

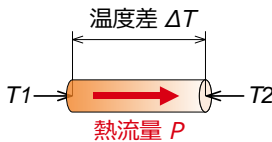
熱設計（基礎編）

# 熱抵抗と放熱の基本

電子機器の設計では小型化、高効率化、電磁両立性(EMC)対応、熱対策が課題になっています。熱は部品や機器の性能や信頼性、そして安全性に関わるので以前から重要検討事項の1つです。このアプリケーションノートでは、電子機器で使われるICやトランジスタなどの半導体部品を前提にした熱抵抗と放熱の基本について記載しています。

## 熱抵抗とは

熱抵抗とは、熱の伝わりにくさを数値化したものです。任意の2点間の温度差を、2点間を流れる熱流量(単位時間に流れる熱量)で割った値になります。熱抵抗が高ければ熱が伝わりにくく、低ければ伝わりやすいことを意味します。



$$\text{熱抵抗 } R_{th} = \frac{T1 - T2}{\text{熱流量 } P} = \frac{\text{温度差 } \Delta T}{\text{熱流量 } P} \quad [^{\circ}\text{C}/\text{W}]$$

電気抵抗の記号は R が使われていますが、熱抵抗はθ (シータ)が使われています。半導体部品の分野で規格の標準化を行っている業界団体 JEDEC (半導体技術協会 Joint Electron Device Engineering Council) では、集積回路の熱測定規格 JESD51 の中で、θ<sub>XX</sub> または R<sub>θXX</sub> (ギリシャ文字が使えない場合は、Theta-XX) を使うように標準化しています。なお、XX の部分には任意の2点間の記号が入ります。例えば上図の場合は、θ<sub>T1T2</sub>、R<sub>θT1T2</sub>、Theta-T1T2 のようになります。

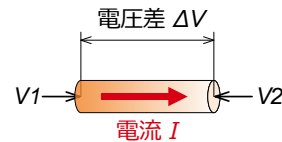
また、あらゆる電気、電子、関連技術の国際規格を策定して公開するグローバル組織である IEC (国際電気標準会議 International Electrotechnical Commission) では、半導体ディスクリートデバイス規格 EN 60747-15 の中で、R<sub>th</sub> が使われています。

これらの関係により、ROHM のデータシートでは、IC はθを、ディスクリートデバイスは R<sub>th</sub> を使用しています (一部例外あり)。

熱抵抗の単位は K/W または °C/W です(Kはケルビン)。Kと°Cでは絶対温度は違いますが(0 K = -273.15 °C)、相対温度として扱うときは同じです(K = °C)。

## 熱のオームの法則

熱抵抗は電気抵抗と同じように考えることができ、熱計算の基本式はオームの法則と同じように取り扱うことができます。下図にオームの法則を図と式で表します。それぞれの変数が熱と電気で置き換えられることが判ります。



$$\text{電気抵抗 } R = \frac{V1 - V2}{\text{電流 } I} = \frac{\text{電圧差 } \Delta V}{\text{電流 } I} \quad [V/A]$$

したがって、電位差 ΔV を R×I で求めるように、温度差ΔTを R<sub>th</sub>×P で求めることができます。

これらの関係をまとめると下表のようになります。

電気	電圧差 ΔV(V)	電気抵抗 R(Ω)	電流 I(A)
熱	温度差 ΔT(°C)	熱抵抗 R <sub>th</sub> (°C/W)	熱流量 P(W)

電気	ΔV = R × I	R = $\frac{\Delta V}{I}$	I = $\frac{\Delta V}{R}$
熱	ΔT = R <sub>th</sub> × P	R <sub>th</sub> = $\frac{\Delta T}{P}$	P = $\frac{\Delta T}{R_{th}}$

