

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K14956

研究課題名(和文)多孔体核沸騰素過程の理解に基づく超低熱流束ループヒートパイプの創出

研究課題名(英文) Study on ultra-low heat flux loop heat pipe based on understanding of a nucleate boiling phenomena in a porous medium

研究代表者

小田切 公秀 (Odagiri, Kimihide)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・特任助教

研究者番号：50866481

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：毛細管力駆動の多孔質体熱流動系における核沸騰現象および濡れ制御特性を明らかにし、0.01 W/cm²級の低熱流束条件で動作可能な、超低熱流束ループヒートパイプ(LHP)技術の確立を本研究の目的とする。マイクロスケール赤外・可視観察装置および、顕微ハイスピード観察装置を用いて多孔体核沸騰現象観察を行い、加熱部の濡れ性が熱伝達係数に及ぼす影響、低熱流束条件で高い熱伝達性能が得られる多孔質体形状を明らかにした。本知見に基づき低熱流束LHPを設計・製作・評価し、最小熱流束0.02 W/cm²と従来技術に対して極めて低い熱流束条件での動作実証に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

蒸発器内部で生じる毛細管力駆動の多孔質熱流動現象は、LHP性能に大きく影響を与えるため、そのメカニズムを明らかにすることは重要である。特に知見の不足していた、濡れ性制御が熱伝達係数に与える影響、低熱流束条件での高熱伝達構造、気泡核生成過程について可視化によって理解を深めた点で、本研究は学術的意義がある。また高効率な低熱流束LHPの技術実証は、将来の宇宙科学・探査ミッションの熱設計自由度向上に資する。さらに本成果は宇宙機および地上用機器の熱制御技術に幅広く活用することが可能であり、社会的意義は大きい。

研究成果の概要(英文)：The purposes of this study are (a) To clarify nucleate boiling phenomena and the effect of wettability control in a capillary porous medium, and (b) To establish a low heat flux loop heat pipe (LHP) technology that operates under heat flux conditions of 0.01 W/cm² class. By using the microscale infrared/visible observation system and the microscale high-speed observation system, the nucleate boiling phenomena in a porous medium was observed. The effect of wettability of the heating plate on the heat transfer coefficient and the geometry of the porous media that enables high heat transfer performance under low heat flux conditions were clarified. Based on them, a low heat flux LHP was designed, fabricated, and tested. The operation at a heat flux of 0.02 W/cm² which is extremely low heat flux conditions compared to conventional LHPs was successfully demonstrated.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：伝熱工学 多孔質体 核沸騰 気液二相流 低熱流束 ループヒートパイプ

1. 研究開始当初の背景

熱的リソースが限られる深宇宙探査においては、分散して存在する低発熱密度機器の熱エネルギー有効利用がミッション成立のために重要となる。本研究では、省エネルギーで高効率熱輸送が可能なループヒートパイプ(Loop heat pipe, LHP)に着目する。LHPは大容量化・高熱流束化に関する研究が数多く行われてきた一方で、 0.01 W/cm^2 以下で動作可能な低熱流束 LHP の研究は数少ない。これは LHP の動作で重要となる多孔体毛細管駆動の熱流動現象の知見や、濡れ制御や多孔質体蒸気溝形状最適化などの、低熱流束で高熱伝達性が得られる条件に関する知見が不足してきたことに起因する。

2. 研究の目的

本研究は、毛細管力駆動の多孔質体熱流動系における核沸騰現象および濡れ制御特性を明らかにし、 0.01 W/cm^2 級の低熱流束条件で動作可能な、超低熱流束ループヒートパイプ(LHP)技術の確立を目的とする。

3. 研究の方法

上述の研究目的を達成するために、(1)マイクロスケール赤外・可視観察装置による多孔質体熱流動現象の可視化、(2)LHP システムレベルでの超低熱流束 LHP 実証に分けて研究を遂行した。図 1 に(1)に用いた実験装置の外観を示す。本装置は LHP 蒸発器内部を模擬したものである。液リザーバからステンレス多孔質体の毛細管力によって、加熱面まで液が吸い上げられ、加熱面で熱流束が加えられると蒸発が生じ、熱流動が発生する。加熱板、多孔質体、蒸気溝が視野に入る領域を、顕微赤外カメラおよびマイクロスコープによって観察した。本研究の目的の一つである、濡れ制御が熱流動特性に与える影響を明らかにするため、加熱板表面の微細構造の有無、蒸気溝幅が異なる多孔質試料(1.0 mm, 0.5 mm, 0.2 mm)を用いて、それぞれの熱伝達係数、気液界面挙動を評価した。また、周期的な核沸騰現象、気泡核生成現象は、ハイスピードマイクロスコープを用いて観察を実施した。(2)については、(1)の知見を反映し、蒸気溝 1.0 mm のステンレス多孔質体をウィックとして用いた円筒型蒸発器を有する低熱流束 LHP を構築し、実証試験に臨んだ。図 2 に装置の外観を示す。LHP 熱輸送距離は 2 m とし、宇宙環境を模擬した低温熱真空環境内部で水平姿勢で試験を行い、最小熱流束(熱輸送量)、最大熱流束(熱輸送量)を評価した。

