

バイポーラトランジスタ

熱安定度と放熱設計

概要

本資料はバイポーラトランジスタ回路の熱安定度と放熱設計について述べたものです。

目次

概要	1
目次	2
1. トランジスター回路の熱安定度と放熱設計	4
1.1. トランジスターの温度特性	4
1.2. 放熱設計	7
1.3. 熱抵抗	11
1.4. 放熱設計計算例	12
1.5. 信頼性を考慮した放熱設計	14
製品取り扱い上のお願い	16

図目次

図 1.1	バイアス回路の安定係数	6
図 1.2	放熱等価回路	7
図 1.3	過渡熱インピーダンス回路	8
図 1.4	パルス損失が印加された場合の温度変化	8
図 1.5	過渡熱インピーダンスの例	10
図 1.6	損失波形の方形波への近似	10
図 1.7	正弦波、三角波損失波形の方形波への近似方法	10
図 1.8	放熱板面積と熱抵抗	12

1. トランジスター回路の熱安定度と放熱設計

トランジスターなどの半導体製品の特徴として、電気的特性が温度に対して非常に敏感なことから、温度変化による動作点の変化を考慮した回路設計が必要となります。

1.1. トランジスターの温度特性

(1) 熱安定度

動作安定係数 S は (1-1) 式で定義されます。

$$S = \frac{\partial I_C}{\partial I_{CBO}} \dots\dots\dots (1-1)$$

(1-1) 式は、温度によりコレクターしゃ断電流 I_{CBO} に変化が生じたときのコレクター電流 I_C の変化量を示します。トランジスタのパラメーターで、最も温度依存性の強いものは、しゃ断電流 I_{CBO} (I_{CEO}) と、ベース・エミッター間電圧 V_{BE} です。これらは、温度の関数として次のように求められます。

$$I_{CBO(T_X)} = I_{CBO(T_0)} e^{K(T_X - T_0)} \dots\dots\dots (1-2)$$

$$I_E = I_{CBO} e^{\frac{q V_{BE}}{kT}} \dots\dots\dots (1-3)$$

- T_0 : 基準温度 (K)
- T_X : 求める温度 (K)
- K : 温度係数 Si の場合、一般に $0.07 \sim 0.08 / ^\circ C$
- q : 電荷 ($1.602 \times 10^{-19} C$)
- k : ボルツマン定数 ($1.38 \times 10^{-23} J / ^\circ K$)
- T : 絶対温度 (K)

接合部に印加されている損失を P_C とし、何らかの原因でこの損失分に $\Delta P_{C(1)}$ の変動が生じたときに、接合部には $\Delta P_{C(1)} R_{th(j-a)}$ の温度変化が起こります。この結果、 I_{CBO} 、 V_{BE} が変動し、この変動分 ΔI_{CBO} 、 ΔV_{BE} によりコレクター電流はそれぞれ $S I_{CBO}$ 、 $g_m \Delta V_{BE}$ の変化を生じます (トランジスターの g_m は $g_m = \frac{\partial I_C}{\partial V_{BE}}$ で定義されます)。

この変化による損失の変動分 $P_{C(2)}$ が先に生じた $\Delta P_{C(1)}$ より大きい場合は、温度上昇が継続するため、 ΔI_{CBO} 、 ΔV_{BE} による損失 $P_{C(2)}$ は $P_{C(1)}$ より小さくなければなりません。

従って、

$$\Delta P_{C(1)} \geq V_C (S \Delta I_{CBO} + g_m \Delta V_{BE}) \dots\dots\dots (1-4)$$

V_C : コレクター印加電圧

であれば安定すると考えられます。

(1-4) 式を変形して、

$$V_C S \frac{\Delta I_{CBO}}{\Delta P_C} + V_C g_m \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta P_C} \leq 1 \quad \dots\dots\dots (1-5)$$

$\Delta T = \Delta P_C R_{th(j-a)}$ と考えられるので (1-2) 式を P_C で微分すると、

$$\frac{\Delta I_{CBO}}{\Delta P_C} = \frac{\Delta I_{CBO}}{\Delta T} \frac{\Delta T}{\Delta P_C} = K R_{th(j-a)} I_{CBO(T_0)} e^{K(T_X - T_0 + P_C R_{th(j-a)})} \quad \dots\dots\dots (1-6)$$

(1-3) 式をエミッター電流 I_E が一定となるようにして V_{BE} の温度特性を求めると、

$$\frac{\Delta V_{BE}}{\Delta T} \approx \frac{k K T}{q} \approx -2.0 \times 10^{-3} \text{ V/}^\circ\text{C} \quad \dots\dots\dots (1-7)$$

