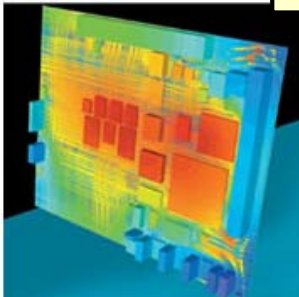




回路・基板設計者のための 失敗しない基板熱設計のポイント

1. 小型部品の放熱経路
2. 部品の熱対策仕分け
3. ヒートシンクと筐体放熱

本資料は書籍「熱設計完全制覇」の内容を抜粋したものです



KOA株式会社 顧問
(株)サーマル デザイン ラボ
国峰尚樹
kunimine@thermo-clinic.com



1. 小型部品の放熱経路

～基板頼りの放熱～

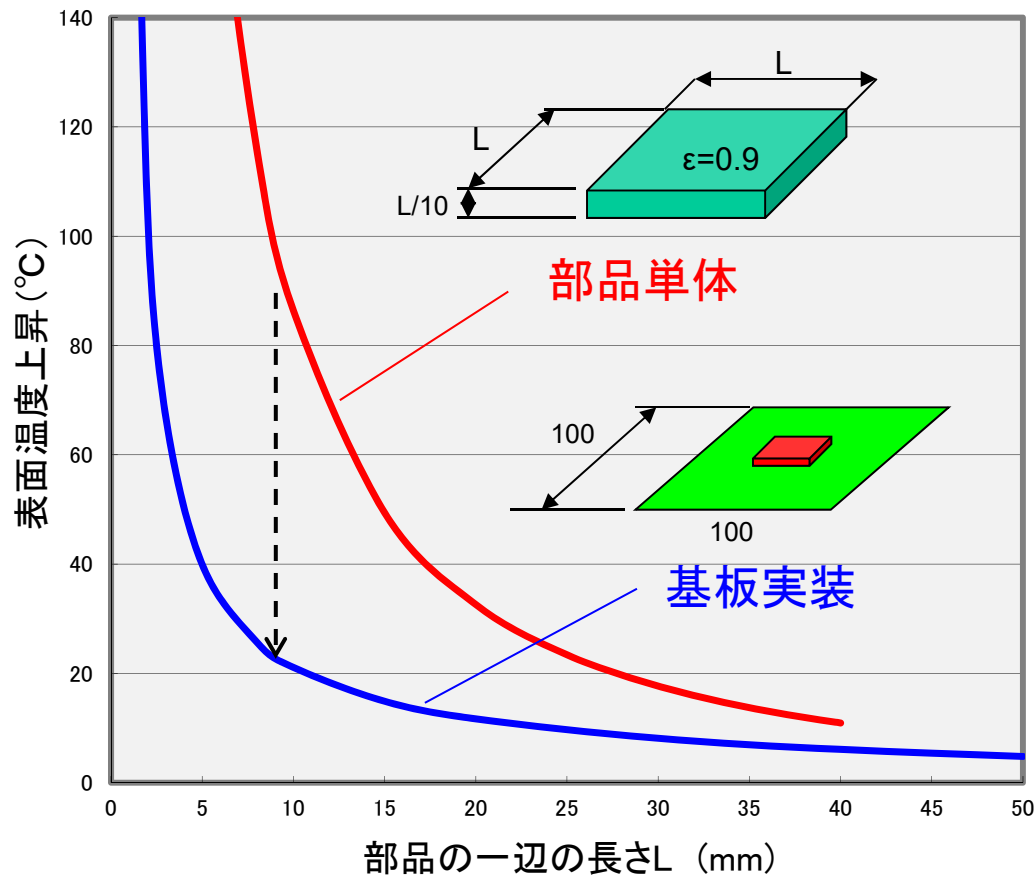
1. 小型部品は「基板放熱」がなければ成立しない

- ・発熱は体積で起こるが放熱は表面からしかできない⇒部品を小型化すると高温になる
- ・しかし基板に小型部品を基板に実装すると基板の助けを借りて放熱するため、温度上昇は抑制される。 小型部品は90%以上が基板を経由して放熱する

解析条件

◆部品 放射率=0.9 発熱量=0.5W
温度均一、自然対流、水平置き
基板間接触熱抵抗 $1\text{K}/(\text{W}\cdot\text{cm}^2)$

◆基板 外形: $100\times 100\text{mm}$
4層板、各層 $18\mu\text{m}$ 、銅箔残存率50%
基板表面放射率0.85



チップ抵抗のサイズと基板への伝導割合

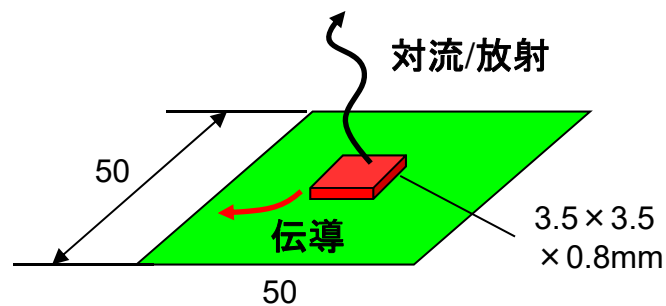
サイズ mm	6332	5025	3225	3216	2012	1608	1005
電力W	1	0.75	0.5	0.25	0.125	0.1	0.063
放射%	2.75	1.55	1.04	0.87	0.35	0.32	0.15
対流%	5.32	3.42	2.41	2.38	1.10	1.08	0.59
伝導%	91.9	95.0	96.6	96.8	98.5	98.6	99.3

※KOA(株)様ご提供

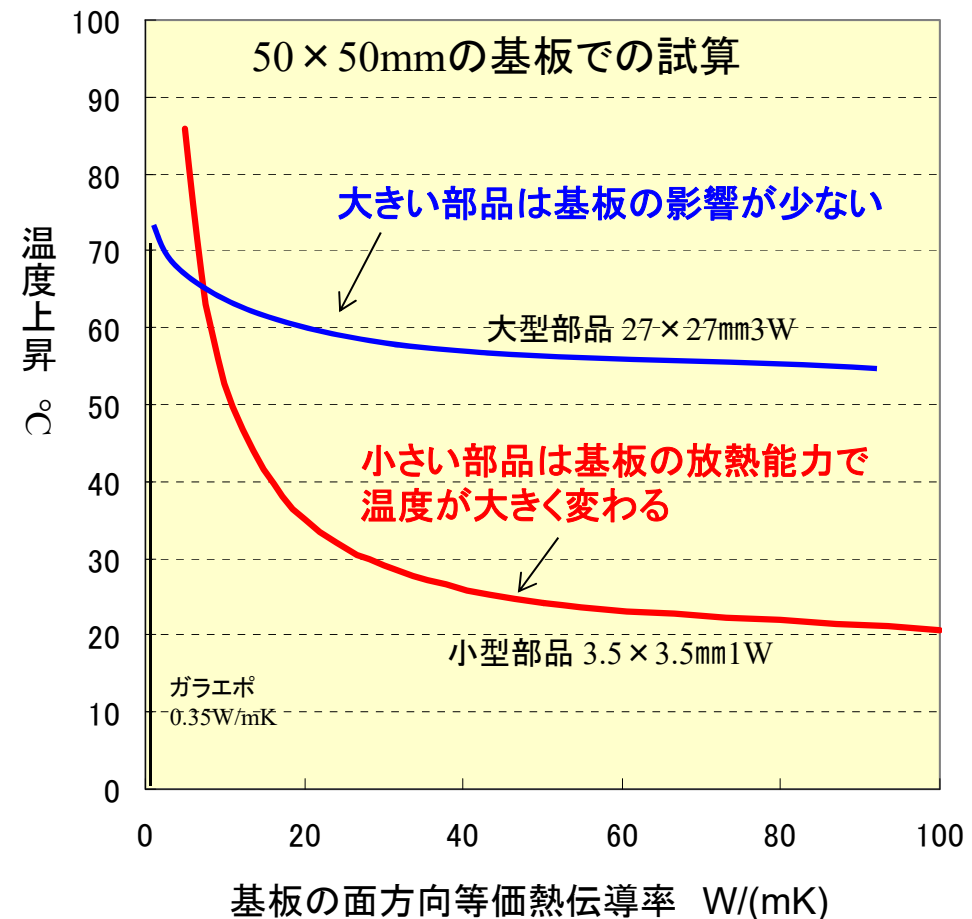
2. 小型部品の温度は「基板の放熱能力」次第

■ 小型部品は基板への放熱が大きいいため、残銅率の増加や厚銅化により、基板の放熱能力(等価熱伝導率)を増大させると温度が下がる。基板の放熱性能によって部品の温度が大きく変わるため、基板の熱設計が重要になっている。

