではこの問題の解決策を述べますが、まず、一般によく使われる TMU について述べる必要があります。

ダイオードベースの温度計測装置 (TMU)

ほとんどの電氣的パラメータは、いかなる形にせよ温度に依存します。しかし実際には、ほとんどの場合、図 4 に示すように一定電流下でのダイオードの順方向電圧降下が TSP として使われます。

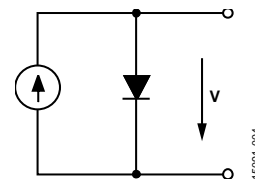


図 4. 1 個のダイオードに流れる一定電流

ほとんどの IC には、ピンに組み込まれた静電気放電 (ESD) 保護回路の形態で、すでにいくつかのダイオードが含まれています。ただし、通常の動作条件下でこれらをどのように利用できるかははっきりしません。代わりに TMU の心臓部に専用のダイオードが使われます。

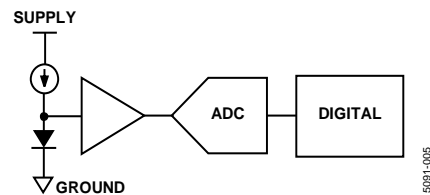


図 5. フル機能の温度計測装置ソリューション

フル機能の TMU ソリューションは、図 5 に示すように、電圧バッファ、ADC、デジタル・ロジックも備えています。この TMU ソリューションは、通常動作中に I²C、SPI、APB などのさまざまなインターフェースを介して、システムの他の部分の温度値を提供することもできます。リアルタイムの結果は、他の回路の動作を調整したり補正したりするために利用できます。しかし、このアプリケーション・ノートでは、ダイオード回路部分だけに焦点を当てます。

順方向電圧降下は、確立された温度依存性に従います。ダイオードに流れる電流は次式で表されます。

$$I = I_s(T) \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) = I_s(T) \left(e^{\frac{V \cdot q}{kT}} - 1 \right) \approx I_s(T) e^{\frac{V \cdot q}{kT}}$$

ここで、
 $I_s(T)$ は逆方向飽和電流、
 V は電圧降下、
 q は電子の単位電荷、
 k はボルツマン定数、
 T は温度です。

この式は一見単純そうに見え、電圧に基づいて温度を表したくなるかもしれませんが、逆方向飽和電流も温度に依存し、 T の理論的解析式ですら実用目的には複雑過ぎます。

しかも、全体像はさらに複雑です。TMU には、電流源や抵抗といった他の部品も必然的に含まれており、それらの部品も温度に依存している可能性があります。経験からすると、現在のシリコン・プロセス技術では、ダイオード接続されたトランジスタのベース抵抗やエミッタ抵抗を増やしただけで、数十度の誤差を招く可能性があります。

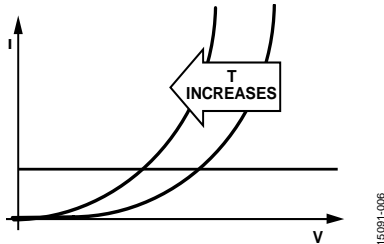


図 6. ダイオードの I-V 曲線 - 温度が上がると、所定の電流に対する順方向電圧降下が減少する

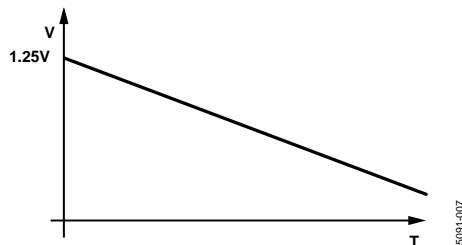


図 7. ダイオードの温度曲線 - 温度が上がると、所定の電流に対する順方向電圧降下が減少する

したがって、 T の正確な解析式を導くことは実質的に不可能です。温度と電圧の関係は、広範な特性評価を通じてしか明らかにすることができませんが、観察から 1 つの事実を導くことができます。すなわち、図 6 と図 7 に示すように、温度が上がると電圧が低下するという事です。これは絶対温度に対して相補的な (Complementary To Absolute Temperature: CTAT) 動作と呼ばれ、実質的には線形であると見なされます。なお、絶対零度 ($T = 0 \text{ K}$) では理想ダイオードの順方向電圧降下がシリコンのバンドギャップ電圧パラメータに等しくなり、約 1.25 V となります。