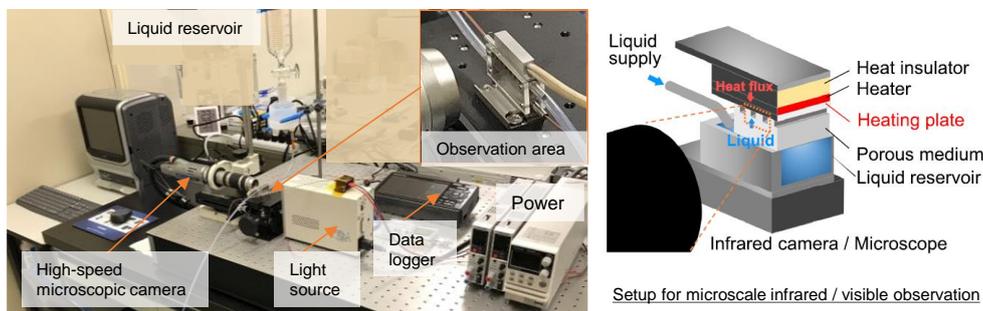


図 1 多孔質体熱流動現象観察装置

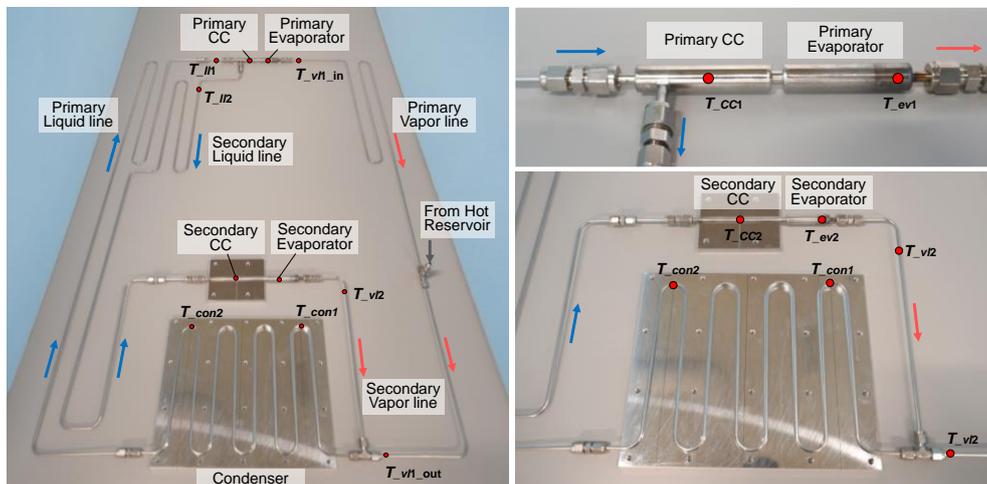


図 2 低熱流束ループヒートパイプ外観

4. 研究成果

(1)について、マイクロスケール赤外・可視観察装置を用いて算出した、蒸気溝幅が異なるステンレス多孔質体試料(空孔半径 $4.5\ \mu\text{m}$, 溝幅 $1.0\ \text{mm}$, $0.5\ \text{mm}$, $0.2\ \text{mm}$)の熱伝達係数の比較結果を図3に示す。なお、それぞれ微細構造有り(図中 Micro-grooved, 接触角 0°)と微細構造無し(図中 Normal, 接触角: $8.2\pm 1.3^\circ$)の比較も示す。図3より、中～高熱流束において、どの蒸気溝幅の条件においても微細構造有り試料が高い熱伝達係数を示すことが明らかとなった。また、低熱流束条件では、微細構造の有無で熱伝達係数に差が生じない一方で、蒸気溝幅 $1.0\ \text{mm}$ で高い熱伝達性能が得られることが明らかとなった。周期的な核沸騰現象、気泡核生成現象のハイスピードマイクروسコープによる観察結果を図4に示す。本撮像は $500\ \text{fps}$ で実施した。図4から蒸気溝内部で加熱された多孔質体表面から気泡核が生成され、成長、離脱する様子が分かる。本現象は、多孔質表面のある位置で周期的に発生することも確認された。核生成が促進される多孔質空孔径分布、形状の調査、核沸騰熱伝達モデルへの反映が課題であり、さらなる研究が必要である。

(2)低熱流束 LHP について、作動流体を窒素とする条件で、宇宙環境を模擬した低温真空環境内部で水平姿勢で試験を実施した。その結果、最小熱負荷は $0.5\ \text{W}$ (熱流束 $0.02\ \text{W}/\text{cm}^2$)、最大熱負荷は $24\ \text{W}$ (熱流束 $0.96\ \text{W}/\text{cm}^2$) での動作が確認された。低熱流束側の目標性能 $0.01\ \text{W}/\text{cm}^2$ に及ばないものの、従来の LHP に対して極めて低い熱流束条件での動作が本研究によって実証された。

