

学位論文題名

マランゴニ効果を液帰還に利用した 二成分ヒートパイプに関する研究

学位論文内容の要旨

近年、通信や気象観測等への人工衛星の利用、日本人の有人宇宙飛行、国際宇宙ステーション計画等が契機となって、かつては夢の世界であった宇宙というものが現実的でより身近な存在として認識されるようになってきた。また一方においては、地球環境の破壊やエネルギーの枯渇、人口の増大等人類の存続に関わる問題が深刻化してきており、早急な対応が迫られている。これらの問題は地球の有限性に起因するものであり、宇宙開発やそれによって培われた技術は人類の未来に対する1つの鍵を握っているといえよう。このような中で代表的な宇宙技術の一つとして当初から用いられてきており、またその技術が地上の問題解決にも貢献しえたものとして、ヒートパイプをあげることができる。ヒートパイプはわずかの温度差で多量の熱を輸送できる高性能伝熱素子であるが、宇宙のような無重力場で使用する場合には凝縮した液体を蒸発部まで帰還させるためのウィックが必須であるとされてきた。しかし、このウィックの存在はヒートパイプの製造工程を複雑にしたり、熱抵抗を増加させたり、毛細管限界や沸騰限界によって輸送し得る熱量が制限されるという負の側面がある。本研究は、無重力場でもウィックなしで使用できるような濃度差マランゴニ効果を作動液帰還に利用した新しい型の二成分ヒートパイプの可能性について、理論解析、数値シミュレーション、地上実験、および微小重力実験により検討を行なったものである。本論文の概要は以下のとおりである。

第1章では、本研究の基本的な背景と問題点について述べた。

第2章では、マランゴニ効果と二成分ヒートパイプについて既往の知見を整理し、本論文で提案するマランゴニ効果を液帰還に利用した二成分ヒートパイプの概念について述べた。また、二成分系の気液平衡関係をもとにした簡単なモデルによって、このヒートパイプに適した作動流体の種類と仕込み液濃度の選択に関する指針を示した。

第3章では、このようなヒートパイプの実現可能性と問題点について具体的に調べるために、JAMICの落下施設を利用した微小重力実験を行なった。その結果、微小重力場における水・エタノール系二成分ヒートパイプ内の作動液の挙動は仕込み液濃度によって異なった様相を呈し、特に作動液濃度が5 mol%程度の場合には微小重力場においてウィックがなくても凝縮液の帰還が起こっていることが明らかにされた。

第4章では、マランゴニ効果による液帰還力を重力場で評価するために重力傾斜法の原理を適用して検討を行なった。実験の結果から、水・エタノール系では5～30 mol%、水・アセトン系では5～50 mol%の作動液濃度範囲において液帰還力が大きく現れることが示された。さらに、水・エタノール系および水・アセトン系の結果の違いは実際のヒートパイプ系に即した

NTU の値を用いることによって説明できることを示した。

第5章では、二成分ヒートパイプにおいてマランゴニ効果生起の基本となる表面張力分布形成のメカニズムを探ることを目的として、水・エタノール混合物の還流凝縮実験を行なうとともに、既往の物質移動理論にもとづいて考察を行なった。その結果、蒸気相の温度分布や作動液の濃度分布の測定結果から算出された表面張力の値は、仕込み液濃度が5 mol%以下の場合には高さ方向に有意な減少傾向を示し、微小重力場においてこれによって生じるマランゴニ効果はヒートパイプにおける凝縮液を蒸発部に帰還する力になりうることを示した。

第6章では、二成分ヒートパイプの凝縮部でみられるような自由表面からの物質流入をとまなう場合のマランゴニ対流について、気液界面の変形を考慮した境界適合座標を用いて数値解析を行なった。その結果、特に表面張力勾配が長さ方向に増加するほど液膜厚さは全体にわたって一様になる傾向を有しマランゴニ効果を液帰還に利用しようとする立場から見て好都合であること、マランゴニ効果の生じない断熱部の存在がヒートパイプにおける液帰還を阻害することにはならないことなどが示された。

