

デスクトップPC用ヒートパイプ式リモートヒートシンクの開発

Development of Heat Pipe-Based Remote Heatsink for Desktop PC

志村隆広*
Takahiro Shimura

野田一*
Hajime Noda

島田守*
Mamoru Shimada

木村裕一*
Yuichi Kimura

概要 CPUなど発熱素子の発熱量の増加が進み、デスクトップPCでは発熱量が100 Wにも達しつつある。一方で、従来の冷却方法ではヒートシンク外寸の制約から性能の限界が見えてきており、100 Wを超える発熱素子の冷却を見据えた新たな冷却方法が望まれる。そこで、十分な放熱面積を持つヒートシンクを空きスペースに設置し、そこまで熱をヒートパイプで輸送するヒートパイプ式リモートヒートシンク (HP-RHS) について検討した。

その結果、例えば120 mm角ファンで冷却するHP-RHSにおいて、150 W程度までの発熱量であればCPUケース温度と雰囲気温度の温度差を30°C以下に保てることを実験で示すことができた。このように、100 Wを超える発熱素子の冷却が可能な、実用的で静音性にも優れたヒートシンクを開発することに成功したので報告する。

1. はじめに

CPUなど半導体素子は高性能化が進むとともに動作時に生じる熱量も大きくなってきている。近年はグラフィックチップなども発熱量が増加してきており複数の素子を冷却する必要があるのも特徴である。一方、素子自体は基本的に小型化の傾向にあることから、発熱量が大きだけでなく、発熱密度が高いのもCPU冷却の特徴の一つである。CPU冷却には、このように発熱量、熱密度ともに高い素子を効果的に冷却する技術が一般に求められる。

デスクトップPCでの状況については、**図1**に示すように発熱量が100 Wにも達しつつあることが分かる。今までの100 W以下の発熱量の場合、**図2**のようにCPU直上のスペースのみを利用してヒートシンクを置き、ファンにて送風するという方法で十分対応できていた。ただし、CPU直上のスペースには当然限りがあり、高密度にフィンを設置したヒートシンクであっても、外形寸法の制約を強く受ける場合には確保できる放熱面積の都合で性能に限界が生じてしまう。CPUのケース温度 (T_c) と、PC内の雰囲気温度 (T_a) の温度差を発熱量 (Q) で割ることで定義される R_{ca} という熱抵抗値でもってヒートシンクの性能を示すと、今までデスクトップ用で行ってきた試作での結果から判断して $R_{ca} = 0.25 - 0.30^\circ\text{C}/\text{W}$ 程度が従来型CPU冷却方式の限界値である。これに対し、必要とされる R_{ca} 値を表したのが**図3**である。必要とされる R_{ca} 値は個々の案件に応じて微妙に変わりうるものであるが、**図3**ではCPUケース温度と雰囲気温度の温度差は30°Cまで許されるという仮定のもと

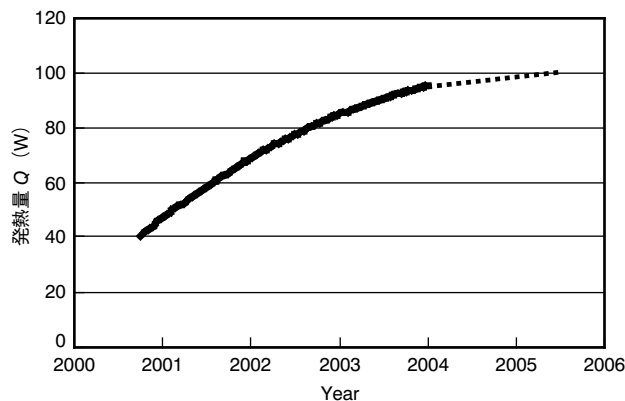


図1 CPU発熱量の推移(デスクトップPC)
Trend in heat dissipation rate of CPU (Desktop PC).

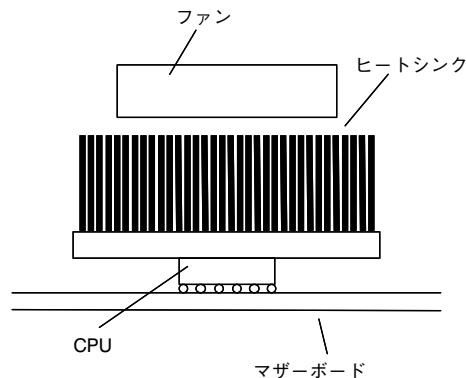


図2 従来のCPU冷却方法
Conventional method for CPU cooling.

