



AN-1604 アプリケーション・ノート

LFCSP パッケージおよびフランジ・パッケージに收容された RF アンプの温度管理計算 著者 : Eamon Nash

はじめに

無線周波数 (RF) アンプは、リード・フレーム・チップ・スケール・パッケージ (LFCSP) またはフランジ・パッケージに收容し、技術の確立したリフロー・ハンダ処理プロセスを用いてプリント回路基板 (PCB) に実装した状態で使用することができます。PCB はデバイス間の電氣的接続を実現するために機能するだけでなく、パッケージ下面の金属スラグを使用してアンプから熱を逃がすための主要経路としても機能します。

本アプリケーション・ノートでは、熱抵抗の概念について述べ、LFCSP パッケージやフランジ・パッケージに收容された代表的な RF アンプの、ダイからヒート・シンクまでの熱流をモデル化する手法を説明します。

目次

はじめに.....	1	デバイスと PCB を合わせた環境での熱モデル.....	5
改訂履歴.....	2	システムの熱抵抗の計算.....	6
熱の概念の復習.....	3	熱抵抗の例：HMC408LP3 評価用ボード.....	6
熱流.....	3	消費電力の計算.....	8
熱抵抗.....	3	信頼性.....	9
温度.....	3	まとめ.....	10
デバイスの熱抵抗.....	4		
最大ジャンクション温度.....	4		
動作温度範囲.....	4		

改訂履歴

8/2019—Revision 0: Initial Version

熱の概念の復習

熱流

材料間で温度差がある場合、高温領域から低温領域に向けて熱が流れます。このプロセスは、回路の高電位側から低電位側に電流が流れるプロセスと同様のものです。

熱抵抗

すべての材料は、ある程度の熱を伝導します。熱伝導率は、材料の熱を伝導する能力を示す標準的な尺度です。熱伝導率の値は、通常、メートル・ケルビン当たりのワット数 (W/mK) またはインチ・ケルビン当たりのワット数 (W/inK) を単位として指定されます。材料の熱伝導率がわかると、材料のその体積での熱抵抗 (θ) が、 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ または K/W を単位として次のように計算できます。

$$\theta = \frac{\text{Length}}{k \times \text{Area}} \quad (1)$$

ここで、

Length はメートルを単位とする材料の長さまたは厚さ。

k は材料の熱伝導率。

Area は m^2 を単位とする断面積。

温度

熱流は電流に例えるアナロジーを使用すると、熱抵抗とそこを流れる熱流がある材料の温度差は、次のようになります。

$$\Delta T = Q \times \theta \quad (2)$$

ここで、

ΔT は材料に発生する温度差 (K または $^{\circ}\text{C}$) 。

Q は熱の流れ (W) 。

θ は材料の熱抵抗 ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$ または K/W) 。

デバイスの熱抵抗

デバイスの熱抵抗は複合的で、多くの場合温度に対し非線形になります。そのため、デバイスの熱モデルは、有限要素解析を使用して創り出されます。動作中のデバイスのジャンクション温度とパッケージの温度は、赤外線写真技術を利用して求めます。このような分析と測定に基づき、等価熱抵抗が求められます。等価熱抵抗は、デバイスを測定する特定の条件下で有効で、この条件は通常、最大動作温度です。

代表的な RF アンプの絶対最大定格については、表 1 を参照してください。

表 1. 代表的な RF アンプの絶対最大定格

Parameter	Rating
Drain Bias Voltage (V_{DD})	60 V dc
Gate Bias Voltage (V_{GG1})	-8 V to 0 V dc
Radio Frequency (RF) Input Power (RFIN)	35 dBm
Continuous Power Dissipation (P_{DISS}) ($T = 85^{\circ}\text{C}$) (Derate 636 mW/ $^{\circ}\text{C}$ Above 85 $^{\circ}\text{C}$)	89.4 W
Thermal Resistance, Junction to Back of Paddle (θ_{JC})	1.57 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$
Temperature Range	
Storage	-55 $^{\circ}\text{C}$ to +150 $^{\circ}\text{C}$
Operating	-40 $^{\circ}\text{C}$ to +85 $^{\circ}\text{C}$
Junction Temperature (T_J) to Maintain 1,000,000 Hour Mean Time to Failure (MTTF)	225 $^{\circ}\text{C}$
Nominal Junction Temperature ($T_{CASE} = 85^{\circ}\text{C}$, $V_{DD} = 50\text{ V}$)	187 $^{\circ}\text{C}$

