

パワーMOSFET の損失と発熱計算手法

目次

はじめにお読みください	3
1. 概要	4
2. 動作中の各温度の概念について	4
3. 平均損失と平均接合温度の算出について	5
4. 最大接合温度 $T_j(\text{peak})$ の算出について	7

はじめにお読みください

1. ご採用に際しては、別途仕様書をご請求の上、ご確認をお願いいたします。
2. 本資料に記載されている当社製品の品質水準は、一般的な信頼度が要求される標準用途を意図しています。

その製品の故障や誤動作が直接生命や人体に影響を及ぼすような極めて高い品質、信頼度を要求される特別、特定用途の機器、装置にご使用の場合には必ず事前に当社へご連絡の上、確認を得て下さい。

当社の製品の品質水準は以下のように分類しております。

【標準用途】

コンピュータ、OA 等の事務機器、通信用端末機器、計測器、AV 機器、アミューズメント機器、家電、
工作機器、パーソナル機器、産業用機器等

【特別用途】

輸送機器（車載、船舶等）、基幹用通信機器、交通信号機器、防災/防犯機器、各種安全機器、医療機器等

【特定用途】

原子力制御システム、航空機器、航空宇宙機器、海底中継機器、生命維持のための装置、システム等

3. 当社は品質と信頼性の向上に絶えず努めていますが、必要に応じ、安全性を考慮した冗長設計、延焼防止設計、誤動作防止設計等の手段により結果として人身事故、火災事故、社会的な損害等が防止できるようご検討下さい。
4. 本資料に記載されている内容は、製品改良などのためお断りなしに変更することがありますのでご了承下さい。
製品のご購入に際しましては事前に当社または特約店へ最新の情報をご確認下さい。
5. 本資料の使用によって起因する損害または特許権その他権利の侵害に関しては、当社は一切その責任を負いません。
6. 本資料によって第三者または当社の特許権その他権利の実施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。
7. 本資料に記載されている製品が、外国為替及び外国貿易管理法に基づき規制されている場合、輸出には同法に基づく日本国政府の輸出許可が必要です。
8. 本資料の一部または全部を当社に無断で転載または複製することを堅くお断りいたします。

1. 概要

本資料ではパワーMOSFETの平均損失と接合部温度 T_j の算出方法について説明します。

また本資料はMOSFET損失計算及びヒートシンク選定ツールNo.DN1_MOSFET_10_jpの損失計算概念を補足するためのものにもなります。

2. 動作中の各温度の概念について

最初に半導体デバイスの動作時における各温度の概念について説明します。

繰り返し動作している時の半導体デバイスを例にケース温度 T_c 、平均接合温度 $T_j(\text{ave})$ 、ピーク接合温度 $T_j(\text{peak})$ の関係性を図1に示します。

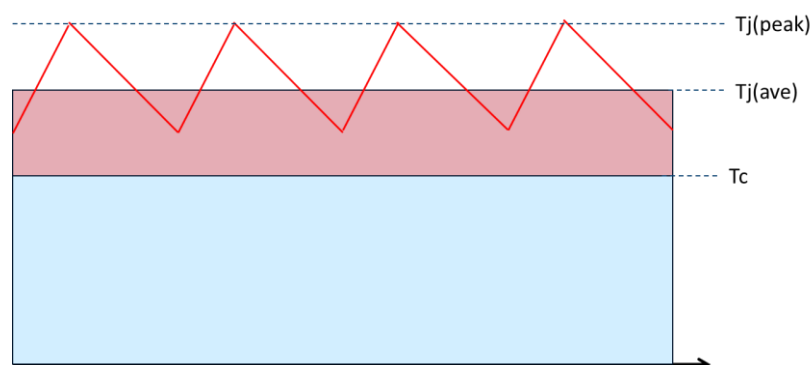


図1. 繰り返し動作における半導体の温度変化模擬例図

半導体デバイスがOn/Offの繰り返し動作している時は、半導体チップ内の接合温度は図5のような瞬間的な温度リップルを持ちながら温度変化させます。しかしながらデバイスの温度として直接観測可能なのは半導体チップ内の接合温度 T_j ではなく半導体デバイスのプラスチックパッケージ表面や金属リード表面での観測となり、一般にそれはケース温度 T_c もしくは T_{case} と呼ばれています。

