

令和 2 年 6 月 6 日現在

機関番号：52605

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06214

研究課題名(和文) 低環境負荷を考慮した並列細管熱輸送デバイスの高効率化・高熱輸送量化

研究課題名(英文) High efficiency and high heat transport rate of parallel tubes heat transport device in order to consider low environmental impact

研究代表者

齋藤 博史 (SAITO, Hiroshi)

東京都立産業技術高等専門学校・ものづくり工学科・准教授

研究者番号：40401450

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：加熱冷却ヘッダと複数細管を接続した構造の並列細管熱輸送デバイスの作動流体に、低環境負荷冷媒を用いた際の熱輸送量計測と内部流動の可視化を行い、熱輸送特性を評価するとともに、高効率化、高熱輸送量化を目的に実施した。その結果、薄型化された並列細管熱輸送デバイスにおける熱輸送量の低下は、アルコール水溶液を用いることで熱輸送量は向上し、標準サイズと同等の熱輸送量が得られることを確認した。また、従来一般的に用いられてきたHFC冷媒に代えオゾン破壊係数および地球温暖化係数が低いHFO冷媒を使用した場合、両者の内部流動に差異は見られず、熱輸送量の低下は熱輸送に関係する物性値に起因するものであることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電子デバイスなど冷却用の相変化型並列細管熱輸送デバイスは、作動流体の沸騰・凝縮によって流体輸送を行うため、電力を一切用いることなく熱輸送を行うことができる。本研究ではグリーン冷媒を用いた並列細管熱輸送デバイスの熱輸送量と内部流動の同時計測から、複雑に変化する気液二相流の内部流動様式と熱輸送量の関係を明らかにし、すでに実用化されている他の熱輸送デバイスに比べ、高効率かつ高熱輸送量が得られることを確認した。また今後さらなる地球温暖化対策と環境影響物質フリーへの要求が高まる中、熱輸送デバイス以外にも相変化を伴う伝熱の要素技術として資することができる。

研究成果の概要(英文)：Heat transport measurement and flow visualization of the internal fluid flow of a parallel tubes heat transport device with a heating/cooling header and several tubes were performed to evaluate the heat transport characteristics and to improve the efficiency and heat transport rate of the device. It was confirmed that the improvement of heat transport rate in the thin type parallel tube heat transfer device was enhanced by using alcohol aqueous solution and the heat transport rate was comparable to that of a standard type. When HFO refrigerant with low ozone depletion potential and low global warming potential was used instead of the conventional HFC refrigerant, there was no difference in the internal fluid flow between the two refrigerants, indicating that the decrease in heat transport was due to the physical properties related to the heat transport rate.

研究分野：熱工学

キーワード：熱工学 流体工学 伝熱機器 気液二相流 熱輸送 内部流動

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

マイクロプロセッサ、パワーデバイス、データセンター内サーバー群などの半導体冷却以外にも、電気自動車で用いられる小型高出力モーターや高電力密度インバーターの冷却のため、高効率で高熱輸送量を有する熱輸送デバイスが必要とされている。それらの熱要求に対応するため、熱輸送デバイスの形状・大きさ・熱輸送長さは多種多様である。すでに実用化されている自励振動型蛇行細管ヒートパイプは作動流体の沸騰・凝縮によって振動流を誘起し、高効率の熱輸送能力を有する。一方、本研究で提案している加熱部・冷却部ヘッダを複数の細管でつなげた沸騰駆動型並列細管熱輸送デバイスは、ヘッダでの内部流動の自由度の高さによって鉛直設置時には蛇行細管ヒートパイプよりも高い熱輸送能力を持つことを実験で明らかにしてきた。

