

ヒートパイプとベーパーチャンバの 高性能パーソナルコンピュータ冷却への適用

サーマルテック事業部 望月正孝*1・齋藤祐士*2・Thang Nguyen*2・Tien Nguyen*2
フジクラタイランド 益子耕一・Vijit Wuttijumnong・Xiaoping Wu

Practical Application of Heat Pipe and Vapor Chamber for Cooling High Performance Personal Computer

M. Mochizuki, Y. Saito, T. Nguyen, T. Nguyen, K. Mashiko,
V. Wuttijumnong & X. Wu

毎年、パーソナルコンピュータ（PC）のプロセッサが高性能となり、それに伴って発生する熱量が問題になってきている。2000年には、PCのプロセッサで使用されるクロック周波数は最大1GHz、発熱量も20Wが最大だったが、2004年にはクロック周波数は3GHz以上、発熱量も100Wに迫るほどになっている。発熱量は増加しているが、反対にプロセッサの半導体部分の大きさ自体はほとんど同じか小さくなっており、それゆえ発熱密度は危険なほどに高くなっている。2000年には発熱密度は約10～15W/cm²だったが、2005年には100W/cm²に届くものと思われる。

この対応策として主に以下の2つが試行されている。

- (1) PCの限られたスペースで高発熱に対応できるような熱設計を行うこと
- (2) 優れた熱輸送能力を持つヒートパイプやベーパーチャンバを用い、熱源と冷却端の間の最低限の熱抵抗で熱を逃がすこと

本稿ではPCの限られた空間でヒートパイプやベーパーチャンバを用いてプロセッサを冷却する様々な方法を概説する。

The trend of the processor performance and heat dissipation have been increased significant every year. In the year 2000, the clock speed of processor used in Personal Computer (PC) was marginal 1GHz and heat dissipation marginal 20 W, but in the current year 2004 the processor's clock speed is higher than 3 GHz and heat dissipation approaching 100 W. Heat dissipation increased but in contrary the size of die on the processor reduced or almost same size and thus the heat flux is critically high. The heat flux is about 10~15 W/cm² in the year 2000 and could reach to 100 W/cm² in year 2005. There are two main challenges: (1) Provide the thermal solution capable high heat dissipation in a confined space of PC; (2) Heat pipes and vapor chamber having high heat flux capability, and minimal possible thermal resistance between heating and cooling ends. The purpose of this paper is to provide overview of practical various cooling solutions using heat pipe and vapor chamber for cooling high power processors in a confined space of PC.

1. ま え が き

より高性能のプロセッサはより多くの熱を発生させるため、PCの限られたスペースで熱対策を提供しなければならぬという挑戦を生み出している。高性能プロセッサとその付帯機器、たとえばキャッシュメモリ、DRAM、HDD、PCMCIA、CD/DVD ROM等がPC内部のスペースを取り、PCのトータル消費電力を増加させているから

である。これはPCの寸法や重量を変更するという妥協なしに熱対策を提供する挑戦である。

プロセッサで最も熱の発生の大きい半導体表面部分は、およそ10mm×10mm程度の大きさである。効果的な冷却のために、熱はプロセッサから離れた大きな放熱面積に拡散させる必要があるが、プロセッサの近傍にあるのは通常限られたスペースである。よって熱を、例えばPCの側面や隅のようなプロセッサから離れた部分に運ぶ必要が生じる。そのために最もよく知られているデバイスは、熱抵抗の小さなヒートパイプやベーパーチャンバである。基本的にヒートパイプやベーパーチャンバは2相の熱輸送デバイスで

*1 開発部長

*2 開発部

ある。それは密封された容器の内部に作用する液体が入っている。容器の一方の端が暖められると、内部の液体の蒸発が引き起こされ、その蒸気は容器の冷たい端に移動して液体に戻る。蒸発時の潜熱は大きいので、容器の一方の端と他端との非常に小さな温度差でかなり多くの熱量を輸送することができる。したがってこれらは非常に高い熱伝導率を持つデバイスであり、その熱伝導率は同じ寸法のむくの銅の数百倍に相当する。ヒートパイプとベーパーチャンバは、そのすぐれた熱伝導率と構造の単純さから最も信頼性が高く、コストパフォーマンスにすぐれた熱対策として開発された。作動液の種類は適用される作動温度に基づいて決められる。コンピュータへの適用では、作動温度は通常 50~100℃である。この作動温度の範囲では作動液としては水が最も適している。本稿では、高性能パーソナルコンピュータの冷却のために、ヒートパイプやベーパーチャンバを使用した様々な最新技術を紹介する。

