

ループヒートパイプの定常及び 非定常動作時の可視化

利用者 1金森康郎、2村上正秀、1杉田寛之、1岡本篤、1畠中龍太、2間瀬勇樹
所属 1宇宙航空研究開発機構、2筑波大学

1. はじめに

ループヒートパイプ (LHP) は内部に封入された作動流体の相変化に伴う潜熱で熱を輸送するループ型熱制御デバイスである。LHPはその特性上、従来のヒートパイプに比べて様々な利点があることから、宇宙用熱制御デバイスとして期待されている。しかし、LHPは微小重量環境下における起動の困難性や、低熱負荷時の不安定挙動が報告されている。このような現象は作動流体の初期の気液分布や流動が影響していると考えられるが、LHP内部の作動流体の詳細な挙動を実験的に確認した例は少ない。そこで、本研究では中性子ラジオグラフィを用いたLHP内部の可視化による実証的研究を目的として、現在、今後実施する本実験用の供試体を設計中である。本課題では、中性子ラジオグラフィによってどのような画像が得られるかを把握し、本実験における最適な撮影条件と新規に製作するLHPの設計要求を確定するために、現在所有するLHPを供試体として様々な条件で撮影し、得られた画像の解像度や視野等を比較した。

2. 実験装置と実験方法

LHPは蒸発器、蒸気管、凝縮器、液管、リザーバで構成され、内部には作動流体が封入されている。LHPは作動流体の潜熱を介して蒸発器から凝縮器へと熱を輸送する。作動流体は蒸発器内に取り付けられたウィックと呼ばれる多孔質体において発生する毛細管力によって駆動される。供試体に用いたLHPの写真を図1に示す。蒸発器はアルミ製で、内部にステンレス焼結金属製のウィックが取り付けられている。ウィックには蒸気の流路として流れ方向にグループが切られている。蒸気管、液管は共に長さ1000mmのステンレス管であり、途中にコイリング部分がある。リザーバ上部には作動流体の封入用にチャージポートが設けられている。蒸発器にはガラスエポキシ板とボルトによってヒータが取り付けられている。撮影時の供試体の配置を図2に示す。供試体は照射室に収めるためにコイリング部分で90度に折り曲げ、アルミ製の治具によってステージに固定した。撮影は蛍光コンバータと冷却型CCDカメラ、EB-CCDカメラを用いて行った。冷却型CCDカメラによる撮影では、供試体からコンバータまでの距離やレンズの種類をパラメータとして撮影を行い、画像の解像度や視野を比較した。レンズは35、55、105mmレンズを使用した。また、作動流体(純水)を封入する前後の画像を撮影し、差分画像の取得を試みた。EB-CCDカメラによる撮影では55mmレンズを使用し、得られた画像の画質を確認した。なお、本課題においてはヒータから熱負荷は加えずに撮影を行った。

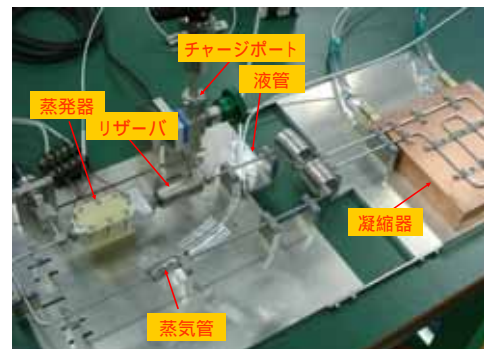


図1 実験に用いたLHPの概観



図2 撮影時の供試体の配置

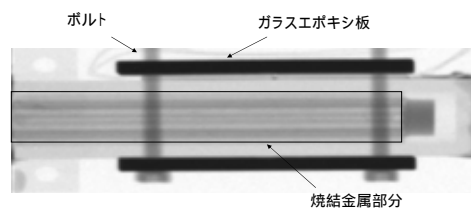


図3 蒸発器内の可視化画像(封入なし)

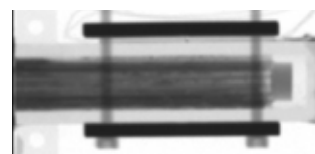


図4 蒸発器内の気液分布(純水封入後)

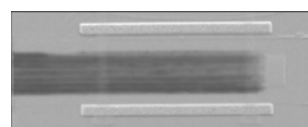


図5 蒸発器内の気液分布(画像演算後)