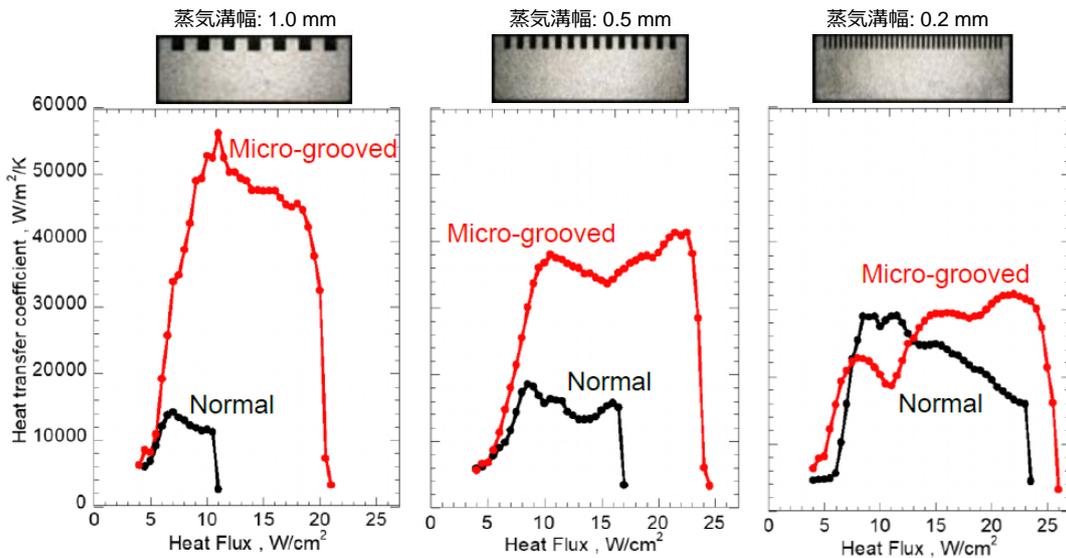


図3 多孔質体蒸気溝幅および加熱板濡れ性が熱伝達係数に与える影響

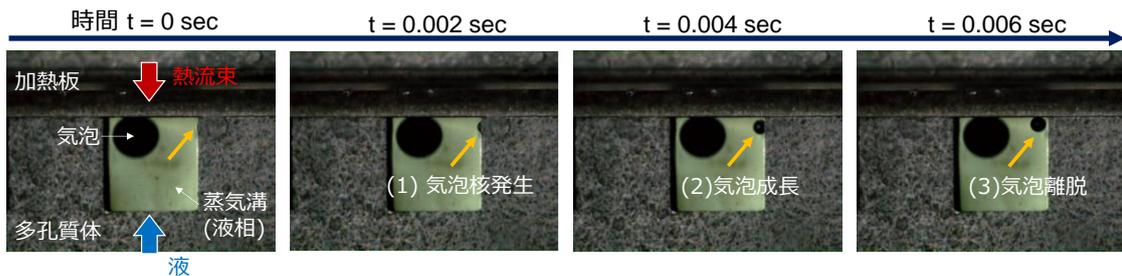


図4 顕微ハイスピード熱流動観察装置を用いた多孔体核沸騰(核生成)観察結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Odagiri Kimihide, Nagano Hosei, Ogawa Hiroyuki	4. 巻 158
2. 論文標題 Experimental investigation on thermal characteristics of a capillary pumped loop with different reservoir locations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119964	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y. Nakatsugawa, K. Odagiri, A. Ueno, and H. Nagano	4. 巻 Accepted
2. 論文標題 Relation between triple phase contact line and vapor groove width for enhancing thermal performance of a loop heat pipe evaporator	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 X. Chang, T. Adachi, K. Odagiri, H. Ogawa, and H. Nagai
2. 発表標題 Design study of cryogenic loop heat pipe for space application
3. 学会等名 17th International Conference on Flow Dynamics（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Nakatsugawa, K. Odagiri, and H. Nagano
2. 発表標題 Thermo-fluid behavior in a micro-grooved evaporator of LHP based on microscale infrared / visible observations
3. 学会等名 The 31st International Symposium on Transport Phenomena（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Odagiri, H. Nagano, and H. Ogawa
2. 発表標題 Thermo-fluid characteristics of a capillary pumped loop with different reservoir locations
3. 学会等名 50th International Conference on Environmental Systems (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 永井大樹, 常新雨, 安達拓矢, 小川博之, 篠崎慶亮, 澤田健一郎, 西城大, 金城富宏, 小田切公秀, 秋月祐樹, 長野方星, 上野藍
2. 発表標題 極低温における熱制御
3. 学会等名 第21回宇宙科学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 常新雨, 小田切公秀, 安達拓矢, 小川博之, 永井大樹
2. 発表標題 宇宙機の極低温ミッション用ループヒートパイプの設計検討
3. 学会等名 令和2年度宇宙航行の力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------