

パワーMOSFET 熱設計と 放熱器への取り付け

概要

本資料はパワーMOSFET の熱設計と放熱器への取り付けについて述べたものです。

目次

概要	1
目次	2
1. 熱設計と放熱器への取り付け	3
1.1. 最大許容損失と放熱等価回路	3
1.2. チャネル部温度のパルス応答	4
1.3. 放熱器への取り付け	10
製品取り扱い上のお願い.....	12

1. 熱設計と放熱器への取り付け

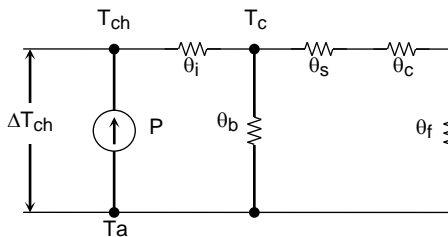
1.1. 最大許容損失と放熱等価回路

パワーMOSFETの最大許容損失 ($P_D(\max)$) は、回路の熱平衡状態が保たれている場合、パワーMOSFETが使用される周囲 (外気) 温度 (T_a) とパワーMOSFETの最大チャンネル部温度 ($T_{ch}(\max)$) および、これから述べる放熱条件によって決まるチャンネルから周囲 (外気) までの全熱抵抗 $R_{th(ch-a)}$ を用いて (1) 式で表すことができます。

$$P_D(\max)(T_a) = \frac{T_{ch}(\max) - T_a}{R_{th(ch-a)}} \quad \dots (1)$$

熱の移動を電流に置き換えると、熱が外部に伝導される経路は電気回路で表すことができます。MOSFETチャンネル部から外気への熱伝導は、この回路から、熱抵抗と熱容量で決まります。

図 1.1 は、熱的に定常な状態における放熱等価回路です。



- θ_i : 内部熱抵抗 (チャンネル部から外圍器まで)
- θ_b : 外部熱抵抗 (外圍器から直接外気まで)
- θ_s : 絶縁板熱抵抗
- θ_c : 接触熱抵抗 (放熱器と接触部での)
- θ_f : 放熱器熱抵抗

図 1.1 放熱等価回路

チャンネル部から外気までの全熱抵抗 $R_{th(ch-a)}$ は、図 8.1 の等価回路から (2) 式で与えられます。

$$R_{th(ch-a)} = \theta_i + \frac{\theta_b(\theta_s + \theta_c + \theta_f)}{\theta_b + \theta_s + \theta_c + \theta_f} \quad \dots (2)$$

放熱器を使用しないパッケージの場合、 $R_{th(ch-a)}$ は (3) 式となります。

$$R_{th(ch-a)} = \theta_i + \theta_b \quad \dots (3)$$

上記パッケージのパワーMOSFETのカatalogなどでは、 $T_a = 25^\circ\text{C}$ の最大許容損失が記載されていますが、特に指定しない限り、(3) 式で与えられた $R_{th(ch-a)}$ と $T_{ch}(\max)$ によって、次式で与えられる値を示しています。

$$P_D(\max)(T_a = 25^\circ\text{C}) = \frac{T_{ch}(\max) - 25}{R_{th(ch-a)}}$$

ケースから外気への熱抵抗 θ_b はケースの材質および形状により異なりますが、一般に熱抵抗 θ_b は θ_i 、 θ_c 、 θ_s 、 θ_f に比べて相当大きな値ですので、放熱器を取り付けるパッケージでは、実用上 (2) 式を簡略化した (4) 式を使います。

$$R_{th(ch-a)} = \theta_i + \theta_s + \theta_c + \theta_f \quad \dots (4)$$

直流損失を扱う場合、(4) 式を用いて定格を満足する放熱設計はできますが、パルス回路などにパワーMOSFETを使用する場合は、 T_{ch} のピーク値が $T_{ch}(\max)$ を超えないよう十分注意する必要があります。

1.2. チャンネル部温度のプルズ応答

一般にパワー-MOSFET の熱インピーダンスは、図 1.2 のような分布定数回路で与えられます。

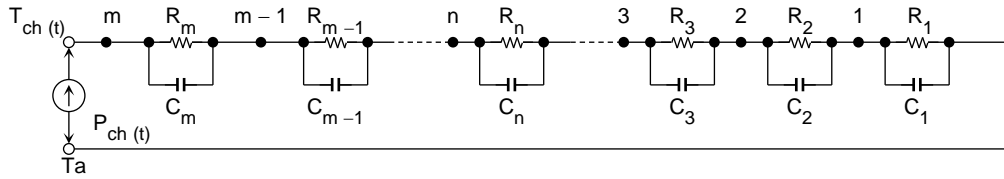


図 1.2 パワー-MOSFET の熱インピーダンス

図 1.2 の回路に図 1.3 のプルズ(パワー $P_{ch}(t)$)が印加された場合、熱的安定状態における m 番目の CR 並列回路に現れる温度変化 $T_{ch}(t)$ は次式で与えられます。