ただし、1 つのダイオードの特性を徹底的に評価したとしても、半導体デバイスの動作はデバイスごとに大きく異なる可能性があります。これは、制御できないプロセス変動によるものです。図 7 に示すような電圧と温度の理想的な線形関係の勾配は、サイズなどの物理的パラメータの変動が逆方向飽和電流に影響するため、ダイオードごとに異なる可能性があります。

この問題に対して考えられる解決策の 1 つを、図 8 の回路図に示します。2 つのダイオードの電圧降下を比較しますが、一方が他方より著しく大きいものとします (例えば $N = 20$ 倍)。これにより、同じ電流源を使用して、プロセスに依存しない TSP を得ることができます。プロセス変動の影響がランダムになることで、デバイスに依存しない T_j の推定を容易にすることができます。

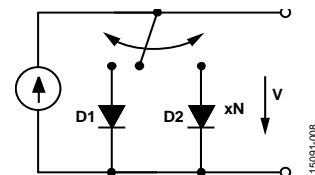


図 8. ダイオード・ペアに流れる一定電流

ダイオード 1 に流れる電流は次式で表されます。

$$I = I_1 \approx I_s(T) e^{\frac{V_1 \cdot q}{kT}}$$

ダイオード 2 に流れる電流は次式のとおりです。

$$I = I_2 \approx NI_s(T) e^{\frac{V_2 \cdot q}{kT}}$$

これらの式を使って T 点での電圧差を求めることができます。

$$V_{TSP} = V_2 - V_1 = \Delta V \approx \frac{kT}{q} \ln N$$

この値は、逆方向飽和電流やプロセス固有の特性には依存しません。

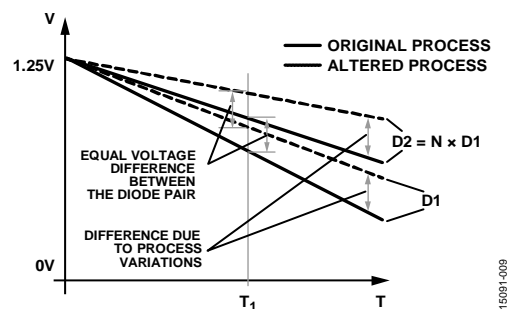


図 9. 所定の温度に対するダイオード・ペアの電圧差は、プロセス変動に関係なく等しい

図 9 は、ある温度 T_1 において任意のダイオード・ペアが取り得る電圧差を示していますが、2 つのダイオード間での電圧差は同じです。

最後に、逆方向飽和電流も 1 つのダイオードを使用して除去できますが、2 つの異なる電流源が必要です。この方法では、電流ミラーによって電流比を正確に設定できるので、さらに良好な結果を得ることができます。この場合の式は、ダイオード・ペアによる解決策の場合とまったく同じです。

温度と TSP の関係の確立

ダイオード電圧ベースの方法は有効なソリューションですが、低消費電力モードを持たないデバイスでは、ジャンクション温度と TSP の関係を評価する方法がないという大きな問題が残ります。また、TSP を任意のパラメータ（直接測定または導出による）にすることができるという点にも留意する必要があります。電圧値は一例として使用するに過ぎません。

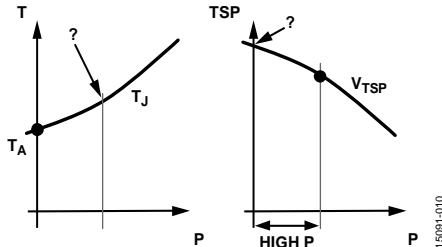


図 10. T_J と TSP の関係

図 10 は基本的な問題を明確に表しています。左の図はジャンクション温度が電力とともに上昇することを示していますが、分かるのは曲線上の 1 つのポイントだけ、つまり消費電力がゼロの場合の周囲温度です。右側の図は高電力状態の TSP を測定できることを示していますが、低電力やゼロ電力時の指示値は得られません。したがって、ジャンクション温度と TSP の両方が分かるシステム状態はありません。

