基板上に配列されたフィン付きパッケージ列の熱伝達*

松 島 均^{*1}, 柳 田 武 彦^{*1}Heat Transfer from Finned LSI Packages in a Channel
between Circuit Boards

Hitoshi MATSUSHIMA and Takehiko YANAGIDA

An experimental investigation was performed using model packages mounted in five columns and up to twelve rows on the floor of parallel channels. Each package has the base area of $22 \times 22 \text{ mm}^2$, the total height of 17.6 mm and is equipped with a finned heat sink. The fin geometries and arrangement, as well as the air velocity, were changed, and their effects on heat transfer from the packages and channel pressure drop were investigated. The difference of the heat transfer coefficient between a variety of finned heat sinks was evident at the upstream portion of the rows. On the other hand it was very small downstream. The heat transfer coefficient from the first package downstream of the missing package was found to increase to the level of complete mixing of cooling air. It was effective to place obstacles between the packages to promote mixing and to increase the heat transfer coefficient. However, the increment of the pressure drop did not change the per-pumping power heat transfer coefficient.

Key Words: Heat Transfer Coefficient, Pressure Drop, Experiment, Package, Array, Fin

1. 緒 言

コンピュータに代表される最近の電子機器においては、演算速度の高速化をはじめとする高性能化ならびに筐体容積の減少による小形化が著しい。このため、単位体積当たりの発熱量は増加の一途をたどっている。電子機器に使われる半導体チップの信頼性は動作温度に逆比例するため、高い信頼性を確保するためには、チップ温度を許容値(100°C前後)以下に抑える必要がある。大多数の電子機器においてはコストおよびメンテナンスの点から空冷方式が採用されており、この傾向は将来も続くと思われる。したがって、今までに増して効率の良い強制空冷方式の確立が必要である。

大形コンピュータのように、発熱量の大きなLSIパッケージが多数並んだ基板を強制対流で冷却する場合、LSIの冷却性能を向上させるためにパッケージ上面に放熱フィンを設置することが多い。基板上に配列されたパッケージ列での熱伝達に関する従来の研究はフィンのないブロックに関してのものだけに限られてお

り^{(1)~(4)}、放熱フィン付きのパッケージ列の冷却設計に適用できる系統的な実験結果は少ない。著者らの1人は先に基板上に基盤目状の規則的配列されたフィン付きパッケージ列の伝熱特性を実験的に調べた⁽⁵⁾。本報では、配列中の一部のパッケージが不規則な幾何形状になった場合の伝熱特性について報告する。

記 号

A : フィン底部面積
 H : パッケージ高さ
 H_F : フィン高さ
 h : 熱伝達率
 L : パッケージ長さ
 N : パッケージ列数
 P : フィン間隔
 P_1, P_2 : パッケージ配列ピッチ
 ΔP : 圧力損失
 Q : ヒータ発熱量
 S : 基板間隔
 T_{fin} : フィン根元温度
 T_{∞} : 入口空気温度
 t : フィン肉厚
 U_{in} : 基板入口風速

* 平成2年9月23日 第68期全国大会講演会において講演。原稿受付 平成2年11月2日。

^{*1} 正員、(株)日立製作所 機械研究所 (〒300 土浦市神立町502)。

W : パッケージ幅

x : 流れ方向の距離

2. 実験装置および方法

本研究で使用した実験装置の概要を図1に示す。風洞は吸込み形であり、空気流量はJISの標準オリフィスを用いて測定する。テストセクションは風洞の前縁部にあり、長さ1050 mm(そのうちパッケージを配列する部分の長さは約600 mm)幅200 mmである。高さは10~40 mmの間で変更できるようになっている。テストセクションの空気入口部には1/4円ノズルが設けられており空気の整流を行う。テストセクションはアクリル製であり、中に配列したパッケージが見えるようになっている。

図2は、本研究で使用したフィン付きのパッケージを示す。LSIモジュール部は、厚さ3 mmの断熱材およびその上部にあるセラミックヒータ(厚さ0.6 mm)より成り($W=22$ mm, $L=22$ mm), その上面に放熱

