

令和 6 年 6 月 6 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03906

研究課題名（和文）自励振動型ヒートパイプの流動様式決定機構の解明とその制御による熱輸送特性向上

研究課題名（英文）Clarification of determining mechanism of internal flow behavior and improvement of operating characteristics of oscillating heat pipes

研究代表者

安藤 麻紀子（Ando, Makiko）

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・主任研究開発員

研究者番号：60748094

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,500,000円

研究成果の概要（和文）：自励振動型ヒートパイプ（Oscillating Heat Pipe, OHP）の熱輸送性能向上には、内部流動を循環流化する必要がある。本研究では逆止弁の流動抵抗による流れの循環流化に着目した。流動抵抗と内部流動の相関を体系的に明らかにするとともに、熱輸送性能向上効果を最大化するために望ましい逆止弁の条件を導出した。また、従来用いられてきたフローティングタイプ逆止弁に代わり、駆動部品を持たない整流機構の検討と試作評価を行った。その結果、Interconnecting channel（隣り合う流路を結ぶ斜めバイパス流路）という非常に簡易な方法で有意な性能向上効果が得られることを実験的に示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電子機器の高機能・高性能化に伴う高発熱化に伴い、その排熱手段は業界共通の大きな課題である。逆止弁付き自励振動型ヒートパイプは高い熱輸送性能を持ち、狭い隙間からも排熱可能であるが、逆止弁の流動特性が内部流動に及ぼす影響については、これまで体系的に整理されていなかった。本研究で逆止弁の流動抵抗/レイアウトと自励振動型ヒートパイプの内部流動/熱輸送性能の相関を明らかにし、それに基づいて望ましい逆止弁の条件を定量的に示したことは、今後の自励振動型ヒートパイプの設計指針となる意義深いものである。また、より簡易な整流機構による熱輸送性能向上についても実現可能性を示した。

研究成果の概要（英文）：To improve the thermal performance of oscillating heat pipes (OHPs), it is necessary to make the internal flow circulating rather than oscillatory. In this study, we focused on the effect of flow resistance of a check valve. The correlation between flow resistance and internal flow was systematically clarified, and the desirable conditions of check valves were suggested for maximizing the thermal performance of OHPs. In addition, a rectifying mechanism with no-moving parts was investigated and evaluated as an alternative to the conventionally used floating-type check valves. As a result, it was experimentally demonstrated that a very simple method called "interconnecting channel" (diagonal bypass channel connecting adjacent channels) can significantly improve the thermal performance of OHPs.

研究分野：熱工学

キーワード：自励振動型ヒートパイプ 逆止弁 循環流

1. 研究開始当初の背景

近年、電子機器の高性能化に伴う発熱量増加や部品の高密度実装による発熱密度の増加が進み、狭い空間から高効率に排熱する方法が求められている。これは宇宙機のみならず、地上用の電子機器、自動車等の様々な業界が共通に抱える大きな課題である。このような課題の解決策となりうるのが自励振動型ヒートパイプ (OHP, Oscillating Heat Pipe) である (図 1(a))。OHP は流れが循環流であるときに高い熱輸送性能を示すことが知られており、図 1(b)のように流路に逆止弁を設けることによって高い熱輸送性能を得ることができる^[1]。著者らは図 2 のようなフローティングタイプ逆止弁を用い、6000W/mK という高い実効熱伝導率を持つ逆止弁付き OHP の宇宙実証に成功している^[2]。このように逆止弁付き OHP は高い技術水準に達したといえるが、一方で本来シンプルな構造である OHP に逆止弁という駆動機構を設けることで、ハードウェアの複雑化や製造コスト増加等のデメリットがあることは否めない。熱問題を抱える様々な業界への普及を考えると、より簡易な方法で流れを循環流化し、高い熱輸送性能を発揮する OHP を実現することが求められる。

