九州大学学術情報リポジトリ Kyushu University Institutional Repository

ベアチップ冷却用平板型ヒートスプレッダーに関す る研究:チップ最高温度に及ぼす熱源およびチップ サイズの影響

富村, 寿夫 九州大学機能物質科学研究所

https://doi.org/10.15017/7939

出版情報:九州大学機能物質科学研究所報告.15(1), pp.73-77,2001.九州大学機能物質科学研究所 バージョン: 権利関係:

# ベアチップ冷却用平板型ヒートスプレッダーに関する研究 (チップ最高温度に及ぼす熱源およびチップサイズの影響)

## 富村寿夫

# Study on Plate Type Heat Spreader for Bare Chip Cooling (Effects of Heat Source and Chip Sizes on Maximum Chip Temperature)

## **Toshio TOMIMURA**

Numerical simulations are conducted on heat transfer in a plate type heat spreader for bare chip cooling. The simulation is concerned with a steady state two-dimensional heat conduction problem for a four- and a two-layer circular plates system, which correspond to the simplified models for the [chip]-[thermal interface material A]-[heat spreader]-[thermal interface material B] system, and the [chip]-[thermal interface material] system without a heat spreader for comparison. From a series of numerical calculations, the effects of heat source and chip sizes on the maximum chip temperature  $T_{max}$  are clarified, and a simple correlation equation to predict  $T_{max}$  is proposed on the basis of the equivalent heat source radius  $r_{ea}$ .

#### 1. 緒 言

電子機器に搭載された高発熱素子の冷却方法として、 マルチフィンタイプ熱伝導体<sup>(1),(2)</sup>、プレート型ヒートパ イプ<sup>(3)</sup>、矩形ヒートスプレッダー<sup>(4),(5)</sup>、CVD ダイヤモン ドヒートスプレッダー<sup>(6)</sup>などが提案されている。本研究 では、モジュール上のベアチップの冷却手段として、高 熱伝導率のヒートスプレッダー板を用いた場合について、 二次元の円筒モデルに基づく数値解析を行った。

これまでに、[ベアチップ] - [熱的介在物質]から成る 二層モデルおよび[ベアチップ] - [熱的介在物質 A] - [ヒ ートスプレッダー] - [熱的介在物質 B]から成る四層モデ ルを用いた一連の解析結果から、ヒートスプレッダーが 本来の機能を果たすために必要な条件とそのメカニズム を明らかにするとともに、ヒートスプレッダーの厚さに はチップ最高温度 *T<sub>max</sub>* を極小化する最適値が存在するこ とを示した<sup>(1)</sup><sup>(8)</sup>。また,具体的な例について、ヒートス プレッダーの最適厚さが得られるための条件を示し<sup>(1)</sup>、

受理日 2001 年 6 月 7 日 本論文を名誉教授 西村幸雄先生に献呈する. さらに、チップ最高温度 T<sub>max</sub> は熱源半径 r<sub>s</sub> 並びにチップ 半径 r<sub>c</sub>の増大とともに単調に低下することを例示した<sup>(8)</sup>。

本報では、チップ最高温度  $T_{max}$ に及ぼす熱源半径  $r_s$ 並 びにチップ半径  $r_c$ の影響をより詳細に検討するために、  $r_c$ を 3.4、6.8、11.3 mm (6、12、20mm<sup>D</sup>矩形断面チップ に対応)、 $r_s$ を 1.7 mm ~  $r_c$ の範囲で変化させた一連の 数値解析結果について報告する。さらに、それらの結果 に基づき等価熱源半径  $r_{eq}$ を導入し、チップ最高温度  $T_{max}$ の簡易予測式を提案し検討した結果についても報告する。

記号

h	:厚さ	[m]
Κ	:熱コンダクタンス	[W/K]
Q	:発熱量	[ <b>w</b> ]
r	:半径、半径方向座標、Figs.1,2	[m]
Т	:温度	[°C]
z	:軸方向座標、Figs.1,2	[m]
ギリシャ文字		
$\Delta r$	:半径方向座標キザミ、Fig.2	[m]
$\Delta z$	:軸方向座標キザミ、Fig.2	[m]
λ	:熱伝導率	[W/mK]
下付き添字		
	1. 1. 2. 2. 5	

a :ヒートシンク

第15巻 第1号(2001)

