

携帯型電子機器用超薄型 高性能ヒートパイプ冷却モジュール

サーマルテック事業部 Mohammad Shahed Ahamed¹・齋藤 祐士²・益子 耕一³

High Performance Ultra Thin Heat Pipe Cooling Module for Mobile Hand Held Electronic Devices

M. S. Ahamed, Y. Saito, and K. Mashiko

近年、ヒートパイプは、スマートフォン、タブレットPC、デジタルカメラ等の携帯電子機器に広く使用されている。技術の進歩に伴い、これらの機器は、操作性の良い様々な機能やアプリケーションを備えているが、快適に動作させるには超高速クロックスピードのプロセッサが必要となる。一般的に、クロックスピードが速いと大量の熱が発生し、プロセッサ表面のホットスポットを冷却するため、熱を移動させ、拡散する必要がある。しかし、上述のような電子機器を十分に冷却する事は、密閉空間に熱源が集中しているため至難の業である。この課題に対し、我々は、超薄型ヒートパイプを開発した。このヒートパイプは、「センターファイバーウィック」と呼ばれる特殊ファイバーウィック構造体を持ち、この両側に十分な蒸気が流れるスペースを持つ。これにより厚さ 1 mm 以下でも作動する。我々は、スマートフォンの熱問題を解決するため、この超薄型ヒートパイプと金属板から成る冷却モジュールを開発した。開発した冷却モジュールの熱特性を把握するために、本研究では、超薄型ヒートパイプの幅、厚さ、および有効長を変えた実験を行った。さらに、冷却モジュール内に使用するヒートパイプの本数の違いによる熱特性への影響を調べた。

In recent years, heat pipes have been widely used in various hand held mobile electronic devices such as smart phones, tablet PCs, digital cameras. With the development of technology these devices have different user friendly features and applications; which require very high clock speeds of the processor. In general, a high clock speed generates a lot of heat, which needs to be spreaded or removed to eliminate the hot spot on the processor surface. However, it is a challenging task to achieve proper cooling of such electronic devices mentioned above because of their confined spaces and concentrated heat sources. Regarding this challenge, we introduced an ultra-thin heat pipe; this heat pipe consists of a special fiber wick structure named as "Center Fiber Wick" which can provide sufficient vapor space on the both sides of the wick structure. We also developed a cooling module that uses this kind of ultra-thin heat pipe to eliminate the hot spot issue. This cooling module consists of an ultra-thin heat pipe and a metal plate. By changing the width, the flattened thickness and the effective length of the ultra-thin heat pipe, several experiments have been conducted to characterize the thermal properties of the developed cooling module. In addition, other experiments were also conducted to determine the effects of changes in the number of heat pipes in a single module. Characterization and comparison of the module have also been conducted both experimentally and theoretically.

1. ま え が き

最先端の技術発展に伴い、スマートフォン、タブレット、ウルトラブック等の携帯機器が薄型および小型化となっている。このような小型化の傾向にもかかわらず、これらの携帯機器は操作性が良く、多くのアプリケーシ

ョンが使用出来る。特に携帯電子機器市場の中でも携帯性の良いスマートフォンが市場を席巻している。スマートフォンは、消費者の要求に応えるため、チップセット、グラフィックカード、より大型のバッテリーなどの熱を発生する部品で内部は埋めつくされている。

図 1 は、スマートフォンに使用されるクロックスピードの高速化の変化を示している。図 2 は、スマートフォンでのゲーム操作から十分後のケース表面温度分布写真である。ホットスポットは、温度分布図で簡単に見て取れ、発熱部分の表面温度は、ユーザーが低温やけどを起

1 TT 技術部 係長
2 TT 事業部 部長
3 TT 開発部 主席研究員

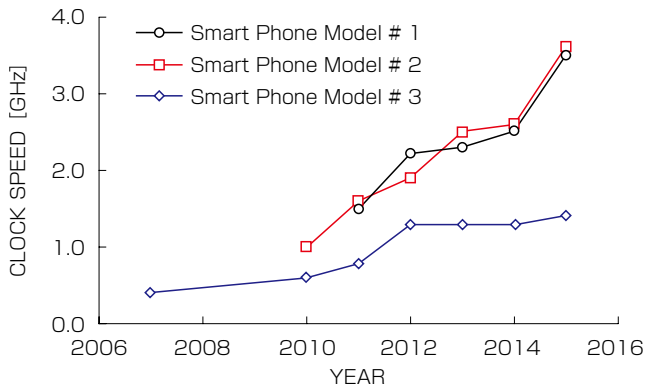


図1 スマートフォンに使用されるCPUクロック速度の高速化のトレンド

Fig. 1. Trend of CPU clock speed in smart phone.