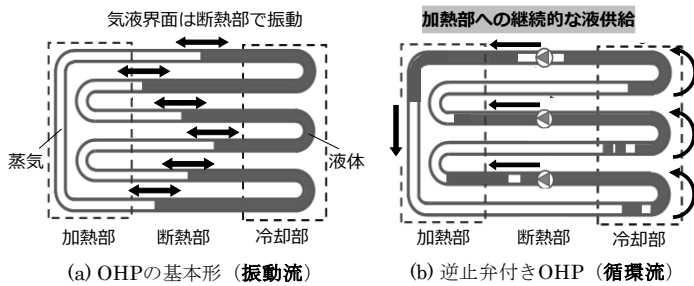


図 1 OHP の基本形と逆止弁付き OHP

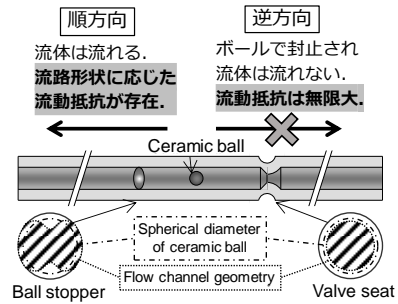


図 2 フローティングタイプ逆止弁

2. 研究の目的

本研究の目的は大きく分けて以下の 2 点である。

- (1) OHP 内の流れが循環流化するメカニズムを明らかにする。著者らの先行研究に基づき、本研究では循環流化に大きく影響する因子として特に流動抵抗に着目する。逆止弁は流動抵抗の制御によって循環流化を図る方法の一つであるが、流動抵抗の値・レイアウト等が OHP の内部流動及び熱輸送特性にどのような影響を及ぼすかは定量的に明らかになっておらず、現象解明に基づいた体系的な理解が必要である。
- (2) 上記で明らかにしたメカニズムに基づき、より簡易な方法で OHP 内の流れを循環流化し高い熱輸送性能が得られる整流機構を提案しその効果を実証する。

3. 研究の方法

(1) 流動抵抗に着目した循環流化のメカニズム解明

逆止弁付き OHP を想定し、逆止弁の流動抵抗値及びレイアウトが内部流動及び熱輸送性能にどのような影響を及ぼすかを検討した。流動抵抗値の影響は主に数値解析によって検討した。使用した数値解析モデルの模式図を図 3 に示す。本モデルは逆止弁付き OHP 内の液体スラグ/蒸気プラグの運動を模擬できる非定常解析モデルであり、逆止弁の順方向/逆方向それぞれの流動抵抗をパラメータとした解析を行うことで、逆止弁の流動抵抗値と OHP 内部流動の相関を考察した。また、逆止弁レイアウトについては、前述の理論モデルを用いた数値解析を行うとともに、逆止弁レイアウトが異なる OHP を用いた実験によってその影響を明らかにした。実験に使用した OHP の外観 (一例) を図 4 に示す。