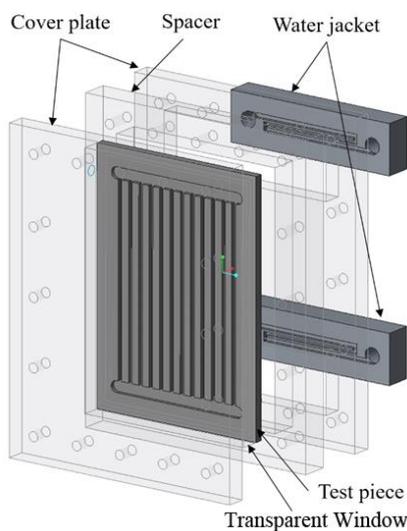
そこでこの並列細管型熱輸送デバイスの適用範囲の拡大に向けて以下の点に焦点を絞って研究を開始した。一つ目に環境負荷低減のために低環境負荷冷媒（作動流体）を用いた際の熱輸送量と内部流動の定量的評価と、熱輸送デバイスの熱輸送性能向上、もう一つは熱輸送能力の形状依存性（細管形状、ヘッダ形状・寸法など）を調査し、熱輸送デバイスの適用限界の拡大を狙ったものである。

2. 研究の目的

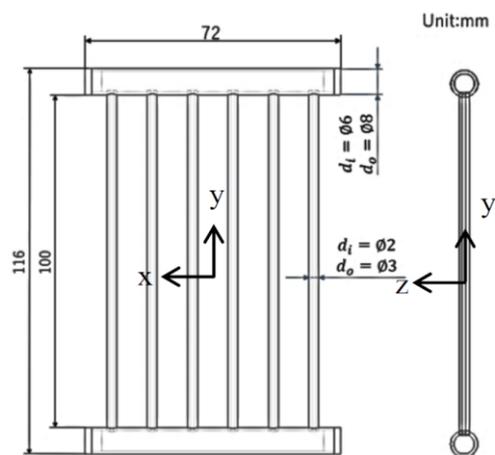
省エネが強く求められる中、電子デバイスの冷却に用いられる高効率な熱輸送デバイスである自励振動ヒートパイプは、細管内部の作動流体の沸騰・凝縮によって振動流を誘起させ、流体輸送のための電力を一切用いることなく熱輸送を行うことができる。これまでに加熱・冷却部ヘッダを有する並列細管型熱輸送デバイスを考案し、熱輸送量と内部流動の同時計測によって、複雑に変化する気液二相流の内部流動様式と熱輸送量の関係を明らかにし、すでに実用化されている蛇行細管型と比較し、高効率かつ高熱輸送量を有することを示した。そこで本研究は、さらなる地球温暖化対策と環境影響物質フリーに対応する為に低環境負荷作動流体での並列細管熱輸送デバイスの高性能化と応用を背景に、作動流体の種類、細管サイズ、ヘッダ形状・サイズ、などの熱輸送デバイスの形状・寸法が熱輸送特性に与える影響を調べることを目的とする。

3. 研究の方法

図1(a)にプレート型、図1(b)にパイプ型並列細管熱輸送デバイスのテストピース概略を示す。図1(a)のプレート型は、その材質は真鍮製でテストプレート表面には加熱・冷却部ヘッダと12本加工の溝型流路がエンドミル加工されている。細溝（細管）部長さは100mm、細管幅方向ピッチは6mmとなっている。標準サイズは正方形断面(2mm(幅)×2mm(深さ)、以降W2/D2と表記)、薄型は矩形扁平断面(4mm(幅)×1mm(深さ)、以降W4/D1と表記)となっており、細管面積を揃えた寸法となっている。細管両端部は加熱・冷却部ヘッダ(矩形断面：6mm(幅)×2mm(深さ)(標準サイズ)、6mm(幅)×1mm(深さ)(薄型)、長手方向長さ：72mm)に接続される。加熱部と冷却部の領域はテストピース両端部から25mmの領域とした。図1(b)のパイプ型は銅パイプにより構成されている。デバイス構造は、外径8mm、内径6mm、長さ72mmサイズの円筒容器を加熱・冷却部ヘッダとし、ヘッダ間を接続する細管は6本で細管長さ100mm、細管外径3mm、内径2mm、細管幅方向ピッチ12mmとした。ヘッダ部や細管部などの接合部はロウ付けされている。



(a) プレート型



図(b) パイプ型

図1 並列細管熱輸送デバイス概略

作動流体にはプレート型は水、1-ブタノール、2-ブタノール、2-プロパノール、エタノールをベースに水との二成分アルコール水溶液を使用した。耐圧性の高いパイプ型はHFC冷媒のR134aおよびHF0冷媒のR1234yfの高圧冷媒を用いた。作動流体は真空ポンプ（アルバック株式会社、GHD-100A）により真空度（東京電子株式会社 CC-10）が絶対圧力で約0.1Torrにテストコア内を減圧し、脱気封入した。作動流体の封入率は全内容積を基準（100%）とし、封入率50%とは全内容積の半分を意味し、封入率50%を標準的な封入率として設定した。

