

コンピュータ高性能プロセッサ冷却の現状と今後

サーマルテック事業部 望月正孝¹・齋藤祐士²・清岡史利²・Thang Nguyen³

The Way We Were and Are Going on Cooling High Power Processors in the Industries

M. Mochizuki, Y. Saito, F. Kiyooka & T. Nguyen

本稿の目的は、ヒートパイプとベーパーチャンバの使用をはじめとして、パーソナルコンピュータ(PC)の限られた空間で高性能プロセッサを冷却する様々な実用的な冷却方法について概説することである。本稿は、空冷の能力の限界を拡張し、その性能を最大にする方法について論じる。本稿では、多様なファン付きヒートシンク用空冷のデザイン、データ、写真、および考察を示し、デザインの変化がいかに空冷能力の限界を押し広げるかを示す。本論部分では、次世代の高性能プロセッサを冷却するために開発している様々な革新的な冷却方法を提示する。最後に、次世代の高性能チップを冷却するために開発するシステムと方法を提案する。

The purpose of this paper is to provide an overview of various practical cooling solutions including the use of heat pipes and vapor chambers for cooling high power processors in a confined space of personal computers (PCs). This paper discusses how to extend the air cooling capability and maximize its performance. Included in this paper are the design, data, photos, and discussion of various fan sink air cooling designs showing how the design changes can push the limit of the air cooling capability. In the main section of this paper, we present various innovative ideas of cooling solution that we are under the process developing for the cooling of next generation of high power processors. Finally, we would suggest what and which way we are going to develop next generation of high power cooling chips.

1. ま え が き

1993年にPentium™プロセッサが採用されてから、プロセッサ性能と消費電力が年ごとに増大する傾向が顕著になってきている。例えば、1993年にはPCで使用するプロセッサのクロック周波数はMHz台であったが、2000年にはクロック周波数が約1 GHz、消費電力が20 Wに達し、さらに2005年にはクロック周波数が約3 GHz、消費電力が130 Wに達した。放熱量は増加しているが、反対にプロセッサのチップサイズは微細シリコン回路技術の進歩によって同じままか小さくなり、そのため熱流束は危険なほど高くなっている。2000年には熱流密度は約10 ~ 15 W/cm²であったが、2006年には100 W/cm²に達した。

電子部品の熱管理は、製品化を成功させる鍵を握る技術の一つである。受動的冷却技術から低温技術まで、利用可能な冷却技術は数多く存在する。例えば、ファンを

備えたフィン付きヒートシンク(ヒートパイプ付きまたはヒートパイプ無し)、機械式ポンプによる液体冷却の1相または2相熱輸送、熱電冷却器、冷凍機、直接液体浸漬冷却などをあげることができる。言うまでもないが、どの冷却技術を選択するかは、熱流束、放熱量、信頼性、静音性、実装性、保守、コストなどの要因に左右される。すなわち、必要な冷却性能をできるだけ安価なランニングコストで実現できる技術が選択される。

現在のデスクトップPCとサーバのプロセッサは概して、放熱量が100 Wを超え、熱流束が100 W/cm²を超えている。受動的冷却ではもはや冷却要求条件を満たすことはできない。液体冷却、熱電冷却、冷凍機などの冷却技術は、必要な冷却性能を提供することができ、コンピュータの冷却のために実用化されている。しかし、これらの冷却技術は未だ広く使用されてはいない。その理由として、システムへの実装が困難である、信頼性が低い、現時点では大量生産に不向き、さらに特にコストが他の技術より高いなどがあげられる。技術的に成熟し、ランニングコストが最も低いという理由で、コンピュータの冷却に最も広く用いられている冷却技術は、空冷である。

1 開発部長

2 開発部グループ長

3 開発部

本論文の目的は、空冷の能力を拡張し、その性能を最大にする方法について考察することである。本論文は、様々なファン付きヒートシンク用空冷のデザイン、データ、および考察について論じ、空冷能力の限界を押し広げるためにデザインがいかに変化してきたかを示す。例えば、熱冷却面の面積、フィン効率、空気流量を最大にするヒートシンクのデザイン、およびファンの風量性能を最適化することで熱輸送の効率を向上させるヒートパイプやベーパーチャンバの使用について述べる。

熱を発生するプロセッサのチップ表面は通常小さく、面積が約1cm²である。効率的な冷却のためには、熱源と放熱部品間の温度勾配はできるだけ小さい方がよい。最もよく知られている、最も低い熱抵抗を持つ効率的な熱輸送デバイスはヒートパイプとベーパーチャンバである。基本的に、ヒートパイプとベーパーチャンバは2相熱輸送デバイスであって、少量の作動流体の入った密封された真空容器である。その容器の一方の端が暖められると、内部の液体が蒸発し、その蒸気が容器の冷たい他端に移動して凝縮する。蒸発時の潜熱が大きいので、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を輸送することができる。したがって、ヒートパイプとベーパーチャンバは非常に高い熱伝導率を持つデバイスである。その熱伝導率は、同じ寸法の中実銅製デバイス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、その優れた熱輸送能力、高い効率、単純な構造から、最も重要な技術として、さらに最もコストパフォーマンスに優れた熱対策として登場した。作動流体はその用途における作動温度に基づいて決められる。コンピュータ用途では、作動温度は通常50～100℃である。この温度範囲内では、作動流体として水が最も適している。

図1にラップトップPC、デスクトップPC、およびサーバに対する現在と今後の熱対策の推移を示す。ラップトッ

プPCでは、リモートヒートエクスチェンジャ（RHE）付きヒートパイプを使用する現在の熱対策は約1.5 /WのR_{ca}性能を提供することができるが、ベーパーチャンバを使用してR_{ca}性能をさらに向上させることを検討する必要がある。ファンを含めたラップトップPC用熱対策の推定コストは、性能要求によって異なるが、5～15 \$の範囲である。デスクトップPCとサーバはその多くが依然として、アルミニウム押出材でできたアスペクト比の高い平行フィンまたはラジアルフィン付きヒートシンク、アルミニウム製または銅製ベースにはんだ付けされたアルミニウム製または銅製プレートフィンなど、従来からの冷却方法を用いている。しかし、性能要求が厳しくなるにつれ、性能を最大にし、空冷能力を限界まで拡張するために、ヒートパイプやベーパーチャンバを使用するようになってきている。

2. 熱抵抗の計算方法

冷却対策に必要な熱抵抗を計算する方法は以下の通りである。

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

ここで、

- Q : 放熱量 (W)
- R_{ja} : CPUチップと周囲間の熱抵抗 (/W)
- R_{jc} : CPUチップとCPUケース表面間の熱抵抗 (/W)
- R_{ca} : CPUケース表面と周囲間の熱抵抗 (/W)
- T_a : 周囲温度 ()
- T_j : CPUチップ内部の接合部の温度 ()
- T_{sys} : 他の発熱部品 (ハードディスクドライブ、グラフィックカードなど) に起因するシステム内部の周囲温度の上昇 ()

