

令和 2 年 6 月 12 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06218

研究課題名(和文) 逆止弁付き自励振動型ヒートパイプのスタートアップ特性向上

研究課題名(英文) Improvement of start-up characteristics of oscillating heat pipe with check valves

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) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：逆止弁付き自励振動型ヒートパイプ(OHP)は薄型で高い熱輸送性能が期待される二相熱輸送デバイスであるが、OHPの冷却部に作動液が偏在した初期状態ではスタートアップしにくいという課題があった。本研究では、気液挙動の解析と実験的評価により、従来はOHPの断熱部中央に配置されていた逆止弁を冷却部近傍に配置することにより、作動液がOHP加熱部へ再供給されやすくなり、スタートアップ特性向上につながることを示した。また、全ての逆止弁を冷却部近傍に配置するのではなく、ターンごとに冷却部近傍と加熱部近傍に交互配置することにより、安定したスタートアップ特性と高い定常熱輸送性能を両立しうることを確認した。

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が進む中、その排熱手段が大きな課題となっている。逆止弁付き自励振動型ヒートパイプは約6000W/mKという高い熱輸送性能を持つとともに狭い発熱箇所からも熱輸送可能なデバイスであるため、排熱手段として期待されるが、スタートアップ特性の面で課題があった。本研究でスタートアップ特性向上が図れたことにより、確実にスタートアップすると同時に高い熱輸送性能を発揮するデバイスとしての信頼性を高めることができた。これは宇宙を始め、自動車、電子機器等の様々な業界が抱える排熱問題の解決の一助となる。

研究成果の概要(英文)：An oscillating heat pipe (OHP) with check valves is an attractive two-phase flow heat transfer device, which can remove waste heat effectively from narrow spaces. However, it has difficulty in starting up under the initial condition where the working fluid is localized in the cooling section. This study tried to improve the start-up characteristics by numerical simulations of vapor-liquid behavior in the OHP and experimental evaluations. The results showed that the start-up characteristics could be improved when the check valves were located near the cooling section, not at the center of the adiabatic section. The check valves located near the cooling section could help the working fluid to be resupplied to the heating section, resulting in successful start-up. Additionally, this study showed that the check valve layout in a zig-zag manner could be the most balanced solution to realize both the reliable start-up and high heat transfer performance in the steady-state.

研究分野：熱工学

キーワード：ヒートパイプ 気液二相流 自励振動 スタートアップ 逆止弁

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年の宇宙機搭載機器の高機能・高性能に伴う機器の高発熱化に対応する熱輸送デバイスとして、外部からの動力を必要とせず高い熱輸送効率を期待できる自励振動型ヒートパイプ (Oscillating Heat Pipe, 以下 OHP) が注目されている。OHP は蛇行する細管ループに作動流体を封入したものである (図 1(a))。加熱部における液の蒸発 / 気泡の膨張と冷却部における蒸気の凝縮 / 気泡の収縮によって生じた圧力差が駆動力となって作動流体の振動や循環を引き起こされ、熱輸送が行われる。潜熱と顕熱の両方による高効率な熱輸送が可能であることに加え、細管ループであるため、狭い隙間からの熱輸送も可能であるというメリットがある。国内外において、作動流体の種類・流路形状・流路内表面状態等の最適化による熱輸送性能の向上検討が進められている。また、数値解析を用いた OHP 内部流動現象の解明も進められているが^{[1][2]}、設計パラメータによらず一般化された解析モデルの確立には至っていない。

OHP は宇宙・自動車・電子機器等の様々な業界が抱える排熱問題への解決策として、研究開発が進められてきた。宇宙分野においては、通常の OHP より熱輸送性能を向上させた逆止弁付き OHP (図 1(b)) の研究開発が進められている。OHP の断熱部中央に配置された逆止弁によって、流れを振動流から一方方向流に整流することにより、広い熱負荷範囲で高い熱輸送性能が得られる。逆止弁付き OHP は 2012 ~ 2016 年に軌道上微小重力実験が行われ、軌道上でも地上と同等の安定した熱輸送性能を示すことが確認された^[3]。一方で、OHP 内初期気液分布によっては、OHP の動作開始 (スタートアップ) に時間を要する事象が確認され、特に作動液が OHP 冷却部に偏在した初期条件下においては、スタートアップしづらいという結果が得られている。

