

ヒートパイプを利用した車載用電子デバイスの温度マネジメントシステム

Thermal Management System with Heatpipe for in Vehicle Electronic Devices

平澤 壮 史 ^{*1}
Takeshi Hirasawa池田 匡 視 ^{*1}
Masami Ikeda佐々木 千 佳 ^{*2}
Chiyoshi Sasaki

概要 今後の大きな成長が見込まれるプラグインハイブリッド自動車(以下PHV)や電気自動車(以下EV)などの次世代自動車には、リチウムイオンバッテリーなど種々の電装部品が適用されている。本稿では、これらに搭載される車載電子デバイスのために、均熱性に優れたデバイスであるヒートパイプを温度マネジメントシステムに利用することで得られるメリットを検討した結果を説明する。リチウムイオンバッテリー(以下LIB)の温度マネジメントについては、空冷システムと比較して体積が88%減少するにも関わらず、雰囲気温度35℃、発熱量3 Wのセル20個を35℃の冷却源で冷却した場合、ヒートパイプデバイスでは最高セル温度38.1℃、セル間温度差1.3℃に抑えられるなど冷却性能、均熱性に優れることがわかった。また、その他車載用インバータなどの電子デバイスの冷却に対しても、ヒートパイプシステムの適用可能性について説明する。

1. はじめに

モータを動力もしくは補助動力とするエコカーは、今後更なる普及が見込まれている。2020年には自動車の販売台数のうち少なくとも20%程度が、これらモータ駆動機構を有するエコカーになると見込まれている¹⁾。また、これまでこのカテゴリーの主役であったハイブリッド車だけでなく、今後は主にバッテリー電源をパワーソースとするプラグインハイブリッド車、電気自動車などの比率が高まり、同年でプラグインハイブリッド車、電気自動車それぞれ200万台前後の販売が予想されている。これらのエコカーにはリチウムイオンバッテリーやインバータなどの電装部品が数多く搭載されるが、車両性能の向上によりこれらの電装部品の発熱量は増加し、省スペースで効率的な冷却方法の提案が必要となることが予想される。そこで本稿では、リチウムイオンバッテリーやインバータといった車載用電装部品の冷却技術として、均熱化性能に優れたヒートパイプの適用検討を行った結果を報告する。

2. リチウムイオンバッテリーの特性について

2.1 高温での問題点

PHVやEVなどのバッテリー電源がメインパワーソースである車両は走行のためのコストが低く、またCO₂排出量も低いいため、今後引き続き販売数を伸ばし車両の主流になっていくと思われるが、普及のハードルのひとつとなっているのが1充電あ

たりで走行できる距離であろう。現在バッテリーのみで走行できる距離は、PHVで40～60 km程度、EVで100～230 km程度(一部スポーツタイプ除く)であり、一般的なICE車(内燃機関車)の500 kmと比較して大幅に短い状況にある。また、実用上はヘッドライトやエアコンなどの電装品を用いるため、実走行距離はカタログ値の20～40%減になると言われており走行距離がさらに短くなる。また、単純に航続距離を延ばすためにバッテリーの容量を増やしても、バッテリー自身の重量が増えるため走行距離が単純に比例するわけではない。そのため、単位体積当たりの充電容量が大きいバッテリーを搭載することが必要であり、近年LIBがこれらエコカーに搭載される例が増えてきている。

しかし、LIBでは高温下での満充電状態での保存や充放電を繰り返すことにより蓄電容量が減少してしまうため、満充電以下で充電を終了するように制御している。満充電の状態を100%、完全放電を0%としたとき、一般にハイブリッド車(以下HV)で50%程度、プラグインハイブリッド車(PHV)で80%程度以下の容量領域でしか利用していないと言われている。

そのため、バッテリーの充電容量が多少減少しても実使用で問題とならないよう余計にバッテリーを積載しなければならず、重量が足されるため電費が悪くなり、また居住空間も減少してしまうという状況となっている。