* 研究開発本部 環境・エネルギー研究所

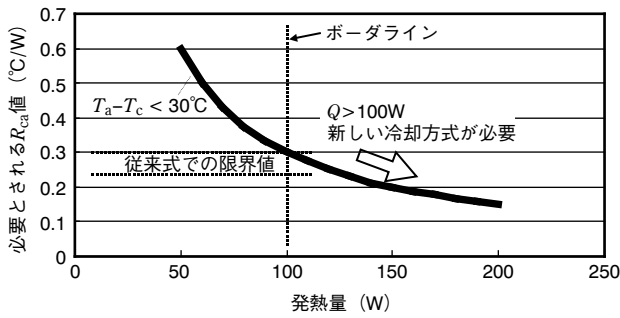


図3 ヒートシンクに求められる性能
Required performance for heatsink.

に計算された R_{ca} を代表値とした。図3は、従来型CPU冷却方式の限界は発熱量に換算すると100 Wが目安となること、つまり、発熱量が100 Wを超える場合には従来の方法に代わる新しい冷却方法が必要であることを示している。

新しい冷却方式を考える上で、念頭におかなければならないのは、いかなる場合も最終的な熱の放出先は空気となることであり、ヒートシンクから空気への放熱性を向上させないことには解決は望めないことである。空気への放熱性を高める方法としては、風速を上げる方法、フィンに細工をして乱流を促進させる方法、フィン面積を増やす方法が考えられるが、前の二つは結果的に送風時の騒音を上げることにつながるので受け入れられにくい。結局、フィン面積を大きく取る方策を考え出すしかない。そこで考えられるのが、PC内の空きスペースに十分なフィン面積を持つヒートシンクを設置し、CPUからヒートシンクまで何らかの形で熱を輸送するリモートヒートシンク(RHS; remote heatsink)方式である。なお、RHS方式では、前述の騒音の問題でも有利である。なぜならば、フィンが大きくなることで従来よりも大きなファンを使うことになり、騒音レベルを左右するファンの回転数を押さえたままでも風量を確保することができるからである。また、きょう体換気用のファンをRHS冷却に併用するようになれば新たなファンを追加する必要も無い。

熱をRHSに輸送する手段としては、例えばポンプを用いて水を循環させる方法(いわゆる水冷)、ヒートパイプを用いる方法、コンプレッサ式の冷凍機を応用する方法などが考えられるが、以下の理由でヒートパイプ方式が最も実用的である。

- (1) ポンプやコンプレッサのように可動部や動力を必要としない
- (2) 簡単な構成であるため低コストである
- (3) 優れた長期信頼性を持つ
- (4) 熱伝達は相変化を通して行われるため、高密度の熱を効率よく拡散できる
- (5) 少量の作動液しか必要とせず、密閉性も高いため液漏れの心配が無い

本報ではヒートパイプ式リモートヒートシンク(HP-RHS)のデスクトップPCへの応用に当たって行った幾つかの実験結果や、実際の応用例について報告する。

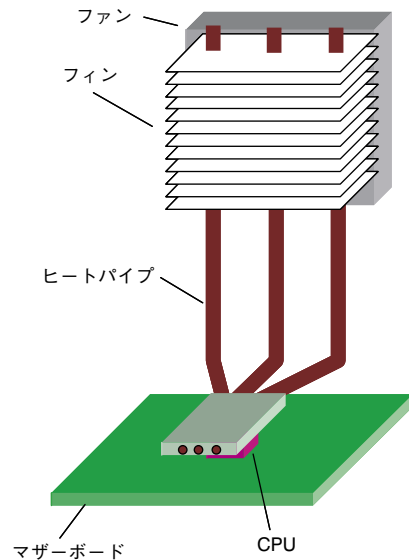


図4 RHS概念図
Schematic illustration of RHS.

