

ベーパーチャンバを用いたサーバ用チップ冷却ユニット

熱ソリューション部開発2グループ
熱ソリューション部開発1グループ
熱ソリューション部技術グループ
熱ソリューション部

萩 野 春 俊¹・ファン タンロン¹
川 原 洋 司²
齋 藤 祐 士³
富 塚 稔 瑞⁴

Chip Cooling Unit for Server by Using Vapor Chamber

H. Hagino, P. Tanhlong, Y. Kawahara, Y. Saito, and T. Tomitsuka

生成AI技術の利用拡大に伴い、AIサーバに搭載されるCPU/GPUの高性能化ならびに高集積化が急速に進展している。高性能化に伴いそれらの消費電力は増大し、同時に発熱量が著しく増加している。半導体部品は高温環境に対して脆弱であるため、動作保証温度を超過しないよう冷却設計を施すことが不可欠となっており、半導体チップさらにはシステム全体のサーマルマネジメントが、喫緊の重要課題として位置付けられている。そこで当社でベーパーチャンバを用いたサーバ用CPU/GPUチップ冷却ユニットを開発したのでそれを報告する。

With the expanding use of generative AI technologies, the performance and integration density of CPUs and GPUs for AI servers have been advancing rapidly. As performance has increased, heat generation from chips has increased significantly due to higher power consumption. Therefore, thermal management of semiconductors is critical because semiconductor reliability degrades at high operating temperatures. So, server cooling systems play an important role in the thermal management of both chips and overall server systems. Vapor chamber cooling unit is developed for server chip thermal management. The cooling performance of the vapor chamber unit and its effectiveness for server chips are shown in this paper.

1. ま え が き

AIサーバの発熱はここ数年で増加しており、最新のAI向けチップでは発熱量が1,000Wを超えるものも珍しくない。また、サーバラック全体の消費電力が100kWを超えるものも登場している。サーバ用チップの冷却方式としては主に空冷方式と液冷方式が採用されている。空冷方式とは、放熱フィンを発熱体に取り付け、機器に搭載された空冷ファンにより高速の風をフィンに当て熱を外へ逃がす方式であり、構造が簡潔であるためサーバ冷却で主に採用されていた手法である。しかし、空気は熱輸送能力が低いいため、高発熱体の冷却には大型のファンとフィンが必要となる。また、高負荷時には騒音や振動が発生する問題がある。液冷方式はチップの上に内部に流路を持つコールドプレートに密着させ、内部に冷却液を流して放熱を行う方式である¹⁾。水は空気に比べて熱輸送能力が高く、高負荷時でも安定した冷却が可能である。一方で、ポンプ、熱交換器、

冷媒タンク等の専用設備を必要とするため、既存のデータセンタに導入する際には追加設備の設置が必要である。また、液漏れリスクを有するため定期的なメンテナンスや予防対策が不可欠である。一方、空冷ユニットは既存の空調設備を利用できるため、追加設備を必要とせず導入が容易である。冷却方式の選定の際には冷却性能だけでなく、冷却ユニットの設置可能なスペースの有無や基板周辺部品との干渉といった物理的制約を考慮する必要がある。図1にサーバ冷却方式について冷却装置高さ（サーバ高さ）と対応可能なチップ発熱量の関係を示す。冷却ユニットを設置する自由空間が大きい場合は空冷ユニットが選ばれるが、冷却ユニットを設置する空間が限られる場合や発熱量が大きい場合には冷却効率の高い液冷冷却ユニットが選ばれる。さらに、初期投資費用やメンテナンス性を含めた総合的な観点から冷却方式を決定することが求められる。近年のAI向けチップの発熱量増加の速度が早く、既存の冷却方式では対応が難しくなっているため、さらなる冷却能力の向上が望まれている。本稿ではサーバ冷却用途として開発したベーパーチャンバを用いた液冷、空冷ユニットの熱性能を評価し、既存の冷却手法との比較を報告する。