(2) より簡易な方法で循環流化する方法の検討・実証

(1)の結果に基づき、できるだけ簡易で OHP 内の流れを循環流化できる整流機構を検討した。

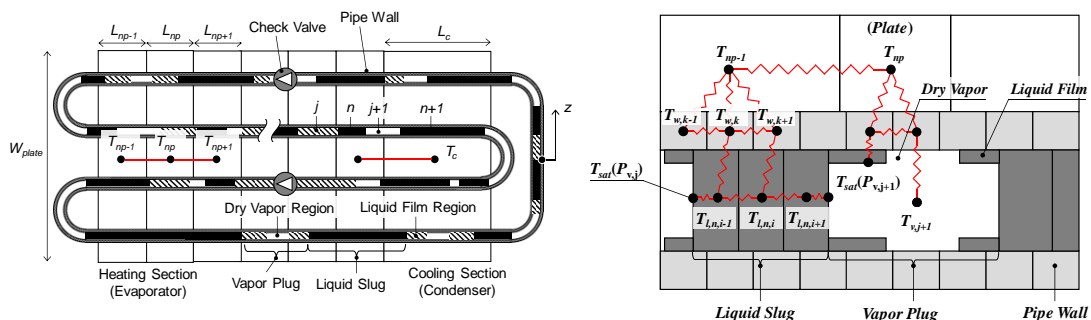


図 3 逆止弁付き OHP 数値解析モデルの模式図と流路内の熱回路網

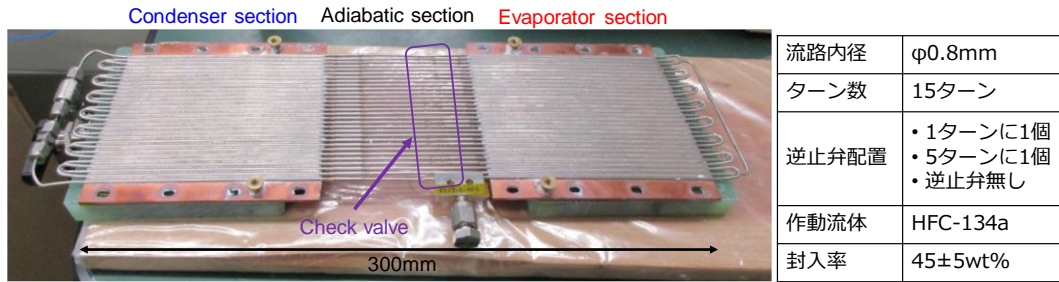


図4 逆止弁配置の影響評価に使用した OHP の外観 (一例) と主な仕様

有望と思われる方法についてはその整流機構を備えた OHP を試作し、動作特性試験を行った。整流機構を持たない OHP との比較により、整流機構の効果を評価した。

4. 研究成果

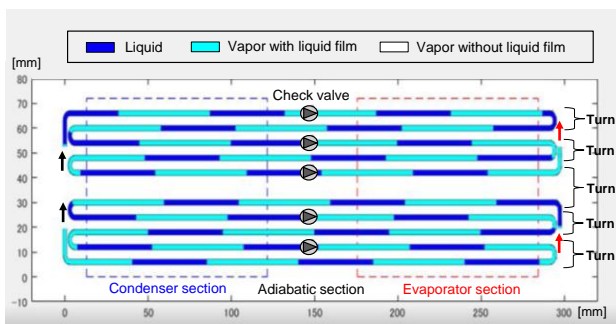
(1) 流動抵抗に着目した循環流化のメカニズム解明

① 逆止弁流動抵抗値の影響

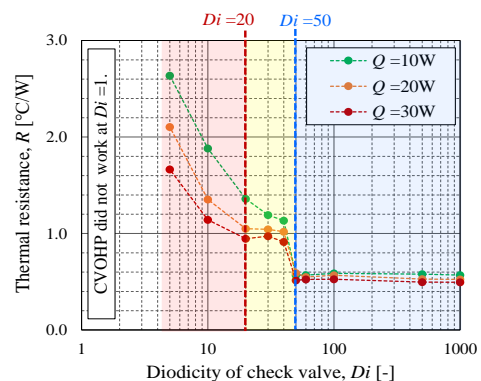
まず、逆止弁の流動抵抗値が内部流動及び熱輸送特性にどのような影響を及ぼすかを、数値解析によって検討した。ここでは、逆止弁の流動抵抗を表す指標として流動抵抗係数 ($=\Delta P/(\rho u^2/2)$)、 ΔP は逆止弁通過時に生じる圧力損失、 ρ は流体の密度、 u は流速を導入する。順方向・逆方向それぞれに対して異なる流動抵抗係数が存在する。また、順方向に対する逆方向の流動抵抗係数の比を **Diodicity** (流動抵抗比) と定義する。