図1に現在と未来のラップトップPC、デスクトップPC、サーバ、関連機器で要求される熱抵抗 (Rca : CPU ケースから周囲温度までの熱抵抗) とその対策における費用の関係を示す。ラップトップPCでは、Rca 1.5℃/W がすでに要求されており、まもなく 1.0℃/W が要求されることが予想される。ヒートパイプ/Remote Heat Exchanger : RHE はチップの冷却に効果的であり、より低い熱抵抗を持つベーパーチャンバの使用はさらに有効である。図1からはさらに、ファンを含めたトータルの熱対策として、およそ 5~15\$ の範囲で許容されるコストと熱抵抗の関係がわかる。デスクトップサーバにおいては、メインストリームの冷却対策として、すでに従来からのアルミニウムの押し出しフィンやプレートフィンのようなヒートシンクが使われてきているが、現在ではラップトップPC同様、ヒートパイプヒートシンクやベーパーチャンバが適用されるようになってきている。要求される Rca の値は 0.3℃/W に届こうとしており、将来は 0.2℃/W 以下が要求されるようになると思われる。

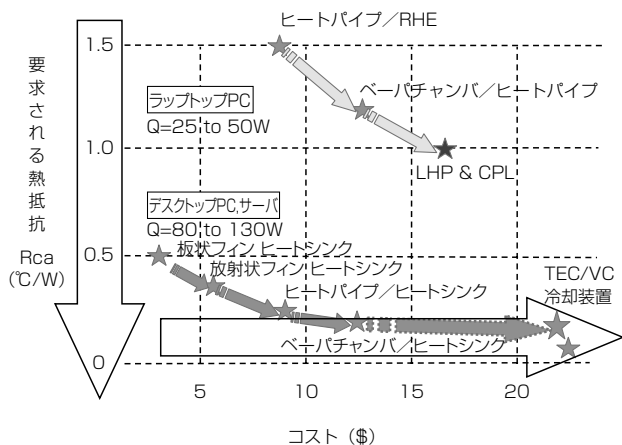


図1 熱対策の推移
Thermal solution trend

2. 熱抵抗の計算方法

冷却対策として必要となる熱抵抗の計算方法を以下に示す。

$$R_{ja} = R_{jc} + R_{ca} = (T_j - T_a - T_{sys}) / Q \dots (1)$$

ここで、

Q : 放熱量 (W)

R_{ja} : CPU 半導体表面と周囲間の熱抵抗 (°C/W)

R_{jc} : CPU 半導体表面と CPU ケース表面間の熱抵抗 (°C/W)

R_{ca} : CPU ケース表面と周囲間の熱抵抗 (°C/W)

T_a : 周囲温度 (°C)

T_j : 内部 CPU 半導体の接合部の温度 (°C)

T_{sys} : ノートブック PC 内部のシステムの上昇温度 (°C)

CPU のパッケージは熱を拡散させるものであり、R_{jc} は CPU のタイプや製品によって異なる。熱対策としては、R_{ca} を制御することのみで可能である。図2に CPU 接合部の最大温度を 100℃、外部周囲温度 35℃、システムの温度上昇を 10℃ と仮定した場合に必要なとされる熱抵抗 R_{ja}、R_{jc}、R_{ca} と CPU 発熱量の関係を示す。

3. 放熱システム例

3.1 例1—熱拡散プレートをもつヒートパイプ

数年前まで、ノートブック PC のプロセッサからの熱の発生は 10W 以下だった。当時は一般的な冷却方法として、図3の (a) (b) に示すように、ヒートパイプを使って CPU からノートブック PC のキーボードの下、または、シャーシの上に置かれた通常はアルミニウム製の熱拡散プレートに熱を伝達する方法が用いられていた。

