

## 論文審査の結果の要旨

氏名：藤本 貴行

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：電子機器冷却用サーモサイフオンの伝熱特性に関する研究

審査委員：（主査） 教授 松島 均

（副査） 教授 野村 浩司 教授 山崎 博司

サーモサイフオンは CPU などの発熱素子の熱を集約してファンにて一括冷却することが可能であることから、これまでサーバ冷却用に銅製のサーモサイフオンが製品適用されてきた。また、サーモサイフオンでは、受熱部の沸騰伝熱面の表面形状を適正化することで伝熱面過熱度を小さくすることにより、CPU をより低い動作温度で安定稼働させることが可能である。

しかし、これまではコストや設置スペースなどの観点からその活用シーンは限定的であった。価格や重量差から銅材からアルミ材への置き換えが多方面で活発化している状況にある中、コストや軽量化の点で優位であり、かつ沸騰伝熱性能に優れたアルミ製のサーモサイフオンを考案することは工業的に有意義である。また、電子機器の高密度化に加え、近年ではより過酷な高温環境で機器が安定的に動作することが求められることも少なくない。しかし、これまで高温環境でのサーモサイフオンの動作限界について検証された例はない。

本研究は、電子機器の冷却向けにサーモサイフオンを広く活用すべく、冷却スペースが十分でない機器の冷却に適した低背型のアルミ製サーモサイフオンを新規に考案し、高性能化の鍵であるサイフオン受熱部の沸騰伝熱性能を向上させると共に、高温環境でのアルミサーモサイフオンの適用可能性について検証することを目的とする。

核沸騰の熱伝達性能は、冷媒の物性、伝熱面の表面性状、熱流束等に加えて、伝熱面上の気泡発生点の数密度の影響を強く受けることが知られている。発泡点数密度は与えられた面積の伝熱面上で気泡が発生する確率であり、電子機器の CPU 冷却のように伝熱面積が比較的小さい場合は、特に発泡確率が沸騰冷却性能に大きく影響を及ぼす。伝熱面の表面に発泡を促す方法として、伝熱面上に微細構造を設ける方法が知られている。本研究において試作をしたアルミサーモサイフオンの沸騰伝熱面は、アルミニウム合金基材の切り起こし加工によるスカイプフィンをベースとした機械加工面であり、伝熱面の表皮下に連続した空洞（孔）を多数有する微細多孔構造が形成されている。また、冷媒に純水を使用すると、アルミを侵して非凝縮性の水素ガスを発生させることで凝縮伝熱性能が劣化する可能性があることから、加圧系の低沸点冷媒であるフッ素系不活性冷媒の中から、蒸発潜熱、比熱、熱伝導率が比較的大きく、かつ水の溶解度が少ない HFE 7000 を採用した。そして、微細多孔構造を有するアルミニウム伝熱面の沸騰伝熱促進効果について実験的に検討を行った。また、発泡点の数密度に基づく沸騰伝熱性能の予測についてこれまで提案されている予測式を元に検討を行った。さらに、試作したアルミ製サーモサイフオンの基本性能と実機への適用に関する検討を行った。

本論文は全7章から構成されており、各章の概要は以下の通りである。

第1章は序論であり、本研究の背景、従来研究、研究の目的について述べている。

第2章では、アルミ製サーモサイフオンの基本仕様および冷媒の選定、サイフオン主要要素である沸騰伝熱面の形状について述べている。

第3章では、アルミ平滑面上のフッ素系冷媒のプール核沸騰伝熱性能について、特に飽和蒸気圧の影響について述べている。

第4章では、機械加工による微細多孔形状を有するアルミ伝熱面の沸騰伝熱促進効果について、特に微細孔数による影響に着目して述べている。

第5章では、第4章で述べたアルミ沸騰促進面を有するサーモサイフオンの伝熱性能について、特に高温環境下における沸騰伝熱性能、ならびにアルミ腐食性について述べ、アルミサーモサイフオンの動作限界温度について述べている。

第6章では、アルミサーモサイフオンの適用例として、発熱素子が混載した高発熱回路基板のサイフオンによる冷却実現性について述べている。

第7章は結論であり、本研究の成果を総括している。

以上のように本論文は、スカイプフィン加工技術に基づく微細多孔構造を使用することにより、量産性に優れた高性能沸騰伝熱面を考案し、CPU冷却に有利な低沸点フッ素系不活性冷媒 HFE 7000 中における沸騰伝熱性能の促進効果について明らかにした。さらに、高密度実装された電子機器への適用を想定した低背型アルミサーモサイフォンを考案および試作し、広い温度範囲で安定であり高温環境下で使用される電子機器へも適用可能であることを明らかにした。これにより、従来の銅製サーモサイフォンに比べて、軽量化およびコストの両面で有利なアルミ製サーモサイフォンを実現可能とした。また、これらの知見は汎用性があり他の産業機器へも展開可能で、工業的有用性や産業社会への貢献性が高い。このため、この成果は、生産工学、特に熱・流体工学に大きく寄与するものと評価できる。

よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

令和 3年 3月 4日