

主 論 文 の 要 約

論文題目 マイクロスケール赤外・可視観察に基づく
多孔体内相変化素過程の解明とループヒート
パイプ高熱流束化への応用
(Study on characteristics of phase-change heat
transfer in a porous media for high heat flux
loop heat pipe based on microscale
infrared/visible observation)

氏 名 小田切 公秀

論 文 内 容 の 要 約

近年、宇宙機熱制御要求はミッション高度化に向けてさらに厳しくなっており、高熱流束条件で動作可能な高効率熱輸送デバイスが求められている。また深刻化する地球環境問題およびエネルギー問題を本質的に解決するためには、熱エネルギー有効利用が必要不可欠であり、分散して存在する熱利用技術、蓄熱技術、熱発電を繋ぐ熱エネルギー輸送デバイスが求められている。このような背景に基づき、本研究では無電力で長距離・大量熱輸送が可能という特長を有するループヒートパイプ(Loop Heat Pipe, LHP)に着目する。LHPは毛細管力駆動型の気液二相熱輸送デバイスであり、従来のヒートパイプと比較して高い熱輸送性能が期待できる。LHP性能を決定する最も重要な構成要素は、受熱部の蒸発器である。蒸発器内の多孔体では相変化を伴った熱流動現象が生じているが、そのメカニズムや現象に影響を及ぼす因子は十分に解明されていない。このためLHP高熱流束化への課題は蒸発器多孔体内の熱流動現象の解明である。しかしながら、マイクロスケールの現象を赤外領域・可視領域で総合的に捉える可視化研究は存在せず、さらにこれまでに行われてきた蒸発器解析は実験との検証が不十分であった。またLHP高性能化に関する研究については、実験的および解析的に行われてきたが、なぜ性能が向上するか、そのメカニズムの解明は不十分であった。またLHPシステムレベルでは、熱輸送距離の大きな条件で高熱流束熱輸送が可能なLHPが存在しない。また民生応用にあたり、360°の姿勢変更に対応可能な

ことが求められるが、高熱流束 LHP の性能の姿勢依存性について詳細に研究した例は存在しない。以上の背景に基づき、本研究では、蒸発器多孔体内相変化素過程を解明し、得られた基礎的知見を LHP 高熱流束化に応用することを目的として、マイクロスケール赤外・可視観察および物理数学モデル構築、高性能蒸発器構造の提案および実証、高熱流束 LHP の研究開発と高熱流束 LHP 内部の熱流動解析に取り組んだ。本研究の新規性は、(1)先行研究例のないマイクロスケール赤外・可視観察によって現象解明に取り組む点、(2)可視化に基づいて理論モデルを構築する点、(3)実験と理論に基づいてメカニズムを明らかにしながら要素レベルで蒸発器高性能化手法を提案・実証する点、(4)基礎知見を応用し、熱輸送距離の大きな高熱流束 LHP および 360°姿勢変更が可能な高熱流束 LHP をシステムレベルで実証する点、(5)蒸発器熱流動解析を統合した LHP 解析によってシステムレベルにおける蒸発器熱流動現象を明らかにする点の 5 点である。

第 1 章では研究背景として、宇宙機熱制御および熱エネルギー有効利用の重要性について述べ、LHP の動作原理と特長、高熱流束 LHP の研究開発動向、蒸発器内の熱流動現象の可視化、蒸発器内の熱流動解析に関する先行研究例、蒸発器高性能化手法に関する先行研究例を記した後、研究課題および本研究の目的を示す。

第 2 章では蒸発器内部の多孔体熱流動現象のマイクロスケール赤外・可視観察および熱流動物理モデル構築について記す。本章の位置づけは現象可視化と理論構築による基礎学理の深化である。本研究では蒸発器内部を模擬した観察部を顕微赤外カメラおよびマイクロスコプを用いて可視化した。観察には、polytetrafluoroethylene (PTFE)製(空孔径: 1.2 μm) およびステンレス製(空孔径: 1.0, 4.5, 22 μm)の 4 種類の多孔体試料を用いた。実験結果から算出した加熱部と蒸気間の熱伝達係数には 4 種の試料で共通した傾向が観察され、その要因は 3 種の熱流動現象によることを明らかにした。具体的には低熱流束負荷時に容器、多孔体、蒸気溝の固気液三相界線で形成される液体架橋表面で相変化が生じる Mode A、中熱流束時に多孔体と加熱板の接触面で核沸騰現象が発生するとともに三相界線の液架橋表面で相変化が生じる Mode B、高熱流束時に液架橋が消失し多孔体内部の気液界面で相変化が生じる Mode C である。また Mode B では核沸騰伝熱と液架橋表面での相変化双方の寄与によって、高い熱伝達性能を得られることが明らかとなり、この状態を維持することで蒸発器熱伝達性能向上が期待できることを示した。実験で観察された 3 種の動作モードを理論的に説明するため熱流動物理モデルを構築した。Mode A は離散化した液架橋内の局所的な伝導伝熱量と気液界面における蒸発熱量が保存する関係に基づいて界面温度を算出し、液架橋全体のエネルギーバランスから加熱板温度を算出し、最終的に予測熱伝達係数を求めた。Mode B は液架橋表面蒸発と核沸騰伝熱の組み合わせであることから、液架橋表面蒸発は Mode A と同じ計算方法により、核沸騰による熱輸送は表面の気泡度を考慮した熱伝達式を用いて算出した。各熱輸送量の割合は繰り返し計算によって求め、得られた加熱板温度を用いて予測熱伝達係数を求めた。Mode C は加熱板と多孔体間の接触熱抵抗と多孔体内の気液界面蒸発を考慮した伝熱モデルにより予測熱伝達係数を求めた。算出した予測熱伝