★ 小さい部品は「基板放熱」、 大きい部品は「表面放熱」

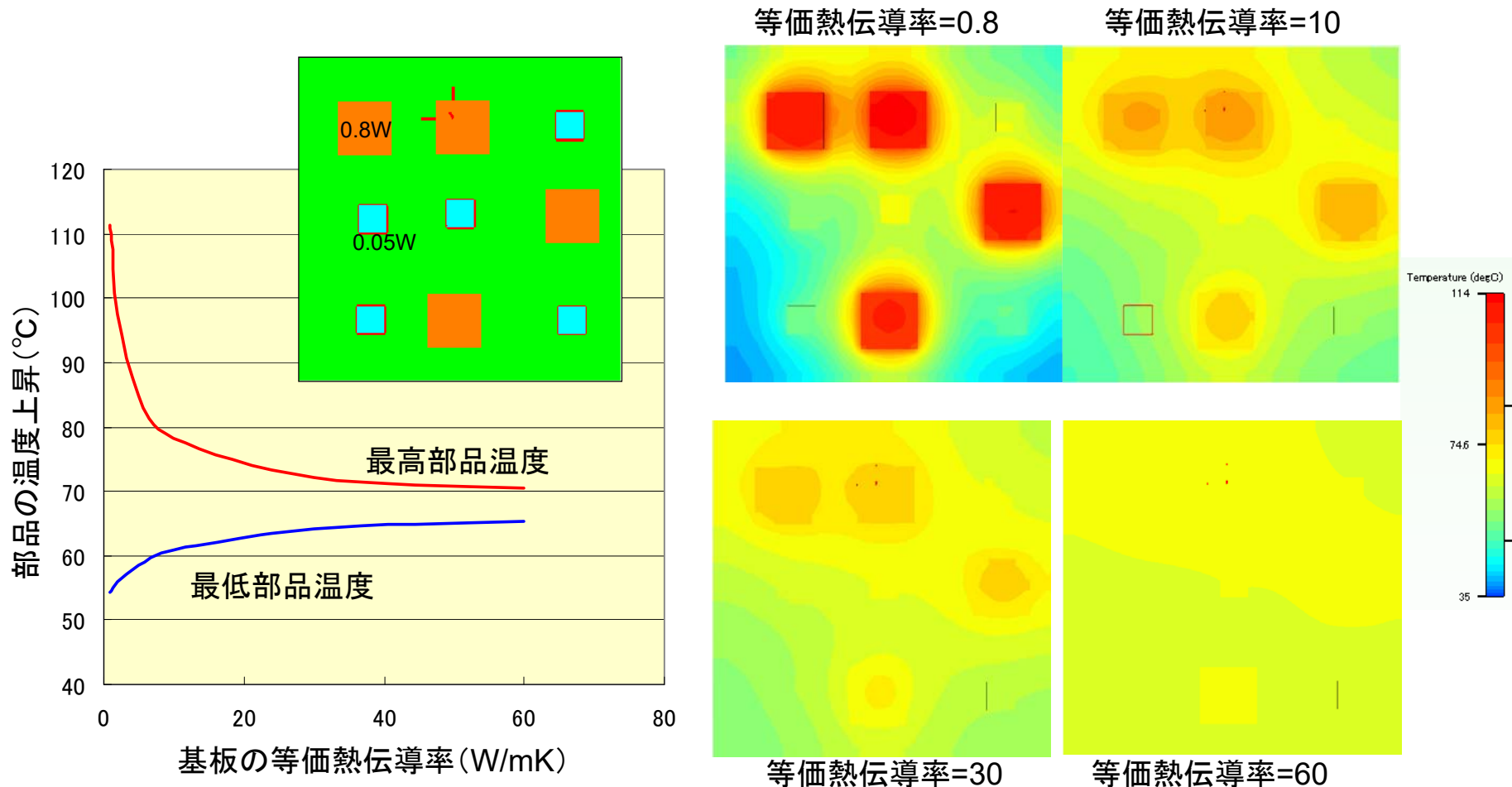


発熱量=1W
部品-基板間熱抵抗=0°C/W
基板板厚=1.5mm 各部放射率=0.8
周囲温度25°C 自然対流、垂直置き



3. 高熱伝導基板は「基板の熱流束」で部品の温度が決まる

- ・基板の等価熱伝導率が大きくなるほど部品温度は均一化され、ほとんど発熱のない部品も温度が上昇する。基板は高発熱部品には放熱板として機能するが、低発熱部品にはヒータとして作用する。
- ・高熱伝導基板では耐熱温度の異なる部品を近接して同一基板に実装すると危険



【補足】 温度上昇は熱流束に比例する

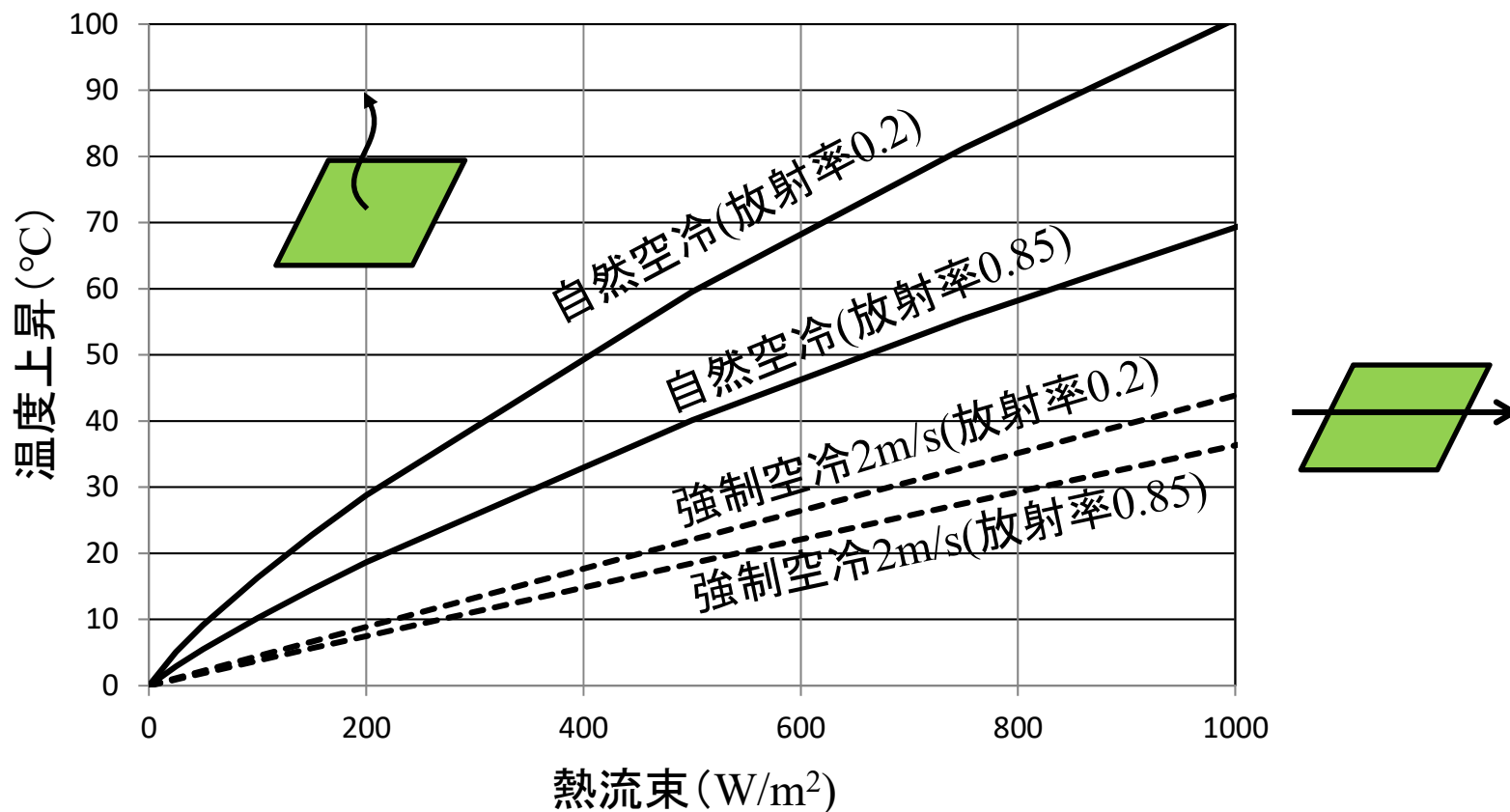
■ 熱流束を計算すれば、温度上昇を概算できる。

温度上昇 = 熱流束 (W/m^2) / 熱伝達率 ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)