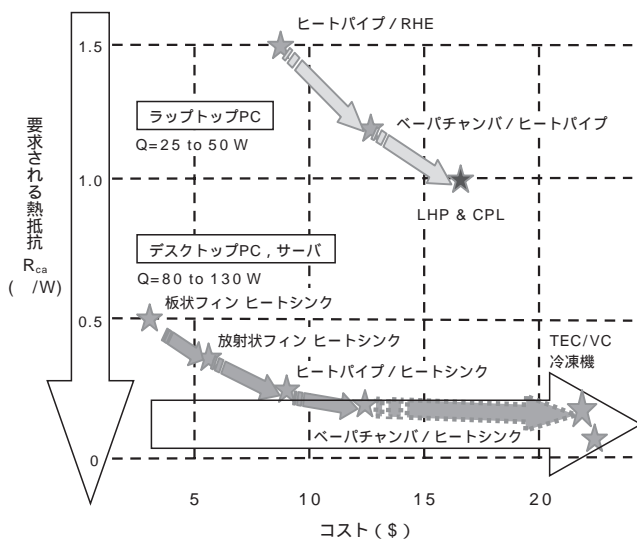


図1 熱対策の推移
Fig. 1. Thermal solution trend.

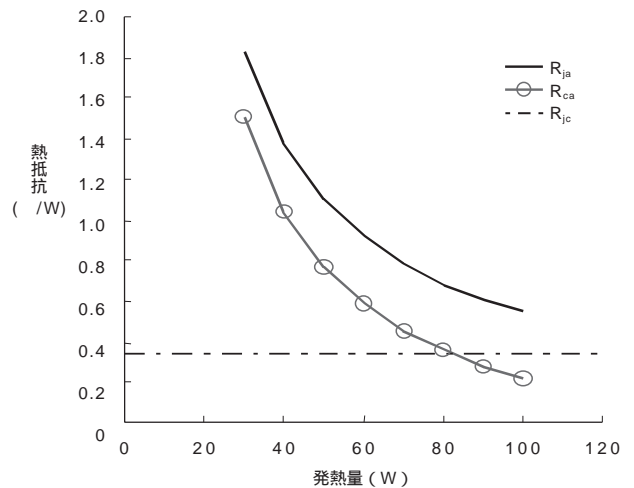


図2 R_{ja}, R_{ca}, R_{jc} と放熱量
Fig. 2. R_{ja}, R_{ca}, R_{jc} vs. heat dissipation.

CPUのパッケージは熱を拡散させるものであり、 R_{jc} はCPUのタイプやメーカーによって異なる。ほとんどの場合、 R_{jc} は約0.33 /Wである。

熱対策では、 R_{ca} を制御することだけが可能である。この熱抵抗は、Thermal Interface Material (TIM) と冷却方法で決まる。CPU接合部の最高温度を100、外部周囲温度を35、システムの温度上昇を10と仮定した場合に必要な熱抵抗 R_{ja} 、 R_{jc} 、 R_{ca} とCPU放熱量の関係を図2に示す。

消費電力が100 Wまで上昇すると、外部熱マージン(R_{ca})が空冷の限界にほぼ達してしまうので、 R_{jc} (0.33 /W)を無視することはできない。

3. ラップトップPCの熱対策の例¹⁾²⁾⁴⁾

3.1 ハイブリッドシステム

ハイブリッドシステムは図3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付けられた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、フィンに直接空気を吹き付けるために放熱用ファンが使われている。このシステムは、 R_{ca} が約1.8 /Wで、放熱能力が26 Wである。また、一

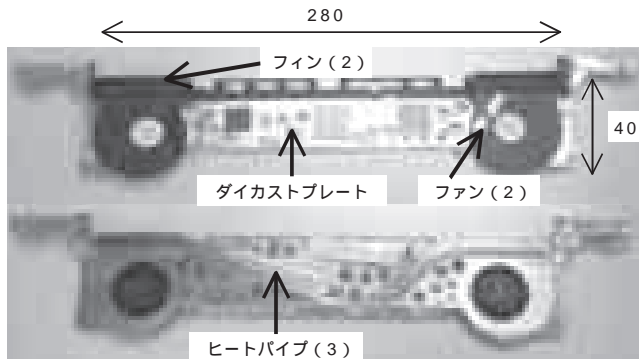


図3 ハイブリッドシステム (単位: mm)
Fig. 3. Hybrid cooling system.



図4 リモートヒートエクスチェンジャ (RHE)
Fig. 4. Remote heat exchanger.

体構造のために、組み立てが非常に容易というメリットがあるが、その反面、ダイカストの熱容量が大きいので、熱の一部がPCケース内部に滞留するという欠点がある。

3.2 リモートヒートエクスチェンジャ (RHE)

図4に示すように、リモートヒートエクスチェンジャは、基本的にヒートパイプ、フィン、ファンから構成される。ファンの大きさは、おおよそ45 mm x 45 mm x 10 mm (厚さ)である。ファンは最大風量0.15 m³/min、最大静圧90 Paの性能のものを用いた。このデザインの R_{ca} は約1.1 /Wで、冷却能力が40 Wである。

3.3 ベーパーチャンバ

ベーパーチャンバの動作原理は2相熱輸送デバイスであるヒートパイプと同じである。ヒートパイプは丸管から作られ、密閉後に要求形状に曲げたり、平板化したりすることができる。ベーパーチャンバの容器は、プレス加工、冷間鍛造または機械加工で作られるので、その形状は固定され、曲げたり、平板化したりすることはできない。図5に様々なベーパーチャンバの形状と大きさを示す。

図6に、ベーパーチャンバを用いた冷却システムの例を示す。このシステムの R_{ca} は、表1に示すように約0.6 /Wである。周辺条件を $T_j = 100$ 、 $T_a = 35$ 、 $T_{sys} = 10$ 、

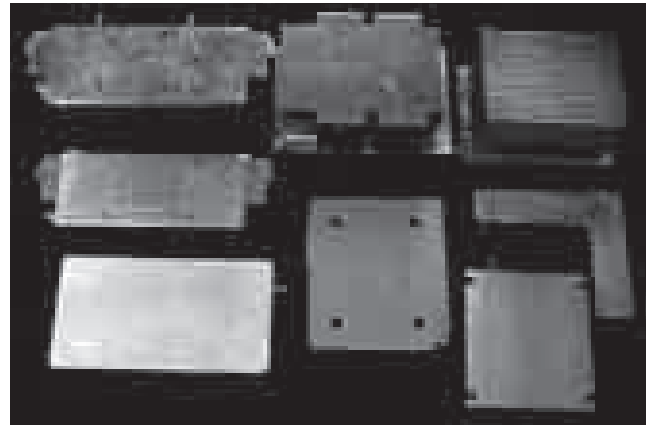


図5 ベーパーチャンバ各種
Fig. 5. Various vapor chambers.