接合温度 T_j が観測できない理由として半導体デバイス内部のPN接合部（ジャンクション）の温度の為、熱電対などでは直接温度変化を確認できないためです。

その為、半導体デバイスの各種データシートに記載された熱抵抗 R_{th} 、電気的特性カーブ、ケース温度 T_c 、オシロスコープで観測した動作波形などを用いて、動作時の損失を算出し、そこから発熱計算を行い、接合温度 $T_j(\text{peak})$ や $T_j(\text{ave})$ を擬似的に算出します。

尚、半導体デバイスの動作における各種温度の関係性は、 $T_j(\text{peak}) \geq T_j(\text{ave}) \geq T_c$ となります。

3. 平均損失と平均接合温度の算出について

平均損失や平均接合温度は製品を適切な温度へ冷やすために使用される放熱器の熱抵抗を算定するために必要な計算になります。対して、最大接合温度は回路上的で半導体デバイスのイレギュラーな動きによる非繰り返し動作含む瞬間的に大きな負荷がかかる動作などにおいても、最大定格内に収まっているかの判断を行うために必要な計算となります。

まず算出対象の MOSFET の 1 期間分（ゲート波形がオン動作してオフするまでの期間）の駆動波形を決めます。

次にその波形をスイッチングの ON/OFF 期間と導通期間の 3 区間になるように図 1 のように分割します。

その後、スイッチングの ON/OFF のそれぞれの区間を 3～4 区分程度に波形を近似しつつ分割します。

近似分割の際は、実駆動波形に対して少し大きめにマージンを取って分割してください。少し大きめのマージンを取ることで想定以下の損失になり T_j が低く算出されるのを防ぐことができます。

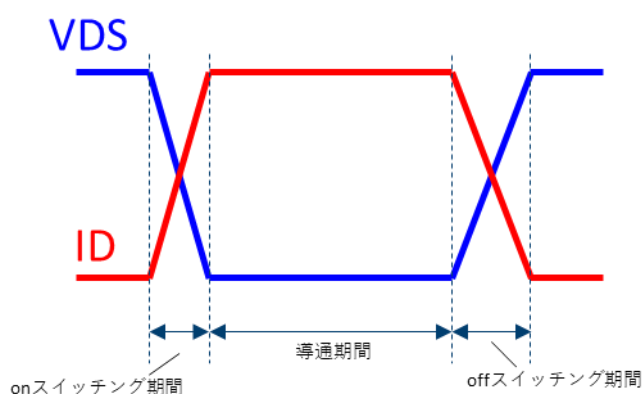


図 1. 動作波形における区間分割

次に各区間の損失算出についてそれぞれの適用式を用いて行います。

図 2 のようなスイッチング動作を行っている場合は下記①の式を適用し算出します。

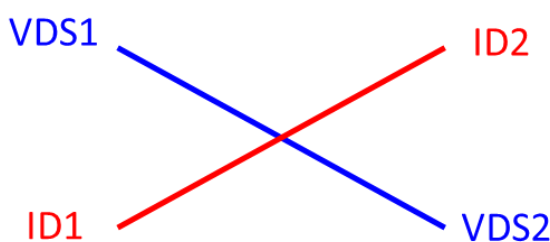


図 2. MOSFET の動作における VDS と ID の波形例

① スイッチング動作区間

$$P_{sw(on \text{ or } off)} = 1/6 \times \{ (2 \times ID1 \times VDS1) + (2 \times ID2 \times VDS2) + (ID1 \times VDS2) + (ID2 \times VDS1) \} \cdots (a)$$