1つの例として、ラップトップPCのシャーシ上に取り付けられた長方形のアルミニウム製熱拡散プレートで構成さ

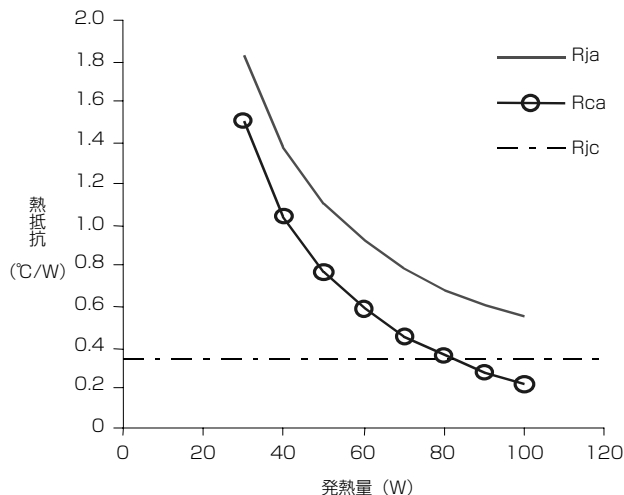


図2 発熱量と R_{ja}、R_{ca}、R_{jc}
R_{ja}、R_{ca}、R_{jc} vs. heat dissipation

れたシステムを紹介する。プレートの寸法は厚さ0.6mm、長さ190mm、幅100mmのものが用いられている。ヒートパイプは直径3mmのものであり、ノートブックPCの厚さ方向の制約に適合させるために断面の寸法が高さ2mm×幅3.6mm×長さ200mmの楕円状に加工されている。ヒートパイプは熱拡散プレートにリベットを用いて機械的に接合された押さえプレートにはさみこみ固定されている。ヒートパイプの加熱部分、冷却部分の長さはそれぞれ、30mmと170mmである。このシステムの冷却性能 (Rca) を図9に示す。Rcaは約8℃/Wである。Tj = 100℃, Ta = 35℃, Tsys = 10℃, Rjc = 0.33℃/Wの条件では、このシステムはおおよそ7W分の放熱が可能ということになる。

3.2 例2—ヒンジタイプのヒートパイプシステム¹⁾

図4に示されるように、ヒンジタイプのヒートパイプシステムを用いることにより、ノートブックPCの表示画面裏面スクリーンにアルミニウム製熱拡散プレートを取り付け、プロセッサからの熱をそのプレートに輸送することが可能となる。基本的にこのシステムは、直径2~4mmのヒートパイプと寸法が長さ25mm、幅7mm、高さ17mmの銅製ヒンジコネクタで構成される。初段のヒートパイプは加熱部を熱源に接触させて取り付けられ、2つのヒート

パイプをつなぎ止めているヒンジコネクタを通して第2段目のヒートパイプに熱を伝える。第2段目のヒートパイプは、寸法が170mm×250mm×0.4mmのアルミニウム製熱拡散プレートに熱を伝えるために使われている。ヒンジコネクタは初段のヒートパイプから第2段目のヒートパイプへ熱の受け渡しを可能とし、ノートブックPCの開閉に対応可能であるように第2段目のヒートパイプをノートブックPCの開閉に合わせて回転させるために使われている。冷却性能 (Rca) を図9に示す。Rcaは約5℃/Wの値が得られている。例1と同じ条件では、このシステムは10W分の放熱が可能である。

3.3 例3—ハイブリッドシステム^{2) 3)}

ハイブリッドシステムは図5に示すように、ヒートパイプ、ダイカストプレート、フィン、ファン等で構成されるシステムである。放熱のために、アルミニウムダイカストプレート上に取りつけられた3本のヒートパイプが使われている。ヒートパイプにはアルミニウム製のフィンが取り付けられており、フィンに直接風を吹き付けるために放熱用ファンが使われている。このシステムの冷却性能 (Rca) は図9に示されており、Rcaは約1.8℃/W、26W分の放熱能力がある。

