

# パーソナルコンピュータ冷却用 新型コンポジットウィックヒートパイプ

フジクラタイランド 益子 耕一・Vichan Kumthongkittikun・栗山 浩之  
Prasong Ektummakij  
サーマルテック事業部 望月 正孝\*1・齋藤 祐士\*2・Thang Nguyen\*2

## New Composite Wick Heat Pipe for Cooling Personal Computers

K. Mashiko, V. Kumthongkittikun, H. Kuriyama, P. Ektummakij, M. Mochizuki,  
Y. Saito & T. Nguyen

ヒートパイプは2相の熱輸送デバイスであり、優れた熱輸送能力と高い効率性を有している。ヒートパイプは他の冷却デバイス、冷却ファン、電子冷却器、液体循環冷却器等と比較して、構造が単純、可動部分がない、電力の消費がない、取り付けが容易、メンテナンスフリー等の利点を持つ。しかし、プロセッサの性能アップにより発生熱量が増加するのに伴って、熱抵抗のさらなる低減と最大熱輸送量のさらなる増大が求められることになり、ヒートパイプの性能を改善する必要性が生じている。われわれはコンポジットウィック構造のヒートパイプを開発したが、これは従来構造のウィックを持つヒートパイプと比較して、より低い熱抵抗とより大きな熱輸送量を持つものである。

本稿では、パーソナルコンピュータを冷却するためのコンポジットウィックヒートパイプと従来タイプのヒートパイプの比較を行う。

Heat pipe is a two-phase heat transfer device, having excellent heat transfer capability and higher efficiency. It has several advantages compared with other cooling devices such as cooling fans, thermo-electric coolers, liquid pump loop device are that it has simple structures, no moving parts, no power consumption, easy to install and maintenance free. However, with the ever-increasing processor power and heat flux, it is a must to improve heat pipe performance that having lower thermal resistance and larger maximum heat transfer rate. We have developed the composite wick structure heat pipe, which has lower thermal resistance and larger heat transfer rate than the traditional wick structure heat pipe. This paper describes the comparison between composite wick heat pipe and traditional wick heat pipe for cooling personal computers.

### 1. ま え が き

ヒートパイプがパーソナルコンピュータ、とりわけ、ノートブック型コンピュータの冷却に適用され始めたのは1993年であるが、当時は広く使われているものではなかった。それから10年以上が経過した現在では、ノートブック製品の大部分にはヒートパイプを使用した冷却ユニットが搭載されていると思われる。電子装置における消費電力量の増大と特にノートブック機器におけるサイズの小型化が継続的に要求されており、このことから機器内の限られた有効スペース内で最適な熱設計管理を行うことが重要な課題となっている。不適切な熱設計管理は製品の性能と信頼性を悪化させることになる。

図1にノートPC用プロセッサの発熱量の流れを示す。2000年では、クロック700MHzのプロセッサから約10Wの熱が発生している。2004年/2005年には発熱量は、クロックが2~3GHzのプロセッサから約50Wの発生へと増大している。発熱量は年間で10W近く増大したと思われる。プロセッサのダイ部分（半導体部分）表面の面積は約1cm<sup>2</sup>であることから、プロセッサからの発熱密度は5年以内で10W/cm<sup>2</sup>から50W/cm<sup>2</sup>へと5倍に増加していることになる。さらに、最新のプロセッサではプロセッサダイ部分からの熱の発生は均一ではなく、さらに大きな発熱密度の発生を引き起こす。図2では、熱が発生しているプロセッサダイ部分の面積の割合に対して、どの程度熱が集中的に発生しているかを示す密度要因数を示してある。

熱の発生部分の割合が40%から60%へ変化すると、発熱密度が2倍から3倍へと変化する。このことは、熱が集中して発生している部分での熱流束は100W/cm<sup>2</sup>を超えて