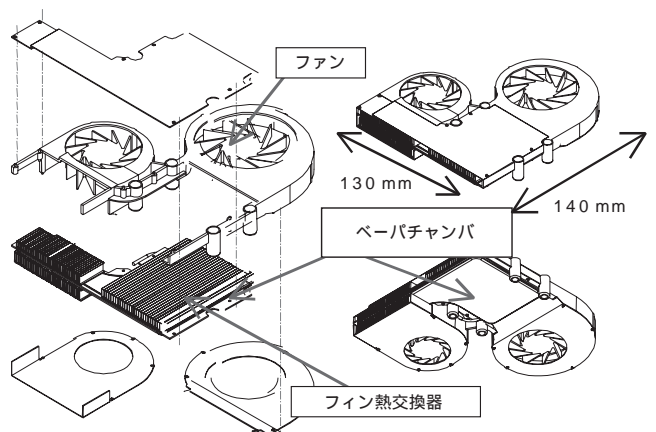


図6 ベーパーチャンバの適用例
Fig. 6. Vapor chamber solution.

$R_{jc} = 0.33 \text{ } /W$ と仮定すると、このシステムの放熱能力は60 Wである。

ベーパーチャンバを用いた冷却システムの性能は、2次元方向熱輸送のおかげで、ヒートパイプを用いたシステムの性能よりも高い。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を用いたシステムの優れた点は以下の通りである。

- ・熱の流れがヒートパイプの1次元的な流れと比較して2次元的になる。これによりベーパーチャンバはより高い熱輸送能力と低い熱抵抗を持つ。
- ・50 W/cm²を超える高い熱流束にも対応可能。
- ・ベーパーチャンバは均一な温度分布と大きな表面積を持つため、放熱能力に優れている。
- ・ベーパーチャンバは(TIMを介して)CPUに直接取り付けることができるので、ヒートパイプを取り付ける場合に必要な「ヒートブロック」が不要となり、ヒートパイプと「ヒートブロック」間の接触熱抵抗を低減することができる。
- ・ベーパーチャンバにフィンを取り付けて接触表面積を大きくすることができるので、接触熱抵抗を低減し、フィン効率を上げることができる。

様々な熱対策の R_{ca} と放熱能力の概要を表1に示す。

表1 様々な熱冷却方法の R_{ca} と放熱能力
Table 1. Summary of R_{ca} for various thermal solutions.

番号	冷却方法	R_{ca} (/W)	Q (W)
1	ハイブリッドシステム	1.8	26
2	遠隔熱拡散器	1.1	40
3	ベーパーチャンバ	0.6	60

図7に、ラップトップPCの熱対策の傾向を示す。冷却性能を最大にし、空冷能力の限界を押し広げるために、複数のヒートパイプを使用するデザインや、ベーパーチャンバを高密度のフィンや複数のファンと共に使用するデザインが求められていることがわかる。

4. デスクトップPCの熱対策の例²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾

図8に、空冷能力を最大にするためのデザインの変遷の概要を示す。同条件で比較するため、各デザインの冷却容積は、おおよそ90 mm × 90 mm × 65 mm(厚さ)である。最大冷却能力仕様時の騒音レベルは一般に、音源から1 m離れた地点で45 dBである。デザインの内容を以下に記載する。

タイプ1: 通常の押し出しヒートシンクであって、1インチ当たり約7枚のフィンを持っている。フィン厚さは1.2 mm、フィンピッチは3.5 mm、フィン高さは30 mmである。このヒートシンクの R_{ca} は0.4から0.5 /Wである。

タイプ2: アスペクト比の高い押し出しヒートシンクである。このデザインでは、能力いっぱいまで押し出し成型を行っている。フィン枚数は1インチ当たり約10枚で、フィン厚さは1 mm、フィンピッチは2.3 mm、フィン高さは30 mmである。熱拡散抵抗を最小にするため、アルミニウム製ベースに銅製ブロックをはんだ付けしている。このヒートシンクの R_{ca} は0.3から0.4 /Wである。

タイプ3: このデザインでは、平行フィンから放射状フィンに変わっている。このヒートシンクは、ベ-

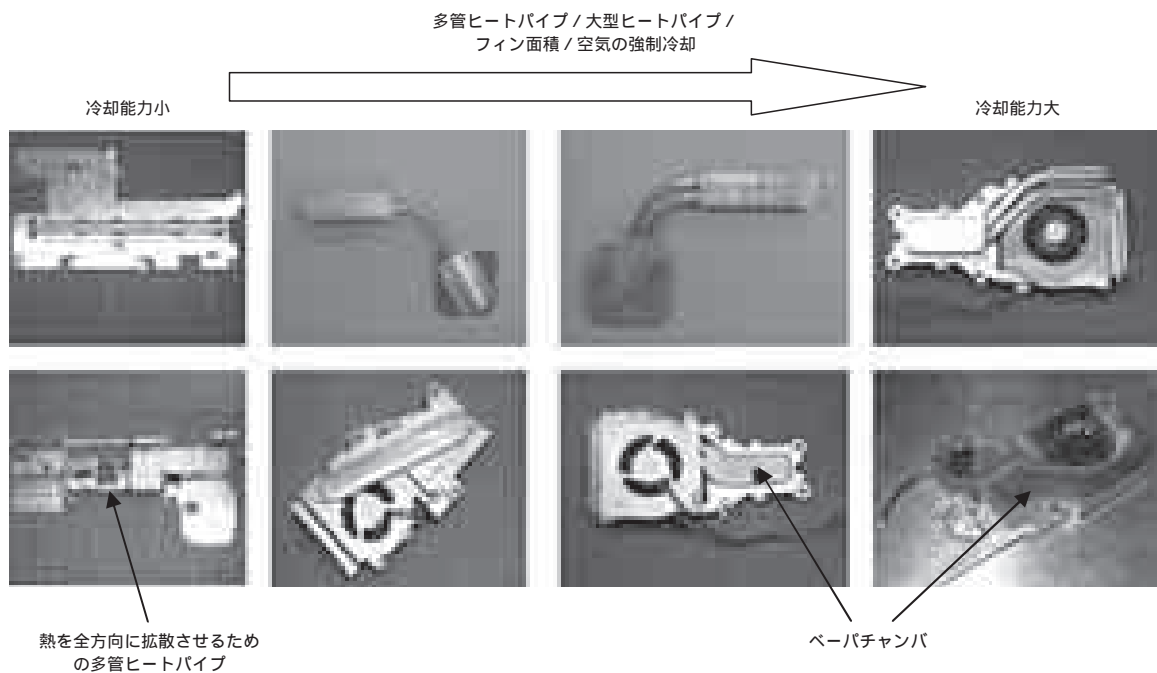


図7 ラップトップPCの熱対策の傾向
Fig. 7. Trend of thermal solution in laptop PC.