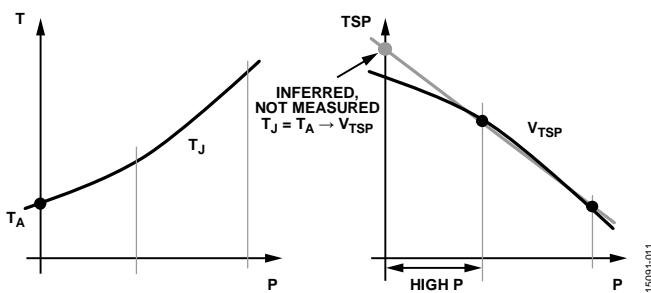


図 11. ゼロ電力における TSP の推定電圧レベル

この問題を解決するには、前に説明した EIA/JEDEC 規格の仮定を利用して、T_J と V_{TSP} の関係が線形であると仮定します。T_J = K V_{TSP} + T₀。このようにして DUT をいくつか（少なくとも 2 つ）の高電力状態に置くだけで、それらの点に合う線を推定することができます。図 11 の右側に示すように、この線は TSP を表す垂直軸と交わります。この点は、右の座標系のゼロ消費電力位置に相当します。しかし、左の座標系では、ゼロ消費電力における T_J は周囲温度に他なりません。したがって、これで関係が確立されたこととなります。

図 12 に示すように、このプロセスを、K と T₀ を近似するために異なる周囲温度に対して繰り返します。

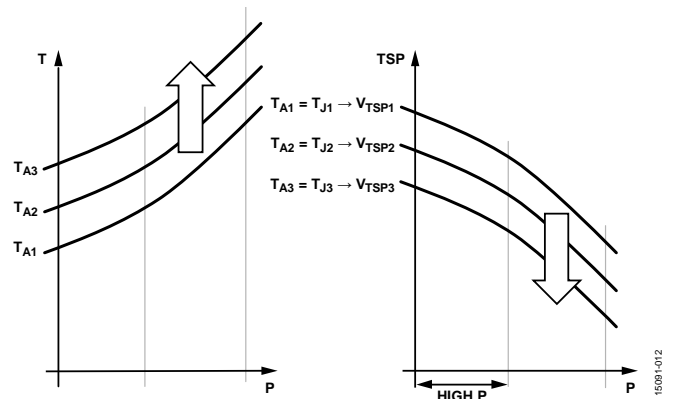


図 12. 異なる周囲温度に対する電圧-電力曲線の確立

結果

現在の最先端の高速 ADC をこの方法によって評価した場合の実測値を、図 13 に示します。デバイスは 9 種類の異なる電力モードに置きましたが、これらのうちのいくつかはオーバーラップしています。TSP はダイオード・ペアの順方向電圧の差に基づくもので、一方のダイオードのサイズは他方の 20 倍の V_{TSP} = ΔV です。