- ① $P_{ch}(t) = P_0$ の領域では、

$$T_{ch}(t) = \sum_{n=1}^m (P_0 R_n - T_n(\min)) \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{C_n R_n}\right) \right\} + T_n(\min) \quad \dots (5)$$

- ② $P_{ch}(t) = 0$ の領域では、

$$T_{ch}(t) = \sum_{n=1}^m T_n(\max) \cdot \exp\left(-\frac{t}{C_n R_n}\right) \quad \dots (6)$$

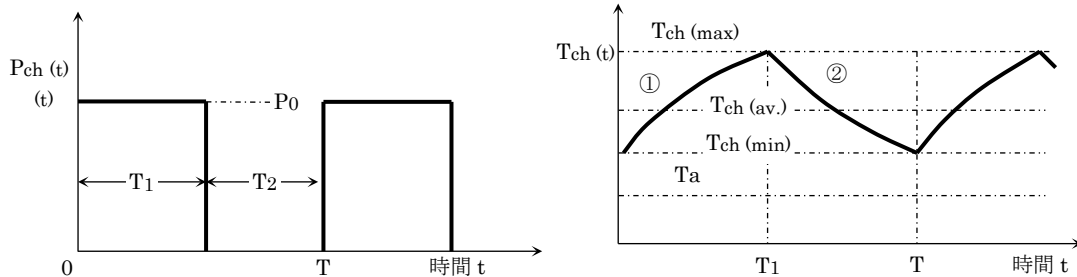


図 1.3 プルズが印加された場合の温度変化

通常のパワー-MOSFET では $n = 4$ 程度を考慮することにより、ほぼ実際の値に近似することができますが、 C, R の値が明確でない場合は T_{ch} の値を算出することは困難です。そこで、一般的には下記のように過渡熱抵抗を使用して T_{chpeak} を推定します。

図 1.4 に過渡熱抵抗特性の代表例を掲載しています。単発方形波プルズ (プルズ幅 T_1 、ピーク値 P_0) が印加された場合、プルズ幅 T_1 に対する過渡熱抵抗 $r_{th}(T_1)$ を求め、 T_{chpeak} は、(7) 式で与えられます。

$$T_{chpeak} = r_{th}(T_1) \cdot P_0 + T_a \quad (7)$$

図 1.3 のような周期 T の連続プルズが印加された場合、熱的安定状態において T_{chpeak} は (8) 式で与えられます。

$$T_{chpeak} = P_0 \left[\frac{T_1}{T} R_{th(ch-a)} + \left(1 - \frac{T_1}{T} \right) \cdot r_{th}(T + T_1) - r_{th}(T) + r_{th}(T_1) \right] + T_a \quad \dots (8)$$

プルズ回路の放熱設計においては (8) 式の T_{chpeak} がパワー-MOSFET の $T_{ch}(\max)$ を超えないよう十分注意する必要があります。