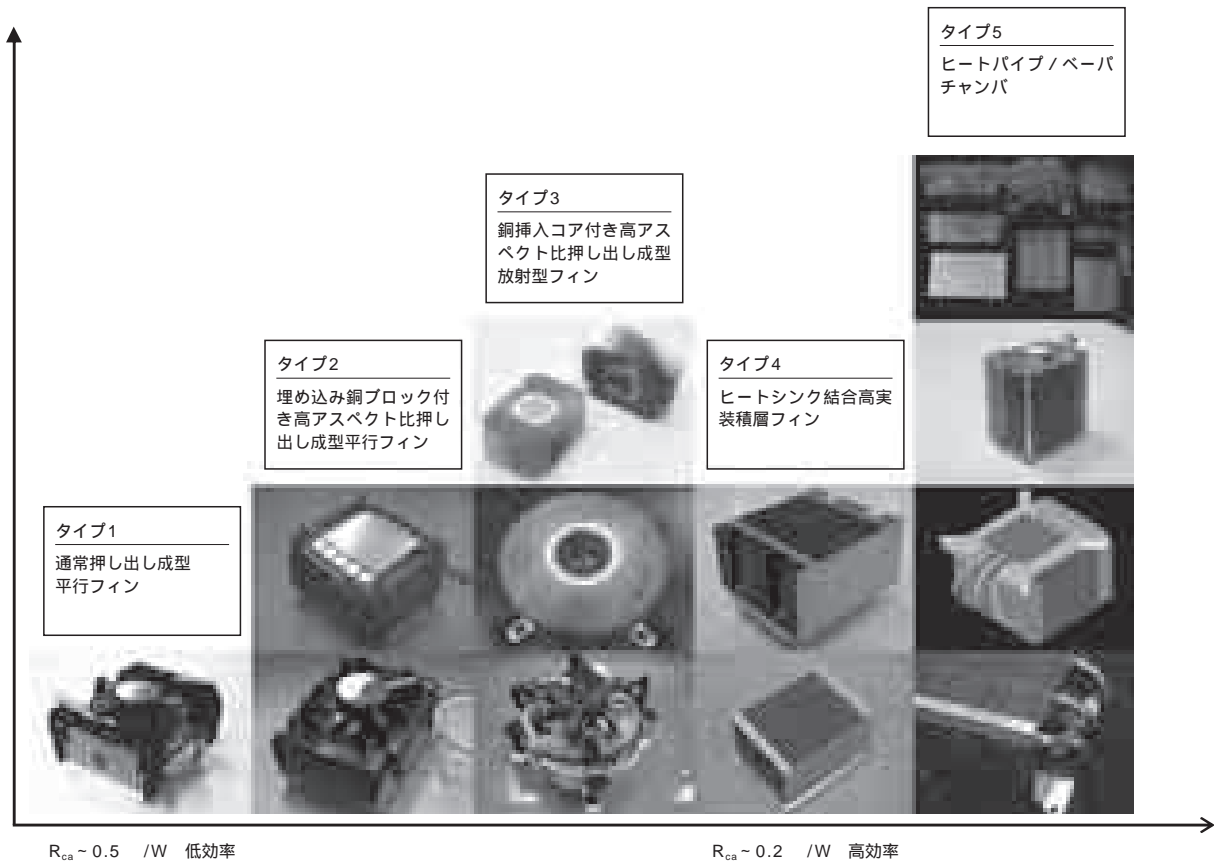


図8 デスクトップPCの冷却方法変遷の概要
Fig. 8. Summary of cooling design trend for desktop PCs.

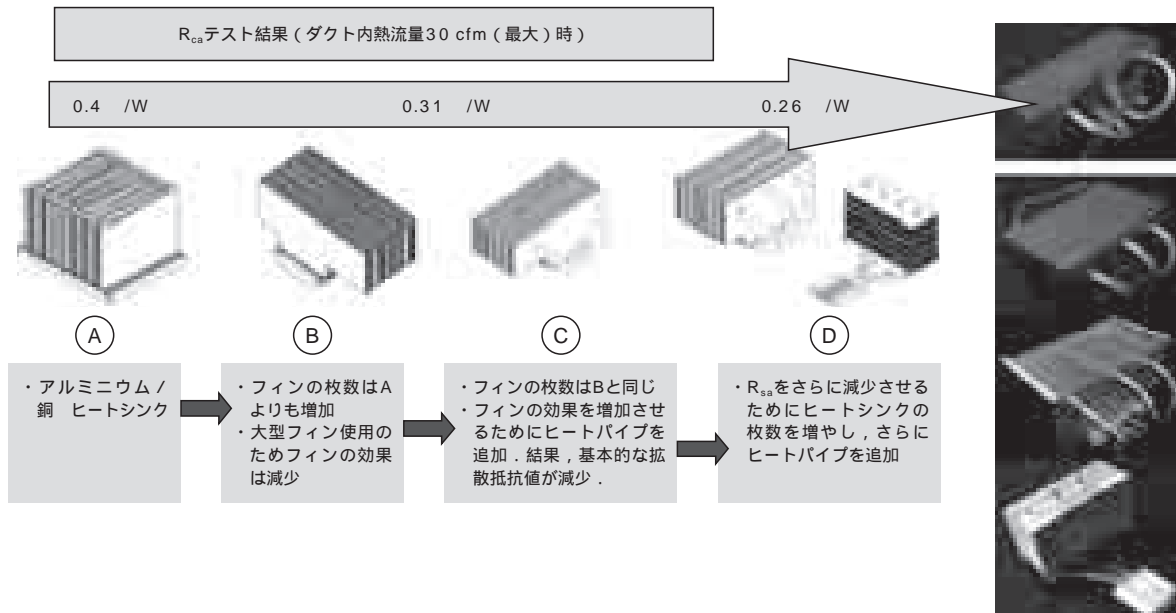


図9 デスクトップPCの冷却にヒートパイプ・ヒートシンクを使用したシステム
Fig. 9. Heat pipe heat sink solution for cooling desktop PCs.