加熱条件については、プレート型はテストコアの上下ヘッダ部背面に取り付けられたジャケット部に、恒温槽より供給された加熱水および冷却水を供給し加熱条件を設定し、パイプ型はテストピースの加熱・冷却部ヘッダをコンテナ内に格納し、恒温槽から供給される加熱水および冷却水でそれぞれ加熱・冷却し、両形状とも加熱条件はボトムヒートとした。

熱輸送特性は熱輸送量 Q [W] ($Q = \rho V C_p (T_{c,out} - T_{c,in})$) および実効熱伝導率 k_{eff} [W/(m·K)] ($k_{eff} = QL / (A(T_{h,wall} - T_{c,wall}))$) を用い評価した。ここで、 V [m³/s] は冷却水体积流量、 ρ [kg/m³] は水の密度、 C_p [kJ/(kg·K)] は水の定圧比熱、 $T_{c,out}$ [°C] は冷却水出口温度、 $T_{c,in}$ [°C] は冷却水入口温度、 L [m] は壁温測定点間距離、 A [m²] は細管流路内断面積、 $T_{h,wall}$ [°C] は加熱側外壁表面温度、 $T_{c,wall}$ [°C] は冷却側外壁表面温度である。

内部流動の可視化実験は伝熱実験と同時に、テストピース前面に取り付けられたポリカーボネート製透明観察窓側からC-MOSカメラ（IDS UI-3160CP-M-GL Rev.2, 解像度800pixel×600pixel, 設定フレームレート100fps）を用い撮影した。

4. 研究成果

薄型化された並列細管熱輸送デバイス (W4/D1) の作動流体に水を用いた際の熱輸送量は、標準サイズ (W2/D2) に比べ約70%の性能低下が確認された。その内部流動は可視化実験から、加熱ヘッダから冷却ヘッダへ向かう蒸気流に比べ逆方向に向かう液還流が弱い状態であることが確認され、その結果熱輸送量が低下したと考えられた。そこで状態変化のタイミングや気液の流動に変化を与えるため二成分水溶液に着目し、作動流体にアルコール水溶液を用い熱輸送特性の改善を試みた。図2に薄型プレート並列細管熱輸送デバイス (W4/D1) の加熱水・冷却水温度差と熱輸送量の関係を示す。アルコール100%を用いた場合 (図中△ (▲) 記号) の熱輸送量は、2-プロパノールが最も高く、エタノールが最も低い結果となった。この二種のアルコールの物性値に注目し比較すると、2-プロパノールはエタノールに比べ比熱、動粘度などが高く、表面張力、蒸発潜熱が低い特徴を持つ。内部流動の可視化実験から、2-プロパノールはエタノールより大きな気泡を細管内で形成し、作動流体を冷却ヘッダへ押し上げている様子が確認され、作動流体の環流が活発であった。このことから表面張力の大きさは蒸気泡によるポンプ作用に大きく寄与することが推測される。また蒸気泡にトラップされ運ばれる液体の比熱が大きいことで、より多くの熱が運ばれたと考えられる。

図3に最大熱輸送量を示した加熱水・冷却水温度差が最大の時の、アルコール水溶液濃度と最大熱輸送量の関係を示す。アルコール水溶液濃度0%は水単体の状態を表す。4種のアルコール水溶液はすべて25%もしくは50%の濃度で最大熱輸送量を示している。内部流動の可視化から1-ブタノール100%、2-ブタノール100%および水は、上昇する蒸気泡が冷却ヘッダまで到達するような脈動流は見られなかった。エタノール100%は冷却ヘッダまで到達する環状噴霧流が確認され、蒸気泡により形成される液プラグが冷却ヘッダまで運ばれる様子は見られず液輸送は少ないと考えられる。それらのアルコールに対し2-プロパノール100%および2-プロパノール水溶液では、蒸気泡および液プラグが冷却

