International
IOR Rectifier

APPLICATION NOTE

アプリケーション・ノート：AN-1057

ヒートシンク特性

目次

ページ

はじめに 2

熱管理の効用最大化 2

熱伝導の原理 2

用語と定義 3

熱伝導モード 3

1. 伝導 3

2. 対流 6

3. 放射 10

半導体の放熱 12

ヒートシンクの適切な選定 12

多くの電子機器では、システム設計時に、温度が重要な要素になります。スイッチング損失と伝導損失により、デバイスのシリコンが最大接合温度（Tj_{max}）以上に加熱され、性能低下、故障、最悪の場合には火災を引き起こすことがあります。従って、デバイスの温度が Tj_{max} を超えないように設計する必要があります。適切な熱管理方法を設計するために、接合温度 Tj は常に最低動作温度に保ってください。

© インターナショナル・レクティファイアー・ジャパン
この文献の無断複製・転載を禁じます。

ヒートシンク特性

著者 Llew Edmunds（International Rectifiers）。Aavid Thermalloy 社の関連文書。

対象題目

- はじめに
- 熱管理の効用最大化
- 熱伝導の原理
- 熱伝導モード
- 伝導
- 対流
- 放射
- 半導体の放熱
- ヒートシンクの適切な選定
- 押出成形データ
- 温度および距離補正係数
- 熱モデル化性能

はじめに

多くの電子機器では、システム設計時に、温度が重要な要素になります。スイッチング損失と伝導損失により、デバイスのシリコンが最大接合温度（T_{jmax}）以上に加熱され、性能低下、故障、最悪の場合には火災を引き起こすことがあります。従って、デバイスの温度が T_{jmax} を超えないように設計する必要があります。適切な熱管理方法を設計するために、接合部温度 Tj は常に最低動作温度に保ってください。

熱管理の効用最大化

熱管理は、後回しにせず、基板のレイアウト設計段階で決定しておく必要があります。プリント基板の設計時に熱負荷を決定すると、無理がなく、低コストで済みます。最適な解決法で適応性と選択性を向上させ、基板の設計完了後に起きるデバイス故障を防止することができます。設計の最終段階で発生する問題の多くは、熱管理上の要件が原因です。

熱伝導の原理

熱伝導は、2 つの表面温度が異なる場合に起きるもので、熱エネルギーが高温側から低温側の表面に移動します。例えば、電圧差により電流が流れ、同様に、温度差により熱が移動します。温度差が大きくなると、熱流量も増加します。

$$\text{熱伝導} \propto \text{温度差}$$

用語と定義

熱負荷（W）	生成される熱エネルギー量。通常、下記のように定義されます。 （デバイス全体の電圧降下）×（デバイス内を流れる電流）
周囲温度（Tamb）	デバイスの周囲で直ちに冷却される空気の温度
最大接合部温度（Tj_{max}）	デバイスのシリコン接合部での最大許容温度
熱抵抗（RΘ） （°C/W） - （Rth と記すこともある）	熱エネルギーが高温から低温に流れる時に受ける抵抗。温度差と移動する熱量の比で表されます。数値が小さいほど、効率が高くなります。
接合・シンク間（RΘjc/Rthjc）	デバイスのシリコン接合からパッケージのケースまでの熱抵抗（メーカーにより提供）
ケース・シンク間（RΘcs/Rthcs）	使用される界面材料の熱抵抗
シンク・周囲間（RΘsa/Rthsa）	ヒートシンクの熱抵抗

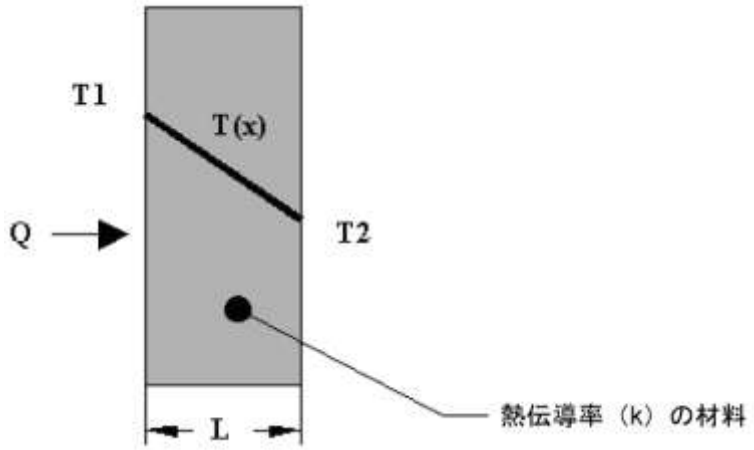
熱伝導モード

熱伝導には 3 つのモードがあります。

1. ***伝導***
2. ***対流***
3. ***放射***

1. 伝導

伝導は、熱エネルギーが媒体の中を移動することを指します。



$$Q = \frac{kAc}{t}(T_1 - T_2)$$

ここで、

Q = 熱量（W）

k = 熱伝導率（W/m°C）

Ac = 接触面積（m^2）

T = 温度（°C）

t = 材料厚または熱の移動距離（m）

$$Q = \frac{kAc}{t}(\Delta T)$$

- ΔT と t が一定の場合、Q は Ac に正比例します。
- ΔT と Ac が一定の場合、Q は t に逆比例します。
- Ac と t が一定の場合、Q は ΔT に正比例します。