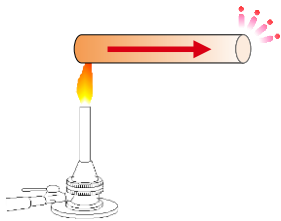
### 伝熱と放熱経路

熱は、物体や空間を伝わります。伝わるということは、熱エネルギーがある場所から別の場所へ移動することを意味します。

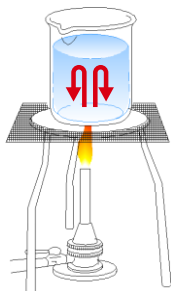
### 伝熱の 3 形態

伝熱には、熱伝導、対流(熱伝達)、熱放射の 3 つの形態があります。

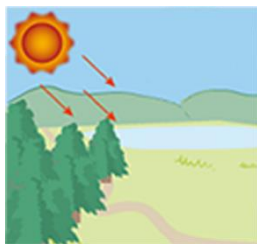
- ・熱伝導：同一物体内で、物質を構成する分子の運動によって、温度が高いところから低いところへ熱が移動する現象で、物質の移動は伴いません。



- ・対流(熱伝達)：固体表面とこれに触れる空気や水などの流体との間に温度差があるとき、流体の流れによって熱が移動する現象。対流は熱伝導に比べて多くの熱を伝えることが可能です。

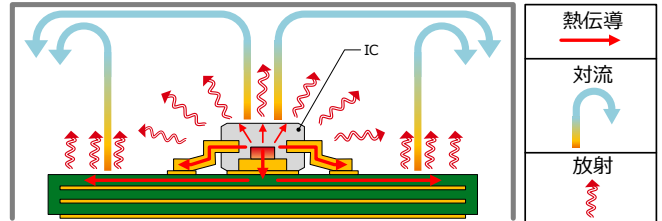


- ・熱放射：物体表面から温度に応じた波長の電磁波が放出されます。空間を伝わって伝達先の物体に当たり、電磁波の振動エネルギーで伝達先の物体表面分子が振動することで熱が移動し物体の温度が変化する現象。熱放射は物体間に熱を伝える媒体がなくても(真空中でも)熱の移動が起こります。そのため周囲の空気の温度も変化しません。

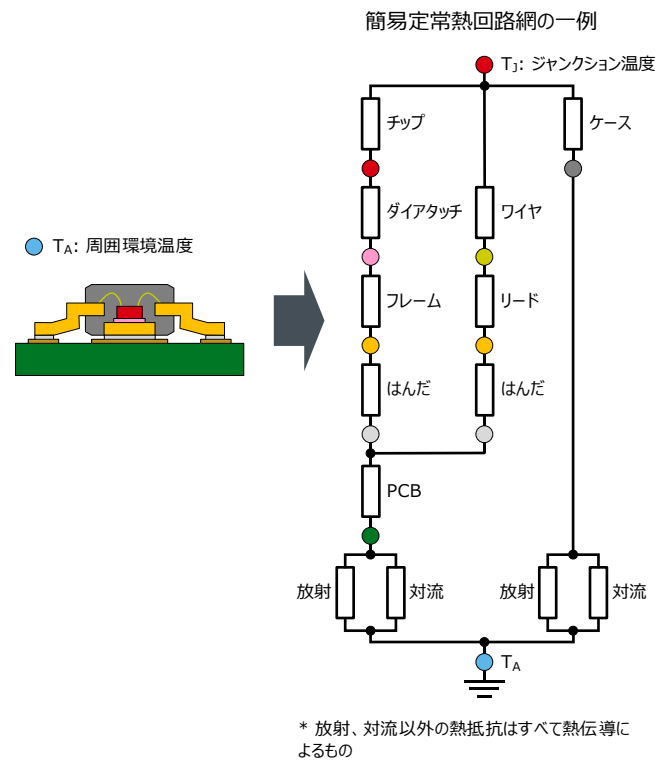


### 放熱経路

発生した熱は、伝導、放射、対流により、様々な経路を経て外気に逃げて行きます。ここでは、プリント基板(PCB)に実装された IC を例に説明します。



発熱源は IC のチップ(Die)です。その熱がダイアタッチ(ダイボンディング)、リードフレーム、ケース(パッケージ)、プリント基板に伝導します。その熱はプリント基板や IC パッケージ表面から対流、放射により大気に伝わります。これを抵抗素子の回路網で表すと以下ようになります。



