

特集 | パワーコントロールユニット用両面積層冷却器の高性能化*

Development of High Performance Double-Sided Cooler for Power Control Unit

杉本 尚規 山中 章 大畑 創
 Naoki SUGIMOTO Akira YAMANAKA Hajime OHATA

A Double-Sided cooling Power Control Unit (PCU) has been released in the market in 2007. The PCU has extremely high output power and is installed in a limited small space in vehicles. The development of this new cooler has enabled the PCU to be commercialized because it effectively cools the heat from both sides of the PCU by using cooling liquid. Consequently, the development of the new cooler has made it possible to reduce the size of the PCU and to increase its heat-density. The cooling performance has been improved by +20% by using refined wavy fins that have good performance on cooling liquid with low Reynolds Number (low flow velocity). Additionally, the cost of the developed cooler has been reduced by using existing parts, excluding the wavy fins, to minimize investment.

1. はじめに

2007年に初めて市場投入された両面冷却方式のパワーコントロールユニット (PCU) は、従来の片面冷却方式に比べ冷却効率が2倍となるメリットがある (Fig. 1)。これを可能にしたのが、両面放熱パワー素子を挟み込み、積層方向両端から圧縮力を付与することで冷却面を両面から密着できるダイアフラム機能付き冷却器である (Fig. 2)。

冷却器は、タンク部にダイアフラム機能を持たせることでパワー素子間の接触熱抵抗を安定的に低減することができる (Fig. 3)。合せて密着力 (圧縮力) に耐えかつ高性能化のためチューブ内に2層構造のインナフィンを保有している (Fig. 4)。更に両面冷却構造を

積層化させることで、放熱パワー素子枚数バリエーションにも対応できる汎用構造となっている。

2007年に両面冷却化により大きく進化したPCUであるが、市場黎明期にあるハイブリッド車の展開拡大のためには、コンベ車に対して追加部品となるPCUの小型・低コスト化が常に求められる。そのためにはパワー素子の小型化、発熱密度の向上は不可避であり、それを冷却する冷却器の更なる高性能化が求められる。

そこで、短期的目標として製造設備技術・ノウハウ流用前提での高性能化を図るべく、従来との構成部品共通化・体格互換性を維持し、構成部品のインナフィン変更により高性能化を進めることとした。

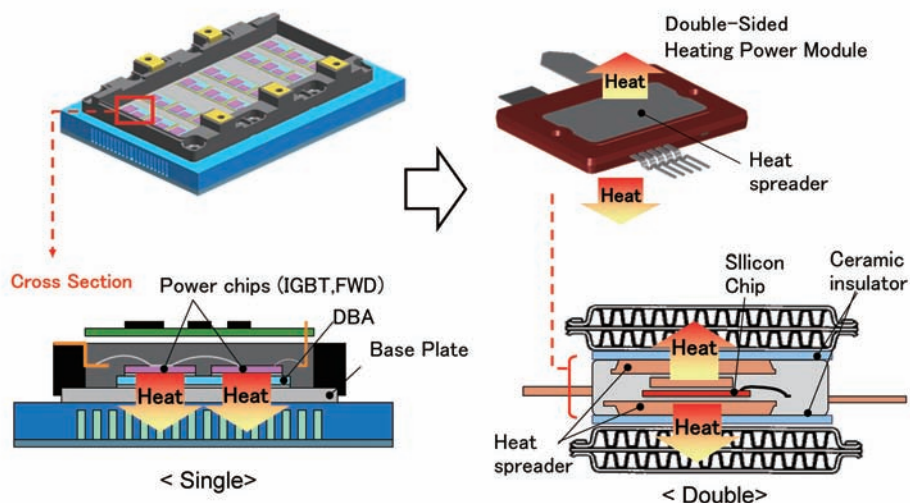


Fig. 1 Overview of Double-Sided cooling

*2011年8月31日 原稿受理

今回対象システムは、パワー素子水冷回路を独立して持ち（電動ウォーターポンプによる冷却水循環）かつ冷却器はインナフィンを内蔵した冷却チューブを複数持つ（積層構造）ことから冷却チューブ1本当りの流量が少ない事が特徴である。よって性能向上手段として直接的手法（インナフィン伝熱面積アップ）に加え、管内混合効果促進により素子近傍に低温の冷却水が供給できることを狙って微細ウェーブフィンを採用した。結果、加工限界・プレス成形量産性も考慮しつつ混合効果の高いウェーブ形状を創出し、冷却性能従来比+20%を満足できる冷却器を開発した。

