

氏名	岡崎 峻		
学位の種類	博士(工学)		
学位記番号	博甲第7726号		
学位授与年月日	平成28年3月25日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当		
審査研究科	システム情報工学研究科		
学位論文題目	マルチループ型ヒートパイプの熱輸送機構と大型システムへの適用		
主査	筑波大学 教授	博士(工学)	阿部豊
副査	筑波大学 教授	博士(工学)	西岡牧人
副査	筑波大学 准教授	博士(工学)	藤野貴康
副査	筑波大学 准教授	博士(工学)	金子暁子
副査	筑波大学 教授(連携大学院)	博士(工学)	杉田寛之 (宇宙航空研究開発機構)
副査	電気通信大学 教授	博士(工学)	大川富雄

## 論文の要旨

本研究では、広温度範囲で動作可能なマルチループ型ヒートパイプの開発と動作実証ならびにシミュレーションによる熱輸送機構の解明を行っている。その結果、マルチループ型ヒートパイプでは、加熱部から輸送された熱が冷却部で周囲環境に放熱されること、冷却部下部で作動流体はサブクールされ次のループに流入すること、さらに加熱部から冷却部への熱輸送が、低熱負荷では顕熱、高熱負荷では潜熱が支配的になることを明らかにした。

加熱部での相変化には、過熱度が必要な条件と飽和蒸気圧曲線上で相変化が起きる条件が存在している。過熱度を要する条件では、加熱部で飽和温度よりも高温部が観測されるため加熱部温度が不均一になる。ボイド率が約0.97になる高熱負荷条件で流動様式が噴霧流に遷移し加熱部上部で管内壁が乾くため、マルチループ型ヒートパイプは最大熱輸送量を迎えていると考察される。また、ボイド率によって最大熱輸送量の予測が可能なことを明らかにした。さらに、広温度範囲、高熱負荷条件で実験結果を再現可能なシミュレーションコードを、1次元の均質流によってモデル化した。作成したシミュレーションコードによって、マルチループ型ヒートパイプの熱輸送特性に対して、温度・流速・ボイド率の実験結果とシミュレーション結果が一致していることを示した。これにより、体積力が流体の駆動力と考えたモデルによって、マルチループ型ヒートパイプの熱輸送性能予測が行えることを明らかにした。このシミュレーションモデルを用いて、GAPSプロジェクトにおいてダークマター観測が行われる南極上空高度約35 kmにおいて想定される、GAPS南極フライト実験を想定した熱環境において、GAPSに搭載されるSi(Li)検出器が、マルチループ型ヒートパイプによって、フライト観測中に検出器の要求温度である $-35^{\circ}\text{C}$ 以下に制御可能であることを示した。

## 審査の要旨

### 【批評】

GAPS (General Anti-Particle Spectrometer) は、宇宙線中の反粒子の高感度探査を通じて、未知の宇宙物理過程を探る事を目的として開発されているものであり、2010年代後半以降に南極での気球実験を予定している。南極での気球実験では、観測の要求から Si (Li) 検出器を  $-35^{\circ}\text{C}$  以下に保つ必要があること、Si (Li) 検出器の内部発熱が低密度で広範囲に分布していること、使用できる電力や重量が限られているなどの課題があった。これらの課題は、いずれも現時点において解決されておらず、また解決にむけての方策も示されていない極めて困難なものであった。2010年代後半以降に予定されている GAPS を用いた南極での気球実験を成功させるためには、電力を使用しない熱輸送デバイスの開発が必要不可欠であった。

本研究は、このような課題を解決するために、GAPS に適用可能な電力を使用しない熱輸送デバイスとして、マルチループ型ヒートパイプを開発し、その作動原理に関わる物理を明らかにするとともに、シミュレーションコードの開発により、南極での気球実験に対する適用性評価を行ったものである。

本研究において開発したマルチループ型ヒートパイプは、内径 1.0 mm 程度の細管で構成され、管内部に飽和状態の作動流体が封入された熱輸送デバイスである。垂直の加熱部と冷却部、それらを断熱部の管で結合し 1 ループを構成している。これらを、一筆書きで多ループ結合させることでマルチループ型ヒートパイプを構成している。

本研究では、まず、広温度範囲での動作実験を行って、マルチループ型ヒートパイプにおいては、加熱部と冷却部のボイド率分布から得られる体積力が流体を流動させる駆動力として作用し、熱輸送を行っていることを明らかにした。さらに、体積力が流体の駆動力と考えた 1 次元均質流モデルに基づくシミュレーションコードを新たに開発し、このシミュレーションコードと実験結果を比較検討することによって、マルチループ型ヒートパイプ内における温度、流速、ボイド率分布ならびに軸方向温度分布と質量流量が、本解析コードによって再現可能であることを示した。この結果は、細管を用いたマルチループ型ヒートパイプにおける熱輸送機構が、1 次元均質流によって物理的にモデル化することが可能であることを示すものであり、学術的にも貴重な成果である。最終的に、本研究で明らかにした知見は、マルチループ型ヒートパイプが、南極実験に用いられる GAPS システムに使用可能であることを示すものであり、科学的にも技術的にも極めて重要かつ挑戦的な課題を解決しているものと評価される。

### 【最終試験の結果】

平成 28 年 2 月 8 日、システム情報工学研究科において、学位論文審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、学位論文審査委員全員によって、合格と判定された。

### 【結論】

上記の学位論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。