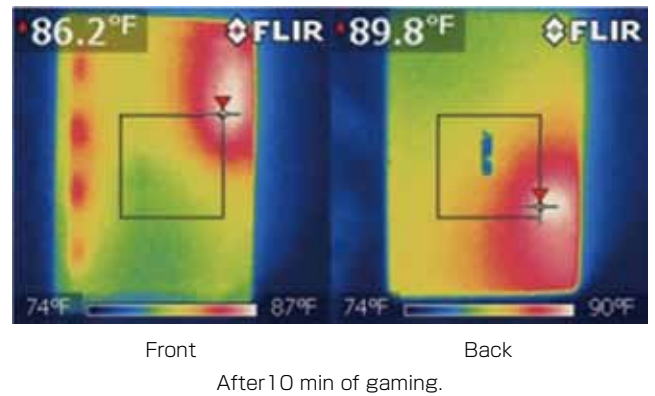


図2 スマートフォンの表面温度分布写真
Fig. 2. Thermographic view of smart phone skin temperature.

こすのに十分な温度に達する。このような種類の機器には冷却モジュールが必要である。

スマートフォンの一般的な冷却モジュールとしては、近年、グラファイトシート（高い面内熱伝導率を持つ）が金属板（マグネシウム、アルミニウム、ステンレス鋼、銅など）と組み合わせて使用されてきた。しかし、この冷却モジュールは、更に発熱量が増加したCPUを十分冷却する事が出来なくなっている。

図3は、スマートフォン内のこのような冷却モジュールの典型的な例を示している。現在の冷却モジュールであるグラファイトシートの問題に対して、超薄ヒートパイプを用いた冷却モジュールが有力な候補となっている。例えば、図1に示したスマートフォンのモデル2とモデル3はそれぞれ2014年と2016年に超薄ヒートパイプを冷却に使用している。

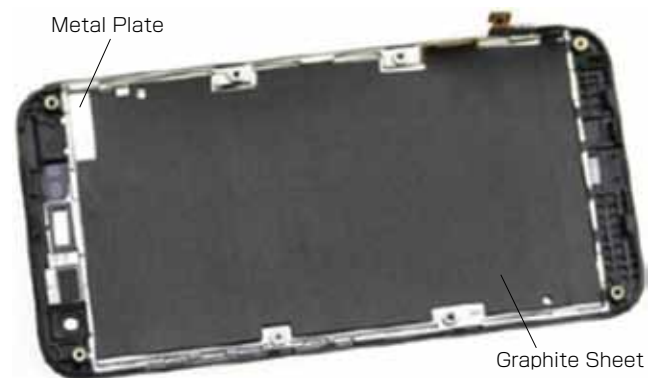


図3 携帯機器用冷却モジュールの典型的な例
Fig. 3. A typical example of common solution.

ヒートパイプは密閉真空容器であり、一般的に大変小さい温度差で、蒸発部から凝縮部まで潜熱を輸送できるため、優れた熱輸送機器として知られている。ヒートパイプは、金属（銅、アルミニウム、ステンレス鋼等）製チューブ、ウィック（微金属粉、微細金属繊維、網、軸方向溝等）構造体とチューブ内に充填された作動液（純水、アルコール、R134A等）で構成されている。

ヒートパイプの片方が加熱されると、パイプ内部で作動液が蒸発し、圧力差ができるため発生した蒸気がパイプのもう一方に移動する。もう一方では、温度が低いため、凝縮が起こり、蒸気は液体に戻る。凝縮液はウィック構造により生じた毛管力を利用し、加熱部分に戻る。この流体の移動動作により熱は潜熱で移動する。

Ponnapan [1] は、一般的なヒートパイプは $5\text{--}25\text{ [W/cm}^2\text{]}$ の熱流束を持つ熱源から離れた位置にあるヒートシンクへ熱輸送できることを示した。スペース上の制約や熱特性の要求に合わせて、マイクロヒートパイプ、ループヒートパイプ、振動ヒートパイプ等の異なるタイプのヒートパイプがこれまで開発されてきた。ヒートパイプは、多くの分野で開発がされているものの、厚さ方向へ

の厳しい制限を受ける狭いスペースの携帯機器への応用はいまだに開発の余地がある。

Mochizukiら [2] および Jalilvandら [3] は、厚さ1 mmから3 mmの平型ヒートパイプの問題点と応用分野について示した。さらに、1995年にFaghri [4] は、厚さ1 mmから2 mm、長さ25 mmから120 mmの異なるタイプの小型ヒートパイプの開発と試験を行った。しかし、携帯機器で求められるヒートパイプの厚さは1.0 mm以下である。この厚さのヒートパイプには、新しいウィック構造を開発することが必要であった。

著者ら [5] は、「センターファイバーウィック」と呼ばれる特殊なファイバーウィック構造から成り、ヒートパイプの幅方向断面においてウィックの両側に十分な蒸気通路スペースを持つ超薄型ヒートパイプを紹介した。この超薄型ヒートパイプを使用し、著者ら [6] は、スマートフォンの熱問題を解決する冷却モジュールを開発した。この冷却モジュールは、主に熱輸送用の超薄型ヒートパイプと主に熱拡散の金属板から構成される。本研究では、この冷却モジュールの熱特性を把握するため、超薄型ヒートパイプの幅、厚さ、有効長さを変えていくつもの実験を行った。