上図左側の IC 断面図の各部の色は、回路網の円の色、例えばチップは赤のように一致しています。チップのジャンクション温度  $T_j$  は回路網に示した熱抵抗を通して周囲環境温度  $T_A$  に至ります。

放熱経路は、チップからダイアタッチ、フレームを介して裏面放熱パッド(Exposed Pad)に伝導し、そして PCB の銅箔ランド上のはんだを介して PCB に伝導します。さらに、その熱は PCB からの対流と放射により大気( $T_A$ )に伝わります。

他の経路としては、チップからボンディングワイヤを介してリードフレーム、そして PCB に伝わり対流、放射する経路と、チップからパッケージを通じて大気へ対流、放射する経路があります。

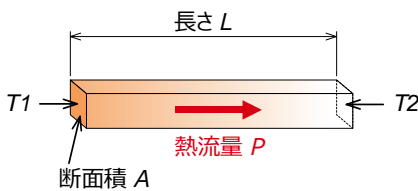
この経路の熱抵抗と IC の電力損失が判れば、前述の熱抵抗の式を使って温度差、この場合は  $T_J$  と  $T_A$  間の差が計算できます。

熱設計とは、ここで示したようなそれぞれの熱抵抗を低減する、つまり、チップから大気までの放熱経路の熱抵抗を低減して行くことです。それにより、 $T_J$  は低下し信頼性が向上します。

ここからは、それぞれの熱抵抗を小さくするために必要な基本式について説明します。

### 熱伝導による熱抵抗

熱伝導による熱抵抗を以下のイメージ図と式で示します。



温度差  $(T_1 - T_2) = \text{熱抵抗 } R_{th} \times \text{熱流量 } P$

$$\text{熱抵抗 } R_{th} = \frac{\text{長さ } L}{\text{熱伝導率 } \lambda \times \text{断面積 } A}$$

図は、断面積  $A$ 、長さ  $L$  の物体の一端の温度  $T_1$  が伝導により反対側の端へ移動し、温度  $T_2$  になったことを表しています。

最初の式は、最初に出てきた熱抵抗の式で、 $T_1$  と  $T_2$  の温度差は、熱抵抗  $R_{th}$  に熱流量  $P$  を掛けた値になることを示しています。

最後の式は  $R_{th}$  を物体のパラメータで表したものです。

図および式の各項からすぐに想像できたと思いますが、熱伝導による熱抵抗は、導体のシート抵抗と基本的に同じ考え方ができます。シート抵抗は熱伝導率を抵抗率に置き換えた式で求められます。抵抗率が導体の材料により固有の値を持つように、熱伝導率も材料固有の値になります。

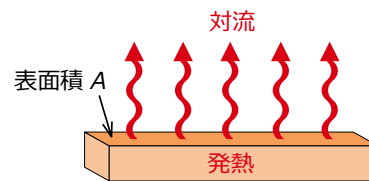
$R_{th}$  の式より、熱伝導による熱抵抗を低くするためには、物体の断面積を大きくするか、長さを短くするか、熱伝導率が大い材料を選択する必要があります。

### 対流(熱伝達)による熱抵抗

対流にはいくつか種類があり、用語も含めてその定義を示します。

流体	気体、液体などの流れるもの
対流	熱を受け取った流体が移動することによって熱を運ぶ熱移動現象 ※流体がない状態(真空)では対流による熱移動は期待できない
自然対流	流体の温度差で発生する上昇流のこと
強制対流	ファンやポンプなどの外部的な要因によって発生する流れのこと

流体による熱抵抗を以下のイメージ図と式で示します。



$(\text{表面温度} - \text{流体温度}) = \text{熱抵抗 } R_{th} \times \text{熱流量 } P$

$$\text{熱抵抗 } R_{th} = \frac{1}{\text{対流熱伝達率 } hm \times \text{表面積 } A}$$

対流熱伝達率  $hm$

$$\text{自然対流 } hm = 2.51 \times C \times \left(\frac{\Delta T}{L}\right)^{0.25} \quad [W/m^2K]$$

$C$ : 係数 (形状と設置条件による)