1 熱ソリューション部開発2グループ アシスタントマネージャー（博士(工学)）

2 熱ソリューション部開発1グループ グループ長

3 熱ソリューション部技術グループ エキスパート（博士（学術））

4 熱ソリューション部 部長

略語・専門用語リスト

略語・専門用語	正式表記	説 明
ベーパーチャンバ	Vapor Chamber	金属製の密閉容器内に封入された作動液が蒸発と凝縮を繰り返すことで大量の熱を高速で輸送する素子。基本的な形状は平板状で、熱を面方向に広げることができる。
コールドプレート	Cold Plate	熱を液体へ放熱するための放熱部品。内部には流路があり、そのを流れる液体が熱を奪い放熱が行われる。液体を流すためのポンプと液体を冷やすための熱交換器やチラーと共に使われる。
ヒートシンク	Heat Sink	熱を空気中に放熱するための放熱部品。多くのフィンが設けられており、空気と触れる面積を増やすことで効率よく放熱を行う。
ヒートスプレッダ	Heat Spreader	局所的な熱を広げて冷却ユニットへ伝えるための板状の部品。
ヒートパイプ	Heat pipe	金属製の密閉容器内に封入された作動液が蒸発と凝縮を繰り返すことで大量の熱を高速で輸送する素子。基本的な形状は円筒形で曲げや潰しの加工を施されることが多い。
ウィック	Wick	内部で凝縮した作動液を毛細管力で蒸発部へ戻す微細な隙間を持つ構造体。
Lid	Lid	チップを覆うように取り付けられた金属製の蓋で、チップを外部の衝撃や圧力から保護し、チップの発熱を冷却ユニットへ伝える働きを持つ。

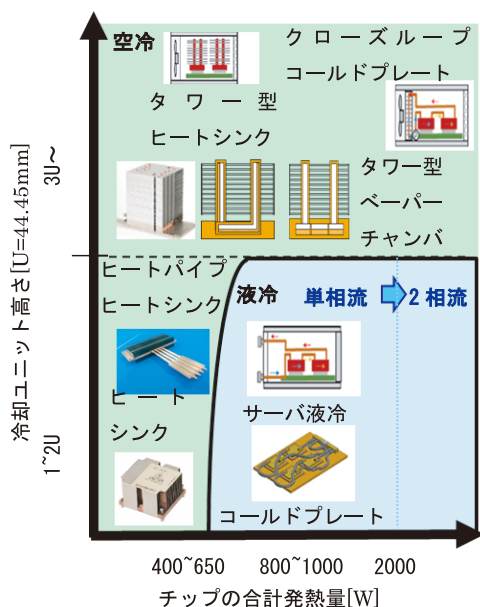


図1 サーバ冷却方式の比較

Fig. 1. Comparison of server cooling unit for data center.

2. ベーパーチャンバ概要

チップで発生した熱を効率的に冷却ユニットへ伝達することで放熱を促進させることを目的に、ヒートスプレッダ、ヒートパイプ、およびベーパーチャンバといった伝熱部材が広く利用されている^{2, 3)}。ヒートスプレッダは高热伝導性を有する金属部品であり、チップ表面から発生する熱を拡散し、冷却ユニットへ効果的に伝達する伝熱部材である。ヒートパイプ、ベーパーチャンバは、内部に封入された作動液の蒸発・凝縮サイクルを利用して熱を輸送する伝熱部材であり、金属管内部に作動液と微小な隙間を有するウィックとよばれる構造体を配置し、ウィック内部での毛細管現象により作動液を循環させるものである。作動液は真空密封された容器内で蒸気と液体が飽和状態を保つよう封入されている^{4, 5)}。図2にベーパーチャンバの動作原理を示す。ベーパーチャンバは、平板状の金属容器内に作動液とウィックを配置した構造を有する伝熱素子である。ベーパーチャンバが加熱されると作動液が蒸発し、潜熱として