なので、冷却条件 (熱伝達率) が変わらなければ温度上昇は熱流束に比例する

平板の熱流束と温度上昇との関係

100mm × 100mm × 1mmの水平置き等温平板で試算、強制空冷では面に平行な風速



2. 部品の熱対策仕分け

失敗しないためには2ステップに分けて基板設計を行う

① マクロ視点の熱設計

熱流束で熱的厳しさを評価し、
熱源分散と熱拡散を図る

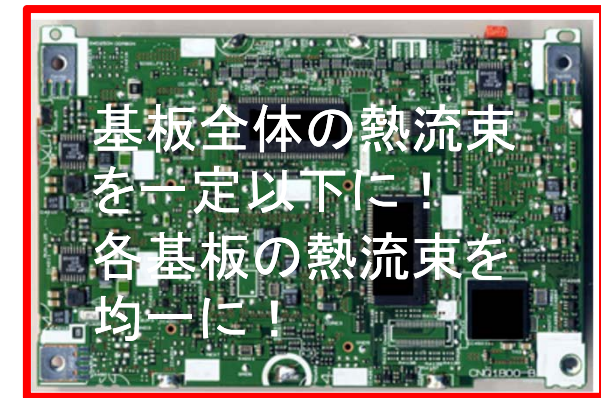
② ミクロ視点の熱設計

部品の目標熱抵抗と単体熱抵抗から
部品の熱対策仕分けを行う

1. 基板の熱は「熱流束」で管理、対策は熱源分散と熱拡散

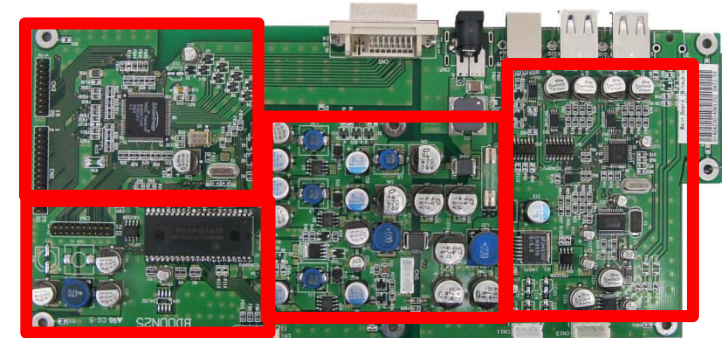
①基板単位の熱流束を確認しよう

熱流束＝搭載部品の総消費電力/基板の表面積
例) 自然空冷基板であれば、300～400W/m²
(この値は製品の条件によって異なる)



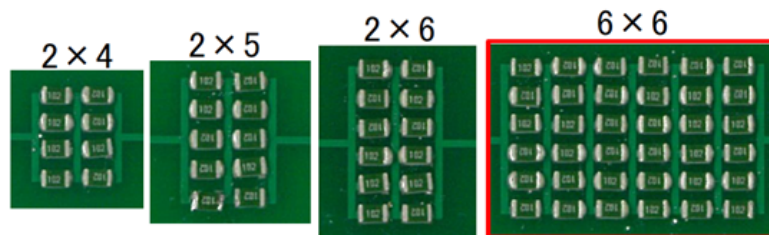
②基板内の熱流束分布を極力均一にしよう

基板の回路ブロックごとに熱流束を計算し、熱流束の分布が均一になるようにブロック面積を調整する(熱源分散)

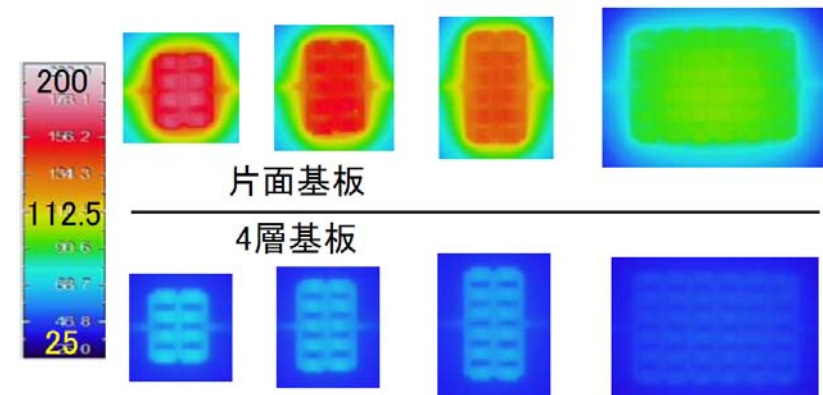


③熱流束が大きい部分は銅箔で「熱拡散」する

熱源が集中してもプリント基板の残銅率が大きければ、熱の拡散で温度は下がる



60×60mmの基板に1W印加。チップ抵抗
8⇒36個に熱源分散すると温度は低下し、
4層板(熱拡散)にするとさらに温度は下がる

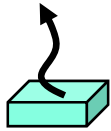


資料提供: KOA株式会社

2. 部品の危険度を目標熱抵抗と単体熱抵抗で判断する

■「ニュートンの冷却法則」

$$W = S \times h \times (T_c - T_a)$$



媒質中の固体が冷却される
様子を表す経験式

W: 伝熱量 (Watt)、S: 物体の表面積 (m²)

T_c: 物体の表面温度 (°C) T_a: 周囲温度 (°C)

h: 熱伝達率 (W/m²K)

$$h = \begin{cases} \sim 15 (\text{W/m}^2\text{K}) & \text{自然空冷} \\ \sim 90 (\text{W/m}^2\text{K}) & \text{強制空冷} \end{cases}$$