スからフィンまでの熱伝導を向上させるため、一体化された銅製コアを持っている。一般に、放射状フィンは、平行プレートフィンより多くの空気をファン

から取り込む。従って、フィンから空気への熱伝達率がより高く、冷却がより効率的である。このヒートシンクの R_{ca} は約0.3から0.35 /Wである。

タイプ4：高密度の積層フィンをベース金属にはんだ付けしている。フィン厚さは0.2 mm、フィンピッチは1 mm以下にすることができる。このヒートシンクの R_{ca} は約0.25から0.3 /Wである。

タイプ5： R_{ca} をさらに低減して、仕様上の制約が同じという条件で0.25 /Wより低くするためには、ヒートパイプやベーパーチャンバをベースに使用することを検討する必要がある。これにより熱源からフィンまでの熱輸送が最大になり、冷却能力が向上する。

図9に、冷却性能を向上させるためにヒートパイプを使用した例を示す。熱源からフィンまで熱を効率的に輸送するためにヒートパイプを使用することで、フィン効率を向上させ、ベースにおける熱拡散抵抗を低減している。

5. サーバの熱対策の例

サーバの熱対策技術はデスクトップPCに対する技術と似ているが、熱仕様と境界条件は異なる。サーバの例では、放熱量はデスクトップPCより高いが、騒音はデスクトップPCの45 dBより高い55 dBである。図10に、サーバ冷却用のファン付きヒートシンクの例を示す。これは、ファンがヒートシンクと一体化されているため、アクティブクーリングと呼ばれる。パッシブクーリングでは、ヒートシンクと一体化されたファンはないが、空気をヒートシンクに吹き付けるためにコンピュータシステム用の組込みファンを使用している。図10に示すデザインでは、銅製フィンを銅製ベースにはんだ付けしている。このデザインは、銅製ベースを図5に示したベーパーチャンバベースと交換することで、さらに改良することができるが、必要性能を満足しているためこのデザインが用いられた。さらにベーパーチャンバを使用するとコストが高くなるという理由もある。

図11と12にその他のサーバ冷却の例をいくつか示す。これらの例では高さ方向のスペースが利用できるので、

「タワー」型デザインを使用することが理想的である。このデザインは、マルチヒートパイプ型か単一大型ヒートパイプ型である。マルチヒートパイプ型の場合、ヒートパイプの曲がり部にはフィンを取り付けられないので、この部分で冷却スペースの損失が生じるのに対して、単一大型ヒートパイプ型の場合には、ヒートパイプの全長に

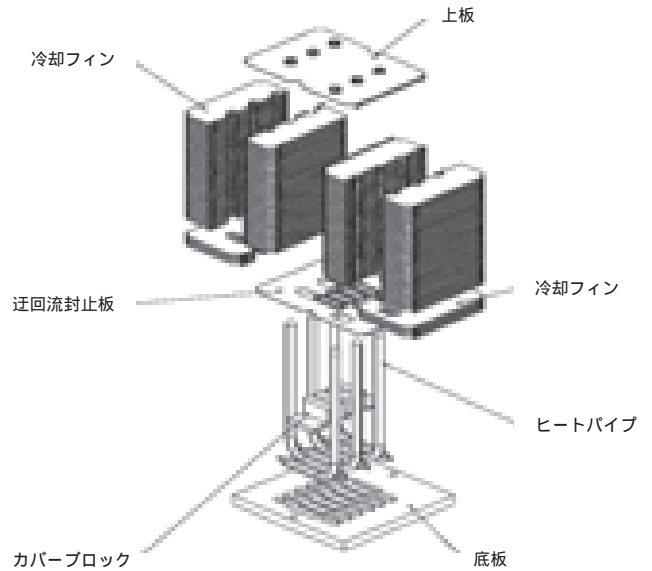


図11 タワー型マルチヒートパイプ
Fig. 11. Multiple heat pipes tower.



図12 タワー型単一大型ヒートパイプ
Fig. 12. Single large heat pipe tower.

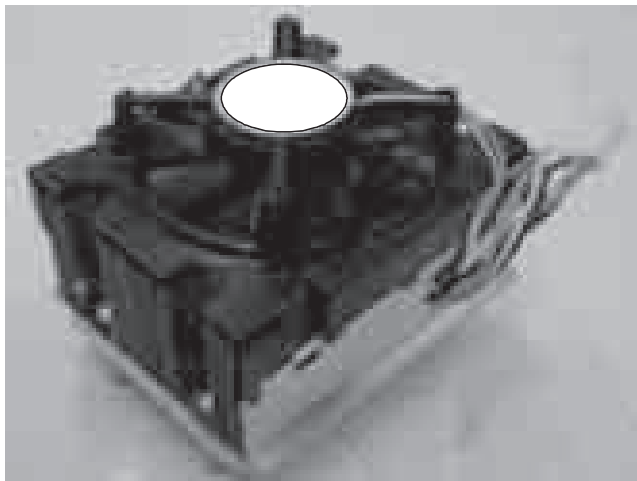


図10 サーバ冷却用ファン付きヒートシンク
Fig. 10. Fan sink for cooling server.



図13 ベーパーチャンバベース
Fig. 13. Vapor chamber base.

わたってフィンを取り付け冷却スペースを有効に用いることができる。従って、フィン構成が同じ場合は、マルチヒートパイプ型の方がより高さを必要とする。一方、マルチヒートパイプ型は単一大型ヒートパイプ型よりファン部分の圧力損失が小さい。冷却性能はフィン構成とダクト空気流が同じと仮定すると、両方のデザインでほとんど差がない。

取付条件で高さ方向のスペースが取れない場合、ペーパーチャンパを使用したシステムの方がヒートパイプを使用したシステムより適している。図13に、ペーパーチャンパベースに直接フィンをはんだ付けしたデザインを示す。熱源の大きさと、金属ベースの場合のヒートシンクベースの大きさにもよるが、ベースに沿って大きな温度勾配がつく。2相の潜熱輸送を利用するペーパーチャンパでは、ベースはほぼ等温である。

6. 今後の冷却技術

6.1 プロセッサチップからの熱拡散の改善

図14に、現在の一般的なCPUの放熱構成略図を示す。現在の技術では、ヒートスプレッドャ (IHS) は、熱伝導グリスを介してCPUチップと接続しており、中実銅プレートで作られている。IHSは熱の拡散部品であって、一部分で熱を受け取り、その熱を拡散し、様々な冷却部品へ伝達することができる。チップとIHS (図2の R_{jc}) 間の平均熱拡散抵抗は、総熱抵抗のかなりの割合を占める。

CPUチップとIHS間の熱拡散抵抗を改善するいくつかの実施可能なアイデアを以下に記す。

- ・ 中実銅製IHSの代わりに、図15に示す2相マイクロチャンネルペーパーチャンパ (MVC) を使用する。MVCは基本的に、少量の作動流体の入った密封された真空容器である。容器内部には、沸騰熱伝達面積を増大させる微小フィン構造物が設けられている。容器の一方の端が暖められると、内部の液体が蒸発し、その蒸気が容器の冷たい端に移動して凝縮する。蒸発時の潜熱が大きいので、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を輸送することができる。従って、MVC-IHSは、熱伝導によるのみ熱が拡散する中実銅製IHSと比べて、熱拡散抵抗が低く、等温の温度分布を持ち、局所的なホットスポットはない。
- ・ CPUチップとIHS間に熱伝導グリスを使用する代わりに、接触熱抵抗を最小にする口付けやはんだ付けを用いる。ただし、接触面の熱膨張率の不一致等の技術的な課題、腐食、化学反応等の信頼性問題などがある。これらの接触面にCPUチップとほぼ同じ熱膨張率を持つ材料をめっきしたり、金めっきを施したりすることができる。

