

論文の内容の要旨

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

サーモサイフオンは CPU など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、これまでにサーバ冷却用に銅製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。

しかしながら、これまではコストや設置スペースなどの観点で、活用シーンは限定的であった。よって、価格や重量差から銅材からアルミ材への置き換えが多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、且つ、沸騰伝熱性能に優れるアルミ製のサーモサイフオンを考案することは、工業的に意義のあることと考える。

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。しかしながら、これまでに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した例は無い。

そこで、本研究では、電子機器の冷却向けにサーモサイフオンが広く活用されるべく、冷却スペースが十分に無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実験的に検証することを主たる目的とする。

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と捉えることができ、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。従来より、伝熱面の表面に発泡を促す微細構造を設ける方法が検討されている。

そこで、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には、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を採用し、伝熱面の表皮下に連続した空洞（トンネル）があり、トンネルと伝熱面外の冷媒を連通させる孔が多数設けられた微細多孔構造（リエントラントキャビティ）を形成した。

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 HFE（ハイドロフルオロエーテル）の中から、比較的に蒸発潜熱、比熱、熱伝導率が大きく、また、水の溶解度が少ない HFE-7000 を採用した。

微細多孔構造を有するアルミニウム伝熱面（以下、微細多孔面と称す）上の HFE-7000 の沸騰伝熱促進効果について、実験的に検証および考察を行った。特に、微細孔の数密度および飽和蒸気圧が沸騰伝熱性能に及ぼす影響について、アルミ平滑面と比較検証をした。受熱量は CPU 冷却を想定して最大で 100W（伝熱面積 9cm^2 、熱流束 $11\text{W}/\text{cm}^2$ ）とし、微細孔の数密度を $467[1/\text{cm}^2] \sim 1250[1/\text{cm}^2]$ までの 5 種、飽和蒸気圧を大気圧、 0.14MPa 、 0.18MPa の 3 種とした。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、中山らにより提案されている予測式（Nakayama et al., 1980）を元に検討を行った。

以下に主要な結論を示す。

- (1) 平滑面では、飽和蒸気圧の上昇に伴い、同一熱流束を伝えるのに要する伝熱面過熱度は低減し、沸騰伝熱性能は向上する。また、熱流束が高くなるほど、熱伝達係数は大きくなる。
- (2) 微細多孔面では、平滑面と比べて全熱流束域で伝熱面過熱度が低下し、沸騰伝熱性能は向上する。気泡が伝熱面の空洞（トンネル）内に保持されて気泡の離脱が安定化し、発泡点数が増加したためであると考えられる。伝熱促進効果が最も大きかったのは、孔密度 $833[1/\text{cm}^2]$ （飽和蒸気圧 0.14MPa ）

であり、熱伝達係数は $100\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 以上に達する。

- (3) 孔密度 $467[1/\text{cm}^2]$ および $625[1/\text{cm}^2]$ では、熱流束 $3\text{W}/\text{cm}^2$ を超えた領域においては、平滑面と同様に飽和蒸気圧の上昇に伴い伝熱面過熱度が低減するが、 $2\text{W}/\text{cm}^2$ 以下の熱流束が低い領域では、飽和蒸気圧 0.18MPa にて傾向は逆転し過熱度が增大する。微細多孔面は平滑面と比べて、発生気泡数が明らかに多いことから、空洞内から気泡が離脱する際の気泡同志の干渉が、特に低熱流束域で蒸気圧 0.18MPa では大きく影響したものと考えられる。
- (4) 孔密度 $833, 933, 1250[1/\text{cm}^2]$ では、伝熱面過熱度はさらに低減し、平滑面よりも気泡径が小さく気泡の数も多い。飽和蒸気圧の影響については、蒸気圧 0.14MPa は大気圧よりも過熱度が低減するが、 0.18MPa では孔密度 $833[1/\text{cm}^2]$ および $1250[1/\text{cm}^2]$ において過熱度が增大し、特に孔密度 $1250[1/\text{cm}^2]$ では実験を行う毎に過熱度が大きくばらつく。離脱後の気泡同志の干渉による影響が、より顕著になったためであると考えられる。発泡点数が増加したことによる伝熱促進効果と、離脱気泡の相互干渉による影響により、孔数および孔サイズには最適な範囲がある。
- (5) 沸騰曲線は累乗近似式により整理されることが知られているが、近似式における係数 C 値および m 値は、孔密度 $833, 933, 1250[1/\text{cm}^2]$ では C 値が大きく、 m 値が小さくなる。孔数が多くなると、沸騰曲線の勾配が緩やかになり、低熱流束域においても高い熱伝達性能を有する。
- (6) アルミニウム平滑面および微細多孔面（孔密度 $625[1/\text{cm}^2]$ ）を対象に、中山らにより提案されている予測式を元に、伝熱面過熱度の予測式の検討を行った結果、低熱流束領域にて多少誤差が大きいものの、検討した予測式により概ね誤差範囲 20% 以内で予測することができる。