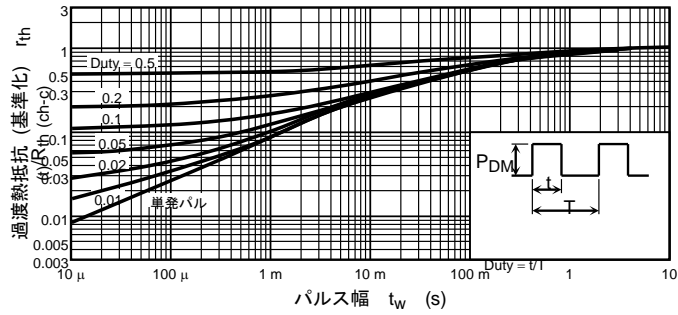


図 1.4 過渡熱抵抗特性

以上の解析では方形波を扱いましたが、実際にパワー-MOSFET を機器に応用する場合、 $P_{ch}(t)$ は方形波でないときがあります。

そのような場合は、損失波形を図 1.5 のように方形波に近似し、(8) 式により T_{chpeak} を算出することができます。

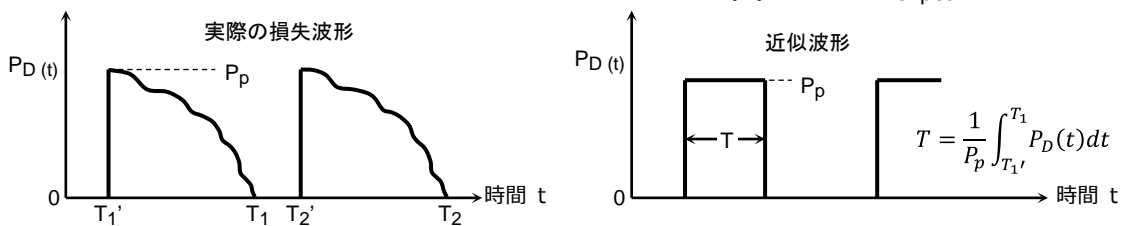


図 1.5 損失波形の近似

パルス波形を方形波パルスに変換する場合、正確には積分しなければなりません、変換しようとする波形がほぼ正弦波や三角波の場合は下記のような近似をする場合があります。

図 1.6 における(a)、(b)は波高値を $0.7P_D$ としてパルス幅を $0.91t$, $0.71t$ とします。(面積が同一)

(c)、(d)の場合はピーク電力を同一でパルス幅を $0.63t$, $t/2$ で近似した例です。(面積が同一)

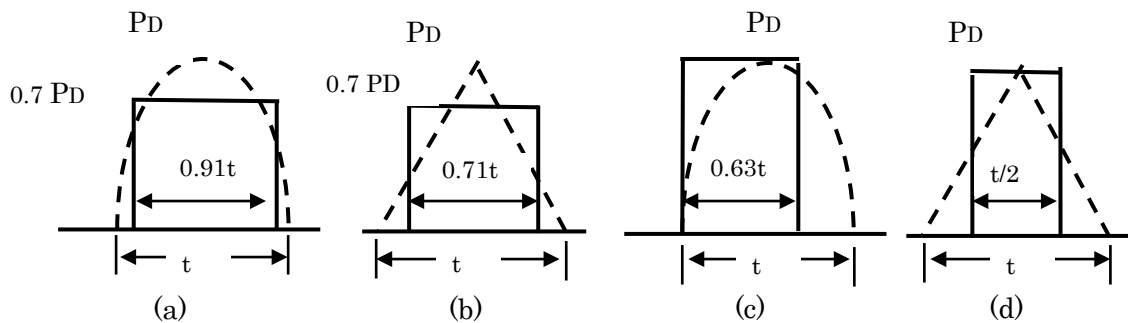
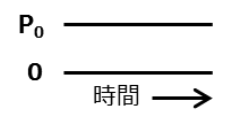
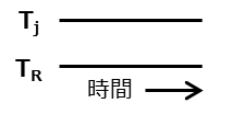
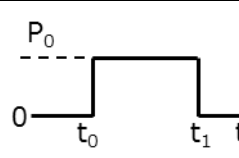
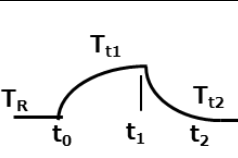
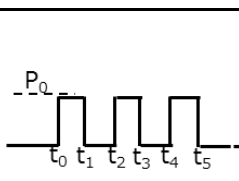
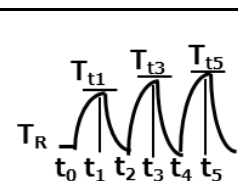
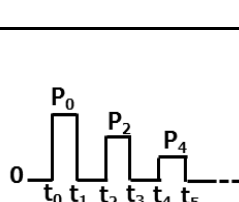
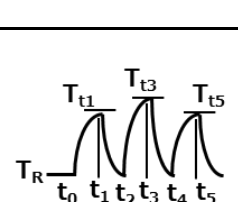
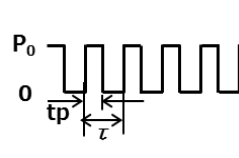
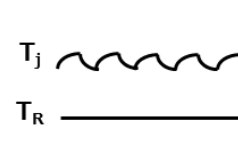
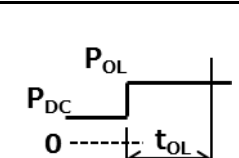
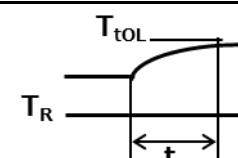
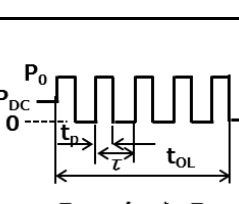
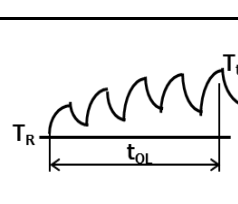