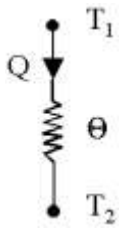
（i） 回路解析

電気回路



$$i = \frac{V_1 - V_2}{R}$$

熱回路



$$Q = \frac{T_1 - T_2}{\Theta}$$

（ii） 伝導抵抗

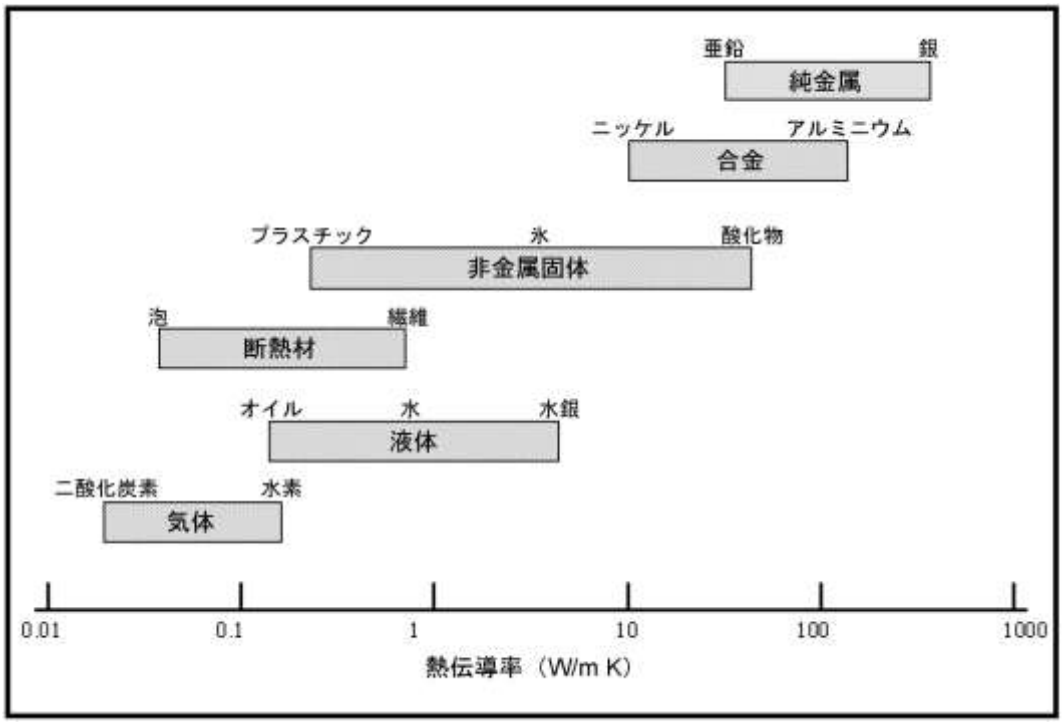
$$\Theta = \frac{t}{kAc}$$

材料	t（インチ）	k（W/m°C）	TO-220 の θ（°C/W）
空気	N/A	0.026	N/A
グリース	0.002	0.197	1.67
シリコン・ゴム	0.005	0.472	1.74
グラフォイル	0.005	2.205	0.37
アルミナ	0.002	34.25	0.02

ヒートシンク材料	k（W/m°C）	用途
アルミニウム（1100 シリーズ）	203	スタンピング
アルミニウム（5000 シリーズ）	202	自動クリップ・スタンピング
アルミニウム（6000 シリーズ）	207	押出成形品
銅（110 合金）	358	ヒート・スプレッダ

（iii） 熱伝導率（k）

常温、常圧時の物質のさまざまな状態と熱伝導率の範囲



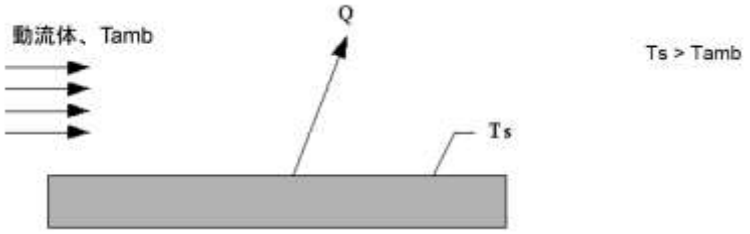
（iv） 伝導を利用する際の注意事項

- 接触面はすべて平滑にします。接触面には可能な限り、熱グリースあるいはインタフェース・パッドを使用してください。
- 電力密度を均一にするために、半導体は間隔をとって配置します。