逆止弁付き OHP を熱輸送デバイスとして用いるに当たっては、初期気液分布によらず確実にスタートアップすることが必要不可欠である。しかしながら、スタートアップのメカニズムについては完全には解明されていない。

2. 研究の目的

本研究では、逆止弁付き OHP におけるスタートアップ現象を数値解析及び実験的評価によって明らかにし、スタートアップ特性を向上させる方法を見出すことを目的とする。これにより、高い熱輸送性能を持つとともに確実にスタートアップする信頼性の高い熱輸送デバイスの提供が可能になる。

3. 研究の方法

(1) 気液挙動に関する数値解析に基づくスタートアップ特性向上策検討

本研究ではまず、代表的な初期気液分布を仮定し、各初期気液分布の場合において、加熱開始 ~ OHP のスタートアップに至る過程で OHP 内の液体スラグ・蒸気プラグがどのような動きをするかを調べた。数値解析モデルの模式図を図 2 に示す。解析モデルは流路に沿った一次元モデルであり、OHP 内の流れは完全なスラグ流と仮定している。また、前述の軌道上実験結果を再現できることを確認している^[4]。このモデルを用いた気液挙動の解析結果に基づき、スタートアップ特性向上策の机上検討を行い、その効果を数値解析モデルを用いて検証した。