2. ヒートパイプの最大熱輸送量について

HP-RHS自体はノートブックPCで既に実用化されている^{1), 2)}が、違いとしては主に大きさにあり、当然、ヒートパイプの長さも違ってくる。例えば、ノートブックPCでは100～200 mmくらいの長さのヒートパイプを用いるところを、デスクトップPCでは400 mmくらいの長さのヒートパイプを用いる場合もありうる。ヒートパイプは熱輸送距離に応じて最大熱輸送量(Q_{max})が低下する性質があり、その点が解決すべき課題といえる。一方で、ヒートパイプは一般に熱を下から上に移動させるボトムヒートモードでの作動が有利とされているが、幸いなことにデスクトップPCではノートブックPCよりもボトムヒートモードでの作動を期待しやすい環境にある。ボトムヒートモードでHP-RHSを使うパターンとして、例えば図4のようなレイアウトが考えられる。この場合ではL字状に曲げられたヒートパイプを用い、例えば120 mm角のファンを利用してRHSを冷やすことを想定している。以下にボトムヒートモードを積極的に取り入れた場合の例としてL字ヒートパイプ単体の Q_{max} を測定した結果、及び実験を通して得られた知見を紹介する。

比較しやすくするため、今回はヒートパイプの外径6 mm ϕ 、全長400 mmを固定とした。また、図5に示すようにL字形の水平部分に長さ20 mmのヒータを取り付けて蒸発部とし、垂直部分に長さ120 mmの冷却水ジャケットを取り付けて凝縮部とした。その他の部位は断熱材で覆われ、断熱部としてある。固定条件以外で Q_{max} に影響を与えそうな要素としては、作動温度(T_v)と水平部分の長さ(L_{hr})にあると考え、これらをパラメータとして実験を行うことにした。温度測定は図6のように蒸発部、断熱部、凝縮部の各2点を熱電対で測定し、平均値を各部での温度(蒸発部 T_e 、断熱部 T_a 、凝縮部 T_c)とした。また、ヒートパイプ内の熱抵抗(R_{hp})、作動温度を図6に示すように定義した。

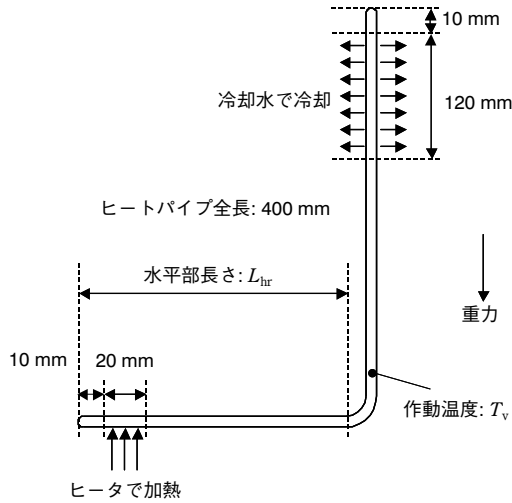


図5 L字型ヒートパイプ測定レイアウト
Measurement layout for L-shaped heat pipe.

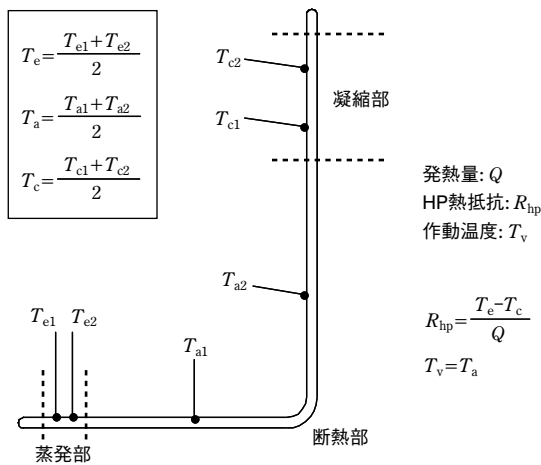


図6 熱電対レイアウト
Layout of thermocouples.

図7に水平部長さ50 mmでのヒートパイプ内熱抵抗の測定結果を1例として示す。いずれの作動温度の場合でもある熱量で R_{hp} が急激に上昇しているが、これはヒートパイプ内でドライアウトが起きていることを示している。 R_{hp} が急激に上昇する境界の熱量で Q_{max} を定義し、水平部長さを50 mm, 100 mm, 150 mm, 200 mmの4条件、作動温度を30℃, 40℃, 50℃, 60℃の4条件で Q_{max} を求めた。図8に各条件での Q_{max} を示す。図8では横軸を L_{hr} の逆数(前記4条件はそれぞれ20 m⁻¹, 10 m⁻¹, 6.7 m⁻¹, 5 m⁻¹に相当)とし、作動温度別にデータを表示してある。直線は原点を通る直線を示しており、いずれの作動温度においても測定データが直線に乗っていることを表している。このことは Q_{max} と L_{hr} の積が直線の傾きから求められる一定値でまとめられることを意味している。従って、L字ヒートパイプの Q_{max} は図9のように表現できることになる。このように、L字ヒートパイプの Q_{max} を実験的に明らかにするとともに、 $Q_{max}L_{hr}$ で性能を表現する方法を見出すことができた。