*トランジスタのバイアス条件により通常 $-1.8 \text{ mV/}^\circ\text{C} \sim -2.2 \text{ mV/}^\circ\text{C}$ となりますが、一般的に、 $-2 \text{ mV/}^\circ\text{C}$ が代表値として用いられます。また、ダーリントン接続されたトランジスタについては、2 倍の温度係数となり、 $-4.0 \sim -4.5 \text{ mV/}^\circ\text{C}$ が代表値として用いられます。

従って、

$$\frac{\Delta V_{BE}}{\Delta P_C} = \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta T} \frac{\Delta T}{\Delta P_C} \approx -2.0 \times 10^{-3} \times R_{th(j-a)} \quad \dots\dots\dots (1-8)$$

(1-6) と (1-8) 式を (1-5) 式に代入して、

$$V_C S K R_{th(j-a)} I_{CBO(T_0)} e^{K(T_X - T_0 + P_C R_{th(j-a)})} - 2.0 \times 10^{-3} R_{th(j-a)} V_C g_m \leq 1 \quad \dots\dots\dots (1-9)$$

ただし、 $T_X - T_0 + P_C R_{th(j-a)} \geq T_{jmax} - T_0$

(1-9) 式が満足されれば回路は安定であると考えられます。しかし、(1-9) 式は複雑で実用的ではありません。そのため、 S の定義の中で V_{BE} の変化に対する I_C の変化分も含めて考えると、(1-9) 式の第 2 項は省略して考えても十分実用的であり、(1-9) 式を簡略化して、

$$V_C S K R_{th(j-a)} I_{CBO(T_0)} e^{K(T_X - T_0 + P_C R_{th(j-a)})} \leq 1 \quad \dots\dots\dots (1-10)$$

ただし、 $T_X - T_0 + P_C R_{th(j-a)} \geq T_{jmax} - T_0$

臨界電圧 V_{crit} を (1-11) 式のように定義します。

$$V_{crit} = \frac{1}{S K R_{th(j-a)} I_{CBO(T_0)}} \quad \dots\dots\dots (1-11)$$

(1-11) 式を (1-10) 式に代入すると、

$$\frac{V_C}{V_{crit}} e^{K(T_x - T_o + P_C R_{th(j-a)})} \leq 1 \quad \dots\dots\dots (1-12)$$

となり、(1-12) 式を変形して、 $K=0.08$ 、基準温度 (周囲温度) $T_o=25 \text{ }^\circ\text{C}$ とすると、

$$P_C R_{th(j-a)} + T - 25 \leq 29 \ln \frac{V_C}{V_{crit}} \quad \dots\dots\dots (1-13)$$

以上により、(1-11) と (1-13) 式が回路の安定条件を与える式となります。

(2) バイアス回路の安定係数

図 1.1 は各バイアス回路の安定係数がどのようになるかを示しています。(a) (b) (c) は一般のバイアス回路、(d) は入力トランスの直流抵抗分を無視できないときを表したものです。