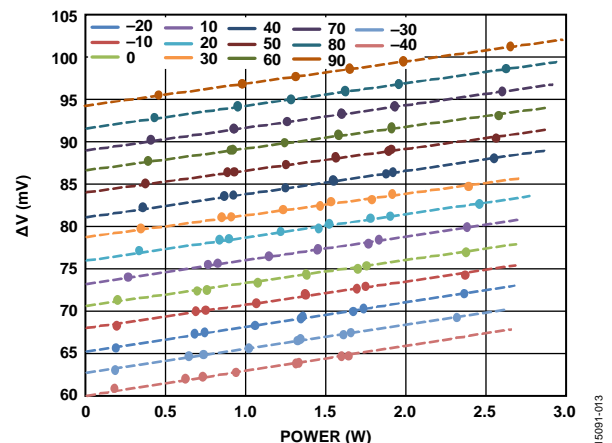


図 13. さまざまな周囲温度における電力対ダイオード・ペア・ベースの電圧差の曲線

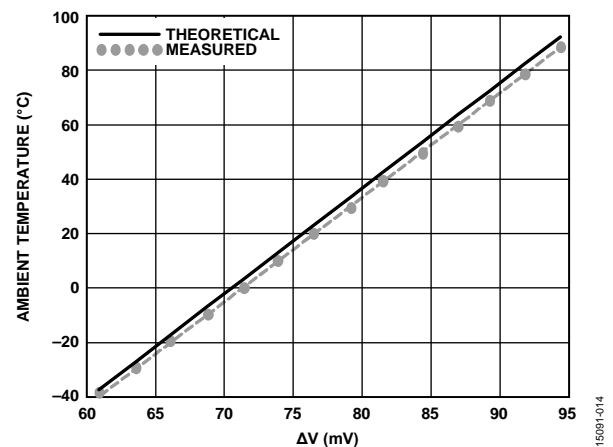


図 14. 特性 TSP と温度の関係

推定した切片に基づく TSP 特性を図 14 に示します。また、線形近似の結果を表 1 に示します。ダイオード・ペアに対する理論値も求められている点に留意してください。このため、測定値と理論値を比較することができます。

表 1. 線形近似に関する測定値と理論値の比較

Values	K (°C/mV)	T ₀ (°C)
Measured	3.836	-273.48
Theoretical	$3.874 \left(\approx \frac{q}{k \ln 20} \right)$	-273.15 (absolute zero)

実用的なセットアップ – 恒温槽モデル

T_J と TSP の関係の特性を評価するにあたって、周囲温度は重要な役割を果たします。さらに、データシートにおける DUT の特性評価は異なる周囲温度で行われているのが普通ですが、周囲温度ではなくジャンクション温度について行われている場合もあります。後者は PCB 設計に依存しませんが、前者は依存します。例えば、10 層の基板材料 Rogers Theta を使用して必要な熱性能を発揮するように設計された PCB は、約 10 K/W の熱抵抗を実現します (表 2 参照)。

表 2. 複数のデバイスとパッケージを組み合わせた場合の熱抵抗値

Product	Package	θ _{JA} (K/W)
AD9625	196-ball BGA	10.0
AD9684	196-ball BGA	9.0
AD9680	64-lead LFCSP	8.8
AD9691	88-lead LFCSP	9.5
AD6684	72-lead LFCSP	9.74

これらの結果を得るには、すべての層に、表面積が約 100 cm² の厚く切れ目のない全面銅箔 (グラウンドと電源) を設け、これをボード全体にわたりビアで接続する必要があります。特に、DUT の下層は、放熱の点で重要です。例えば、196 ボールの BGA パッケージには直径 8 mil のビアが 196 個あり、64 ピン LFCSP パッケージには 225 個のビアがあります。これらの推奨事項は電気的な検討結果と食い違うことがあり、実際のシステム設計に適さない可能性があります。その場合は、周囲温度が同じでも、ジャンクション温度が高くなる場合があります。

これらの事実を照らして、システム評価には、周囲環境を制御した状態でのテストを取り入れる必要があります。高精度なテストには工業用加熱炉やオイルベースの校正槽を使用しますが、これらのテストは非常に高くつくおそれがあります。より簡単な方法は、温度制御された空気を流入させる恒温槽を作ることです。特に考慮すべき点は、多くの既存製品の設計が、1 個以上のファンを持つシャーシを使用しているということです。これが一般的な方法であり、また、周囲温度が重要な役割を果たしているため、以下のセクションでは、空気の流入および流出機構を持つ、簡単な恒温槽のセットアップについて検討します。

ただし、例えば複雑な流体力学的解析を伴う厳密な熱解析は、このアプリケーション・ノートの範囲を超えるものだという点に留意してください。ここでは、先に定義した単純なモデルを、直観的に理解できる程度に改善するだけに止めます。

モデル

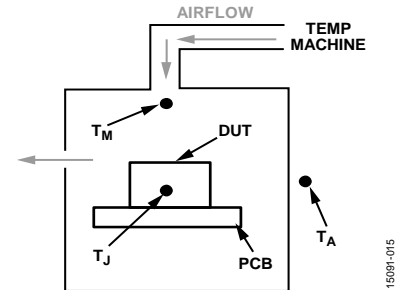


図 15. 閉環境での代表的な DUT セットアップのモデル

閉環境での代表的なセットアップを図 15 に示します。このセットアップでは、2つの経路の伝熱がモデル化されています。その1つが T_J と熱チャンバ恒温槽外側の周囲温度 T_A の間で、もう1つが T_J と温度装置 (一定した熱源として動作) によって設定された恒温槽内部の周囲温度 T_M の間です。