2. 冷却モジュールの詳細

試作した冷却モジュールは、超薄型ヒートパイプをはんだで金属板へ取り付けしたが、他の接着材料でも取り付けることができる。

図4は、試作に用いた冷却モジュールの写真を示す。モジュールの全体寸法は、110 mm×60 mmである。冷却モジュールに使用した超薄型ヒートパイプは、元の直径が2 mmから3 mmの銅パイプから製作した。超薄型ヒートパイプの長さおよび厚さは、それぞれ50 mmから80 mm、0.35 mmから0.60 mmである。金属板は構造部材としても用いられるので純銅と比較してより強度があり、熱伝導率も(270 [W/m.K])純銅(300 [W/m.K])に近い銅合金(厚さ0.2 mm)を使用した。

図5に超薄型ヒートパイプの断面とウィック構造を示す。本ウィック構造は、以前「センターファイバーウィック」と名づけられた。ウィック外径0.05 mmから0.10 mmの微細な金属繊維がパイプの中央に位置してウィックの両端に蒸気を流すスペースを確保した。式(1)はヒートパイプの最大熱輸送量を示す。

$$Q_{max} = \frac{2\sigma \cos \theta}{\frac{32\mu_V \cdot L_{eff}}{\rho_V A_V D_{hv}^2 \lambda} + \frac{\mu_L \cdot L_{eff}}{KA_W \rho_L}} \cdot \frac{r_p}{r_p} \dots \dots (1)$$

ここで、 σ は表面張力 [N/m]、 θ は接触角度 [deg]、 r_p 有効細孔半径 [m]、 μ_L と μ_V はそれぞれ流体と蒸気の粘度 [Pa.s]、 L_{eff} はヒートパイプの有効長さ [m]、 ρ_L と ρ_V はそれぞれ流体と蒸気の密度 [kg/m³]、 A_W と A_V はそれぞれウィックと蒸気流路断面積 [m²]、 D_{hv} は蒸気流路の水力直径 [m]、 λ は蒸発潜熱 [J/kg]と K は透過率 [m²]である。

ヒートパイプの内面の濡れ性が良ければ接触角度、 θ が小さくなりそれによって式(1)の分子にある毛細管引力が大きくなる。また、高い透過率と小さい有効細孔半径のウィックを使用するとヒートパイプの最大熱輸送量が増加する事が式(1)から分かる。これは透過率が高くなるとウィックの中を液体が流れ易くなる事と小さい有効細孔半径(r_p)で発生する大きい毛細管引力の為である。表1は、異なる種類のウィックの有効細孔半径(r_p)および透過率(K)の値を示す。センターファイバーウィックの透過率は、他の従来のウィックのよりも高く、透過率と有効細孔半径比率が一番大きくなっている。

図6はセンターファイバーウィックを用いた超薄型ヒートパイプの厚さを0.35 mmから0.60 mmの範囲で変えた場合の蒸発部熱伝達率、 h_e [W/m².K]と凝縮部熱伝達率、 h_c [W/m².K]を実験データで示している。使用したヒートパイプは外径2 mmのパイプから出来ており全長さは85 mmである。厚さ0.60 mmのヒートパイプの蒸発と凝縮両部の熱伝達率が0.35 mmの熱伝達率よりほぼ2倍ほど増加していることが分かる。

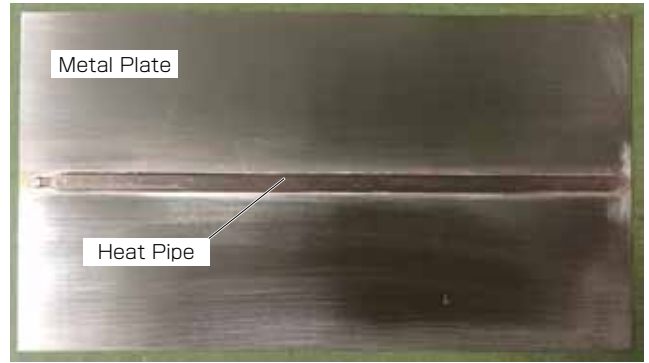


図4 冷却モジュールの写真
Fig. 4. Studied cooling module.

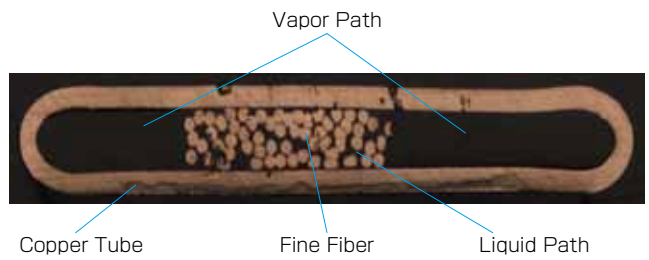


図5 超薄型ヒートパイプのウィック構造
Fig. 5. Ultra-thin heat pipe wick structure.

表1 異なる種類のウィックの特性
Table 1. Properties of different wick structure.