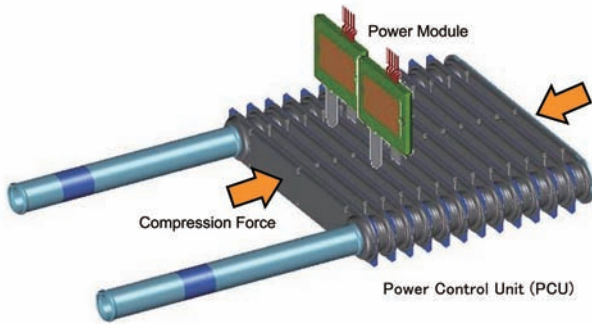


Fig. 2 Double-Sided Inverter-PCU cooler

2. 性能向上の考え方

従来のインナフィンはパワー素子配置にもたれFig. 4の構造を取っている。圧縮荷重に耐える剛性を確保しつつ高性能化（伝熱面積増並びにチューブを形成するプレートとの確実なろう付け保証）を図るため、プレートとの面接合実現可能なフィン山凹凸形状かつ流路微細化の2層式ストレートフィン構造となる。

冷却器は、標準パワー素子枚数が12×2枚であることから13段の積層構造となるため、循環流量（12L/min）に対するチューブ流量は平均0.92L/min（7.7%）、段数毎の流量分配（Fig. 5）を考慮すると両面冷却チューブMIN流量は0.58L/min（4.8%）と超微小流量となる。