② 導通損失区間（導通期間において電流波形が一定値だった場合に適用、それ以外は①を適用）

$$P_{cond} = ID^2 \times RDS(on) \cdots (b)$$

上記の際、 $RDS(on)$ は温度特性を持っておりますので計算対象の MOSFET のデータシート上の ID - $RDS(on)$ 特性曲線や電氣的特性表の $RDS(on)$ 値の typ 値と Max 値をご確認の上、適切な値を設定してください。

- ③ (a)、(b)の式を用いて算出された各期間の電力を纏めると図3のような動作近似図になります。
 ここで $P_{sw(on)}=P1$ 、 $P_{cond}=P2$ 、 $P_{sw(off)}=P3$ とします。

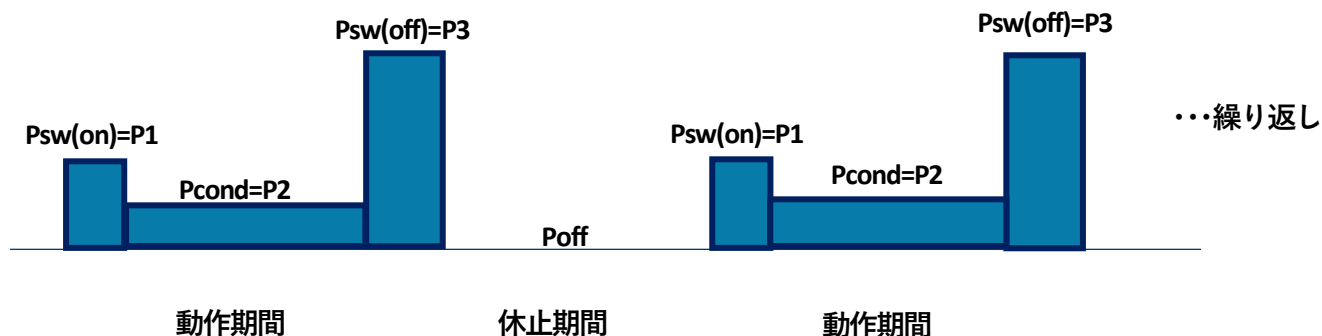


図3. 繰り返し動作における電力損失波形

- ④ 図3のように同一の動作損失が繰り返し印加される場合は、動作波形の全期間平均分から2周期分の損失波形が印加されたとして接合温度上昇分を算出します。

そのためには③で求めた動作波形から全期間の平均損失 P_{ave} と1周期の中で休止期間を除いた動作期間の平均損失 P_{on} を算出し、図4の様な方形波近似波形を作成し下記のように図示します。

