

令和元年6月15日現在

機関番号：32702

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2017～2018

課題番号：17H07197

研究課題名（和文）マイクロカプセル相変化物質を用いた自励振動ヒートパイプの熱輸送性能向上

研究課題名（英文）Heat transport performance enhancement in pulsating heat pipe using microencapsulated phase change material

研究代表者

三浦 正義（MIURA, Masayoshi）

神奈川大学・工学部・助教

研究者番号：50803376

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：銅板上に正方形溝流路を形成した2ターンU字自励振動ヒートパイプを用い、マイクロカプセル相変化物質（MEPCM、相変化設定温度40℃）を作動流体に添加する実験を行い、MEPCM添加による自励振動ヒートパイプの熱輸送性能向上効果を明らかにした。具体的には、種々のMEPCM添加濃度作動流体で実験を行い、熱輸送量と加熱部・冷却部温度差の関係（熱輸送特性）を得た。その結果、作動流体に対するMEPCM添加濃度には熱輸送性能を最大にする最適値が存在することが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

今日、電子機器は小型化と消費電力の増加に伴い発熱密度が増大しており、その冷却技術の重要性が増している。そのなかで、従来のヒートパイプと異なる熱輸送機構をもち、今後の高性能熱輸送デバイスとして注目される自励振動ヒートパイプの熱輸送性能向上手法として、これまで着目されていなかった顕熱輸送を増加させる方法を提案した。具体的には、マイクロカプセル相変化物質（MEPCM）を作動流体に添加する方法であり、作動流体にMEPCMを添加する最適な条件を実験的に調べ、本手法の熱輸送性能向上効果を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：The heat transport performance enhancement in a pulsating heat pipe (PHP) was experimentally evaluated using a microencapsulated phase change material (MEPCM, melting point 40℃). In these experiments, a two-turn U-shaped PHP with a square channel formed on a copper plate was used as the test channel. Experiments were conducted for various MEPCM weight fractions, and the relationships between the heat transport rate and the wall temperature difference between the heating section and the cooling section (heat transfer characteristics) were obtained. The results indicated that an optimum weight fraction of MEPCM can be obtained at which the PHP heat transport performance is maximized.

研究分野：熱工学

キーワード：相変化蓄熱材 機能性流体 往復振動流 熱輸送促進 電子機器冷却

1. 研究開始当初の背景

今日、電子機器は小型化と消費電力の増加に伴い発熱密度が増大しており、その冷却技術の重要性が増している。そのなかで、従来のヒートパイプと異なる熱輸送機構をもつ自励振動ヒートパイプ (Pulsating Heat Pipe, PHP) が今後の高性能熱輸送デバイスとして注目されている^[1]。自励振動ヒートパイプは、図1に示すように、加熱部と冷却部の間を何回も往復する流路内を真空排気し、作動流体を流路体積のおよそ50%封入したものである。そして、加熱部と冷却部の温度差に伴う蒸気圧力差に伴い、表面張力で形成された液柱が自励的に振動する。このとき顕熱輸送（流路壁と作動流体の間の対流熱伝達による熱輸送）と潜熱輸送（作動流体の蒸発・凝縮による熱輸送）が同時に行われるため、高い熱輸送性能が得られる。このように自励振動ヒートパイプでは顕熱輸送と潜熱輸送の両方が生じることが特徴であるにも関わらず、それらの寄与の割合はこれまで十分に明らかにされていなかった^[2]。しかし、申請者らのこれまでの研究により顕熱輸送と潜熱輸送の寄与の割合が同程度であること、すなわち作動流体の自励振動による熱輸送において顕熱輸送が作動流体往復振動による熱輸送の約50%を占めることが明らかにされた^[3]。

従来、自励振動ヒートパイプの熱輸送性能向上手法として潜熱輸送に寄与する沸騰・蒸発を促進するものが多く試みられてきた。加熱部へのウィック挿入^[4]、作動流体への固体微粒子添加^[5]、セルフリウエティング流体の作動流体としての使用^[6]など、加熱部での蒸発液膜の形成を強化し、潜熱輸送を促進する研究が行われている。しかし、前述したように熱輸送全体の約50%を占める顕熱輸送を促進し、自励振動ヒートパイプの性能を向上させる試みは従来行われていない。そこで、自励振動ヒートパイプの熱輸送性能をさらに向上させるためには、これまで着目されていない顕熱輸送を増加させる方法を考案し、その熱輸送促進機構を解明することが望まれる。

