

篠崎 健*
浅井勇吾*
牛房裕之**

沸騰現象を利用した電子機器冷却技術

Cooling Techniques of Electronic Devices with Boiling Phenomenon

Masaru Shinozaki, Yugo Asai, Hiroyuki Ushifusa

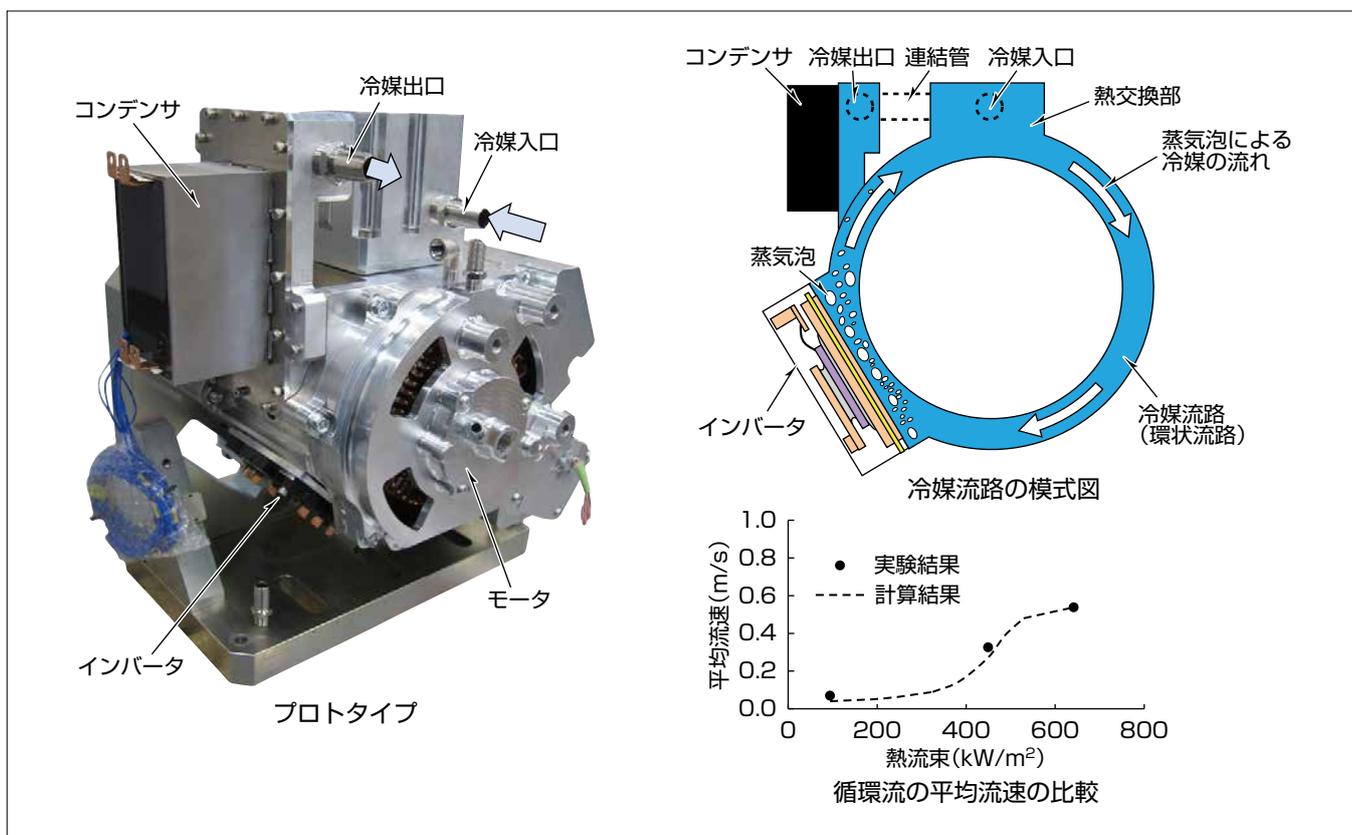
要旨

近年、環境保護の観点から電機機器の省エネルギー化を目的としたインバータ駆動化が進んでいる。特にパワー半導体が組み込まれたインバータは、電鉄、車載、家庭電器などのキーデバイスに位置付けられている。さらに、機器の小型化が図られる中で、インバータの小型高密度実装化によって、設置面積当たりの発熱量である発熱密度が増大し、高効率な冷却方式の開発が必要不可欠になってきている。