設計の観点から上式のパラメータを2つに分類し、左辺と右辺に分ける

①仕様で指定されるもの(自分で決められないもの) : ⇒左辺へ

発熱量W、許容温度T_c、周囲温度(使用温度上限)T_a

②設計変数として使えるもの(自分で決められるもの): ⇒右辺へ

表面積S、熱伝達率 h

<機器/部品の要件>

所定の環境T_a°C下で
W(ワット)発熱した時に
T_c°C以下であること

目標熱抵抗

対策熱抵抗

$$\frac{T_c - T_a}{W} = \frac{1}{S \times h}$$

<実現手段>

表面積を大きくする、
熱伝達率を大きくする
ことのみが実現手段

この等号を成立させることが熱設計

3. まず自己冷却「可能」か「不能」かを判別する

■前頁の表面積 S に部品が持つ固有表面積 S_p を代入する

$$\frac{T_c - T_a}{W} \geq \frac{1}{S_p \times h}$$

これが成立する部品は自己冷却可能
左辺を目標熱抵抗(要求されるもの)
右辺を単体熱抵抗(持っているもの) と呼ぶ

■危ない部品＝自己冷却不能な部品

単体熱抵抗が目標熱抵抗よりも大きい部品は自分で自分を冷やせない部品

$$\frac{T_c - T_a}{W} < \frac{1}{S_p \times h}$$

この大小関係の判定式により、危険な部品を見分けることができる



■危ない部品への熱対策

$$\frac{T_c - T_a}{W} = \frac{1}{(S_p + S_a) \times h}$$

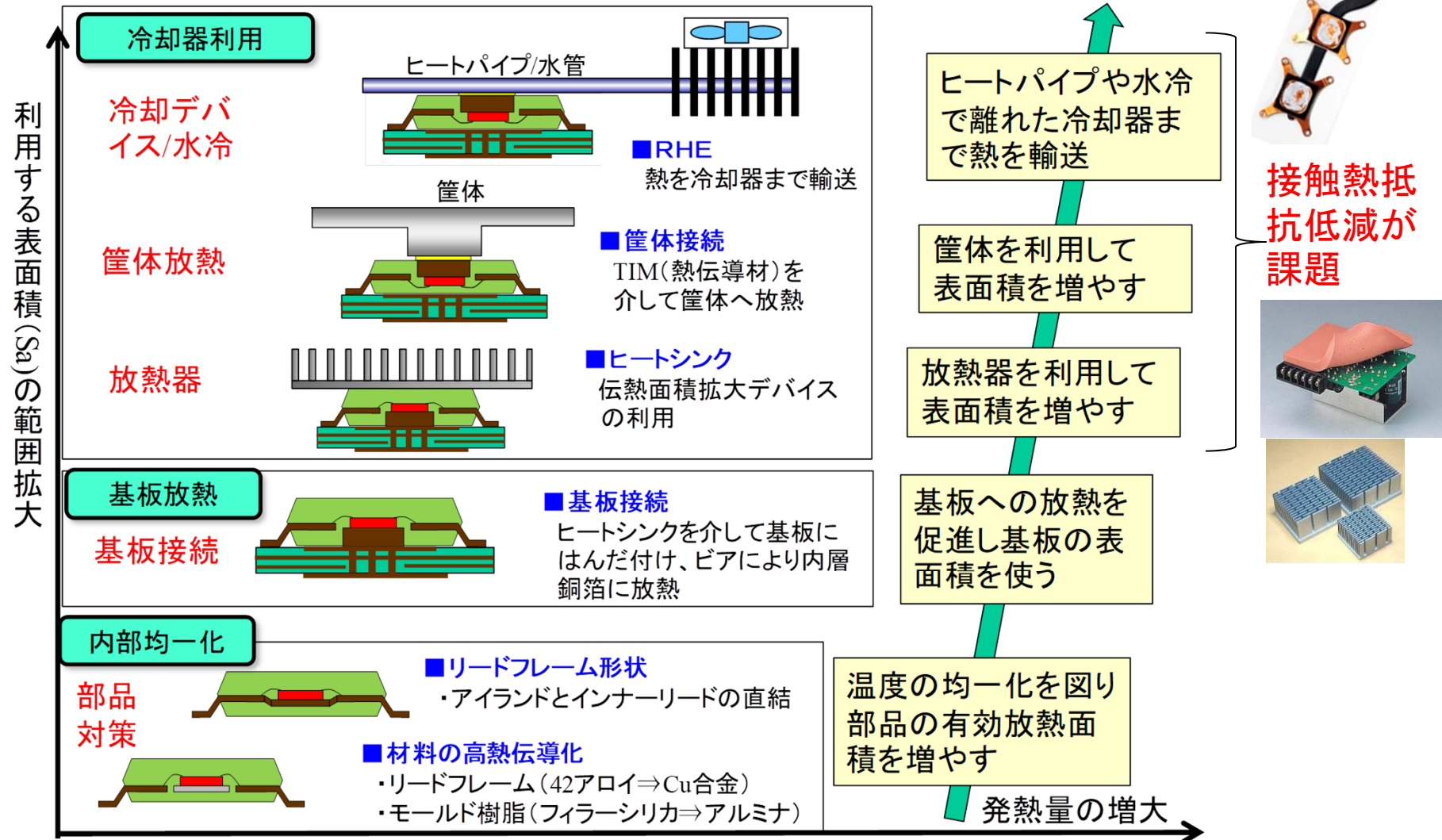
部品自身の表面積だけで条件を満足できない部品では、固有表面積 S_p に何らかの形で追加表面積 S_a を加えて対策する

S_a :追加表面積

4. 発熱の大きい部品ほど多くの表面積を利用する

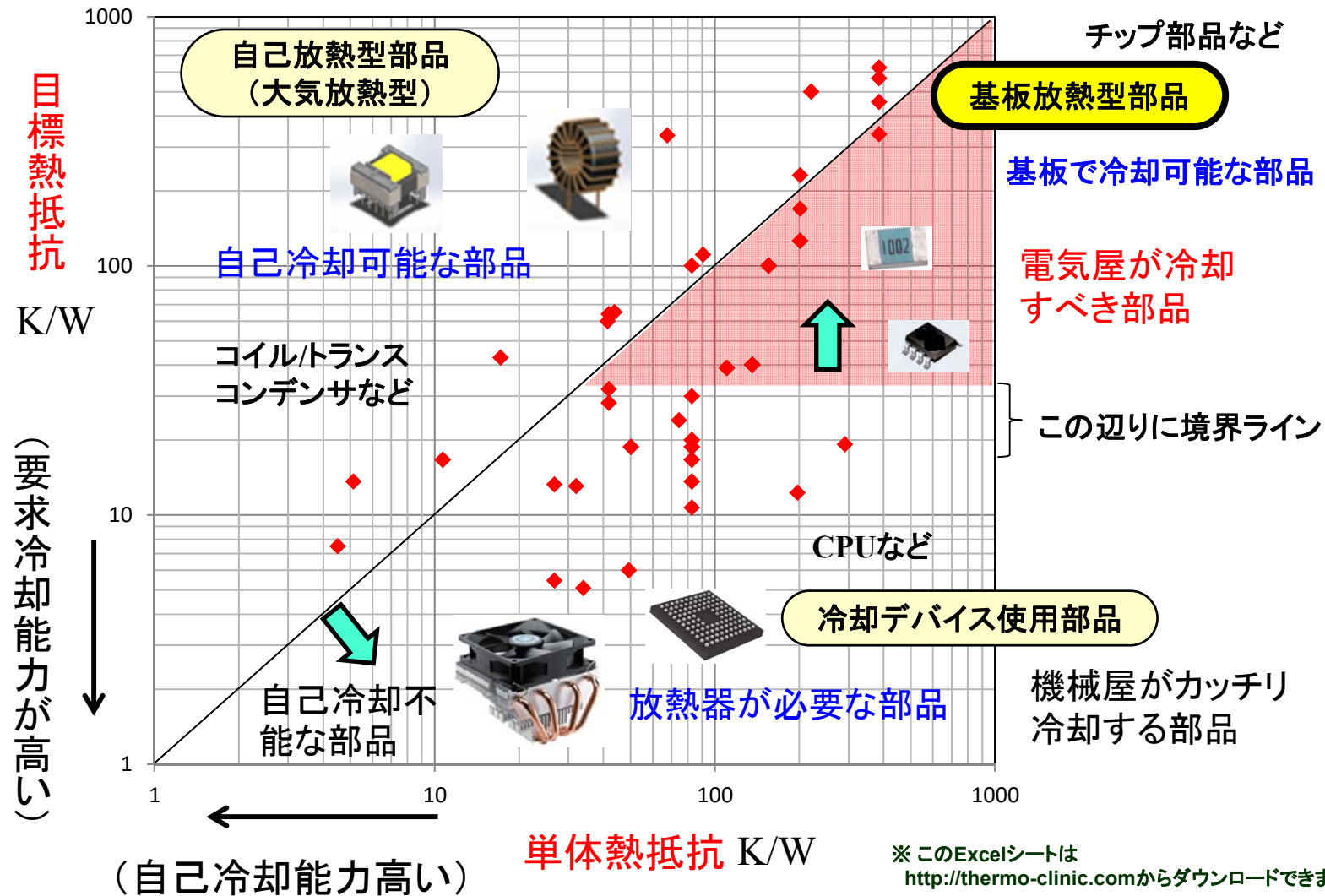
$$\frac{T_c - T_a}{W} = \frac{1}{(S_p + S_a) \times h}$$

