

|      |              |
|------|--------------|
| 報告番号 | ※ 甲 第 11054号 |
|------|--------------|

## 主 論 文 の 要 旨

論文題目 マルチスケール気液二相熱流動解析に基づく  
ループヒートパイプ熱輸送機構の解明と  
高性能化に関する研究

氏 名 西川原 理仁

## 論 文 内 容 の 要 旨

本論文では、次世代熱輸送技術として有望な気体と液体との相変化を利用した熱輸送素子であるループヒートパイプ（LHP）に関して、LHP熱輸送機構の解明および高性能化を目的とし、蒸発器多孔体内気液二相流の詳細な3次元解析を含むLHPシステムとしての解析モデルの構築、蒸発器構造による高性能化方法の提案、樹脂多孔体を用いたLHPの開発、LHP熱性能におけるウィック熱伝導率の影響について記した。

LHPは、次世代宇宙機熱設計における基盤技術、また近年民生分野、電子機器の冷却などへの応用が可能な技術として期待されている。しかし、性能を支配する蒸発器の設計方法は確立されておらず、これは多孔体内気液二相熱流動の理解が十分でないことに起因している。またLHPのウィック材は従来のヒートパイプ(HP)に習い金属多孔体が多いが、近年、金属より熱伝導率の低い樹脂やセラミックなどの多孔体開発が進んでおり、多孔体特性の良いウィック開発が可能になりつつある。しかし、LHP熱輸送特性におけるウィック熱伝導率の影響は従来のHPとは同様ではなく、熱伝導率の低い新しい多孔体材料の適用基準が不明瞭であり、多孔体内気液二相熱流動の理解無くしては、十分な議論を行うことはできない。これまで蒸発器解析に関する研究は行われてきているが、気液二相状態における3次元の詳細な解析は行われておらず、ウィック熱伝導率、形状などの影響は十分に明らかにされていない。LHP技術の確立には、詳細な物理現象に基づくLHP蒸発器形状の最適設計方法の確立、高精度設計、次世代材料の適用基準の確立などが必要であると考えられ、これらを達成するには蒸発器多孔体内熱流動の詳細な物理を含むLHP解析が必要であると考え、本研究の目的とした。

第1章では、蒸発・凝縮を利用した熱輸送技術、LHPとの比較、LHPの特徴、動作原理、今日におけるLHPの研究開発、LHP解析、蒸発器解析、不安定動作、可視化、ウィック開発、マルチLHPについて述べ、本論文での目的を示した。

第2章では、LHP性能に最も影響を与える要素の一つであり、LHP開発において最も重要であるウィックの多孔体特性および熱伝導率の影響について述べた後、蒸発器温度に

おける低熱伝導性ウィックと高熱伝導性ウィックとの比較を定式化した。従来使用されてきた金属に代わり樹脂であるPoly Tetra Fluoro Ethylene (PTFE)の多孔体をウィックに適用した作動流体をエタノールとしたLHPの設計・製作・地上実験による性能評価について示した。起動を含むLHPの非定常特性を明らかにするため、一次元の運動量、エネルギー保存式を基にした過渡解析モデルを構築した。解析モデルについて述べた後、実験結果との比較により開発した解析の妥当性を評価した。解析結果は、蒸発器に関する熱伝達率をフィッティングさせることによって実験結果と一致した。さらなる高精度解析のためには蒸発器多孔体内の詳細な熱流動をシミュレーションすることが必要であることが示された。実験で明らかになった高熱負荷での蒸発器熱伝達率の低下は、加熱面付近のウィックに気相領域が形成されることが原因であると考えられたため、ウィックと蒸発器加熱面との間にマイクロオーダーの隙間を導入し気相領域の形成を抑制することを目的とした蒸発器構造を有するLHPを製作し、その有効性を実験により評価した。マイクロギャップの幅を500, 100, 50, 20, 0  $\mu\text{m}$ で実験したところ、20  $\mu\text{m}$ の蒸発器で熱伝達率が最大となり、PTFEウィックにおけるマイクロギャップの有効性が実験的に示された。さらに、作動流体をEthanol, Acetone, R134aの三種類で実験を行い、蒸発器熱伝達率における作動流体の物性、封入量の影響を明らかにした。実験より示された高熱負荷における熱伝達率の低下の原因を明らかにするために、マイクロオーダーの分解能を持つ赤外線サーモグラフィを用いて蒸発器を模擬した多孔体内熱流動観察を行った。観察された温度分布より高熱負荷では気相領域が形成されていることが示された。