インバータの冷却方式には、一般的にファンの送風で冷却する空冷方式と、水などの冷媒をポンプによって循環させて冷却する水冷方式がある。さらに、沸騰や凝縮などの相変化による冷媒の潜熱を利用した冷却方式が注目されて

いる。今回は、沸騰現象を利用した冷却方式に着目し、基礎性能評価装置によって沸騰冷却の特徴を把握するとともに、車載用インバータ冷却装置のプロトタイプを製作して性能評価を実施した。沸騰によって発生した蒸気泡の気泡ポンプ効果による循環流を利用して、冷媒が伝熱面に常時供給され、安定して沸騰が起こるような冷媒流路を構成したことで、インバータを効率良く冷却することを実現した。また、気泡ポンプ効果による循環流の流速を予測する数値シミュレーションを構築し、実験結果とよく一致することを確認した。

今後、基礎性能評価装置や数値シミュレーションを活用することで、沸騰冷却技術を各種電子機器へ展開していく。



沸騰冷却を適用したインバーター体形モータのプロトタイプ

モータの外周に設置した冷媒流路にインバータを取り付けることで一体化したプロトタイプを示している。発熱密度の大きいインバータが動作すると、インバータの伝熱面が沸騰して蒸気泡が発生する。発生した蒸気泡による気泡ポンプ効果で冷媒流路内に循環流が発生し、安定して沸騰冷却を利用することができる。構築した数値シミュレーションによって、循環流の流速を精度良く予測できることを確認した。

1. ま え が き

近年、環境保護の観点から電機機器の省エネルギー化を目的としたインバータ駆動化が進んでいる。特にパワー半導体が組み込まれたインバータは、電鉄、車載、家庭電器などのキーデバイスに位置付けられている。さらに、機器の小型化が図られる中で、インバータの小型高密度実装化によって、設置面積当たりの発熱量である発熱密度が増大し、高効率な冷却方式の開発が必要不可欠になってきている。

インバータの冷却方式には、一般的にファンの送風で冷却する空冷方式と、水などの冷媒をポンプによって循環させて冷却する水冷方式がある。さらに、沸騰や凝縮などの相変化による冷媒の潜熱を利用した冷却方式が注目されている。空冷方式や水冷方式は顕熱を利用した冷却方式であり、流体である空気や冷媒の温度上昇分が熱の移動量に相当する。このため、冷却能力を高性能化するためには、ファンやポンプで送り出す風量や冷媒量を増加させる必要があり、消費電力増加又は機器の大型化といった課題が発生する。一方、相変化冷却方式は、沸騰で発生する蒸気泡の気泡ポンプ効果を冷媒循環の駆動力として利用できれば、ポンプによる課題を解消することができる。

本稿では、相変化冷却方式の一つである沸騰冷却技術をインバータ冷却に適用することを目指して実施した、基礎性能評価及びプロトタイプによる評価結果について述べる。

2. 沸騰冷却技術

三菱電機では、沸騰冷却技術の基礎性能を評価するための試験装置を製作し、現象の可視化及び高性能化に向けた開発を行っている⁽¹⁾⁽²⁾。ここでは、基礎性能評価試験の結果を使って沸騰冷却技術の特徴について述べる。