固有の表面積 S_p で不足する場合何らかの方法で表面積 S_a を付加して対策する



5. 部品を目標・単体熱抵抗で3分類する

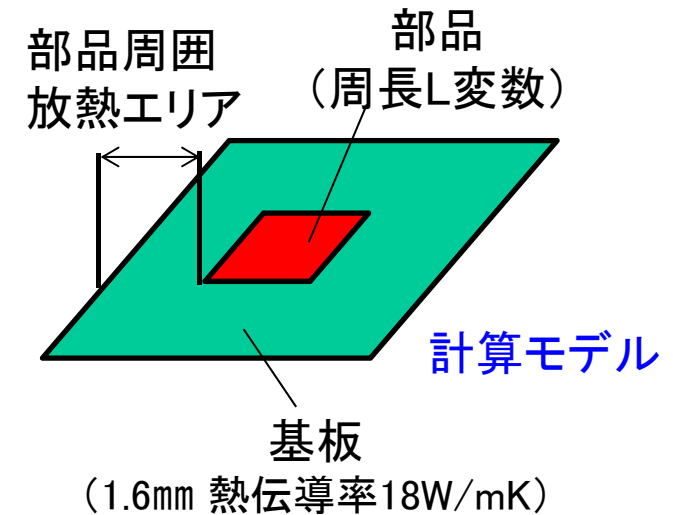
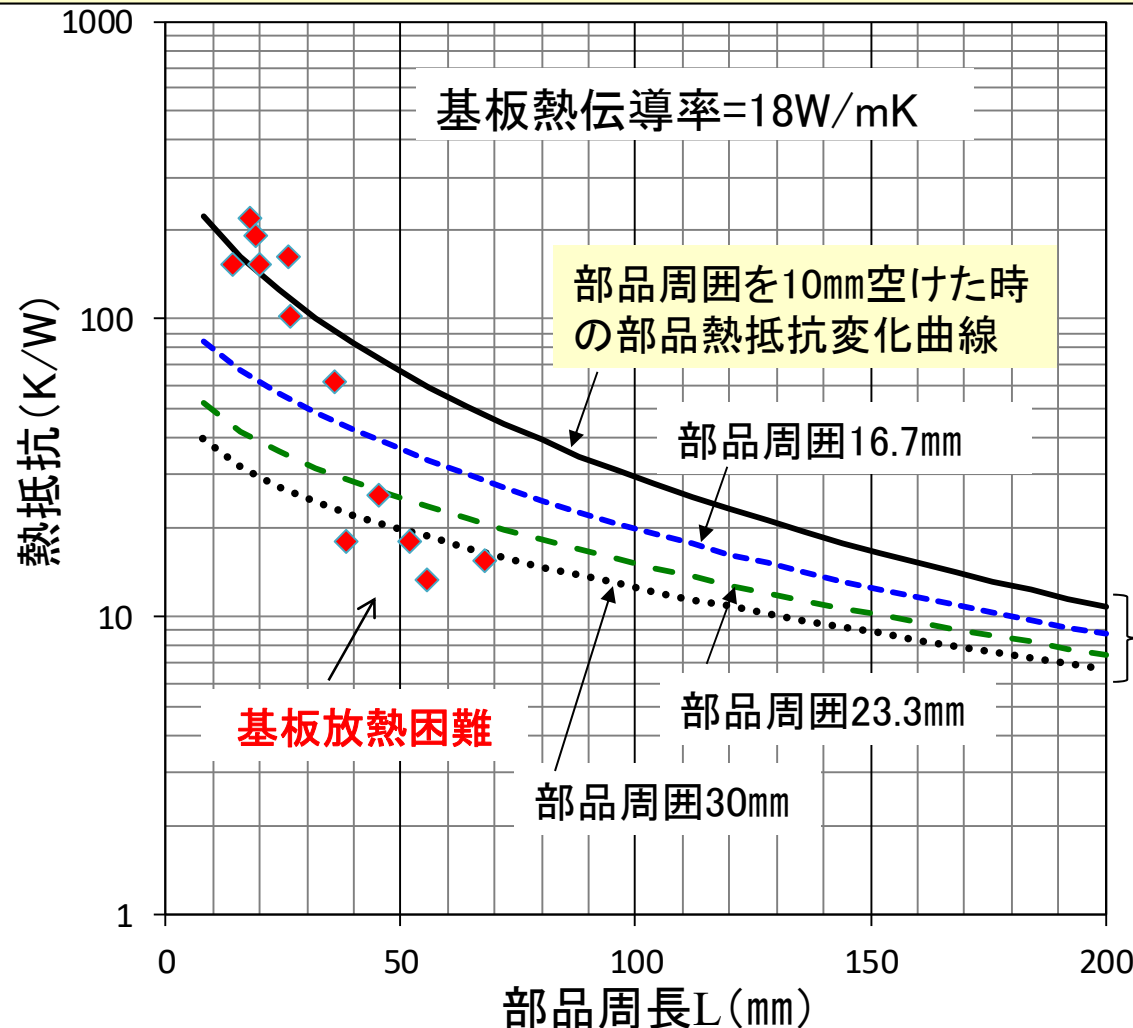
■実製品部品をマッピングしてみると下図のように3領域に分けられる。
まず自己冷却可能部品と不能部品、自己冷却不能部品は基板で対策可能な部品と不可能な部品に分けられる。ここから対策の仕分けを行う



6. 基板放熱可能かどうかを見極める

■ 部品を基板で冷却するには、基板を経由する熱抵抗が小さくならない。

- ・ 部品の周囲に十分な放熱スペースが空いている ⇒ 部品周囲の放熱領域
- ・ 部品がある程度大きい(周長 L が大きい) ⇒ 部品周長 L
- ・ プリント基板の残銅率が高い ⇒ 等価熱伝導率 λ_e