図16に、熱拡散抵抗の概略計算と、様々なサイズの中実銅製IHSとMVC-IHSとの比較を示す。チップサイズが10 mm × 10 mmであるという前提に基づくと、IHSサイ

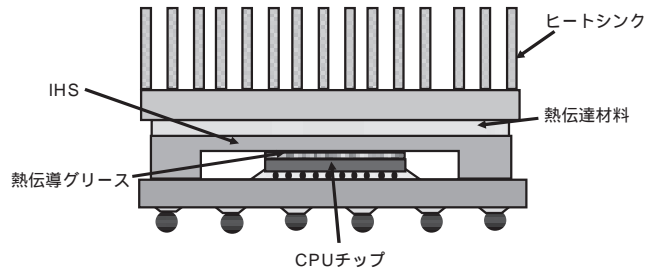


図14 CPUの放熱構成
Fig. 14. Thermal solution integration.

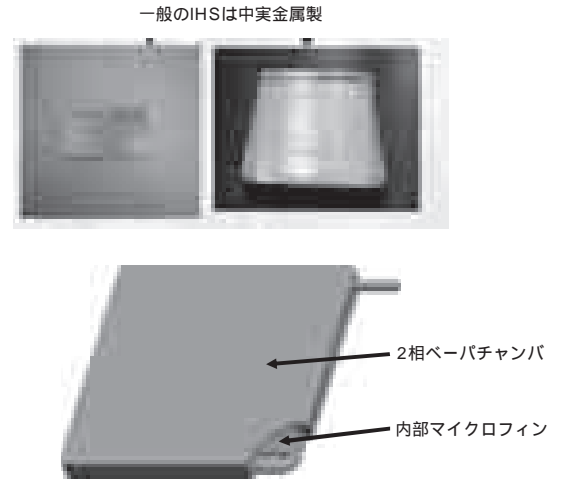


図15 マイクロチャンネルペーパーチャンパ
Fig. 15. Micro-channel vapor chamber.

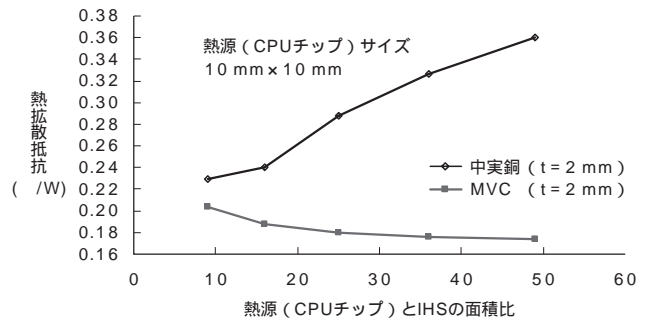


図16 中実銅製IHSとMVC製IHSの熱拡散抵抗比較
Fig. 16. Thermal spreading resistance comparison between Cu-IHS and MVC-IHS.

ズがチップサイズの約10倍あれば、中実銅製IHSよりもMVC-IHSを使用する方が有利である。

6.2 熱輸送デバイス (ヒートパイプ) の改善

前述のように、熱を発生するプロセッサのチップ表面が通常約1 cm²と小さいので、効率的な冷却のためには、熱源と放熱部品間の温度勾配をできるだけ小さくすることが必要である。熱抵抗が非常に小さく、熱輸送が効率的な、最もよく知られているデバイスは、ヒートパイプとペーパーチャンパである。プロセッサの消費電力と熱流束がますます増加しているため、ヒートパイプの最大熱

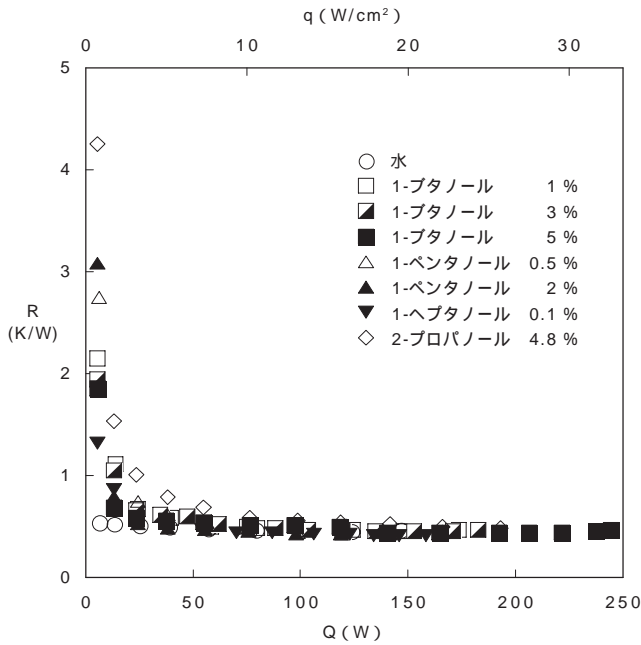


図17 直径8mmヒートパイプでの作動流体の違いによる性能比較
Fig. 17. Heat pipe performance comparison of different fluids for dia. 8 mm heat pipe.

輸送量 (Q_{max}) を大きくし、ヒートパイプの熱抵抗 (R_{hp}) を低減することが最も重要である。ヒートパイプを改善するいくつかの実施可能なアイデアを以下に記す。

- ・粉末焼結による新しいウィック型ヒートパイプ
粉体粒子のサイズと空隙率が最大毛管力を最適化する重要な要素であるが、その一方で高い浸透性を維持することが必要となる。また、ヒートパイプ性能をさらに向上させ、かつ安定させるためには、ウィックの厚さと均質性が重要な要素となる。
- ・ウィックの濡れ性と沸騰熱伝達を改善する新しい作動流体
基礎研究から、微量な高価アルコール水溶液は、沸騰プロセス中に、核生成部において強い液体流を伴った特殊な表面張力挙動を示すことがわかった。また、実験研究から、プール沸騰熱伝達において、水と比べて極めて小さい気泡が生成されることがわかった。これは、熱輸送性能が向上したことを示している。ヒートパイプ性能が向上したことを示している基礎研究の結果を図17に示す。

6.3 新しい冷却プラットフォーム

図18に、デスクトップPC用のプラットフォームである Advanced Technology Extended (ATX) と Balanced Technology Extended (BTX) の略図を示す。前者が現在のプラットフォームである。図19に、ATX用とBTX用の代表的な冷却システムを示す。BTXがATXに対して優れている主な点は以下の通りである。