数値解析では図 5(a)のように、各ターンの断熱部に逆止弁を 1 個持つ 5 ターン OHP を模擬し、順方向流動抵抗係数と **Diodicity** をパラメータとして解析を行った。気液が均等に分布した初期状態から解析を開始し、OHP 温度が定常に達した際の蒸発部-凝縮部平均温度差と蒸発部に与えた熱負荷から OHP の熱抵抗を算出した。図 5(b)に順方向流動抵抗係数: 100, **Diodicity**: 1~1000, 熱負荷: 10, 20, 30W に対する解析結果を示す。**Diodicity** に対する熱抵抗の変化傾向から、逆止弁による熱輸送性能向上効果を最大化するためには、50 以上の **Diodicity** が望ましいことがわかった。図 2 のフローティングタイプ逆止弁では、逆方向流をほぼ完全に封止できるため、**Diodicity** を無限大と見なせるが、図 5(b)の結果はそこまで **Diodicity** が大きくなくても十分に熱輸送性能向上効果が得られることが示唆している。また、熱抵抗の変化傾向は 3 つの領域に大別でき、これは内部流動の様子と密接に関係していることもわかった。最も **Diodicity** が高い領域 (50 以上) では流路全体に渡って流動が活発で、液体スラグが継続的に蒸発部へ供給されるとともに、長い液体スラグがターンを跨いで循環する。よって、流路表面が乾くことが殆ど無いことに加え、高速循環する液体スラグの対流熱伝達による寄与も多く得られるため、熱輸送性能は大きく向上する。一方、**Diodicity** が 50 未満の領域では、液体は凝縮部に長い液柱を形成して留まるようになり、蒸発部への液体供給は間欠的になった。特に **Diodicity** が 20 以下になると、OHP 内を一つの波が伝播するようになり、蒸発部が乾きあがる時間帯が長くなるため、熱抵抗は大きく増加した。なお、解析対象とした 5 ターン OHP は逆止弁無しでは動作しなかったことから、**Diodicity** が低い場合でも有意な動作特性改善効果は得られると言える。

なお、**Diodicity** だけでなく順方向/逆方向の流動抵抗係数自体についても、望ましい条件があることが数値解析により示唆された。順方向流動抵抗係数が 100 を超えると、**Diodicity** を非常に大きくしたとしても内部流動は間欠的な循環に留まり、熱抵抗が下がりにくい。また、**Diodicity** に関わらず、逆方向流動抵抗係数が一定以上の値でなければ、スタートアップに長い時間を要することもわかった。加熱開始後、OHP 内の液体スラグは蒸発部から凝縮部へ徐々に移動しようとするが、逆止弁がその動きを阻み蒸発部側へ液体スラグを押し戻す。これにより蒸発部に液体スラグが再供給されると、沸騰をトリガーにしてスタートアップに至る。



(a) 数値解析モデルにおける流路レイアウト



(b) 熱抵抗と流動抵抗比の相関 ($\xi_f = 100$)

図5 逆止弁流動抵抗比が OHP 熱輸送性能に及ぼす影響の数値解析検討

逆方向流動抵抗係数自体が小さいと、蒸発部から押し出された液体スラグを再度蒸発部へ押し戻す効果が弱まり、スタートアップが遅くなる。解析の結果、逆方向流動抵抗係数が 1000 を下回るとスタートアップに要する時間が著しく増加することがわかった。

② 逆止弁レイアウトの影響

逆止弁レイアウトが内部流動及び熱輸送特性に及ぼす影響については、逆止弁の個数・位置が異なる OHP を用いた実験及び数値解析により検討した。

図 6 は逆止弁個数が異なる 15 ターン OHP の熱輸送特性実験から熱抵抗を算出したものである。逆止弁の個数は OHP の熱抵抗に大きな影響を及ぼすことが分かる。また、逆止弁個数を変えた数値解析の結果からは、逆止弁が各ターンに 1 個から 5 ターンに 1 個に減ることにより、逆止弁から離れたターンでは整流効果が及ばず逆流が発生し、蒸発部で生じる圧力上昇を流体の駆動力として効率的に利用できていないことが示唆された。その結果、液体の大部分は長い液柱を形成して凝縮部に滞留してしまう。液柱の先端が蒸発部入口に到達すると沸騰が起きるものの、沸騰回数は大きく低下する。このことは流体を駆動する力を減少させると同時に、蒸発部内を通過する液体スラグ数の減少も意味するため、蒸発部内が乾きあがりやすくなり熱抵抗増加を招く。なお、逆止弁個数によるスタートアップ特性への影響は殆ど見られなかった。これは、加熱開始後に蒸発部から押し出されようとする液体スラグを、どこか 1 箇所でも蒸発部へ再供給できれば沸騰が発生しスタートアップに至るためである。