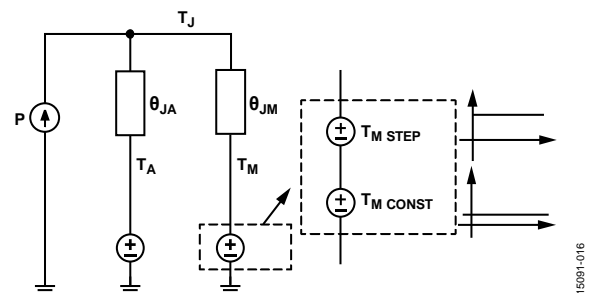


図 16. 図 15 に示すセットアップ内での熱交換を表す回路図

図 16 の回路図は熱エネルギーの伝達をモデル化したものです。なお、ステップ・インパルスによって行うシステム同定のために、さらに電源を分けることは有効です。ここに示すような線形モデルの場合、線形重ね合わせを行えば、T_M を元々の定常温度に等しい一定値とステップ値に分割することができます。この値は、温度装置を周囲温度と異なる値に設定した場合、ゼロ以外の値となります。

熱抵抗は 2 つの経路の伝熱を表します。電源は DUT によって消費される電力を表します。

$$T_J = \theta \left(P + \frac{1}{\theta_{JM}} T_M + \frac{1}{\theta_{JA}} T_A \right)$$

ここで θ は等価熱抵抗で、次式で定義されます。

$$\theta = \frac{\theta_{JM} \theta_{JA}}{\theta_{JM} + \theta_{JA}}$$

しかし、消費電力とジャンクション温度は相互に影響し合う可能性があり、その結果電力値が一定せず、関係が非線形になる場合があることに留意してください。

例えば図 17 は、AD6684 高速 ADC の電力とジャンクション温度の代表的な関係を示しています。

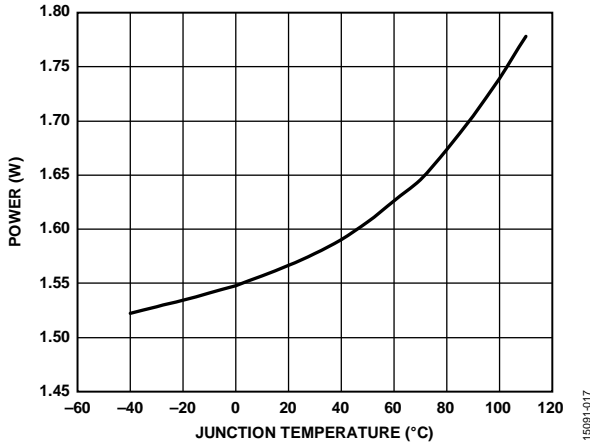


図 17. ジャンクション温度対電力

曲線の各部分は、次式により線形近似できます。

$$P = \alpha T_J + P_0$$

ここで、

α は線形係数、

P_0 は線形モデルの切片です。

これはシステム方程式を複雑にします。

$$T_J = \frac{\theta}{1 - \alpha\theta} \left(P_0 + \frac{1}{\theta_{JM}} T_M + \frac{1}{\theta_{JA}} T_A \right)$$

計算

モデル内の未知数は θ_{JM} と θ_{JA} の 2 つだけです。したがって、このシステムは 2 つの測定を行うだけで解くことができます。

新しい変数 A は、 T_M と T_1 の勾配として定義できます。

$$A = \frac{T_{M2} - T_{M1}}{T_{J2} - T_{J1}}$$

同様に、次の値は既知です。

$$\alpha = \frac{P_2 - P_1}{T_{J2} - T_{J1}}$$

$$P_0 = P_1 - \alpha T_{J1} = P_2 - \alpha T_{J2}$$

これから、 θ_{JM} は次のように定義できます。

$$\theta_{JM} = \frac{(T_{M1} - T_A) - A(T_{J1} - T_A)}{\alpha(T_{J1} - T_A) - P_1}$$