また、受熱部の沸騰伝熱面に上述の微細多孔構造（孔密度 $625[1/\text{cm}^2]$ ）を有するアルミサーモサイフォンを試作し、HFE-7000 を用いて 100°C 環境を上限に 100W 受熱時の動作検証実験を行い、高温環境でのアルミサーモサイフォンの適用可能性について検証を行った。アルミとフッ素系冷媒 HFE-7000 の共存環境においては、冷媒中の溶存水分と冷媒が加水分解反応を起こすことにより生成されるフッ素イオンにより、アルミ表面に局部腐食（孔食）が生じる可能性が考えられる。そこで、HFE-7000 とアルミニウム合金の共存環境における長期信頼性を検証するため、高温環境（ 50°C 、 100°C 、 150°C ）におけるエージング加速試験を行い、冷媒の加水分解性およびアルミ腐食性について検討を行った。

以下に主要な結論を示す。

- (7) サイフォン受熱部への入熱の直後には、伝熱面温度の過度的な上昇（オーバーシュート）が生ずるも、環境温度 100°C に至るまで概ね伝熱面温度は安定的に維持される。また、動作中のサイフォンの内圧は HFE-7000 の飽和蒸気圧とほぼ等しく、室温から 100°C 環境までの全域に渡り、沸騰および凝縮の相変化が安定して維持される。
- (8) 入熱直後のオーバーシュートについては、本冷媒の濡れ性が比較的高いため、伝熱面の微小キャビティ内を濡らしてしまい、沸騰開始が遅れたことが主要因であると考えられる。一度、飽和核沸騰が開始するとキャビティ内の気泡核が十分に形成されるため、以降オーバーシュートは発生しない。
- (9) 環境温度の上昇に伴い飽和蒸気圧が高くなり、沸騰伝熱が促進されるために受熱部の熱抵抗は減少する。しかしながら、環境温度 60°C 付近でサイフォン内圧の増大に伴う受熱部の塑性変形のため、熱抵抗が増大に転じる。塑性変形が生じない環境温度域（ 54°C 以下）では、環境温度の上昇に伴い熱伝達係数が上昇し、清浄な平滑面（Kutateladze の式）の約 7 倍に到達する。
- (10) 環境温度の上昇に伴い（ $50^\circ\text{C} \sim 150^\circ\text{C}$ ）、HFE-7000 と溶存水分の加水分解反応が促進されることにより、フッ素イオンの生成速度が上昇する。
- (11) アルミ表面に吸着するフッ素成分は、 100°C および 150°C 環境では微量ながらも検知されるが、 50°C 環境においては検知されない。
- (12) フッ素イオン生成速度から、サーモサイフォンが搭載される電子機器が仮に環境温度 50°C で 10 年稼働する場合のフッ素イオン生成量を試算した値は、フッ化水素の最小致死量（経口）に対して極めて微量（ppm オーダー）である。よって、人体に対する危険性は非常に低いと考えられる。
- (13) 以上の検討結果により、本アルミサーモサイフォンの環境上限温度は 50°C 程度であり、高温環境における電子機器の冷却への適用は可能である。

さらに、通信ネットワーク用光伝送装置を対象に、動作保証温度が異なる複数の発熱素子（LSI 素子およ

び光素子)が搭載された高発熱回路基板へのアルミサーモサイフォンによる冷却実装の実現性について、試作機による動作試験により検討を行った。以下に主要な結論を示す。

- (14) 狭小空間へのサーモサイフォンの実装と、複数発熱源のレイアウト変更に対応するために、サイフォンの匡体をアルミ一体構造とし、且つ、受熱領域を冷却対象毎に分割する構造を採用することで、複数素子の一括沸騰冷却が可能である。

以上のように本論文は、スカイプフィン加工技術を応用することにより、量産性に優れ、且つ、微細孔構造(リエントラントキャビティ)を多数有する高性能沸騰伝熱面を開発し、CPU冷却に有利な低沸点冷媒としてフッ素系不活性冷媒HFE-7000を選定することで、沸騰伝熱性能の促進効果について実験的に明らかにした結果と共に、高密度電子機器への冷却適用を想定して低背型アルミサーモサイフォンを考案および試作し、広い温度範囲で沸騰安定性を実現し、高温環境下で使用される電子機器へのサーモサイフォンの適用が可能であることを明らかにした結果を纏めたものである。

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も有利であり、また本技術は、汎用性の高い高性能伝熱面として、他の産業機器への展開も可能である。機器の小型・軽量化の観点でも必要な技術であり、工業的な有用性、産業社会への貢献が高い。

以上