機器の筐体の一部をヒートシンクとして利用する場合は、想定される電力密度に適した材料厚と境界面積であることを確認します。

2. 対流

対流は、高温の表面の熱エネルギーを、それより低温の動流体（空気、水など）に移動させることを指します。数学的予測が最も難しい熱伝導モードです。



$$Q = h_c A_s (T_s - T_a)$$

$$\Theta = \frac{1}{hcAs}$$

Q = 熱量（W）
hc = 熱伝導係数（W/m^2 °C）
As = 表面積（m^2）
Ts = 表面温度（°C）
Ta = 周囲温度（°C）
θ = 熱抵抗（°C/W）

対流には 2 種類あります。

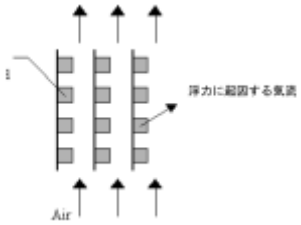
a) 自然対流

b) 強制対流

a） 自然対流

自然対流は、密度の違い（流体での温度変動によって生じる）に伴う浮力作用に起因する流体の移動です。適切に設計された自然対流ヒートシンクを海抜ゼロで動作させると、熱量の約 70% が自然対流で移動し、約 30% が放射で移動します。

高度が高くなると、空気の密度が小さくなるため、対流による寄与は少なくなります（例えば、高度 70,000 フィートでは、熱量の 70 ～ 90% が放射によって放散される）。



自然対流を利用する際の注意事項

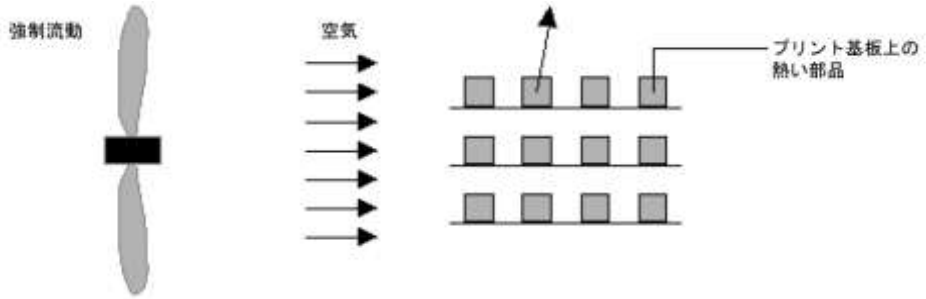
1. キャビネットとラックは、筐体の上部と下部に適切な通気口を設けます。
2. 長さの異なる装置をラックに載せる場合、長い装置の下には、熱を発生する短い箱を置かないでください。
3. 熱を発生する機器はキャビネットの上段近くに置き、熱を発生せず熱に弱い部品はキャビネットの底部に置きます。
4. 回路基板を多数ラックに載せる場合、大量の熱が放散されるので、基板は垂直に立てて、自然対流で冷却されるようにしてください。
5. 押出形材製ヒートシンクのフィンは、自然対流による冷却が利用できる場合、垂直に配列します。

b） 強制対流

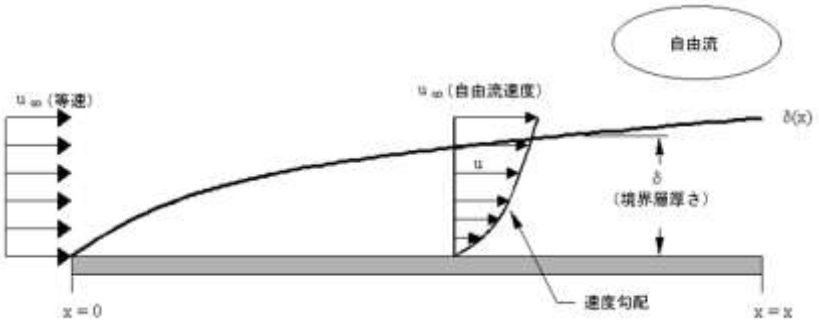
強制対流は、外部手段（ファン、ポンプなど）を使用して生じさせる流体の流れです。

例えば 180LFM の流速で、放射熱伝導の割合は 2 ～ 7% まで減少します。従って、表面処理（陽極酸化処理）は重要な伝熱性能因子ではありません。表面未処理のアルミニウムでも、ヒートシンク温度が低く、対流の寄与が大きいため、効率は陽極酸化仕上げと同程度です。