熱を吸収する。蒸気は低温部へ移動し、凝縮によって熱を放出する。凝縮液はウィックの毛細管作用により再び加熱部へ戻り蒸発する。この自律的なサイクルの繰り返しにより、大量の熱を高速に輸送可能である。

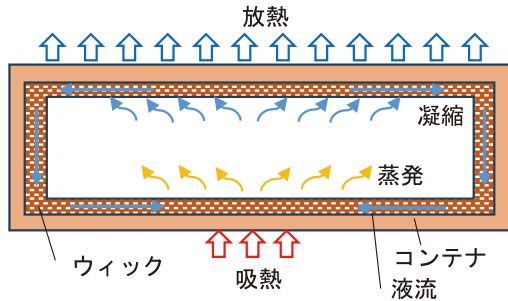


図2 ベーパーチャンバの動作原理

Fig. 2. Schematic diagram of vapor chamber.

3. ベーパーチャンバ冷却ユニット

3.1 ベーパーチャンバ液冷ユニット

液冷ユニットはチップ上に取り付けられたコールドプレートにポンプを用いて冷却液を流してチップを冷却する。コールドプレートを通った冷却液はラジエーターを介して冷却され、コールドプレートへ循環される。図3に液冷ユニットを用いたチップ冷却の模式図を示す。CPU/GPUが基盤上に実装され、その上に金属Lidが取り付けられている。Lidとは半導体部品をチップパッケージ内で保護、封止するために使用される金属製の蓋のことであり、外部の衝撃から半導体を保護する役割と、発熱時にチップ内部で局所的に温度が高温となるホットスポットを防止するための熱拡散板としての役割を持つ。Lidの上には冷却ユニットとしてコールドプレートが取り付けられている。この時Lidの熱拡散能力が足りない場合や冷却ユニットの熱抵抗が高い場合にはチップが高温となり故障の原因となりうる。チップパッケージの温度は冷却ユニットの熱抵抗 R_{ca} [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$]とチップパッケージ熱抵抗 R_{jc} [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$]からなる総熱抵抗 R_{ja} [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$]で決まる。近年はコールドプレートの高性能化が進んでおり R_{ca} が低くなっている。チップパッケージ熱抵抗はLid部の熱抵抗が支配的であるが、熱伝導により熱を拡散させているため材料の物性値により抵抗は決まるが、一般的にLidには合金や純銅が使われることが多く、材質により大きな抵抗の改善はされない。総熱抵抗におけるパッケージ熱抵抗の割合が高まっており、冷却ユニットの改良のみでは総熱抵抗の低減には限界がある。そこで、パッケージ熱抵抗を下げるため、金属Lid部をベーパーチャ