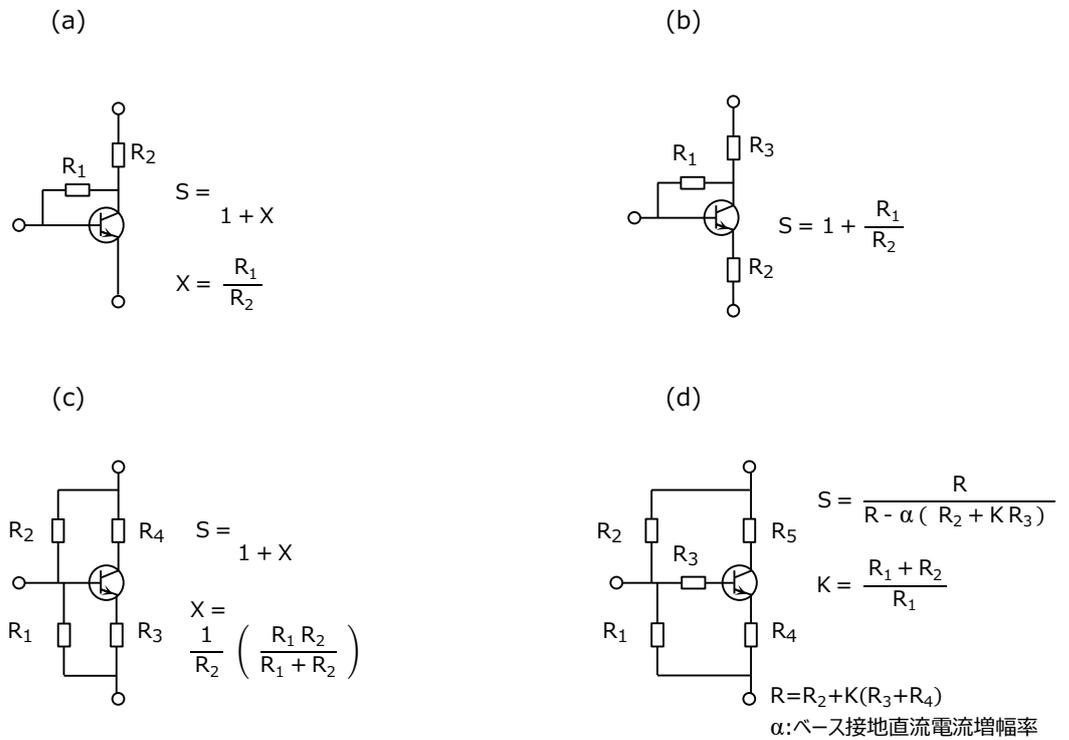


図 1.1 バイアス回路の安定係数

一般に安定係数は小さいことが望ましいですが、小さくなると回路の直流損失分が増加し効率が悪くなります。出力段のバイアス回路では、安定係数を小さくすることにより損失は増加するため、一般的には出力段のバイアス回路は、温度補償デバイスにより熱安定度を良好にする方法がとられます。

温度補償デバイスを用いる場合は、デバイスの使い方によって安定度を自由に選ぶことができます。温度補償デバイスとしてはサーミスタ、バリスタが一般的です。使い方についてはそれぞれのデバイスの技術資料などを参照してください。

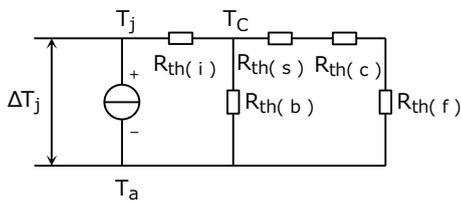
1.2. 放熱設計

(1) 最大コレクター損失と放熱等価回路

トランジスターの最大コレクター損失 (P_{Cmax}) は、バイアス回路の熱安定度が十分に設計されている場合は、トランジスタが使用される周囲温度 (T_a) とトランジスターの最大接合温度 (T_{jmax})、および、接合部から雰囲気までの全熱抵抗 $R_{th(j-a)}$ とにより (1-14) 式の関係が成り立ちます。

$$P_{Cmax}(T_a) = \frac{T_{jmax} - T_a}{R_{th(j-a)}}, \quad P_{Cmax}(T_c) = \frac{T_{jmax} - T_c}{R_{th(j-c)}} \quad \dots\dots\dots (1-14)$$

トランジスターの接合部で発生する熱が外部へ伝導される経路は、熱の移動を電流と同様に考えて電気回路に置き替えると熱抵抗と熱容量から表されます。熱的定常状態では、図 1.2 の放熱等価回路で表されます。



- $R_{th(i)}$: 接合部から外囲器までの内部熱抵抗
- $R_{th(b)}$: 外囲器から雰囲気まで外部熱抵抗
- $R_{th(s)}$: 絶縁板熱抵抗
- $R_{th(c)}$: 外囲器と放熱器の接触部での接触熱抵抗
- $R_{th(f)}$: 放熱器熱抵抗

図 1.2 放熱等価回路

接合部から雰囲気までの全熱抵抗 $R_{th(j-a)}$ は、図 1.2 の等価回路から (1-15) 式で求められます。

$$R_{th(j-a)} = R_{th(i)} + \frac{R_{th(b)} (R_{th(s)} + R_{th(c)} + R_{th(f)})}{R_{th(b)} + R_{th(s)} + R_{th(c)} + R_{th(f)}} \quad \dots\dots\dots (1-15)$$

中出力以下のトランジスターでは一般的に放熱器を用いないので $R_{th(j-a)}$ は、

$$R_{th(j-a)} = R_{th(i)} + R_{th(b)} \quad \dots\dots\dots (1-16)$$

となります。

中出力以下のトランジスターのデータシートなどでは、 $T_a=25^\circ\text{C}$ の最大コレクター損失が記載されていますが、特に指定していない限り (1-16) 式で与えられる $R_{th(j-a)}$ と T_{jmax} から

$$P_{Cmax}(T_a = 25^\circ\text{C}) = \frac{T_{jmax} - 25}{R_{th(j-a)}} \quad \dots\dots\dots (1-17)$$