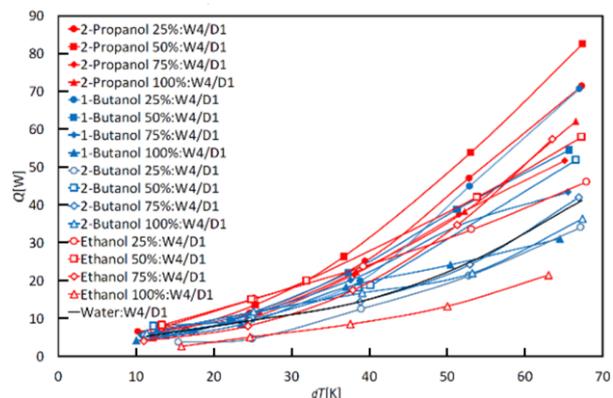


図2 各作動流体における加熱水・冷却水温度差と熱輸送量の関係 (プレート型コア (W4/D1), 封入率50%, 作動流体: 水, エタノール, 1-ブタノール, 2-ブタノール, 2-プロパノール)

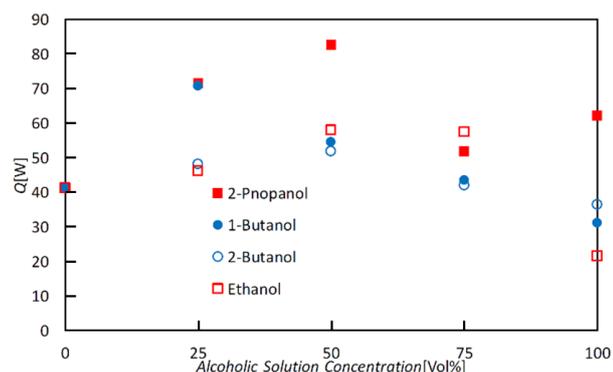


図3 各アルコール水溶液濃度と最大熱輸送量の関係 (プレート型コア (W4/D1), 封入率50%)

ヘッドまで到達する脈動流が確認され、気液の輸送が活発であることが確認された。アルコールの動粘度は水よりも高く、これは作動流体が流れやすいことを意味し、表面張力が低いことは大きな沸騰蒸気泡の生成を可能にする。熱輸送量の向上には、沸騰により生成された蒸気泡により、多くの液作動流体を冷却ヘッドへ押し上げることが必要であり、薄型化された並列細管熱輸送デバイスにおいて、2-プロパノール水溶液はそれを可能とした。またアルコール水溶液の濃度に対する物性値の変化は、粘度や表面張力は非線形的に変化することが知られており、アルコール水溶液濃度に対する熱輸送量の変化はそれらの非線形性の影響と考えられる。

次にパイプ型並列細管熱輸送デバイスの熱輸送特性について示す。パイプ型コアはその構造上、プレート型と比較して耐圧性に優れ、従来、高压冷媒として一般的に用いられてきた HFC 冷媒などを用いることができる。その HFC 冷媒は不燃性かつ安定した物質で、液化しやすいという特徴を持っている。しかしオゾン破壊係数はゼロであるが、温室効果ガスを多く排出するため地球温暖化への影響が大きく、その使用や製造は制限されつつある。その置き換えのための新しい冷媒として HF0 冷媒が注目され、HFC 冷媒と分子構造は似ているがオゾン破壊係数がゼロかつ温室効果ガスの排出量も少ないといった特徴を持つ。そこで作動流体として HFC 冷媒に R134a, HF0 冷媒に R1234yf を用いた場合の熱輸送特性について比較、評価した。

