

主論文の要約

論文題目 電子機器の熱管理に向けた超薄型ループ
ヒートパイプに関する研究
(Study on an ultra-thin loop heat pipe for
thermal management of electronics)

氏名 塩賀 健司

論文内容の要約

本論文は、作動流体の相変化を利用した潜熱輸送デバイスであるループヒートパイプ (LHP) をスマートフォンなどの薄型電子機器における発熱部品の熱移動に適用することで、機器の熱問題を解決することを目的として考案した、これまでにない新しい薄型 LHP の構造、製法および熱輸送性能について述べた。

従来の LHP 技術は、高い信頼性が要求される人工衛星や航空機において機器の熱制御を行うことを主な用途として研究開発が進められており、LHP を地上で使用する機器に適用した事例はほとんどない。なぜ民生機器に搭載する LHP が普及しないのか。その理由として、製造コスト、実装スペース、動作不安定性（特にモバイル機器）の中に課題があると考える。本研究は、電子機器の熱管理（サーマルマネージメント）の一手法として、スマートフォン、タブレット PC などの薄型電子機器に使用される高発熱部品の熱移動を行う LHP の有効性を明らかにすることを動機としている。本論文では、薄型電子機器への LHP の適用を実証するために設計した薄型 LHP に対して、様々な条件下での温度測定により熱性能の評価を行ない、薄型 LHP 内部の気相および液相の動作状態について議論を試みた。また、平板型蒸発器を有する LHP および MEMS 技術を用いたマイクロ LHP の設計・試作と、その性能評価を通して、銅薄板のエッチング加工と拡散接合プロセスによる世界最薄の LHP の考案に至る技術について述べた。

本研究では、下記の研究を行った。

- (1) 電子機器の熱管理へのループヒートパイプ技術の適用
- (2) 薄型ループヒートパイプの研究

(3) 2枚の銅薄板を用いた超薄型ループヒートパイプの研究

これらの研究によって、下記の2つの目標を達成した。

- 1) 薄型電子機器にLHPを適用するために、平板型蒸発器を有するLHPを設計・試作し、熱輸送性能の評価から、LHPの効率的な熱輸送による省エネルギー効果を明らかにした。
- 2) 銅薄板への微細加工と接合技術を用いた新規構造の薄型LHPを提案し、厚さ1 mm以下で姿勢依存のない熱輸送性能をもつ薄型LHPを設計・試作することで、薄型LHPの実現性と性能限界を明らかにした。

本論文は5章で構成されている。

第1章では、緒論として、本研究の背景と目的を述べた。移動通信技術の発展に伴い、IoTデバイスが普及することで生まれるビジネス（市場）について概説し、5G時代の到来によって、センシング機器やエッジ端末などの小型、薄型の電子機器が増加することで電子機器の熱管理の意義、重要性が増していることについて言及した。IoTデバイスの中核となる電子機器であるスマートフォンについて、従来の熱管理の手法やデバイスについて整理し、薄型化と高発熱化が進む電子機器の熱管理に、より効率的な熱輸送が可能なLHPを適用することを検討した。LHPの基本構造およびLHPによる熱輸送の原理を説明し、電子機器に適用する薄型LHPの先行研究として、Si-MEMS技術を用いたマイクロLHP (μ LHP)の研究事例と、薄型の蒸発器を有するLHPに関する先行研究について概説した。その上で本研究の目的を記述した。

第2章では、電子機器の熱管理にLHP技術を適用することを目的として、ハイエンドサーバ用の高発熱CPUの冷却にLHPを導入することによる省エネルギー効果を実証した。LHPを使用した冷却システムではファン風量を低減できることから、水冷方式や気液二相流冷却方式と比較して、サーバシステムの低消費電力化を実現できる。また、ノートPCなどの薄型電子機器のCPU冷却用途として、平板型蒸発器を有するLHPに関する研究を行い、熱漏れ（ヒートリーク）を低減するための蒸発器およびウィック構造に関する技術を提案し、LHPの熱輸送性能の向上を実証した。均一な細孔をもつSPG（シラスポーラスガラス）ウィックを用いた平板型蒸発器の性能評価により、ウィックの細孔径・空隙率やグループ形状についての設計指針を提示した。

