

エネルギー・自動車分野への熱シミュレーション技術の展開

The Application of the Thermal Simulation Technology to the Products in the Energy and in the Automotive Fields

島田 守*
Mamoru Shimada

池田 匡視*
Masami Ikeda

概要 当社では、エレクトロニクス分野からエネルギー分野まで、数W(ワット)レベルの素子の冷却から数kWレベルまでの熱の処理に対応した放熱製品を提供している。当初、エレクトロニクス分野向け製品の設計への利用から始まった熱シミュレーション技術は、製品設計期間の短縮と設計最適化に大きな役割を果たすようになり、現在ではエネルギー分野や自動車分野に至るほぼすべての製品分野で設計に利用されるようになってきている。これらの分野で、冷却対象となる素子の発熱量はエレクトロニクス分野と比較して大きく、解析対象であるヒートシンクも大型となるため、シミュレーションを行う上での難しさがあった。そこで本稿ではエネルギー分野でのヒートシンクを中心として、設計にシミュレーション技術を適用する際の解析方法の工夫や解析精度改善について説明するとともに、自動車分野へのシミュレーション技術の展開について紹介する。

1. はじめに

当社では、ヒートパイプ応用製品を中心に様々な分野で使用される放熱製品を製品化しており、熱流体解析ソフトウェアを利用してシミュレーションを行うことで、試作回数や試作コストを削減するとともに設計の最適化を行っている。シミュレーションがまず利用され始めたのは、ノートPCなどのエレクトロニクス分野向け製品であったが、現在ではあらゆる放熱製品、熱制御製品の設計に利用されるようになってきている。近年は熱設計の重要性が広く認識されるようになってきており、限られたスペースを効率的に利用し、高度な放熱設計を行うことが求められるようになってきている¹⁾。

図1に、様々な半導体素子の発熱量と発熱密度を示す。エレクトロニクス機器の中で、主に冷却対象となるのはCPUやGPUなどの信号処理用の演算素子であり、素子寸法が小さく発熱密度が大きいという点に特長がある。

一方、エネルギー分野や自動車分野で冷却対象となるのは図1に示すサイリスタ、IGBT(絶縁ゲートバイポーラトランジスタ)、ダイオードといった発熱量の大きなパワーデバイスであり、冷却にはパワーキッカー®という名称で商品化しているエネルギー分野向けのヒートシンクが使用されている²⁾。これらの素子の冷却には、主に直径12.7mm以上の太径ヒートパイプが使用され、小さな熱抵抗で大きな熱量を輸送できるという特性が大きな力を発揮している。なかでも鉄道用電源向けには、地球環境負荷が小さいという利点のほか、放熱システムを軽量

化できるというメリットから、従来から使用されている沸騰冷却デバイスに代わって、ヒートパイプ式冷却デバイスの採用が増えている。

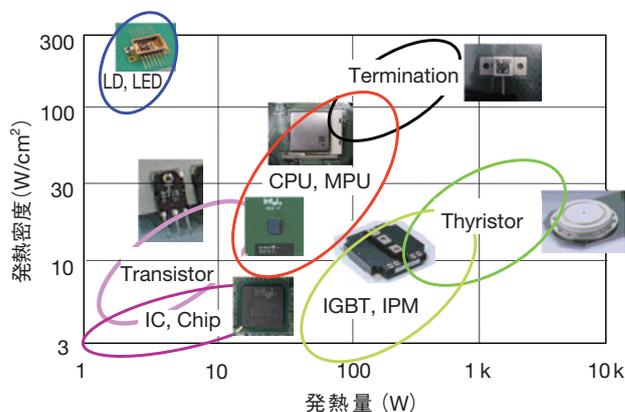


図1 半導体素子の発熱量と発熱密度
Heat value and heat density of typical semiconductor device.