この線より上であれば基板放熱
下であれば放熱器対策

※ 基板水平置き自然対流、両面冷却
放射率 0.85、
周囲温度 59.28°C (前記機器内部温度)
熱伝達率は部品許容温度で計算
等価熱伝導率18W/mK

※ このExcelシートは
<http://thermo-clinic.com>からダウンロードできます

3. ヒートシンクと筐体放熱

基板放熱では対策できない部品はヒートシンクや筐体の表面積を使って放熱する。
ヒートシンクの最適化と接触熱抵抗の低減がポイントになる。

1. ヒートシンクの熱抵抗は3つある

■ヒートシンクの熱抵抗は3つの要素から構成される

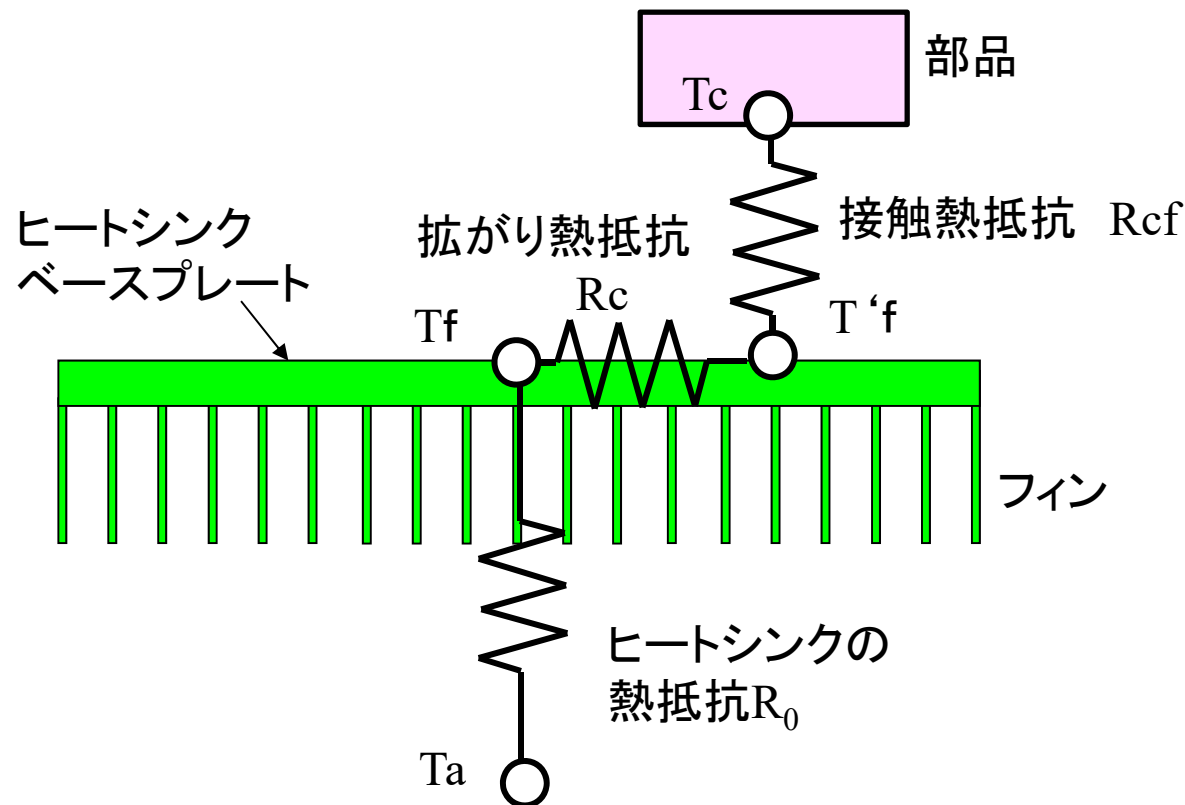
1) ヒートシンクフィンの部分の熱抵抗 R_0

2) ヒートシンクベース面の拡がり熱抵抗 R_c

3) 部品とヒートシンクの接触熱抵抗 R_{cf}

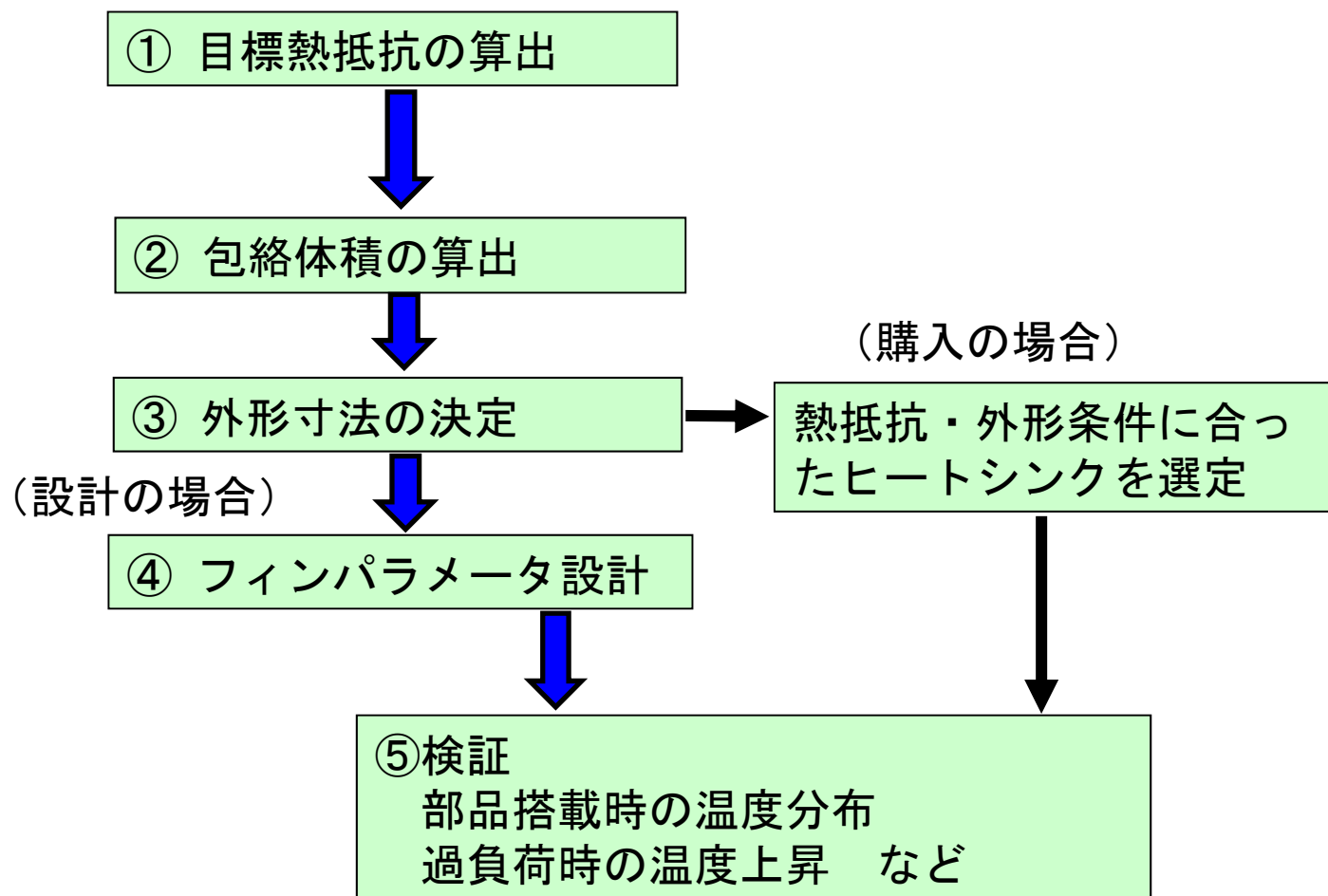
ヒートシンク屋が使う熱抵抗は1)のみである。

2)、3)は実装方法によって発生する熱抵抗なので、ユーザ責任範囲となる



2. 自然空冷ヒートシンクの設計・選定手順

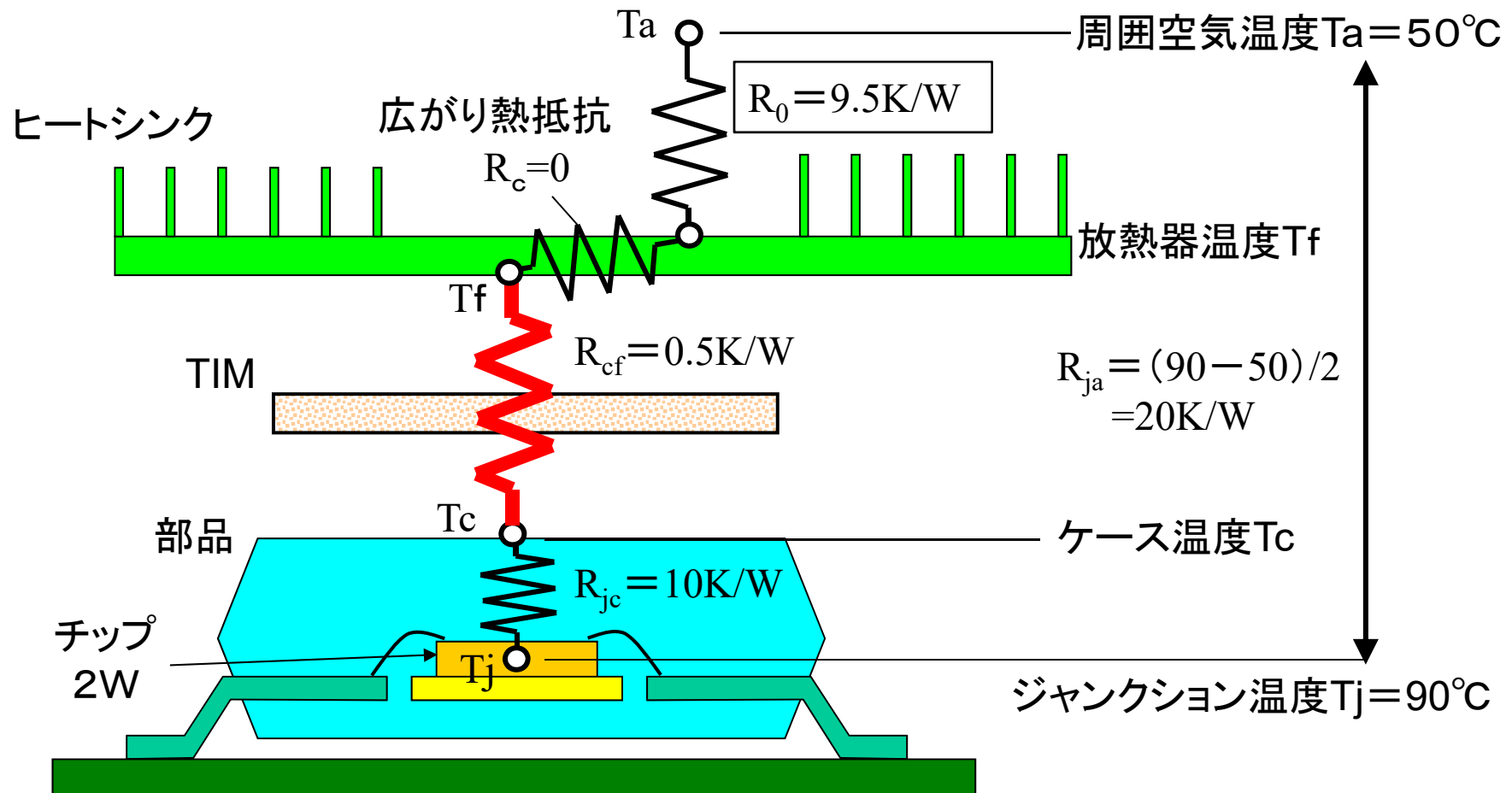
■自然空冷ヒートシンクは形状でその性能が決まるため、設計・選定手順はシンプルである。下記の手順に従って作業を進めればよい。