達性能と実験結果は特性の異なる 4 種の試料それぞれにおいて良好な一致を示した。また理論モデルに基づき、蒸発器高性能化につながる設計指針が(1)三相界線(TPCL)の増加、(2)多孔体と液体間の濡れ性改善、(3)蒸発器容器と液体間の濡れ性改善であることを明らかにした。

第 3 章では第 2 章で明らかにした高性能化指針を応用した高熱伝達多孔体構造の提案および実証について述べる。本章の位置づけは、第 2 章で明らかにした基礎学理を蒸発器高性能化に応用した要素レベルでの応用研究である。(1)について、蒸気溝幅を 0.2 mm, 0.5 mm, 1.0 mm, 2.3 mm, 3.0 mm と変化させた小型の PTFE, ステンレス試料を用いて性能評価を行った。実験の結果、溝幅の小さな、すなわち三相界線が長い試料ほど高熱流束時により高い熱伝達性能を示すことを明らかにした。また低熱流束時には溝幅が小さい試料の場合は蒸気溝内部が液で満たされ、溝から周期的に気液噴出が生じることで熱伝達性能が低下することを明らかにした。これによって要求熱流束に応じた最適溝幅設計が必要となることを示した。(2)について多孔体と作動流体間の濡れ性を改善するため、ステンレス試料(SS1.0 μm)への酸処理を実施し、熱伝達性能の評価を行った。熱伝達性能評価の結果、Mode B から Mode C へと遷移する熱流束が酸処理前：5.0 W/cm²から酸処理後：6.0 W/cm²となり性能が向上することが明らかとなった。SEM 観察によって明らかにした多孔体表面の幾何形状から、液架橋で生じる毛細管力を予測するモデルを構築した。多孔体濡れ性改善による性能向上メカニズムが濡れ性改善による液架橋毛細管力の向上であることを理論と実験の双方から明らかにした。(3)について、蒸発器容器内壁の濡れ性改善手法として複数の試料を用いて検証を行った。具体的には、SAM 膜(自己組織化単分子膜)の付加およびサンドブラストによる表面処理、パルスレーザー照射によるマイクロ溝加工の 3 種によって濡れ性改善を実施した。各試料について熱伝達性能の評価を行った結果、高熱流束条件において、SAM 膜付加試料：5.6 倍、サンドブラスト試料：7.0 倍、マイクロ溝試料：20 倍とそれぞれ熱伝達性能が大きく向上することが明らかとなった。蒸発器容器内壁の濡れ性改善によって、熱伝達性能が向上することを実証した。また、理論モデルによる検証によって各試料における熱伝達性能向上メカニズムを明らかにした。

第 4 章では、第 2, 3 章の知見である高性能化手法のうち三相界線(TPCL)の増加を、異なる 3 種の LHP システムに応用し、実証した結果を示す。本章の位置づけは、基礎的知見を実機搭載レベルの LHP に適用するシステムレベルの応用研究である。具体的には、(1)高熱流束 LHP 実証と蒸発器熱流動現象の解明、(2)民生機器搭載のための高熱流束 LHP の研究、(3)複数熱源からの排熱が可能なマルチエバポレータ型高熱流束 LHP への応用の 3 点である。システム設計のために構築した LHP 熱流動モデルを用いて、各システムへの三相界線長さの最適設計を行い、形状を決定した。(1)ではブロック型蒸発器を有する、熱輸送距離 550 mm の LHP を構築した。熱輸送性能評価の結果、最高熱流束は、熱輸送距離 550 mm 級で世界最高性能の 18.2 W/cm² (260 W)に達した。また第 2 章で構築した多孔体熱流動解析を統合した LHP モデルによって、LHP システムにおける詳細な熱流動解析を行った。その結果、

蒸発器内部に形成される液架橋形状の変化と熱伝達係数の関係、Mode B 動作時に核沸騰伝熱の寄与が熱流束の増加と共に増加することを定量的に明らかにした。(2)では、平板型高熱流束 LHP を構築し、抗重力状態を含む異なる 6 姿勢での動作特性を評価した。実験の結果、6 姿勢全条件で動作可能なこと、最高熱流束は 19.6 W/cm^2 (280 W)、最小熱抵抗は 0.06 K/W となることを明らかにした。(3)では、位置および発熱密度の異なる複数熱源からの排熱を可能にするマルチエバポレータ型 LHP を構築した。それぞれ幅 0.2 mm (本数:190)、 0.2 mm (本数:30)、 0.5 mm (本数:62)の蒸気溝を有し、蒸発器熱伝達性能が異なる円筒型蒸発器を設計した。熱輸送特性評価の結果、各熱源の熱流束に対応した熱輸送が可能であることを実証し、さらに一部の蒸発器に熱負荷が加わらない条件においても LHP が動作可能であること、最大熱負荷での LHP 起動が可能であることを実証した。

第 5 章では本論文の結論を述べ、今後の課題および将来の展望を示す。