

〈一般研究課題〉 微小領域における凝縮現象の解明に基づく  
フレキシブル熱輸送デバイスの研究  
助成研究者 名古屋大学 上野 藍



## 微小領域における凝縮現象の解明に基づく フレキシブル熱輸送デバイスの研究

上野 藍  
(名古屋大学)

### Study on flexible heat transport devices based on the condensation phenomena in micro-scale

Ai Ueno  
(Nagoya University)

#### Abstract :

Recently, research and development of wearable devices has become more active, and novel thermal control devices for flexible heat sources are required in the future. Against this background, this study aims to create a flexible loop heat pipe (FLHP) that is driven by the capillary force of micropillars. Initially, the design of the FLHP was conducted by a one-dimensional steady-state model with the maximum capillary force of the micropillars. The device size of the FLHP was determined to be  $52 \times 82 \times 1.8$  mm and Ethanol was selected as a working fluid. The FLHP was formed from PDMS by a developed microfabrication process. Until now, different materials were used for the wick (porous material) of the evaporation part and the case body, which caused sealing issues. In this study, the entire LHP system, including the wick, was fabricated in a single process using PDMS, and the problem of poor sealing was greatly improved. A proof of concept for FLHP prototype with high flexibility was obtained by a heat load test.

#### 1. はじめに

電子機器の小型化はさらなる発展を見せており、近年ではスマートウォッチのような人体に近いウェアラブルデバイスが登場してきている<sup>[1]</sup>。このように電子機器の高性能化および小型化は急速に進んでおり、熱設計の要求はますます厳しくなることが予想される。現在の小型電子機器は熱拡

散のためにグラファイトシートなどの高熱伝導材料が使用されている<sup>[2]</sup>。また、近年ではヒートパイプやベイパーチャンバーといった厚さ1mm未満の熱輸送デバイスが適応されつつある<sup>[3]</sup>。しかし、これらはいずれも銅やステンレスを材料とした剛性が高い熱輸送デバイスであり、ウェアラブル機器のような屈曲したものには適応できない。今後予想されるさらなるウェアラブル機器の発展に備え、フレキシブル性を有した高性能熱輸送デバイスの創出が必要不可欠である。そこで本研究では高い熱輸送性能を持つループヒートパイプ(Loop Heat Pipe, 以下LHP)に着目した。LHPは気液二相流熱輸送デバイスであり、蒸発部、蒸気路、凝縮器、液路、リザーバから構成される。LHPはウィックと呼ばれる多孔質体の毛細管力によって駆動する。また、LHPの前身技術であるヒートパイプと比較して、ポンプとなるウィックが蒸発器のみに存在するため、薄型化が可能である。LHPの薄型化に関する研究はこれまでに報告されているが<sup>[4-6]</sup>、ウェアラブルデバイス搭載を見据えた超薄型フレキシブルLHP(Flexible LHP, FLHP)の研究例は皆無である。

以上の背景より、本研究では新たな冷却技術としてシステム全体がフレキシブル性を有する高効率な熱輸送デバイスの創出を目指す。特に、助成期間中にはFLHPの中でも重要な構成要素かつ最も高い圧力がかかるため高機密性が要求される蒸発部に微細加工技術を用いて駆動源となるマイクロピラー構造を導入し、PDMSを用いて一元的にデバイスシステムを作製することに取り組んだので報告する。

## 2. マイクロピラー構造を用いたFLHPの提案と設計

FLHPの動作原理は図1に示す通り、内部に封入された作動流体が蒸発器で相変化する際に潜熱として熱を吸収し、蒸気管を通り凝縮器に放熱、凝縮した液が液管を通り、リザーバを経て再び蒸発器に戻る仕組みである。本研究では、FLHPの駆動源としてマイクロピラー構造を導入することを提案した。これにより、既存のフレキシブル熱輸送デバイスは各要素が独立して作製されているのに対し、本FLHPは従来のデバイスとは異なりLHPの構成要素全てを主材料であるPDMSで作製することで1つの基板上に統合されたシステムを形成することができ、薄型かつ高气密性が可能となる。本設計では、マイクロピラー構造による最大毛細管力を算出し、一次元定常モデルを用いてデバイスサイズ52×82×1.8 mmのFLHPを設計した。作動流体にはエタノールを選定した。

FLHPを設計するために構築した解析モデルについて述べる。本解析モデルでは定常状態一次元非圧縮流れを想定しており、質量流量はループ内で常に一定と仮定する。また、各部流体の温度および圧力は単相流ではエネルギー保存則および運動量保存則を用いて計算を行い、二相流についてはLockhart-Martinelli法<sup>[7]</sup>を用いて計算した。

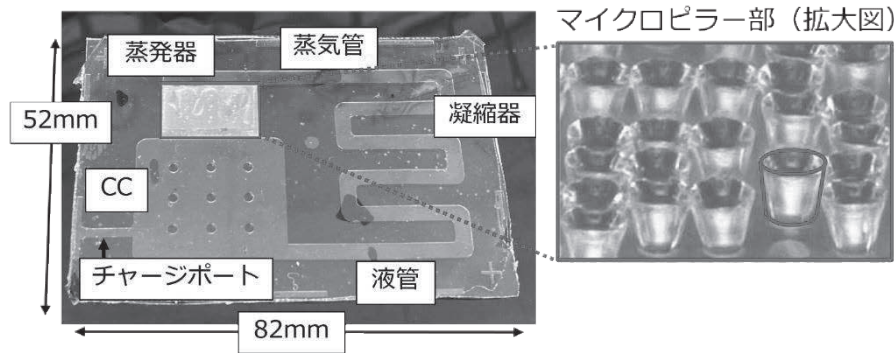


図1 本研究で提案・設計したFLHPの外観図.