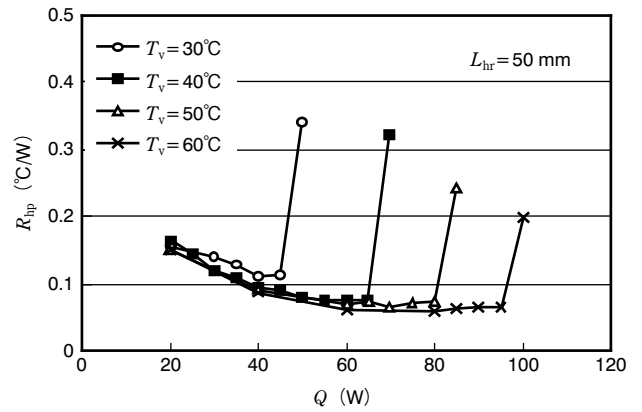


図7 熱抵抗測定例
Example of results of thermal resistance measurement.

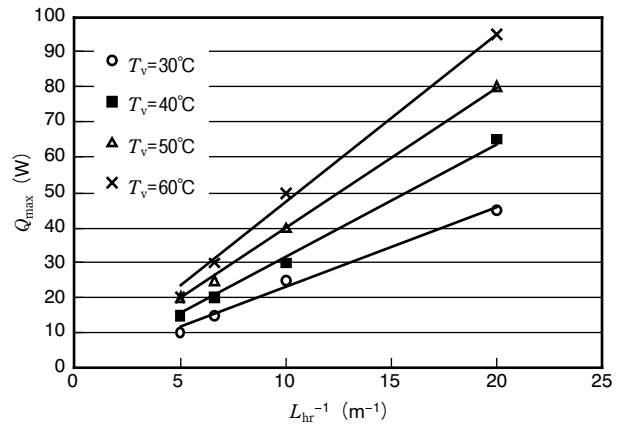


図8 L字ヒートパイプにおける Q_{max}
 Q_{max} in L-shaped heat pipes.

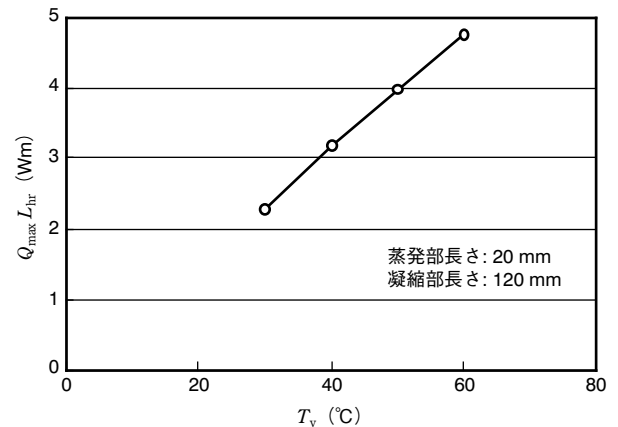


図9 L字ヒートパイプにおける $Q_{max}L_{hr}$
 $Q_{max}L_{hr}$ in L-shaped heat pipes.

3. ヒートシンクの熱抵抗について

次に、ヒートパイプを実際にヒートシンクに組み込んだ場合のヒートシンクの熱抵抗について述べる。なお、図4ではRHSのみによる冷却方法が示されているが、CPU直上にヒートシンクを置く従来型の方式も併用するとより効果的であると思われる。ここでは図10に示すような複合型のヒートシンクを試作し、性能評価を行った。なお、RHSと区別するため、以下ではCPU直上の側のヒートシンクをDHS (direct cooling heatsink)と呼ぶこととする。