エネルギー分野、特に鉄道用電源の放熱器の熱シミュレーションには、エレクトロニクス製品とは異なる難しさがあったが、解析方法を工夫することで、エレクトロニクス分野のシミュレーションと同等の精度を実現できるようになってきている。本稿では、エネルギー分野向け放熱製品設計への熱シミュレーション技術の適用方法について説明するとともに、自動車用放熱デバイスの解析事例についても紹介する。

* 研究開発本部 自動車電装技術研究所

2. 熱シミュレーションにおける各種放熱部品とヒートパイプ

図2に、ヒートシンクの模式図を示す。放熱製品は一般的に、発熱素子に接続される受熱ブロック、ヒートパイプ、放熱フィン、冷却ファンなどから構成される。このうち受熱ブロックと放熱フィンは固体熱伝導物質であり、一般的な熱解析ソフトウェアでは熱伝導部品としてそのまま扱うことができる。また冷却ファンについても、多くのソフトウェアで標準モデルとして使用できるようになっており、P-Q(静圧-風量)カーブを与えることで、系の圧力損失に応じて風量が規定される機能を有するだけでなく、ファンブレードの回転に伴って生じる気流の回転成分が与えられるようになっている場合も多い。これらの部品に比べて、ヒートパイプモデルが熱解析ソフトウェアへ搭載される例は少なかったが、近年は熱回路網型部品として扱う方法で利用できるようになっている例も見られる。

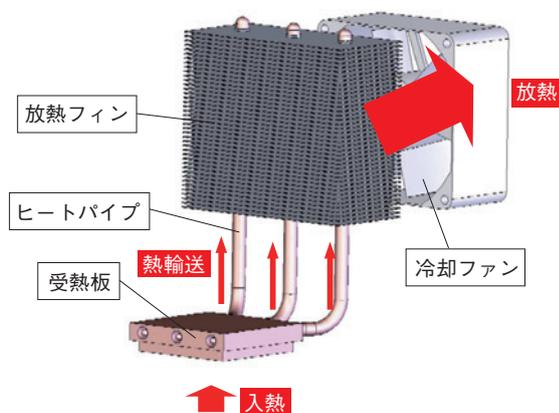


図2 ヒートシンクの模式図
Schematic structure of heat-sink.

図3に、ヒートパイプの内部構造を示す。ヒートパイプは、容器となる金属性コンテナの中に減圧状態で少量の作動流体が封入されている、シンプルな構成である。そして、この作動流体が入熱部で蒸発し放熱部で凝縮する相変化を繰り返しながら循環する際に、蒸気の流れとともに熱を輸送する³⁾。また凝縮部で生成した液相の作動流体を効率的に蒸発部に還流させるため、ウィックと呼ばれる機構が設けられる。最近では環境への配慮から、ヒートパイプコンテナとしては銅が、そして作動液としては水が使用される場合が多くなっている。表1に、ヒートパイプの伝熱デバイスとして3つの大きな特長を示す。このようにヒートパイプは、伝熱デバイスとしての優れた特性を有している。

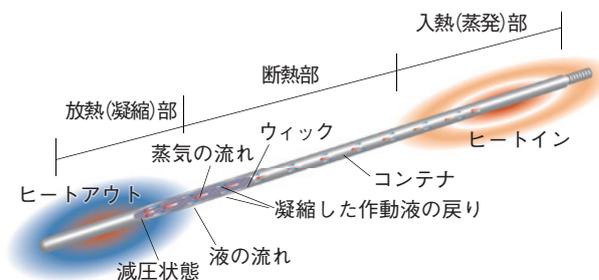


図3 ヒートパイプの模式図
Schematic structure of heat-pipe.

表1 熱輸送デバイスとしてのヒートパイプの特長
Properties of the heat pipe as a heat transport device.

