

多孔体内熱流動現象の計測・制御に基づく次世代熱輸送デバイスの創製

名古屋大学大学院 工学研究科 機械システム工学専攻 教授

長野 方星

1. テーマ設定の背景

脱炭素社会の実現に向けて、未利用な熱エネルギー有効利用技術は極めて重要であり、特に熱輸送技術の省エネ化は喫緊の課題である。熱輸送には、従来はポンプ式の液体循環などが用いられているが、電力消費が大きく、また温度低下により効率が悪いといった欠点があった。そこで、著者は電力を用いることなく長距離の熱輸送が可能なループヒートパイプ (Loop Heat Pipe, LHP) に注目した (図1)。LHPはウィックとよばれる多孔質体で生じる毛管力 (表面張力) をポンプ駆動力とした無電力熱輸送技術である。しかし、その性能限界を決める多孔体の材料物性や幾何学形状が、多孔体表面で生じる気液熱流動素過程に与える影響が十分には明らかになっておらず、これまでは人工衛星の冷却用 100W 級小型 LHP など、適用分野や熱輸送量は限定的であった。そこで著者は、LHP の性能を格段に向上することを目的に、多孔体の物性計測、多孔体界面での気液相変化素過程の解明、最適相界面構造の創製、その知見に基づく LHP の高性能化に関する研究開発に取り組んだ (図2)。

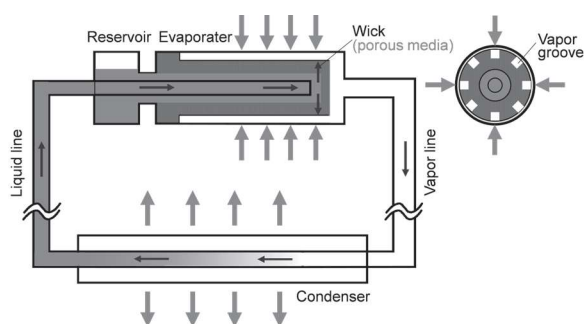


図1 LHPの概念図

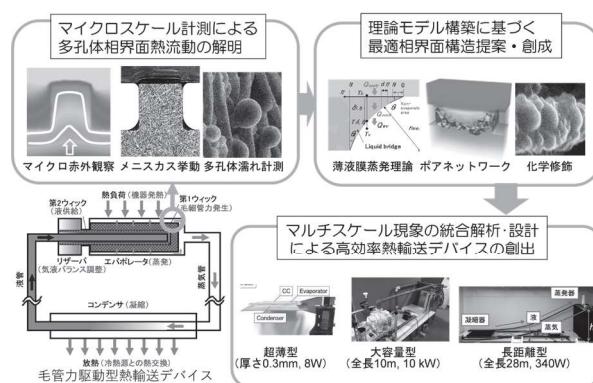


図2 本研究のアプローチ

2. 素形材分野との関連性

LHPはナノ～マイクロオーダーの金属や樹脂多孔質体内で発生する毛管力を利用して、熱を潜熱の形で輸送できるため、省エネ、高効率の点で次世代の革新的熱輸送デバイスとして期待されている。しかし、その性能を決定づける多孔体の物性パラメータは多岐に渡っており、細孔径、空隙率、浸透率、屈曲度、熱伝導率に加え、作動流体との濡れ性、蒸気溝形状、初期気泡核生成半径、熱源との接触面積、接触圧などがあり、これらの複合因子が気液相界面後退現象、ならびに薄液膜蒸発から沸騰への相変化過程遷移に影響を与えている。これらの多孔体物性および作動流体との複合挙動を理解することは、LHPはもちろんのこと、多孔体沸騰式熱交換器に最適となる多孔体素材の開発につながり、熱エネルギー有効利用技術のブレイクスルーに多大な貢献が期待できる。

3. 研究開発の成果

LHPの動作基礎原理となる多孔体表面での相変化過程における熱流動現象を明らかにするため、独自のマイクロスケール赤外・可視同時観察により、温度分布、液浸透深さ、気液界面移動速度を同時に計測できる手法を確立した¹⁾。本手法

により、例えば、多孔体相界面での相変化熱流動挙動は3つの様式に分類され、多孔体-蒸気溝界面に生じる液架橋が重要な熱伝達を担うことや、伝熱促進効果の高い薄液膜蒸発と核沸騰を共存できる界面構造を形成することで、従来の沸騰における限界熱流束よりも5倍以上高い熱伝達性能が得られることなど、従来法では予測できない多孔体界面での熱流動現象の本質を明らかにする成果をあげた。

次に、薄液膜蒸発理論とポアネットワークモデルを組み合わせた多孔体内相変化モデルを構築し、多孔体内の詳細な温度・圧力場、気液界面位置を3次元で解析することにより、赤外・可視計測で得られた物理現象を理論的に裏付けた²⁾。また、本物理モデルにより得られた高性能化指針に基づき、多孔体内の濡れ性向上のための化学修飾や、構造制御に伴う三相界面領域の最適設計など、相界面特性の改質・制御により、さらに高い熱輸送性能を実現した。

さらに、上記の基礎的知見を融合した多孔体相界面構造を有する独創的なLHPを提案、製作し、これまで国内外で実証されていたLHP性能に対し、熱輸送量、熱輸送距離、熱流束の観点で数倍以上の性能を達成した。

4. 訴求点

本研究の独創性、学術分野での先進性、社会への貢献度、波及効果について述べる。

4.1 独創性

独自のマイクロスケール可視・赤外計測技術により温度分布、毛管力浸透深さ、気液界面移動速度を同時に計測できる独創的な装置を確立し、これまで明らかになっていない多孔体界面近傍での気液相変化素過程の現象を動的かつ定量的に観測することに成功した。

4.2 学術分野での先進性・優位性

多孔体内相変化は蒸気溝に生じる液架橋により行われていること、伝熱促進効果の高い薄液膜

蒸発と核沸騰を共存できる界面構造を形成することで、従来の5倍以上の高い熱伝達性能が得られることなど、多孔体相界面での熱流動現象を本質的に明らかにする画期的な発見に至った。本成果はヒートパイプ関連の世界最大の国際会議での受賞や数多くの招待講演につながった。

4.3 社会への貢献度・実用性

得られた知見に基づく多孔体相界面構造の詳細熱輸送モデルと独自の実装技術により、世界最薄（厚さ0.3mm、実効熱伝導率42,000 W/mK）、世界最長輸送距離（全長28m、実効熱伝導率1,900,000 W/mK）、世界最大熱輸送量（10kW）の無電力熱輸送をそれぞれ実現した。現在は、モバイル機器、光学機器の冷却や自動車排熱有効利用のための無電力熱輸送デバイスについて企業と共同研究を実施している。中でも超薄型LHPは量産化に向けた準備が進められるなど、社会実装にむけた開発が行われている。

4.4 波及効果

著者が独自に構築しているLHP技術により、従来は100W-1m程度の熱輸送しかできなかったLHP技術に対し、10kW-3mや320W-10mの無電力熱輸送を達成している。本成果は脱炭素社会で求められる熱エネルギー有効利用における熱供給の大動脈として利用できるため、工場排熱利用、住宅の太陽熱利用、地中熱利用など幅広い波及が期待できる。

参考文献

- 1) K. Odagiri, M. Nishikawara, and H. Nagano, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 126, No. 5, pp. 1083-1090 (2017).
- 2) M. Nishikawara, H. Nagano, and P. Prat, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 126, No. 5, pp. 1098-1106 (2017).