LFCSPP パッケージとフランジ・パッケージについては、パッケージのケースをパッケージ下面の金属スラグとみなします。

最大ジャンクション温度

与えられたデータシートの最大ジャンクション温度は、製品ごとの絶対最大定格表で仕様規定され、デバイスの半導体プロセスによって異なります。表 1 では、1,000,000 時間の MTTF を維持する最大ジャンクション温度は 225 $^{\circ}\text{C}$ と仕様規定されています。この仕様温度は、窒化ガリウム (GaN) デバイスでは典型的な温度です。この限界値を超えると、デバイスの寿命は短くなり、デバイスの故障が早まることになります。

動作温度範囲

デバイスの動作温度 (T_{CASE}) は、パッケージの基部で仕様規定されます。すなわち、 T_{CASE} は、パッケージ下部の金属スラグの温度になります。動作温度は、デバイス周囲の温度とは異なります。

T_{CASE} と P_{DISS} がわかれば、ジャンクション温度 (T_J) は容易に求めることができます。例えば、 T_{CASE} が 75 $^{\circ}\text{C}$ で、 P_{DISS} が 70 ワットの場合、 T_J は次式を用いて計算できます。

$$\begin{aligned} T_J &= T_{CASE} + (\theta_{JC} \times P_{DISS}) \\ &= 75^{\circ}\text{C} + (1.57^{\circ}\text{C}/\text{W} \times 70\text{W}) \\ &= 184.9^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

T_J は、デバイスの信頼性を考慮すると最も重要な仕様で、決してこれを超えてはいけません。対照的に、 P_{DISS} を下げることによって T_J を最大許容レベル以下に維持できるのであれば、 T_{CASE} は仕様規定された絶対最大定格を超えることも可能です。ディレーティング仕様 (この場合は 636mW/ $^{\circ}\text{C}$) を使用すると、ケース温度が仕様規定された最大レベル (85 $^{\circ}\text{C}$) を超える場合の最大許容 P_{DISS} を計算できます。例えば、表 1 のデータを使用すると、 P_{DISS} を 83W に制限すれば、95 $^{\circ}\text{C}$ の T_{CASE} を許容できます。この P_{DISS} は次式を用いて計算されます。

$$\begin{aligned} P_{DISS} &= 89.4\text{W} - (636\text{mW}/^{\circ}\text{C} \times 10^{\circ}\text{C}) \\ &= 83\text{W} \end{aligned}$$

次式を用いて計算すると、この P_{DISS} の値から、ジャンクション温度は 225 $^{\circ}\text{C}$ となります。

$$\begin{aligned} T_J &= T_{CASE} + (\theta_{JC} \times P_{DISS}) \\ &= 95^{\circ}\text{C} + (1.57^{\circ}\text{C}/\text{W} \times 83\text{W}) \end{aligned} \quad (3)$$

デバイスと PCB を合わせた環境での熱モデル

デバイス周りの熱環境を完全に理解するには、デバイスの熱経路と材料をモデル化することが必要です。図 1 に、PCB とヒート・シンクにマウントされた LFCSP パッケージの断面図を示します。この例では、熱はダイで発生し、パッケージと PCB を通じてヒート・シンクに伝搬しています。デバイスのジャンクション温度を求めるには、熱抵抗を計算する必要があります。熱抵抗と熱流を組み合わせると、ジャンクション温度が計算できます。そして、デバイスが高い信頼性で動作するかどうかを判定するため、このジャンクション温度を仕様規定された最高ジャンクション温度と比較します。

図 1 では、デバイスのジャンクションからヒート・シンクに至る熱経路が、次のように定義されています。

- θ_{JA} は、デバイスのジャンクションからパッケージ上部周辺の空気までの熱抵抗。
- θ_{JC} は、ジャンクションからケース（パッケージ下部の金属スラグ）までの熱抵抗。
- θ_{SN63} は、ハンダの熱抵抗。
- θ_{CU} は、PCB 上の銅めっきの熱抵抗。
- θ_{VIACU} は、ビア・スルー・ホール（VIA）の銅めっきの熱抵抗。
- $\theta_{VIASN63}$ は、ビア・スルー・ホールを充填するハンダの熱抵抗。
- θ_{PCB} は、PCB 積層材料の熱抵抗。

通常の回路基板では、複数のビア・ホールや PCB 層があります。システムの熱抵抗の計算のセクションでは、熱回路を用いて各熱抵抗を計算し、直列熱抵抗と並列熱抵抗を組み合わせ、デバイスの全体的な熱抵抗を求めます。