で与えられる値を示しています。ケースから雰囲気への熱抵抗 $R_{th(b)}$ はケースの材質や形状により決定されます。

$R_{th(b)}$ は $R_{th(i)}$ 、 $R_{th(c)}$ 、 $R_{th(s)}$ 、 $R_{th(f)}$ に比べて値が大きいため、(1-15) 式は簡略化して (1-18) 式を使うと

ができます。

$$R_{th(j-a)} = R_{th(i)} + R_{th(c)} + R_{th(s)} + R_{th(f)} \quad \dots\dots\dots (1-18)$$

定常的な損失を扱う場合には (1-18) 式を使用することにより、最大定格を満足する放熱設計が可能となります。しかしながら、トランジスターをスイッチング回路などで使用する場合には、 T_j のピーク値が T_{jmax} を超えないよう十分注意が必要です。

(2) 接合部のパルス応答

トランジスターの熱インピーダンスは、図 1.3 のような分布定数回路で求められます。

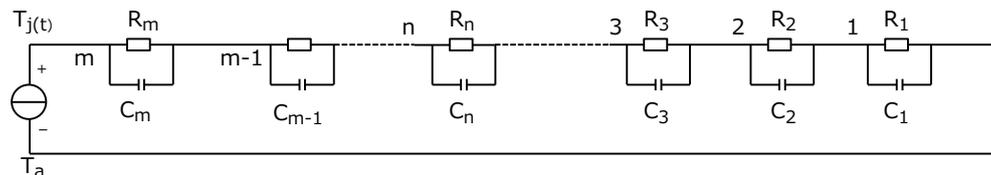


図 1.3 過渡熱インピーダンス回路

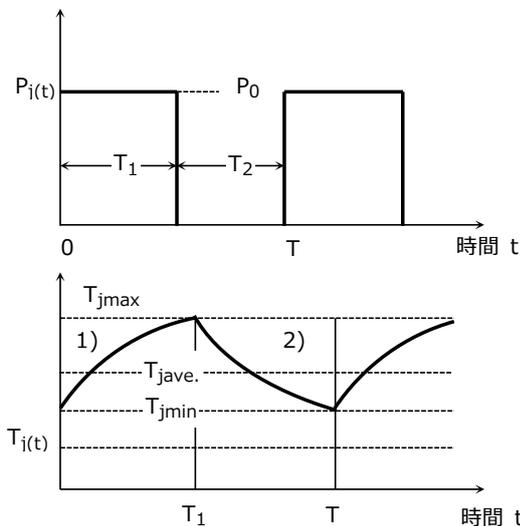


図 1.4 パルス損失が印加された場合の温度変化

図 1.3 の回路に、図 1.4 のようなパルス状の損失 $P_{j(t)}$ 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 $T_{j(t)}$ は次式で求められます。

1) $P_{j(t)} = P_0$ の領域では、

$$T_{j(t)} = \sum_{n=1}^m \{ (P_0 R_n) - T_{n \min} \} \left\{ 1 - e \left(\frac{-t}{C_n R_n} \right) \right\} + T_{n \min}$$

