

ループヒートパイプの動作特性に及ぼすセカンダリーウィックの影響評価

Study of the Effect of a Secondary Wick on Operating Characteristic of Loop Heat Pipe

利用者 岡本 篤¹⁾、 富中 龍太¹⁾、 杉田 寛之¹⁾、 飯倉 寛²⁾
 Atsushi OKAMOTO Ryuta HATAKENAKA Hiroyuki SUGITA Hiroshi IIKURA

所属 1)宇宙航空研究開発機構、2)原子力機構

概要

近年、宇宙機の熱制御系に対する要求の高度化に伴い、既存の熱制御技術のみで熱設計を成立させることが困難になってきており、作動流体の蒸発と凝縮により熱輸送を行い、毛細管力のみで作動流体が循環する熱制御デバイスであるループヒートパイプが注目されている。ループヒートパイプは現在宇宙機の熱制御に使用されている従来型ヒートパイプに比べて熱輸送特性が重力の影響を受けにくい、大量の熱を長距離輸送できるなど多くの利点を有する。JAXAでは宇宙機への適用を目指した宇宙用ループヒートパイプの研究開発を行っており、その一環として2008年度よりループヒートパイプ動作時の作動流体の挙動を視覚的に把握することを目的として中性子ビーム実験を行っている。2008年度に実施した中性子ビーム実験の結果、ある条件下において余剰作動流体の液溜め部であるリザーバから、作動流体が蒸発する蒸発器に作動流体が安定して供給されないという想定外の事象が確認された。本事象を反映してセカンダリーウィックと呼ばれる液供給機構を追加するよう設計変更を行った。今年度、セカンダリーウィックを追加したループヒートパイプを中性子ビーム実験に供した結果、以前に想定外事象が確認された実験条件においてもリザーバから蒸発器に安定して液が供給されていることが視覚的に把握でき、設計の妥当性を確認することができた。

キーワード ループヒートパイプ、セカンダリーウィック、気液挙動、中性子ビーム、可視化

1. 目的

JAXAでは次世代の宇宙用熱制御デバイスとして注目されているループヒートパイプ (Loop Heat Pipe, 以下LHP) の開発を行っている。LHPは Fig.1に示す通り、蒸発器、蒸気管、凝縮器、液管、リザーバから構成され、蒸発器に熱が印加されると蒸発器に内包されたウィックと呼ばれる多孔質体内部で作動流体が蒸発して気液界面が生成され、ウィック内部の気相と液相における表面張力の違いにより毛細管力が発生する。その毛細管力を駆動力として作動流体は蒸気の状態を蒸気管を通して凝縮器に到達する。凝縮器において作動流体は外部と熱交換（地上試験ではコールドプレートとの伝導熱交換、軌道上では宇宙空間への輻射排熱など）を行い凝縮する。凝縮した液は液管を通して蒸発器に還流する。このサイクルを繰り返すことにより作動流体の蒸発潜熱を利用した大容量熱輸送が可能となる。なお、動作条件（蒸発器への印加熱量、凝縮器の放熱シンク温度）によりループ内部に必要な作動流体の量は異なるため、余剰な作動流体を格納するリザーバ (CC) と呼ばれるタンクが蒸発器近傍に設置される。

JAXAでは 2008 年度にLHP動作時の作動流体の挙動を把握することを目的として中性子ビーム実験による作動流体の可視化実験を行った。その結果、ある条件下においてリザーバから蒸発器に作動流体が安定して供給されないという想定外の事象が確認された。本事象を反映してセカンダリーウィックと呼ばれる液供給機構を追加するよう設計変更を行った。新規に追加したセカンダリーウィックにより想定通りリザーバから蒸発器に液が供給されているか確認すること（液供給効果の確認）、およびセカンダリーウィックが熱輸送特性に及ぼす影響を評価することを目的として実験を実施した。