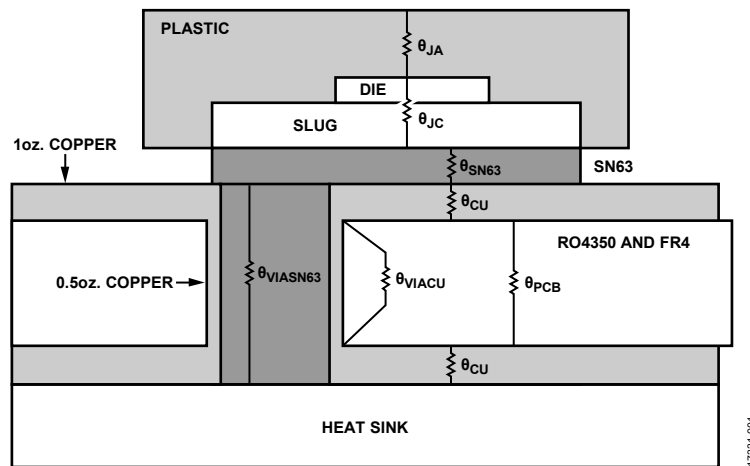


図 1. PCB およびヒート・シンク上にマウントした LFCSP パッケージの熱モデル

システムの熱抵抗の計算

それぞれの熱経路の熱抵抗を、式 1 を用いて計算します。各熱抵抗を求めるには、その材料の熱伝導率を知る必要があります。PCB アセンブリで一般的に用いられる材料の熱抵抗については、表 2 を参照してください。

表 2. 一般的な PCB 材料の熱伝導率

Material	Thermal Conductivity (W/inK)
Copper (Cu)	10.008
Aluminum (Al)	5.499
Rogers 4350 (RO4350)	0.016
FR4 or G-10 Laminate	0.008
Alumina (Al ₂ O ₃)	0.701
SN63 Solder	1.270
Thermally Conductive Epoxy	0.020
Gallium Arsenide (GaAs)	1.501
Plastic Mold Compound	0.019

図 1 の熱モデルに基づく等価熱回路を、図 2 に示します。T_{PKG} は、パッケージ基部の温度、T_{SINK} は、ヒート・シンクの温度です。図 2 において、パッケージ周辺の温度 (T_A) は一定と仮定しています。実際のアセンブリでは、閉じた空間にあるため、T_A は電力の消費と共に増加する可能性があります。金属スラグを備えた LFCSP パッケージやフランジ・パッケージでは、θ_{JA} は θ_{JC} より十分大きいので、この解析においては周辺温度への熱経路は無視しています。

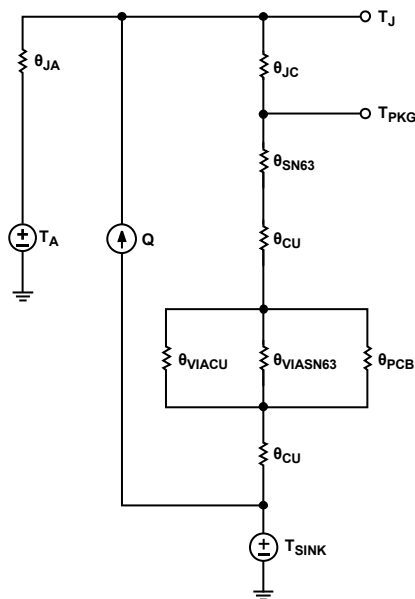


図 2. 等価熱回路

熱抵抗の例：HMC408LP3 評価用ボード

HMC408LP3 パワー・アンプは、Rogers RO4350 積層材料で構成された、厚さが 0.010 インチの評価用ボードを使用しています。図 3 に示したグラウンド・パッドのレイアウトは、面積が 0.065 インチ× 0.065 インチで、直径 0.012 インチのビア・ホールが 5 個あります。この回路基板の上面と下面のめっきは、1 オンスの銅 (厚さ 0.0014 インチ) です。ビア・ホールは、1/2 オンスの銅 (厚さ 0.0007 インチ) でめっきされています。アセンブリの間にビア・ホールは SN63 ハンダで充填されます。解析によると、熱流はほぼすべて、ビア・ホールを充填するハンダを介して流れます。そのため、回路基板レイアウトのその他の部分については、この解析では省略します。