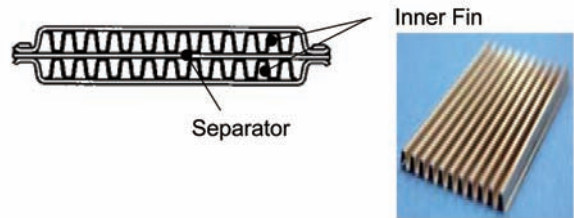


Fig. 4 Cross section of tube

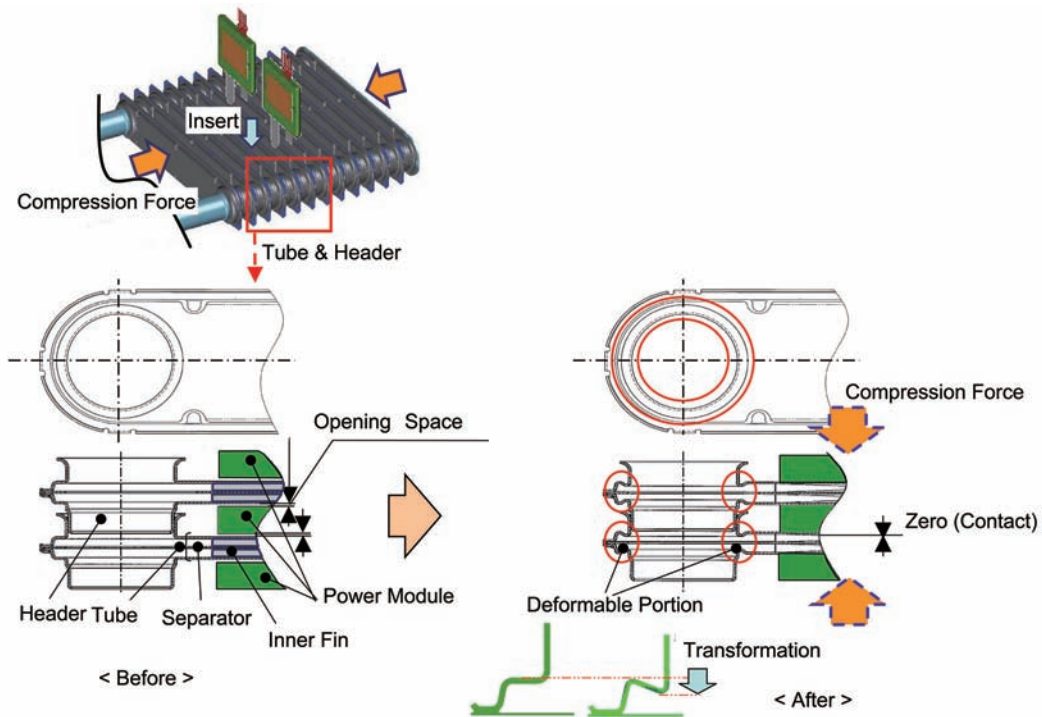


Fig. 3 Deformation of header

性能向上のためにまずは伝熱面積をアップできるフィン形状を考えるものの、更なる向上手段については、今回のようなレイノルズ数<500の層流域では、例えばフィン形状のオフセット化、ピン形状、フィン表面へのディンプル配置等、一般的な乱流促進技術での高性能化が望めない。

そこでチューブ表面近傍程管内水温が高い事に着目し、フィン形状をウェーブ化し冷却水を強制的に上下左右に動かすことで素子冷却を促進（混合効果）できないかと考えた（Fig. 6）。即ちウェーブ構造であれば

水が左右に動くことは想像できるが、更にフィン山形状に着目し、ウェーブ流れとの複合からフィン山角度 δ が上下方向流れを生むのではないかと考えた。これは主流流れを左右に大きく動かす事で、より効果が大きくなると想定される。そこでウェーブ角度 θ 及び曲げ R を小さく、深さ D を大きくとるべくフィン成型性（材料伸び）にも着目しつつ本メカニズムを達成しうるフィン諸元を開発した。

