

令和 2 年 6 月 12 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14879

研究課題名（和文）極細自動振動ヒートパイプ開発による革新的な3軸柔軟サーマルストラップの実現

研究課題名（英文）Extra fine oscillating heat pipe for innovative three-axis flexible thermal strap

研究代表者

岩田 直子 (Iwata, Naoko)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・研究開発員

研究者番号：70751139

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：柔軟かつ高熱伝導な宇宙機用熱輸送デバイスの開発を目指し、内径0.4mm以下の金属製極細配管から構成される自動振動ヒートパイプ(OHP)を新規に設計・製作した。OHPには循環流を誘起するための逆止弁が10個挿入されている。重力の影響の小さい水平状態に設置した状態での熱輸送特性（熱コンダクタンスと熱輸送量）と、3軸方向の動的剛性を試験及び解析により評価し、軽量かつ高性能な3軸フレキシブルサーマルストラップとしての性能を満たすことを確認した。また宇宙空間を模擬した熱真空環境でも熱輸送性能に劣化がないことを試験により確認し、宇宙機への適用可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来のOHP研究の半分以下となる内径0.4mm以下の金属配管で逆止弁付きヒートパイプを開発した例は世界初である。通常、OHPの断熱部（加熱部と冷却部の間）長さが長くなると、重力のアシストのない水平状態ではOHPは動作しにくい。本研究では配管の柔軟性を確保するために過去の極細OHP研究例に比べ長い断熱部長（約60mm）を設けたが、逆止弁を挿入することで水平状態でも安定したヒートパイプの起動・動作を確認することができた。本研究で開発したフレキシブルサーマルストラップにより、振動や熱変形を宇宙機構体に伝えずに排熱を行うことができ次世代宇宙機の高度な指向精度要求に応えられるようになることが期待される。

研究成果の概要（英文）：Aiming the development of a flexible and highly heat-conductive device for space application, a micro oscillating heat pipe (OHP) which is composed of metal pipes with an inner diameter of 0.4 mm or less was designed and manufactured. Ten check valves are inserted in the OHP to induce the circulation flow. The OHP heat transfer performance (i.e. thermal conductance and heat transfer rate) was tested in the horizontal direction where the gravity effect is minimized. The dynamic stiffness in the 3-axis direction was evaluated by micro-disturbance tests and analysis. The test and analysis results show the OHP is lightweight and high-performance 3-axis flexible thermal strap. It was also confirmed by test that its heat transfer performance doesn't degrade even in a thermal vacuum environment simulating deep space.

研究分野：熱制御

キーワード：熱制御 自動振動ヒートパイプ 逆止弁 サーマルストラップ フレキシビリティ 動的剛性

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、地球観測や天文観測を行う宇宙機の指向精度要求や性能要求はますます高度化し、機器で発生する微小擾乱や熱変形を宇宙機構体に伝達させないことが求められている。一方で搭載機器の発熱量は増大しており、高熱伝導な熱バスの利用も同時に要求される。従来の宇宙機で使用されている硬くて曲がりにくい熱バスでは、搭載機器で発生する微小擾乱や熱変形を宇宙機構体に伝えずに排熱を行うことはできず、高い熱コンダクタンスを持ちながらフレキシブルな熱輸送デバイスの開発が必須である。しかし、一般的にこれは相反する概念であり、熱バスにフレキシビリティを持たせると熱コンダクタンスは低下する。

申請者は X 線天文衛星の熱設計主担当者として、柔軟性のあるグラファイトファイバー製ストラップなどを排熱バスに採用した [Iwata et al., *J. of Rockets and Spacecraft*, 2016] が、次世代宇宙機の熱設計要求及び指向精度要求に応えるためには、これらを凌駕する 3 軸方向のフレキシビリティを持ちながら軽量かつ熱コンダクタンスの高い新たなサーマルストラップの開発が必須であると確信した。

一方、申請者らはこれまで、自励振動ヒートパイプ (Oscillating Heat Pipe, 以下 OHP) という多数の細い配管から構成される熱輸送デバイスについて実験的研究を行ってきた。OHP は、配管内に存在する作動流体が高温部と低温部間を往復運動することで熱輸送が行われるデバイスで、重力の影響を受けにくい [Iwata et al., *Thermal Sci. and Eng.*, 2010] などの特徴がある。しかし、細管独特のフレキシビリティ特性には着目されてこなかった。申請者は衛星開発と OHP 研究の両方の経験から、細管から構成される OHP を応用すれば 3 軸方向のフレキシビリティと高い熱コンダクタンスを持つフレキシブルサーマルストラップを実現できると考え、本研究を着想した。