図1は、沸騰冷却の性能を示す沸騰曲線である。縦軸は沸騰面の過熱度(沸騰面温度と冷媒の沸点の温度差)、横軸

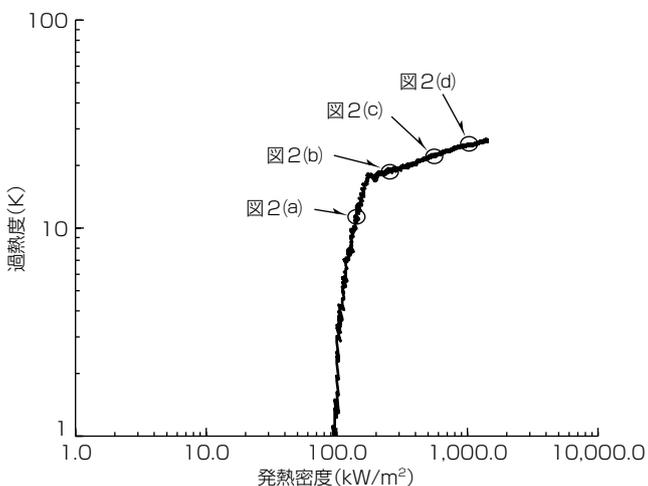


図1. 沸騰曲線

は熱流束(発熱密度)を示している。冷媒に熱流束を与えると、伝熱面は自然対流によって冷却される(図2(a))。自然対流による放熱量は小さいため、熱流束に対して過熱度が大きく上昇する。冷媒の温度が上昇して部分的に沸点に到達すると、伝熱面上から蒸気泡が発生し始め(図2(b))、沸



(a) 自然対流による伝熱面の冷却



(b) 伝熱面上からの蒸気泡発生



(c) 蒸気泡の数の増加



(d) 蒸気泡の合体と上昇

図2. 沸騰様相

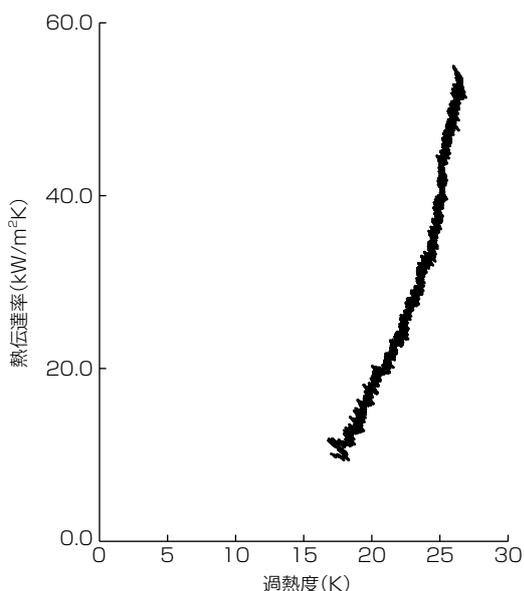


図3. 沸騰時の熱伝達率の推移

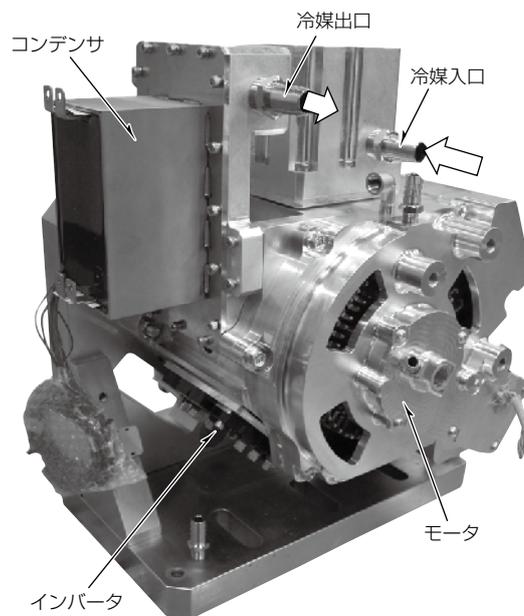


図4. プロトタイプ

騰曲線の傾きが変化する。さらに熱流束を与えると発生する蒸気泡の数が増加していき(図2(c)), 沸騰が激しくなると発生した蒸気泡が合体しながら上昇していく(図2(d))。さらに熱流束を与え続けると、限界熱流束(Critical Heat Flux: CHF)と呼ばれる限界点に到達し、その後は蒸気泡が伝熱面全体を覆ってしまい伝熱面に冷媒が接触できなくなる。その結果、急激に過熱度が上昇し、効果的な冷却ができずに熱暴走してしまう。蒸気泡が安定して発生している間は、熱流束を大きくしても過熱度の変化は小さい。つまり、従来の冷却方式では、風量や冷媒量が一定ならば熱伝達率が一定であるのに対して、沸騰冷却は蒸気泡の発生によって熱伝達率が上昇し、冷却性能が増加していく(図3)。つまり、過熱度の上昇に伴って熱伝達率が直線的に上昇する。