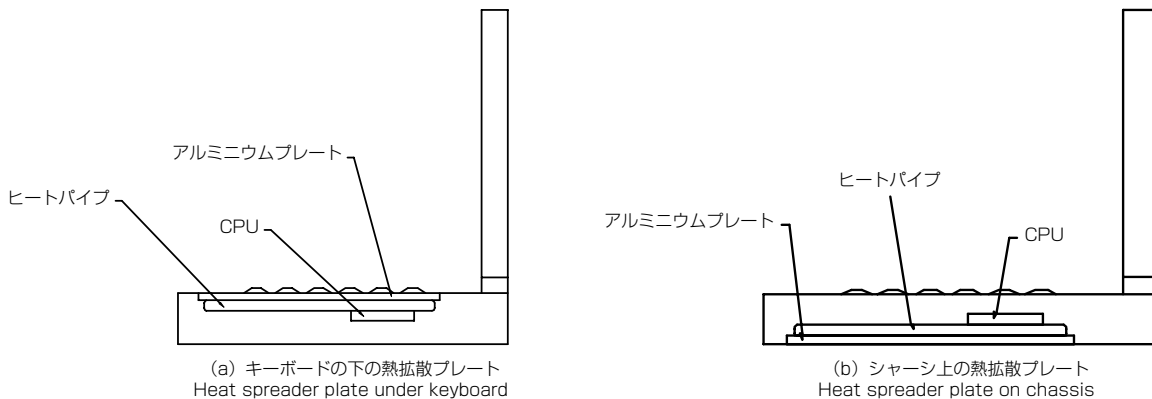


図3 ラップトップPCにおける受動的熱対策
Passive cooling solution for laptop PC

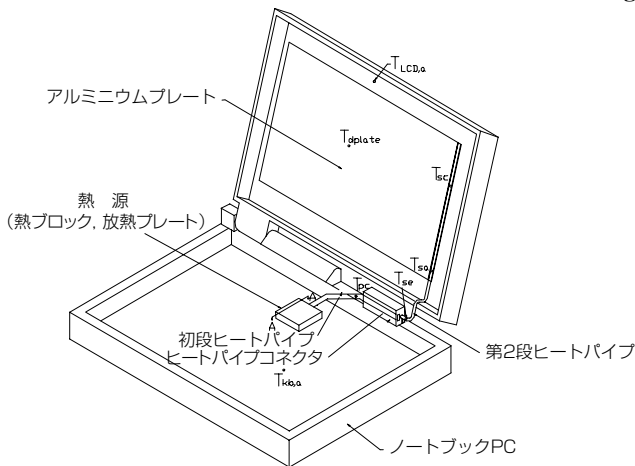


図4 ヒンジタイプのヒートパイプシステム
Hinged heat pipe system

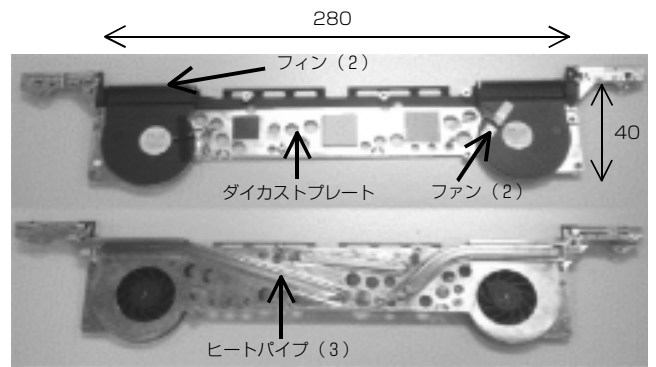


図5 ハイブリッドシステム (単位: mm)
Hybrid system

3.4 例4ーリモートヒートエクスチェンジャー (Remote Heat Exchanger ; RHE)

図6の (a) (b) に示すように、RHEの基本構成はヒートパイプ、フィン、ファンより成る。図6 (a) のタイプは1本のヒートパイプと1つのフィンからなるRHEであり、一方 (b) のタイプは2本のヒートパイプと2つのフィンからなるRHEである。どちらに対しても同じ大きさ (約45mm×10mm) で同じ性能 (最大風量：0.15m³/min, 最大静圧：90Pa) のファンが取り付けられている。(a) (b) 2つのタイプのRcaの値は、図9に示すようにそれぞれ1.4℃/Wと1.1℃/Wである。放熱能力はそれぞれ32Wと39Wとなる。