また、逆止弁位置の影響については逆止弁を 1 個だけ持つ 5 ターン OHP を対象として数値解析により検討した。逆止弁を断熱部に置いた場合と凝縮部の戻り管（大きな U 字流路）に配置した場合では、熱抵抗には大きな差は無かったが、後者のほうがスタートアップに長い時間を要した。この差は加熱開始後の液体スラグの動きによって説明できる。図 7 はスタートアップ時点での OHP 内気液分布の違いである。前述の通り、OHP のスタートアップには加熱開始後蒸発部から押し出されようとする液体スラグを押し止め、蒸発部へ再供給することが重要である。しかし、逆止弁を凝縮部の戻り管に配置した場合には断熱部から距離が遠く、液体を押し戻す働きが弱い。その結果、液体スラグも液膜も蒸発部から後退し、断熱部に留まる液体スラグでの沸騰を待つことになるため、スタートアップに要する時間が大幅に増加する。

以上の通り、逆止弁の流動抵抗／レイアウトと OHP 内部流動／熱輸送性能の相関から、OHP の動作特性向上効果を最大化するのに望ましい条件が明らかとなった。逆止弁単体としては、「順方向流動抵抗係数：100 以下」、「Diodicity：50 以上」、「逆方向流動抵抗係数：1000 以上」が望ましい。また、逆止弁のレイアウトについては、「1 ターンに 1 個」とし、「断熱部に配置」するのが良い。このような具体的な指標は今まで体系的に整理されておらず、今後の OHP 設計指針となる意義深いものである。

(2) より簡易な方法で循環流化する方法の検討・実証

従来用いていたフローティングタイプ逆止弁に代わり、より簡易な方法で OHP の内部流動を循環流化する方法を検討した。方法の選定に当たっては、駆動部品が無いこと、組み込みの容易性、寸法（極端に大きな容積を必要としない）等を考慮した。先行研究の調査も含めて検討した結果、適用可能性がある方法として、テスラバルブ¹³⁾、ノズル形状、異径流路、Interconnecting channel¹⁴⁾の 4 つを選定した。テスラバルブとノズル形状は逆止弁の考え方に近いが、駆動部品が無い。異径流路は隣り合う流路に差を設けることで流動抵抗及び毛細管力に差を生み出し、流れを一方に整流しようとするものである。Interconnecting channel は蒸発部または凝縮部

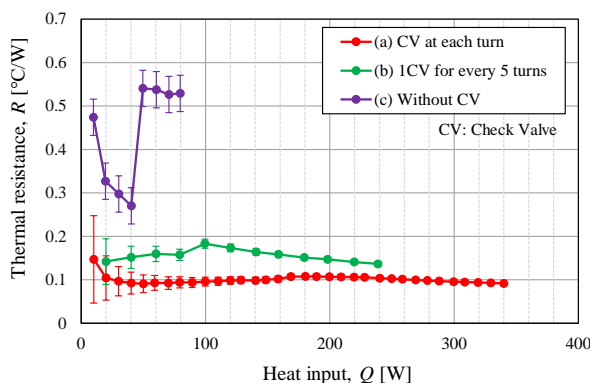
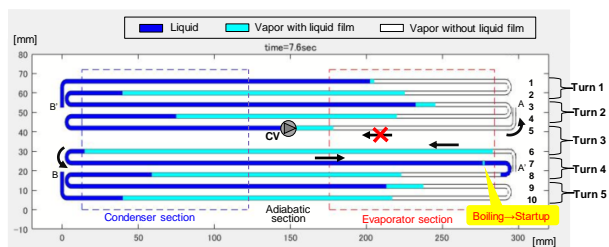
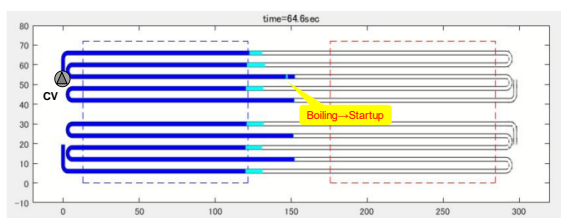