\*1 開発部長

\*2 開発部

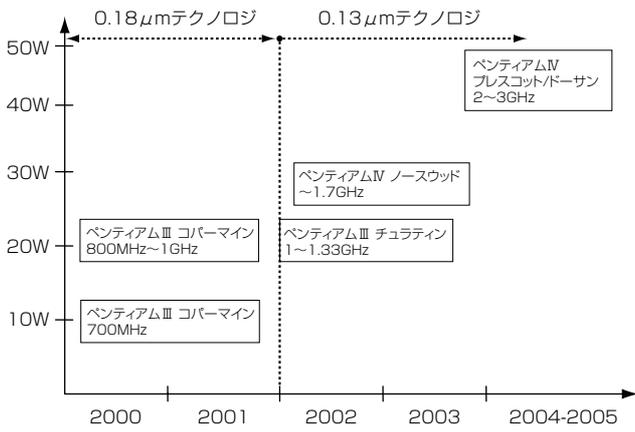


図1 ノートPC用プロセッサの発熱量  
Processor heat dissipation

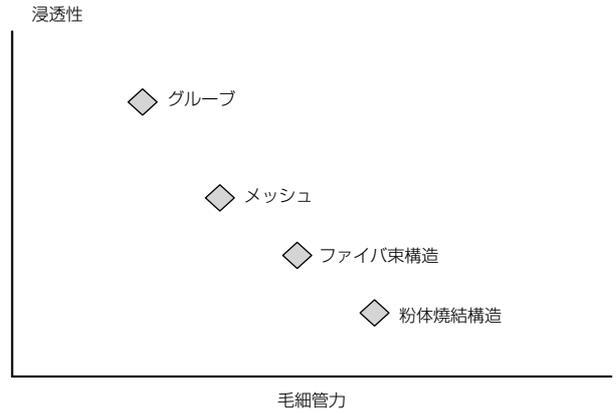


図3 各ウィック構造の毛細管力と浸透性  
Capillary and permeability of various wick structures

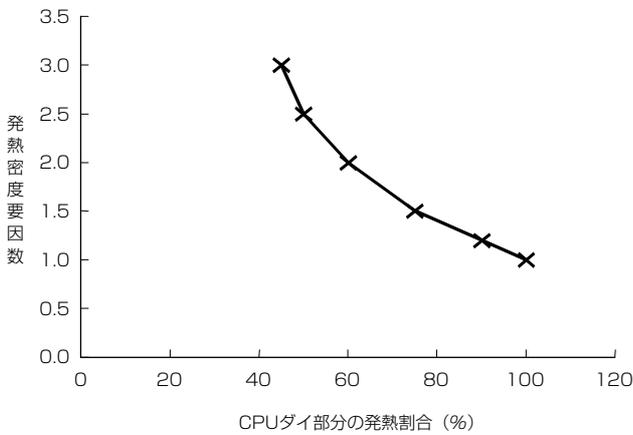


図2 CPUダイ部分の発熱面積割合と発熱密度要因の関係  
Density factor as function of die area heated

いることを意味している。

ヒートパイプは、プロセッサで発生する熱を冷却のための熱交換装置まで搬送する目的で用いられる。ヒートパイプは高い熱輸送量の要求に耐える性能を持ち、加熱端から冷却端まで小さい温度勾配であることが必要である。もしヒートパイプの性能が十分でなかったり、ドライアウト（ヒートパイプ内部の熱輸送用の作動液が蒸発部まで戻らなくなる現象）が発生したりすると、冷却が十分には行われない状態を引き起こし、これはプロセッサの破壊やシステムのシャットダウンにつながることになる。

本稿では、プロセッサからの熱発生量や発熱密度の増大に伴って求められるヒートパイプの性能改善について報告する。

## 2. ウィックの特性

ヒートパイプで使用されている最も一般的なウィックの構造は、メッシュ、グループ、粉末を焼結したもの、繊維を束ねた構造のもの、そして新しいタイプのコンポジットファイバウィック（FB-G）と呼ばれるものがあるが、FB-