ンバに変えたベーパーチャンバLidを開発した。図4にベーパーチャンバLidの模式図を示す。外形は金属Lidと同じだが、ベーパーチャンバLid内部に作動液が封入されており、作動液の潜熱輸送により高い熱拡散能力を有する⁶⁾。Lidには半導体素子の保護のため強度も求められるが、ベーパーチャンバLid内部にはコラムとよばれる補強用の柱を設けて強度を高めている。銅LidとベーパーチャンバLidの熱性能の比較として熱抵抗の評価を行った。ベーパーチャンバLidの外観を図5に示す。Lidの評価では同一のコールドプレートを用いて熱源を模した25 mm×25 mmのヒーター表面温度と冷却水温度との温度差より総熱抵抗を評価した。評価サンプルのサイズは55 mm×55 mm×3.4 mmで冷却水温度が30 $^{\circ}\text{C}$ 、60 $^{\circ}\text{C}$ の場合の評価結果を図6に示す。水温が30 $^{\circ}\text{C}$ の場合は発熱量が小さいとベーパーチャンバLidと銅Lidでの熱抵抗の差は小さいが、発熱量が増えるにつれてベーパーチャンバの熱抵抗が減少し、熱抵抗の差が大きくなった。ベーパーチャンバの性能は蒸発と凝縮のサイクルと、内部の飽和水蒸気圧による蒸発量に依存する。発熱量が小さいとベーパーチャンバ内部温度は低く飽和水蒸気圧が低いと蒸発量が少ないが、発熱量が増えるとベーパーチャンバ内部温度が上昇して蒸発量が増加し、蒸発と凝縮のサイクルが促進されて熱抵抗が減少する。水温が60 $^{\circ}\text{C}$ の場合にはベーパーチャンバ内部温度が高くなり、銅Lidとの比較において熱抵抗がより小さくなる。600 Wの熱入力時の熱抵抗差を温度差に変換したのを見ると、銅Lidに比べてベーパーチャンバLidを使用した場合にはヒーター表面温度が10 $^{\circ}\text{C}$ 以上減少している。総熱抵抗はベーパーチャンバLidを使用することで約20 %下がっている。ベーパーチャンバLidを用いた場合の効果について図7に示す。CPUの最大発熱量 Q_{max} [W]、最大許容温度 T_{j-max} [$^{\circ}\text{C}$]より求められる許容最大総熱抵抗 $R_{ja-max} = (T_{j-max} - T_{wi}) / Q_{max}$ [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$]を考える。ベーパーチャンバLidによって R_{jc} が低減されることで R_{ja-max} が減少する。これは同じ熱量でもベーパーチャンバを用いることで熱源温度を低くできることを意味しており、許容温度に到達する発熱量を考えると今回開発したベーパーチャンバLidを用いることで銅Lidの場合に比べて20 %向上しており、高性能・高発熱チップの冷却にも対応が可能であることを意味している。チップパッケージの低熱抵抗化により液冷システム全体の省エネ化が可能となる。既存のLidをベーパーチャンバLidにすることで効率よく熱をコールドプレートへ伝えることができるため液冷ユニットの冷却効率が上がり、低出力のポンプでも十分に冷却が可能となり、電力消費の大きいチラーを使わず温かい水でも十分にチップを冷却できるため、液冷システムの消費電力削減が可能となる。

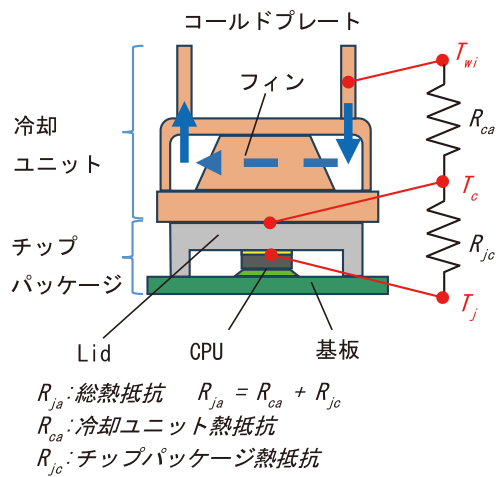


図3 水冷ユニットを用いたチップパッケージ冷却の模式図
 Fig. 3. Schematic diagram of liquid cooling unit for chip package.

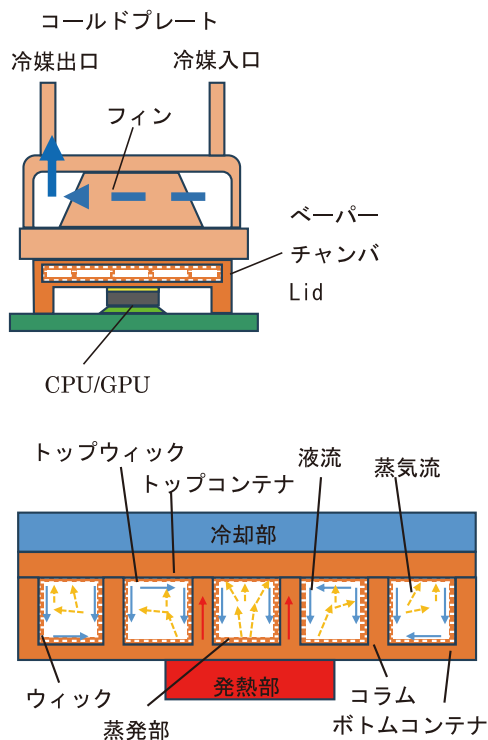


図4 ベーパーチャンバLidを用いた水冷ユニット
 (上: 冷却ユニット模式図, 下: ベーパーチャンバLid内部構造)