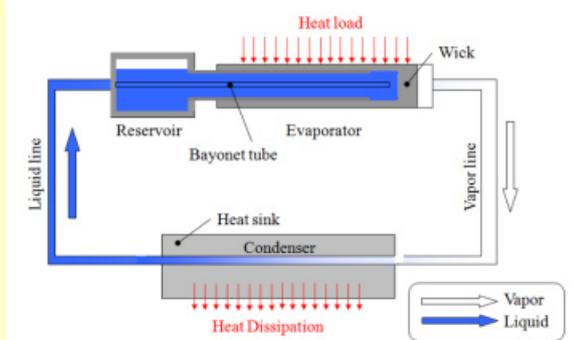


Fig.1 Schematic of a loop heat pipe

2. 方法

本実験に使用したLHPの構成および主要な設計パラメータをそれぞれFig.2, Table1に示す。蒸発器 (Evaporator) の両側には蒸発器加熱用セラミックヒータが取り付けられており、ヒータに電圧を印加することにより蒸発器が加熱され、内部に封入した作動流体が蒸発する。蒸発した作動流体は蒸気の状態を凝縮器 (Condenser) に到達する。凝縮器の配管はハンダ付けによりコールドプレート (Cold Plate) に接合されており、コールドプレートはチラーにより温度制御されたフロン系冷媒を内部に循環させることにより実験中は 25℃に制御されている。蒸気の状態の作動流体は凝縮器配管を通過する際にコールドプレートの熱交換により冷却された凝縮器配管の内壁と熱交換を行うことにより凝縮し、液の状態を液管を通して蒸発器に還流する。本実験では、コントラストの良い画像を取得することを目的として質量減衰係数の大きな水を作動流体として使用した。LHPはFig.3に示すように全体を断熱材で覆った状態で照射室内に設置される。実験では、蒸発器へのヒータ加熱を行い、LHP各部に貼り付けた T型熱電対により各部の温度データを取得すると同時に、中性子ビームを照射してLHP内部の作動流体の挙動を撮像する。本実験では、LHPの動作特性に及ぼす重力の影響を評価することを目的としてFig.4に示す2つの姿勢にて撮像を行った。Fig.4(a)に示す姿勢 (Bottom heating) は蒸発器に還流する作動流体は重力の影響をほとんど受けないのに対して、Fig.4(b)に示す姿勢 (CC under Evaporator) は作動流体が蒸発器に還流する際に重力に逆らって還流する必要がある。いずれの姿勢の実験も冷却型 CCD カメラを使用し、105mmレンズにてFig.4中に緑色のラインで示される範囲のみを拡大して撮像を行った。熱電対の貼付位置を Fig.4(b)に示す。

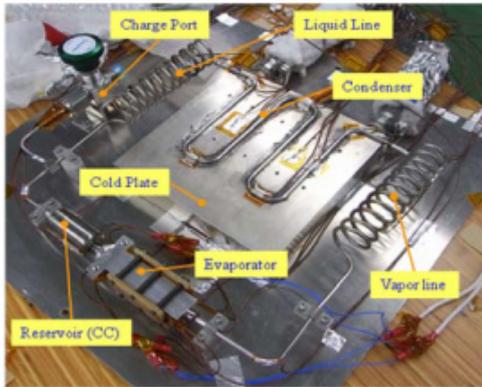


Fig.2 LHP for visualization test

Table 1 Major Design Parameters of the LHP

Evaporator	Size(mm)	18.6x18.6 x76.5
	Material	A5052
Primary Wick	Size(mm)	O. D. =12.6, I. D.= 6 , L= 60
	Pore Radius	2.8 μm
	Porosity	40%
	Material	SUS304
Secondary Wick	Material	Stainless Steel
	Mesh No.	#200
Vapor Grooves	Size(mm)	1.0 H x1.5 W.
	Number of	18
Vapor Line	Size(mm)	3.17 O. D. x1000 L.
	Material	Stainless Steel
Condenser	Size(mm)	3.17 O. D. x500 L.
	Material	Stainless Steel
Liquid Line	Size(mm)	3.17 O. D. x1000 L.
	Material	Stainless Steel
Reservoir (CC)	Size(mm)	7.6 I. D. x35 L.
	Material	Stainless Steel
Bayonet Tube	Size(mm)	1.58 O. D.
	Material	Stainless Steel