2. 研究の目的

本研究では、OHP を発展させたデバイスとして、細管のフレキシビリティを活かし宇宙機の排熱及び熱変形・擾乱伝達問題を解決する 3 軸フレキシブルサーマルストラップを開発する。これまでの研究結果より、十分なフレキシビリティを得るには外径 0.5 mm 以下、製作性を考えると内径 0.4 mm 以下が要求される。しかし、従来の研究では熱輸送性能を重視していたため、主に内径 1~4 mm、細いものでも内径 0.8 mm 程度の OHP しか殆ど研究されていない。本研究では、熱輸送性能とフレキシビリティを両立できる、より細い配管 (外径 0.5 mm 以下、内径 0.4 mm 以下) に焦点をあてる。宇宙機への応用においてフレキシビリティ評価のポイントは静的剛性だけでなく、微小擾乱の周波数に対応した動的剛性である。熱輸送性能 (熱コンダクタンスと最大熱輸送量) 及び機械的性能 (動的剛性) を測定することで、3 軸にフレキシブルなサーマルストラップとしての評価を行う。これまでの科学衛星でのサーマルストラップへの要求値などから、目標値として熱コンダクタンス 2.5 W/K 以上、3 軸全ての動的剛性 2.5×10^4 N/m 以上を目指す。さらに、宇宙機への適用を目指し軌道上の熱環境が熱輸送性能や剛性に与える影響を調査する。本提案の高性能なフレキシブルサーマルストラップ開発は、宇宙機搭載機器の高度な指向精度要求や観測要求に応え、より高度な次世代の宇宙観測や地球観測におけるミッション成果創出に貢献する。

3. 研究の方法

(1) サーマルストラップ向け極細 OHP の設計製作

内径 0.4 mm 以下の金属配管製 OHP は世界でも殆ど例が無いため、まずその試作を行った。内径 0.32 mm、外径 0.52mm のステンレス (SUS) 配管を 2 方向に 7 回 (全部で 14 回) 折り曲げ、端部を T 字型継手に結合させて全長 150 mm の OHP を製作し動作を確認した。熱輸送距離が 1 mm の場合は水平でも動作が確認できたが、熱輸送距離 50 mm では OHP をボトムヒート (加熱部が鉛直下向きになる方向) 状態で垂直または 45 度に傾けた状態でしか動作を確認出来なかった。

(2) マイクロ逆止弁の開発

OHP 内に逆止弁を挿入すると、逆止弁が無い場合よりも動作が安定して継続することが知られている [Miyazaki et al., *Proc. 6th Int. Heat Pipe Symp.*, 2000]。そこで、重力の影響がなくとも自励振動が継続するようにヒートパイプ内の液柱の自励振動をアシストする逆止弁を極細 OHP に挿入するべく、マイクロ逆止弁の開発を行った。従来の逆止弁はスウェージング加工等で変形させた配管を口ウ付けで接合しているものなどが多いが、極細配管での同様の加工は困難であったため、電鍍で製作したニッケル配管を用いて逆止弁を製作した。逆止弁の順方向及び逆止方向の流量を確認した後、10 本の逆止弁を 1 ターンごとに挿入した、外径 0.5 mm、内径 0.39 mm の極細 OHP を製作した。

(3) 試験による性能評価

(2) で製作した逆止弁付き極細 OHP について、作動流体として HFC-134a を封入し、大気中にて封入率を 60 - 20 wt% の間で変化させながら熱コンダクタンスと熱輸送量を計測する試験を実施した。その結果、封入率 40 wt% 前後で最も性能が良い結果となったため、封入率が 40 wt% 程度になるように OHP の配管を封止し、サーマルストラップとして完成させた。サーマルストラップの熱輸送性を計測し耐宇宙環境性を確認するために、大気中及び熱真空試験中での熱性能試験