Wick Type	Permeability, K [m ² ×10 ⁻¹⁰]	Effective Pore Radius, r _p [m×10 ⁻³]
Sinter Powder (Powder Size OD 0.05 mm)	0.16	0.01
100#Mesh	1.8	0.12
Center Fiber Wick (Fiber Size OD 0.05 mm)	3.9	0.09

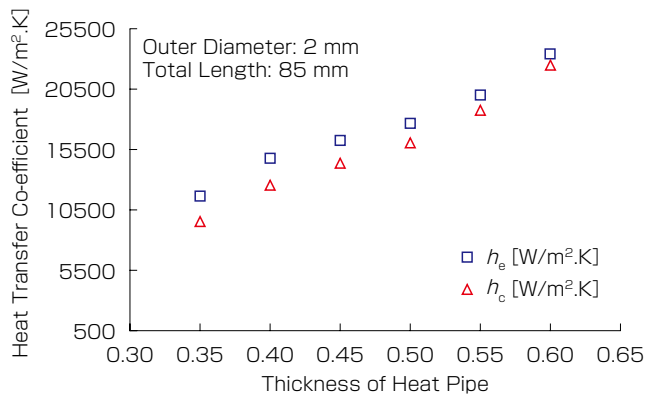


図6 熱伝達率へのヒートパイプ厚さの影響
Fig. 6. Effect of heat pipe thickness on heat transfer co-efficient.

試作に用いた冷却モジュールに熱入力した場合受けた熱はヒートパイプと金属板により拡散される。図 7 は冷却モジュールの熱伝導のイメージを示す。式 (2) は、冷却モジュールの熱バランスを示す。

$$Q_{total_IN} = Q_{spread_HP} + Q_{spread_PLATE} \dots\dots (2)$$

ベースサンプルとして、厚さ 0.05 mm, 平面熱伝導率 1500[W/m.K] のグラファイトシートを超薄型ヒートパイプモジュールと同じサイズの銅合金板に取り付けたものを準備した。図 8 は、ベースサンプルの概略図を示す。

3. 実験装置と評価方法

冷却モジュールの熱特性把握は、実験的および理論的に行われた。図 9 は、実験装置の概略図を示す。冷却モジュールは、10 mm×10 mm, 厚さ 1.7 mm のセラミックヒータで加熱し、熱拡散評価のため冷却モジュール表面温度を 9 点測定した。さらに、モジュールの表面全体

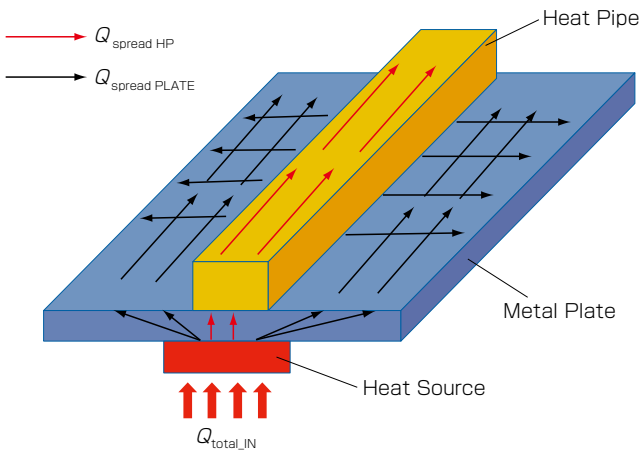


図7 冷却モジュール使用時の熱拡散イメージ
Fig. 7. Heat spreading image of the studied cooling module.

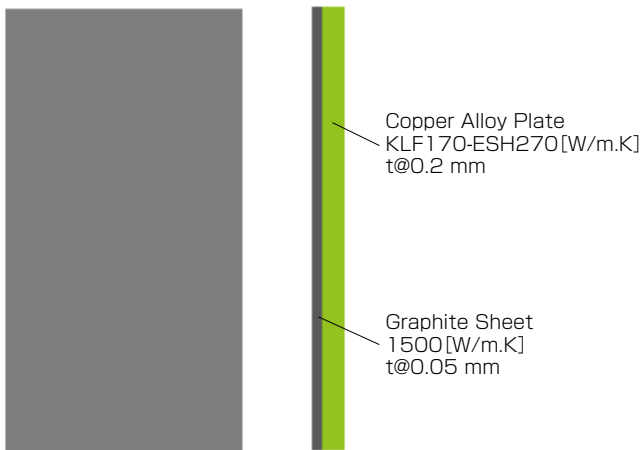


図8 ベースサンプル構造
Fig. 8. Base line sample structure.