(2) スタートアップ特性向上策の効果の実験的検証

次に、上記で検討したスタートアップ特性向上策を反映した供試体を製作し、特性向上効果が

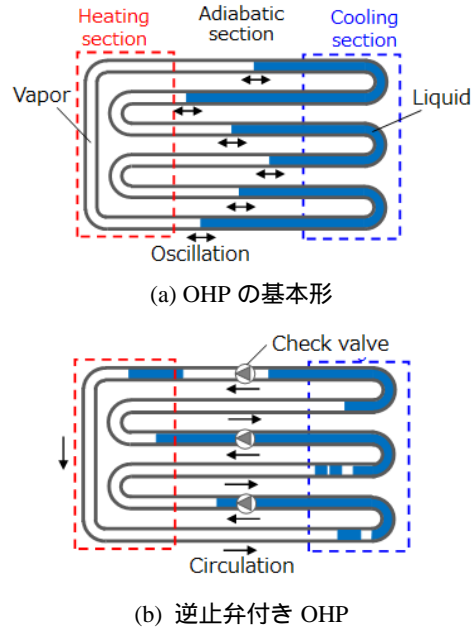


図 1 OHP の基本形と逆止弁付き OHP

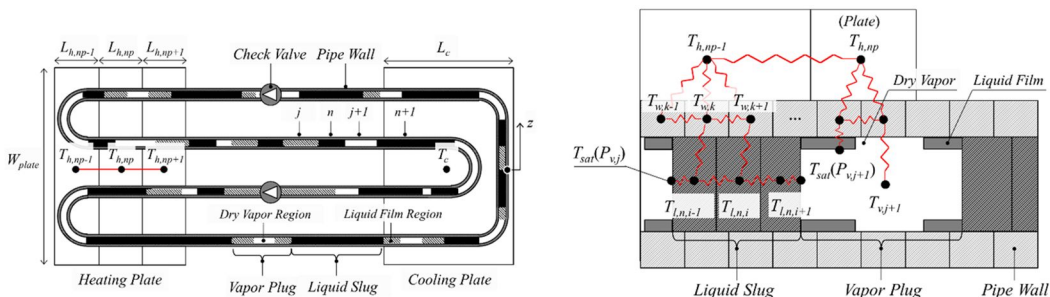


図 2 逆止弁付き OHP 数値解析モデルの模式図と熱回路網

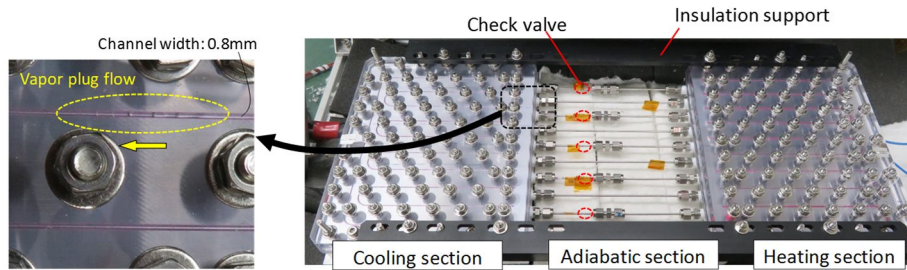


図3 逆止弁付き OHP 可視化供試体の外観

得られるかを実験的に検証した。ここでは、金属平板に流路溝を加工し透明板で蓋をした、流路内気液挙動が観察できる形態の供試体を設計・製作して実験を行った。供試体の外観を図3に示す。加熱部と冷却部はアルミ平板上に加工された矩形流路(0.8mm角)である。一方、断熱部は逆止弁を取り付ける必要があることから、内径0.8mmのSUS製配管を用いており、加熱部/冷却部とは配管継手を介して接続されている。供試体長手方向の全長は420mmである。流路のターン数は5ターンであり、作動流体はHFC-134a(封入率46%)を用いた。これらの仕様は軌道上実証実験用供試体の仕様を概ね踏襲するものとなっている。

4. 研究成果

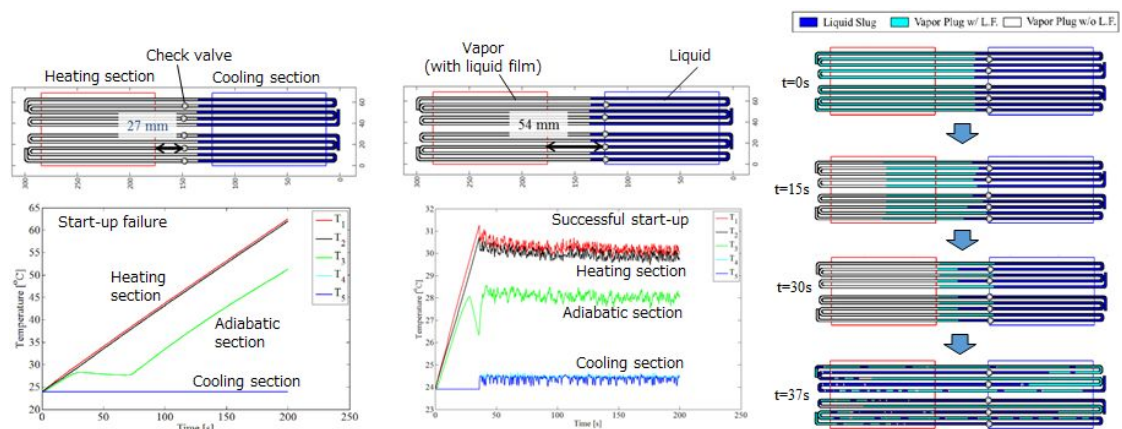
(1) 気液挙動に関する数値解析に基づくスタートアップ特性向上策検討

OHP内の初期気液分布は、作動液が均等に分布している場合、作動液が加熱部に偏在している場合、作動液が加熱部と冷却部にまたがって存在する場合、作動液が冷却部に偏在している場合の4パターンに大別される。筆者らが先行的に行った数値解析において、それぞれの場合において加熱開始後にどのような気液挙動を示すか検討されている^[4]。このうち、~のように、加熱部に作動液が存在する場合には、加熱開始後に加熱部での核沸騰をきっかけにしてスタートアップすることが確認された。これに対し、~の場合は初期状態において加熱部に存在していた液膜が徐々に蒸発し、最終的には加熱部が完全にドライアウトしてしまい、スタートアップできないという結果に至る。一方で、スタートアップには至らないものの、~の場合でも液膜蒸発に起因する気液界面の微小な振動が起きることが示唆されている。

本研究ではこの微小振動を逆止弁によって一方向に促進すれば、作動液が加熱部側へ到達しスタートアップに繋がるのではないかと考えた。そのために、従来は断熱部中央に配置されていた逆止弁を、冷却部近傍(作動液が冷却部に偏在しても、作動液と逆止弁がオーバーラップする位置)に配置する。図4に逆止弁配置を変えた場合のスタートアップ特性の解析結果を示す。OHPの内径は0.8mm、作動流体はHFC-134a(封入率45%)、ターン数は5ターンである。加熱開始時点ではOHP全体が常温であるとし、加熱部に11.1Wの熱負荷を与えるという条件で解析を行った。温度履歴を見ると、逆止弁を断熱部中央に配置した場合はスタートアップしなかったが、冷却部近傍に配置した場合にはスタートアップに成功したことがわかる。図4(b)の右列は冷却部近傍に配置した場合における気液挙動を示したものである。加熱開始後に加熱部の液膜が蒸発により後退していく様子がわかる。同時に、逆止弁が配置された列では作動液が加熱部へ向かって押し出され、この液面が加熱部に到達してスタートアップに至ることが示された。