第7章では無重力場において二成分ヒートパイプ内の液相および蒸気相で起こる熱・物質移動や、気液界面で起こる同時移動現象も考慮して総括的に解くことにより、系内の流れ場、温度場、濃度場とヒートパイプの条件との関係について考察するとともに、先に行なった解析や微小重力実験によって得られた結果と比較して検討を行なった。その結果、気相側の温度境界層および濃度境界層が十分発達していない冷却部入口付近においては気液界面の温度および濃度の変化が顕著で表面張力勾配が大きくなること、ヒートパイプの冷却部が長くなると長さ方向の表面張力勾配が緩やかになるために凝縮液膜の厚さが増加し、凝縮液が冷却部の一部分に滞留して液プラグが形成される要因になりやすいことが示された。

第8章では、微小重力下における水・エタノール混合蒸気の凝縮過程に及ぼす表面張力の影響について、微小重力実験により検討を行なった。その結果、通常重力下での凝縮は混合蒸気の濃度や冷却条件に応じて膜状・筋状・滴状の形態をとりうるが、微小重力下では凝縮液膜は不安定になって滴になりやすくまた滴径は増大していくことが示された。

第9章では、ヒートパイプとしては角型のガラス製二成分ヒートパイプを用い、航空機の放物飛行を利用した微小重力実験により検討を行なった。実験で得られた凝縮液の映像から、画像処理によってヒートパイプの冷却部に存在している作動液量を算出した結果、仕込み液濃度が50mol%と比較的高い場合を除いて、冷却部液量はほぼ一定速度で減少していた。画像データからヒートパイプの液帰還量を算定し、管内の液流動に関する基礎式から求められた液帰還量の推定値と比較した結果、オーダー的には両者は近い関係を与えており、本論文で考えているような機構によってマランゴニ効果による液帰還が起こることが明らかにされた。

第10章では本論文で提案した新しいヒートパイプの可能性についての総括的な考察を行なうとともに、ここで得られた知見の関連分野の中での位置付けを示し、今後の課題や問題点について述べている。

学位論文審査の要旨

主査	教授	篠原邦夫
副査	教授	井口 学
副査	教授	増田隆夫
副査	助教授	中島耀二
副査	教授	花岡 裕 (室蘭工業大学)

学位論文題名

マランゴニ効果を液帰還に利用した 二成分ヒートパイプに関する研究

近年、宇宙船地球号の人口、資源、エネルギーおよび環境問題の深刻化に伴い、夢の世界であった宇宙が、国際宇宙ステーション計画によって、確実に現実の研究対象になってきている。宇宙および有限な地球を人類の未来に役立てるためには、宇宙開発や地上で培われた科学技術を駆使して最適なアプローチを行う必要がある。ヒートパイプは、その代表的な技術の一つとして宇宙でも用いられてきているが、宇宙のような無重力場で使用するには、作動液帰還のためのウィックが必須であるとされてきた。しかし、このウィックの存在はヒートパイプの製造工程を複雑にし、毛細管限界や沸騰限界によって輸送し得る熱量が制限される等の弱点がある。

そこで、本研究では、無重力場でもウィックなしで作動液帰還に使用できる濃度差マランゴニ効果を利用した新しい型の二成分ヒートパイプを考案し、理論解析、数値シミュレーション、地上実験、および微小重力実験によって多面的にその可能性を検討しており、これは従来の研究に見られない全く新しい発想に立った試みである。