Fig. 4. Vapor chamber liquid cooling unit.
 (top : Schematic diagram of vapor chamber liquid cooling unit, bottom: Schematic diagram of vapor chamber structure)

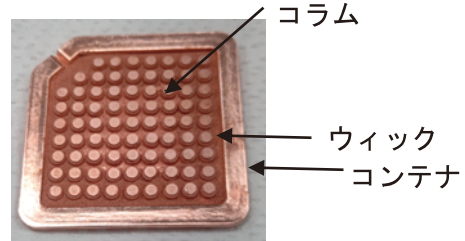
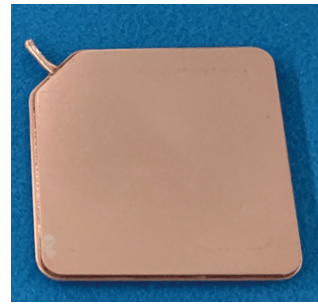


図5 ベーパーチャンバLid (上: ベーパーチャンバLid外観, 下: ベーパーチャンバの内部構造)

Fig. 5. Vapor chamber Lid. (up : Appearance of vapor chamber, bottom : Internal structure of vapor chamber Lid)

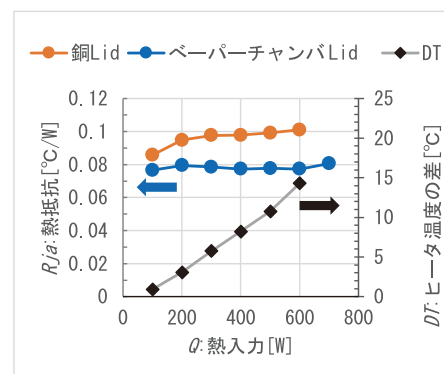
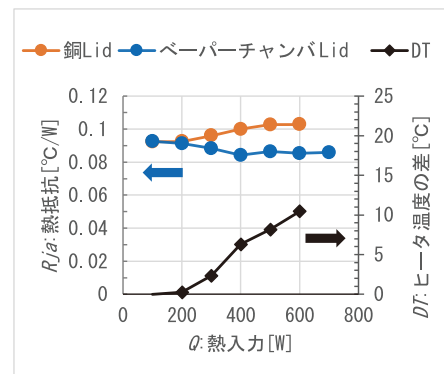


図6 ベーパーチャンバLidの熱抵抗測定結果
 (上: 冷却水温度30℃, 下: 冷却水温度60℃)

Fig. 6. Thermal resistance of vapor chamber liquid cooling unit (top : Liquid temperature = 30 °C bottom: Liquid temperature = 60 °C)

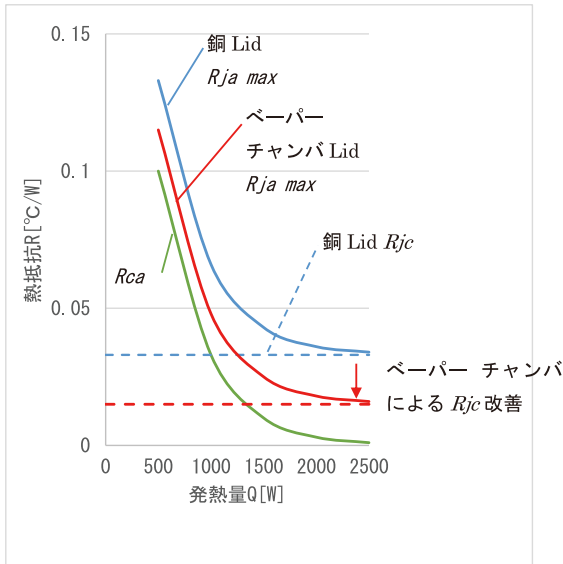


図7 ベーパーチャンバLidによる熱抵抗改善の効果
Fig. 7. Effect of vapor chamber lid to cooling unit's thermal resistance.