с	:チップ	
Ε	:格子点(i, j)、(i+1, j)間、Fig.2	
eq	:等価	
f	: コンパウンド(熱的介在物質)	
hsp	:ヒートスプレッダー	
i	:半径方向格子点、Fig.2	
j	:軸方向格子点、Fig.2	
max	:最大值	
N	:格子点( <i>i, j</i> )、( <i>i, j</i> +1)間、Fig.2	
n	:指数、式(9)	
p	:高熱伝導物質(熱的介在物質)	
S	:格子点( <i>i, j</i> )、( <i>i, j-</i> 1)間、Fig.2	
S	:熱源	
W	:格子点( <i>i, j</i> )、( <i>i-</i> 1, <i>j</i> )間、Fig.2	
2	: ヒートスプレッダーが無い場合(二層モデル)	
4	: ヒートスプレッダーが有る場合(四層モデル)	
上付き添字		
k	:反復回数	
*	:交点	

#### 2. 数 値 解 析

ここでは矩形断面チップを等価な円形断面チップで置 き換え、三次元問題を二次元化し解析の簡略化を行った。 この簡略化によるチップ最高温度に及ぼす影響は現われ ないことを予め確認している。

物理モデルと座標系の例を Figs. 1(a), (b)に示す。Fig.1 (a)の二層モデルは、半径  $r_s$ の底面部領域が局所的に  $Q_s$ で発熱する半径  $r_c$ 、厚さ  $h_c$ 、熱伝導率  $\lambda_c$ のベアチップを、 熱的介在物質として厚さ  $h_f$ 、熱伝導率  $\lambda_f$ のコンパウンド 層を介して温度  $T_a$ のヒートシンクに接続し冷却した場合 を示す。一方、Fig.1(b)の四層モデルは、チップ最高温度  $T_{max}$ の低減をはかるためにチップとコンパウンド層の間 に厚さ  $h_{hsp}$ 、熱伝導率  $\lambda_{hsp}$ のヒートスプレッダー板を挿入 し、ヒートスプレッダーとチップ間の熱的介在物質とし て厚さ  $h_p$ 、熱伝導率  $\ddot{e}_p$ の高熱伝導体層(例えばハンダ付



Fig.1 Examples of physical model and coordinate system

けなどの金属接合)を用いた場合の例を示す。なお、いずれの系も周囲は断熱されているとした。

解析には二次元円筒座標系で表されたネットワーク法 を適用した。Fig.2を参照すると、各層内での離散化され た格子点(*i*, *j*)の温度 *T*<sub>i</sub>, は次式で与えられる。

$$T_{i,j} = \frac{K_E T_{i+1,j} + K_W T_{i-1,j} + K_N T_{i,j+1} + K_S T_{i,j-1}}{K_E + K_W + K_N + K_S}$$
(1)

ここで、 $K_E$ 、 $K_W$ 、 $K_N$ および  $K_S$ は熱コンダクタンスであり、次式で表される。

$$K_E = \lambda_E \frac{2\pi r_i \Delta z_j}{(\Delta r_i + \Delta r_{i+1})/2}, \quad K_W = \lambda_W \frac{2\pi r_{i-1} \Delta z_j}{(\Delta r_{i-1} + \Delta r_i)/2} \quad (2)$$
$$K_N = \lambda_N \frac{2\pi r_{i-1} \Delta r_i}{(\Delta z_j + \Delta z_{j+1})/2}, \quad K_S = \lambda_S \frac{2\pi r_{i-1} \Delta r_i}{(\Delta z_{j-1} + \Delta z_j)/2}$$