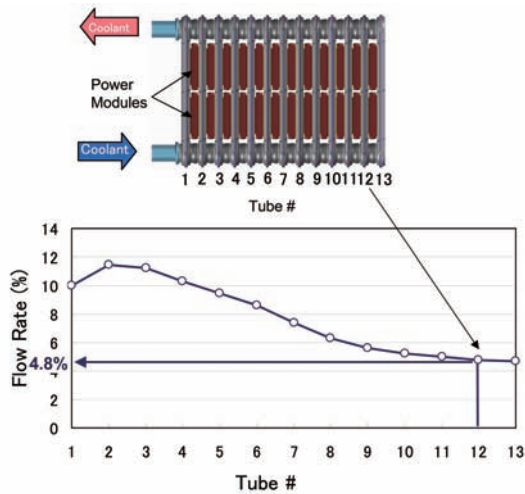


Fig. 5 Characteristics of coolant flow rate by tube position

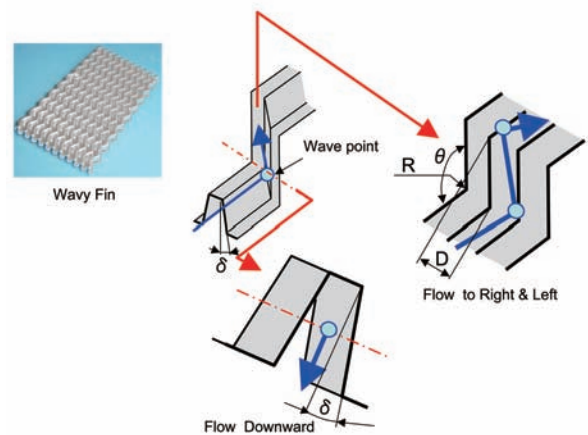


Fig. 6 Mixed image of fin structure at planning phase

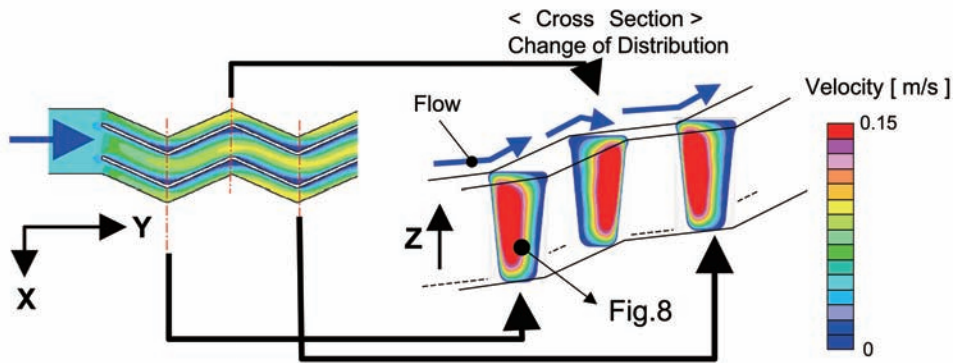


Fig. 7 Velocity distribution of coolant in fin (Simulation)

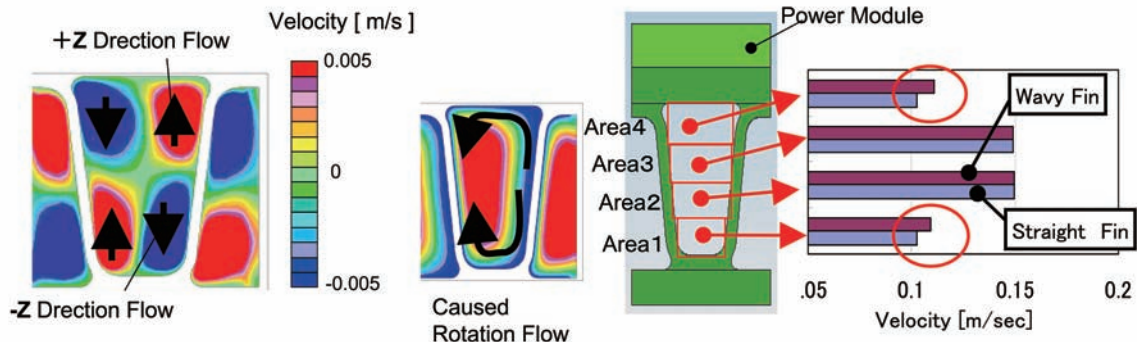


Fig. 8 Velocity distribution of coolant in fin (Z-Direction)

Fig. 9 Average velocity at each area of fin

3. ウェーブフィンによる攪拌効果と性能向上効果検証

Fig. 7にウェーブフィン管内流れ流速分布図を示す。ここからZ方向の速度分布のみ切り出したのがFig. 8, ストレートフィンとの管内流速分布差を示したのがFig. 9である。Z方向成分は主流最大流速の3%程度であるものの流路断面を4分割した場合、それぞれが異なる方向（回転方向）の流れを持っている事が分かる。即ちウェーブ曲げ部分の境界層近傍にて熱源（パワー素子）から遠い冷水と熱源近傍（チューブ接触面付近）の温水が循環される上下左右回転流れが生じ、ストレートフィンより熱源近傍管内流速がアップしている（混合促進効果あり）。その結果、Fig. 10, 11に示すようにストレートフィンに対し管内水温低減効果（混合促進効果）が得られる事で+10%以上の性能向上効果が得られる。