一方、LIBの容量劣化は化学反応に起因するものであり、その劣化速度はアーレニウス式に従うと言われており²⁾、これは使用環境温度を下げたり急速充電時の発熱を抑えられればバッテリー寿命が長くなることを意味する。

すなわち、バッテリー温度を適切にコントロールできれば、現在よりも満充電に近い領域までバッテリーを利用しつつ劣化によ

^{*1} 研究開発本部 自動車電装技術研究所^{*2} サーマル・電子部品事業部門

る容量減少を抑えることが出来、搭載するバッテリー量も減らせると考えられる。

2.2 低温での問題点

また大部分のLIBは、0℃を大きく下回る低温下ではリチウムイオンの移動速度が落ち電池反応が行われにくくなるため、電圧の低下が起こり放電できる容量が減少してしまう。この電圧低下は高出力時(大電流放電時)に顕著となるため、これらバッテリーを搭載した自動車、特にEVにおいては出力(加速力)の低下もしくは最高速の低下の原因ともなる。

そのため、低温下では速やかにバッテリーを加熱し、本来利用できる充電容量を使い切れるようにする必要がある。

3. バッテリー温度マネジメントシステムについて

3.1 空冷システム

現在多くのLIB搭載車、特にHVが採用している温度マネジメントシステムは空冷方式である。これは、一定間隔の隙間を開けてLIBセル(単電池)を並べ、これを補機類と一緒にケースに入れた構造のもので、このケースとセルの間には隙間が開いており、この隙間(ダクト部)にファンで空気を送り込むことで温度調整用の空気が流れ、セル間の隙間を通過して反対側のダクト部に抜けてゆく構造となっている(図1)。

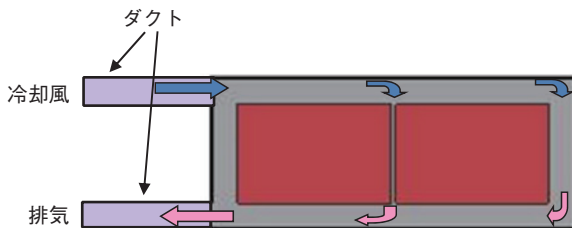


図1 一般的な空冷システムの概略図
Schematic of conventional air-cooling system.

この方式では、温度マネジメントに必要となる部材は、主にダクトを構成するためのケースと空気を送り込むためのファンだけであり簡素なシステムとなっている一方で、温度マネジメントのための空気を流すためにダクト部やセル間の隙間が必要となっており、PHVやEVのようにセル数が多いエコカーでは空気を流すための空間が多く必要となってしまう。先に述べたように、バッテリーの電気だけで走行する(以下EV走行)ことでその経済性が甘受できるPHVやEVでは、EV走行距離の長距離化が必要といわれており、一方で車両内の搭載スペースは限られていることから、バッテリーセル以外の容積は極力抑えることが必要となっている。そのため、空冷システムではダクトやセル間隙間を極力小さくすることが必要となっているが、あまり小さくしてしまうと空路のインピーダンスが大きくなり十分な風量を供給できなくなってしまうため、ダウンサイズにも限界がある。

3.2 ヒートパイプシステム

現在我々が検討しているシステムは、ヒートパイプを用いた温度マネジメントシステムである。ヒートパイプとはコンテナ

(容器)の中に作動液を封入したもので、発熱部で作動液の蒸発潜熱により熱を奪い、蒸気が冷却部で熱を放出して作動液に戻ることで熱を放出することで、迅速に高温部から低温部へと熱を輸送するデバイスである。また、作動液を冷却部から発熱部に輸送するために、コンテナの内面にウィックと呼ばれる毛细管力を生じる部分が設けてあり、このウィックにより発熱部へ作動液が供給され続けるサイクルが生まれる(図2)。