図1 実験装置

図2 パッケージ構成(標準フィン付き)

図3 パッケージ配列

フィンが接着されている。本研究で使用した放熱フィンは基本的には図2に示すものである。すなわち、フィン肉厚 $t=1$ mm, フィン間隔 $P=2.5$ mm, フィン高さ $H_f=12$ mm, フィン枚数7枚であり、本研究ではこれを標準フィンと呼ぶ。本研究で用いるパッケージの高さは基本的には $H=17.6$ mm である。

図3は、本研究でのパッケージの配列パターンを示す。現状の電子機器におけるパッケージの配列は多くの場合、基盤目状に配列されている。このため、本研究においては前報⁽⁵⁾と同じく実用性の高い基盤目配列を対象にした。

前報⁽⁵⁾においては規則的に並べられたパッケージ列において基板間隔 S や流れ方向の配列ピッチ P_2 の変化がパッケージ列での流れと熱伝達に及ぼす影響を調べた。

本研究では、パッケージの流れ方向の配列ピッチ P_2 を44 mm($D/L=1.0$), 基板高さ S を25.4 mm($S/H=1.44$)に固定し、基板入口流速 U_{in} を3, 5, 8 m/sと変化させた。ここで、レイノルズ数 Re_L を

$$Re_L = U_{in} L / \nu_{\infty} \quad (1)$$

と定義すると、上記の流速はそれぞれ、 $Re_L=4.2 \times 10^3$, 7.1×10^3 , 1.1×10^4 に対応する。

なお、本研究では、図2で示される標準フィンを付けたパッケージを、図3で示すように規則的に基盤目状に配列した場合を標準状態と呼ぶ。実験は、標準状態およびそれ以外の場合について行った。

伝熱実験は、図3に示すようにパッケージを流れと直角方向に5列、流れ方向に12列、計60個配列した状態で中央3列を加熱して行った。熱伝達率の測定は中央列のパッケージについて行った。

本研究では、パッケージ上部(フィン底部)面積 A を規準にした熱伝達率 h を次のように定義する。

$$h = (Q/A) / (T_{fin} - T_{\infty}) \quad (2)$$

図4 フィンの違いによるパッケージ伝熱性能の変化

ここで、 Q ：ヒータ発熱量、 T_{fin} ：フィン根元温度、 T_{∞} ：入口空気温度である。 Q は入力電力から計算でき、 T_{fin} はフィン根元に埋め込んだC-C熱電対($\phi 0.2$ mm)を用いて測定し、 T_{∞} は入口ノズル部に設けたC-C熱電対($\phi 0.2$ mm)を用いて測定した。

本研究では、伝熱実験と並行して圧力損失の測定実験も行った。圧力損失の測定は、テストセクションの天井部に設けた圧力タップを用いて行った。圧力タップの直径は1 mmであり、流れ方向に9個設けた。圧力損失の値は微差圧計(0~50 mmH₂O, 最小感度0.01 mmH₂O)を用いて測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 フィンの種類を変えた場合 図4は、多種類の放熱フィンについて、それぞれを配列した場合の放熱性能の変化を比較したものである。図4は、 $U_{in}=5$ m/sの場合であり、フィンとしては、標準フィン、薄肉フィン2種($P=1.5, 2.0$ mm, $W=L=22$ mm), 引抜フィン(大形コンピュータ論理LSI用)の4種を用

図5 フィンの違いによる圧力損失の変化

図6 配列の一部に抜けがある場合の伝熱性能

いた。フィンの材質は標準フィンおよび引抜フィンがAl, 薄肉フィンがCuである。薄肉フィンを用いるとフィン単体の放熱性能を向上させることができる。本報告では薄肉フィンの列数は5列までとした。図4より、上流側においては、各フィンにおける放熱性能に大きな差があるものの下流側に行くに従ってこの差は急激に減少していくことがわかる。これは、本研究で対象とした基盤目状のフィン配列の場合、下流側においては空气の温度上昇による熱抵抗の上昇が支配的となり、全体の熱抵抗に対するフィン単体性能の寄与の割合が少ないためである。