境界条件に関しては、Fig.1(a)を例として示すと、次式で与えられる。

$$r = 0, 0 < z < h_c + h_f : \partial T/\partial r = 0$$
  

$$r = r_c, 0 < z < h_c + h_f : \partial T/\partial r = 0$$
  

$$0 \le r < r_s, z = 0 : -\lambda_c \partial T/\partial z = Q_s/\pi r_s^2$$
(3)  

$$r_s \le r \le r_c, z = 0 : \partial T/\partial z = 0$$
  

$$0 \le r \le r_c, z = h_c + h_f : T = T_a$$

半径(r)方向と軸(z)方向の分割数は、条件に応じて、そ れぞれ、20~134、15~63 分割とした。また、収束判定 条件として、次式を与えた。

$$\left| T_{i,j}^{k} - T_{i,j}^{k-1} \right|_{\max} / T_{0,0}^{k} \le 2.0 \times 10^{-7}$$
<sup>(4)</sup>

ここで、*k* は反復回数、*max* は最大値、*T<sup>k</sup>*<sub>0,0</sub> は座標原点に おける温度すなわちチップ最高温度 *T<sub>max</sub>*を表す。その結 果、本解析範囲における系のエネルギーバランスは 3%以 内であった。



Fig.2 Network for two-dimensional heat conduction

### 3. 数値解析結果および考察

#### ヒートスプレッダーの機能 3.1

ヒートスプレッダーが本来の機能を果たすために必要 な条件とそのメカニズムに関しては既報<sup>(8)</sup>で詳述したの で、ここではその概要を示す。

Fig.3 に、半径  $r_c$ =11.3mm、厚さ  $h_c$ =0.6mm、熱伝導率  $\lambda_c$ = 150W/mK のベアチップに関し、半径 r<sub>s</sub>=3.4mm の底面部 領域が O=35W で局所的に発熱する場合の冷却例を示す。

このようなチップを、Case-1 に示すように厚さ h,=0.03 mm、熱伝導率熱伝導率 λ<sub>n</sub>=100W/mK の高熱伝導体層を

介して温度 T<sub>a</sub>=30℃のヒートシンクに接続し冷却すると、 チップの最高温度は非常に低く抑えられ、Tmax=34.1℃と なる。しかし、実際には、機器の組立て性やチップ交換 などの補修性の問題から、例えば Case-6 に示すように、 ゼル状のコンパウンド(厚さ h<sub>f</sub>=0.1mm、熱伝導率 λ<sub>f</sub>=3 W/mK)などを介してヒートシンクとの接続がとられるが、 この場合、コンパウンド層が大きな熱抵抗となり、Tmax は 55.7℃にまで上昇してしまっている。

この問題に対処するため、厚さ $h_{hsp}$ =3mm、熱伝導率 $\lambda_{hsp}$ =400W/mK のヒートスプレッダー板をコンパウンド層上 に載せ高熱伝導体層を介してヒートシンクに接続した例 が Case-4 である。ここで、ヒートスプレッダーはヒート シンクと一体化しており、機器の分解、組立てはコンパ ウンド層が受け持つ。この場合の系内の温度分布を Fig.4 に示す。期待に反し熱源上部の系内温度分布は高いまま であり、ヒートスプレッダーは単に熱抵抗としてしか機 能していない。このため、Tmaxは更に高くなり、58.1℃に 上昇している。

しかし、同じチップ、コンパウンド、ヒートスプレッ ダーおよび高熱伝導体の組合せに対し、Case-3 に示すよ うにコンパウンドと高熱伝導体の位置を入れ替えてヒー



Fig.3 Examples bare chip cooling

トシンクに接続すると、Tmaxは43.1℃に低下する。Case-4 の場合と比較して最高温度 Tmarは 15℃も低下し、ヒート スプレッダー本来の機能が得られている。これは、Fig.5 に示すように、チップとヒートスプレッダーの間に挟ま れた高熱伝導体層による半径方向への熱移動が良好に行 われた結果、熱源直上部の温度が低下し平坦化するとと もに熱源外周部が熱の拡散領域として有効に働いたこと による。

以上の結果から、局所的に発熱するベアチップの冷却 手段として高熱伝導率のヒートスプレッダー板を使用す る場合、チップとヒートスプレッダー間およびヒートス プレッダーとヒートシンク間の熱的介在物質の組合せが 重要であり、その組合せを誤るとヒートスプレッダーは 逆に熱抵抗として作用する。