を実施した。フレキシブル性を確認するために動的剛性計測試験を2軸(Z軸及びY軸)方向に行い、さらに構造モデルによる解析にてX軸方向動的剛性を確認した。

4. 研究成果

(1) サーマルストラップ向け極細 OHP の設計製作

作動流体として HFC-134a を封入率 70 wt% で封入した、内径 0.32 mm の試作 OHP (図 1) の片端を長さ 50 mm の加熱部 (アルミ板) に固定し、もう片端の冷却部を長さ 50 mm (断熱部長 50 mm) と 99 mm (同 1 mm) の 2 通りに変えて加熱部への熱入力量を増加させる試験を行った。OHP を水平方向に設置すると、断熱部長さが 1 mm と短い場合は OHP が起動し熱入力量 7 W まで安定して動作したが、断熱部長さ 50 mm では OHP が起動しなかった。断熱部長 50 mm の OHP を水平状態ではなく加熱部を下側にした垂直状態 (ボトムヒート状態) にて熱負荷を与えたところ OHP の起動が確認された。



図 1 試作 OHP

水平状態かつ断熱部が長い (50 mm) 状態で OHP が起動し

なかったのは、冷却部または断熱部に存在する液柱の自励振動の振幅が断熱部長さに対して十分でなく、加熱部に液柱が供給されなかったため自励振動が開始または継続しなかったと考えられる。冷却部が長く断熱部が短い OHP では自励振動により液柱が十分に加熱部に供給されたため自励振動が継続していると考えられる。断熱部に逆止弁を入れることで液柱 (液スラグ) の自励振動がアシストされ、断熱部が長い OHP でも安定した動作が期待される。

(2) マイクロ逆止弁の開発

内径 0.4 mm 以下の配管に接続させるため、外径 0.4 mm の配管を用いて逆止弁の製作を行った。電鍍で製作した内径 0.21 mm、外径 0.4 mm のニッケル配管 2 本を図 2 のように 0.6 mm の間隔をあけて突き合わせ、間に直径 0.3 mm (又は 0.35 mm) のボールを入れ、さらにそれらを包むように内径 0.4 mm、外径 0.5 mm のニッケル配管を被せて電鍍にて接合し逆止弁としている。図 2 で左から右に流れる方向が逆止方向であり、ボールが内径 0.21 mm のニッケル配管の内側に挟まることで作動流体の流れが止められる。作動流体が順方向に流れる際は、ニッケル配管の端部が 45 度切り落とされているためボールと配管の間に隙間が生じ、作動流体が完全に止められることなく流れるようになっている。ボールの材質と直径が異なる逆止弁を表 1 に示す通り 2 本ずつ計 4 本製作し、X 線 CT スキャン (表 1 の No. 1, 2) または X 線透過 (同 No. 3, 4) による内部目視検査と、二相状態の HFC134a による液流し試験を行った。図 3 に示す内部目視検査ではどの逆止弁にも不具合はなかったが、ボール径が小さい No. 1, 2 に比べ No. 3, 4 は順方向に対する逆方向の質量流量が非常に大きかった。その原因は明らかではないが、No. 3, 4 の方が順方向・逆方向共に質量流量が大きくなっていることから、No. 1, 2 のボールの方が 0.21 mm のニッケル配管に収まりやすいと考えられ、OHP 製作には No. 1, 2 の逆止弁仕様を採用することとした。

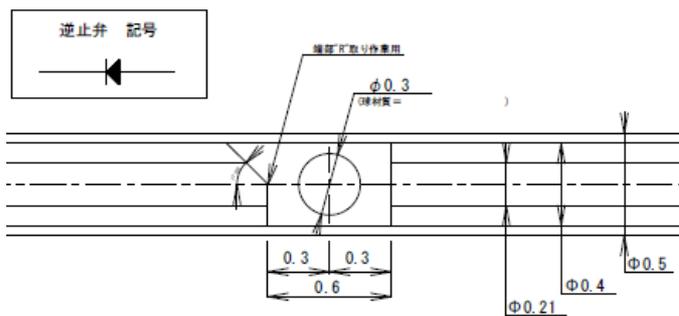


図 2 マイクロ逆止弁 (No. 1, 2) (単位: mm)