への熱拡散効果確認のためサーモグラフ写真を撮影した。ヒーターの表面温度 T_h , 冷却モジュール上部の表面温度 $T1, T2, T3$, 中間部の表面温度 $T4, T5, T6$, 下部の表面温度 $T7, T8, T9, T10$ を K 型熱電対で測定した。TIM (Thermal Interface Material) シートは、モジュールとヒーター間に接触抵抗を一定に保つために使用し、試験は温度が定常状態になるまで行った。実験室内の風流の影響をなくすため、実験は実験装置全体を箱で覆った状態で行った。周囲温度 T_{amb} は、約 25 °C に保った。

冷却モジュールの熱拡散効果確認のため、本研究では有効熱伝導率 k_{eff} [W/m.K], 総熱抵抗 R_t [°C /W] とヒートパイプの熱抵抗 R_{HP} [°C /W] を考慮する。 k_{eff}, R_t および R_{HP} は、それぞれ (3), (4) と (5) で定義される。計算を簡単にするため、冷却モジュール下部と上部の平均温度 ($T_{hot_avg}, T_{cold_avg}$) を使用した。 X_{eff} は、高温部と低温部の両端の距離である。金属板の断面部のみ A_{cross} を使用する。

$$k_{eff} = \frac{Q_{in} X}{A_{cross} \Delta(T_{hot_avg} - T_{cold_avg})} \dots\dots (3)$$

$$R_t = (T_h - T_{amb}) / Q_{in} \dots\dots (4)$$

$$R_{HP} = (T2 - T10) / Q_{in} \dots\dots (5)$$

4. 結果と考察

本研究のモジュールの特性把握のため、以下の項目を変化させた。

- a. 超薄型ヒートパイプの幅
- b. 超薄型パイプの厚さ
- c. 超薄型パイプの本数
- d. 超薄型パイプの長さ

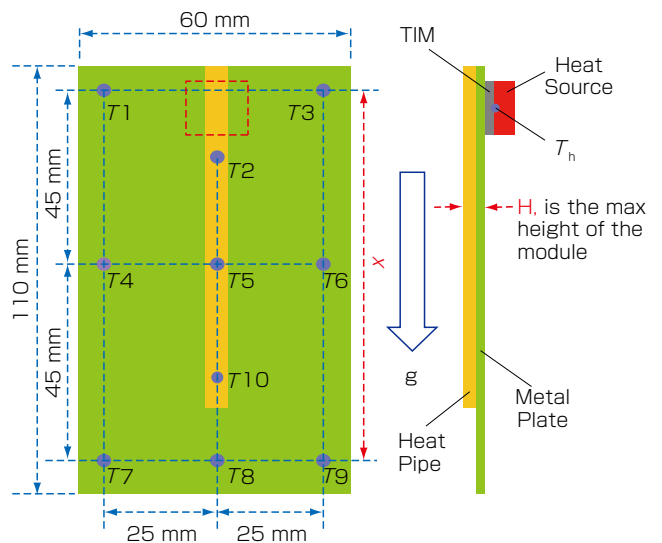


図9 実験装置の概略図
Fig. 9. Schematic diagram of experimental set-up.

図 10 は、超薄型ヒートパイプ幅の冷却モジュール総熱抵抗 R_t と平均熱伝導率 k_{eff} への影響を示す。ヒートパイプ幅は、銅管の元々の直径 (OD) を変えることで調整した。 k_{eff} および R_t は、幅 3.0 mm (OD 2 mm), 4.5 mm (OD 3 mm), 7.8 mm (OD 5 mm) の超薄型ヒートパイプを用いた冷却モジュールで試験した。ここでヒートパイプの厚さ t は 0.45 mm とし、モジュールの最大高さ H は 0.67 mm, ヒートパイプの長さ L は 85 mm とした。図 10 中の Base Line R_t と k_{eff} は図 7 に示したベースサンプルの値である。図 9 は超薄型ヒートパイプの幅が増えると有効熱伝導率が増加し、総熱抵抗が低下することを示している。これは、ヒートパイプの幅が増え、蒸発部及び凝縮部の面積が増し、ヒートパイプの熱抵抗が下がることにより冷却モジュールの熱抵抗が下がるためである。表 2 は異なるヒートパイプの幅を持つ冷却モジュールの総熱抵抗 R_t と平均熱伝導率 k_{eff} の値を示す。図 11 でもヒートパイプの幅が増すことにつれて熱拡散範囲が広がっていることが分かる。

図 12 は、超薄型ヒートパイプ厚さの冷却モジュール総熱抵抗 R_t と有効熱伝導率 k_{eff} への影響を示す。この評価には外径 2 mm と 3 mm のヒートパイプを用い、外径 2 mm のヒートパイプを厚さ 0.35 ~ 0.60 mm, 外径 3 mm のヒートパイプを厚さ 0.45 ~ 0.60 mm に潰したもので試験を行った。ヒートパイプの長さ L は 85 mm とした。ヒートパイプをより薄くした場合、内部スペースは狭まくなり性能が低下する。その結果、厚さが薄くなる

と有効熱伝導率が低下し、総熱抵抗が増加することがわかる。本研究では、ベースサンプルの熱性能レベル以上に保つには、最少厚さは 0.40 mm 必要であることが分かった。OD 2 mm の厚さ 0.40 mm 超薄型ヒートパイプを用いた冷却モジュールの有効熱伝導率と熱抵抗はそれぞれ 1432.5 [W/m.K], 12.5 [°C/W] であり、これに対しベースサンプルはそれぞれ 1425 [W/m.K], 12.7 [°C/W] である。