3. 2 熱源半径 r とチップ半径 r の影響

Fig.6 に、Fig.3 に示した Case-3 の系でチップを冷却し た場合について、チップ最高温度 Tmax に及ぼす熱源半径 rsとチッブ半径 rcの影響を示す。ここで、各記号(●、



Fig.4 Radial temperature distribution in cooling system with plate type heat spreader (Case-4)





九州大学機能物質科学研究所報告

第15巻 第1号(2001)

○)、(▲、△)、( $\blacksquare$ 、 $\Box$ )はチップ半径 $r_c$ が 3.4、6.8、 11.3mm(6、12、20mm<sup>□</sup>矩形断面チップに対応)の場合 の数値シミュレーション結果であり、黒塗りと白抜き、 各記号を連ねる実線と破線は、それぞれ、ヒートスプレ ッダーが有る場合(四層モデル)と無い場合(二層モデ ル)を表す。また、一点鎖線と二点鎖線は、 $r_c=r_s$ の場合、 すなわち系が完全に一次元の場合のヒートスプレッダー が有る場合と無い場合の結果であり、次式で与えられる。

$$T_{\max} = T_a + \left(\frac{h_c}{\lambda_c} + \frac{h_p}{\lambda_p} + \frac{h_{hsp}}{\lambda_{hsp}} + \frac{h_f}{\lambda_f}\right) \frac{Q_s}{\pi r_s^2}$$
(5)

ヒートスプレッダーが無い場合(二層モデル)

ヒートスプレッダーが有る場合(四層モデル)

$$T_{\max} = T_a + \left(\frac{h_c}{\lambda_c} + \frac{h_f}{\lambda_f}\right) \frac{Q_s}{\pi r_s^2}$$
(6)

いずれのチップ半径  $r_c$ においても、熱源半径  $r_s$ が一次 元の場合の $r_s=r_c$ から実線と破線が交差する点の半径 r\*に 減少するまでは、ヒートスプレッダーが有る系の方が  $T_{max}$ が高くなっている。すなわち、 $r_s=r*\sim r_c$ の範囲では、 ヒートスプレッダーは単に熱抵抗として作用しているに 過ぎない。これに対し、 $r_s<r*$ の範囲においてはヒートス プレッダー本来の機能が得られ、ヒートスプレッダーが 無い場合と比べ  $T_{max}$ は低くなり、その差は熱源半径  $r_s$ の 減少とともに増大している。

3.3 等価熱源半径によるチップ最高温度の予測

Figs.7、8に、それぞれ、ヒートスプレッダーが有る場合と無い場合について、式(5)、(6)に基づき次式で定義した等価熱源半径 *r<sub>eq</sub>と熱源半径 r<sub>s</sub>およびチップ半径 r<sub>c</sub>の関係を示す。* 

ヒートスプレッダーが有る場合(四層モデル)  

$$r_{eq,4} = \sqrt{\left(\frac{h_c}{\lambda_c} + \frac{h_p}{\lambda_p} + \frac{h_{hsp}}{\lambda_{hsp}} + \frac{h_f}{\lambda_f}\right) \frac{Q_s}{\pi(T_{\max,4} - T_a)}}$$
(7)

$$r_{eq,2} = \sqrt{\left(\frac{h_c}{\lambda_c} + \frac{h_f}{\lambda_f}\right) \frac{Q_s}{\pi (T_{\max,2} - T_a)}}$$
(8)



Fig.6 Effects of  $r_s$  and  $r_c$  on  $T_{max}$ 

#### 九州大学機能物質科学研究所報告

ここで、 $T_{max,4}$ および $T_{max,2}$ には、それぞれ、二次元円筒 座標系の四層および二層モデルで得られた数値解析結果 を代入する。各記号の意味は Fig.6 の場合と同じである。 また、実線、破線および一点鎖線は、各チップ半径 $r_c$ お ける数値シミュレーション結果を、次式のベキ乗関数

$$\frac{r_{eq}}{r_c} = \left(\frac{r_s}{r_c}\right)^n \tag{9}$$

で最小自乗近似した結果である。指数 n は、各チップ半 径 r<sub>c</sub>=3.4、6.8、11.3mm に対し、ヒートスプレッダーが有 る場合と無い場合について、それぞれ、n=1/4.6、1/2.7、 1/2.0 および n=1/2.3、1/1.4、1/1.2 となる。