本論文では、第1章で本研究の背景と目的を述べた後、第2章では表面張力の濃度・温度依存性および気液平衡関係に基づいて、作動流体の種類と仕込み液濃度がヒートパイプの性能に与える影響を評価し、それらを適切に選択して濃度差によるマランゴニ効果を利用すれば、従来のウィック式のヒートパイプと比較して同等以上の性能を期待できることが示された。それを確かめるために、第3章で、落下施設を利用した二成分ヒートパイプの微小重力実験を行なっている。その結果、濃度5 mol%のエタノール水溶液を作動液としたヒートパイプにおいて、ウィックが存在しなくても濃度差マランゴニ効果によって実際に作動液の帰還が起こることを初めて見出した。

次に、このようなマランゴニ効果を利用した二成分ヒートパイプの可能性を、地上で検討するために、第4章で重力傾斜法による実験、第5章で二成分混合溶液の還流凝縮

実験を行なっている。その結果、水・エタノール系では5～30mol%、水・アセトン系では5～50mol%の作動液濃度において液帰還力が大きく現れることを見出し、これらが混合溶液の分離操作と同様の手法により説明できることを示した。また、水・エタノール混合物の還流凝縮過程における作動液濃度分布の測定結果を基に表面張力の値を算出して、仕込み液濃度が5 mol%以下の場合には蒸気の流れる管軸方向にマランゴニ効果の発現に有効な減少傾向が存在することを見出した。これによって、微小重力場においても、ヒートパイプ内の凝縮液を蒸発部に帰還する力を保証できることを明らかにして、その実現性を更に高めている。

一方、本研究の対象としているマランゴニ効果は従来のものとは異なり、自由表面からの物質流入をとまなう系についてのものであるため、第6章では新しい観点からの数値解析を行っている。これによる知見で特筆すべきことは、二成分ヒートパイプにおいてマランゴニ効果の生じない断熱部の存在が、必ずしも液帰還を阻害しないことである。また、第7章では、二成分ヒートパイプ内の液相および蒸気相で起こる熱・物質移動や、気液界面で起こる同時移動現象も考慮して総括的に解くことにより、二成分ヒートパイプに関する諸条件とマランゴニ効果との関係について、内部の流れ場、温度場、濃度場との関わりのもとで考察しているのは、工学的アプローチとして評価できる。

マランゴニ効果による作動液帰還にとって液膜の切断やプラグの発生は致命的障害になるため、蒸気の凝縮形態が膜状か滴状かは重大問題である。第8章では、微小重力場における混合蒸気の凝縮現象を落下実験によって調べた結果、蒸気の濃度や冷却条件に応じて形成される凝縮筋が、微小重力場では不安定になって滴になりやすく、その滴径は時間とともに増大していくことを見出している。重力場における蒸気の凝縮形態が表面張力の影響を受けることは周知の事実であるが、微小重力下における凝縮現象を取り扱った研究は極めて少なく、これらの知見から微小重力科学における新分野の開拓が期待できる。

第9章では、第8章までに得られた知見をふまえて、角型管の隅に沿った濃度差マランゴニ流を利用する発想を展開した。航空機のパラボリックフライトを利用した角型ガラス製二成分ヒートパイプに関して微小重力実験を行なった結果、凝縮液の映像から算定された液帰還量が理論的に推定される値に近いことが分かり、本研究のようなマランゴニ効果による液帰還の起きることを明らかにしている。また、ヒートパイプを角型にすることにより、帰還流が角型管の隅に沿って毛管現象により管壁に付着して流れるようになるため、液面の変動により生じる液プラグの形成を回避することができ、一般に利用されているマイクロヒートパイプにおいても、本研究で考案したマランゴニ効果を有効に引き出すことが可能であることを見出している。

第10章では本研究を総括し、本研究で得られた知見の関連分野における位置付けを示して、今後の課題や問題点についても述べている。

これを要するに、著者は、濃度差マランゴニ効果を作動液帰還に利用した新しい型の二成分ヒートパイプの可能性について、主として化学工学的な手法を用いて理論と実験の両面から検討した結果、種々の有用な新知見を得たものであり、化学工学、伝熱工学および宇宙環境利用工学の新展開に対して貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。