図 13 は、超薄型ヒートパイプの厚さ (0.35 mm, 0.45 mm と 0.55 mm) を変えた場合の冷却モジュールの最大熱拡散能力を示している。この実験で使用した薄型ヒートパイプは外径 2 mm のパイプから出来ており全長は 85 mm である。図 13 の横軸は捏入力、 Q_{in} と縦軸はヒートパイプの熱抵抗、 R_{HP} を表している。熱入力を増加し続けた場合ある熱入力を超えるとヒートパイプの熱抵抗が上がり始める。本研究ではこの熱入力が最大熱拡散能力と定義した。従って、図 13 から 0.35 mm 超薄型ヒートパイプを用いた冷却モジュールの最大熱拡散能力は 4 [W] であり、0.45 mm と 0.55 mm 超薄型ヒートパイプ

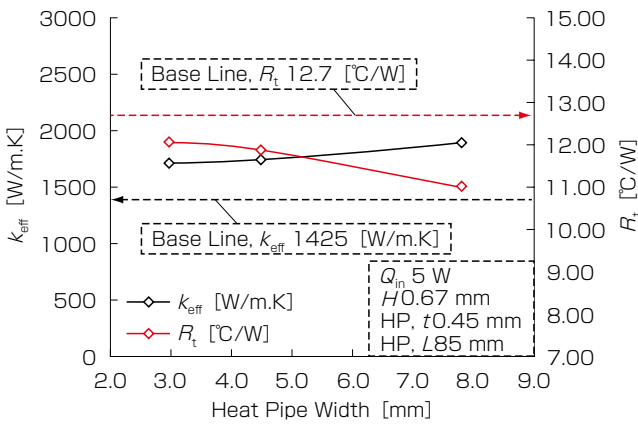


図 10 熱抵抗および有効熱伝導率へのヒートパイプ幅の影響
Fig. 10. Effect of heat pipe width on thermal performance.

表 2 異なるヒートパイプの幅を持つ冷却モジュールの R_t と k_{eff}
Table 2. R_t and k_{eff} of different width heat pipe module.

Width of Heat Pipe [mm]	k_{eff} [W/m.K]	R_t [°C/W]
3.00	1712.6	12.1
4.50	1742.0	11.9
7.80	1887.7	11.0

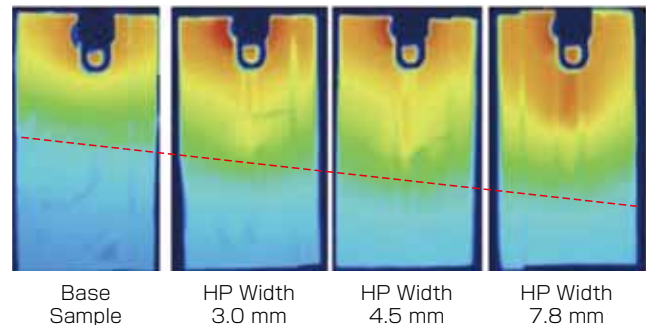


図 11 異なるヒートパイプの幅を持つ冷却モジュールのサーモグラフ写真
Fig. 11. Heat spreading capacity of different width heat pipe.

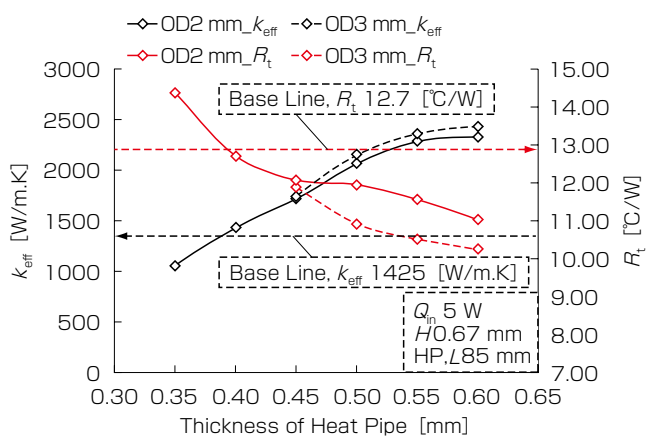


図 12 熱抵抗および有効熱伝導率へのヒートパイプ厚さ幅の影響
Fig. 12. Effect of heat pipe thickness on thermal performance.

を用いた冷却モジュールの最大熱拡散能力はそれぞれ 6 [W] と 7 [W] である。

図 14 は、冷却モジュールに使用されるヒートパイプ数を 1 本から 3 本まで変えた場合の冷却モジュール熱特性への影響を示す。本研究では超薄ヒートパイプ厚さ t は 0.45 mm, 最大冷却モジュール高さ H は 0.67 mm, ヒートパイプの長さ L は 85 mm とした。冷却モジュールのヒートパイプ数が増えると、熱特性が著しく向上した。例として、OD 2 mm, 3 本のヒートパイプモジュールでは、有効熱伝導率と総抵抗はそれぞれ 2300 [W/m.K], 10.6 [°C/W] であり、これに対しヒートパイプ 1 本の冷却モジュールはそれぞれ 1712.6 [W/m.K], 12.1 [°C/W] であった。サーモグラフ観察においてもヒートパイプの数の増加に伴い、熱拡散範囲が広がっていた。