(2) スタートアップ特性向上策の効果の実験的検証

前述の通り、逆止弁を冷却部近傍に配置することによってスタートアップ特性向上効果が得られることが数値解析によって示された。ここでは、逆止弁付きOHPの可視化供試体を用いて、



(a) 逆止弁：断熱部中央の場合の温度履歴

(b) 逆止弁：断熱部中央の場合の温度履歴と気液挙動

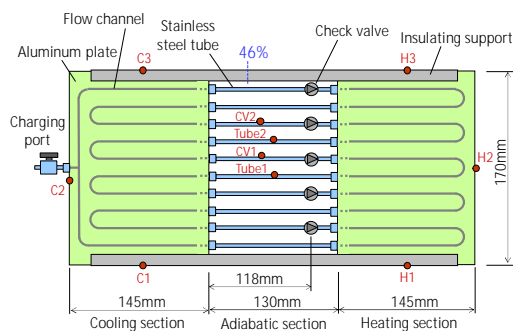
図4 逆止弁配置を変えた場合のスタートアップ特性(解析結果)

逆止弁配置によるスタートアップ特性向上効果を実験的に検証した。なお、ここではスタートアップ特性と定常熱輸送性能の両立の観点から、これら両方の特性について評価を行った。

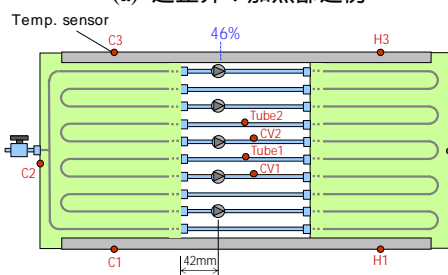
供試体の模式図を図5に示す。比較のため、逆止弁配置は(a)加熱部近傍、(b)冷却部近傍、(c)交互配置の3パターンとした。作動流体としてHFC-134a(封入率46%)が封入されており、仮に全ての作動液が冷却部側に偏在したとすると、気液界面は図5中の「46%」と記した位置に来ることになる。3パターンの配置を採用した理由は次の通りである。逆止弁は加熱部から冷却部へ向かう流れを遮断する向きに取り付けられており、加熱部で気泡が両側へ膨張しようとする際に、これを片側で遮断することで、流れを一方に整流する役割を果たす。しかしながら、逆止弁が加熱部から離れた位置にある場合には、得られる整流効果は弱くなると考えられ、その結果、定常熱輸送性能が低下することが懸念される。つまり、スタートアップ特性向上のためには逆止弁を冷却部近傍に配置したほうが有利だが、定常熱輸送性能向上のためには逆止弁を加熱部近傍に配置したほうが有利であると推測される。(c)の交互配置は(a)と(b)それぞれのメリットを兼ね備える狙いがある。

実験では、毎回実験開始直前に作動流体を封入しているため、実験開始時点の気液分布はランダムである。実験開始後、まずは作動液が冷却部に偏在した状態を作るため、OHPの冷却部のみを裏面に取り付けたコールドプレートによって常温から10°Cまで冷却した。冷却完了後、加熱部に10Wおよび20Wを与え、各条件で定常に達した際の温度データを取得した。また、気液挙動は目視観察及び高速度カメラ撮影を行った。

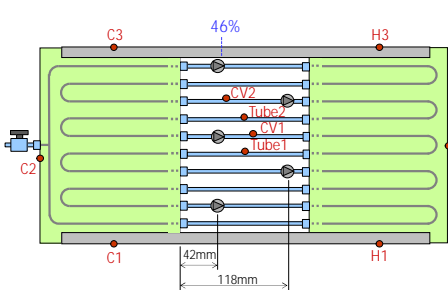
図6に各逆止弁配置パターンにおけるOHP各部の温度履歴を示す。(a)逆止弁が加熱部近傍にある場合、冷却開始後に液体スラグが徐々に冷却部へと移動していき、やがて冷却部全体が液体スラグで満たされた状態になる様子が確認された。冷却完了時点では気液の動きは全く見られず、OHP加熱部と冷却部の温度差も広がっていることから、冷却部には液体、加熱部には蒸気という形で完全に分離した状態であると考えられる。この状態では逆止弁は作動液とオーバーラップする位置になく、加熱を開始してもスタートアップしなかった。その後、定常データを取