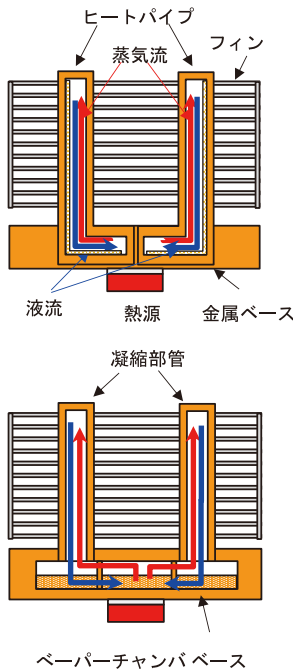


図8 タワー型空冷ユニット模式図 (上：タワー型ヒートシンク, 下：タワー型ベーパーチャンバ)

Fig. 8. Schematic diagram of tower type air cooling unit (top: tower type heat sink unit, bottom: tower type vapor chamber unit)

3. 2 ベーパーチャンバ空冷ユニット

空冷ユニットはヒートシンクが最も普及しており、発熱体の熱を受熱するヒートシンクベースとフィンからなる。高発熱量の半導体チップ冷却には放熱効率を高めるために表面積が大きい大型のフィンが使われており、ヒートシンクベースで受けた熱を効率的にフィン先端まで伝える目的で、ヒートパイプをヒートシンクベースとフィンに接続したタワー型ヒートシンクが実用化されている²⁾。図8にヒートパイプを用いたタワー型ヒートシンクとタワー型ベーパーチャンバヒートシンクの模式図を示す。タワー型ヒートシンクではL字に曲げ加工を行った複数のヒートパイプが金属ベース部とフィンの間に設けられており、ヒートパイプによりベース部で受熱した熱をフィンへ伝えて放熱を行う。タワー型ベーパーチャンバヒートシンクは金属ベース部をベーパーチャンバ化し、ベーパーチャンバ上面にはフィンと接続された複数の凝縮管を持つ⁶⁾。ベーパーチャンバの下部が発熱体と接触しており、蒸気は凝縮管へ移動してフィンにより放熱され凝縮する。凝縮液は凝縮管内壁に設けたウィックの毛細管力によって蒸発部へ戻る。図9にタワー型ヒートシンクとタワー型ベーパーチャンバの蒸発部の構造を示す。タワー型ヒートシンクでは複数のヒートパイプを金属ベース上に並べて熱源と接触させている。蒸発と凝縮のサイクルはそれぞれのヒートパイプ内で独立しておりヒートパイプの肉厚分熱源と接触する面積が小さくなるため蒸発に寄与する面積が小さくなる。チップパッケージには複数の発熱部があることが多く、タワー型ヒートシンクの場合には場所によっては熱源直上がヒートパイプの曲面部となり、ベース部が肉厚となって蒸発部まで熱が輸送されにくく熱抵抗が高くなる場合がある。一方でタワー型ベーパーチャンバはベーパーチャンバベース部と熱源全面が直接接触しているため、蒸発部の熱抵抗を低くすることができる。タワー型ヒートシンクとタワー型ベーパーチャンバの性能比較を示す。外形はどちらも115 mm×95 mm×130 mmで、冷却フィンの体積は等しいもので熱抵抗の評価を行った。タワー型ヒートパイプはL字に曲げられた10本のヒートパイプが銅ベースにはんだ付けされ、冷却側にはアルミフィンが取り付けられている。タワー型ベーパーチャンバは8本の凝縮管がベーパーチャンバベース部上面にロウ付けで接合され、アルミフィンが取り付けられている (図10)。熱源は50mm×30mmのヒーターをベース裏面に設置し、85 CFMの風量で評価した。ベース部下面温度 T_{base} [°C]、流入した空気温度 T_{air} [°C]、ヒーター発熱量 Q [W]より求めた総熱抵抗 R_t [°C/W]は