この現象を利用すれば、インバータを効率良く冷却できるだけでなく、動作条件によって発熱量が変化しても、伝熱面の温度があまり変化しないという効果も得ることができる。

3. 沸騰冷却技術を適用したプロトタイプ評価

3.1 プロトタイプの構成

沸騰冷却技術の冷却性能を確認するため、車載用インバータ冷却装置のプロトタイプを製作して性能評価試験を実施した。プロトタイプを図4に示す。プロトタイプは、モータ、インバータ、コンデンサ及び冷媒流路で構成されており、冷媒流路はモータ外周とインバータに接触している。冷媒流路内の模式図を図5に示す。外部から供給される冷媒は、冷媒入口から流入し、連結管を経由してコンデンサ用冷却器を通り、冷媒出口から排出されるU字流れを基本としている。このU字流れの下部に、モータ外周に図

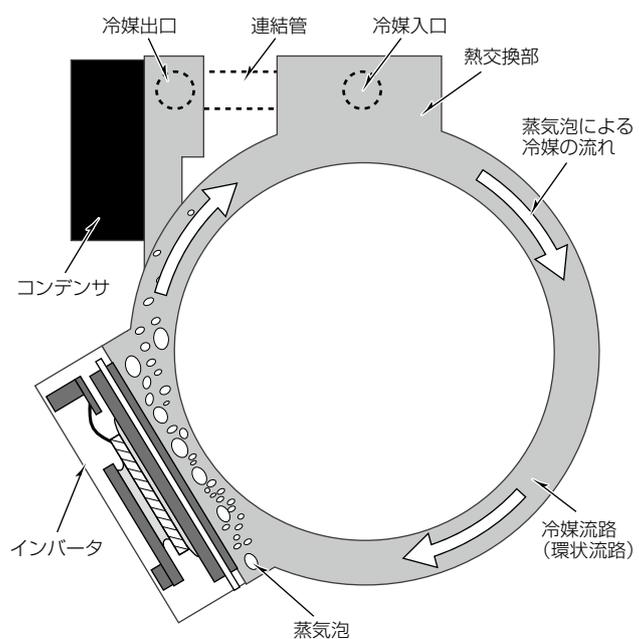


図5. 冷媒流路内の模式図

のような冷媒流路(環状流路)を設け、熱交換部と連結させる。環状流路は冷媒で満たされているだけで、ポンプによる流れの影響を受けない流路となっている。この流路壁面の一部をインバータの伝熱面で構成し、インバータの伝熱面を冷媒と接触させる。これによって、インバータが動作して発熱すると、伝熱面が沸騰して蒸気泡が発生する。発生した蒸気泡の気泡ポンプ効果によって生じた流れが駆動力となって、図中矢印で示す冷媒の流れが生じる。上昇した蒸気泡は熱交換部で冷媒と熱交換することで凝縮して液に戻るため、外部流路へ流出することはない。この現象が繰り返されることで、安定した沸騰冷却を実現できる。

表 1. 実験条件

液温	80℃
雰囲気温度	20℃
冷媒流量	10L/min
電流	10~120Arms
電圧	300V
トルク	0~85N・m
回転数	1,000~3,000rpm