海抜ゼロでは、放射熱伝導の寄与は比較的小さいので、通常無視されます。

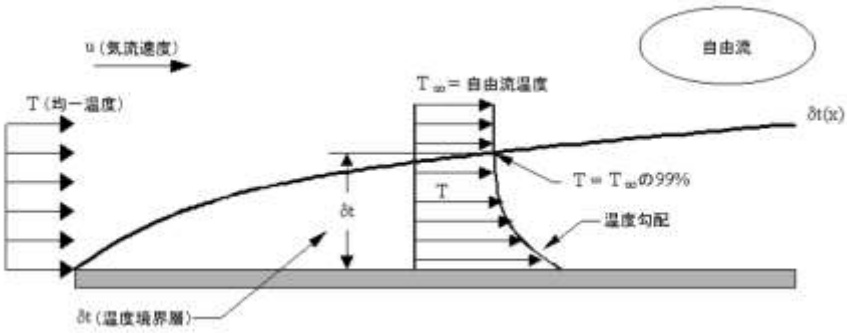


平板上の速度境界層



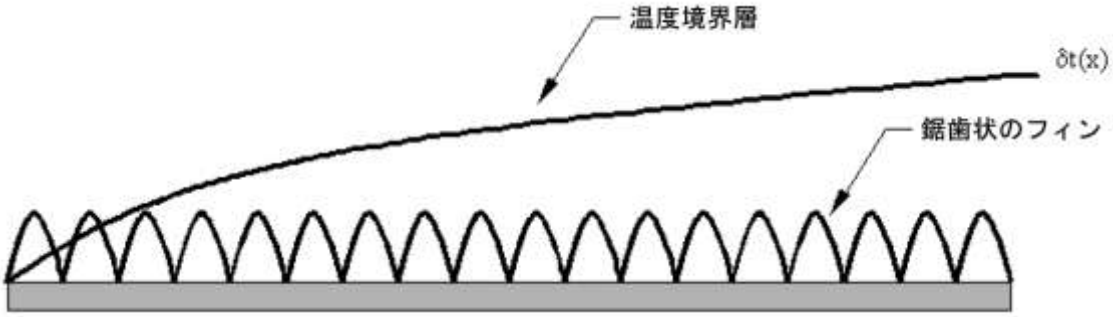
- x（先端からの距離）が増すと、δ が減少します。
- 速度が上がると、δ が減少します。

等温平板上の温度境界層

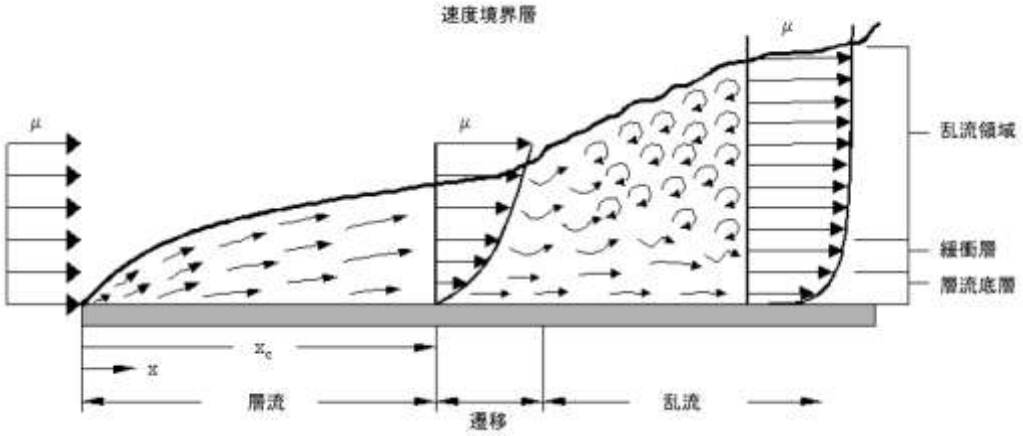


- x（先端からの距離）が増えると、温度勾配が小さくなります。
- x（先端からの距離）が増えると、δ も増えます。
- （鋸歯状のフィンが効果のない理由）
- 鋸歯の奥行より δ の方が厚くなります。

温度境界層 vs 鋸歯状のフィンがあるヒートシンク



平板上の層流の発達 vs 乱流の発達



x = 特性長（先端からの距離）

x_c = 遷移が始まる時の距離（遷移は臨界レイノルズ数 Re_x で始まる）

- レイノルズ数は無次元数で、慣性力と粘性力の比を表します。
- Re_x は、1×10^5 ～ 3×10^6 であることが知られており、表面粗さと自由流の乱流レベルに依存しています。

