屈曲風路に実装された高発熱 CPU モジュールの冷却特性*

近 藤 義 広^{*1}, 松 下 伸 二^{*2}
大 橋 繁 男^{*1}, 森 山 隆 志^{*3}

Cooling High-Power-Density CPU Modules within a Bending Air-Duct

Yoshihiro KONDO^{*4}, Shingi MATSUSHITA,
Shigeo OHASHI and Takashi MORIYAMA^{**} Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi, Ltd., 502 Kandatsu, Tsuchiura, Ibaraki, 300-0013 Japan

We have developed a method of cooling high-power-density CPU modules within a bending duct. The method uses a jet-duct system made of an air duct and axial fans. This system has slit orifices upstream from the CPU modules. Pressure drops in this system are calculated as four values: wringing loss in the chamber, friction loss in the duct, extrusion loss from the duct, and wringing loss in the slit orifice. These loss values agree with the experimentally measured losses to within an error of $\pm 10\%$. The calculation showed that when the duct width is small, the wringing loss in the chamber account for the major part of the total loss. Experiments in a wind channeled show that a CPU module can be cooled by a volumetric flow rate of more than $0.32 \text{ m}^3/\text{min}$ and a velocity in front of the CPU module of more than 2 m/sec . These results show that the jet-duct system has good cooling performance and redundancy.

Key Words: Forced Convection, CPU Module, Heat Sink, Bending Air-Duct, Impingement

1. 緒 言

近年、電子機器の発熱密度は著しく増大し、高効率な冷却が望まれている。この問題解決のため、まず、著者等は衝突噴流冷却方式に着目し、LSI パッケージに搭載するタイプの異なるヒートシンク（平行平板フィン、ピンフィン）に関し、一連の研究^{(1) (2)}を行い、冷却ファン等の制約条件が与えられた場合のヒートシンクの最適形状を求める手法を提案した。

また、空冷コンピュータでは三次元実装⁽³⁾が多く見られ、高発熱 CPU モジュールをスタック状に複数枚実装することを考えた低騒音でかつコンパクトな冷却構造が望まれている。前報⁽⁴⁾では、CPU モジュール群を対象に、冷却風の有効活用と簡素な構造を取るスリット噴流方式について検討し、適正なスリット孔形状を実験的に求めた。さらに、ファン付きヒートシンクを搭載した CPU モジュールの冷却に関しては、ファン付きヒートシンクの一部を含む穴から冷却風を供給する噴流ダクト方式を提案し、その冷却性能を実験的に検討した。

電子機器一般では、基板間に冷却風を平行に流す平

行流冷却方式が広く用いられている^{(5) (6)}。しかし、コンピュータの計算性能を最適化した場合、後述する図 1 (b) に示すように、水平、垂直実装が混在する複雑な三次元実装となる。そこで、本報では、高発熱 CPU モジュールを複雑な三次元実装とした場合について、上記の噴流ダクト方式を用い、まず、その圧力損失特性を実験的に検討した。さらに、圧力損失を予測できる物理モデルを提案し、実験値との検証を行った。また、伝熱特性を実験的に検討し、放熱フィンの高性能化を図り、CPU モジュールと筐体外気間の熱抵抗の上限値を低風量で満足できたので報告する。

2. お も な 記 号

B : フィンベース厚さ
 dP : 流路損失 α 静圧
 Hf : フィン高さ
 L : フィン長さ
 P : フィン間すきま
 Q : CPU カード当たり冷却風量
 R_{ca} : フィンベース—入口空気間熱抵抗
 S : フィン列群すきま
 T_{air} : 筐体外気温度
 T_c : CPU カードケース温度
 Tf : フィン板厚
 U : CPU カード前面風速

* 原稿受付 2001 年 5 月 21 日。

^{*1} 正員、(株)日立製作所機械研究所(〒300-0013 土浦市神立町 502)。^{*2} (株)日立製作所インターネットプラットフォーム事業部(〒243-0435 海老名市下今泉 810)。^{*3} (株)日立製作所インターネットプラットフォーム事業部(〒442-8576 豊川市白鳥町野口前 9-5)。