図 1.6 近似波形

表 1.1 温度上昇計算式

電力印加パターン	接合部での電力損失波形	接合部温度上昇の波形 (T_R = 基準温度)	接合部温度と電力損失に対する解 R_{th} = 定常状態の熱抵抗、 $r_{th}(t_1)$ = 時間 t_1 での過渡熱インピーダンス $r_{th}(t_2-t_1)$ = 時間 (t_2-t_1) での過渡熱インピーダンス
(a) 連続負荷			$T_j - T_R = P_0 R_{th}$ $P_0 = (T_j - T_R) / R_{th}$
(b) 単一パルス負荷			$T_{t1} - T_R = P_0 r_{th}(t_1)$ $T_{t2} - T_R = P_0 [r_{th}(t_2) - r_{th}(t_2-t_1)]$ $P_0 = (T_{t1} - T_R) / r_{th}(t_1)$
(c) 短いパルス列負荷 (等振幅)			$T_{t1} - T_R = P_0 r_{th}(t_1)$ $T_{t3} - T_R = P_0 [r_{th}(t_3) - r_{th}(t_3-t_1) + r_{th}(t_3-t_2)]$ $T_{t5} - T_R = P_0 [r_{th}(t_5) - r_{th}(t_5-t_1) + r_{th}(t_5-t_2) - r_{th}(t_5-t_3) + r_{th}(t_5-t_4)]$
(d) 振幅の等しくないパルス列負荷			$T_{t1} - T_R = P_0 r_{th}(t_1)$ $T_{t3} - T_R = P_0 r_{th}(t_3) - P_0 r_{th}(t_3-t_1) + P_2 r_{th}(t_3-t_2)$ $T_{t5} - T_R = P_0 r_{th}(t_5) - P_0 r_{th}(t_5-t_1) + P_2 r_{th}(t_5-t_2) - P_2 r_{th}(t_5-t_3) + P_4 r_{th}(t_5-t_4)$
(e) 等振幅の長いパルス列負荷 (近似解)			$T_j - T_R = P_0 [(t_p R_{th} / \tau) + (1 - t_p / \tau) r_{th}(\tau + t_p) - r_{th}(\tau) + r_{th}(t_p)]$ $P_0 = (T_j - T_R) / [(t_p R_{th} / \tau) + (1 - t_p / \tau) r_{th}(\tau + t_p) - r_{th}(\tau) + r_{th}(t_p)]$
(f) 連続電力印加に続く過負荷 (非パルス状)			$T_{tOL} - T_R = P_{DC} R_{th} + (P_{OL} - P_{DC}) r_{th}(t_{OL})$ $P_{OL} = [(T_{tOL} - T_R - P_{DC} R_{th}) / r_{th}(t_{OL})] + P_{DC}$
(g) 連続電力印加に続く過負荷 (パルス状) (近似解)			$T_{OL} - T_R = P_{DC} R_{th} + P_0 [(t_p / \tau - P_{DC} / P_0) r_{th}(t_{OL}) + (1 - t_p / \tau) r_{th}(\tau + t_p) - r_{th}(\tau) + r_{th}(t_p)]$ $P_0 = [T_{OL} - T_R - P_{DC} \{R_{th} - r_{th}(t_{OL})\}] / [(t_p / \tau) r_{th}(t_{OL}) + (1 - t_p / \tau) r_{th}(\tau + t_p) - r_{th}(\tau) + r_{th}(t_p)]$

「計算方法の例」

計算に必要なデータとしては、ドレイン・ソース間電圧波形、ドレイン電流波形、周囲温度、放熱器の熱抵抗データおよび動作条件です。このデータをもとに (8) 式よりチャネル温度を算出することができます。算出した温度が、定格 ($T_{ch(max)}$) 内であれば、使用可能と判断できます。

ここで、スイッチング電源などで見られる連続動作による代表波形をもとに、具体的な計算例を示します。

<代表波形> 使用デバイス (放熱器なし)