長距離熱輸送	ヒートパイプの熱抵抗は、長さあまり依存しないため、熱輸送距離が長くなっても温度差が大きくなるらない。
均熱性	ヒートパイプは、作動液が自発的に高温部から低温部へ熱を輸送するため、常に均一な温度に保たれる。
熱密度変換	入熱部面積と放熱部面積を変えることができ、より大きな面積、あるいは小さな面積から放熱させ熱を取り出すことができる。

ヒートパイプの構造はシンプルであるものの、作動液の気液相変化を直接的にシミュレーションで扱うことは、計算機負荷が非常に大きい。特にヒートシンク全体を対象とするようなスケールでは、実用的な時間で解析を行うことが困難であることから、解析上は、図4に示すような簡易モデル化して扱う場合が多い。まず、ヒートシンクの解析では、ヒートパイプは一様な物性を持った棒状部品として形状モデル化する。そして、受熱ブロックとの間とフィンとの間のそれぞれに熱伝達係数を設定することで、入熱源から作動液までの間の熱抵抗及び作動液から放熱材までの間の熱抵抗に相当する条件を与える。ヒートパイプ部品自体も熱伝導部品として扱われる場合には、ヒートパイプ要素自体の伝熱特性が受熱ブロックからフィンまでの間の熱抵抗に大きな影響を与えないように、十分大きな熱伝導率を設定する。一部の熱解析ソフトウェアでは、同様の考えに基づいて構成されたヒートパイプ部品が利用できるようになっており、これをそのまま使えばヒートパイプの伝熱特性をシミュレーションで再現することが可能である。

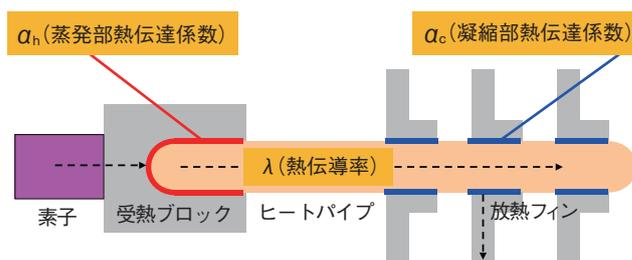


図4 ヒートパイプの解析モデルの一例
Example of the analysis model of the heat pipe.

図5に、ヒートパイプを使用しない構成の電子機器用ヒートシンクの、シミュレーションで得られた温度分布図の例を示す。この例では、発熱素子のサイズが小さく発熱密度が大きいため、ベースプレートの温度分布が大きくなっている。このような単純な構成のヒートシンクでは、シミュレーションを用いずとも簡易熱計算ツールを利用して熱性能をある程度推定することが可能である⁴⁾。

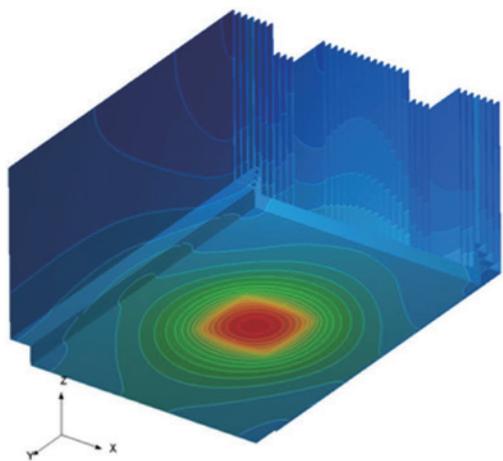


図5 シミュレーションで得られたヒートシンク温度分布の例 (ヒートパイプなし)
Example of the temperature distribution of a heat sink obtained by a simulation (without heat pipes).

これに対して図6に、ヒートパイプを使用したヒートシンクの解析事例を示す。この例では6本のヒートパイプが使用されており、中央に置かれる遠心ファンからの冷却風によりフィンから放熱する設計となっている。この例のように、複数の伝熱経路と複雑な冷却風の流を持つヒートシンクの熱性能を推定することは困難である。しかし、シミュレーションを利用して空気の流れの状態も含めて計算することで、熱抵抗を精度良く求めることが可能となる。現在では、ヒートパイプを利用した放熱デバイスにおいて、シミュレーションを用いた熱設計が欠かせないものとなっている。

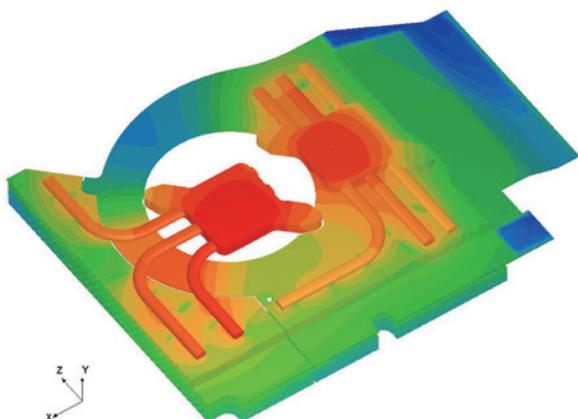


図6 シミュレーションで得られたヒートシンク温度分布の例 (ヒートパイプあり)
Example of the temperature distribution of a heat sink obtained by a simulation (with heat pipes).