3.5 例5ーベーパーチャンバ

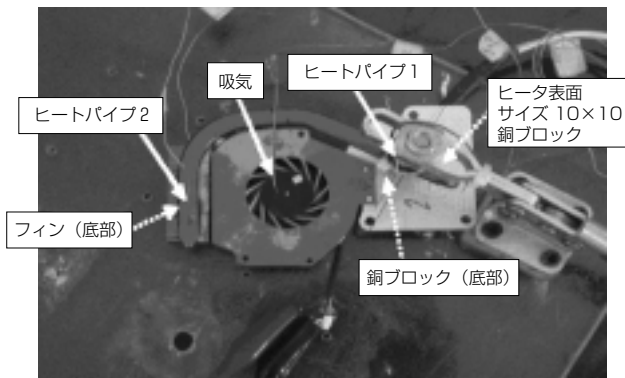
ベーパーチャンバの動作原理は2相の熱輸送デバイスであるヒートパイプと同様である。ヒートパイプは円管から作られ、取り付けられる段階で要求される形状に曲げたり、平板化されたりする。ベーパーチャンバは冷間鍛造または機械加工で作られるので、加工後にはその形は固定され延ばしたり平板化することはできない。図7に様々な形と大きさのベーパーチャンバの写真を示す。

ベーパーチャンバを用いた冷却システムの例を図8に示す。このシステムでは、図9に示したようにRcaは約0.6℃/Wである。前に述べたのと同じ制約条件T_j = 100℃, T_a =

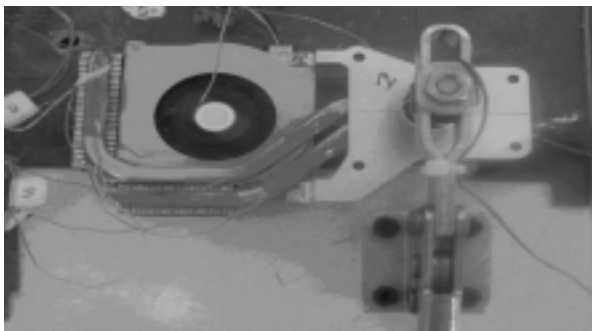
35℃, T_{sys} = 10℃, R_{jc} = 0.33℃/Wでは、このシステムでは60W分の放熱が可能である。

ベーパーチャンバを用いた冷却システムは、一般的にヒートパイプを用いたシステムよりも高い冷却能力を示す。ヒートパイプを用いたシステムと比較してベーパーチャンバシステムの優れた点を以下に示す。

- ・熱の流れがヒートパイプの1次元の流れと比較して2次元になる。これによりベーパーチャンバは高い熱輸送能力と低い熱抵抗を持つことになる。
- ・50W/cm²を越える高い熱流輸送能力を持つ。
- ・全体の温度分布を均一にすることが可能であり、また、大きな表面積を持つため、これは放熱能力にとっては優位な条件である。
- ・CPUに直接取り付けることにより、ヒートパイプを取り付ける場合に必要銅ブロックやヒートパイプと銅ブロック間の熱抵抗を減らすことができる。
- ・フィンを直接取り付けることができ接触熱抵抗を低くすることができるため、フィンの効果を高めることができる。



(a) RHE タイプ1
RHE type 1



(b) RHE タイプ2
RHE type 2

図 6 RHE
Remote Heat Exchanger (RHE)