Gは細溝と繊維を束ねた構造のものを組み合わせた構造を持つ。ヒートパイプの性能を左右する最も重要な2つの要素は、毛細管力と浸透性（作動液の流れやすさ）である。毛細管力は作動液をヒートパイプ凝縮部から蒸発部に送り循環させるために必要となる駆動力を生み出す。高い浸透性はより小さい熱抵抗をもたらす。図3に異なるウィック構造ごとの浸透性と毛細管力の関係を示す。最も高い性能を持つヒートパイプの理想的な状態は、毛細管力と浸透性の両方とも高い性能を占めることであるが、これら2つの要素はお互いに相反するものである。より高い毛細管力を得るには、より小さい細孔半径が要求されることになるが、より小さい細孔半径では浸透性が低下するためである。それゆえウィックの設計においては、適用される状況において必要とされるこれら2つの要素のバランスを十分に考慮する必要がある。たとえばグループ構造（軸に沿った溝を持つ構造）のウィックでは高い浸透性を持つが、毛細管力は低く、このことからこの構造のウィックは発熱部が冷却部よりも高い位置にある状態（トップヒートモード）よりも、発熱部が低い位置にある状態（ボトムヒートモード）や発熱部が同じ高さにある状態（水平熱分布モード）により適しており、トップヒートモードに対して用いると毛細管力が不十分であることから、作動液の循環が行われずドライアウトを引き起こす可能性がある。これに対して、粉末焼結ウィックは高い毛細管力を有するのでトップヒートモードでは有効であるが、グループ構造ウィックと比較してボトムヒートモードでは熱抵抗が大きくなる。これは、粉末焼結ウィックではヒートパイプ内部の作動液の流れに対する圧力損失が大きいためである。コンポジットファイバウィック構造（FB-G）ではファイバ束で毛細管力を発生させグループウィックで浸透性を高めている。

図4 (a) に従来のファイバウィックヒートパイプの構造を示す。剥き出しの銅管の内壁に平行して銅製のファイバウィックの束が配置されている構造になっている。らせん状のスプリングが銅管の内壁にファイバウィックを押しつけている。このウィック構造は高い毛細管力が得られる

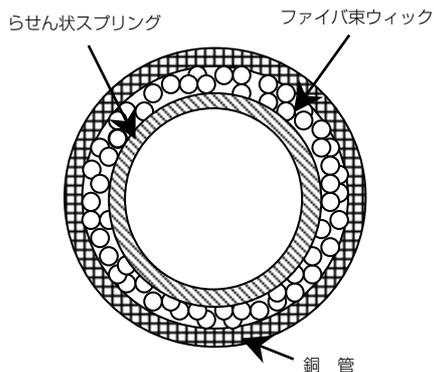


図 4 (a) 従来のファイバウィックヒートパイプ  
Traditional fiber wick heat pipe

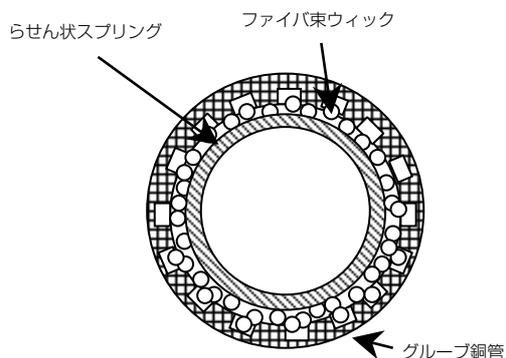


図 4 (b) コンポジットウィックヒートパイプ (FB-G)  
Composite wick heat pipe (FB-G)

が、浸透性はグループ構造のウィックほど高くない。

図4 (b) にコンポジットファイバウィック (FB-G) と呼ぶ新しく開発されたウィック構造を示す。このFB-G構造はグループ構造ウィックとファイバ構造ウィックを組み合わせたものである。FB-G構造の有利な特徴を以下に示す。

- ・ウィックの位置と分配の最適化による従来以上の高い毛細管力。
- ・従来以上の浸透性。
- ・溝構造ウィックの部分では気化と液化のための表面積を増大させている。これにより小さな温度差で大量の熱輸送が可能。