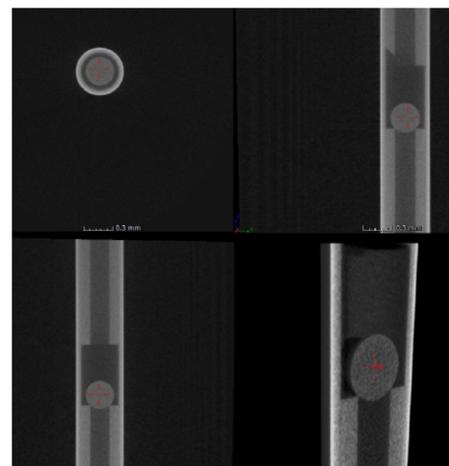


図 3 No. 1 逆止弁の X 線 CT スキャン写真

表 1 試作したマイクロ逆止弁の特徴と HFC-134a 液流し試験結果

逆止弁	特徴	順方向質量流量 (g/min)	逆方向質量流量 (g/min)
No. 1	ボール直径 0.3 mm ボール材質 SUS 配管端面取り加工無し	0.12	0.008 ~ 0.042
No. 2		0.27	0.006 ~ 0.007
No. 3	ボール直径 0.35 mm ボール材質 超硬合金 配管端面取り加工あり	4.0	1.35 ~ 2.62
No. 4		0.91	0.75

No.1, No.2 逆止弁とほぼ同じ仕様の逆止弁が挿入された内径 0.21 mm, 外径 0.4mm, 長さ 50.6 mm のニッケル配管を 10 本製作し、別途製作した SUS 配管(外径 0.39 mm, 内径 0.27 mm)と電鋳で接合した。逆止弁の目的は冷却部から加熱部に向かう液柱の流れの誘発であり、断熱部分に 1 ターンおきに挿入している。閉ループにするために、両端の SUS 管と作動流体封入用 SUS 管(先端にバルブ付き)は T 字型に突き合わせて電鋳にて接合している。これにより、片側 10 ターン、幅 38 mm, 長さ 180 mm の逆止弁付き極細 OHP(図 4)が完成した。

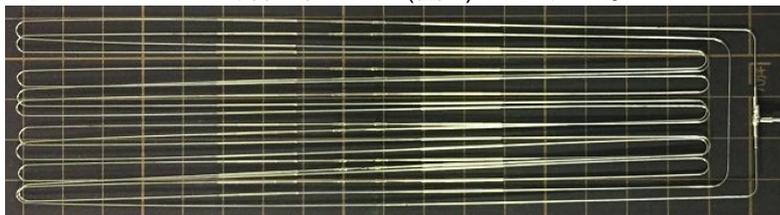


図 4 逆止弁付き極細 OHP (背景は 10 mm 方眼)

(3) 試験による性能評価

逆止弁付き極細 OHP の両端に 60 mm x 60 mm のアルミ板を取り付け、加熱部及び冷却部とした。OHP 内部には作動流体として HFC-134a を封入し、OHP の熱性能評価及び配管封止時の作動流体封入率決定のために大気中にて封入率を 60 - 20 wt%の間で変化させながら熱コンダクタンスと熱輸送量を計測する試験を実施した。熱コンダクタンス C は以下の式で表される。

$$C = Q / (T_H - T_C)$$

ここで Q は OHP の正味の熱輸送量、 T_H は加熱部板温度、 T_C は冷却部板温度を示す。加熱部にヒータを取り付け、冷却部を 10 degC の冷媒で冷却した状態でヒータの熱負荷量を上げていく熱輸送試験を行ったところ、水平状態での OHP の動作を確認することができた。封入率を変えた場合の熱コンダクタンスを図 5 に示す。OHP の熱コンダクタンスは 0.2 W/K 程度と、OHP と同じ幅・長さ・厚み(外径)の銅板の熱コンダクタンスの約 2.5 倍程度の熱輸送性能を得ることが出来た。熱コンダクタンスは封入率 26 wt%と 37 wt%の時に最も高く、また最大熱輸送量(ただし本実験では OHP がドライアウトに達する前に加熱部 45 degC に達した時点で試験終了としたため、本来の最大熱輸送量ではない)は封入率 37 wt%時に最大となった。この結果はおおむね従来 OHP 研究結果[Zhang et al., *Heat Transf. Eng.*, 2008] と一致しているが、本試験では、従来 OHP が起動しないと考えられる 10-20 wt%でも動作が確認された。この要因は作動流体質量が小さい低封入率でも加熱部へ液が輸送されることにあると考えられ、その背景として次の 2 点が推察される: a) 内径が小さいため毛細管力が大きくなり、作動流体が蒸気柱(蒸気プラグ)と液柱(液プラグ)に分かれやすくなる。b) 他の条件が同じであれば管径によらず蒸気速度と凝縮熱伝達率が変わらないとした場合、管径が大きくなると蒸気プラグが冷却部を通過する間に凝縮する質量比が大きくなり、より多くの液が加熱部に輸送される。