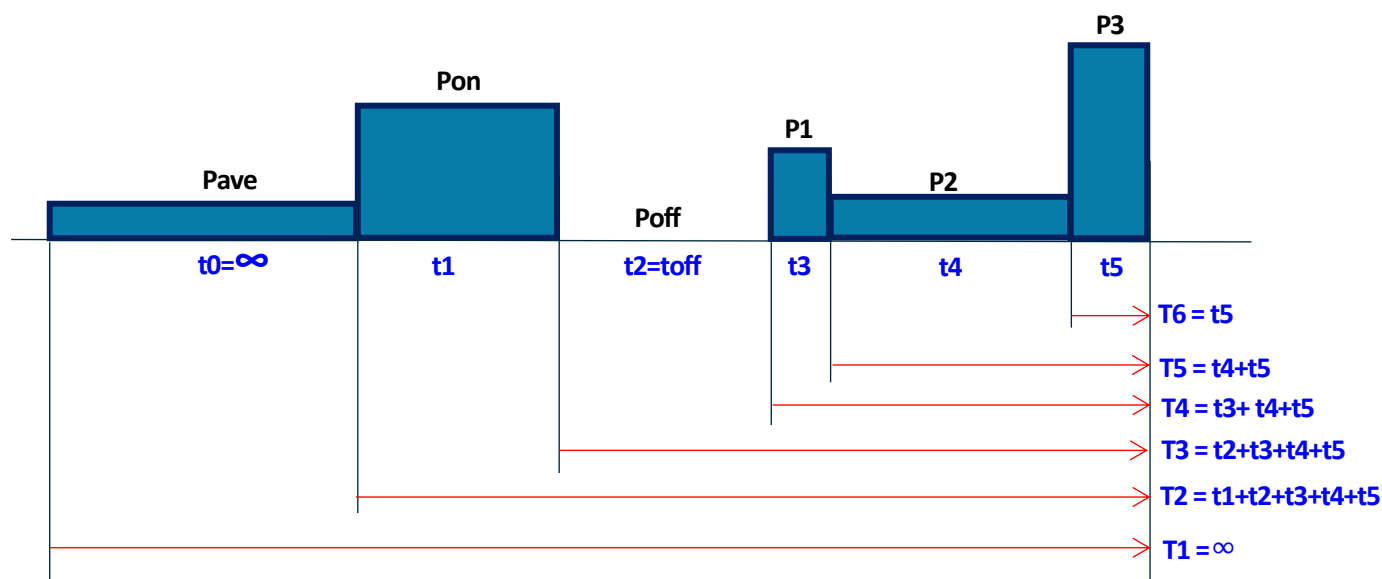


図4. 全動作期間の電力近似図

- ⑤ 全期間平均損失 P_{ave} と平均接合温度 $T_j(ave)$ の算出方法について

動作期間の平均損失 P_{on} : 損失波形1周期 ($P1 \sim P3$) の平均損失とし次の様に算出します。

$$P_{on} = (P1 \times t3 + P2 \times t4 + P3 \times t5) / T4 \cdots (c) \text{ となります。 (尚、 } T4 = t3 + t4 + t5 \text{ とします。)}$$

次に全期間平均損失 P_{av} : 損失波形1周期 ($P1 \sim P3$) 及び休止期間 (P_{off}) の平均値とし次の様に算出します。

$$P_{ave} = (P_{on} \times T4) / T3 \cdots (d) \text{ となります。 (尚、 } T3 = t2 + t3 + t4 + t5 \text{ とします。)}$$

したがって、全期間の平均損失 P_{ave} から、算出される全期間平均接合温度 $T_j(ave)$ は以下の式から求められます。

$$T_j(ave) = P_{ave} \times R_{th(j-c)} \cdots (e) \text{ となります。 (尚、この時の } R_{th(j-c)} \text{ は飽和熱抵抗値を使用します)}$$