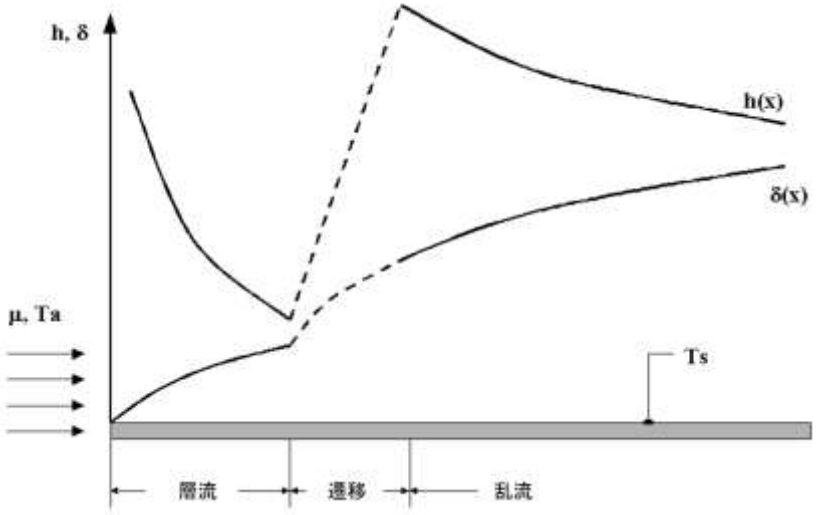
「h」（対流係数）

対流係数 h は、下記の流体物性のわずかな変動に非常に敏感です。

- 熱伝導率
- 動粘性係数
- 密度
- 比熱
- 速度
- 流動タイプ（層流あるいは乱流）

気流遷移は通常、約 180LFM の流速で発生し、流速を上げると遷移の程度が大きくなります。

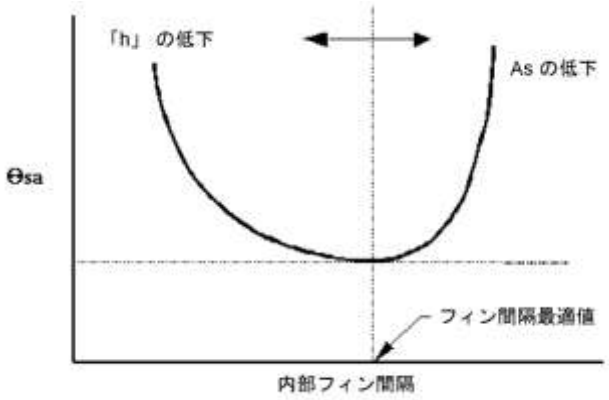
等温平板上での速度境界層厚さ vs 熱伝導係数



フィン間隔 vs h および A

h はフィン間隔とフィン高さの関数です。*フィン間隔*は自由気流を制御します。

フィン間隔が減少すると、A_S が増加します。



フィン効率

- 効率 η は以下の場合に減少します。
  - フィンの長さが減少する場合
  - フィンの厚さが減少する場合
  - フィンの「k」（熱伝導率）が減少する場合
  - 「h」（熱伝導係数）が減少する場合（すなわち、流速が減少する場合）

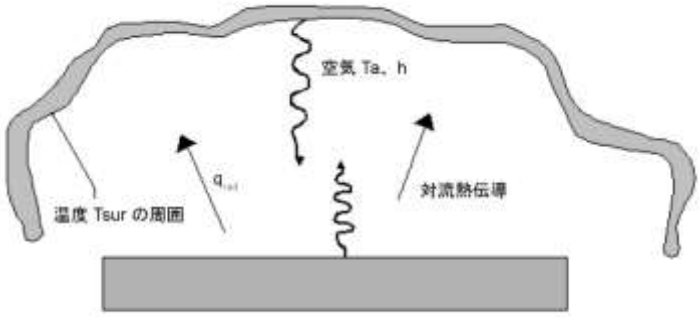
注）強制対流を使用する場合、η は 70% 以下にしてください。

強制対流を利用する際の注意事項

1. 基板実装ヒートシンクは、気流が全体に流れるよう、ジグザグに配置します。
2. ヒートシンクへの気流を遮断しないよう、注意してください。
3. 強制空冷は、自然対流の空気流路に沿って配置します。

3. 放射

放射は、熱エネルギーが電磁波の形で、さまざまな温度で 2 つの表面間で移動することを指します。真空中で最も効率が高くなります。



温度 Ts での放射率 ε の表面および表面積 A

用語と定義

放射	有限温度で物質が放射生成するプロセス
吸収	物質が放射を遮り、内部熱エネルギーに転換するプロセス
黒体	理想的な放射体かつ吸収体
放射率	物質の表面が放出する放射の、同じ温度で黒体が放出する放射に対する比