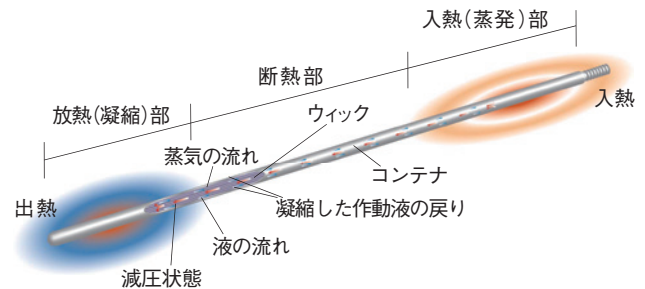


図2 ヒートパイプの動作原理
Schematic of heatpipe working.

コンテナと作動液の組み合わせによっては化学反応を生じてヒートパイプとしての性能が劣化することがあるため、一般的にはその組み合わせが固定されており、本稿にて提案する温度マネジメントシステムにはコンテナが銅、作動液が水の組み合わせのヒートパイプを採用している。水は液体の中で比熱が大きいため、同じ大きさのヒートパイプでも輸送できる熱量が大きく、システムの小型化に寄与している。

このヒートパイプを、LIBでは一般的な形状である角型セルの側面や底面に熱接合するとともに、その一部を加温冷却源に取り付けられセルの温度をマネジメントできることになる。またヒートパイプはその動作原理から、単に熱を輸送だけでなく熱接触している部材を均熱化する作用も持つ。そのため、例えば複数個のセルを同じヒートパイプに接合すれば、これらを一括して温度マネジメントできるだけでなくセル間の均熱化が図れる。今回は組み立て性を考慮して、セル底面にヒートパイプシステムを取り付けた場合を検討することとした。

3.3 空冷システムとヒートパイプシステムの体積比較

空冷システムとヒートパイプシステムの比較のため、以下のモデルにて体積を検討した。

セルのサイズをW120 mm×H100 mm×D20 mmとし、EV用として総セル数200個、20個で1モジュールを形成しているバッテリーバックを想定し、空冷システムではダクトの厚みを30 mm、セル間の隙間を3 mmとしたもの(TYPE A)と、ダクトの厚みを20 mm、セル間の隙間を2 mmとしたもの(TYPE B)を検討した(上下隙間はいずれも0 mm)(図3)。セル側面以外のダクト部分は考慮せず、単にセル側面に面しているダクト部及びセル体積の合計を計算すると、TYPE Aで80 L、TYPE Bで69 Lとなる。

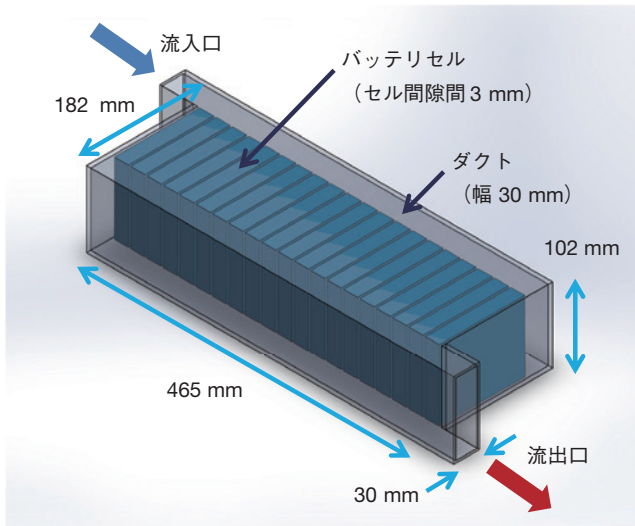


図3 空冷システムダクト形状
Schematic of air-cooling system for CAE
(Computer Aided Engineering).