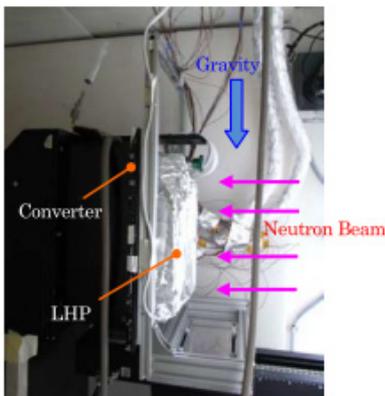


Fig.3 Experiment set up

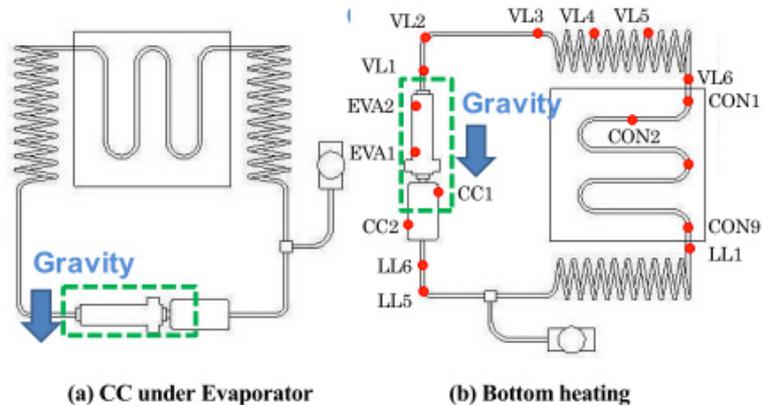


Fig.4 Orientations of LHP and the locations of the temperature sensors

3. 研究成果

結果の一例として、Fig.4(b)に示す姿勢（Bottom heating）において蒸発器に熱負荷100Wを印加した際の結果について述べる。Fig.6に示す通り、蒸発器へのヒータ加熱開始直後に作動流体が蒸発し、蒸気が凝縮器まで到達している。加熱開始から約20分後にはLHP各部の温度が定常状態に到達していることからLHPが安定して動作していることがわかる。LHPが安定して動作している様子は Fig.7に示す蒸発器へのヒータ加熱開始直後の蒸発器およびリザーバ内部の作動流体の分布の時間変化からも確認できる。ヒータ加熱直後に蒸発器内部の作動流体が蒸発し、蒸気の状態で蒸気管に流れていく様子がわかる。作動流体の蒸発に伴い蒸発器内部の作動流体の量は少なくなるため、安定して起動、動作するためには作動流体を適切にバイオネット管先端およびリザーバからセカンダリーウィックを介して供給する必要がある（Fig.5）が、ヒータ加熱開始から34秒後の撮像写真を見ると、セカンダリーウィックを介して作動流体が重力に逆らって吸い上げられ、蒸発器に供給されていることが視覚的に確認できる。セカンダリーウィックによる液供給はヒータ加熱開始から30分経過した時点でも安定して行われておりLHPは安定して動作していると考えられる。

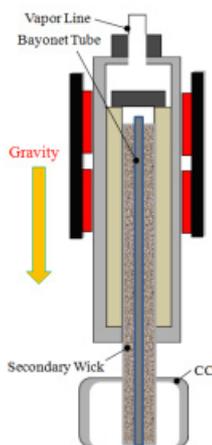


Fig.5 Schematic view of the evaporator area

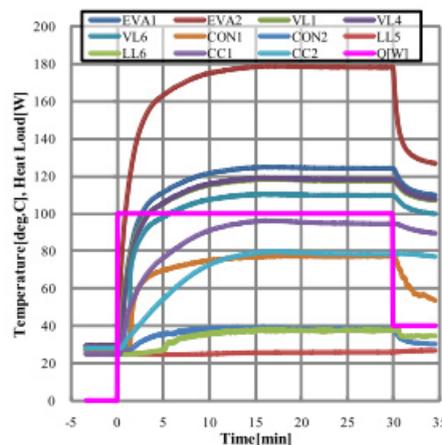


Fig.6 Temperature trend in successful start-up (LHP w/o secondary wick, CC under Evaporator, Q=100W)

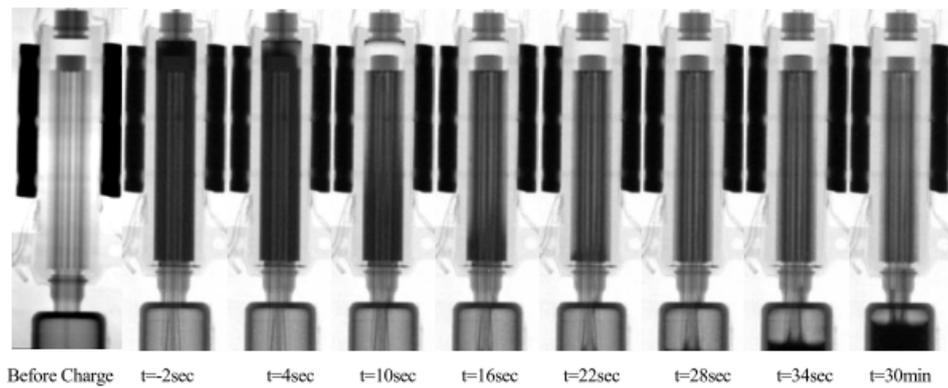


Fig.7 Vapor-Liquid distribution in successful start-up
(LHP w/o secondary wick, CC under Evaporator, Q=0W to 100W)