上記の有利な特徴を持つことにより、FB-Gヒートパイプは従来以上の最大熱輸送容量を持ち、ヒートパイプ自体の熱抵抗も従来より小さくなっている。

### 3. 実 験 装 置

新しいコンポジットウィック構造 (FB-G) と従来のウィック構造品との比較性能試験を行った。

サンプルとして以下の3タイプのヒートパイプを用いた。

- (1) 従来のファイバウィック (未焼結) タイプのヒートパイプ

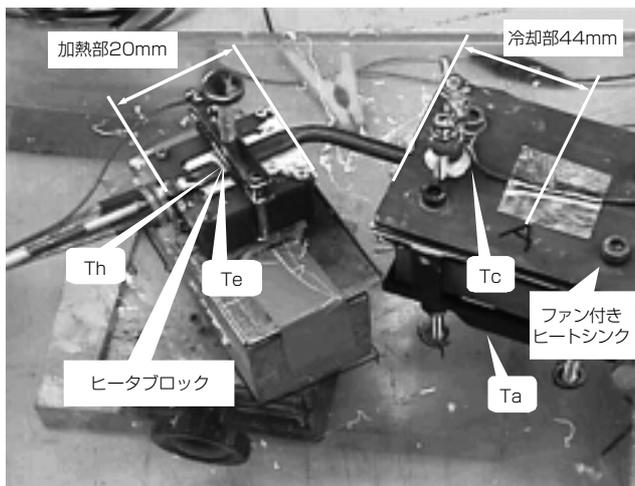


図 5 試験装置  
Test set up

- (2) 焼結したファイバウィックタイプのヒートパイプ

- (3) FB-Gヒートパイプ

寸法は3タイプとも同一で、直径6mm、長さ200mmである。ヒートパイプは1か所の屈曲部を持ち、また2.5mm×8.2mmの平坦部分を2か所、蒸発部 (長さ20mm) と凝縮部 (長さ44mm) として持つ。試験装置を図5に示す。銅製のヒータブロックが熱源として使われ、その寸法は長さ25mm×幅19mmで高さ15mmである。冷却はファン付きのヒートシンクフィンにより行った。

### 4. 試験結果と考察

図5の試験装置により、入熱量Qを20～35Wと変化させ、次の4箇所の温度を測定した。

- ・ Q : 熱 量 (W)
- ・ Ta : ファン付きヒートシンクの入口空気温度 (°C)
- ・ Tc : ヒートパイプの凝縮部の温度 (中央部) (°C)
- ・ Te : ヒートパイプの蒸発部の温度 (中央部) (°C)
- ・ Th : ヒートブロック上部の表面温度 (中央部) (°C)

ヒートパイプの各熱抵抗を次のように定義した。

$$R_{con} = (T_e - T_c) / Q \dots\dots\dots (1)$$

$$R_{eva} = (T_h - T_e) / Q \dots\dots\dots (2)$$

$$R_{hp} = (T_h - T_c) / Q = R_{con} + R_{eva} \dots (3)$$

このとき

- ・ Rcon : ヒートパイプの凝縮部の熱抵抗 (°C/W)
- ・ Reva : ヒートパイプの蒸発部の熱抵抗 (°C/W)
- ・ Rhp : ヒートパイプの総熱抵抗 (°C/W)

図6に各ウィック構造のヒートパイプ蒸発部の熱抵抗を示す。FB-Gウィック構造は、従来のファイバウィック構造のものと比較すると蒸発部の熱抵抗は0.55°C/Wから0.39°C/Wと約30%小さくなっていることがわかる。この特性の改善は、FB-Gウィック構造ではウィックの配置が従来よりもさらに均一になったこと、グループにより蒸発

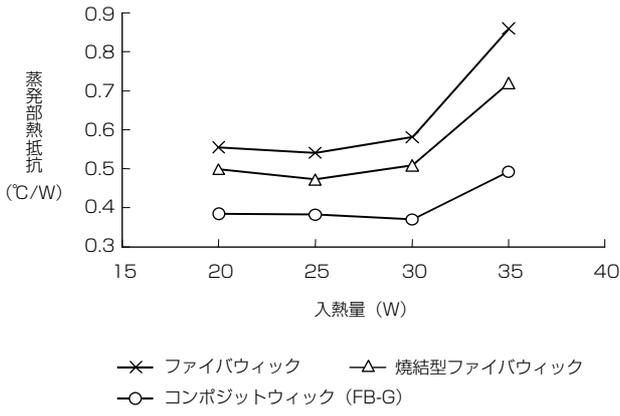


図6 各ウィック構造のヒートパイプ蒸発部熱抵抗  
Heat pipe evaporator thermal resistance for various wick structures

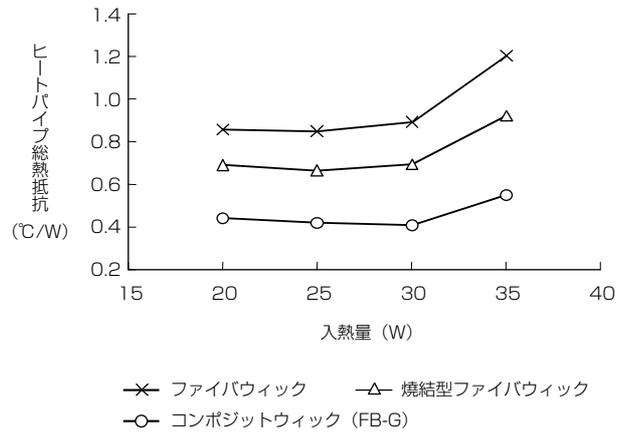


図8 各ウィック構造のヒートパイプ総熱抵抗  
Total heat pipe thermal resistance for various wick structures