なお、図5に示すように、本研究で対象にした4種の放熱フィンを並べた際の圧力損失は、いずれの場合にも著しい差は見られない。

3.2 パッケージ列に抜けがある場合 図6は、規則正しく配列された基板上のパッケージ列に一部抜けがある場合の伝熱性能を調べたものである。測定は、(1)4列めと8列めのパッケージを抜いた場合、(2)7列めと8列めのパッケージを抜いた場合(3)8列めのパッケージを抜いた場合の3種類について行った。図6は、 $U_{in}=5$ m/sの場合であり、参考のためにパッケージの抜けがない標準状態における伝熱性能を実線で、またこの場合に冷却空氣が完全に混合したと考えた場合の伝熱性能の予想値を破線で示す。図6より、パッケージ列に抜けがあると、その下流側におけるパッケージの熱伝達率は大きく増大すること、ならびにその値は完全混合をしたと考えた場合の値に近いことがわかる。パッケージ列に抜けがある場合には、抜けがある部分で起こる(i)フィン間を流れる速度の回復および(ii)熱混合の促進が下流側のパッケージの熱伝達率増大の要因と考えられるが、特に混合の促進が熱伝達率の増大に対して支配的であると考えられる。

図7は、パッケージ列に抜けがある場合の流れ方向

図7 配列の一部に抜けがある場合の圧力損失

に対する圧力損失の変化を示す。図7より、パッケージ列に抜けがあるとその下流側の圧力損失は増大する傾向を示す。その場合は、4列めと8列めのパッケージを抜いた場合がいちばん大きく1割程度である。しかし、配列中の1～2個のパッケージが抜けたことが、全体の圧力損失に与える影響はそれほど大きいとはいえない。

以上のように、多数配列したパッケージのうち数個のパッケージを抜くことは、熱伝達率の増大のわりには、圧力損失の増大はそれほど大きくならないため局所的に発熱量の大きなパッケージの冷却を行ううえでは有効な方法であると考えられる。

3.3 パッケージ列中に異種のフィンがある場合

図8は、標準状態の配列において、一部異種のフィンが混った場合の伝熱性能を示す。本研究では、異種のフィンとして通風抵抗の大きい $P=1\text{ mm}$, $t=1\text{ mm}$, $H_F=12\text{ mm}$ のフィン ($W=L=22\text{ mm}$) を使用した。異種フィンがあるのは、4列めと8列めである。図8より、流動抵抗の大きい異種フィンが混ってもそのまわりのパッケージの放熱性能はほとんど影響を受けていないことがわかる。異種フィンは放熱面積が大きく、

図8 異種のフィンが混った場合の伝熱性能

図9 異種のフィンが混った場合の圧力損失

自由主流中にある際の伝熱性能が良い（自由主流中にある際の熱伝達率は主流速度が 5 m/s の場合、標準フィンが $617\text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$, 異種フィンが $843\text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$) ので、配列中にあっても異種フィンの伝熱性能の方が若干良い（ただし、自由主流中で見られたような大きな差はない）。

図9は、この場合の圧力損失の流れ方向への変化である。図9からわかるように異種フィンを配置することにより、圧力損失は増加する。しかし、この影響はわずかであり、全体の1割以下である。

3.4 冷却流路中に障害物を置いた場合 前報⁽⁵⁾

における検討で、基盤目配列されたフィン付きパッケージ列において冷却空気の混合がかなり抑えられることが明らかとなった。すなわち、パッケージとパッケージの間を流れる空気は、パッケージ付近の空気と混合をすることなく、そのまま下流方向に流れてしま