$\Delta T$ : 温度差  $[^\circ C]$

$L$ : 代表長さ  $[m]$

$$\text{強制対流 層流 } hm = 3.86 \times \left(\frac{V}{L}\right)^{0.5} \quad [W/m^2K]$$

$$\text{強制対流 乱流 } hm = 6 \times \left(\frac{V}{L^{0.25}}\right)^{0.8} \quad [W/m^2K]$$

$V$ : 風速  $[m/s]$

$L$ : 代表長さ  $[m]$

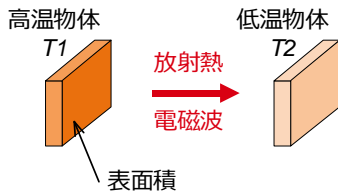
対流による熱抵抗は、対流熱伝達率  $hm$  と発熱する物体の表面積  $A$  の積の逆数になります。式から、物体の表面積が大きくなると、対流の熱抵抗が低くなることが判ります。

対流熱伝達率  $hm$  は、対流の種類によって異なります。自然対流では、温度差が大きいほど対流が促進され熱抵抗が低くなります。強制対流では、風速が速いほど熱抵抗が低くなることが判ります。

### 熱放射による熱抵抗

熱放射は、分子を介して熱移動する熱伝導や対流(熱伝達)とはメカニズムが異なります。これは物体や流体がない真空中でも熱移動ができます。

熱放射による熱抵抗を以下のイメージ図と式で示します。



温度差  $(T1 - T2) = \text{熱抵抗 } R_{th} \times \text{熱流量 } P$

$$R_{th} = \frac{1}{\text{放射熱伝達率} \times \text{表面積}}$$

$$\text{放射熱伝達率} = \sigma \times \text{放射率} \varepsilon \times (T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)$$

$\sigma$ : ステファン・ボルツマン定数  $5.67 \times 10^{-8} [W/m^2K^4]$

放射率  $\varepsilon$ : 材料表面の放射率 0~1

熱放射による熱抵抗は、放射熱伝達率と発熱体の表面積の積の逆数になります。式から物体の表面積、温度、放射率が熱放射の熱抵抗に影響を与えます。

$R_{th}$  の式より、熱放射による熱抵抗を低くするためには、物体の表面積を大きくするか、放射率が大きい材料を選択する必要があります。

材料	放射率
磨かれた アルミホイール	0.05
アルミナ	0.78
磨かれた 銅	0.03
酸化した 銅プレート	0.78
磨かれた 鋳鉄	0.21
酸化した 鋳鉄	0.57
磨かれた 真ちゅう	0.04
酸化した 真ちゅう	0.60
樹脂	0.79-0.83
ゴム	0.86-0.92
塗装 つや消し白	0.91
塗装 つや消し黒	0.88
塗装 光沢黒	0.90

出典 : Emissivity of Solids, Heat Exchanger Design Handbook, ISBN: 978-1-56700-423-6

熱伝熱 3 形態である熱伝導、対流(熱伝達)、熱放射における各熱抵抗の式を示してきました。いずれも基本式から、熱抵抗を低くするための手がかりが得られるので、各パラメータの関連性を確認してください。

### まとめ

最後に伝熱 3 形態の熱抵抗算出式と、熱抵抗を低くする手段をまとめます。

**伝導熱抵抗**

$$R_{th} = \frac{\text{長さ}}{\text{熱伝導率} \times \text{断面積}}$$

熱抵抗を低くするには :

- ・物体の断面積を大きくする。
- ・物体の長さを短くする。
- ・熱伝導率が大きな材料を選択する。

**対流熱抵抗**

$$R_{th} = \frac{1}{\text{対流熱伝達率} \times \text{表面積}}$$

熱抵抗を低くするには :

- ・物体の表面積を大きくする。
- ・自然対流では温度差が大きくなるように配置を考える。
- ・強制対流では風速を速くする。

**放射熱抵抗**

$$R_{th} = \frac{1}{\text{放射熱伝達率} \times \text{表面積}}$$

熱抵抗を低くするには :

- ・物体の表面積を大きくする。
- ・放射率が大きい材料を選択する。

## 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/>