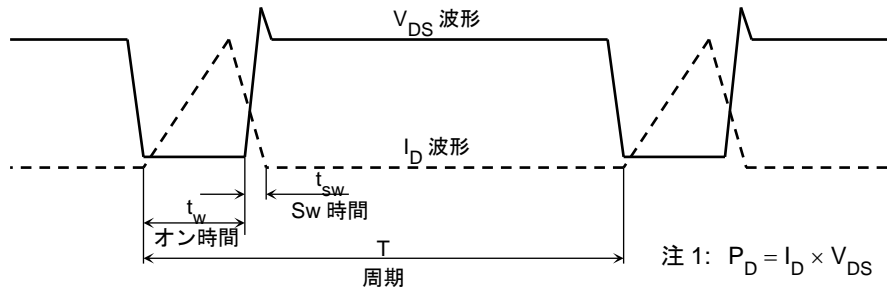


図 1.7 デバイス使用代表波形

上記波形の電力損失 (注 1) を方形波近似し、(8) 式を利用してチャネル温度を算出します。上記の波形より求めた損失波形と、その波形から方形波近似したものを次に記載します。(図 1.8)

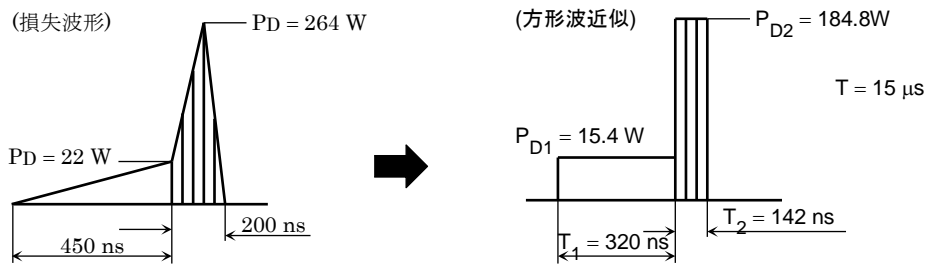


図 1.8 方形波近似波形

図 1.3 のような規則的な繰り返し方形波が印加された場合は、(8) 式を用いてチャネル温度上昇のピークを計算しますが、上述のような複数の方形波が周期的に印加された場合は、別途にモデルを考えて計算式を適応する必要があります。

モデルを組む際は、電力損失の平均値に、それをを超える部分を 2 サイクル程度合わせるものとして電力損失を取り扱います。従って、上記の方形波の場合は、図 1.9 のような近似モデルを用いて計算します。

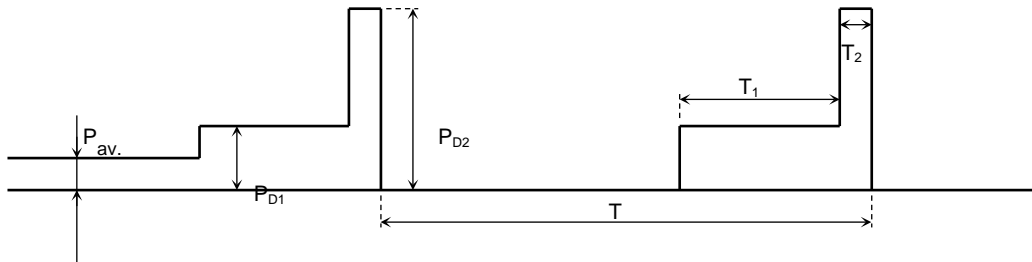


図 1.9 電力損失モデル

$$P_{av.} = \frac{1}{T} \int_0^T (P_{D1} + P_{D2}) dt = \frac{1}{T} (T_1 P_{D1} + T_2 P_{D2})$$