E-mail: kondou@merl.hitachi.co.jp

Wd: ダクト幅

添 字

1: 最上流部

2: 中間部

3: 最下流部

3. 実験装置および検討対象

本研究では風洞装置を用いた要素実験と電子機器装置を用いた実験の二種類を行った。その概略をそれぞれ、図1(a), (b)に示す。要素実験および電子機器装置を用いた実験では、CPU モジュールをそれぞれ1枚および8枚実装する。CPU モジュールには図3で説明する放熱フィン(Heat sink)が搭載される。放熱フィンは熱伝導グリースを介して CPU モジュールに搭載され、CPU モジュールと放熱フィンは、CPU モジュールに設けた5箇所のネジで固定される。なお、2個の電源は CPU モジュールに安定した電気を供給するものであり、電源基板とコンデンサなどの電子部品から構成される。冷却風は CPU モジュール、電源を搭載するマザーボードに衝突し、2個の電源基板を通して両側に流れる。図1(b)の電子機器装置では、図1(a)の要素実験に用いた1個の CPU モジュールと2個の電源が、重力方向に8段積まれるようにマザーボードに実装される。図1(b)に示すように、6台のメインファンは正面(入口)に向かって右側に3台、背面側(出口)に3台実装される。既報⁽⁴⁾の検討

結果から、放熱フィン入口部でフィン全体に冷却風を供給できるように、スリット孔の形状は放熱フィンの形状より一回り小さな $120\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ である。以下の整理に用いる CPU モジュール当たりの風量 Q は風洞出口に設けた整流洞の差圧⁽¹⁾により、流路の圧力損失 dP はチャンバ部と CPU モジュール出口部の差圧により求めた。

実験に供した CPU モジュールの概略を図2に示す。CPU モジュールは、1個の CPU (45 mm 角) と4個(片面2個)の SRAM (45 mm 角) が1枚の基板上に搭載され、各々が Al 放熱板に熱伝導グリースを介して実装されている。温度測定点は CPU 中央部の1箇所(T_c)である。CPU モジュールには 0.05 mm 厚のステンレス製の発熱用ヒータが取り付けられ、温度測定には線径 0.1 mm の T 型熱電対を用いた。以下の整理に用いる外部熱抵抗 R_{ca} は、上記の温度 T_c と入口空気温度 T_{air} との差を CPU モジュールの発熱量 W で除した値で定義する。

$$R_{ca} = (T_c - T_{air}) / W$$

今回の場合、この熱抵抗の上限値は $0.615\text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$ とする。この熱抵抗の上限値は、CPU モジュールの安定した動作を保証するものであり、CPU モジュールの信頼性許容温度と電子機器装置環境仕様温度、及び CPU モジュールの発熱量から決定される。なお、この上限値は外気温度を $40\text{ }^\circ\text{C}$ 、CPU 接合部温度を $100\text{ }^\circ\text{C}$ 、接合部-モジュールケース間の熱抵抗を $0.135\text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$ とすると、約 80 W 発熱の CPU モジュール

Fig. 1 Experimental apparatus

が冷却可能な値である。

図 3 に放熱フィンの概略を示す。丸印がねじ締付け用の穴(5箇所)である。全ての放熱フィンとも電源を CPU モジュール間に実装するため、そのフィンベース部にはフィンを搭載していない。また、冷却風が効率よく、フィンサイドに流れるようにフィンの流れ方向に切り欠き(S1, S2)を設けている。放熱フィン NO. 1 と NO. 2 は基盤目配列で電源付近にあるフィンの有無の違いである。NO. 3~5 は千鳥目配列で

Fig. 2 CPU module (up view)

う材によりフィンベース部にフィンを取り付けている。NO. 5 は自動車のラジエーター用フィンを、NO. 6 は一枚の Al 板の切起しにより放熱フィンとしたものである。なお、このようなフィン配列を選択した理由は、押出しタイプの平行平板フィンとほぼ同等な製造コスト、CPU モジュールに搭載する際の取扱利便性からである。

CPU モジュール前面風速は、風洞装置を用いた要素実験と電子機器装置を用いた実験ともに、CPU モジュールの前面部に装着式多点風温風速プローブを用いて測定した。なお、電子機器装置を用いた実験では、全てのメインファンが駆動した場合、全てのメインファンの中から 1 台のみが停止した場合について、風速測定を行った。全てのメインファンの中から 1 台のみが停止した場合を検討することにより、冷却ファンが冗長運転となり、無停止型電子機器装置を提供できる。

まず、風洞装置を用いて、放熱フィンの種類に対する CPU モジュール前面風速と熱抵抗の関係を実験で求め、熱抵抗の目標値を達成できる最小必要風量、必要風速を検討した。最後に電子機器装置を用いて、CPU モジュールの前面風速を測定し、CPU モジュールを冷却できるかどうかの確認を行った。