また、ダクト及びセル間隙間のシステム全体の体積に占める割合はそれぞれ40%、30%となっている。

一方、ヒートパイプシステムは、直径8 mmのヒートパイプを厚さ4 mmにつぶし、これを厚さ2 mmのアルミ板で挟んだ構成となっており（図4）、幅120 mm、厚さ8 mmの断面形状となっている。

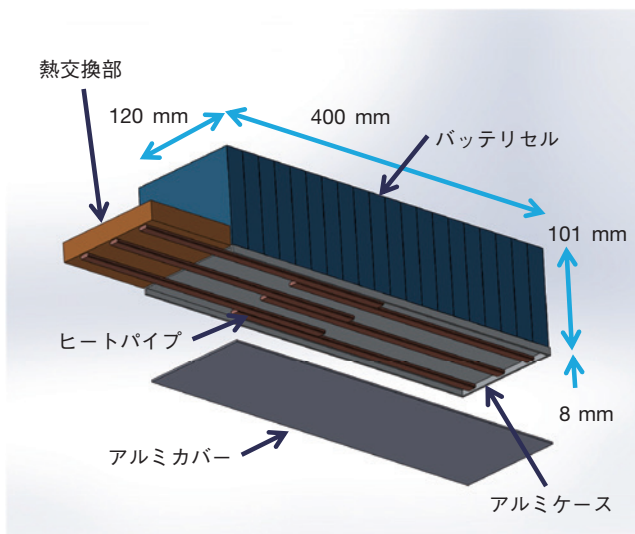


図4 ヒートパイプシステムの概略図
Schematic of heatpipe system for CAE.

一部ヒートパイプ同士がオーバーラップしている部分があるが、ヒートパイプはその長さに反比例して熱輸送量が低下するため、システムの構成により適宜このようなオーバーラップ部を設け、短いヒートパイプをつなげてシステム全体の熱を輸送するようにしている（図4）。

ヒートパイプシステムも同様にセル底面に接している部分及びセル体積の合計を計算すると53 L、ヒートパイプシステム単体ではわずかに4 L、システム全体の体積に占める割合は7%となった（図5）。

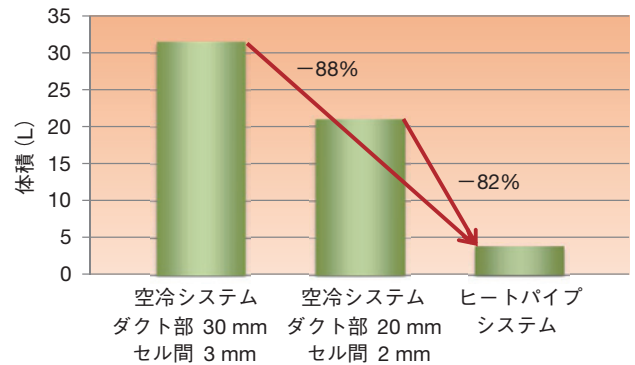


図5 各システムの体積（セル体積を除く）比較
Volume comparison of each system.

3.4 冷却性能の比較

次に、従来の空冷システムとヒートパイプシステムの冷却性能についての比較を説明する。

空冷システムはTYPE Aとし、ダクトの出入口はセルモジュールの対角に設置した（図3）。

このモジュール10個に対して大型のファンで空気を送ることを想定し、1モジュールあたり0.6 m³/minの流量とした。

一方、ヒートパイプシステムはエアコンの冷媒もしくは水冷配管でその温度コントロールを行うことを想定し、熱交換部として幅100 mmのブロックを取り付け、この部分の温度が一定になるとしてモデリングを行った。ヒートパイプシステムとバッテリーセルの間は、厚さ1 mmのサーマルシート（熱伝導率1 W/mk）で伝熱する設定とした。

まず、冷却が必要な場合を想定して解析条件を設定した。雰囲気温度、空冷の冷却風温度及びヒートパイプシステムの熱交換部の温度を35℃とし、充電時などを想定しセルが3 W発熱している状態のとき、それぞれのシステムでモジュール内（セル数20個）のセル最高温度及びセル間最大温度差がそれぞれ何℃になるかを熱解析により確認した。

なお、セル内部の温度分布は考慮せず各セルの平均温度での比較としているが、熱容量は同体積のアルミと同じとしている。

結果を表1に示す。

表1 空冷システムとヒートパイプシステムの冷却性能比較
Cooling performance comparison between air-cooling system and heatpipe system.