計算は平均電力損失 P_{av} を無限時間印加した後、繰り返し波形を2サイクル印加したとして、下記のように行います。

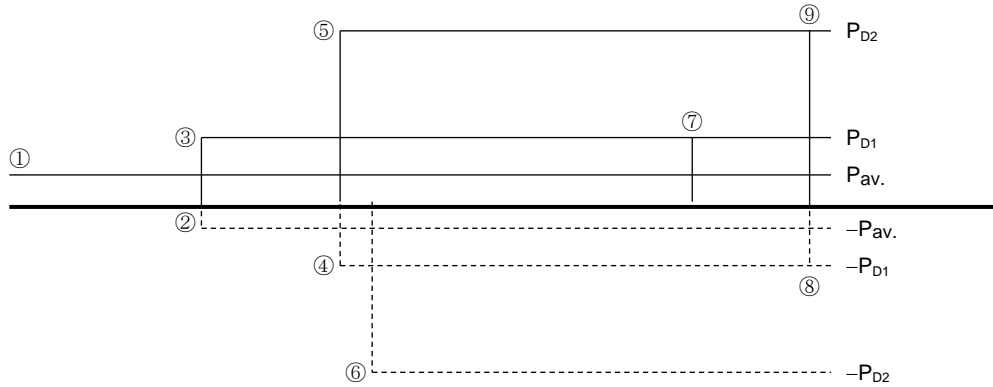


図 1.10 重ね合わせる各波形と時間の関係

$$\begin{aligned}
 \Delta T_{ch(peak)} = & \underbrace{P_{av.}}_{①} \times R_{th(ch-a)} - \underbrace{P_{av.}}_{②} \times r_{th}(T + T_1 + T_2) + \underbrace{P_{D1}}_{③} \times r_{th}(T + T_1 + T_2) \\
 & - \underbrace{P_{D1}}_{④} \times r_{th}(T + T_2) + \underbrace{P_{D2}}_{⑤} \times r_{th}(T + T_2) - \underbrace{P_{D2}}_{⑥} \times r_{th}(T) + \underbrace{P_{D1}}_{⑦} \times r_{th}(T_1 + T_2) \\
 & - \underbrace{P_{D1}}_{⑧} \times r_{th}(T_2) + \underbrace{P_{D2}}_{⑨} \times r_{th}(T_2) \quad \dots (9)
 \end{aligned}$$

チャネル温度の算出には (9) 式にもありますように、 $R_{th(ch-a)}$ 、 $r_{th}(t)$ の熱抵抗が必要となります。

$r_{th}(t)$ の値： 個別技術資料に記載してある過渡熱抵抗グラフより求めた値を使用してください。

なお、個別技術資料に値が記載されていないパルスの短い範囲は、次の式により求められます。

$$r_{th}(t) = r_{th}(T) \times \sqrt{\frac{t}{T}}$$

T : 過渡熱抵抗グラフにおける最少記載時間

$r_{th}(T)$: 時間 T における過渡熱抵抗

図 1.1 の放熱等価回路における熱抵抗は、それぞれ次のように説明されます。

(1) チャネル部・ケース間熱抵抗 (内部熱抵抗) θ_i

パワーMOSFET チャネル部からケース外囲器までの内部熱抵抗 θ_i は、パワーMOSFET の構造、材料、組み立て方、ケース材料などで決まるもので、パワーMOSFET 固有の熱抵抗です。

この値を実測するためには、パワーMOSFET のケース温度を一定に冷却した状態にすることが必要です。

ケース温度を一定値 $T_c = 25^\circ\text{C}$ に冷却して動作させた場合、パワーMOSFET に許容される最大損失 $P_D(\text{max})$ は、(10) 式で与えられます。

$$P_D(\text{max}) = \frac{T_{ch(\text{max})} - T_c}{\theta_i} = \frac{T_{ch(\text{max})} - 25}{\theta_i} \quad \dots (10)$$

パワーMOSFET のカタログなどでは基準点温度が 25°C (例 : $T_c = 25^\circ\text{C}$) のときの最大許容ドレイン損失が記載されています。

注記：チャネル・ケース間の熱抵抗の記号は $R_{th(ch-c)}$ としてもよい。

(2) 接触熱抵抗 θ_c

接触熱抵抗 θ_c は、パワーMOSFET のケースと放熱器接触面の接触状態により決まり、接触面の平坦度、粗さ、接触面積、締め付け方に大きく影響されます。例えば接触面にシリコングリスを塗布すると、接触面の粗さや平坦度の影響を小さくできます。しかし、放熱器を取り付けることを前提にしていないパワーMOSFET（SMD タイプ等）においては、放熱器を用いるときの取り付け方によっては接触熱抵抗も相当大きなものになります。

(3) 絶縁板熱抵抗 θ_s

パワーMOSFET と放熱器を絶縁する必要があるときは、パワーMOSFET と放熱器との間に絶縁物を用いなければなりません。

この絶縁物による熱抵抗 θ_s は絶縁物の材質と厚さ、面積により決まり、無視できない値となります。

(4) 放熱器熱抵抗 θ_f

放熱器の熱抵抗は、放熱器表面より外気へ逃げる熱の経路の分布定数的熱抵抗と考えることができます。また、放熱器の熱抵抗は、その表面積、材質、形状、外気の状態等により決定されます。