- ・ATXでは、ファンはヒートシンクに向けて冷却空気を吹き付け、その冷却空気がヒートシンクベースに

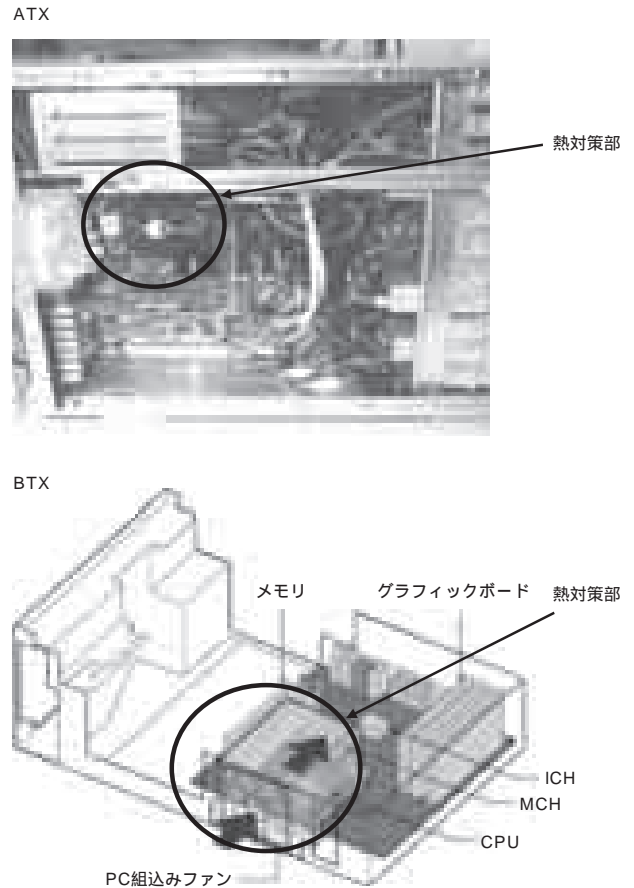


図18 デスクトップPCのプラットフォームATX, BTX
Fig. 18. ATX and BTX platform for desktop PCs.



図19 ATX, BTX用の主な熱対策部品
Fig. 19. ATX and BTX typical thermal solution.

衝突して直角に曲がり、ヒートシンクから出て行く。このため、空気流は静的圧力水頭を失い、その結果、

速度が遅くなり、マザーボード上の他の部品を効果的に冷却することができない。一方BTXでは、空気流はヒートシンクに平行に吹き付けられるので、空気出口部でも高速である。そのため、マザーボード上の他の部品をよく冷却することができる。

- ・ BTXは入口空気として、低温の空気を外部から取り入れるが、ATXはシステム内を循環している高温の空気を使用する。入口空気の温度が低ければ低いほど、冷却性能がよい。
- ・ 冷却性能が向上したBTXでは、ファンの回転数を下げることができ、その結果、騒音レベルも下げることができる。
- ・ BTXでは、システムへの空気流出入量が多いので、システム内部の温度が低い。
- ・ 空冷性能が向上すればするほど、ヒートシンクの性能は悪くてもよく、ヒートシンクは一般に製造が容易になり、かつ安価になる。

6.4 ピエゾファン（圧電ファン）⁶⁾

ピエゾファンの基本原理は、圧電セラミック材に電圧を印加すると、そのセラミック材の片側が膨張し、反対側が収縮することである。この圧電セラミック材を、例えば金属シートまたはプラスチックシートに取り付けて

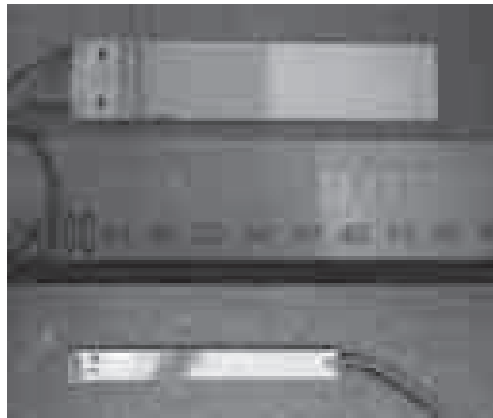


図20 シングルブレード型ピエゾファン
Fig. 20. Single blade Piezo fan.

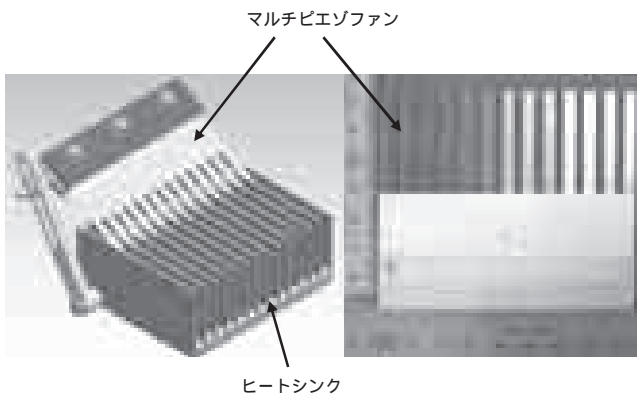


図21 マルチブレード型ピエゾファン
Fig. 21. Multi blade Piezo fan.

交流電圧を加えると、シートが振動する。このシートの振動が冷却のための空気流を生み出す。現在、高効率かつ小型のピエゾファンの開発が進行中である。ピエゾファンの主な利点は、他の空気移動デバイス、例えば軸流ファンやブローアと比べて安価なことと騒音レベルが低いことがあげられる。図20と21に、シングルブレード型とマルチブレード型のピエゾファンのプロトタイプを示す。

6.5 マイクロチャンネル型2相ポンプ

図22にマイクロチャンネル型2相ポンプの略図を示す。このシステムのコンセプトのみを本論文で示す。代表的な結果から、このシステムは飽和水流量が50 ml/min以下でも0.1 $\text{-cm}^2/\text{W}$ 以下の蒸発部熱抵抗を実現できることがわかった。また、このシステムは50 W/cm²以上の熱流束に対応できる。

6.6 キャピラリポンプ（CPL）⁷⁾

CPLの原理はヒートパイプの原理と似ている。CPLは基本的に、ウィック構造物に生じる毛管力と作動流体の蒸発時の潜熱を利用して、大きい熱負荷をかなり長い距離にわたって運ぶ熱輸送デバイスである。図23に、従来のヒートパイプとCPLの略図を示す。両者の主要な相違点

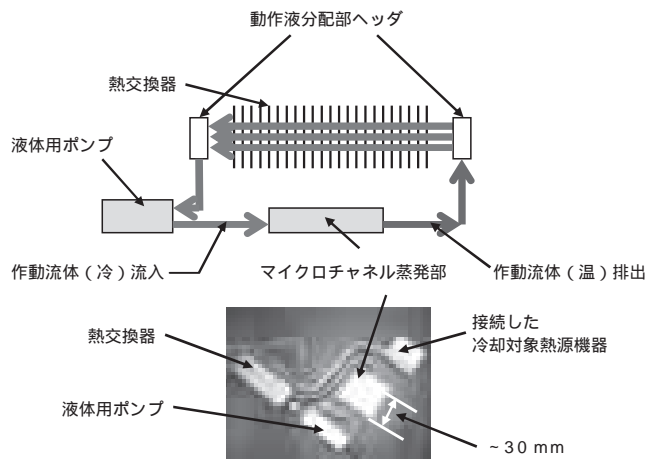


図22 マイクロチャンネル型2相ポンプ略図
Fig. 22. Schematic micro-channel two-phase pump loop.