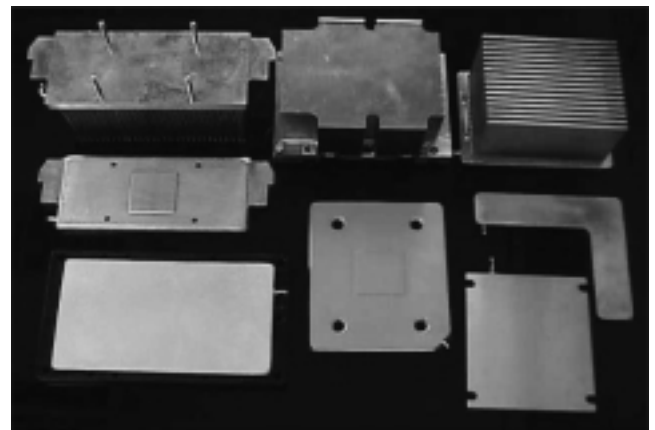


図 7 各種ベーパーチャンバ
Various vapor chambers

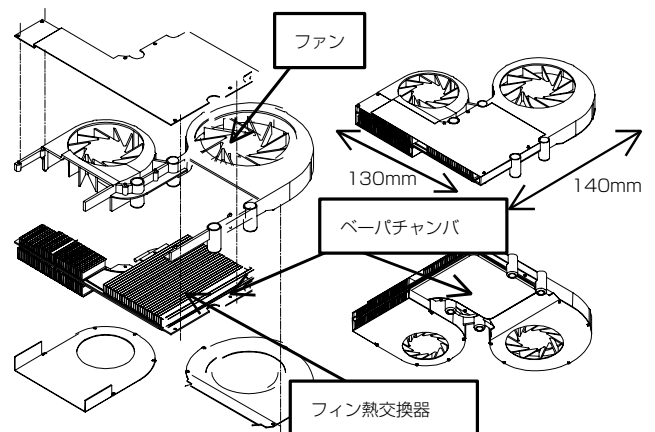


図 8 ベーパーチャンバの適用例
Vapor chamber solution

タイプ別の冷却システムのRcaと放熱能力の概要を表1に示す。

4. ヒートパイプとベーパーチャンバ適用によるラップトップPC変遷

先に述べたように、より高い熱伝導能力を持ち、加熱部

表1 様々な放熱システムにおけるRcaとQ
Summary of Rca for various thermal solution

No.	熱	Rca (°C/W)	Q (W)
1	熱拡散プレート付きヒートパイプのシステム	8	7
2	ヒンジタイプのヒートパイプシステム	5	10
3	ハイブリッドシステム	1.8	26
4a	RHEを用いたシステム タイプ1	1.4	32
4b	RHEを用いたシステム タイプ2	1.1	39
5	ベーパーチャンバを用いたシステム	0.6	60

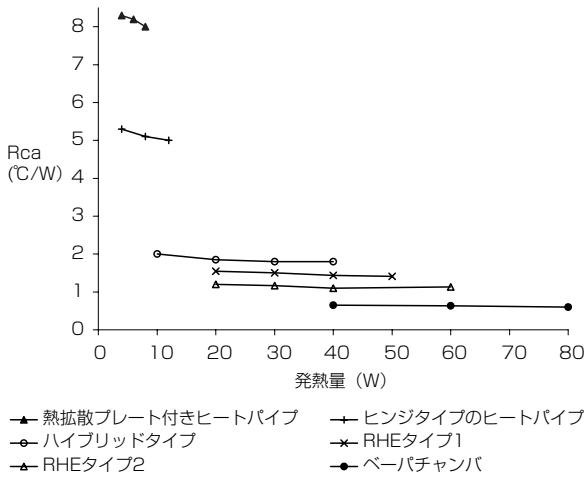


図9 各種の熱対策方法に対する発熱量と熱抵抗の関係
Thermal resistance Rca vs. heat dissipation for various thermal solution

と冷却部間で可能な限り最小の熱抵抗を持つヒートパイプとベーパーチャンバの適用をはかることが技術的な課題である。図10に様々なサイズのヒートパイプの一般的な冷却能力を示す。ヒートパイプは長さが150mmの丸型と平型である。図からわかるように、丸型のヒートパイプを平らにすると、熱輸送能力はサイズの減少割合に応じて低下する。さらにヒートパイプの実際の適用においては、ラップトップPCの部品配置に合わせてヒートパイプを多数曲げる必要があり、熱輸送能力はさらに低下することになる。CPUのパワーが増加するにつれて、より大きな熱輸送に耐えるヒートパイプの複数化や大型化が要求されるようになってきている。しかし、ラップトップPCの限られた有効スペースでは、複数のヒートパイプを設置することには問題がある。図11にラップトップPC冷却用ヒートパイプのデザインの傾向を示す。より高い冷却要求に伴って、複数の大型ヒートパイプを集約して使用する方法やベーパーチャンバをフィンやファンと共に使用する方法等に移行し