第3章では、蒸発器設計の高精度化および蒸発器熱輸送機構の解明および高性能化を目的としたポアネットワークモデル (PNM)を用いたマイクロスケールの3次元気液二相熱流動解析モデルを構築した。モデルでは、詳細な流動、熱輸送、気液界面分布を求めため、多孔体の空孔径分布を考慮し、蒸発器ケースを含む計算領域を扱い、ケースの熱伝導方程式、ウィックのエネルギー保存式、多孔体内流動を連成して解いた。比較的低熱流束下における多孔体が液相で満たされた状態、高熱流束下における加熱面直下での気泡生成により多孔体に気相が存在する状態の二つの流動形態およびその遷移に関してシミュレーションを行った。液で満たされたウィックから気液二相状態のウィックへの遷移における界面形状を示し、高熱流束では凹凸を持った多孔体内の気液界面分布が示された。それぞれの状態における温度、圧力、流量分布および熱輸送特性の解析結果を示した。また、従来の1次元モデルと3次元モデルとの多孔体内の圧力損失および熱リークの見積もりの差を明らかにした。さらに、先行研究の二次元PNMを用いた解析結果との比較を行い、SUSの高熱伝導性ウィックでは熱流束に対する蒸発器ケースの過熱度の計算結果が一致した。しかし、PTFEの低熱伝導性ウィックでは本研究の方が蒸発器ケースの過熱度が低くなる傾向を示した。ウィックのエネルギー保存式の中の対流項の影響を調べた結果、対流項と熱伝導項との比を表すペクレ数が比較的大きくなるPTFEウィックにおいては、多孔体内の対流項の影響で気相領域の拡大が抑えられることが明らかになった。

第4章では、第3章での蒸発器解析とLHP解析とのモデルの統合を行い、LHPシステムとしての蒸発器性能を評価した。ウィック形状、作動流体 (Ethanol, Ammonia)、ウィック材料 (PTFE, SUS) をパラメータとした計算を行い、蒸発器熱伝達率に及ぼす影響を明らかにし、蒸発器高性能化における方針を示した。PTFE-Ethanol LHPにおいては、

グループ本数の影響が支配的であることが明らかになり、これは蒸発器ケースーウィックグループが共有する三相界線に熱流束が集中することに起因していることが示された。SUSウィックにおいては、PTFE同様グループ本数の影響に加えて、ウィックー蒸発器ケースの接触面積の影響も重要であることが示された。EthanolとAmmoniaでは物性の違いにより気液二相状態へ遷移する際の核生成位置が異なることが示された。各熱流束における多孔体内気液界面形状を示し、低熱流束下においては気液界面面積の増加により熱伝達率が上昇し、高熱流束下においては気相領域深さの増加により熱伝達率が低下するという多孔体内気液界面挙動と蒸発器性能の関係を明らかにした。さらに、第2章で実証したマイクロギャップを有する蒸発器についても解析モデルを構築し計算を行った。解析により、ギャップ内流れは2次元平行平板流れよりも流れが攪拌されており、ヌセルト数が高いことが明らかとなった。さらにギャップ幅に対する蒸発器熱伝達率の挙動は、10  $\mu\text{m}$ で熱伝達率が極大となる曲線を描きギャップの最適幅が存在することを解析により明らかにすることができ、第2章の実験に加えてPTFEウィックにおけるマイクロギャップの有効性を解析的にも示すことができた。ギャップが10  $\mu\text{m}$ より大きい領域ではギャップ層自体の熱抵抗増加の影響が大きくなり、10  $\mu\text{m}$ より小さい領域ではギャップ内流れの圧力分布が大きくなりそれに伴う飽和温度分布が大きくなる影響の二つのトレードオフがギャップの最適幅が存在する理由であることを明らかにした。またPTFE多孔体の空隙構造を明らかにするため、空間分解能0.27  $\mu\text{m}$ を有するX線CTにより内部構造の観察を行い、三次元再構築を行った。観察結果から二次元のポアネットワークを作成し、Throat長さがマイクロオーダーであることが分かった。観察された空隙構造と計算における仮想的な空隙構造との違いの影響を解析により示した。3次元解析から得られた知見をもとにPTFEウィックを用いた蒸発器形状による高性能化を実験により検証した。PTFEにおいては、従来構造の軸方向グループを持つウィックと蒸発器ケースーウィックグループの三相界線を長くするため、軸方向および周方向グループを組み合わせたウィックを用いて蒸発器を製作した。実験結果より、三相界線を長くしたウィックで本研究でこれまで行ってきた実験の最高性能、熱流束27,000  $\text{W}/\text{m}^2$ において熱伝達率2,600  $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ を達成し、三相界線長さが蒸発器熱伝達率に大きく影響を与えることが実験的にも明らかになった。周方向グループにより三相界線を長くした構造では、3次元グループ圧力分布の考慮がさらなる高性能化には必要であると考えられた。最後に、本研究で行ったウィック形状に関する蒸発器熱伝達率の実験結果のまとめを示した。

第5章では、本論文での結論を述べた後、今後の課題、将来の展望について記した。