試作したヒートシンクはL字状に曲げられたヒートパイプが5本用いられ、水平部の長さ60 mm、全長400 mmとした。また、水平部を短く保ちつつもDHSとRHSの距離を任意に設計できるようにするべく、水平部からまず斜めに立ち上げてからRHSの近くで垂直に曲げるという2段階での曲げを採用している。前述の単体評価の結果から、このヒートパイプ1本の Q_{max} を見積もると作動温度40℃で約50 Wに相当する。なお、複数本のヒートパイプを使ってフィンに分散させて取り付けの方がRHSのフィン効率を上げることができるので1本のヒートパイプのみですべての熱を運びきる必要は無い。例えば120 mm幅のフィンであれば、3～5本程度のヒートパイプを分散させて取り付けるのがフィン効率の点で望ましく、したがって、ヒートパイプ1本当たり50 W程度の Q_{max} があれば100 W超の発熱にも十分対応できるわけである。DHSは機械的なクリーニングにより0.4 mmの肉厚のアルミフィンを1.9 mmピッチで35枚取り付け付けた。また、RHSは同じく機械的な取り付けが可能な差し込みフィンとし、0.2 mmの肉厚のアルミフィンを1.2 mmピッチで98枚取り付け付けた。実験はDHSの底面から20 mm角のヒータで200 Wを入熱し、DHS、RHSを個別の12VDCファン(DHS側：60×60×15 mm、RHS側120×120×40 mm)で冷却することで行った。

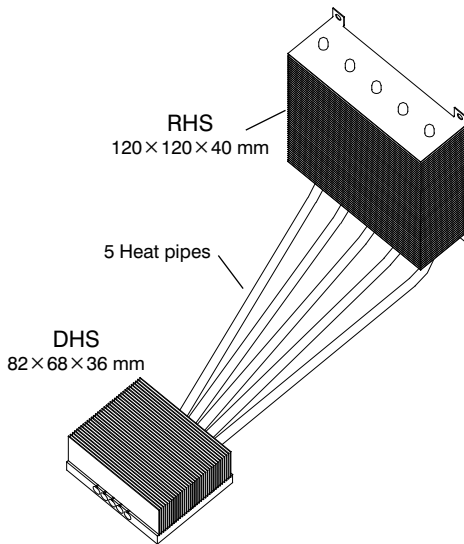


図10 複合型ヒートシンク概略
Outline of combined type heatsink.

DHS側とRHS側両方のファンを用いた場合、RHS側のファンのみを動作させた場合の二通りでヒータ温度と外気温度を測定し、ヒータ温度をCPUケース温度と見なして R_{ca} を求めると、DHSとRHS両方用いた場合で $R_{ca} = 0.193^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 、RHSのみを用いた場合で $R_{ca} = 0.213^{\circ}\text{C}/\text{W}$ となった。この結果から図3を用いて対応可能な発熱量に換算するとDHSとRHS両方用いた場合で155 W、RHSのみを用いた場合でも141 Wといずれの場合も100 Wを超える発熱量に十分対応できることを示すことができた。

4. シミュレーションによる設計

最後にシミュレーションによるヒートシンクの設計例を示す。写真1は2004年夏モデルのデスクトップPCに採用されたHP-RHSである。これはヒートパイプ4本で120×120×

60 mmのRHSに熱を運び、120 mm角のファン(厚さは25 mmで騒音は37 dB、写真では見えにくいだがヒートシンク背面に設置されている)で冷却するタイプである。

このヒートシンクをモデル化し、熱・流体解析によりヒートシンク内の温度分布を求めた例を図11に示す。ここで、フィンと受熱ブロックはともに純アルミ材とし、印加熱量は103 W、RHSへの風量は1.67 m³/min、雰囲気温度は35℃(絶対温度で308 K)とした。ヒートパイプ部分の物性値については、単体での評価結果などから得た値を計算モデル内では採用している。図11から分かるように、最も高い温度を示すのは入熱面の中央に当たる受熱ブロック表面上で、受熱ブロック表面の最高温度と雰囲気温度の温度差から得られる熱抵抗を R_{sa} と定義すると $R_{sa} = 0.116^{\circ}\text{C}/\text{W}$ となった。なお、この計算値は同じ風量での実測結果とほぼ一致しており、計算モデルが妥当であることを確認している。