図 4 に冷媒封入率 α を変化させた際の加熱水・冷却水温度差と熱輸送量の関係を示す。パイプ型コアの場合、プレート型と比較して細管部全内容積に対しヘッド部内容積が大きく、封入率 25%は下部ヘッド体積の半分を満たす液封入量、40%は下部ヘッド体積と同じ液封入量、70%は下部ヘッドおよび細管部と上部ヘッド体積の半分を満たす液封入量となる。熱輸送量は同一封入率の場合、R134a のほうが R1234yf に比べて高い。R134a の封入率 40%, 50%, R1234yf の封入率 50%において、加熱水・冷却水温度差の増加に伴い熱輸送量は単調に上昇する。それに対して R134a, 封入率 25%, R1234yf, 封入率 25%, 40%では、加熱水・冷却水温度差 30K (R1234yf, $\alpha=25\%$) もしくは 40K (R134a, $\alpha=25\%$ および R1234yf, $\alpha=40\%$) をピークに熱輸送量が著しく低下している。これは作動流体の上昇に対し凝縮液の還流が不足し、加熱ヘッド内の作動流体が減り、最終的には加熱ヘッド内に液が無くなるドライアウトに至ったためである。封入率 70%での R134a, R1234yf の熱輸送は加熱水・冷却水温度差に対して変化はほとんどなく、熱輸送デバイスとして機能してしない。これは細管部管壁温度の変化が見られなかったことから、細管部まで作動流体が液の状態で充満し、気液の作動流体の上昇や凝縮液の還流が発生せず作動流体の相変化による循環が行われなかったためと推測される。

図 5 に HFC 冷媒 (R134a), HF0 冷媒 (R1234yf) の内部流動を、耐圧性を向上させたプレート型コア (W2/D2) を用い可視化実験を行った結果を示す。可視化領域は図中破線で囲まれた領域である加熱ヘッドおよび冷却ヘッドとその細管接続部の周辺部とした。内部流動の可視化画像より図 5(a)HFC-134a と図 5(b)HFC-1234yf の内部流動の様子は類似していることがわかる。加熱ヘッド側では冷媒の沸騰による細かな気泡が発生し多数存在していることが確認できる。また、加熱部ヘッド内でも、ヘッド内下部とヘッド内上部細管寄りでは気泡サイズが異なり、加熱部ヘッド内でも上側で大きな気泡へと成長している。これは、細かな気泡が合体、成長して合体気泡となったためである。細管部へは大小様々なサイズの気泡が流入し、細管部を加熱部から冷却ヘッド部へ向かうにつれて気泡サイズが成長していき、細管内で一つの大きな合体気泡となり気液の輸送が行われていることがわかる。冷却ヘッド内では蒸気の凝縮による液の存在と突沸(気泡による気液界面の盛り上がり)が確認

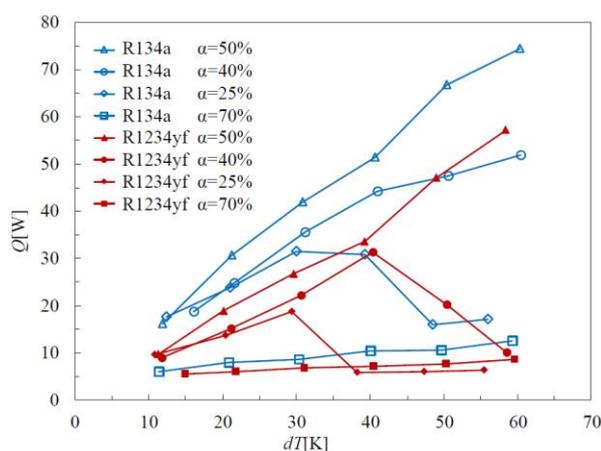


図 4 冷媒封入率を変化させた際の加熱水・冷却水温度差と熱輸送量の関係 (パイプ型コア, 作動流体: R134a, R1234yf)

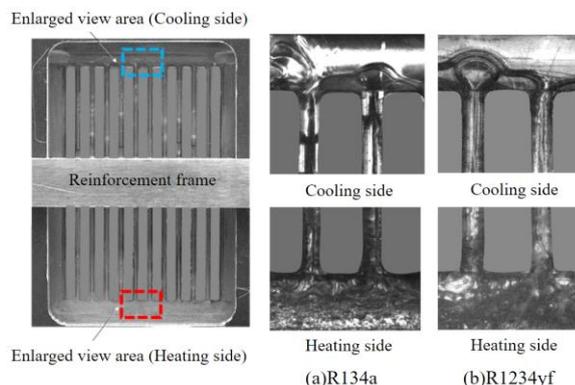


図 5 HFC 冷媒, HF0 冷媒の内部流動の可視化画像 (プレート型コア, 作動流体: R134a, R1234yf, 加熱水・冷却水温度差 25°C)