図 15 は、ヒートパイプの長さが 50 mm と 85 mm の場合の冷却モジュール熱特性への影響を示す。ここでは、ヒートパイプの厚さ t は 0.45 mm, モジュールの最大厚さ H は 0.67 mm とした。ヒートパイプの長さが長くなると、冷却モジュールの有効熱伝導率も増加し総熱抵抗は下がる。ヒートパイプの長さ 50 mm 冷却モジュールの

有効熱伝導率と総抵抗はそれぞれ 1285 [W/m.K], 13.5 [°C/W] であり、これに対しヒートパイプの長さ 85 mm の冷却モジュールはそれぞれ 1713 [W/m.K], 12.1 [°C/W] であった。しかし、ヒートパイプの長さが長くなり過ぎると蒸発部にドライアウトが起こりヒートパイプの総熱抵抗があがるので、長さの増加には制限がある。本研究では、ヒートパイプの長さは 85 mm までであり、この長さではヒートパイプのドライアウトは見られなかった。また今回の冷却モジュールをスマートフォンに搭載する場合のヒートパイプ最大長さは筐体スペースの制限により 85 mm 程度と考えている。

基本的に本研究で用いた超薄冷却モジュールの熱特性は数値解析である程度把握することが出来るが、数値解析のモデル化等に時間が掛かる。そこで、我々は今回実験で得られたデータから式 (6) と (7) の簡易な相関式を導いた。

$$k_{eff} = 3075 \times t^{1.22} \times (W \times N)^{0.32} \dots \dots \dots (6)$$

$$R_t = 158.75 \times k_{eff}^{-0.32} \dots \dots \dots (7)$$

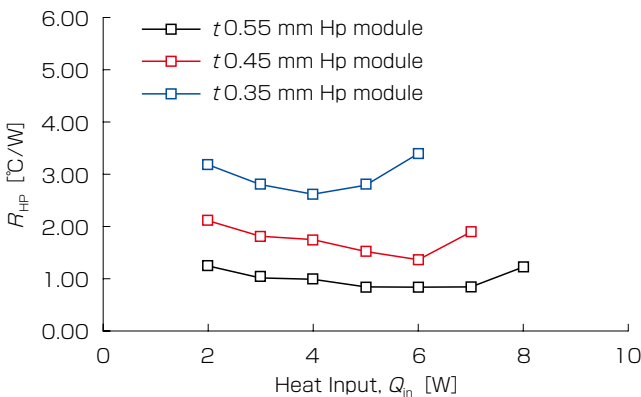


図 13 最大熱拡散能力へのヒートパイプ厚さの影響
Fig. 13. Effect of heat pipe thickness on maximum heat spreading capacity.

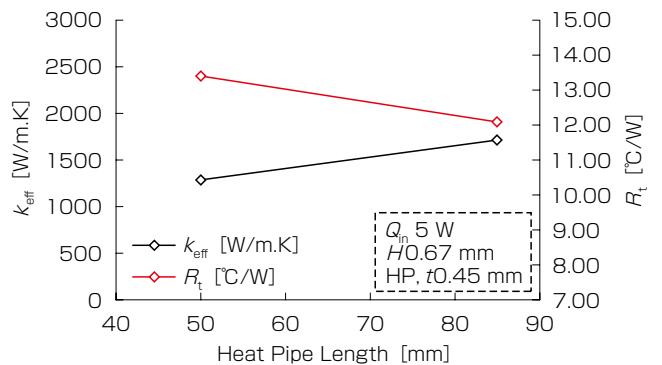


図 15 熱抵抗および有効熱伝導率へのヒートパイプ長さの影響
Fig. 15. Effect of heat pipe length on thermal performance.

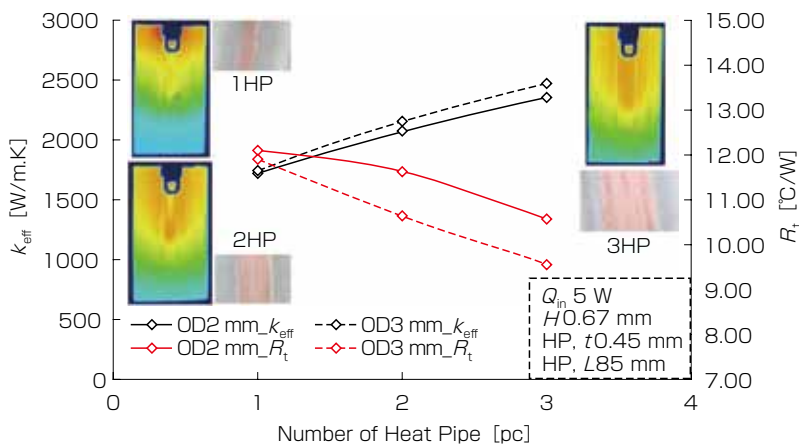


図 14 熱抵抗および有効熱伝導率へのヒートパイプ使用本数影響
Fig. 14. Effect of number of heat pipe on thermal performance.