2) $P_{j(t)} = 0$ の領域では、

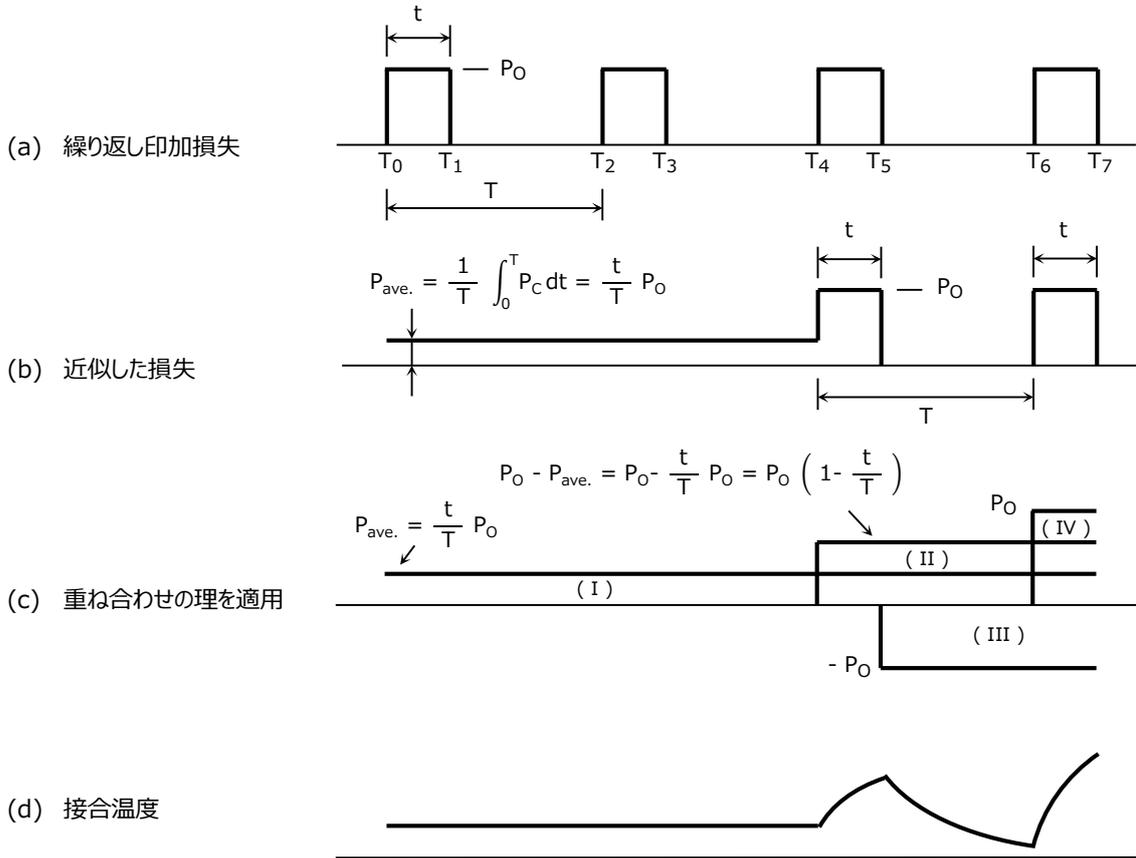
$$T_{j(t)} = \sum_{n=1}^m \left\{ T_{n \min} e \left(\frac{-t}{C_n R_n} \right) \right\}$$

通常のトランジスターでは $n=4$ 程度を考えることにより、ほぼ実際の値に近似することが可能ですが、 C 、 R の値が明確でない場合は T_j の値を算出することは困難です。そのため、一般的には次のように過渡熱インピーダンスを用いて T_{jmax} を算出します。

図 1.5 は過渡熱インピーダンスの代表特性です。単発方形波パルス (パルス幅 t 、尖頭値 P_0) が印加された場合、パルス幅 t に対する過渡インピーダンス $r_{th}(t)$ を使用することにより T_{jmax} は、(1-21) 式となります。

$$T_{j(max)} = r_{th}(t) P_0 + T_a \quad \dots\dots\dots (1-21)$$

図 1.4 のような周期 T の連続パルスの損失が印加された場合には、下記の重ね合わせの理を用いて求めた (1-22) 式から T_{jpeak} を算出します。



$$\Delta T_{j(I)} = P_0 \frac{t}{T} R_{th(j-a)}$$

$$\Delta T_{j(II)} = P_0 \left(1 - \frac{t}{T} \right) r_{th(T+t)}$$

$$\Delta T_{j(III)} = - P_0 r_{th(T)}$$

$$\Delta T_{j(IV)} = P_0 r_{th(t)}$$

$$T_{j(max)} = P_0 \left[\frac{t}{T} R_{th(j-a)} + \left(1 - \frac{t}{T} \right) r_{th(T+t)} - r_{th(T)} + r_{th(t)} \right] + T_a \quad \dots\dots\dots (1-22)$$