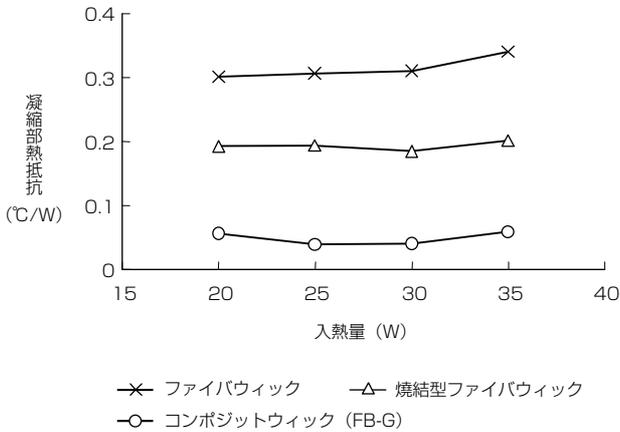


図7 各ウィック構造のヒートパイプ凝縮部熱抵抗  
Heat pipe condenser thermal resistance for various wick structures

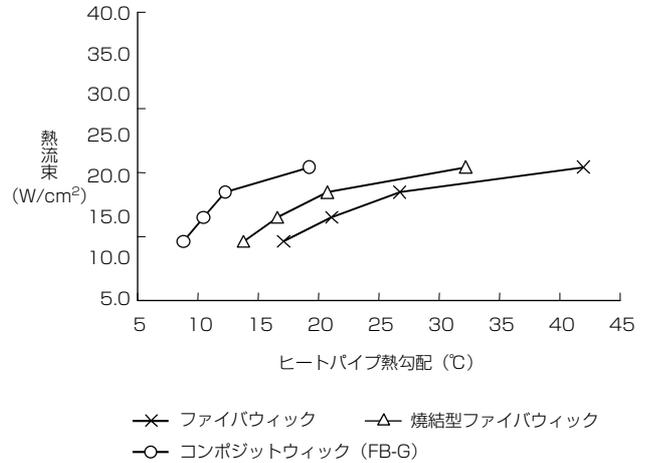


図9 各ウィック構造の温度勾配と熱流束の関係  
Heat flux vs. heat pipe temperature gradient for various wick structures

部面積が従来よりも大きくなったことによる。ウィックの配置が均一であることは蒸発部内の作動液の所在位置を均一に改善させることになり、それゆえ作動液の気化を局所滞留型気化から薄膜状均一型気化に促進させることになる。図6ではまた、焼結タイプのファイバウィックでは、従来の非焼結タイプのものよりも熱性能に優れていることも示されているが、これは焼結タイプのものはウィックの配置がより均一となりパイプの壁面への接触状態も焼結により改良されていることによる。入熱量が30Wとなった後、すべてのヒートパイプで蒸発部の熱抵抗の上昇が見られ、ヒートパイプのドライアウトが始まったことが示されている。

図7と図8にそれぞれヒートパイプ凝縮部熱抵抗とヒートパイプ総熱抵抗を示す。FB-G構造での凝縮部の熱抵抗の改善は、浸透性がより高くなったこととウィックの配置がより均一になったことによる。この結果は新型コンポジットウィック構造では、トータルの熱抵抗が0.84°C/Wから0.4°C/Wと50%以上の性能改善がなされたことを示

している。

図9に蒸発部と凝縮部間の温度勾配に対する熱流束の関係を示す。比較のためにヒートパイプの許容温度勾配を15°Cと仮定すると、この結果からFB-G構造では、従来のファイバウィック構造のものと比較して、熱流束が10W/cm<sup>2</sup>から20W/cm<sup>2</sup>と2倍の性能改善がなされている。これはFB-G構造のヒートパイプがより高い毛細管力と浸透性を持つことによる。