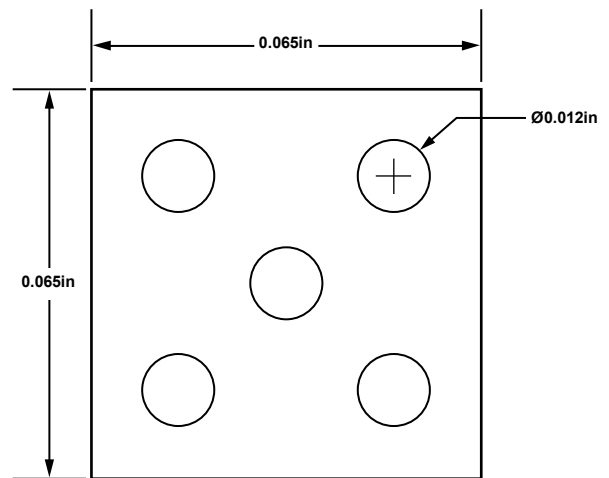


図 3. グラウンド・パッドのレイアウト

それぞれの熱抵抗を、式 1 を用いて計算します。θ_{SN63} を計算するには、SN63 ハンダの熱伝導率を 1.27W/inK、長さ (ハンダ接合の厚さ) を 0.002 インチ、面積を 0.004225 平方インチ (0.065 インチ× 0.065 インチ) とします。

$$\theta_{SN63} = \frac{0.002}{1.27 \times 0.004225} = 0.32^{\circ}\text{C/W} \quad (4)$$

次に PCB の上部の銅めっきについて同様に計算します。銅の熱伝導率は 10.008W/inK、長さは 0.0014 インチ (1 オンスの銅)、面積は 0.00366 平方インチ (in²) です。

$$\theta_{CU} = \frac{0.0014}{10.008 \times 0.00366} = 0.038^\circ\text{C/W} \quad (5)$$

ビア・ホール銅めっきの面積は次式で計算できます。

$$Area = \pi \times (r_o^2 - r_i^2) \quad (6)$$

ここで、
 r_o は、外径。
 r_i は、内径。

外径が 0.006 インチ、内径が 0.0053 インチとすると、面積は 0.00002485in² となります。ビアの長さは、基板の厚さ (0.010 インチ) で、銅の熱伝導率は 10.008W/inK です。

$$\theta_{VIACU} = \frac{0.010}{10.008 \times 0.00002485} = 40.23^\circ\text{C/W} \quad (7)$$

5 個のビアが並列に配置されているので、抵抗はこれを 5 で割った値になります。そのため、 $\theta_{VIACU} = 8.05^\circ\text{C/W}$ となります。

ビアを充填するハンダについても同様に計算できます。

$$\theta_{VIASN63} = \frac{0.010}{1.27 \times 0.0000882} = 89.27^\circ\text{C/W} \quad (8)$$

充填されたビアは 5 個あるので、等価熱抵抗は、 $\theta_{VIASN63} = 17.85^\circ\text{C/W}$ となります。

次に、PCB 材料の熱抵抗を、長さ 0.010 インチ、Rogers RO4350 の熱伝導率 0.016W/inK、面積 0.00366in² として計算します。

$$\theta_{PCB} = \frac{0.010}{0.016 \times 0.00366} = 170.7^\circ\text{C/W} \quad (9)$$

図 2 の等価熱回路から、3 つの熱抵抗 (θ_{PCB} 、 θ_{VIACU} 、 $\theta_{VIASN63}$) を並列にした場合、 5.37°C/W となります。ビアをハンダで充填することで、熱抵抗は、 8.05°C/W から 5.37°C/W に減少します。最後に、熱抵抗の直列成分を加えると、PCB アセンブリ全体の熱抵抗は次のようになります。

$$\theta_{ASSY} = \theta_{SN63} + \theta_{CU} + \theta_{EQUIV} + \theta_{CU} = 0.372 + 0.038 + 5.37 + 0.038 = 5.81^\circ\text{C/W} \quad (10)$$

ここで、 θ_{ASSY} は、アセンブリの熱抵抗です。

消費電力の計算

熱抵抗値を求めた後は、熱流 (Q) を求める必要があります。RF デバイスの場合、Q の値は、デバイスに入力される合計電力とデバイスが出力する合計電力の差になります。合計電力には RF 電力と DC 電力が含まれます。