3. 目標熱抵抗の決定

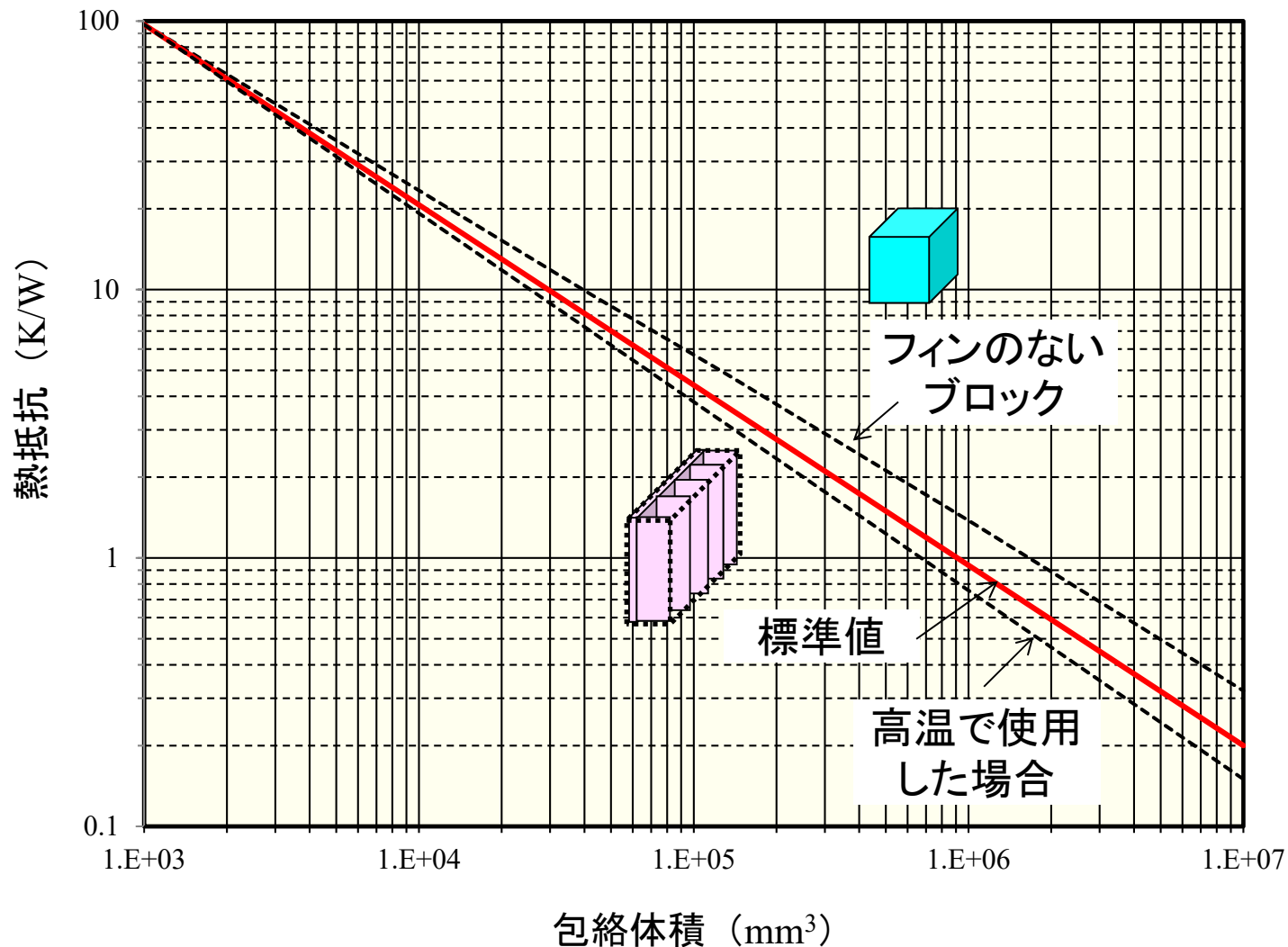
冷却対象部品を周囲温度 50°C で使用し、最大 2W 発熱した時に、ジャンクション温度を 90°C 以下にしたい。最初にヒートシンクの目標熱抵抗 R_0 を計算する。

目標熱抵抗から大きさ(包絡体積)を求め、寸法を決めればよい
(ここでは拡がりの熱抵抗 R_c は0としています)