(a) 逆止弁：加熱部近傍

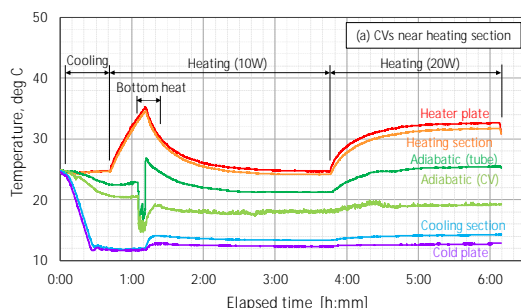


(b) 逆止弁：冷却部近傍

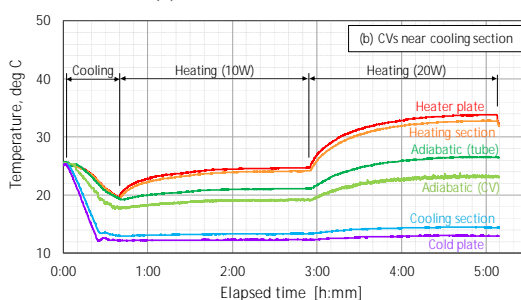


(c) 逆止弁：交互配置

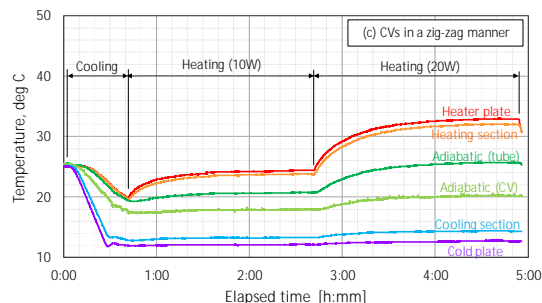
図5 逆止弁付き OHP 可視化供試体の模式図



(a) 逆止弁：加熱部近傍



(b) 逆止弁：冷却部近傍



(c) 逆止弁：交互配置

図6 各部の温度履歴

得するために一旦ややボトムヒート姿勢に傾けて強制的にスタートアップさせた後、再び水平姿勢に戻し、10W、20Wでの熱輸送性能データを取得した。

これに対し、(b)逆止弁を冷却部近傍に配置した場合も冷却開始後に液体スラグが冷却部側へ偏っていく傾向は見られたが、冷却部全体が液体で満たされた後にも、小さな気泡プラグ群が間欠的に冷却部へ流れ込む様子が観察された。また、OHPの加熱部温度が徐々に低下していることから、弱いながらOHPが動作していると判断できる。この状態で加熱部に熱負荷を加えると、その後も継続して動作した。逆止弁を冷却部近傍に配置したことにより、作動液が冷却部に偏在しやすい環境下であっても、完全な気液分離が起こるのを防ぎ、スタートアップ特性向上効果が得られたものと考えられる。(c)逆止弁を交互配置した場合の挙動は、(b)冷却部近傍に配置した場合とよく似ており、必ずしも逆止弁全てを冷却部近傍へ配置しなくても、同等のスタートアップ特性向上効果が得られることが示唆された。

定常状態における加熱部と冷却部の温度差を図7に示す。事前の予想通り、(b)逆止弁が冷却部近傍に配置した場合に最も温度差が大きく、熱輸送性能が最も低いことがわかる。一方、(c)交互配置の場合は、(a)加熱部近傍に配置した場合とほぼ同等の結果を示しており、全ての逆止弁を加熱部近傍へ配置しなくても、同等の定常熱輸送性能が得られることが示唆された。逆止弁を加熱部近傍または交互配置した場合は、加熱部から冷却部へ向かう蒸気プラグの流れが活発(流速が速く、流れが継続する時間も長い)である様子が観察されており、加熱部近傍の逆止弁によって一方への整流が効果的に行われていることを裏付けるものとなっている。

本実験検証では、スタートアップ特性向上効果とともに定常熱輸送性能についても評価したが、これらを両立する方法として、逆止弁を交互配置することが最もバランスの良い方策の一つであることが示唆された。

(3) 逆止弁配置以外のスタートアップ特性向上策

本研究では、逆止弁配置によるスタートアップ特性向上を主軸に進めたが、それ以外の特性向上策として、流路内表面の表面粗さ(表面のキャピティ径)に着目した数値解析検討を行った^[5]。スタートアップのきっかけになる沸騰を促進することで、スタートアップ特性向上を目指すものである。数値解析検討の結果、加熱部と断熱部をキャピティ径の大きい疎壁面とし、かつターンごとにキャピティ径に傾斜を付けて沸騰しやすさに差を設けることにより、ターン間の圧力均衡が崩れて循環流を生じやすくなる傾向が確認された。実験による検証には至らなかったが、これにより安定したスタートアップと高い熱輸送性能を実現できる可能性がある。