できる。冷却部ヘッダ内の気泡は、加熱ヘッダ内で見られた細かな気泡は見られない。細かな違いではあるが、加熱部ヘッダ内において R134a は気泡サイズが異なる層状の様子がみられるが、HF0 冷媒にはそのような層は見られず全体に様に同じサイズの気泡が入り乱れている様子が見て取れた。以上より、冷却部では HFC 冷媒と HF0 冷媒の状態に大きな差は見られず、加熱部では HFC 冷媒において気泡の層の形成があったが内部流動に顕著な差は見られず、どちらも沸騰による気泡の生成は活発であり、R134a の熱輸送量が R1234yf に対して約 23~40%程度の低下を示したのは、物性値の差によるものと推測される。

図 6 に HF0 冷媒 (R1234yf) の内部流動の時間変化を示す。可視化領域は図 5 に示した図中破線で囲まれた領域である。加熱部における気泡の生成は時間によらず大きな変化は見られない。常に細かな沸騰気泡が生成され、気泡はヘッダから細管に向かいながら気泡径が徐々に大きく成長している。細管部へは細かな気泡と合体気泡の両方が流入している。細管部内ではそれらの気泡が一つの大きな合体気泡となり上昇し冷却ヘッダへと到達している。冷却ヘッダには気液の流入が確認され、突沸は図にある通りの時間変化で発生と消滅を繰り返している。

図 7 に加熱水・冷却水温度差の変化に対する HF0 冷媒 (R1234yf) の内部流動の変化を示す。可視化領域は図 5 に示した図中破線で囲まれた領域である。加熱ヘッダ内部での沸騰気泡の生成は低温度差では少ないが、温度差が大きくなりにつれて多くなっている。冷却ヘッダ側では温度差に関わらず突沸が確認され、その出現頻度が変わるが、その流動様相に大きな変化は見られなかった。この様な観察結果は HFC 冷媒 (R134a) でも同様で流動状態に大きな違いは見られなかった。

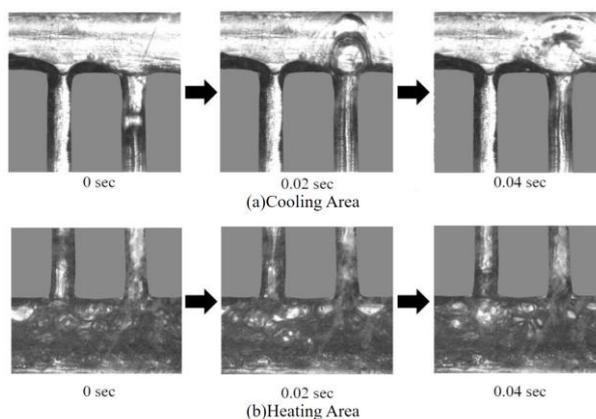


図 6 HF0 冷媒 (R1234yf) の内部流動の時間変化 (プレート型コア (W2/D2), 加熱水・冷却水温度差 25°C)

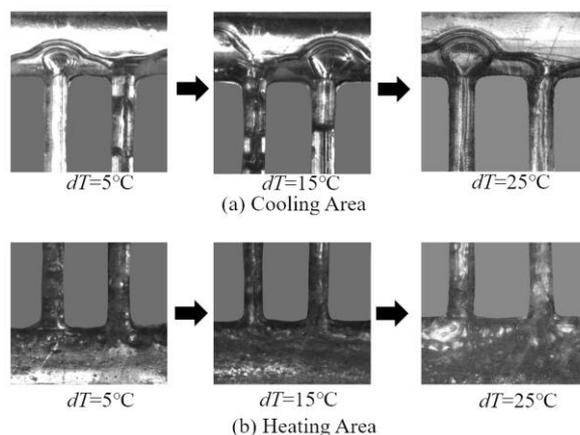


図 7 加熱水・冷却水温度差の変化に対する内部流動の変化 (プレート型コア (W2/D2), 作動流体: R1234yf)