図 1.11 は放熱器の中央にパワーMOSFET を 1 個取り付け、放熱器を垂直位置にしたときの熱抵抗の実測値です。

最近では、放熱器メーカーが種々の放熱器を発表していますので、実際使用する場合は、これらのデータを参考にする と便利です。

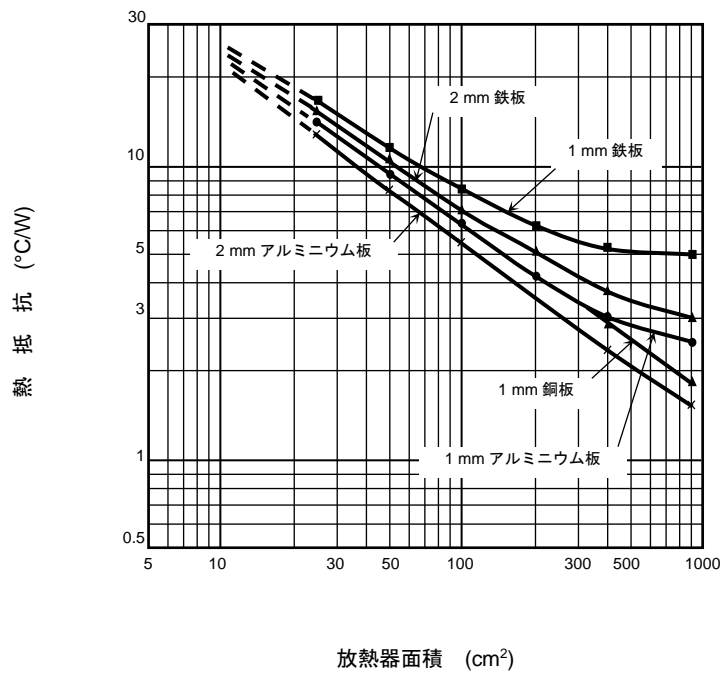


図 1.11 放熱器面積と熱抵抗 (θ_f)

1.3. 放熱器への取り付け

放熱器にバリや凹凸があったり、取り付け面の大きさや締め付けトルクが適切でない場合などは素子に歪みを与え、ペレットや樹脂の破壊、樹脂とフレームの密着性劣化などが発生しますので、以下の注意事項に従った放熱板の取り付けをお勧めします。

(1) 放熱器の平坦度

放熱器のデバイスを取り付ける面は十分滑らかでなければいけません。放熱器の反りや凹凸が大きかったり、プレスバリや切削クズなどの異物がはさまれたりすると、極端な場合にはデバイスを破壊させることがあります。このような問題を防ぐため、放熱器のパワーMOSFET との取り付け面平坦度は、50 μm 以下としてください。

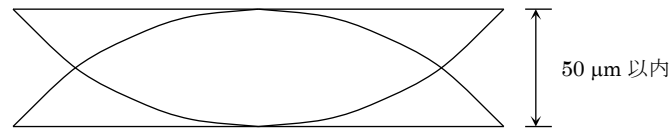


図 1.12 放熱器反り

(2) 取り付け穴

放熱器の取り付け穴部分のプレス抜型ダレは 50 μm 以下とし、取り付け穴も必要以上に大きく空けないようにしてください。やむを得ず取り付け穴部のダレおよび穴径が大きめの場合、必ず角ワッシャを使用してください。

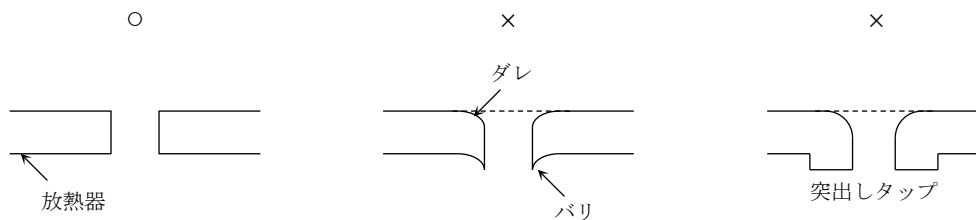


図 1.13 取り付け穴のバリ・ダレ、突出しタップ

(3) ネジ

放熱器への取り付けに使用するネジは大別して、小ネジとタッピングネジがあります。タッピングネジを使用する場合はトルクが大きくなり、締め付けトルクの最大値を超える可能性があるため、注意が必要です。また、特殊ネジ（皿ネジ、丸皿ネジ）はデバイスに異常な応力を加えることになるので、絶対に使用しないでください。