	セル最高温度（℃）	セル間温度差（℃）
空冷システム	44.6	5.4
ヒートパイプシステム	38.1	1.3

このように、ヒートパイプシステムは空冷システムに対して6.5℃以上もセル温度が低くなり、またセル間温度差も1.3℃となっている。

さらに、セル間温度差があるということは、最高温度のセルを所定温度まで冷却するために他のセルを過剰に冷やして余計なエネルギーを消費していることを示しており、特に冷却時は充電時など比較的長時間にわたり冷却源の温度を保たなくては

いけないため、この点でもヒートパイプシステムは電費や航続距離の向上に有用なシステムであることがわかる。

3.5 加温性能の比較

次に、両システムで低温からLIBを加温した場合を比較した。空冷システムは3.4と同じ構成とし、セルを含むシステム全体の温度を -10°C とした。このシステムに 20°C の空気を $0.6\text{ m}^3/\text{min}$ 流した場合にすべてのセル温度が 10°C まで上昇する時間、及びその時のセル間温度差を熱過渡解析により確認した。

一方、ヒートパイプシステムも3.4と同じ構成とし、こちらは熱交換部の温度を 20°C に設定し、同様にすべてのセル温度が 10°C まで上昇する時間、及びその時のセル間温度差を確認した。

結果を表2に示す。

表2 全セル 10°C まで到達する時間及び到達時のセル間温度差
Elapsed time reached to 10 degree celsius and temperature variation between battery cells.

	全セル 10°C 到達時間(秒)	セル間 温度差($^{\circ}\text{C}$)
空冷システム	2140	2.8
ヒートパイプシステム	1010	6.0

このように、セル間温度差は空冷システムが 2.8°C であるのに対し、ヒートパイプシステムでは 6°C であったが、空冷システムでは全セルを 10°C まで加熱するために2140秒必要であるのに対し、ヒートパイプシステムでは約半分の1010秒で全てのセルを 10°C 以上に昇温できていることがわかる。加温時には、基本的にこれらの時間だけ温度調整のためにエネルギーを消費すれば良いため、冷却時ほどセル間温度差は問題にならず、あくまでも加温時間の短さが重要と思われる。

なお、ヒートパイプの作動液に水を使用しているため、氷点下でシステムが停止状態となっていると凍結して作動しなくなってしまう。しかし、各ヒートパイプシステムに適正なヒートパイプサイズ、本数などを設定すれば、周囲温度が氷点下であっても加熱部側から作動液が溶け、溶けた部分は再びヒートパイプ作動を始めるため、徐々に作動領域がヒートパイプ全体に及び最終的に終端部まで熱を伝えることができるようになる。鉄道用など氷点下の環境で作動液が水のヒートパイプヒートシンクが使用されているのもこのためである。

また、今回の検討では作動液の溶解にかかる時間は無視しているが、ヒートパイプの体積に占める作動液の割合は非常にわずかであり解析結果にほとんど影響しないと考えられる。

4. 車載電子デバイスの冷却

4.1 インバータ素子冷却ヒートシンクの可能性

次に、車載用電子機器の中でも発熱量の大きいインバータ素子の冷却について、ヒートパイプヒートシンクの適用可能性について述べる。

4.2 インバータ発熱量と各種冷却方法

現在、駆動用モータの出力はHV小型車で20 kW程度、高級車のHVシステムで100 kW程度となっている。このモータに電力を効率よく供給するためにインバータ回路が使用されているが、現在のインバータ素子はSiウエハー上に回路が構成されており、その熱ロス率は5%程度と言われている。

そのため、これから推定される各サイズの車両のインバータ発熱量をまとめると表3のようになっている。

表3 エコカーに搭載されるインバータの推定発熱量
Supposed motor power and heat loss of inverter.