図10に、コンポジットウィックヒートパイプ (FB-G) のパイプ径の違いによる一般的な性能を示している。

### 5. ノートブックPC冷却のためのヒートパイプの適用例<sup>1) 2) 3)</sup>

図11に、実際のノートブックPC冷却用のヒートパイプモジュール例を示す。この設計のものは、2本の6mm平板ヒートパイプと2個のフィンタイプの熱交換器と空冷ファン (ファンは、概寸45mm×10mm, 最大風量0.15m<sup>3</sup>/min,

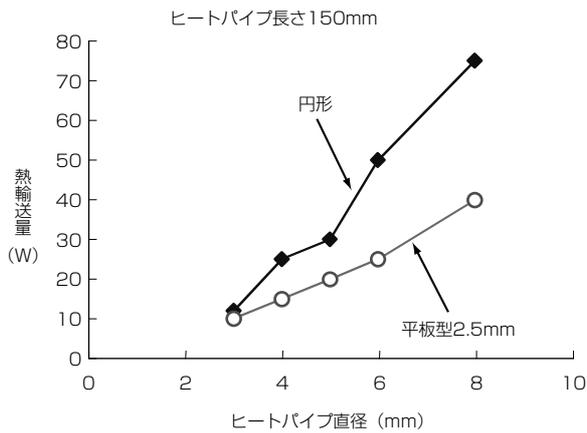


図10 ヒートパイプのサイズと性能の関係 (FB-G)  
Heat pipe performance vs. heat pipe size (FB-G)

最大静圧90Pa)で構成されている。ウィックの異なった3種類のヒートパイプを用いて3台のモジュールを製作した。総熱抵抗 (Rt: 熱源から周辺までの熱抵抗) を表1に示す。まったく同じヒートパイプモジュールでFB-Gを使用したヒートパイプとファイバウィックを使用したものを比較すると、ファイバウィックのもの総熱抵抗1.52°C/Wに対して、FB-Gのものでは1.1°C/Wを実現している。

3つのタイプのモジュールで放熱量を計算した結果を表1に示してある。ファイバウィックを使用したモジュールの熱輸送量約33Wと比較して、FB-Gを使用したものでは約46Wとなっている。この計算結果は、プロセッサダイ部分表面の許容温度100°C、周囲温度35°C、ノートブックPC周囲部分の温度上昇15°Cの仮定に基づいている。(すなわち  $Q = (100 - 35 - 15) / 1.1 = 45.5W$ )

## 6. む す び

新型コンポジットウィック構造 (FB-G) のヒートパイプについてまとめる。

- ・熱流束が従来の10W/cm<sup>2</sup>から20W/cm<sup>2</sup>と2倍になっている。これはFB-Gがより高い毛細管力と浸透性を持ったことによる。
- ・ヒートパイプの熱抵抗は従来の0.84°C/Wから0.4°C/Wと50%以下となっている。
- ・例として紹介したヒートパイプモジュールでは、放熱量が33Wから46Wへと増加している。
- ・プロセッサの発熱量増加に対応するために、ヒートパイプの最大熱輸送量をさらに増加し、熱抵抗を低くする継続的な改善が必要である。今後、プロセッサの発熱密度は50W/cm<sup>2</sup>以上となり、それに対応してヒ-



図11 ノートブックPC冷却用ヒートパイプモジュールサンプル

Example of heat pipe module for cooling notebook

表1 同じ冷却モジュールでの各ウィック構造のヒートパイプ総熱抵抗と放熱量

Total thermal resistance and heat dissipation capability for the same cooling module with various heat pipe wick structure

| ウィックの種類     | Rt (°C/W) | Q (W) |
|-------------|-----------|-------|
| ファイバウィック    | 1.52      | 32.9  |
| 焼結型ファイバウィック | 1.37      | 36.5  |
| FB-G        | 1.1       | 45.5  |

トパイプの熱抵抗は0.1°C/W以下を実現する必要があると予想される。

## 参 考 文 献

- 1) T. Nguyen, M. Mochizuki, K. Mashiko and Y. Saito: Use of Heat Pipe Heat Sink for Thermal Management of High Performance CPUs, Proceedings of 16<sup>th</sup> Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, pp.76-79, San Jose, CA USA, March 2000
- 2) Masataka Mochizuki: Advanced Cooling Technology Using Heat Pipes and Vapor Chambers for High Power PC, Proceedings of Thermal Engineering Conference '03, pp79-80, Kanazawa, Japan, November 2003
- 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, San Jose, Ca, USA, March 9-11, 2004