3. 大型ヒートシンク解析での課題と解決方法

エネルギー分野や自動車分野向けの大型の放熱製品では、設計への熱シミュレーション技術の適用には難しさがあつた。その主な原因は、表2に示す3点にある。

表2 シミュレーションを行う上でのエネルギー分野向け大型ヒートシンクとエレクトロニクス向けヒートシンクとの違い
Differences between the large heat sinks in the energy field and the heat sinks in the electronics field in the performance of simulations.

製品の大きさ	エレクトロニクス向けは、比較的小型で典型的な大きさは100 mm程度であるのに対し、エネルギー分野向けは、大型で寸法は最大1000 mmに達するものもある。
空気の流れ	空気の流れは、小型ヒートシンクでは層流となるが、大型ヒートシンクでは乱流となる場合がある。
冷却条件	冷却条件は、小型ヒートシンクでは風量で規定される場合が多いが、大型ヒートシンクでは特定の場所の風速で規定される場合が多い。

第1の原因は、エレクトロニクス分野向けとエネルギー分野や自動車分野向けヒートシンク製品の、解析モデルとしての大きさの違いである。エレクトロニクス分野向け製品の代表的な寸法は、100 mm程度と小さいため1回の解析に要する時間が1～2時間程度と短く、比較的短時間で複数の構造案や設計パラメータを振った解析を繰り返して最適設計を見出すことができる。これに対して、大型ヒートシンクの一例である鉄道用パワーキッカーの場合には、一辺の寸法が1000 mm程度に達するものがある。このため、PC用ヒートシンクと同程度の精密さでメッシュ分割を行うと要素数は数千万に達するため、一回の解析に要する時間が数日程度になる場合があり、計算コストが大きい。計算時間が長く計算コストが大きくなると、シミュレーションを利用して設計最適化を行うメリットが得られにくくなる。

第2の原因は、フィン間の空気の流れの性状の違いである。エレクトロニクス向けのヒートシンクはフィン間が狭いため、空気の流れは層流になっている。それに対して、大型のヒートシンクでは一般的にフィン間隔が広く、フィン間風速が大きい場合にはレイノルズ数が数千程度に達して乱流になる場合もある。しかし、ヒートシンクのシミュレーションでは、一般的な乱流モデルが適用できるように要素分割を行うことが難しいという問題があつた。

そして、第3の原因は、ヒートシンクの熱設計仕様の違いである。一般的にエレクトロニクス分野向けヒートシンクは、風洞を利用して精度良く熱抵抗を実測することが可能なため、指定風量に対する熱抵抗として熱特性が定義される場合が多く、シミュレーション結果との定量的な評価が行いやすい。これに対し、大型ヒートシンクの場合は、寸法が大きいため風量を精密に制御した風洞を利用した実測評価が困難である。このため、熱評価で放熱部をダクトで覆って冷却風を流したときには、

フィン前面の特定の場所での風速と熱抵抗との関係により熱特性を規定することが多く、解析結果との定量的な比較が困難であるという問題があった。

まず、寸法が大きくメッシュ数が多くなる問題へ対応するため、解析モデル形状の簡略化を行った。いまでこそ、3次元CADで作成した設計図面をそのまま利用してシミュレーションを実施するのは当たり前であるが、計算機の能力が現在と比較にならないくらい低かった時代には、製品形状そのままで解析を実施することが困難で、解析モデル形状の簡略化は一般的に行われる手法であった。たとえば大型のヒートパイプ-ヒートシンクの場合、図7に示すようにパーリング加工したフィンにヒートパイプを圧入する方法でフィンを固定するのが一般的であるが、このフィンパーリングの形状をシミュレーションで再現するために細かな要素分割が必要で、解析モデル全体の要素数が大きくなる。そこで、パーリングを省略したフィンモデルを用いて解析を行い、ヒートパイプとフィンとの間の接触面積減少の影響に対しては、熱伝達係数で補正する方法などで、メッシュ数を削減した。