形式	サイズ	モータ出力 (kW)	インバータ発 熱量(kW)
HV・PHV	大型	100	5.0
	中型	60	3.0
	小型	20	1.0
EV	中型	80	4.0
	小型	50	2.5

一方、その出力に合わせて複数の素子を組み合わせて使用しているが、インバータ素子の発熱密度は $30\text{ W}/\text{cm}^2$ 程度と言われており、今後SiCなどの高耐熱素子では $100\text{ W}/\text{cm}^2$ レベルに近づいていくと思われる。また、1素子あたりの発熱量は $200\sim 300\text{ W}$ 程度ありこれを複数個使用して所定出力を得ようになっているが、発熱量の大きさ及び発熱密度から、表3記載よりも小さい発熱量のものもしくは発熱密度がかなり低いものでないと、アルミダイカストや押し出し加工ヒートシンクを用いた空冷では冷却ができない。そのため、現状では水冷方式が主流となっている。

水冷方式は、HVやPHVなどエンジンが設置されて雰囲気温度が 100°C を超えるようなエンジンコンパートメント(ボンネット)内でも使用できるという大きなメリットがある。一方、配管が必要で組み立てに工数が必要であり、またシステムの重量も重く、インバータ素子の冷却温度をきちんと制御するためには電動ウォータポンプが必要でラジエータ用ファン以外にも電力を消費するというデメリットがある。

EVやFCV(燃料電池車)などエンジンコンパートメント内の温度が高くない車両に関しては、ヒートシンクの高性能化が果たせれば空冷が可能となり軽量化、低消費電力化が可能となる。また、エンジンの搭載されているHVやPHVでも、インバータシステムをエンジンコンパートメントからトランクルームや床下などに移設できれば、環境温度が大幅に低い場所に設置でき空冷が可能となり、またICEのダウンサイジングが進めばかつてのようにICEの空冷化もできるであろうから、車両全体を空冷化することも決して不可能ではないと思われる。

ヒートパイプヒートシンクは、すでに鉄道用インバータの冷却にも使われているだけでなく、高速エレベータ用インバータの冷却やサーバーCPUの冷却にも使用されている。鉄道用インバータの発熱量は数十kWにもなり、またサーバーCPUの発熱密度は $60\text{ W}/\text{cm}^2$ になるものもあるが、いずれもヒートパイプヒートシンクにて空冷冷却が行われている。そのため、例

例えば図6のような形状のヒートシンクとファンを車載用インバータに取り付けることで空冷化できるものと思われる。

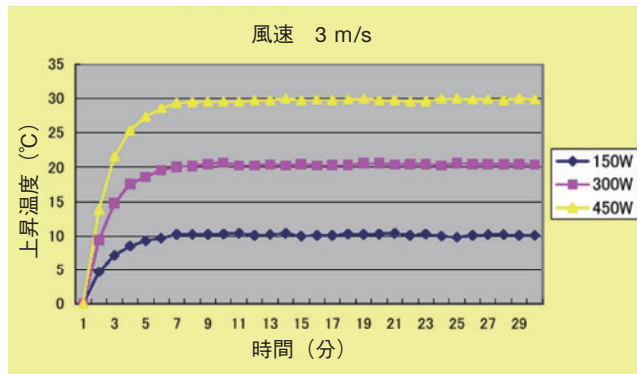
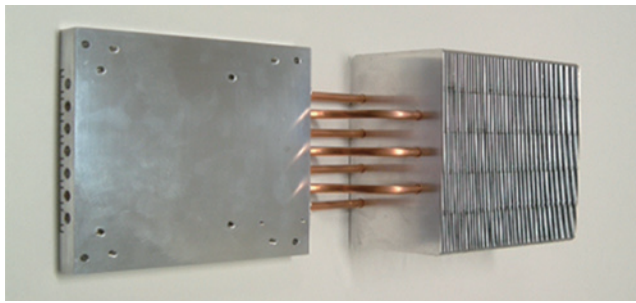


図6 エレベータ用インバータ冷却用ヒートパイプヒートシンク及びその性能例
Heatpipe heatsink for inverter used elevator and its performance.