図 6 逆止弁個数が異なる OHP の熱抵抗



(a) 断熱部に逆止弁あり（加熱開始7.6秒でスタートアップ）



(b) 凝縮部に逆止弁あり（加熱開始64.6秒でスタートアップ）

図 7 逆止弁個数が異なる OHP の熱抵抗

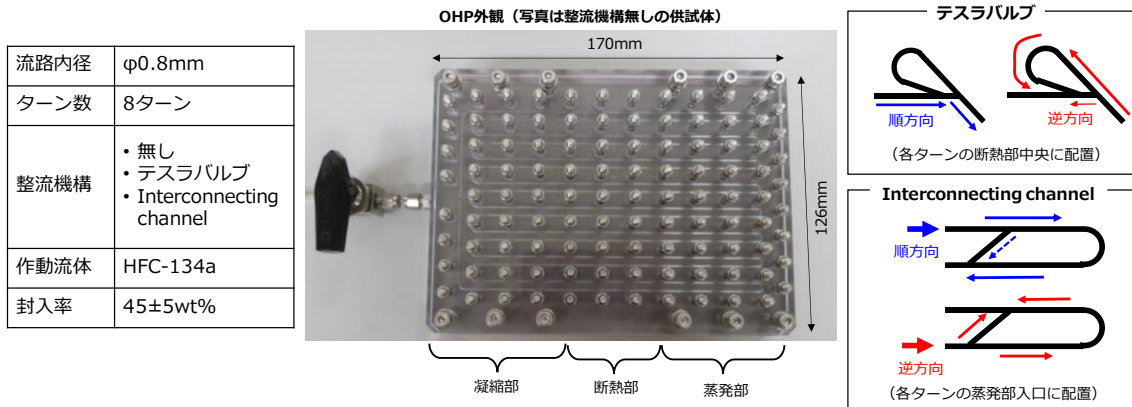


図 8 簡易な整流機構付き OHP の供試体外観と整流機構模式図

において隣り合う流路間に斜めにバイパス流路を入れることで、流れの向きによる流動抵抗差をつけるものである。本検討ではこの中で最も Diodicity を大きくしやすいと考えられるテスラバルブと、最も省スペースで組み込める Interconnecting channel について試作評価を行った。テスラバルブ付き OHP, Interconnecting channel 付き OHP, 更に整流機構を持たないリファレンス用 OHP を試作し、動作特性試験により整流効果の有無を評価した。供試体の外観を図 8 に示す。内部流動が確認できるように、金属製ベースプレートに流路溝を加工し透明な樹脂カバーで蓋をする構成とした。