(1-22) 式は、S/B による電流集中が生じない熱制限領域でのみ適用できるものです。

パルス的な電力が印加される回路の放熱設計では、(1-22) 式の T_{jmax} がトランジスタの接合温度最大定格を超えないよう、十分な注意が必要です。

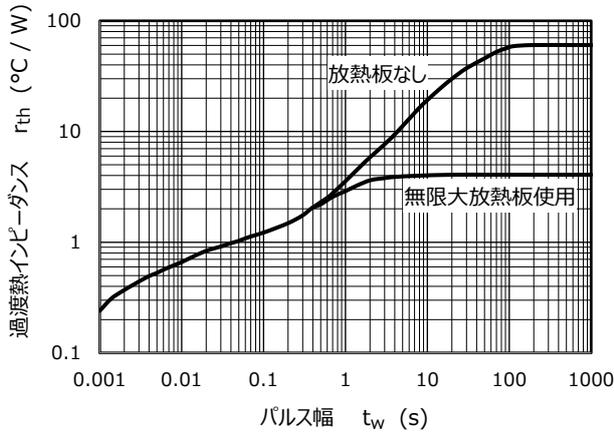


図 1.5 過渡熱インピーダンスの例

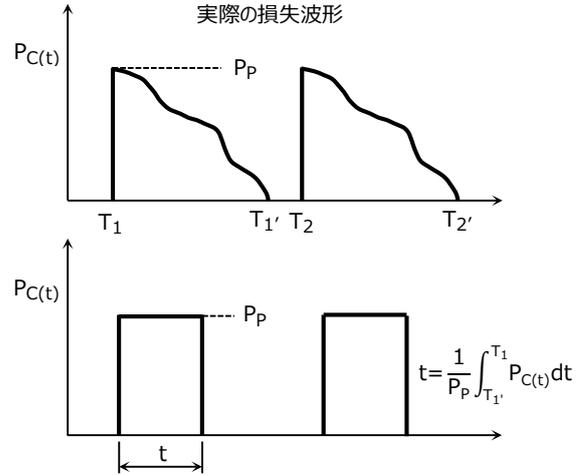


図 1.6 損失波形の方形波への近似

今までの説明では、方形波を扱いましたが、実際にトランジスタを機器に応用する場合、 $P_j(t)$ が方形波であることはまれです。そのような場合は、損失波形を図 1.6 のように方形波に近似し、(1-22) 式により T_{jpeak} を算出することができます。

方形波の近似方法として、損失波形が正弦波や三角波の場合には、図 1.7 のようにして近似することができます。図 1.7 で (a)、(b) は波高値 P_p を 0.7 倍し、パルス幅をそれぞれ 0.91 倍、0.71 倍します。また、(c)、(d) の場合では波高値は同一としてパルス幅を 0.63 倍、0.5 倍とすることで、ほぼ同等の面積に近似することができます。

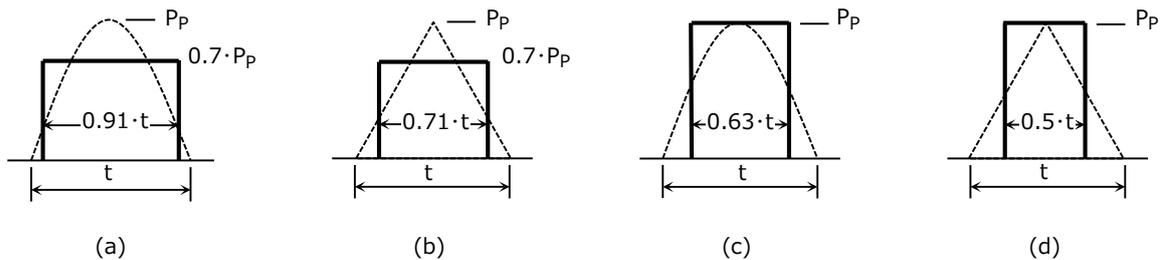


図 1.7 正弦波、三角波損失波形の方形波への近似方法

1.3. 熱抵抗

図 1.2 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) 接合部・外圍器間熱抵抗 (内部熱抵抗) $R_{th(i)}$

トランジスター接合部から外圍器までの内部熱抵抗 $R_{th(i)}$ は、トランジスターの構造、材料などに決まるもので、それぞれのトランジスター固有の値です。

この熱抵抗値を測定するためには、トランジスターを一定のケース温度に強制的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 $T_C=25\text{ }^\circ\text{C}$ に冷却して動作する場合には、トランジスターに許容される最大損失 P_{Cmax} は、

$$P_{Cmax} = \frac{T_{j\max} - T_C}{R_{th(i)}} = \frac{T_{j\max} - 25}{R_{th(i)}} \quad (\text{W}) \quad \dots\dots\dots (1-23)$$

で求められます。

大出力のトランジスターのデータシートなどでは $T_C=25\text{ }^\circ\text{C}$ 、または、無限大放熱器を使用したときの最大コレクター損失が記載されていますが、これは (1-23) 式のように、トランジスターの内部熱抵抗により決まるものです。

(2) 接触熱抵抗 $R_{th(c)}$

接触熱抵抗 $R_{th(c)}$ は、外圍器と放熱器と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。接触面にシリコングリースを塗布したり、シリコンラバーを使用すると、接触面の粗さ、平坦度の影響を小さくすることができます。

(3) 絶縁板熱抵抗 $R_{th(s)}$

トランジスターを放熱器から絶縁する必要があるときは、トランジスター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 $R_{th(s)}$ 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。