(4) 絶縁スペーサ

機械的強度のあるものを使用してください。

(5) 絶縁ワッシャ

素子に合ったものを使用してください。

(6) グリース

ベースオイルが分離し難く、素子内部に悪影響を与えないものを使用願います。

(7) 締め付けトルク

良好な熱抵抗が得られ、素子にストレスを与えないために、表 1.2 に示すトルク値以下で使用してください。

表 1.2 外器別の最大トルク

外囲器	ビスの締め付けトルク (最大値、単位は N・m)
パッケージ通称	
TO-220	0.6
TO-220SIS	0.6
TO-3P(N)	0.8
TO-247	0.8
TO-3P(L)	0.8

製品取り扱い上のお願い

株式会社東芝およびその子会社ならびに関係会社を以下「当社」といいます。
本資料に掲載されているハードウェア、ソフトウェアおよびシステムを以下「本製品」といいます。

- 本製品に関する情報等、本資料の掲載内容は、技術の進歩などにより予告なしに変更されることがあります。
- 文書による当社の事前の承諾なしに本資料の転載複製を禁じます。また、文書による当社の事前の承諾を得て本資料を転載複製する場合でも、記載内容に一切変更を加えたり、削除したりしないでください。
- 当社は品質、信頼性の向上に努めていますが、半導体・ストレージ製品は一般に誤作動または故障する場合があります。本製品をご使用頂く場合は、本製品の誤作動や故障により生命・身体・財産が侵害されることのないように、お客様の責任において、お客様のハードウェア・ソフトウェア・システムに必要な安全設計を行うことをお願いします。なお、設計および使用に際しては、本製品に関する最新の情報（本資料、仕様書、データシート、アプリケーションノート、半導体信頼性ハンドブックなど）および本製品が使用される機器の取扱説明書、操作説明書などをご確認の上、これに従ってください。また、上記資料などに記載の製品データ、図、表などに示す技術的な内容、プログラム、アルゴリズムその他応用回路例などの情報を使用する場合は、お客様の製品単独およびシステム全体で十分に評価し、お客様の責任において適用可否を判断してください。
- 本製品は、特別に高い品質・信頼性が要求され、またはその故障や誤作動が生命・身体に危害を及ぼす恐れ、膨大な財産損害を引き起こす恐れ、もしくは社会に深刻な影響を及ぼす恐れのある機器（以下“特定用途”という）に使用されることは意図されていませんし、保証もされていません。特定用途には原子力関連機器、航空・宇宙機器、医療機器、車載・輸送機器、列車・船舶機器、交通信号機器、燃焼・爆発制御機器、各種安全関連機器、昇降機器、電力機器、金融関連機器などが含まれますが、本資料に個別に記載する用途は除きます。特定用途に使用された場合には、当社は一切の責任を負いません。なお、詳細は当社営業窓口までお問い合わせください。
- 本製品を分解、解析、リバースエンジニアリング、改造、改変、翻案、複製等しないでください。
- 本製品を、国内外の法令、規則及び命令により、製造、使用、販売を禁止されている製品に使用することはできません。
- 本資料に掲載してある技術情報は、製品の代表的動作・応用を説明するためのもので、その使用に際して当社及び第三者の知的財産権その他の権利に対する保証または実施権の許諾を行うものではありません。
- 別途、書面による契約またはお客様と当社が合意した仕様書がない限り、当社は、本製品および技術情報に関して、明示的にも黙示的にも一切の保証（機能動作の保証、商品性の保証、特定目的への合致の保証、情報の正確性の保証、第三者の権利の非侵害保証を含むがこれに限らない。）をしておりません。
- 本製品、または本資料に掲載されている技術情報を、大量破壊兵器の開発等の目的、軍事利用の目的、あるいはその他軍事用途の目的で使用しないでください。また、輸出に際しては、「外国為替及び外国貿易法」、「米国輸出管理規則」等、適用ある輸出関連法令を遵守し、それらの定めるところにより必要な手続を行ってください。
- 本製品の RoHS 適合性など、詳細につきましては製品個別に必ず当社営業窓口までお問い合わせください。本製品のご使用に際しては、特定の物質の含有・使用を規制する RoHS 指令等、適用ある環境関連法令を十分調査の上、かかる法令に適合するようご使用ください。お客様がかかる法令を遵守しないことにより生じた損害に関して、当社は一切の責任を負いかねます。