放射 - （シュテファン・ボルツマンの公式）

$$Q = \varepsilon\sigma Ar(Ts^4 - Ta^4)$$

$$hr = \varepsilon\sigma(Ts + Ta)(Ts^2 - Ta^2)$$

$$\Theta = \frac{1}{hrAr}$$

ここで、

Q = 熱量（W）

ε = 放射率

Ar = 放射表面積（m^2）

Ts = 表面温度（K）

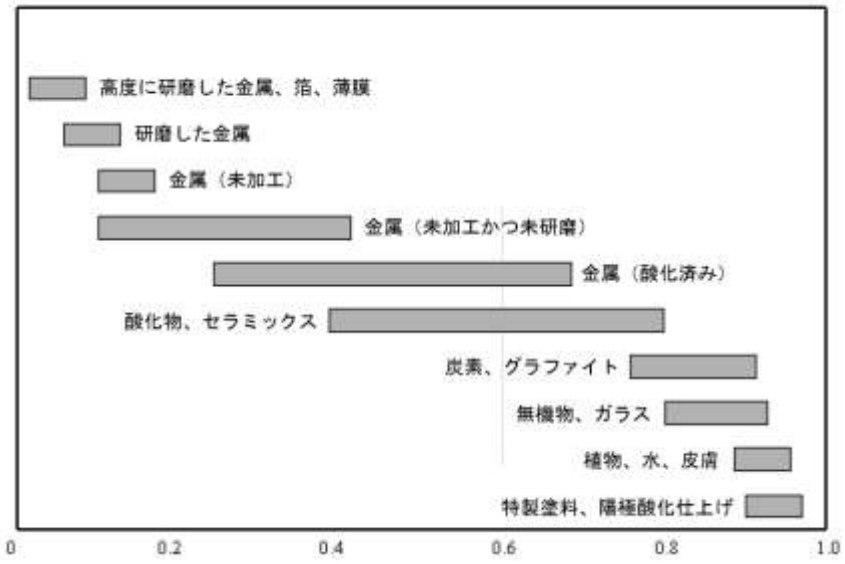
θ = 熱抵抗（°C/W）

σ = シュテファン・ボルツマン定数（5.67×10^{-8} W/m^2K^4）

Ta = 周囲温度（K）

hr = 放射伝熱係数（W/m^2K）

「ε」放射率



さまざまな表面の放射率

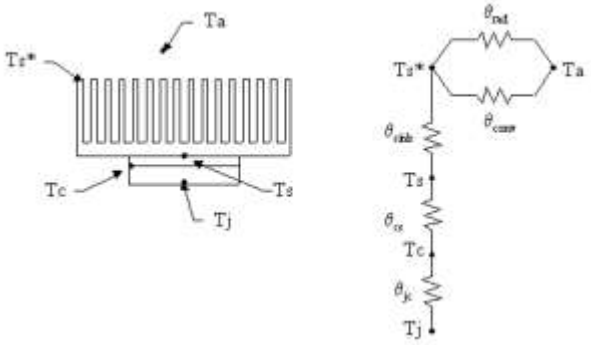
さまざまな表面の代表的放射率

材料 – 表面仕上げ	放射率
アルミニウム – 研磨	0.04
アルミニウム – 未加工	0.06
アルミニウム – 陽極酸化（すべての色）	0.8
銅 – 工業用研磨	0.03
銅 – 面削仕上げ	0.07
銅 – 厚膜酸化物被覆	0.78
鉄鋼 – 圧延薄板	0.55
鉄鋼 – 酸化膜	0.78
ステンレス – 合金 316	0.28
ニッケルめっき – 艶なし	0.11
銀 – 研磨	0.02
ブリキ – 光沢あり	0.04
塗料、ラッカー – すべての色 – 平面仕上げ	0.94
塗料、ラッカー – すべての色 – 艶出し仕上げ	0.89

放射を利用する際の注意事項

1. 表面放射率を最大化します。
2. 表面を遮るものを除外して表面積を最大化します。
3. 放射する表面は、むき出しの表面のみです（表面積すべてではない）。フィンの間の領域は、放射が衝突し合います。
4. 伝導度の高いヒートシンクと界面材料を使用して、ケースから放射表面までの熱抵抗を最小化し、放散表面と周囲の空気の温度差を大きくします。

半導体の放熱



$$\Theta_{ja} = \Theta_{jc} + \Theta_{cs} + \Theta_{sa}$$

$$\Theta_{ja} = \frac{T_j - T_a}{Q}$$

Θ_{jc} = 接合・ケース間

Θ_{cs} = ケース・シンク間

Θ_{sa} = シンク・周囲間

$$\Theta_{sa} = \frac{(\Theta_{conv})(\Theta_{rad})}{(\Theta_{conv} + \Theta_{rad} + \Theta_{sink})}$$

ヒートシンクの適切な選定

必要なヒートシンクを選定する場合、以下のパラメータが必要：

1. Q – 熱量（W）
2. T_{jmax} – 最大許容接合部温度（°C）（メーカーにより提供）
3. Ta – 周囲流体温度（°C）
4. Rθjc – 機器の熱抵抗（メーカーにより提供）
5. Rθcs – 界面材料の熱抵抗
6. 熱伝導抵抗（ρ）、厚さ（t）、接触面積（A） ⟶ $\Theta cs = \frac{(p)(t)}{A}$
7. 自然あるいは強制対流冷却
8. 流速（LFM）（強制対流の場合）

$\Theta ja = \Theta jc + \Theta cs + \Theta sa$

$\Theta sa = \Theta ja - (\Theta jc + \Theta cs)$

$\Theta ja = \frac{(Tj - Ta)}{Q}$

$$\Theta_{sa} = \frac{(T_j - T_a)}{Q} - (\Theta_{jc} + \Theta_{cs})$$

例

TO-220 パッケージ・アウトライン・デバイスは、Tj = 150°C、Ta = 50°C で 4W（Q）の熱を放散しています。
Rθjc = 3.0°C/W（デバイスのデータシートより）