樹脂モールドにより絶縁された外圍器では、記載されたトランジスターの熱抵抗に絶縁物の熱抵抗 $R_{th(s)}$ を含んでいます。

(4) 放熱器熱抵抗 $R_{th(f)}$

放熱器の熱抵抗は放熱器表面より雰囲気へ逃げる熱の経路の分布定数的熱抵抗と考えられます。雰囲気の状態、放熱器と雰囲気との温度差および放熱器の有効面積に関係してきますが、数式的に表現することは難しく、現状では全て実測により決めています。図 1.8 は放熱器の中央にトランジスターを 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。

放熱器メーカーが種々の放熱器を発表していますので、技術資料などを参照の上、最適な放熱器を選定してください。

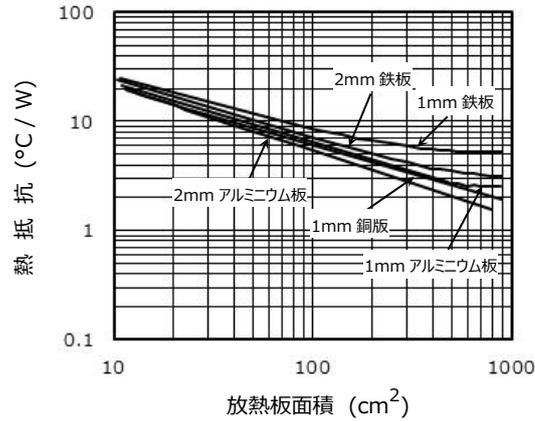


図 1.8 放熱板面積と熱抵抗

1.4. 放熱設計計算例

これまでの内容をもとに実際の計算例を下記に示します。計算にあたって与えられる定数または求める定数は、次の 4 つに分類されます。

- (a) トランジスター ($R_{th(i)}$ 、 T_{jmax})
- (b) トランジスターのコレクター損失 (P_C)
- (c) 周囲温度 (T_a)
- (d) 放熱器熱抵抗 ($R_{th(f)}$)

(例 1.) トランジスター、周囲温度およびコレクター損失が与えられて、必要な放熱器の熱抵抗を求めます。

ある製品にコレクター損失 $P_C=15\text{ W}$ を印加し、周囲温度 $T_a=60\text{ °C}$ で動作させるときに必要な放熱器を求めます。

与えられる条件は、 $P_{Cmax}=80\text{ W}$ ($T_C=25\text{ °C}$)、 $T_{jmax}=150\text{ °C}$ および、 $P_C=15\text{ W}$ 、 $T_a=60\text{ °C}$ で、絶縁板とシリコングリースの熱抵抗を $R_{th(c)}+R_{th(s)}=0.8\text{ °C/W}$ とします。

(1-17) と (1-23) 式より、

$$R_{th(i)} = \frac{T_{jmax} - T_C}{P_{Cmax}} = \frac{150 - 25}{80} \approx 1.6\text{ °C/W}$$

$$R_{th(j-a)} = \frac{T_{jmax} - T_a}{P_C} = \frac{150 - 60}{15} = 6\text{ °C/W}$$

(1-18) 式より、

$$R_{th(f)} = R_{th(j-a)} - (R_{th(i)} + R_{th(c)} + R_{th(s)}) \approx 6 - (1.6 + 0.8) = 3.6 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{W}$$

放熱器は 3.6 $^\circ\text{C} / \text{W}$ 以下の熱抵抗が必要です。2 mm 厚のアルミニウム板では、図 1.8 より 200cm² の面積が必要です。アルミニウム放熱板では 140×140×2 mm 程度の大きさのものを用品です。

(例 2.) トランジスター、周囲温度および放熱器が与えられていて、トランジスターに許容される最大コレクター損失を求めます。

トランジスターを絶縁板とシリコングリースを用いて 100×100×2 mm アルミニウム放熱板に取り付け、周囲温度 $T_a=60 \text{ } ^\circ\text{C}$ まで動作させたいときに許容される最大コレクター損失を求めます。与えられる条件は、 $P_C=20 \text{ W}$ ($T_C=25 \text{ } ^\circ\text{C}$)、 $T_{j\max}=150 \text{ } ^\circ\text{C}$ および、 $T_a=60 \text{ } ^\circ\text{C}$ 、図 1.8 より $R_{th(f)}=5.4 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{W}$ が求まり、 $R_{th(c)}+R_{th(s)}=0.6 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{W}$ とします。

(1-23) 式より、

$$R_{th(i)} = \frac{T_{j\max} - 25}{P_{C\max}} = \frac{150 - 25}{20} = 6.25 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{W}$$