No	Tf mm	P mm	Hf mm	B mm	L ₁ mm	L ₂ mm	L ₃ mm	S ₁ mm	S ₂ mm	Processing method
1	1	3.5	20	4	with A					cutting
2	1	3.5	20	4	without A					cutting
3	1	3.5	20	4	20	20	20	3	3	with wax
4	0.2	3	17	4	20	20	20	3	3	with wax
5	0.2	2.5	16	4	21	21	21	4	4	with wax
6	0.2	2	20	4	21	18	17	2	12	skive

Fig. 3 Heat sink

4. 実験結果および検討

4.1 圧力損失特性 図4にダクト幅に対する流路損失特性を示す。図中のプロットが実測値であり、線で描かれたところが以下に述べる計算値である。冷却ファン特性は図1の電子機器装置に実装される冷却ファン6台中の1台が停止した場合のものである。電子機器装置に実装される冷却ファン全体での静圧－

冷却風量特性と要素実験での圧力損失－冷却風量特性（8枚のCPUモジュール分）の交点が電子機器装置での動作風量となる。なお、この冷却ファン特性の算出方法は次の通りである。まず、冷却ファン3台及び2台を並列実装した場合の静圧－冷却風量の関係を、冷却ファン1台のメーカーデータより求める。（ある静圧に対して1台の冷却ファン特性の冷却風量を単純に3倍及び2倍する。）この両者の特性を持つ冷却ファ

Fig. 4 Pressure drop at various duct widths

Fig. 5 Breakdown of pressure drop ($Q = 0.35 \text{ m}^3/\text{min}/\text{CPU module}$)

ン2台を直列に実装したと考え、それぞれ（並列3台、並列2台）の静圧-冷却風量の関係から全冷却風量に対して静圧を加算する。今回の場合、放熱フィンの損失は全体の流路損失に対して10%程度と比較的少なく、放熱フィン以外の部分での流路損失が大きかった。なお、放熱フィンの流動抵抗の評価は、放熱フィンをCPUモジュールに装着した場合と、しない場合の圧力差で評価した。

従って、流路損失の計算値は以下のように4箇所の流路損失⁽⁹⁾に分けて考えた。

- (A) チャンバからダクトの入口での絞り損失
- (B) ダクト内での摩擦損失
- (C) ダクト内での拡大膨張

(D) スリット孔での絞り損失

この4箇所の損失を合計したものが計算値である。実験値、計算値ともダクト幅 W_d (図1(b))を狭くすると流路損失曲線の勾配は急となる。計算値は実験値を $\pm 10\%$ 程度の精度で整理できる。冷却ファンとの動作点(冷却ファン特性曲線と流路損失曲線の交点)は、ダクト幅が20mmでは $0.44 \text{ m}^3/\text{min}$ 、ダクト幅が50mmでは $0.66 \text{ m}^3/\text{min}$ であり、ダクト幅が40mm以上ではその風量の増加割合は小さくなる。

次に、ダクト幅の変化に対する流路損失の内訳(計算値)を検討する。図5に冷却風量 $0.35 \text{ m}^3/\text{min}$ 時の4箇所の損失内訳を示す。なお、他の風量に関しても同様であった。ダクト幅 W_d が狭い場合、チャンバか

Fig. 6 Pressure drop in different structures ($W_d = 38 \text{ mm}$)

Fig. 7 Thermal resistance of heat sink with or without A part

らダクト入口での絞り損失が大きな割合を占める。ダクト幅 W_d が 50 mm と広くなるとスリット孔での絞り損失が大きくなる。従って、この両者の損失を低減するために、絞り部の形状を変化させ検討した。

なお、ダクト幅が 40 mm 以上では、冷却ファン特性と圧力損失曲線との交点である動作風量の増加割合が小さいことと、電子機器装置を標準のラックへ装着することを考慮に入れて、ダクト幅 W_d は 38 mm と固定した。

図6にダクト幅 38 mm 時の入口絞り部（チャンバ部、スリット孔部）の形状をいくつか変化した場合の流路損失曲線の計算値を示す。両方の絞り部を滑らかな形状（23R：半径 23 mm で最大の曲げ形状、図6では細破線）にすることにより、冷却ファンとの動作風量は対策前の荒い絞り形状（直角、図6では太実線）の場合（ $0.61 \text{ m}^3/\text{min}$ ）より、 $0.08 \text{ m}^3/\text{min}$ 、13% 程度上昇できる。しかし、絞り部の形状の対策は手作業であり、コストが上昇するため、製品開発の場合、コストパフォーマンスを考慮して、形状の決定を行う必要がある。