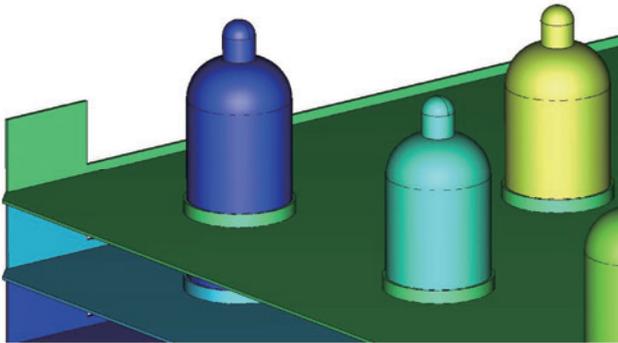


図7 ヒートパイプとフィンパーリングの模式図
Schematic of the heat pipe and the fin burring.

フィン間の流れのレイノルズ数が大きくなる課題への対応では、一般的な乱流モデルが適用しにくい場合に使用できるように提供されている低レイノルズ数型の乱流モデルを使用することとし、その際に発生しやすくなる“熱計算が不安定化する”という問題に関しては、ソフトウェアベンダーとも協議しながら対策を行った。そして、最終的には計算の不安定化を避けるための要素分割条件を確立し、標準化することで回避した。

また、実測結果と解析結果の定量的な比較が難しいという問題に関しては、実測評価状態をシミュレーションにより忠実に模擬するというスタンスで解析を行うこととした。その際に、シミュレーションでの境界条件として与える風速と規定点風速との間にずれが生じるが、一回の解析のなかでサイクルごとにユーザサブルーチンを用いて境界風速条件を制御し、最終的に規定点風速を指定値に収束させる方法を用いることで、規定点風速を合わせ込むための解析の繰り返しを避けるようにした。

図8に、これまでに紹介した手法を用いて鉄道車両用ヒートシンクの解析を行った結果と実測とを比較した事例を示す。この製品は、風速が小さい場合にはフィン間流れが乱流と層流の遷移領域に入るが、解析では流れを層流として扱うか乱流とし

て扱うかを選択しなければならず、実測結果との差が大きくなっている。しかしレイノルズ数が大きく完全な乱流状態になっていると推定される大風速領域では、熱抵抗の解析誤差は5%以内となっている。

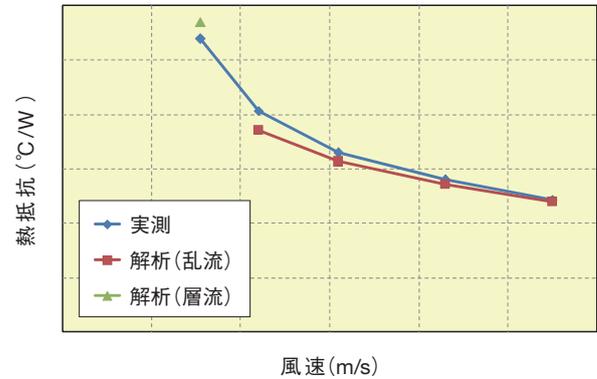


図8 鉄道車両用パワーキッカーの実測結果と解析結果の比較例
Example of the comparison between the measured value and the analysis value of the POWER KICKER for railway vehicles.