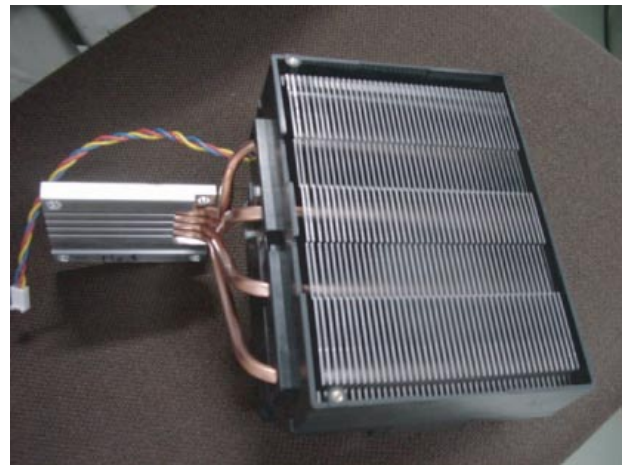


写真1 デスクトップPC用RHS製品例
Example of RHS product for desktop PC.

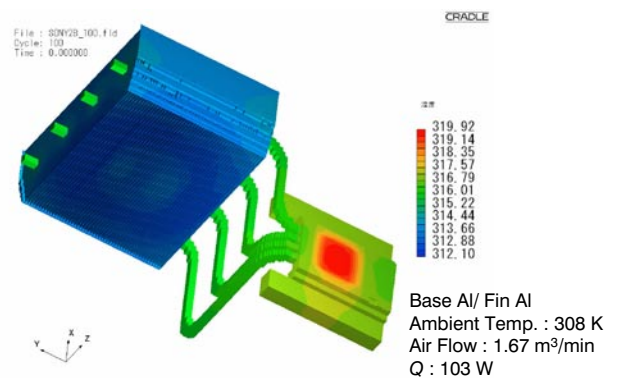


図11 ヒートシンク温度分布(計算)
Temperature distribution in a heatsink (calculation).

また、更に高性能にするべく、フィンと受熱ブロックをともに純銅に替えた場合は、同じモデルを用いての計算から $R_{sa} = 0.102^{\circ}\text{C}/\text{W}$ が得られ、12%ほど R_{sa} を小さくできることが分かった。材質の選択は性能と軽量性の双方の観点から決められるが、今回はアルミ材の場合でも満足な性能を得ることができたので、軽量性を考慮してフィンと受熱ブロックがともにアルミ材のものを採用した。余談ではあるが、銅製のヒートパイプにアルミフィンを取り付けるなど異種材料を容易に組み合わせることができるのも機械的な接合を採用している利点であり、古

河電工のヒートシンクがもつ特徴の一つである。

最後に、 R_{ca} に換算して比較してみる。 R_{sa} にCPUとの接触抵抗(TIMの選択などにより若干変わりが $0.10^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 程度)を加えれば前述の R_{ca} になる。したがって、前記のものでアルミ材を用いた場合で $R_{ca} = 0.216^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 、銅材を用いた場合で $R_{ca} = 0.202^{\circ}\text{C}/\text{W}$ となる。図3を参照すると、アルミ材を用いた場合で139 Wまで、銅材を用いた場合で149 Wまで対応できることになる。

5. おわりに

100 Wを超える発熱量に対応可能なデスクトップ用の次世代ヒートシンクとして、十分な放熱面積を持つヒートシンクを空きスペースに設置し、そこまで熱をヒートパイプで輸送するHP-RHSを検討した。その結果、例えば120 mm角ファンで冷却するHP-RHSにおいて R_{ca} が $0.20^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 程度であること、別の言い方をすれば、150 W程度まではCPUケース温度と雰囲気温度の温度差を 30°C 以下に保つことが可能であることが分かった。このように、HP-RHSは100 Wを超える発熱にも十分対応できることを示すとともに、実際にデスクトップPCに搭載することにも成功した。

HP-RHSは水冷など他の手法に比べれば主に信頼性、コストなどの点で実用的であり、ノートブックPC同様にデスクトップPCでも一般的になっていくはずである。今後は、より多くの事例に適用可能な基礎データを更に蓄積し、より有効に設計に生かせるようにしていくのが主な課題である。

参考文献

- 1) J. Sotani, et al. : "A Micro Heat-Pipe for Cooling Notebook PCs," Proceedings of the 9th International Heat Pipe Conference, (1995), 877.
- 2) K. Namba, et al. : "Heat-Pipes for Electronic Devices Cooling and Evaluation of Their Thermal Performance," Proceedings of Itherm '98, (1998), 456.