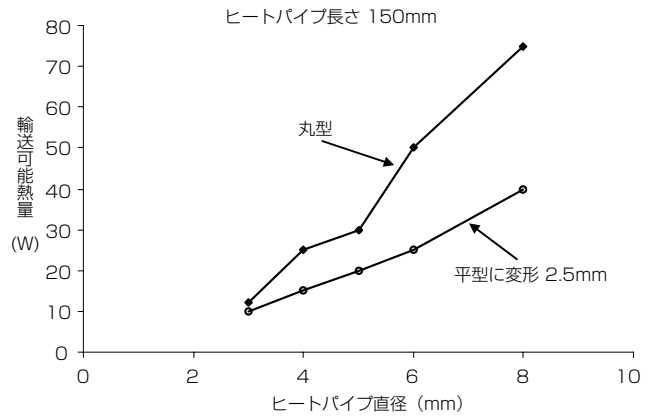


図10 ヒートパイプサイズによる輸送可能熱量
Heat pipe performance vs. heat pipe size

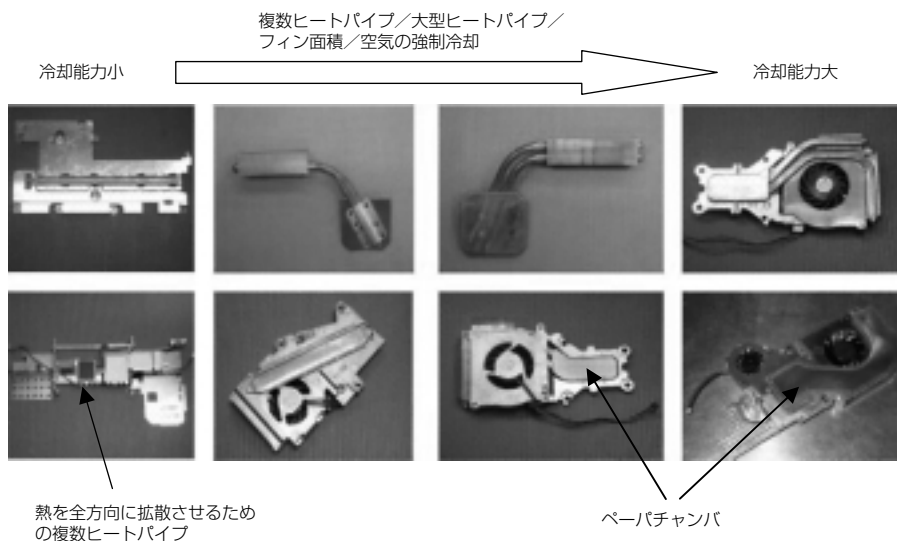


図11 ラップトップPCの熱対策の流れ
Trend of thermal solution in laptop PC

てきていることがわかる。

5. ヒートパイプのデスクトップPCへの適用

図12に、デスクトップPC冷却分野における現在のヒートパイプ適用の傾向を示す。依然として、アルミニウム成形のヒートシンクやファンを取り付けたヒートシンク等標準的な冷却システム (Rsa 0.3から0.4℃/W) が適用され続けていることがわかる。図12中では、クロック周波数2.4GHzのペンティアム4プロセッサ冷却のための代表的な

ファン付きヒートシンクが示されている。これからは熱抵抗0.3℃/W以下を満足するヒートシンクとヒートパイプを組み合わせたシステムが適用されていくことになると思われる。基本的に現状のコンピュータでヒートシンクの占有面積は大きくなってきているが、一方、熱源の大きさは以前と比較して同じ程度である。よってより低い熱拡散抵抗を持つ冷却システムに対してはヒートパイプが使用されることになる。図13にデスクトップPCの最上位機種とサーバに適用された複数ヒートパイプを使用した冷却の例を示す。