4. 鉄道用ヒートシンクにおける設計最適化事例

続いて、シミュレーションを利用してヒートシンク設計の最適化を行った実際の例を示す。図9は、パワーキッカーの初期試作品である。シミュレーションを利用してこの初期試作品の設計上の問題点を調査したところ、風下側のフィンピッチを小さくし放熱面積を大きくしているにもかかわらず、図10に示す解析結果のように、発熱素子の温度が風下側に行くほど高くなっていることが分かった。これはフィン間を流れる空気が風下へと移動するにつれ、フィンから放出される熱により次第に温度が上昇していくため、風下側のフィンからは放熱しにくくなり素子の温度が高くなってしまったためである。また、発熱素子とヒートシンクに搭載されているヒートパイプとの位置関係の影響で、一部のヒートシンクに熱負荷が集中する傾向も見られた。

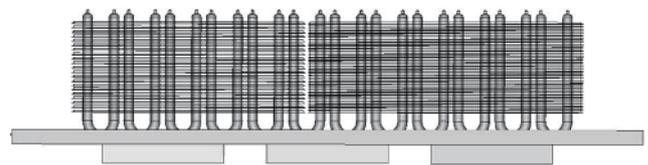


図9 鉄道用パワーキッカーの一次試作品
First trial design of the POWER KICKER for railways.

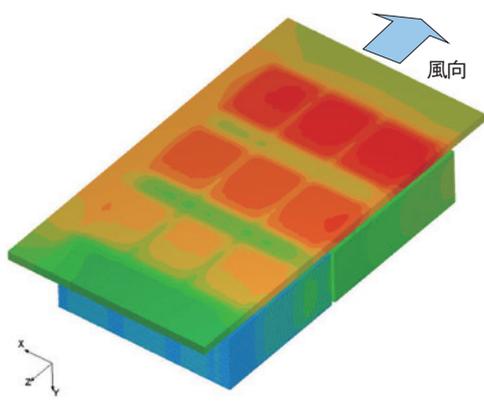


図10 鉄道車両用パワーキッカーの温度分布図(一次試作品)
Temperature distribution of the POWER KICKER for railway vehicles (first trial design).

そこで、風上-風下方向でのフィン分割方法と、それぞれのフィンピッチの比、そしてヒートパイプ配置の二つの設計要素について、シミュレーションにより最適化の検討を行った。その結果、フィン分割数を2から3に増やすことでヒートシンクの ΔT (温度上昇値)は小さくなることが分かった。また、隣り合うフィンピッチの比は2対1とした場合に空気の流れがスムーズになり、風下側の素子の ΔT が小さくなることが分かった。なお、ヒートパイプ配置についても検討を行ったが、配置の工夫を行うと設置できる本数が少なくなるため熱性能の向上にはつながらず、結果的に初期設計での配置を採用することになった。

図11に、最終設計品の構成を示す。フィンを空気の流れに沿って三分割し、風上側ではフィン間を広くし空気温度上昇を抑制することで、風下側のフィンからも効果的に放熱できるようにしている。図12に、最終設計品の解析結果を示す。このようにヒートシンクの ΔT を6℃低減させ、発熱素子の間の温度差を70%縮小することができた。

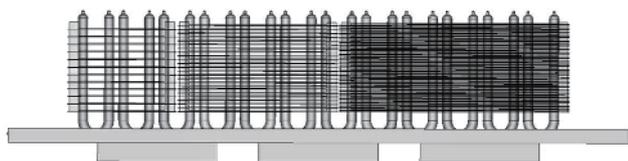


図11 鉄道用パワーキッカーの最終設計品
Final design of the POWER KICKER for railways.

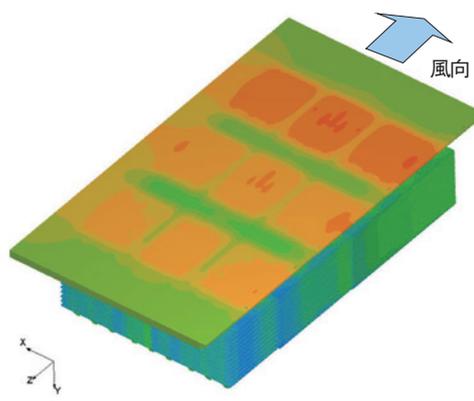


図12 鉄道車両用パワーキッカーの温度分布図(最終設計品)
Temperature distribution of the POWER KICKER for railway vehicles (final design).