表 3. 恒温槽温度テストの結果

Material	Airflow (SCFM)	T_{M1} (°C)	T_{M2} (°C)	T_{J1} (°C)	T_{J2} (°C)	P_1 (W)	P_2 (W)	θ_{JA} (K/W)	θ_{JM} (K/W)
Styrofoam	8	25	120	45.4	120.5	1.67	1.94	50.1	16.1
	12	25	120	46.6	128.9	1.67	1.98	73.9	15.8
Acrylic	8	25	120	41.7	108.8	1.74	1.98	30.2	14.1

さらに、 θ_{JA} は、 θ_{JM} に基づいて次のように定義できます。

$$\theta_{JA} = \frac{1}{\alpha + \frac{1}{\theta_{JM}}}$$

結果

図 16 に示すモデルには熱容量がありません。したがって、過渡動作は検討しておらず、定常状態だけに限定されています。これらは、ステップ応答におけるシステムの最初の状態と最後の状態です。また、ここに示した結果は、基本的かつ直観的な概要を示すためのものだという点にも留意する必要があります。これらは、単純な熱抵抗ベースのモデルの制限を示すためのものに過ぎません。

テストは、異なる材料（発泡スチロールとアクリルガラス）で作った容積約 6000 cm³ の恒温槽を使った、2 つの異なる AD6684 セットアップで行いました。アクリルガラスは取り扱いが容易で、シャーシを迅速に試作するために広く使われています。発泡スチロールは空気を多く含む良好な断熱材です。さらに、テストは異なる空気流量で行いました（図 18 を参照）。テストの結果と計算で求めた熱抵抗を表 3 に示します。

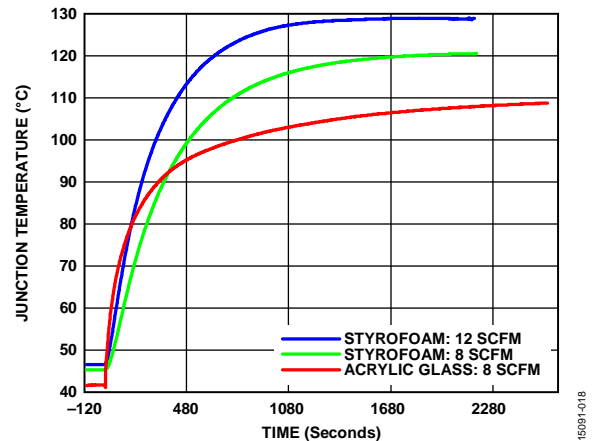


図 18. T_M のステップ時間対ジャンクション温度

ジャンクション温度のテスト結果は、各モデルの曲線で表されています。発泡スチロールの場合はジャンクション温度がより高い値に達していますが、これは発泡スチロールによる DUT とその周辺環境の断熱効果が高く、比較的低い周囲温度の影響を受けていないためです。電力値は多少の差を示しており、これはセットアップごとに異なります。しかし、電力の取り込み量が大きくても、アクリル恒温槽では、同じ高いジャンクション温度に達していません。発泡スチロールは良好な断熱材なので、接合部-周囲間の熱抵抗 θ_{JA} も、部分的にモデルと一致しています。しかし、空気流量はこの値に大きく影響し、このモデルには、対流（空気流ベース）ではなく、伝導による熱伝達を念頭に置いたことによる弱点も見られます。

最後に、接合部-温度装置間の熱抵抗 θ_{JM} は、表 2 に示す値と明らかに異なります。表 2 では、10 K/W 以下の熱抵抗が可能であることが示されていますが、表 3 では、接合部とその直近の周囲空気との間の抵抗が、はるかに大きくなっています。この差は、業界で一般的に使われている線形モデルの欠点を示しています。放熱を改善することにより熱抵抗は低下することが見込まれますが、恒温槽内の空気の流れが最適化されていないので、このモデルは意図せぬ影響や予測不能な影響を受けています。

参考文献

Electronic Industries Association Engineering Department, "Integrated Circuits Thermal Measurement Method—Electrical Test Method (Single Semiconductor Device)". EIA/JEDEC Standard EIA/JESD51-1, Dec. 1995.

JEDEC Solid State Technology Association. "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". JEDEC Standard JESD51-14, Nov. 2010.