4. 最大接合温度 $T_j(\text{peak})$ の算出について

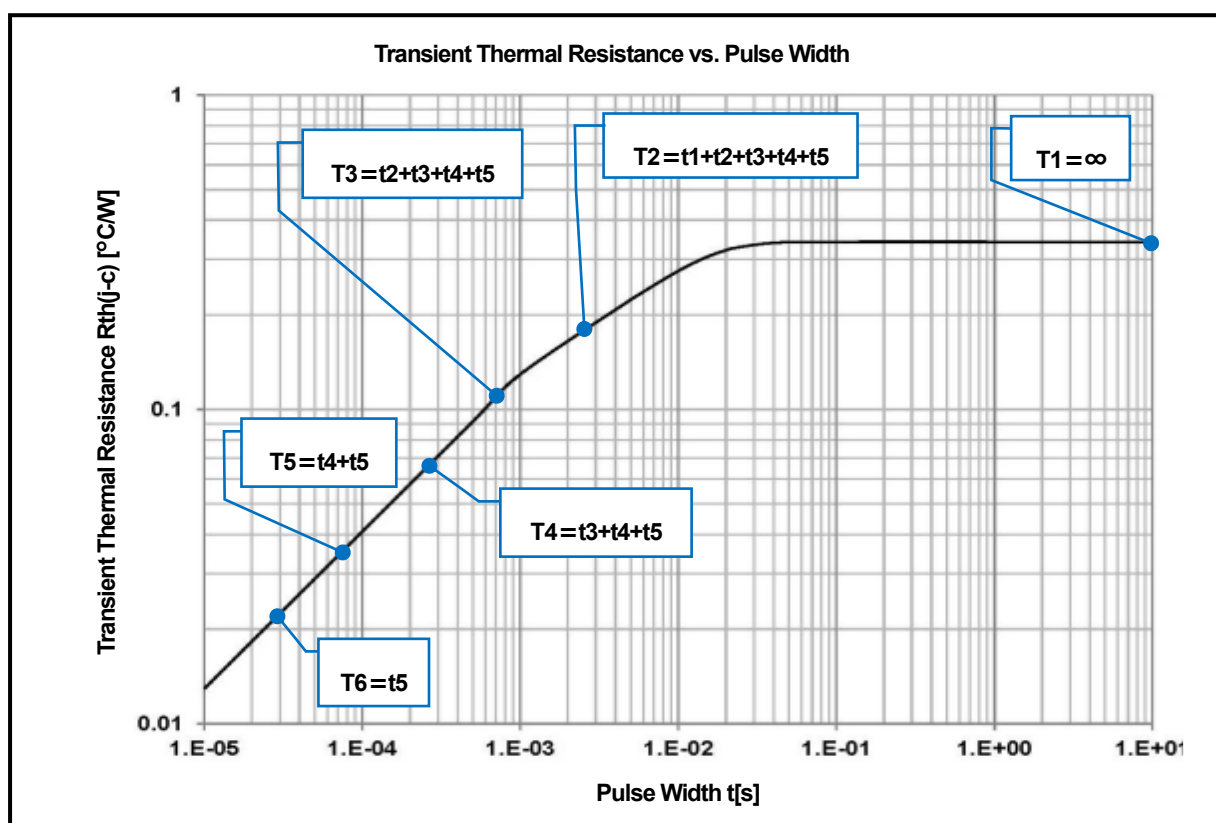
- ① 次に最大接合温度 $T_j(\text{peak})$ の算出方法について

まず接合温度上昇分 ΔT_j の算出を行う必要があります。

接合温度上昇 ΔT_j : 全期間平均損失 P_{ave} 、動作期間の平均損失 P_{on} 、動作期間 1 周期分の損失と熱抵抗を用いて次の計算式で算出します。

$$\begin{aligned} \Delta T_j = & [P_{\text{ave}} \times \{R_{\text{th}}(j-c)(T_1) - R_{\text{th}}(j-c)(T_2)\}] \\ & + [P_{\text{on}} \times \{R_{\text{th}}(j-c)(T_2) - R_{\text{th}}(j-c)(T_3)\}] + [P_{\text{off}} \times \{R_{\text{th}}(j-c)(T_3) - R_{\text{th}}(j-c)(T_4)\}] \\ & + [P_1 \times \{R_{\text{th}}(j-c)(T_4) - R_{\text{th}}(j-c)(T_5)\}] + [P_2 \times \{R_{\text{th}}(j-c)(T_5) - R_{\text{th}}(j-c)(T_6)\}] + [P_3 \times R_{\text{th}}(j-c)(T_6)] \end{aligned}$$

- ② 接合温度 ΔT_j の算出に必要な各パルス幅毎の $R_{\text{th}}(j-c)$ は各製品データシートの図 5 のような熱抵抗グラフより読み取ります。



- ③ 最後に使用条件下における半導体デバイスのケース温度 T_c と上記①の接合温度上昇分 ΔT_j を用いピーク接合温度 $T_j(\text{peak})$ が算出されます。

$$T_j(\text{peak}) = T_c + \Delta T_j \quad \text{となります。}$$