鉄道用大型ヒートシンクの場合には、1回の試作評価を行うのに1~2か月を要するため、従来は時間的にも費用的にも十分な設計最適化を行うことが困難な場合が多かった。しかし、この製品に関しては、設計過程で約30通りのシミュレーションを実施することで、一次試作と最終試作の間に一回の試作を実施しただけで最終的に目標とする放熱性能を達成することができた。現在では、鉄道用大型ヒートシンクのシミュレーション手法は社内部的に標準化されており、ほぼすべての製品設計で利用されている。

5. 自動車用放熱デバイスのシミュレーション事例

自動車については、燃費向上のための駆動系の精密制御や居住快適性向上のため、エレクトロニクス化・コンピュータ化が急激に進んできており、ICなどの半導体素子が多数搭載されるようになってきている。またハイブリッド車(HEV)、電気自動車(EV)、燃料電池車(FCV)などでは、駆動系自体が電動化されている。エンジン車にはもともと水冷システムが搭載されているため、電源やECU(エレクトロニック・コントロール・ユニット)などの冷却が必要となった場合には、この水冷システムを利用して冷却するのが一般的であった。しかし、近年は自動車分野でも軽量でレイアウトの自由度が高い空冷の冷却技術が注目されるようになってきている。

図13に、ヒートパイプが適用されたジャンクションボックスの冷却装置を示す。この製品は、ジャンクションの熱をヒートパイプで集めてシャーシへ伝熱し、最終的に車体から外部へと放熱する設計となっている。このため、水冷システムや冷却ファンを使用せずに放熱することが可能となっている。

近年増加しているHEVやEVでは、大容量のバッテリーを搭載しているため、バッテリーパックの小型化やバッテリーの劣化を防ぐための冷却方法が課題となっている。

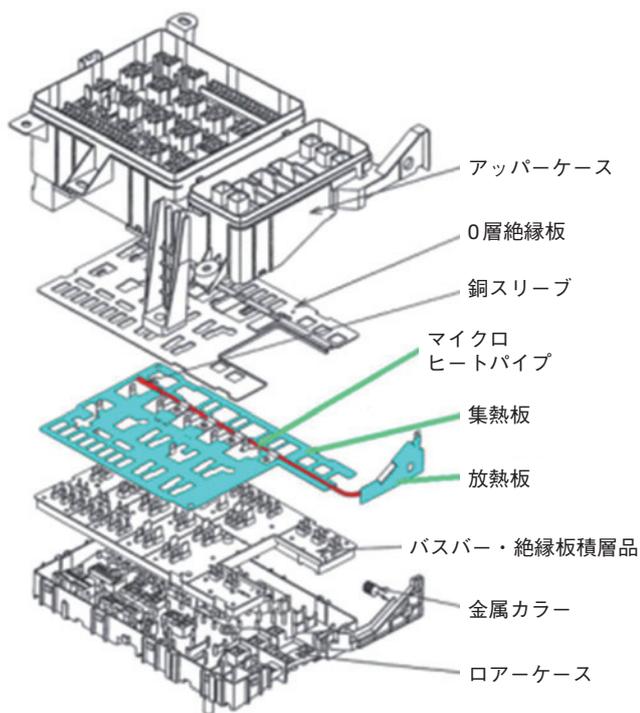


図13 ヒートパイプを使ったジャンクションボックス用放熱器
Heat-pipe-based heat sink for a junction box.

図14に、バッテリー冷却用ヒートシンクのシミュレーション事例を示す。ここでは、1台のヒートシンクでバッテリーセル4個を同時に冷却しており、ヒートパイプの熱輸送機能を利用して離れた場所にある放熱部へ熱を運び、空冷により放熱する方式となっている。本設計ではヒートパイプの均熱化効果によりセル間の温度のばらつきを小さくし、経時劣化速度のばらつきを小さくすることが可能となる。