Figs.9、10は、ヒートスプレッダーが有る場合と無い場 合について、式(9)を式(7)、(8)に代入し逆に $T_{max,4}$ および  $T_{max,2}$ を求めることにより、等価熱源半径 $r_{eq}$ の式(9)によ る近似の妥当性を $T_{max}$ と $r_s$ のグラフ上で確認した結果で ある。ここで、各記号の意味はFig.6の場合と同じであり、 実線、破線および一点鎖線は、各チップ半径 $r_c$ における 式(9)に基づく $T_{max}$ の近似結果である。いずれの場合も、 チップ半径 $r_c$ が 9.8、11.3mmにおいて、熱源半径 $r_s$ が小 さい領域で近似精度が若干低下するが、それ以外の領域 ではほぼ良好な結果が得られている。



Fig.7 Relation between  $r_{eq, 4}$  and  $r_s$ (With plate type heat spreader)



Fig.8 Relation between  $r_{eq, 2}$  and  $r_s$  (Without plate type heat spreader)

第15巻 第1号(2001)



Fig.9 Relation between  $T_{max, 4 \text{ and }} r_s$ (With plate type heat spreader)





#### 4.結 言

局所的に発熱するベアチップの冷却手段として高熱伝 導率のヒートスプレッダー板を用いた場合の効果につい て、二次元円筒座標系による四層および二層モデルに基 づく数値解析を行った。チップ半径 $r_c$ を 3.4、6.8、11.3 mm (6、12、20mm<sup>□</sup>矩形断面チップに対応)、熱源半径 $r_s$ を 1.7 mm ~  $r_c$ の範囲で変えた一連の解析結果から、チ ップ最高温度  $T_{max}$ に及ぼす熱源半径  $r_s$ 並びにチップ半径  $r_c$ の影響を定量的に明らかにした。また、それらの結果 に基づき、一次元系モデルで与えられる  $T_{max}$ に関する関 係式(5)、(6)を利用した等価熱源半径  $r_{eq}$  (式(7)、(8))を 導入し、熱源半径 $r_s$ とチップ半径 $r_c$ との間の相関式(9)を 提案した。そして、 $r_c$ =3.4、6.8、11.3 mm、 $r_s$ =1.7 mm ~  $r_c$ の範囲において、相関式(9)によるチップ最高温度  $T_{max}$ の 簡易予測がほぼ妥当な精度で可能であることを示した。

- (1) 芦分 範行、大黒 崇弘、河村圭三、頭士 鎮夫、日本機械学会論文集(B編)、58-547(1992), 865.
- (2) 芦分 範行、大黒 崇弘、河村 圭三、頭士 鎮夫、日本機械学会論文集(B編)、58-547(1992),871.
- (3) Take, K. and Webb, R. L., Proc. of the PACIFIC RIM/ ASME International Intersociety Electronic & Photonic Packaging Conf. InterPACK '99, 2(1999), 2113.
- (4) Welch, J. W., Lam, T. T. and Yeung, W. K., *ibid.*, 1(1999), 883.
- (5) Lam, T. T. and Fischer, W. D., *ibid.*, 1(1999), 891.
- (6) Fabis, P. M. and Windischmann, H., ibid., 1(1999), 899.
- (7) 富村 寿夫、安斎 久雄、宇田川 義明、第 38回日本 伝熱シンポジウム講演論文集、1(2001), 143.
- (8) Tomimura, T., Anzai, H. and Udagawa, Y., Proc. of the PACIFIC RIM/ASME International Intersociety Electronic & Photonic Packaging Conf. InterPACK '01, (July, 2001, to be published).