従って、ヒートシンクの熱抵抗（Θ_{sa}）が算出できます。

$$\Theta sa = \frac{(T_j - T_a)}{Q} - (\Theta_{jc} + \Theta_{cs})$$

前提

- 界面材料はシリコン・グリース
- 厚さ 0.002 インチ
- 接触面積 0.36 平方インチ

シリコン・グリースの熱抵抗は以下のとおり：

θcs = **1.13°C/W**

従って、

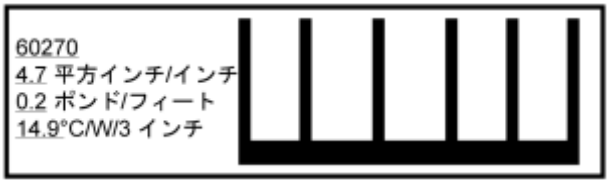
$$\Theta sa = \frac{(150-50)}{4} - (3.0+1.3)$$

θsa = **20.87°C/W** あるいは **温度上昇 = 83.48°C** [4W の場合（θsa*Q）]

従って、

熱抵抗あるいは温度上昇が、それぞれ 20.87°C/W、83.48°C 以下のヒートシンクが必要になります。

押出成形データ



用語と定義

60270	押出成形品の 5 桁の基本部品番号
平方インチ/インチ	押出成形品の断面形状の周辺長は、長さ 1 インチ当たりの外表面積でもあります。性能係数表を用いた熱抵抗（θsa）の予測に使用されます。
ポンド/フィート	1 フィート当たりの押出成形品の重量
°C/W/3 インチ	自然対流で長さ 3 インチの部品を使用した時の理論上の熱抵抗（°C/W）。以下の前提に基づいて算出されます。 - シンク・周囲間 ΔT = 75°C - 黒色陽極酸化仕上げ - 3 インチの部品の中心部に点熱源が 1 つ

温度補正係数

自然対流

ΔT が低下すると、ヒートシンク効率が低下します。

従って、

補正値（°C/W/3 インチ）=（温度補正）×（公表値 °C/W/3 インチ）

温度上昇（ΔTsa）	補正係数
75°C	1
70°C	1.017
60°C	1.057
50°C	1.106
40°C	1.17
30°C	1.257

距離補正係数

伝熱性能公表値

- 自然対流
- 長さ 3 インチの部品
- 中心部に点熱源がある熱負荷

従って、

（距離補正）×（公表値 °C/W/3 インチ）= 補正値（°C/W）

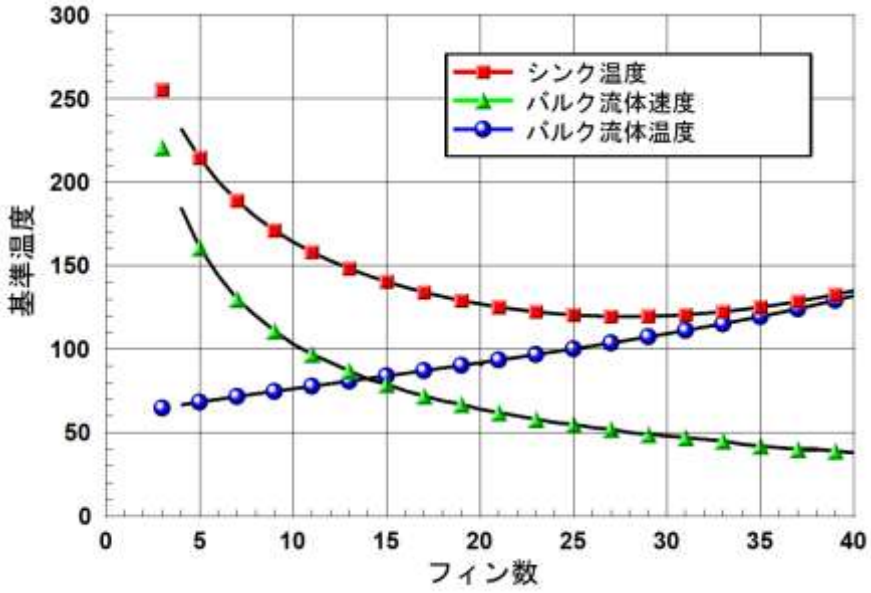
距離	補正係数
1	1.8
2	1.25
3	1
4	0.87
5	0.78
6	0.73
7	0.67
8	0.64
9	0.6
10	0.58
11	0.56
12	0.54
13	0.52
14	0.51
15	0.5