本研究課題ではプレート型およびパイプ型並列細管熱輸送デバイスを用い、その形状寸法や作動流体を変更し熱輸送特性と内部流動の変化について調べた。作動流体の相変化を伴う熱輸送デバイスの熱輸送性能は、作動流体の熱物性値やデバイスの形状寸法の影響を大きく受け、その熱輸送特性を予測することは非常に難しい。しかしながら本研究で得られた低環境負荷冷媒の熱輸送特性や、二成分水溶液を用いた際の熱輸送量の向上といった結果は、今後の熱輸送デバイスの性能予測や性能向上の貴重なベースデータとなり得る。

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 Abiko Kazusa, Murata Akira, Saito Hiroshi, Iwamoto Kaoru	4. 巻 25
2. 論文標題 IMAGE ANALYSIS OF INTERNAL FLOW IN GROOVED-CHANNEL HEAT TRANSPORT DEVICE WITH PHASE CHANGE	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Flow Visualization and Image Processing	6. 最初と最後の頁 47～64
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1615/JFlowVisImageProc.2018021253	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11件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 中畑 大, 齋藤 博史, 村田 章
2. 発表標題 低環境負荷冷媒を用いた並列細管熱輸送デバイスの熱輸送特性
3. 学会等名 日本機械学会関東支部第26期総会・講演会(東京)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大瀬良 紫苑, 齋藤 博史, 村田 章, 工藤 正樹
2. 発表標題 低表面張力溶液を用いた薄型並列細管熱輸送デバイスの熱輸送特性
3. 学会等名 日本機械学会関東支部第26期総会・講演会(東京)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木 稜大, 齋藤 博史, 村田 章
2. 発表標題 HFC, HF0冷媒を用いた並列細管熱輸送デバイスの内部流動の可視化
3. 学会等名 日本機械学会関東学生会第59回学生員卒業研究発表講演会(東京)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三木 勇太, 齋藤 博史, 村田 章
2. 発表標題 アルコール水溶液を用いた薄型並列細管熱輸送デバイスの内部流動の評価
3. 学会等名 日本機械学会関東学生会第59回学生員卒業研究発表講演会(東京)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中畑 大, 齋藤 博史, 村田 章
2. 発表標題 HFO冷媒(R1234yf)を用いた並列細管熱輸送デバイスの熱輸送特性に封入率が及ぼす影響
3. 学会等名 日本機械学会 熱工学コンファレンス2019 (名古屋)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大瀬良 紫苑, 齋藤 博史, 村田 章, 工藤 正樹
2. 発表標題 薄型並列細管熱輸送デバイスの熱輸送特性に与えるアルコール水溶液濃度の影響
3. 学会等名 日本機械学会 熱工学コンファレンス2019 (名古屋)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小山凌, 村田章, 山本昌平, 岩本薫, 齋藤博史
2. 発表標題 深層学習を用いた蛇行細管型熱輸送デバイスの内部流動と壁温の非正常変化予測
3. 学会等名 第56回日本伝熱シンポジウム (徳島)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中畑 大, 齋藤 博史, 村田 章
2. 発表標題 HFC, HFO 冷媒を用いたパイプ型並列細管熱輸送デバイスの熱輸送特性評価
3. 学会等名 日本機械学会関東支部 第 25 期総会・講演会 (千葉)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大瀬良 紫苑, 齋藤 博史, 村田 章
2. 発表標題 "アルコール水溶液を用いた薄型並列細管熱輸送デバイスの熱輸送性能評価"
3. 学会等名 日本機械学会関東支部 第 25 期総会・講演会 (千葉)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長谷川 純, 齋藤博史, 村田 章
2. 発表標題 プレート型並列細管熱輸送デバイスの熱輸送特性にアルコール水溶液の混合比が与える影響
3. 学会等名 関東学生会第58回学生員卒業研究発表講演会 (千葉)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 細田季輝, 齋藤博史, 村田章
2. 発表標題 相変化を伴う薄型並列細管熱輸送デバイスの熱輸送特性評価
3. 学会等名 日本機械学会関東学生会第57回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

国立大学法人 東京農工大学 大学院工学府 機械システム工学専攻 村田研究室ホームページ
<https://www.mmlab.mech.tuat.ac.jp/>

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	村田 章 (MURATA Akira) (60239522)	東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・教授 (12605)	