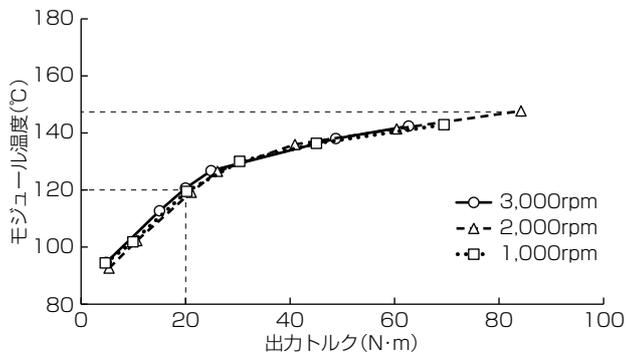


図 6. モジュール温度測定結果

3.2 評価試験結果

表 1 に実験条件を示す。冷媒流量は一定とし、冷媒には蒸留水を使用した。

図 6 に、出力トルクを変化させたときのモジュール温度測定結果を示す。縦軸のモジュール温度は、インバータに搭載されている SiC(シリコンカーバイド)チップ近くに設置された温度センサの温度を表す。トルクを増加させるためにインバータの電流を増加していくと、発熱量が増加するためモジュール温度が上昇する。出力トルク 20N・m、モジュール温度 120℃ 近傍で温度上昇の傾きが変化している。このとき、インバータの伝熱面からは蒸気泡が発生しており、自然対流による冷却から沸騰による冷却に移行したことを目視によって確認した。沸騰冷却が開始するとモジュール温度上昇は緩やかになり、出力トルクを約 4 倍(発熱量を 380W から 750W)に増加させても、モジュール温度上昇を約 23K に抑制できた。発熱量の増加に対してモジュール温度の上昇を抑制できることから、沸騰冷却が効果的な冷却方式の一つであることが分かる。

3.3 数値シミュレーション結果

蒸気泡の気泡ポンプ効果による循環流速を予測するため、低サブクール沸騰領域に用いられる Ahmad の Profile-Fit 法⁽³⁾を参考にして数値シミュレーションを実施した。シミュレーションに際し、簡単化のため以下の条件を仮定した。①蒸気泡の浮力と摩擦損失だけを考慮、②加熱部の曲率は考慮せず鉛直流路、③発生した蒸気泡は熱交換部に到達するまで凝縮しない。

図 7 に、気泡ポンプ効果によって生じた冷媒流路内の循

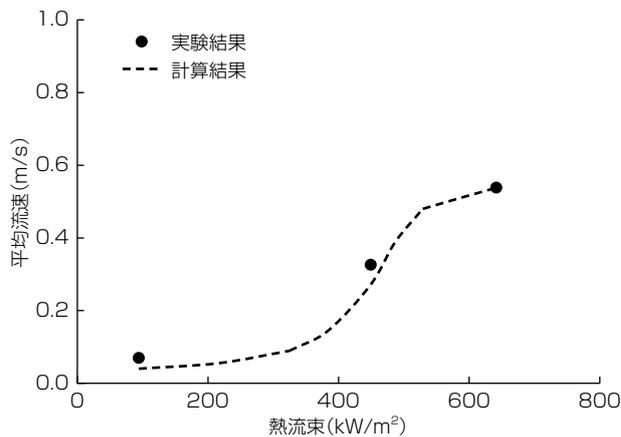


図 7. 循環流の平均流速の比較

環流の平均流速について実験結果と数値シミュレーション結果の比較を示す。計算結果の方がやや平均流速を低めに見積もっているが、全体的によく一致することが確認された。熱流束を大きくしていくことで自然対流から沸騰に変化し、蒸気泡による気泡ポンプ効果が生じ、循環流速が急激に増加する現象を表現できていると考えている。

この結果から、作成した数値シミュレーションを冷媒流路の設計に適用できるめどが得られたと考える。

4. む す び

相変化冷却方式の一つである沸騰冷却技術を車載用インバータ冷却へ適用することを目指し、基礎性能評価及びプロトタイプによる評価を行った。基礎性能評価で沸騰冷却の有効性を確認した。さらに、プロトタイプの製作・評価によって、沸騰によって発生した蒸気泡の気泡ポンプ効果による循環流を利用して効率的な冷却効果を実証するとともに、循環流速を予測する数値シミュレーションを開発した。

今後、基礎性能評価装置や数値シミュレーションを活用することで、沸騰冷却技術を各種電子機器へ展開していく。

参 考 文 献

- (1) 篠崎 健, ほか: 二液混合流体における沸騰熱伝達, 第53回日本伝熱シンポジウム講演論文集, J111 (2016)
- (2) 篠崎 健, ほか: 二液混合流体の沸騰における伝熱面堆積物の影響評価, 第54回日本伝熱シンポジウム講演論文集, C114 (2017)
- (3) Ahmad, S. Y.: Axial distribution of bulk temperature and void fraction in a heated channel with inlet subcooling, Trans. ASME, Ser. C, J. Heat Transfer, 92, No.4, 595~609 (1970)