4. 2. 伝熱特性 図7に図3で示した放熱フィン A 部の有無による熱抵抗の変化を示す。A 部の真下の CPU モジュールには高発熱である CPU がある。図7より、フィン NO. 1（A 部有）とフィン NO. 2（A 部無）では、熱抵抗にほとんど差を生じていない。これは、CPU モジュールの Al 放熱板から放熱フィン

ペースまでの間に熱が熱伝導で十分に広がり、上流側の放熱フィンの箇所でも熱が空気に放出していること、電源が実装されているため、この A 部へ冷却風が流れにくいことが考える。従って、今回、放熱フィンのコストパフォーマンスを考慮して、この A 部に放熱フィンは設けないこととする。

次に、図8に各種放熱フィン（図3）の熱抵抗特性を示す。フィン NO. 3 が他のフィンに比べ、全風量で熱抵抗が低い値となる。これはフィン NO. 3 のフィン板厚 T_f が、他の放熱フィン（フィン NO. 4～6）に比べ、厚く、フィン効率が高いためであると考えられる。さらに、同じフィン厚さのフィン NO. 2 と比べ、フィン NO. 3 の場合、放熱面積が大きいこと、放熱フィンを千鳥目配列であることによる冷却風の有効利用が行われている理由のためである。フィン NO. 3 の場合、熱抵抗の上限値を満足する CPU モジュール当たりの必要風量は $0.32 \text{ m}^3/\text{min}$ 、その際の CPU モジュール前面必要風速は 2 m/sec である。

4. 3 実機での検証 次に、電子機器装置（図1(b)）を用いて、8 枚の CPU モジュールへの供給風量分布の均一化を行うチャンバの効果を検討した。ここでは示さないが、電子機器装置での各 CPU モジュール前面風速を測定した。ファンが全て稼動している場合、各 CPU モジュール前面風速は $4 \sim 2.6 \text{ m/sec}$ であった。一方、ファンが一台停止した場合、各 CPU モジュール前面風速の最小風速は 2.1 m/sec で

Fig. 8 Thermal resistance of each heat-sinks

あった。従って、冷却ファンが停止した場合でも、要素実験から得られた CPU モジュール前面の必要風速 (2 m/sec) を満足する。よって、噴流ダクト方式により、冷却ファンの冗長性を満足し、全ての CPU モジュールの冷却が可能となった。

5. 結 言

CPU モジュール (8 枚水平実装)、メモリボード (4 枚垂直実装) の三次元実装に対し、冷却ファン出口のチャンバとスリット孔を有するダクトからなる噴流ダクト方式において、以下の結論を得た。

- (1) 本噴流ダクトの流路損失を 4 箇所 (チャンバ絞り、ダクト摩擦、ダクト内拡大膨張及びスリット孔絞り) に分け、 $\pm 10\%$ 程度の精度で実験値を整理できた。
- (2) ダクト幅が小さい場合、チャンバ絞りの影響が、ダクト幅が大きい場合、スリット孔絞りの影響が大きくなる。
- (3) 実験的検討を行い、放熱フィンの高性能化 (フィン厚さを 1 mm、フィン列間すきまを設ける) を図り、CPU モジュールと筐体外気の熱抵抗の上限値 ($0.615^{\circ}\text{C}/\text{W}$) を風量 $0.32\text{ m}^3/\text{min}$ で満足できた。なお、この上限値は外気温度を 40°C 、CPU 接合部温度を 100°C 、接合部—モジュールケース間の熱抵抗を $0.135^{\circ}\text{C}/\text{W}$ とす

ると、約 80W 発熱の CPU モジュールが冷却可能な値である。

文 献

- (1) 例えば、近藤・他 2 名、機論(B), 61-596, (1996) 1557-1562.
- (2) 近藤・他 2 名、機論(B), 63-611, (1997) 2484-2491.
- (3) Nakayama, W., *Advances in Thermal Modeling of Electronic Components and Systems*, Vol. 1, (1988), edited by Bar-Cohen, A., and Kraus, A. D., Hemisphere Publishing Corp.
- (4) 近藤・松島、機論(B), 67-656, (2001) 1020-1026.
- (5) Ashiwake, N., ほか 3 名, *Heat Transfer Engineering*, 9-3, (1988), 76-84.
- (6) Sparrow, E. M., ほか 2 名, *Int. J. for Hybrid microelectronics*, 7-3, (1984), 35-43.
- (7) Moffat, R. J., and Anderson, A., *ASME, HTD*, 101, (1988), 33-43.
- (8) Wirtz, R. A., and Chen, W., *ASME, J. Elec. Packaging*, 114, (1992), 29-34.
- (9) 管路・ダクトの流体抵抗, 日本機械学会, (1995), 53-104.