(4) 結論

数値解析と可視化供試体を用いた実験により、加熱開始～スタートアップに至るまでの逆止弁付きOHP内の気液挙動の解明と、スタートアップ特性向上策の検討を行った。この結果、冷却部に作動液が偏在した初期条件下であっても、逆止弁を冷却部近傍に配置し作動液とオーバーラップさせることで、加熱開始後に作動液が加熱部へ再供給されるのを促し、スタートアップさせやすくなることを示した。さらに、スタートアップ特性向上に加えて定常時の高い熱輸送性能を両立するためには、逆止弁を冷却部近傍と加熱部近傍に交互配置することが有効であることを実験により示した。OHPの動作特性には様々な設計パラメータが複雑に影響するため、今後更に広い条件下での解析・実験の評価を行うことで、逆止弁付きOHPの最適設計に資する知見が得られ、実用化に貢献できるものと考えられる。

< 引用文献 >

- [1] Shaffi, M.B., et.al, *Journal of Heat Transfer*, Vol.123, pp.,1159-1172, 2001.
- [2] Das. S.P., et.al, *Int J. Heat and Mass Transfer*, Vol.53, pp.3905-3913, 2010.
- [3] Makiko Ando, et al., *Applied Thermal Engineering*, Vol.130 pp.552-560, 2018.
- [4] Takurou Daimaru, et al., *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.109 pp.791-806, 2017.
- [5] 井上ら, 第62回宇宙科学技術連合講演会講演集, JSASS-2018-4744, 2018.

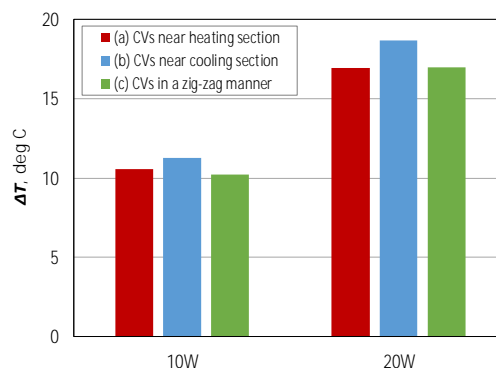


図7 定常状態における加熱部 - 冷却部間温度差 (各条件2回の試験の平均値)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 安藤麻紀子, 五十幡大地, 松友瑠以, 岡本篤, 田中洸輔, 杉田寛之, 井上菜生, 永井大樹
2. 発表標題 自励振動型ヒートパイプの起動特性における逆止弁配置の影響
3. 学会等名 日本混相流学会 混相流シンポジウム2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 井上菜生, 永井大樹, 安藤麻紀子, 松友瑠以, 岡本篤, 杉田寛之
2. 発表標題 宇宙用自励振動ヒートパイプの高信頼性化を目指したスタートアップ特性の改善に関する試み
3. 学会等名 第62回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takuro Daimaru, Nao Inoue, Hiroki Nagai, Makiko Ando, Kosuke Tanaka, Atsushi Okamoto, Hiroyuki Sugita
2. 発表標題 Numerical Study on Start-up Characteristics of Oscillating Heat Pipes with Check Valves
3. 学会等名 47th International Conference on Environmental Systems (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Makiko Ando, Atsushi Okamoto, Kousuke Tanaka, Rui Matsutomo, Nao Inoue, Hiroki Nagasawa, Hiroki Nagai
2. 発表標題 An Experimental Attempt to Improve Start-up Characteristics of Oscillating Heat Pipe with Check Valves
3. 学会等名 49th International Conference on Environmental Systems (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Makiko Ando, Tsushi Okamoto, Kousuke Tanaka, Rui Matsutomo, Nao Inoue, Hiroki Nagasawa, Hiroki Nagai
2. 発表標題 Experimental Study on Start-up Characteristics of Oscillating heat Pipe with Check Valves Having Different Filling Ratio
3. 学会等名 International Symposium on Oscillating/Pulsating Heat Pipes 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019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)	
連携研究者	岡本 篤 (Okamoto Atsushi) (90725350)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・その他部局等・研究領域主幹 (82645)	