3. 実験結果

供試体からコンバータまでの距離を変化させて撮影した画像を比較した結果、距離を小さくすると画像の解像度が高くなることを確認した。一方、供試体からコンバータまでの距離が小さいと散乱中性子の影響が大きくなり、コンバータ輝度の定量性が失われることが知られている。本研究では蒸発器内の詳細な気液分布を捉える必要があるため、画像の解像度を優先させ、供試体とコンバータの距離を小さくして撮影を行うことにした。図3に冷却型CCDカメラと105mmレンズで撮影した純水封入前の蒸発器内の可視化画像を示す。蒸発器の内部に取り付けられたウィックが視認され、画像の濃淡によってウィックに切られたグループも確認することができた。図4は純水を封入した直後の蒸発器内の可視化画像である。純水が浸透している部分が暗くなり、ウィック内の液分布がわかる。封入直後のため、まだウィック全体に一樣には液が浸透しておらず、ウィックの右側では液が少ないことが確認できた。図5は画像演算によって図4を図3で除算した結果である。この画像演算によって蒸発器ケースやウィックなどの背景を消去することができるが、本実験においては完全な背景消去はできなかった。これは、供試体のチャージポートが強く固定されているため、作動流体の封入作業時に加えられた力が供試体に伝わり、供試体の位置が僅かに変化したためだと考えられる。EB-CCDカメラによる撮影ではリアルタイムの動画を得ることができたが、画質が低く、蒸発器内部の液分布を判別するのは困難であった。よって、本実験では画質を優先し、冷却型CCDカメラで連続撮影を行うこととする。これらの知見から、新規に製作する供試体はループ全体が250×250mm(冷却型CCDカメラ及び35mmレンズ使用時の視野)に収まるレイアウトとし、チャージポート部分は途中にフレキシブルな管を用いることで作動流体の封入作業時に加えられる力がLHP本体に伝わらない構造を採用することとする。

4. まとめ

本課題では、中性子ラジオグラフィによるLHP内部の可視化画像を基に、最適な撮影条件と新規製作するLHPの設計要求を確定した。今後、本課題で得た情報を基に新規にLHPを製作し、LHP動作時の可視化実験を行う。

ループヒートパイプ封入冷媒の挙動と動作特性の関連性の把握

利用者 1金森康郎、2村上正秀、1杉田寛之、1岡本篤、1畠中龍太、2間瀬勇樹
 所属 1宇宙航空研究開発機構、2筑波大学

1. はじめに

ループヒートパイプ（LHP）は内部に封入された冷媒の相変化に伴う蒸発潜熱を利用して熱輸送を行うループ型熱制御デバイスであり、長い熱輸送距離、配管レイアウトの自在性、高い温度制御性などの利点を有することから、次世代の宇宙機用熱制御デバイスとして早期の実用化が期待されている。一方で、LHPは微小重力環境下における起動の困難性や低熱負荷時に温度が振動する現象を示す場合があることが報告されているが、そうした非正常現象には気液界面の挙動が大きく影響していると考えられる。そこで本課題では、LHP封入冷媒の挙動と動作特性の関連性の把握を目的として、動作時のLHPの温度モニタを行うと同時に、中性子ラジオグラフィにより冷媒の挙動の可視化を行った。

2. 実験装置と実験方法

撮影に使用したLHPの構成と撮影姿勢を図1に示す。LHPは蒸発器、リザーバ、蒸気管、凝縮器、液管から構成され、封入冷媒（本課題では純水）は蒸発器内に取り付けられた多孔質体（ウィック）で発生する毛細管力を駆動力として循環される。蒸発器においてヒータ加熱により蒸発した冷媒は、凝縮器で液化し、蒸発器内に再度供給される。本課題では、LHPの動作特性に及ぼす重力の影響を把握する目的で、図1に示す2つの姿勢にて撮影を行った。撮影コンフィギュレーションを図2に示す。姿勢Aでは35mmレンズ（全体撮影時）と105mmレンズ（蒸発器周辺の拡大撮影時）の2種類のレンズ、姿勢Bでは105mmレンズのみを使用し、両姿勢とも冷却型CCDカメラを使用して撮影を行った。ヒータ加熱量は0～160Wの範囲で変化させ、熱電対で各部の温度を測定した。

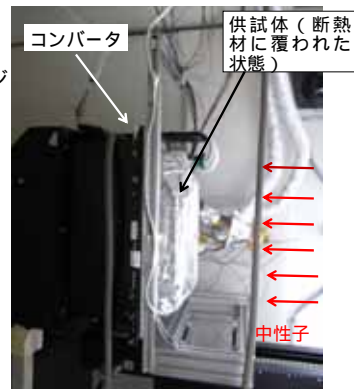
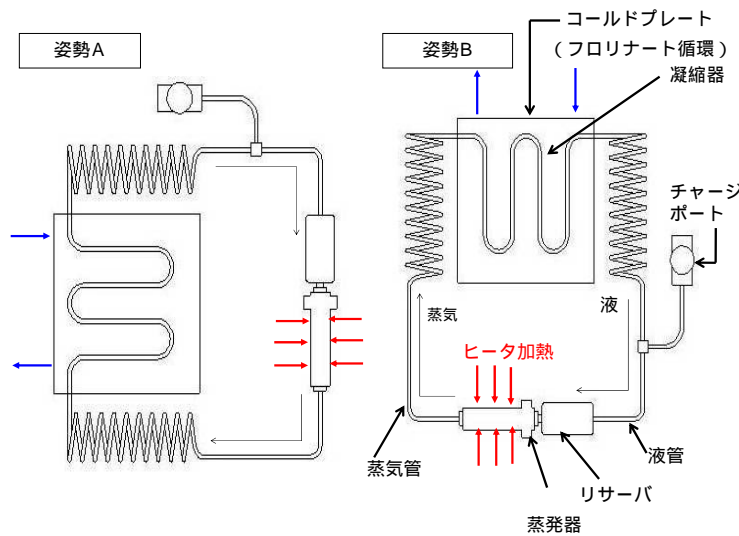