図10 流路中に障害物を設けた場合の伝熱性能

図11 流路中に障害物を設けた場合の圧力損失

図 12 単位ファン動力当たりの伝熱性能の評価

う。そこで混合を促進させるという観点から、流路中に障害物を設けた場合について実験を行った。障害物は、直径 6.4 mm、長さ 20 mm の円柱であり、パッケージ間に図 10 に示すように設置した。本実験で使用的是 $P=2$ mm、 $t=0.15$ mm、 $H_F=12$ mm の薄肉フィンである。実験は $U_m=5$ m/s の場合について行った。図 10 には参考のために、円柱がない場合に冷却空氣が完全混合したと考えた場合の値を実線で示してある。図 10 より、流路中に障害物を設け冷却空氣の混合を促進させることが、下流側のパッケージにおける伝熱性能を向上させるうえで効果的であることがわかる。伝熱性能は円柱の数が多いほど良く、10 本の場合には 5 列めにおける伝熱性能は円柱がない場合に比べて 25 % 程度向上し完全混合の状態にかなり近づいている。

以上のように、冷却流路中に円柱状の障害物を置くことは、下流側パッケージの放熱性能の向上に対して効果があるが、同時に圧力損失の増大もまねく。図 11 は、この場合の圧力損失の変化を示す。円柱数が 10 本の場合の圧力損失は、円柱がない場合に比べて 1.6 倍程度増大している。

3.5 伝熱性能の評価 図 12 は、フィンの種類を変えた場合および流路中に障害物を置いた場合について、ファン動力一定の条件下で伝熱性能の評価を行ったものである。図 12 は、横軸にファン動力、縦軸に 5 列めのパッケージにおける熱伝達率をとってある。

図 12 より、いずれのフィンの場合にも単位ファン動力当たりの熱伝達率 h_s の値はほとんど同じであることがわかる。また、流路中に障害物を設けた場合の単位ファン動力当たりの熱伝達率 h_s もほぼ等しくなっている。

4. 結 言

基板上に配列されたフィン付きパッケージ列の伝熱性能に関して実験的に研究を行った。実験は最も基本的であり、かつ一般的な基盤目配列を対象にし、パッケージの列数を十分に多くとって行った。その結果、以下の結論を得た。

(1) 放熱フィン単体の伝熱性能の差が大きくても、配列状態では下流側においてはその差が減少する。これは、下流側においては空氣の温度上昇による伝熱性能の低下が支配的であるためである。また、ファン動力を一定とした際の下流側における伝熱性能はフィンの種類により大きな差がない。

(2) 配列中の一部にパッケージの抜けがあると、その下流側のパッケージの熱伝達率は向上する。その値は、冷却空氣が完全混合したと考えた場合のものに近い。これにより圧力損失も増大するがわずかである。したがって、配列中に抜けを設けることは、一部の発熱が大きなパッケージを冷却するのに有効であると考えられる。

(3) 配列中に一部異種のフィンが混った場合に、異種のフィンがまわりのパッケージの伝熱性能に与える影響はほとんどない。異種のフィン単体の放熱性能が他のフィンよりも良い場合、配列した場合にも異種のフィンを付けたパッケージの伝熱性能は若干良くなる。ただし、単体性能で見られるほどの差はない。

(4) 流路中に障害物を設けると冷却空氣の混合が促進され、下流側のパッケージでの熱伝達率が増大する。しかし、これと同時に圧力損失も増大するため、ファン動力を一定として考えた場合の伝熱性能は大きく変わらない。

文 献

- (1) 棚田、ほか 2 名、長方形管路の壁面に配列された発熱体まわりの流動と熱伝達、機論, 50-453, B(1984), 1294.
- (2) Wirtz, R. A. and Dykshoorn, P., *Proc. 4th IEPC*, (1984), 318.
- (3) Sparrow, E. M., ほか 2 名, Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of Arrays of Rectangular Modules Encountered in Electronic Equipment, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 25-7(1982), 961.
- (4) Ashiwake, N., ほか 3 名, Forced Convective Heat Transfer from LSI Packages in an Air-Cooled Wiring Card Array, *ASME, Heat Transfer in Electronic Equipment-1983, HTD*, 28(1983), 35.
- (5) Nakayama, W., ほか 2 名, Forced Convective Heat Transfer from Arrays of Finned Packages, *Proc. Int. Symp. Cool. Technol. Electron Equip.*, (1987), 663.