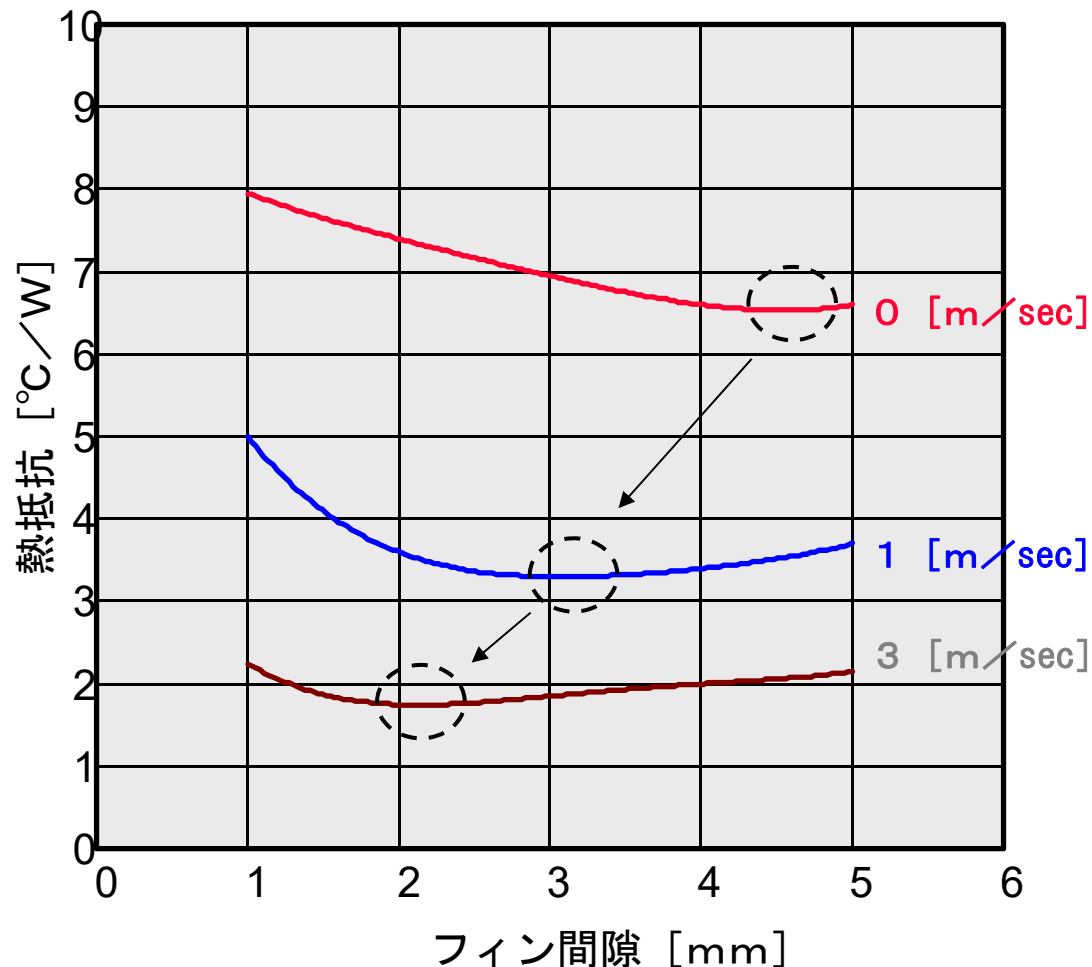
4. フィンの熱抵抗 R_0 は「包絡体積」でおおよそ決まる

自然空冷ヒートシンクはその大きさ(包絡体積)と熱抵抗が密接した関係にある
外形寸法で概ね熱抵抗が決まる。



5. フィン枚数の最適化

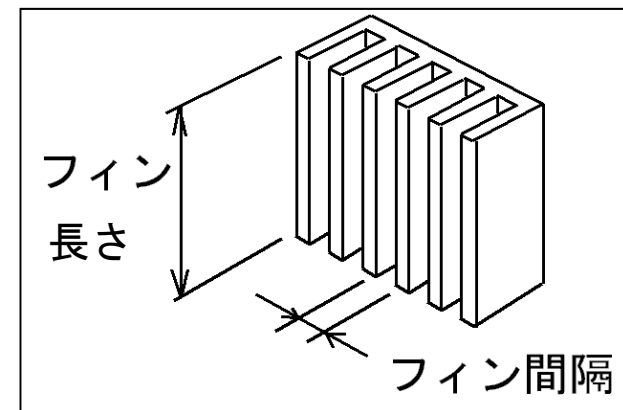
ヒートシンクはその使用風速に応じた最適なフィン間隔が存在する
一般に風速が速いほど最適間隔は狭くなる。設計時には最適間隔を選択する



最適フィン間隔は下式で概算できる。

最適フィン間隔

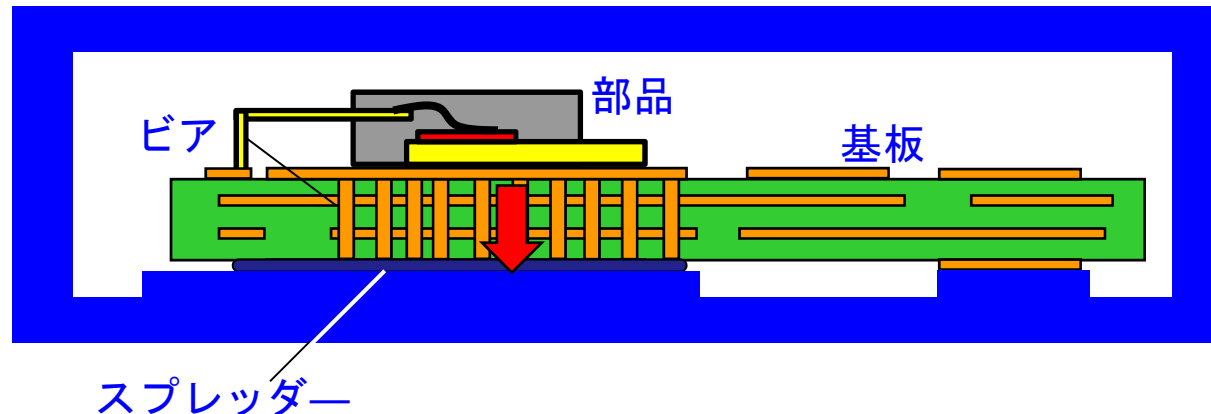
$$= 5 \times \left(\frac{\text{フィン長さ (mm)}}{\text{熱抵抗} \times \text{発熱量}} \right)^{0.25}$$



6. 密閉機器の筐体放熱では接触熱抵抗低減が鍵

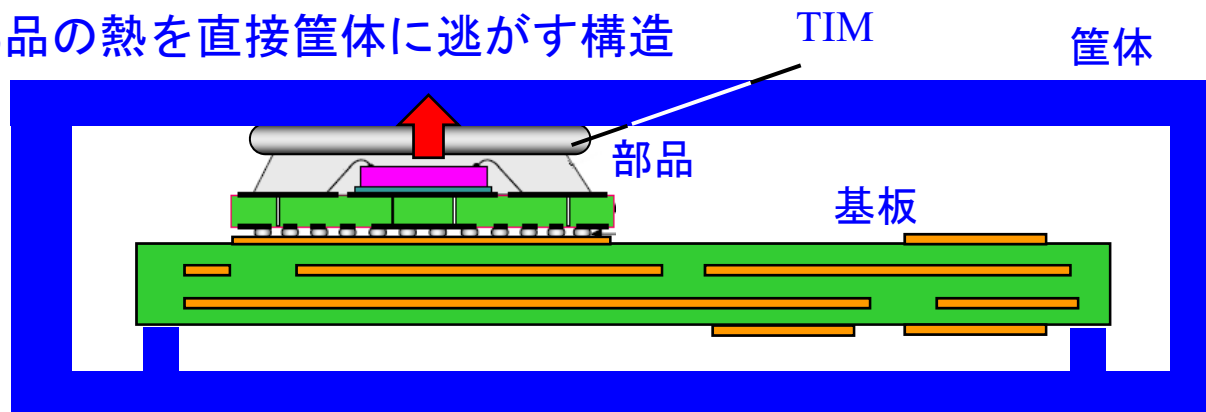
- 高密度実装基板では基板の面内放熱が困難になるため、上下から熱拡散する
- 上側に逃がすか下側に逃がすかは、部品の種類(ICかパワー部品か)等で変わる

部品の熱を基板を経由して筐体に逃がす構造



- ・ 部品の熱を裏面に導き、裏面側より筐体に接触させて放熱する方法
- ・ 配線やビア、TIMのトータル熱抵抗を最小化しなければならない
- ・ 裏面への部品搭載不可
- ・ 基板に熱が逃げやすいパワー部品で有効

部品の熱を直接筐体に逃がす構造



- ・ 部品を直接TIM（放熱シート）を介して筐体に接触させる方法
- ・ 接触圧力が小さく、軟らかいTIMを使うことから接触熱抵抗が大きくなりやすい。
- ・ 複数部品を接触させるには段差吸収が必要
- ・ 上面に熱が逃げやすい大型集積回路部品向き

7. 接触熱抵抗低減のためには適切なTIMを使用する

■ 製品に応じて適切なTIMを選定する

Thermal Interface Materials	接触熱抵抗 ($\text{K} \cdot \text{cm}^2/\text{W}$)	記事	イメージ
サーマルグリース	0.2～1	最も歴史のあるTIM 均一に塗布するには治具が必要 ポンプアウト/オイルブリード等には注意が必要	
熱伝導シート	1～3	絶縁性がある。取扱い容易 高硬度と低硬度品がある 高硬度品は数100kPaの圧力が必要	
PCM (相変化材料)	0.3～0.7	融点50～80℃のワックス 予めデバイスやヒートシンクに塗布できるがリワークは困難	
ゲル	0.4～0.8	グリースに似ているがキュア(硬化)できる	
高熱伝導接着剤	0.15～1	強度信頼性に優れる リワークは困難	
サーマルテープ	1～4	熱伝導性の両面接着テープ ヒートシンク接着などに使われる	

◆熱設計手法や常套手段

- ①入門 : 国峰、藤田、鳳 共著: トコトンやさしい熱設計の本、日刊工業
- ②初心 : 国峰尚樹; エレクトロニクスのための熱設計完全入門、日刊工業 1997年
- ③中堅 : 国峰尚樹: エレクトロニクスのための熱設計完全制覇、日刊工業 2018年

◆ Excelを使った数値計算(熱回路網法)

- ④国峰尚樹、中村篤;

熱設計と数値シミュレーション”、オーム社、2015年

◆熱流体解析高精度化のためのモデリング手法

- ⑤国峰尚樹 編著; 電子機器の熱流体解析入門第2版、日刊工業新聞社、2015年

◆熱設計向けExcelソフトのダウンロード

- ⑥熱設計何でも相談室ホームページ(<http://thermo-clinic.com>)

(株)サーマルデザインラボ

- ⑦熱回路網法ソフトのダウンロード(熱設計と数値シミュレーションDLサイト)

<http://www.ohmsha.co.jp/data/link/978-4-274-21731-9/>