4. 結論・考察

3章に示す通り、セカンダリーウィックを追加したLHPは作動流体が蒸発器に還流する際に重力の影響を受けるLHPの安定起動・動作にとって一番厳しい姿勢 (CC under Evaporator) においても、安定して作動流体をリザーバから蒸発器に供給している。しかし、セカンダリーウィックを追加する前のLHPは、本姿勢はおろか、Fig.8に示す通り、Fig.4(a)に示す姿勢においても起動に失敗しウィックがドライアウト (作動流体が乾き上がる) する事象が2008年に実施した実験で確認されている (Fig.9 赤線枠で示す部分) ことから、セカンダリーウィックの追加によりLHPの動作特性は飛躍的に向上したと言える。2008年度に実施した実験で得られた知見を反映して、セカンダリーウィックを設計し、その妥当性を再度中性子ビーム実験により確認することができたことから、中性子ラジオグラフィ技術は大変有意義な手段であると言える。今後、得られたデータはハードウェアの設計改良だけでなく、解析ツールの構築作業にも役立てていく予定である。

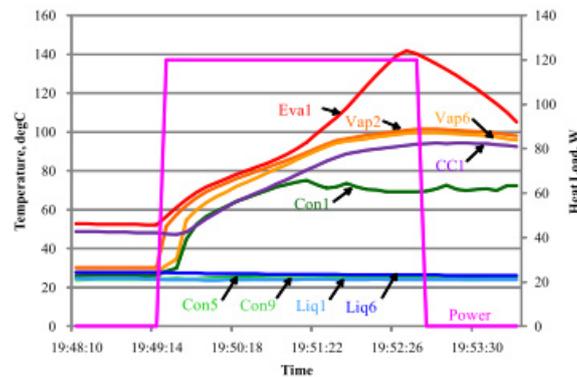


Fig.8 Temperature Trend in failed start-up
(LHP w/o secondary wick, Bottom heating, Q=120W)

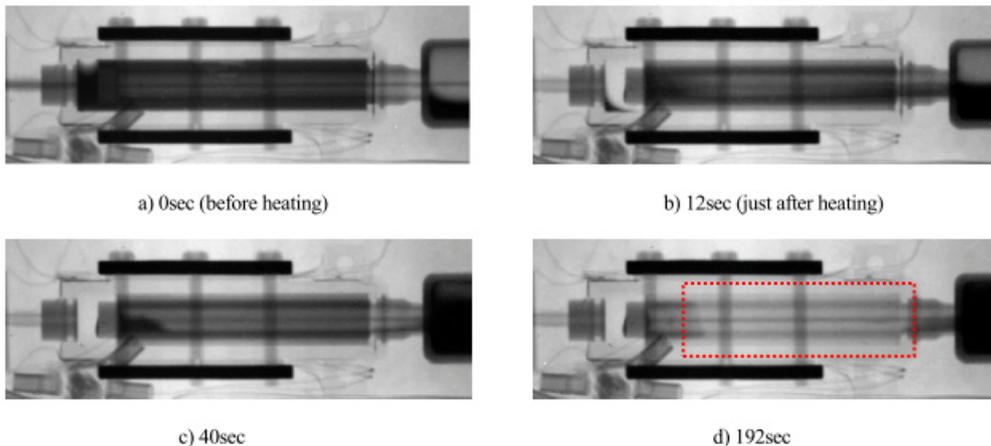


Fig.9 Neutron radiographic image in failed start-up
(LHP w/o secondary wick, Bottom heating, Q=120W)

5. 引用(参照)文献等

N.Takenaka, "Visualization and Measurement of Thermal Hydraulic Phenomena by Neutron Beam," Proceedings of Thermal Engineering Conference, No.07-5, 2007