$$Q = P_{INTOTAL} - P_{OUTTOTAL} = (P_{INRF} + P_{INDC}) - P_{OUTRF} \quad (11)$$

ここで、

$P_{INTOTAL}$ は、DC 電力と RF 入力電力の合計。

$P_{OUTTOTAL}$ は、デバイスが出力する電力で、 P_{OUTRF} と同じ。

P_{INRF} は、RF 入力電力。

P_{INDC} は、DC 入力電力。

P_{OUTRF} は、負荷に印加される RF 出力電力。

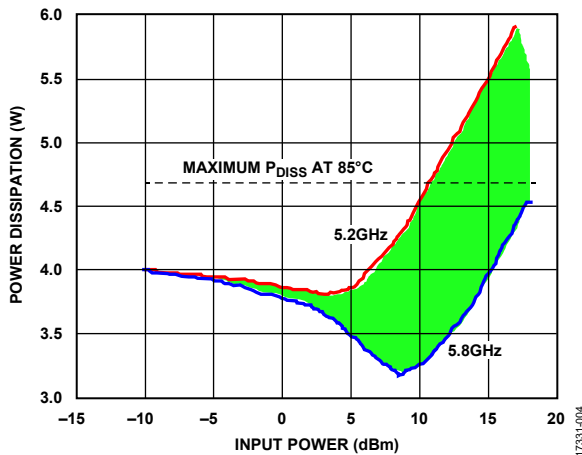


図 4. HMC408LP3 の消費電力と入力電力の関係。

HMC408LP3 パワー・アンプの場合、式 11 を使用すると、図 4 に示した P_{DISS} を計算できます。アンプの次のような特徴が図 4 に示されています。

- RF 入力信号がない場合、デバイスはおよそ 4W の電力を消費する。
- RF 信号が印加された場合の P_{DISS} は、周波数によって異なる。
- デバイスの消費電力が最小となる入力電力がある。

等価熱抵抗 θ_{TOTAL} と Q から、ジャンクション温度は次式を用いて計算できます。

$$\Delta T = Q \times \theta_{TOTAL} \quad (12)$$

$$\theta_{TOTAL} = \theta_{ASSY} + \theta_{JC} = 5.81 + 13.79 = 19.6^{\circ}\text{C}/\text{W} \quad (13)$$

RF 入力電力のない静止条件では、 $Q = 4\text{W}$ なので、

$$\Delta T = 4.0 \times 19.6 = 78.4^{\circ}\text{C} \quad (14)$$

HMC408LP3 の最高ジャンクション温度の仕様規定値は 150°C であるため、 P_{DISS} が 4W の場合、ヒート・シンクの温度は 71.6°C 以下 (すなわち、 $78.4^{\circ}\text{C} + 71.6^{\circ}\text{C} = 150^{\circ}\text{C}$) である必要があります。

HMC408LP3 パワー・アンプが通常動作している (例えば、入力パワーが 5dBm 以下) 場合、消費電力は 4W を下回るため、ヒート・シンクの温度は 71.6°C をわずかに超えても許容できることが示唆されます。ただし、入力パワーが 15dBm で圧縮が大きいような状況でアンプが動作する場合は、 P_{DISS} が増加するため、ヒート・シンクは 71.6°C より低い温度となる必要があります。

表 3. 熱ワークシート

Description	Value	Unit	Comments
Heat Sink Maximum Temperature	70	$^{\circ}\text{C}$	
θ_{ASSY}	5.81	$^{\circ}\text{C}/\text{W}$	Calculated from equivalent thermal circuit
θ_{JC}	13.79	$^{\circ}\text{C}/\text{W}$	From data sheet
θ_{TOTAL}	19.6	$^{\circ}\text{C}/\text{W}$	Add θ_{ASSY} and θ_{JC}
Q	4.0	W	
Resulting Junction Temperature	148.4	$^{\circ}\text{C}$	Heat sink maximum temperature + ($\theta_{TOTAL} \times Q$); do not exceed maximum channel temperature listed in data sheet

信頼性

部品の予想寿命は動作温度に大きく依存します。最高ジャンクション温度より低い温度で動作すると、デバイスの寿命は長くなりますが、最高ジャンクション温度を上回ると寿命は短くな

ります。そのため、熱解析を行うことで、予想される動作条件の下で仕様規定された最高ジャンクション温度を超えないようにする必要があります。

まとめ

ジャンクションからケースまでの熱抵抗が小さい LFCSP パッケージやフランジ・パッケージに収容された表面実装 RF パワー・アンプでは、PCB がデバイス間の RF 用配線としてだけでなく、パワー・アンプからの熱を外部に逃がす主要な熱経路としての役割も果たします。

その結果、LFCSP パッケージやフランジ・パッケージの熱抵抗の主要な指標として、 θ_{JC} が θ_{JA} に置き換わります。

こうした計算の最も重要な指標は、RF アンプのジャンクションまたはチャンネルの温度 (T_J) です。最高ジャンクション温度を超えない限り、 T_{CASE} など、その他の公称制限値を超えることは可能です。