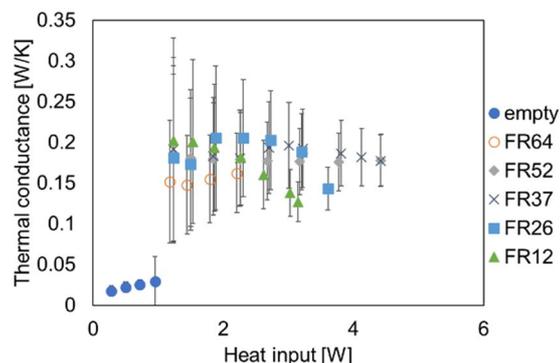


図 5 逆止弁付き極細 OHP の封入率(FR)による熱コンダクタンス変化(FR の単位は wt%)

試験の結果から封入率約 37 wt%で熱的性能が最大になることが明らかになったため、HFC-134a を約 40 wt%封入した状態で、アーク溶接にて作動流体封入用 SUS 配管の封止(作動流体封入用バルブの切り落とし)を行った。封止の際は、溶接箇所 HFC-134a が流入しないように OHP 本体を溶接箇所より鉛直下向きに傾けたうえで OHP をドライアイスで冷却した。封止前後の OHP の質量変化は 0.01g 以下で、ほぼ冷媒のリークなく OHP を封止することが出来た。封止前に、OHP の冷却部と加熱部をアルミ板から 40 mm x 60 mm の銅板に付け替え、銅板と配管をハンダ付けで固定させた(サーマルストラップとしての取付インタフェースプレートとするため)。封止後、フレキシブルサーマルデスクトップとして完成した逆止弁付き極細 OHP を図 6 に示す。



図 6 逆止弁付き極細 OHP 製フレキシブルサーマルストラップ(左は座標系)

図6のサーマルストラップを封止前と同じ条件にてコンダクタンスと熱輸送量の計測を行い、図7に示すように最大0.9 W/Kの熱コンダクタンスと7 Wまでの熱輸送を確認した。図5に示すコンダクタンス値(0.2 W/K)よりも増加したのは、加熱部板及び冷却部板とOHP配管をハンダ付けで固定することにより、板～配管間の熱抵抗が小さくなったためである。サーマルストラップのコンダクタンスは目標値(2.5 W/K)の半分以下であった。この原因は配管径が小さいことと配管本数が10本と少ないことにあると推定される。いずれも増加させると動的剛性への影響が懸念されるが、後述のように動的剛性値は目標値を100分の1以下で満たしており、コンダクタンスが目標値を満たすまで配管本数を増やすことは実現可能であると考えられる。

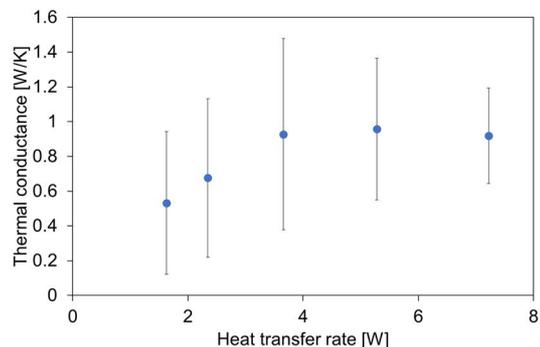


図7 封止後の熱コンダクタンス計測結果

次に、サーマルストラップの宇宙機への適用を目指し、宇宙空間を模擬した熱真空環境にて熱輸送を評価する試験を実施した。冷凍機により100 K以下まで冷却可能なシュラウドを持つ真空チャンパーにサーマルストラップを水平に設置し、加熱部への入熱量とサーマルストラップの周囲温度を変化させた。冷却部温度が-20 degCを下回るとOHPは起動しなかったが、-10 degC以上の温度では起動及び安定した動作を確認することが出来た。また、加熱部温度が32 degCになるまでOHPを動作させた後、入熱量及び周囲温度を低下させてOHP加熱部温度を0 degCまで低下させ再び32 degCまで上昇させるという熱サイクル試験を行い、熱サイクル環境が付加されてもOHPの熱輸送性能に変化がないことを確認した。熱真空試験後の外観、質量及び熱輸送性能(大気圧環境下)に変化はなく、サーマルストラップの熱真空環境下における適用可能性を示すことが出来た。