4.3 その他の車載電子デバイスの冷却

Power Control Unit (PFU), DC-DCコンバータ、電動パワーステアリング (EPS) コントロールユニットなどの車載電子デバイスの制御用ユニットの冷却には、アルミダイカストや押し出しヒートシンクが使用されている。

これらは加工限界の制約から0.6 mm以上の厚みのフィンが付いている。一方、自然空冷で冷却する場合などは、フィンの厚みをもっと薄く、例えば0.3 mmとしてもそのフィンの単独の冷却効率はほとんど変わらずフィン間距離を維持したままフィンピッチを狭くできて、同じ体積内により多くのフィン枚数を取り付けることができ軽量化にもつながる。薄肉のフィンを製造するためには板金材を利用するのが良く、当社ではクリンプフィン(図7)、エコフィンなどの技術を有している。

これら技術を利用することにより、電子デバイスのコントロールユニットの軽量化、また高性能化を図ることが出来、同時にコストダウンにもつながる。

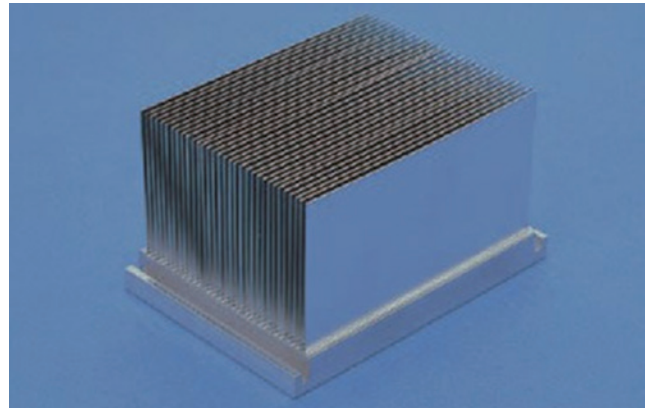


図7 クリンプフィンヒートシンク
Crimped fin heatsink.

さらに、アルミベースにヒートパイプを埋め込んだり取り付けたりすることでその熱伝導率を大幅に改善することができ、局所的な発熱をベース板全体に拡散させることで最高温度の低減を図ることもできる。

このように、板金加工技術やヒートパイプを上手く組み合わせたヒートシンクを随所に採用することで、車両重量を軽量化することができて燃費もしくは電費の改善にもつながることが出来る。

5. おわりに

本稿では、当社の車載用部品に対する冷却デバイス提案の取り組みとして、リチウムイオンバッテリーなどへのヒートパイプ適用例を紹介した。ヒートパイプシステムをバッテリー温度調整デバイスに利用することにより、空冷システムよりもより効率的に冷却もしくは加温ができる。またヒートパイプヒートシンクを用いることでインバータの空冷化も実現できる。さらに車載電子デバイスの冷却に板金加工したヒートシンクを用いるかもしくはベース板にヒートパイプを取り付けることで、ヒートシンクの小型・軽量化、低コスト化が図れ燃費電費の改善につながることができるなど、ヒートパイプを適用することでエコカーの更なる低コスト化、省エネ化が推進されるものと考えている。

今後も、その適用範囲がさらに広げられるよう研究・開発を続けていき、地球環境に少しでも貢献できれば幸いである。

参考文献

- 1) みずほコーポレート銀行 MIZUHO Industry Focus Vol.79 (2010), 10.
- 2) 市村雅弘：小形リチウムイオン電池の寿命特性, NTT ファシリティーズ総合研究所 (2005).