$$R_t = (T_{base} - T_{air}) / Q \quad (1)$$

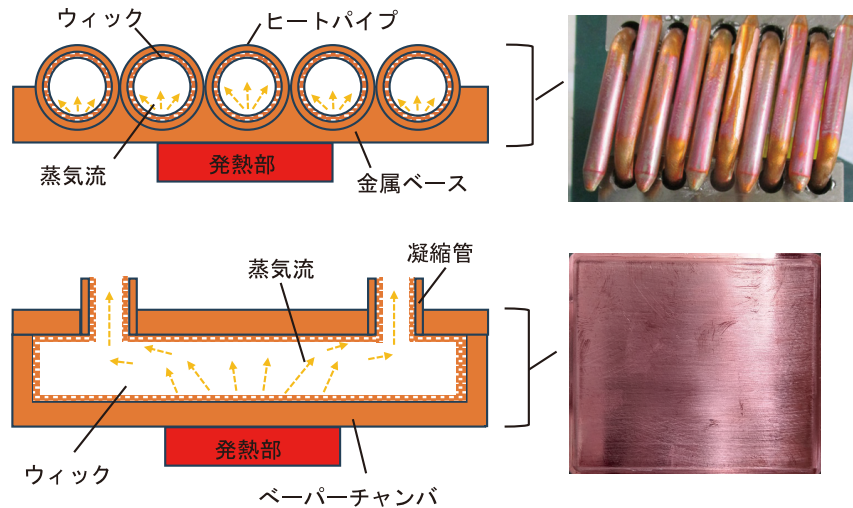


図9 タワー型空冷ユニットの蒸発部模式図（上：タワー型ヒートシンク, 下：タワー型ペーパーチャンバ）

Fig. 9. Schematic diagram of evaporator of tower type cooling unit (top: tower type heat sink unit, bottom: tower type vapor chamber unit)

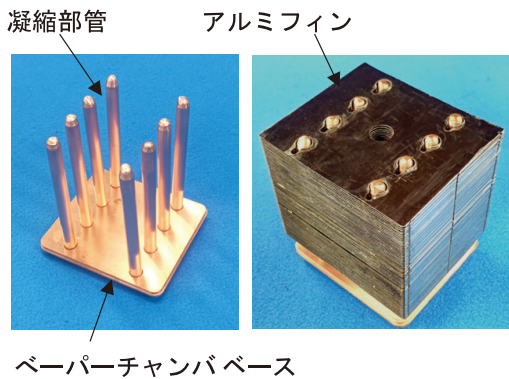


図10 タワー型ペーパーチャンバ外観

Fig. 10. Appearance of tower type vapor chamber.

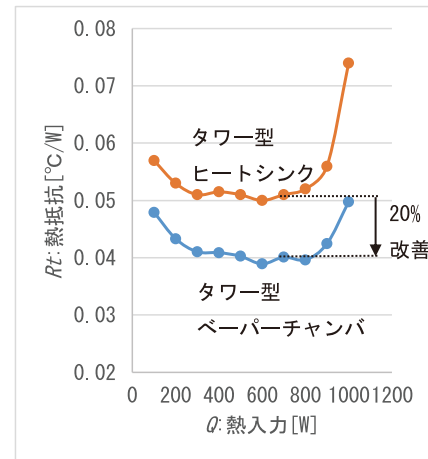


図11 タワー型ヒートシンクとタワー型ペーパーチャンバの熱抵抗実測値

Fig. 11. Thermal resistance of tower type heat sink and vapor chamber.