図1 LHPの構成と撮影姿勢

図2 撮影コンフィギュレーション

3. 実験結果

姿勢Aでの全体撮影（図3）では、スタートアップ時の冷媒の挙動、各熱負荷における気液界面位置、リザーバ水位の変化、ヒータOFF時の冷媒の挙動などを確認できた。概ね予想通りの挙動を示していたものの、ヒータOFF後に蒸発器内がほぼ液で満たされる点など、温度データだけでは推察の難しい現象に関して中性子ラジオグラフィによって有益な情報を得ることができた。姿勢Bではウィックが乾いて熱輸送がなくなる現象を画像・温度データ双方で確認することに成功した。熱負荷120W投入直後はコア内が半分程度液で満たされていたが、徐々にコア内の液量が減り（図4(a)）、その後はリザーバ側から順にウィックが乾いていった（図4(b)）。設計時の想定ではコア内とリザーバ内の液面は重力の効果でほぼ同じ高さとなり、コア内には必ず一定量の液が存在することを想定していたが、実際にはリザーバが満水にも関わらずコアには液がほとんど存在せず、バイオネット管の先端付近しか液が供給されていなかった。これは蒸発器 - リザーバ間の流路が細く、コア内の高圧蒸気によってリザーバからの液が流入できなくなったためと考えられる。また、姿勢Bは事前に実施した特性評価実験においても不安定な温度挙動を示していたが、本実験結果からウィックへの液の供給不足が影響している可能性が高いため、今後も継続して実験的な検討を行うと同時に、設計や製造方法に関しても検証を行う。

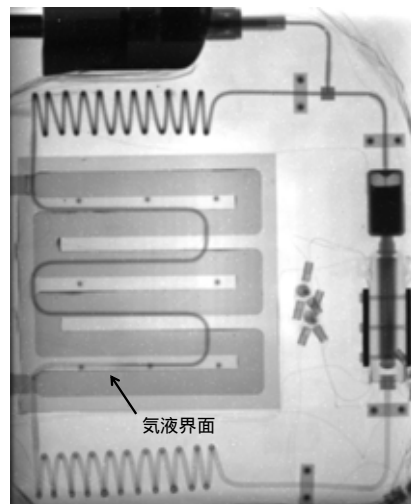


図3 LHP動作時の気液分布（姿勢A、熱負荷120W定常時）

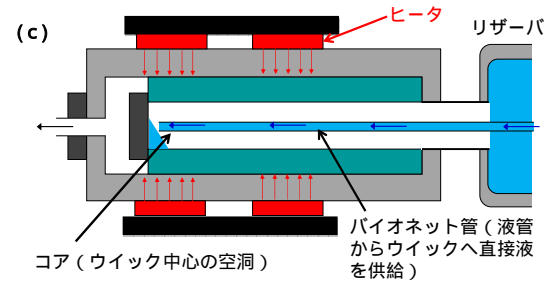
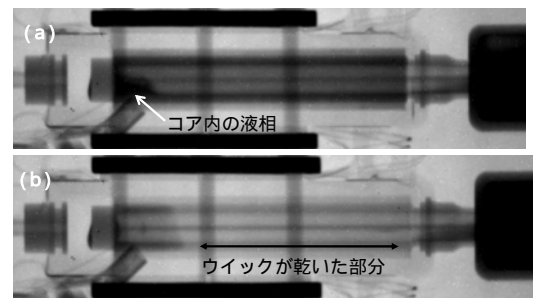


図4 LHP蒸発器ウィックが乾いていく様子（姿勢B、熱負荷120W投入後）
 (a)加熱開始後1分経過時(b)3分経過時
 (c)撮影箇所模式図

4. まとめ

本課題では、LHP封入冷媒の挙動と動作特性の把握を目的として、動作時のLHP各部の温度を測定すると同時に中性子ラジオグラフィにより冷媒の可視化を行った。その結果、温度データのみでは推察できない事象を視覚的に把握することができ、今後のLHP研究開発に資する有益な情報が得られたと同時にH/W設計に反映すべき課題を明らかにすることができた。今回得られた知見は今後のLHP研究開発に反映する予定である。