第3章では、薄型電子機器における発熱部品の熱移動に使用する薄型LHPの研究開発について述べた。ここでは、高発熱部品に対して、LSIチップレベルでの熱輸送に適用する μ LHPと、LSIパッケージレベルでの熱輸送に適用する薄型LHPについて研究を行った。

まず、Siプロセスとガラス基板への微細加工技術を用いた μ LHPを提案し、細孔半径1 μ mの均一な細孔をもつSPGウィックを使用した、サイズ9.3 mm \times 8.4 mmの平板型蒸発器を設計した。試作した μ LHPに対する熱性能評価の結果から、薄型のLHPが動作する（熱輸送を行う）ためには、蒸発器容器の内壁とウィック外周の隙間からの熱漏れを抑制する必要

があることが判明した。これを実現するためには、蒸発器容器の内壁とウィックを一体構造にして、互いの接触面を無くすことでヒートリークを抑制できると考え、モバイル機器向けの薄型 LHP の設計指針として提案した。

次に、LSI パッケージレベルでの熱輸送をテーマとして、モバイル機器、特にスマートフォンに搭載することを目的として考案した、厚さ 1 mm 以下の薄型 LHP の研究について述べた。厚さ 0.1 mm の銅薄板へのエッチング加工と拡散接合プロセスを用いて製造する、厚さ 0.6 mm の新規蒸発器構造を有する薄型 LHP (FlatLoop™) のコンセプト、内部構造、製法および熱輸送性能について記述した。FlatLoop は、熱入力 20 W (熱流束 8.9 W/cm²に相当) で、蒸発器と凝縮器の間の熱抵抗 0.11 K/W を達成した。FlatLoop の動作時の姿勢変化が、熱輸送性能に大きな影響を与えないことを実証し、FlatLoop がモバイル機器に適用可能であることを示した。また、蒸発器への入熱に対するヒートリークの割合が、10% 以下であることを蒸発器に対する 3 次元熱伝導解析により明らかにした。さらに、スマートフォン実機に FlatLoop を導入することで、LHP の高効率熱輸送により、CPU 温度が低下することを示し、CPU の機能制限を遅延させることに効果的であることを実証した。本技術は、エッチング加工によりパターン形成することで蒸発器の内部構造や配管レイアウトの設計自由度が高いこと、および LHP を同一材料で構成することで蒸発器から液管側への熱漏れが少ない熱輸送を実現できることが特徴である。FlatLoop を用いて効率的な熱移動を行ない、薄型電子機器における熱集中を緩和し均熱化することで、アプリケーションの動作および操作性の向上が見込まれ、ユーザビリティの向上を図ることができることを示した。

第 4 章では、薄型 LHP の低コスト化と、さらなる薄型化を動機として考案した、2 枚の銅薄板を用いて作製される超薄型 LHP について、開発コンセプト、内部構造および熱輸送性能について記述した。2 枚の銅薄板を用いた新規構造の超薄型 LHP は、6 層版の FlatLoop において製造上の課題であったアライメント精度と、銅薄板のハンドリングによる製造歩留まり低下の問題を解決した。ハーフエッチング加工により形成した微細溝からなるウィック構造と、銅不織布による作動液の保持機構により、姿勢依存が小さく、高効率な熱輸送性能を実証した。また、本技術を用いて厚さ 0.4 mm の超薄型 LHP を作製し、水平、ボトムヒート、トップヒートの各姿勢において熱輸送を行うことを確認した。0.6 mm 厚 LHP と比較すると、流路圧損の増大に起因すると考えられる熱抵抗の増加が観察されたが、熱入力 7.5 W (熱流束 3.3 W/cm²に相当) において熱抵抗 0.21 K/W (水平姿勢) を達成した。モバイル機器への超薄型 LHP の適用に向けて、本研究で得られた知見に基づき、薄型 LHP の動作温度を低減し、最大熱輸送能力を向上させる設計技術を確立することを今後の課題とした。

最後に、第 5 章では第 2 章から第 4 章までの研究成果を総括し、結論をまとめた。