### 3. 実験結果

#### 3.1 MEMSプロセス

デバイス作製プロセスではMEMS技術を利用し、SU-8モールドを用いてPDMSを主材とする高い柔軟性を有するFLHPのMEMSプロセスを確立した。作製したデバイスの外観およびマイクロピラー部を図1に示す。従来までのデバイス作製において、蒸発部のウィック(多孔質体)とケース本体に異種材料を用いていたため、気密性が低いことが課題であった。それらの課題に対し、本研究では蒸発部を含めたLHPシステム全体をPDMSを用いて一元的に作製することでシール性不良の問題も大幅に改善できた。図2に示す通り、デバイスを屈曲・湾曲させた後もデバイスの欠陥や損傷は無かった。

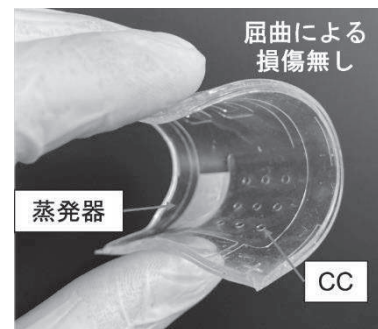


図2 柔軟性の高いFLHP.

#### 3.2 加熱実験結果

作製したデバイスの評価として、図3に示すような可視カメラとサーモグラフィを用いて熱負荷時の気液相変化と温度変化を計測した。作動流体の封入の有無による定常温度の違いを測定し、FLHPの動作状態および熱輸送効果を検証した。その結果、0.75W~2Wの熱負荷において蒸気管温度上昇により一方向の熱輸送を確認された。また、液を封入していない場合に対してヒーター温度は熱負荷2Wのとき最大で約13℃、蒸発器温度は約26℃に低減することが確認された。本実験結果と解析による結果を比較したところ、実験値と解析値が1Wのとき最大で18.7℃の乖離があった(図4)。これは解析上の内部圧力の違いや解析モデルにおける蒸発器内部の仮定が異なることに起因すると考えられる。従って、今後はさらなるデバイスの検証や解析モデルの改善が必要となる。また、FLHPが湾曲姿勢においても駆動することを確認した。

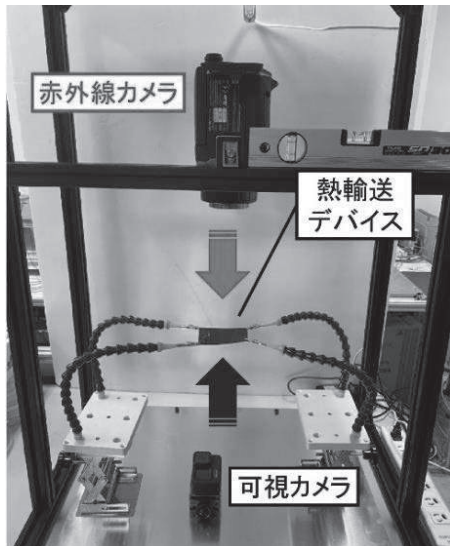


図3 赤外/可視観察によるデバイス評価システム

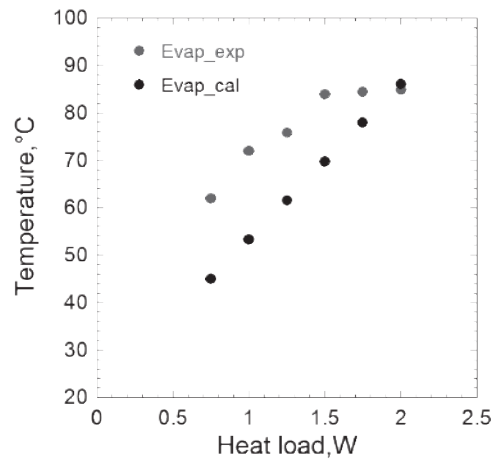


図4 各熱負荷に対する蒸発部の温度変化

#### 4. 結論

本研究では、ウェアラブルインターフェースのための新たな熱制御デバイスとしてフレキシブルFLHPを提案した。一次元定常モデルによりデバイスサイズ $52 \times 82 \times 1.8$  mmのFLHPをMEMS技術により試作した。このFLHPは高い柔軟性を示し、実験の結果、蒸発器から凝縮器への一方向の熱輸送が確認された。本成果は、FLHPがウェアラブル機器への応用に向けた熱輸送デバイスとして有望であることを示した。今後の課題として、解析モデルの検討、様々な姿勢や長期間の駆動実験も検証する必要がある。

#### 参考文献

- [1] SONY smartwatch HP, ([http://wena.jp/lp/wena\\_3/](http://wena.jp/lp/wena_3/))
- [2] Panasonic Graphite sheet, (<https://industrial.panasonic.com/jp/products/thermal-solutions/graphite-sheet-pgs/pgs>)
- [3] FUJITSU smartphone arrows5G HP, (<https://www.fmworld.net/product/phone/f-51a/>)
- [4] G. Zhou, J. Li, Z. Jia, “Power-saving exploration for high-end ultra-slim laptop computers with miniature loop heat pipe cooling module”, *Applied Energy* 239, 859–875, 2019.
- [5] T. Shioga, Y. Mizuno, H. Nagano, “Operating characteristics of a new ultra-thin loop heat pipe”, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 151, 119436, 2020.
- [6] N. Phan, H. Nagano, “Fabrication and testing of a miniature flat evaporator loop heat pipe with polydimethylsiloxane and molding”, *Applied Thermal Engineering* 175, 115377, 2020.
- [7] R. Lockhart, R. Martinelli, “Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes”, *Chemical Engineering Progress*, 1949.