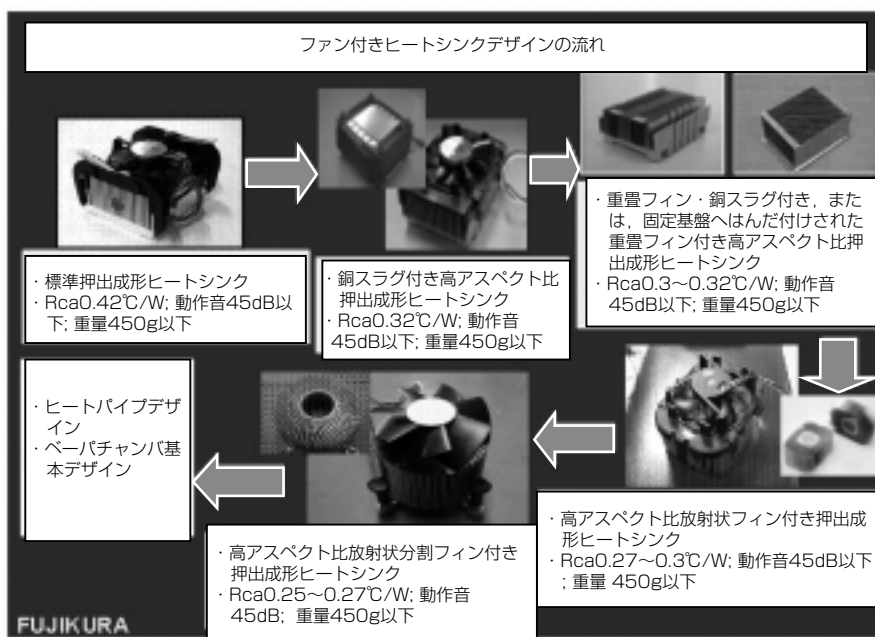


図12 デスクトップPCにおけるヒートシンクの流れ
Heat sink tendency on desktop PC

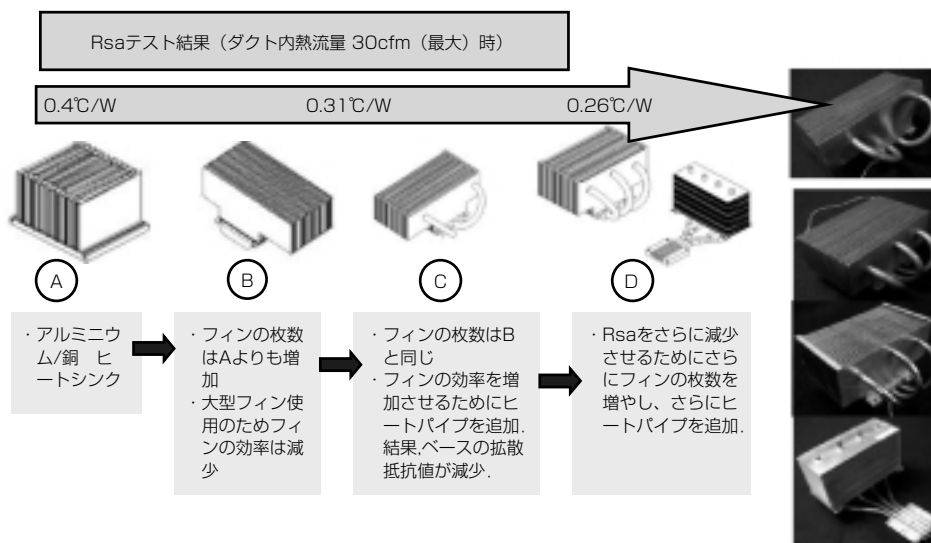


図13 デスクトップPCとサーバにおけるヒートシンクヒートパイプ
Heat pipe heat sink on desktop PC and server

6. む す び

通常、最も発熱量の多いプロセッサ表面の面積は小さいため、この冷却のためには大きなスペースへ熱を拡散させることが求められる。最小の温度勾配で最も有効に熱を拡散させる方法は、ヒートパイプやベーパーチャンバを使用することである。これらは熱拡散抵抗を低くすることを助け、それゆえ冷却システム全体の能力を改善させることができる。高い効率で熱を拡散させたり輸送する場合は、ベーパーチャンバはより高い能力をもち、より適している。プロセッサからの発熱量は増加し続け、これを適切に冷却するためには、高い熱輸送能力を持ち加熱部と冷却部との熱抵抗が最小となるような、さらに高い能力を持つヒートパイプやベーパーチャンバを開発し続けることが必要である。

参 考 文 献

- 1) T. Nguyen, M. Mochizuki, K. Mashiko, Y. Saito and I. Sauciuc : Advance Cooling System Using Miniature Heat Pipes in Mobile PC, Itherm '98, May 27-30, Seattle, WA, USA
- 2) T. Nguyen, M. Mochizuki, K. Mashiko and Y. Saito : Use of Heat Pipe and Heat Sink for Thermal Management of High Performance CPU, Sixteenth Annual IEEE Semiconductor Thermal Management and Management Symposium - Semitherm XVI, March 21-23, 2000 San Jose, CA, USA
- 3) Thang. Nguyen, M. Mochizuki, V. Wuttijumnong, K. Mashiko, Y. Saito and Tien Nguyen : Overview Latest Technology Using Heat Pipes for Cooling High Heat Generation Notebook Computer, Semitherm XX, March 9-11, 2004, San Jose, Ca, USA