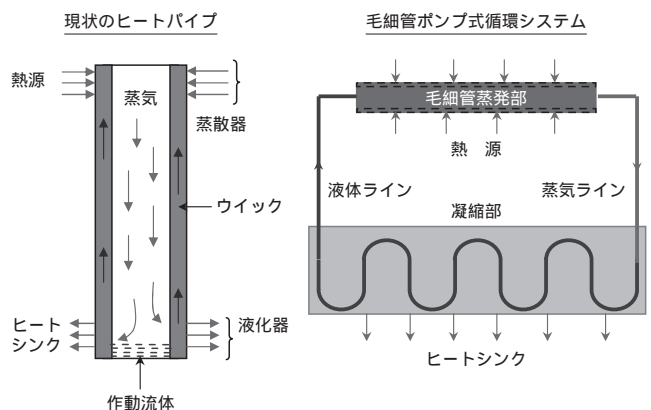


図23 現状のヒートパイプとCPLの概念図
Fig. 23. Schematic of conventional heat pipe and CPL.

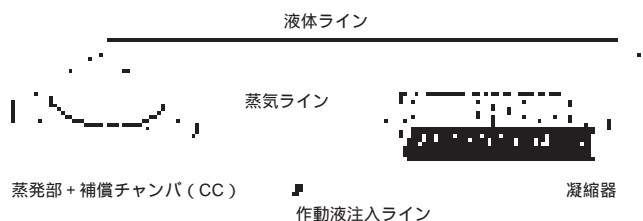


図24 開発したCPLプロトタイプ概念図
Fig. 24. Concept of CPL prototype developed.

表2 CPLの形状・寸法
Table 2. Characteristic dimensions of the CPL.

項目	形状・寸法
蒸発部形状	平円盤型
蒸発部直径 (OD) / 有効動作部直径 (Dia)	30/28 mm
蒸発部厚さ	10 mm
本体部材料	銅
ウイック部材料	ニッケル
ウイック有効細孔半径	3 ~ 5 μm
蒸気ライン直径 (ID/OD)	2/3 mm
蒸気ライン長さ	60 mm
液体ライン直径 (ID/OD)	2/3 mm
液体ライン長さ	200 mm
凝縮器部材料	銅製フィン
凝縮器部長さ	50 mm
フィン幅 / 高さ	20/10 mm
フィンピッチ	1 mm
作動液	水

として、ヒートパイプでは蒸気と液体が対向流であるが、CPLでは一方流れである。このため、CPLは熱をヒートパイプより長い距離を運ぶことができる。CPLは同じサイズのヒートパイプの2~3倍の熱輸送容量を持つことができる。

図24に開発中のCPLプロトタイプ概念図を示す。このシステムの基本的な形状寸法を表2に示す。代表的な結果から、このシステムは約70 Wの熱を輸送することができ、蒸発部熱抵抗0.1 ~ 0.15 /Wを実現できることがわかった。

7. む す び

発熱面積は小さいが発熱量が大きいコンピュータプロセッサは、大きな冷却用スペースを必要とする。熱源から放熱部まで熱を輸送する最も効率的な方法は、ヒートパイプやペーパーチャンバを使用することである。金属ベースにヒートパイプを、あるいはベースとしてペーパーチャンバを使用すると、ベースにおける熱拡散の低減に役立つ。これにより冷却能力を高めることができる。

プロセッサの消費電力が増加し、従って必要熱抵抗 (R_{ca}) が低下するにつれて、空冷による冷却能力を最大にし、空冷による冷却限界を拡張する冷却対策技術の傾向は、ヒートパイプやペーパーチャンバを多用する方向に向かっ

ている。より速く高性能なプロセッサが求められるため、プロセッサの放熱量は今後も増え続けるであろう。従って、十分な冷却能力を提供するためには、熱流束が高く、発熱端と冷却端の間の熱抵抗ができるだけ小さい、優れたヒートパイプやペーパーチャンバの研究・開発を続けていくことが極めて重要である。

CPUチップとIHS間の熱抵抗は、総熱抵抗のかなりの割合を占める。従って、金属銅製IHSからMVC等の熱輸送量の高い他のデバイスへの置き換えを検討する必要がある。さらに、CPUチップにIHSを直接ロウ付けまたははんだ付けすることも検討する必要がある。

部品やシステムを効率的に冷却するためにシステム内の空気流をよく管理すると、ファンの回転数を下げることができるので、騒音レベルを下げることもできる。

参 考 文 献

- 1) T. Nguyen, M. Mochizuki, K. Mashiko, Y. Saito, 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, 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) T. Nguyen, M. Mochizuki, K. Mashiko, Y. Saito: Advanced Heat Sink Combined with Heat Pipe for Cooling PC, Proceedings of the 4th JSME-KSME Thermal Engineering Conference, October 1-6, 2000, Kobe, Japan
- 4) M. Mochizuki, T. Nguyen, H. Agata, F. Kiyooka, et al.: Advanced Thermal Solution Using Vapor Chamber Technology for Cooling High Performance Desktop CPU in Notebook Computer, The 1st International Symposium on Micro & Nano Technology, 4-7 March 2004, Honolulu, Hawaii, USA
- 5) M. Mochizuki, T. Nguyen, Y. Saito, V. Wuttijumng, X. Wu, T. Nguyen: Revolution in Fan Heat Sink Cooling Technology to Extend and Maximize Air Cooling for High Performance Processor in Laptop/Desktop/Server Application, ASME Summer Heat Transfer Conference & InterPACK '05, July 17-22, 2005, San Francisco, USA
- 6) I. Sauciuc, S.-W. Moon, C.-P. Chiu, G. Chrysler, S. Lee, R. Paydar, M. Walker, M. Luke, M. Mochizuki, T. Nguyen, E. Takenaka: Key Thermal Challenges for Low Form Factor Thermal Solution, Semitherm 2005, March 2005, Dallas, USA
- 7) R. Singh, A. Akbarzadeh, M. Mochizuki, T. Nguyen, V. Wuttijumng: Experimental Investigation of the

Miniature Loop Heat Pipe with Flat Evaporator, ASME
Summer Heat Transfer Conference & InterPACK '05,

July 17-22, 2005, San Francisco, USA