(1-18) 式より

$$R_{th(j-a)} = R_{th(i)} + R_{th(c)} + R_{th(s)} + R_{th(f)} = 6.25 + 0.6 + 5.4 = 12.25 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{W}$$

(1-14) 式より、

$$P_C = \frac{T_{j\max} - T_a}{R_{th(j-a)}} = \frac{150 - 60}{12.25} \approx 7.3 \text{ W}$$

(例 3.) トランジスター、放熱器およびコレクター損失が与えられていて、動作可能な最大周囲温度を求めます。

トランジスターを 100×100×2 mm のアルミニウム放熱板に、絶縁板とシリコングリースを用いて取り付けます。コレクター損失 15 W まで印加するときに、動作可能な最大周囲温度を求めます。与えられる条件は、 $P_{C\max}=150 \text{ W}$ ($T_C=25 \text{ } ^\circ\text{C}$)、 $T_{j\max}=150 \text{ } ^\circ\text{C}$ 、および、図 1.8 より $R_{th(f)}=5.4 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{W}$ となり、 $P_C=15 \text{ W}$ 、 $R_{th(c)}+R_{th(s)}=0.7 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{W}$ です。

(1-23) 式より

$$R_{th(i)} = \frac{T_{j\max} - T_C}{P_{C\max}} = \frac{150 - 25}{150} \approx 0.83 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{W}$$

(1-18) 式より、

$$R_{th(j-a)} = R_{th(i)} + R_{th(c)} + R_{th(s)} + R_{th(f)} = 0.83 + 0.7 + 5.4 \approx 6.9 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{W}$$

(1-14) 式より、

$$T_a = T_{j \max} - R_{th(j-a)} P_C = 150 - 6.9 \times 15 \approx 46.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

となり、動作可能な最大周囲温度は 46.5 °C です。

1.5. 信頼性を考慮した放熱設計

トランジスタ回路設計における熱安定度と放熱についての基本的な考え方、計算方法はすでに述べたとおりですが、さらに信頼性についての考え方を加味することが必要です。

産業用途や 1 台当たりの使用部品数の多い機器に対しては信頼性を考慮して、デレーティング (Derating: 逓減) を行う必要があります。

トランジスタの寿命は接合温度に対して指数関数的な関係にあり、トランジスタにより差異はありますが、接合温度のデレーティングによって、信頼性の向上が期待できます。そのため、高い信頼度が要求される場合、接合温度 (印加電力による温度上昇 + 周囲温度) を極力抑えなければなりません。

また、機器のオン・オフなどにより接合温度の大きく急激な変化が生じると、その繰り返しによりトランジスタ内部の電極接合部が熱疲労 (Thermal Fatigue) を起こすこともあります。これを避けるためにも変化量を含めた接合温度を十分に考慮してデレーティングしなければなりません。

下記に信頼性を考慮した放熱設計の計算例を示します。

(例 4.) コレクター損失と周囲温度が与えられていて、必要な放熱板の大きさを求めます。

あるトランジスタを使用してコレクター損失 3 W、周囲温度 55 °C まで動作させる場合に必要な放熱板の大きさを求めます。与えられる条件は $P_{C \max} = 25 \text{ W}$ ($T_c = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$)、 $T_{j \max} = 150 \text{ } ^\circ\text{C}$ です。

(1-23) 式より、

$$R_{th(i)} = \frac{T_{j \max} - T_c}{P_{C \max}} = \frac{150 - 25}{25} = 5 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{W}$$

高信頼性設計とするため、動作最大接合温度を 50 °C デレーティングさせると、動作最大接合温度は、

$$T_{j(\text{opr}) \max} = 150 - 50 = 100 \text{ } ^\circ\text{C}$$

(1-14) 式から、

$$R_{th(j-a)} = \frac{T_{j(\text{opr}) \max} - T_a(\text{max})}{P_C} = \frac{100 - 55}{3} = 15 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{W}$$

従って、 $R_{th(c)} + R_{th(s)} = 0.6 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{W}$ とすると (1-18) 式より、

$$R_{th(f)} = R_{th(j-a)} - (R_{th(i)} + R_{th(c)} + R_{th(s)}) = 15 - (5 + 0.6) = 9.4 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{W}$$

放熱器は 9.4 °C/ W よりも小さな熱抵抗のものが必要となります。図 1.8 より 65×65×2 mm のアルミニウム放熱板が放熱器として適当なサイズとなります。

製品取り扱い上のお願

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（ヘルスクエア除く）、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、発電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、または当社 Web サイトのお問い合わせフォームから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。