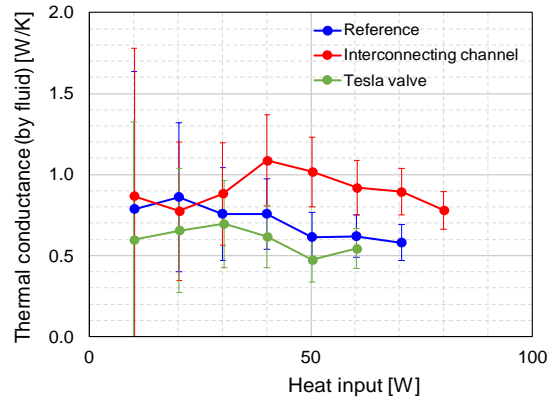


図 9 整流機構付き／無し OHP の内部流動による熱コンダクタンス

各供試体に作動流体を封入し、動作特性試験を実施した。各供試体に与えた熱負荷と熱抵抗の関係を図 9 に示す。ここでは、OHP 全体の熱コンダクタンス（熱抵抗の逆数）からベースプレートの熱コンダクタンスを差し引くことで、内部流動による熱コンダクタンスを算出した。その結果、熱コンダクタンスは Interconnecting channel 付き OHP が最も高く、リファレンス OHP に比べて最大 60% 程度の性能向上効果が確認された。一方で、テスラバルブ付き OHP はリファレンス OHP よりも熱コンダクタンスが低く、最も低熱負荷 (60W) までしか熱輸送できないという結果になった。内部流動はいずれの OHP でも完全な一方循環流化は見られなかった。局所的な振動と循環が組み合わさった流れが支配的であり、循環の方向はその時によって一定ではなかった。Interconnecting channel 付き OHP では循環には至らなくとも、流体の運動が最も活発であった。テスラバルブ付き OHP は目視でも明らかに流体の運動が鈍く、断熱部のテスラバルブ付近で起こる振動がなかなか蒸発部まで届かない様子が見て取れた。テスラバルブはやや複雑な構造ゆえ、順方向にも流動抵抗が増加してしまい、流体の運動を妨げる方向に働いてしまった可能性がある。今回採用した設計は必ずしも最適化されたものではないため、バルブ単体としてどこまで望ましい流動特性を得られるかは、更に突き詰める余地があると考えられる。Interconnecting channel は非常に簡易な構造を追加するだけで良いという点で魅力的であり、これについても、流路の角度・位置・数の最適化によってどこまで性能向上できるかは今後更なる検討を要する。

(3) 結論

数値解析と実験により、OHP の内部流動循環流化のメカニズム及び循環流化による熱輸送性能向上に必要な条件を明らかにした。より簡易な構造で循環流化する方法については、Interconnecting channel という非常に簡易な方法で有意な効果が得られることを実験的に示した。整流機構の形状・寸法・配置等の最適化によってどこまで性能向上できるかについては、今後更なる検討が望まれる。

<引用文献>

- [1] Y. Miyazaki, et al., Proc. of the 6th International Heat Pipe Symposium, pp. 389-394, 2000.
- [2] M. Ando, et al., Applied Thermal Engineering, Vol.130, pp.552-560, 2018.
- [3] S.F. de Vries, et al., Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 105, pp.1-11, 2017.
- [4] M. Ebrahimi, et al., Applied Thermal Engineering, Vol. 90, pp.838-847, 2015.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Ando Makiko, Okamoto Atsushi, Nagai Hiroki	4. 巻 145
2. 論文標題 Effect of Flow Resistance of Floating-Type Check Valves on Heat Transfer Characteristics of an Oscillating Heat Pipe	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ASME Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 101004-1 ~ 11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1115/1.4062783	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6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 安藤麻紀子, 永井大樹
2. 発表標題 逆止弁付き自励振動型ヒートパイプの動作特性における逆止弁流動抵抗比の影響
3. 学会等名 第60回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 安藤麻紀子, 永井大樹
2. 発表標題 逆止弁の向きが自励振動型ヒートパイプの動作特性に及ぼす影響
3. 学会等名 日本混相流学会 混相流シンポジウム2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 川口歩夢, 笹岡佑全, 安藤麻紀子, 岡本篤, 永井大樹
2. 発表標題 逆止弁が自励振動ヒートパイプの動作特性に与える影響（第一報：順方向取り付け）
3. 学会等名 令和5年度 宇宙航行の力学シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 笹岡佑全, 川口歩夢, 安藤麻紀子, 岡本篤, 永井大樹
2. 発表標題 逆止弁が自励振動ヒートパイプの動作特性に与える影響 (第二報: 逆方向取り付け)
3. 学会等名 令和5年度 宇宙航行の力学シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ayumu Kawaguchi, Yuzen Sasaoka, Makiko Ando, Atsushi Okamoto, Hiroki Nagai
2. 発表標題 Experimental Study of Heat Transfer Characteristics of Oscillating Heat Pipe with Different numbers and Orientations of Check Valves
3. 学会等名 53rd International Conference on Environmental Systems (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 安藤麻紀子, 曾根航平, 永井大樹
2. 発表標題 宇宙機熱制御への適用を目指した逆止弁付き自励振動型ヒートパイプの循環流化に関する一考察
3. 学会等名 第59回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2022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
研究分担者	永井 大樹 (Nagai Hiroki) (70360724)	東北大学・流体科学研究所・教授 (11301)	

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
---------	---------