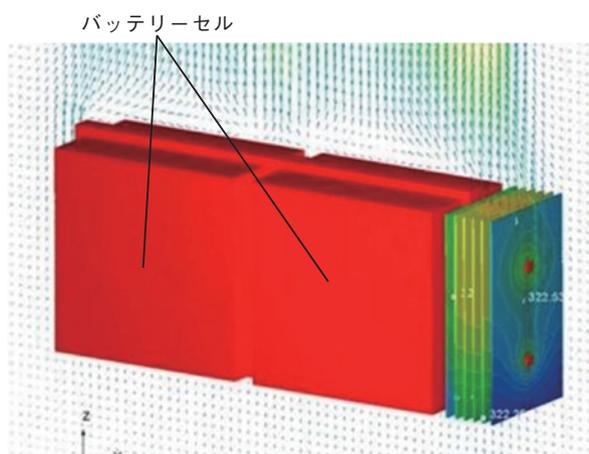


図14 バッテリー冷却用ヒートシンクの解析事例
Analysis example of the heat sink for the cooling of batteries.

更に、自動車の電動化に伴って、電車と同様にインバータやコンバータといった発熱量の大きな半導体の冷却方法も課題の一つとなっている。図15に示すのは、インバータ用ヒートシンクのシミュレーション事例である。インバータは自動車の走行状態の変化に伴い、発熱量が絶えず変化する。ここに示すヒートパイプ式シートシンクでは、受熱ブロックの熱容量を最適化することで、素子の発熱量変化に伴う急激な温度変化を抑制するとともに、熱容量が小さく応答性の速いヒートパイプによってフィンへと熱を伝え、速やかに放熱することが可能となっている。

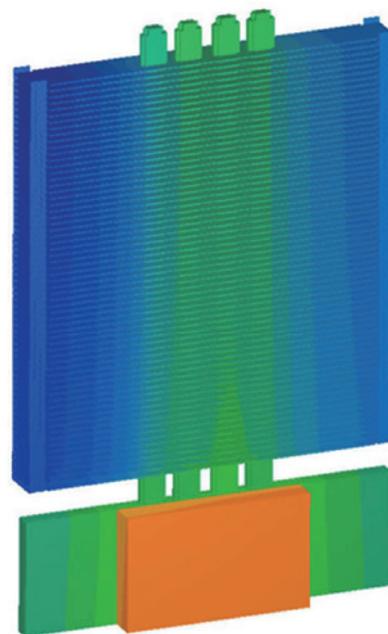


図15 インバータ用ヒートシンクの解析事例
Analysis example of the heat sink for inverters.

6. おわりに

本稿では、放熱製品設計に使用しているシミュレーション技術の、エレクトロニクス分野からエネルギー分野及び自動車分野への展開について紹介した。エネルギー分野及び自動車分野で使用される放熱製品は寸法が大きく、シミュレーションを行うにあたっては、寸法の大きさに起因するいくつかの課題があったが、解析方法の工夫によりエレクトロニクス向け小型ヒートシンクと同等に、誤差5%以内の解析精度を実現することができた。熱関連製品の設計・開発には、常にスピードが求められるため、今後ともニーズに応えられるように、シミュレーションを利用した試作回数の削減と設計効率化を進めていきたい。

また、熱シミュレーションソフトウェアは進化しており、便利な物理モデルが搭載されるとともにユーザーインターフェイスが改良され、製品設計者が道具として気軽に使用できるようになってきている。しかしながら、用途に応じて様々な乱流モデルが使い分けられているように、熱流体解析はシミュレーションの中でも比較的難しい分野であり、常に実測データと比較して精度を確認しながら使っていく必要がある。そのため、

今後も解析精度を向上させるための検討を進め、最終的にはあらゆる製品で解析精度5%以下を実現できるよう、シミュレーション技術の向上に努めていきたい。

参考文献

- 1) 国峯(監修)：最新熱設計手法と放熱対策技術，シーエムシー出版，(2011)。
- 2) 高橋 他：環境にやさしい縦型事例冷却器／ヒートパイプ式冷却器「パワーキッカー」，古河電工時報，No.115 (2005)，41。
- 3) 日本ヒートパイプ協会 編：実用ヒートパイプ，日刊工業新聞社，(2001)。
- 4) 木村 他：熱設計ソフトウェア「冷えろー®」，古河電工時報，No.115 (2005)，63。