更にストレート→ウェーブフィン化による伝熱面積

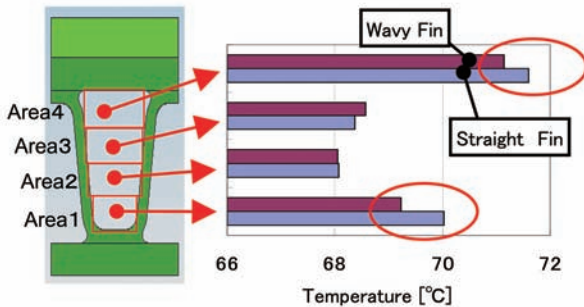


Fig. 10 Average temperature at each area

増分+10%と合すれば20%以上性能向上が見込める。

これを実機評価確認（熱抵抗評価）したのが、Fig. 12である。管内流速が少ない程混合効果が小さくなるため効果は目減りするものの、MIN流量（0.58L/min）において性能（ α_F ）20%以上のアップを確認できた。

4. おわりに

微小流量域での性能向上の切り口として「混合効果」に着目し、インナフィンのみの小変更にて冷却器性能を20%向上させることができた。その結果この冷却器を採用したパワーコントロールユニットは2011年にカムリハイブリッドに搭載された。

今後も更なる小型低コスト化ニーズに答えるべく、冷却器自身の小型化、フィン構造変更による高性能化を追求していく。

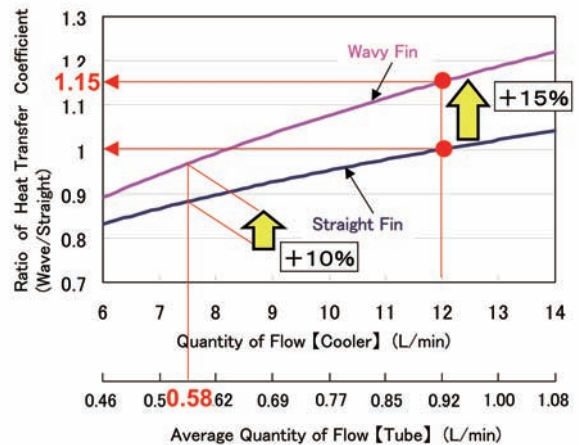


Fig. 11 Effect of coolant circulation mixture

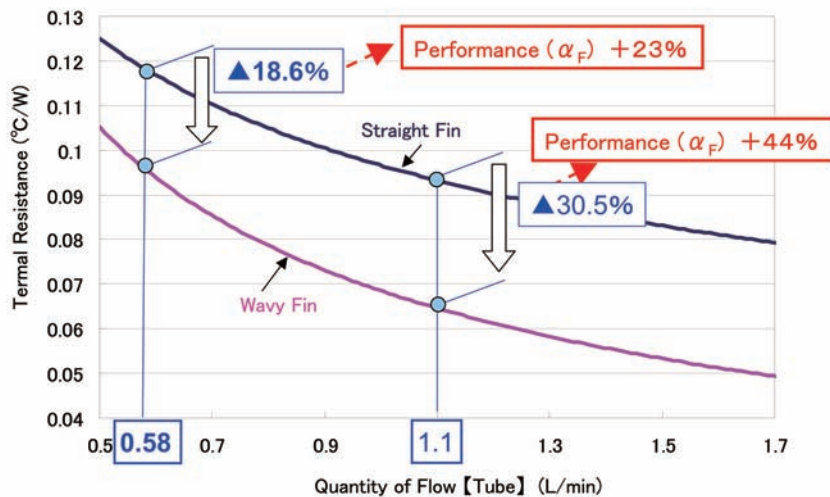
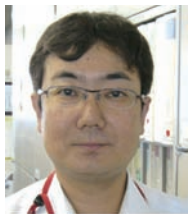
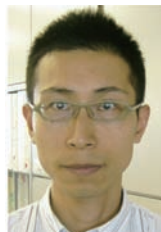


Fig. 12 Verification test results

<著 者>



杉本 尚規
(すぎもと なおき)
熱交換器開発部
熱交換器の開発・設計に従事



大畑 創
(おおはた はじめ)
熱交換器開発部
熱交換器の開発・設計に従事



山中 章
(やまなか あきら)
熱交換器開発部
熱交換器の開発・設計に従事