熱モデル化性能

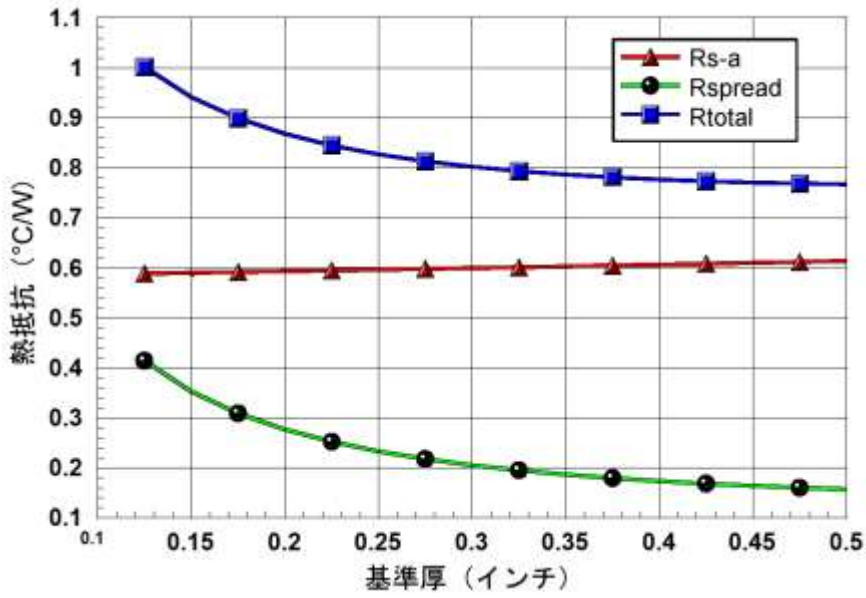
パラメトリック熱解析

1. 自然対流
2. 強制対流
3. 広がり抵抗
4. 過渡分析
5. 冷却板分析

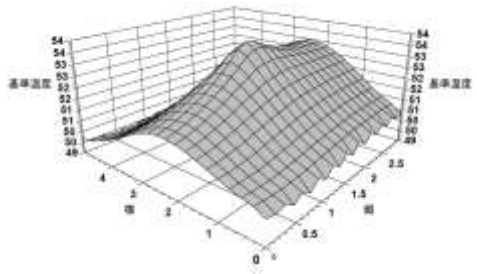
自然対流解析



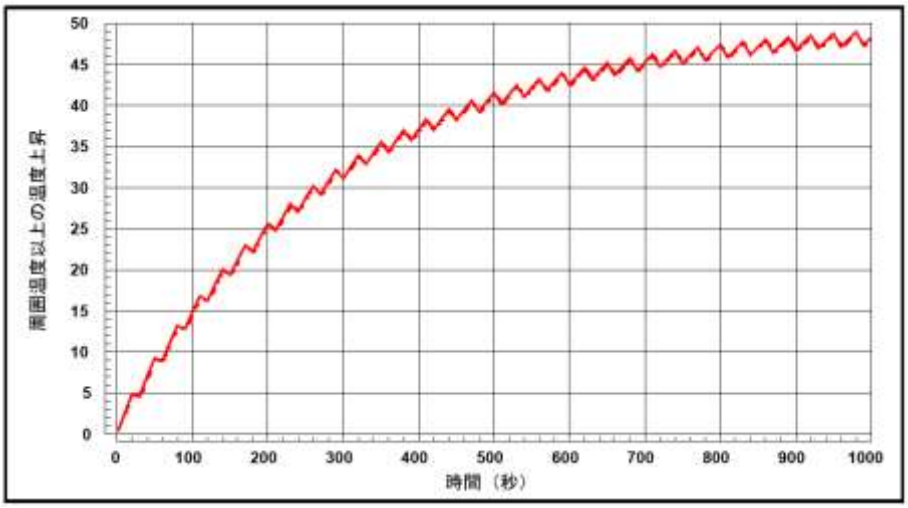
特定の気流で広がりを見せる強制対流



中心部が 15W の平板上の広がり抵抗

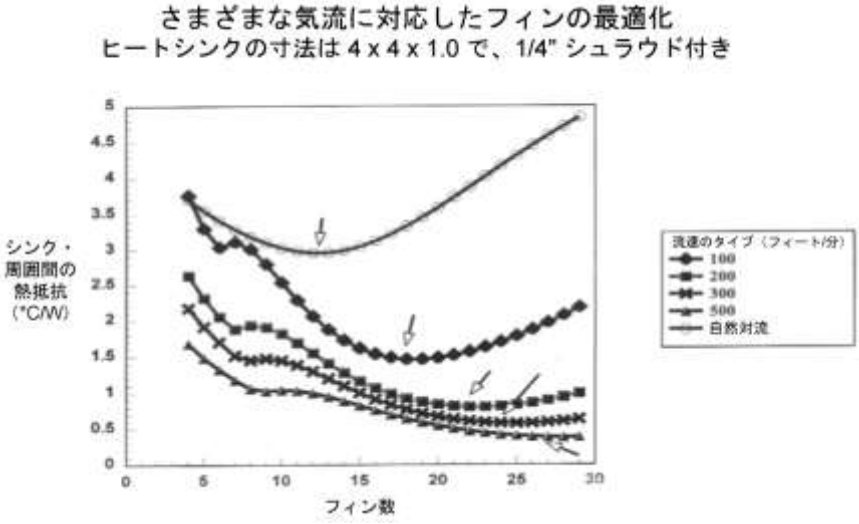


過渡分析負荷サイクル



(0.5°C/W、1.5 ポンド、20 秒間 150W オン、10 秒間 0W、1,000 秒)

設計の最適化



参考文献

「Aavid Thermalloy Thermal Seminar」、Mustafa, S.、カリフォルニア州エルセグンド、2002 年 11 月