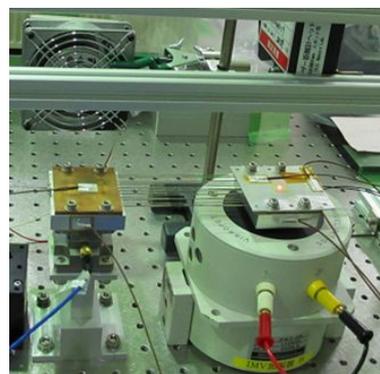


図8 Z軸方向動的剛性試験セットアップ

サーマルストラップのフレキシビリティは、動的剛性試験及び解析により評価した。試験では、主に擾乱発生源(コンプレッサーなど)側に取り付けられると想定されるサーマルストラップの加熱部板を加振器に搭載し、冷却板をフォースセンサに固定した状態(図8)で一軸方向の振動を与え、フォースリンクにかかる荷重及び加熱部板の変位を計測した。試験はZ軸加振とY軸加振のみを行い、X軸方向の動的剛性については解析モデルによる評価とした。加熱部にはヒータによる熱入力を与え、冷却部はファンで強制空冷させOHP動作状態で熱平衡に達した後に、OHPを動作させたままで加振を行った。加振は一軸につき周波数を2Hz, 5Hz, 7Hz(Y方向のみ), 10Hzと変え、各周波数にて15秒間程度変位と荷重の正弦波データを取得した。得られたデータから剛性を算出した結果を図9に示す。構造モデルは、サーマルストラップを構成する配管を逆止弁の有無及び配管接合箇所の有無から5種類に分類し、5本の配管から構成されるモデルとした。図9の実線がX軸方向の正弦波応答解析結果を示している。動的剛性は試験・解析共に200 N/m以下となり目標値(2.5×10^4 N/m)を100倍以上の余裕をもって満たす結果となった。

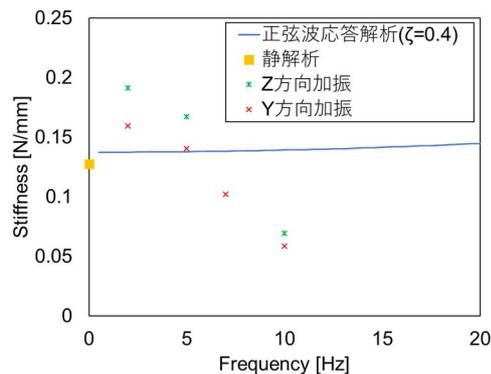


図9 動的剛性試験結果

図10のように90度折り曲げた状態で3軸方向に1 mmずつ変位を与えた場合の剛性も解析により求めた。Z方向変位で剛性が最大となったが、1255 N/mであり目標値の20分の1程度であった。

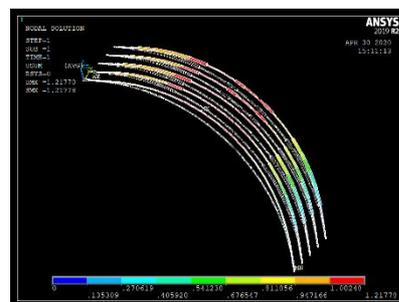


図10 X方向1mm変位の静解析結果(90度曲げ状態)

動的剛性試験の加振中及び加振後にもOHPは正常に動作し続けており、本研究にて十分なフレキシビリティと熱輸送性能を有する極細OHP製サーマルストラップを開発することが出来た。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔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 Iwata, N., Miyazaki, Y., and Ogawa, H.
2. 発表標題 Thermal performance of extra-thin oscillating heat pipe
3. 学会等名 Joint 19th International Heat Pipe Conference and 13th International Heat Pipe Symposium (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岩田直子、宮崎芳郎、小川博之
2. 発表標題 極細自励振動ヒートパイプの実験的研究
3. 学会等名 第39回熱物性シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岩田直子、宮崎芳郎、小川博之
2. 発表標題 極細自励振動ヒートパイプの熱輸送性能評価
3. 学会等名 平成29年度宇宙航行の力学シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Iwata, N., Miyazaki, Y., and Ogawa, H.
2. 発表標題 Micro oscillating heat pipe with check valves
3. 学会等名 International Symposium on Oscillating/Pulsating Heat Pipes (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Bonfiglio Carlotta, Bozzoli Fabio, Cattani Luca, Iwata Naoko, Rainieri Sara, Vocale Pamela
2. 発表標題 Thermal performance investigation by infrared analysis of mini pulsating heat pipe
3. 学会等名 37th UIT Heat Transfer Conference (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