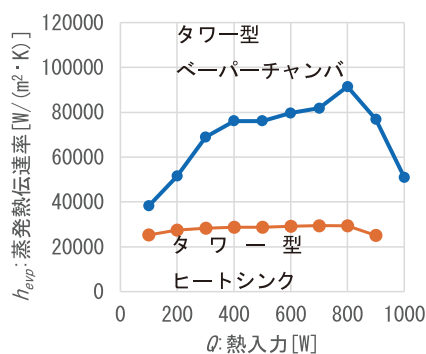


図12 タワー型ヒートシンクとタワー型ペーパーチャンバの蒸発熱伝達率

Fig. 12. Evaporation heat transfer of tower type heat sink and vapor chamber.

となる. 図11に R_t の測定結果を示す. タワー型ペーパーチャンバの熱抵抗はタワー型ヒートシンクよりも低く, 700 Wの時に約20%熱抵抗は低減されており, ヒーター表面温度は約12℃低くなっていた. 定常状態での凝縮管先端部温度 T_{top} [°C]の測定結果より蒸発熱伝達率 h_{evp} [W/(m²·K)]は

$$h_{evp} = Q / ((T_{base} - T_{top}) \times A) \quad (2)$$

となる. ここで A は熱源の面積[m²]を示す. 図12に h_{evp} の評価結果を示す. 蒸発熱伝達率はタワー型ヒートパイプでは約30,000 [W/(m²·K)]であるのに対し, タワー型ペーパーチャンバは約80,000 [W/(m²·K)]となる. これは

蒸発部をヒートパイプからベーパーチャンバとすることで蒸発部面積が増加したことと、ベーパーチャンバの蒸気空間が広く、蒸気の移動のしにくさを示す蒸気圧損を低くすることができるため、蒸発が促進されて蒸発熱伝達率が増加したと考えられる。このことから、ベーパーチャンバを用いることで同一形状の空冷ユニットの冷却性能を向上させることが可能であり、既存のタワー型ヒートシンクで対応できない発熱量のチップもタワー型ベーパーチャンバを用いることで対応できることを示している。

4. むすび

近年のAIに係るチップの性能向上に伴い発熱量が急速に増加しており、チップの発熱量が1kWを超えるGPUも発表されている⁷⁾。AIサーバの発熱量は急速に増加しているが、その発熱を冷却できなければチップの性能を発揮することができない。サーバ用チップ冷却の熱設計において高密度の発熱を拡散させて、効率よく冷却ユニットに伝熱することが重要である。ベーパーチャンバを用いることで熱を効率良く拡散することができ、冷却ユニットと複合させることにより液冷、空冷共に冷却性能を高めることができる。今後一層高まる高発熱チップの冷却に対応できるベーパーチャンバ冷却ユニットを開発していく。

参考文献

- 1) 益子 耕一, フジクラ技報, Vol.2, No123, pp71-76 (2012)
- 2) 齋藤 祐士, ヒートパイプ研究の最前線, 伝熱, Vol.64, No.266, pp.38-43. (2025)
- 3) 齋藤 祐士, 小糸 康志 ヒートパイプ研究の最前線, 伝熱, Vol.64, No.266, pp.7-15. (2025)
- 4) 日本ヒートパイプ協会, 実用ヒートパイプ初版, 日刊工業新聞社 (1985).
- 5) 勝田 正文, ヒートパイプ技術最近の進展, 伝熱, Vol.51, No.217, pp.14-19. (2012)
- 6) 萩野 春俊, サーマルマネジメントの最新動向, エレクトロニクス実装学会誌 Vol.28, No.5, pp 454-458 (2025)
- 7) 笠原一輝, GTC2024 春 基調講演レポート特別寄稿, https://www.gdep.co.jp/tech_report/event_report/, (2024).