式 (6) を利用し薄型ヒートパイプの厚さ, t ; 幅, W と本数, N を変更させた場合冷却モジュールの有効熱伝導率, k_{eff} を計算出来, 有効熱伝導率の値で式 (7) から総抵抗, R_t を計算出来る. また, 熱入力, Q_{in} と周囲温度 T_{amb} が分かれば式 (4) を利用し薄型ヒートパイプ冷却モジュールを使用した場合のヒータ表面温度, T_h が分かる.

図 16 は, 超薄型ヒートパイプの厚さを変えた冷却モジュールを使用した場合のヒータ表面温度, T_h を式 (4), (6) と (7) で計算結果と実験で得られた結果の比較を示している. 0.35 mm 厚さ以外は, 実験と試験結果の差は約 3.0 °C である. ヒータの上昇温度に対して約 4% の違いに相当している. 0.35 mm の厚さのものは, 部分的にドライアウトしており, 試験と計算結果の差は, 5 °C 以上になっている.

5. む す び

本論文では, 携帯電子機器 (スマートフォン, netbook, ultra book 等) 向け超薄型ヒートパイプを用いた冷却モジュールの熱特性把握およびグラフィートシート用いた冷却モジュールとの比較を行った. 本研究では以下のように結論付けている.

1. ヒートパイプの蒸発部および凝縮部熱伝達率は各厚さにおいてほぼ同等の値を示している.
厚さが大きい程熱伝達率が大きくなり 0.35 mm ~ 0.60 mm の時 10,000 ~ 23,000 [W/m².K] である.
2. 超薄型ヒートパイプを用いた冷却モジュールはグラフィートシート用いたベースサンプルより熱特性を向上する事が出来る.
3. 幅の大きいヒートパイプを使用することで, 冷却モジュールの熱特性を良くする事が出来る.
4. ヒートパイプの厚さを増やすことで, 効果的な熱伝導が実現される. 金属板とグラフィートシートの現行の冷却方式と比較して, 同程度またはそれ以上の性能を保つために必要な最小厚さは 0.4 mm である.
5. ひとつの冷却モジュールで使用するヒートパイプの本数を増やすことで熱特性が向上する.
6. ヒートパイプの長さをドライアウトポイントまで長くすると, 熱特性が向上する.
7. 冷却モジュールの熱特性について簡易な相関式を算出し, 冷却モジュールを使用した場合ヒータ表面温度, T_h を約 4% 以内で推定する事ができるようにした.

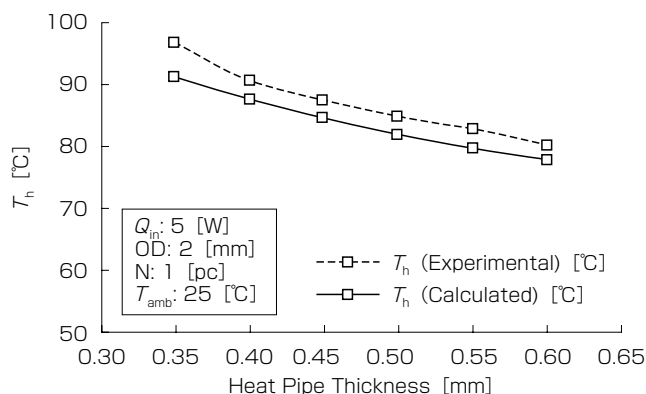


図 16 ヒータ表面温度へのヒートパイプ厚さの影響
Fig. 16. Effect of heat pipe thickness on thermal performance.

参 考 文 献

- 1) Ponnapan R., "Novel grooved-shaped screen-wick miniature heat pipe", AIAA Journal of Thermo physics and Heat Transfer, Vol. 16, No.1, pp. 17-21, 2002.
- 2) Mochizuki M., Nguyen T., Mashiko M. and Saito Y., "Update cooling technology for personal computers using heat pipes and vapor chamber", 1st International Seminar on Heat Pipes and Heat Recovery System, Kuala Lumpur, Malaysia, December 8-9, 2004.
- 3) Jalilvand A., Mochizuki M., Saito Y., Kawahara Y., Nguyen T. and Wuttijumnong V., "Thinner thermal solution module by combination of thin heat pipe and piezo fan", InterPACK 2011 July 6-8, 2011, Portland, Oregon, USA.
- 4) Faghri A., "Heat pipe science and technology", Taylor and Francis, London, 1995.
- 5) Ahamed M. S., Mochizuki M., Saito Y., Mashiko K., Kawahara Y., Tahara Y., "Investigation of thermal performance of thin heat pipe with fiber wick structure", 48th National Heat Transfer Symposium, Okayama, Japan, Jun 01-03, 2011.
- 6) Ahamed M. S., Mochizuki M., Saito Y., Mashiko M., "Hot spot elimination by thin and smart heat spreader", InterPACK 2015 & ICNMM2015, San Francisco, CA, USA, July 6-9, 2015.