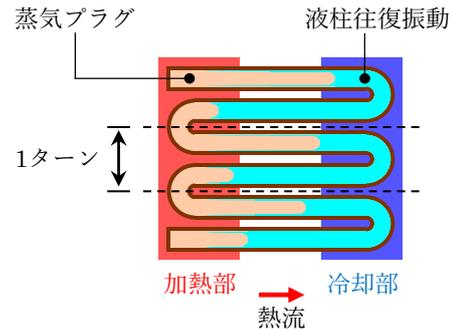


図1. 自励振動ヒートパイプ模式図

2. 研究の目的

本研究では、流路壁と作動流体の間の対流熱伝達による顕熱輸送に着目した自励振動ヒートパイプの熱輸送性能向上手法を提案し、その有効性と詳細な機構を明らかにする。顕熱輸送を増大させる方法として、マイクロカプセル相変化物質 (Microencapsulated Phase Change Material, MEPCM) を作動流体に添加することを提案する。図2に示すように、MEPCMは、固-液相変化蓄熱材であるパラフィン等を直径が数 μm のカプセルの中に充填したものであり、このMEPCMを自励振動ヒートパイプの作動流体に分散混合する。このMEPCM添加作動流体は融解・凝固の潜熱を利用するため、小さな温度変化で多量の熱授受が可能となり優れた熱輸送媒体が実現すると考えられる。また、潜熱蓄熱材をマイクロカプセル化して作動流体に混合するため、蓄熱材が固相時においても流動性を保つことができる。そこで本研究では、作動流体にMEPCMを添加する最適な条件を実験的に調べ、本手法の性能向上効果を明らかにすることを目的とする。

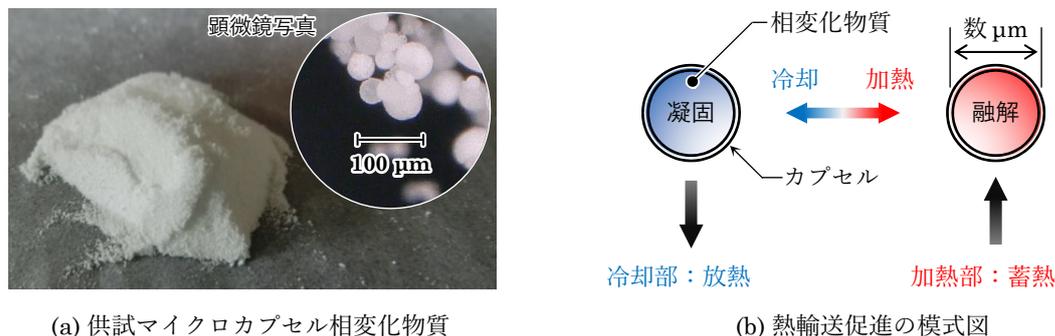


図2. マイクロカプセル相変化物質添加による熱輸送促進

3. 研究の方法

図3に実験装置の概略を示す。正方形断面 (2 mm × 2 mm) の2ターンU字溝流路を設けた銅板の1面に透明なポリカーボネイト板を密着し、流路内部を可視化した。この銅板の加熱部 (長さ70 mm) は、カートリッジヒーターを圧入した銅ブロックおよびセラミックヒーターを流路壁面に押しつけることにより加熱している。冷却部 (長さ60 mm) は、冷却水ジャケットを用いることで冷却部温度を一定とした。流路壁面温度測定のため流路壁外表面から深さ1 mmの位置にT型熱電対 (素線径0.1 mm) を設置した。なお、実際の自励振動ヒートパイプ

と同じように作動流体蒸気の圧縮比を小さくするため、銅ブロックおよび銅管から構成される蒸気チャンバーが流路端部にそれぞれに設置されている。このとき蒸気チャンバー部において、作動流体蒸気が凝縮することを防ぐため、チャンバー外壁面にリボンヒーターを巻き、チャンバー壁温が加熱部温度とおおよそ等しくなるように加熱した。チャンバー先端には圧力計が取り付けられており、ティー部にはバルブが取り付けられており、それぞれのチャンバーのバルブには、真空ポンプおよび作動流体封入装置が接続されている。作動流体としては、エタノール（密度 785 kg/m^3 ）を用いた。なお、作動流体として蒸留水（密度 999 kg/m^3 ）を用いた実験も行ったが、実験装置の耐熱の都合上、加熱部温度を十分に高くすることができず、安定した熱輸送を行うことができなかった。供試 MEPCM（三木理研工業 PMCD-40SP）は、相変化設定温度 40°C であり、エイコサンを主成分とした相変化蓄熱材をメラミンでカプセル化したものである。カプセルの密度は約 1000 kg/m^3 になるように調整されており、粒子径は約 $47 \mu\text{m}$ (SMD) であった。以上の実験装置を用いて、流路に作動流体を封入しない（流路壁熱伝導による熱輸送のみが行われる）場合、作動流体としてエタノールを封入する場合、および MEPCM 添加（1 wt%、2 wt%、3 wt%）エタノールを封入する場合で実験を行い、流路壁面温度を測定した。作動流体の封入量に関しては、ヒーター加熱を行う前の静止した液柱の先端位置 x_t （初期液柱先端位置）を変化させて実験を行った。ここで、位置 x は流路冷却部端部から加熱部へ 10 mm の位置を原点として、加熱部方向への距離を正とする。また、熱輸送量 Q_t は、事前に見積もった周囲環境への熱損失をヒーター投入電力から差し引くことで評価した。本報告では液柱内 MEPCM 濃度を一定に保つため、加熱部が冷却部に対して上になるように流路を 45° 傾けた場合（図 4(a)）における実験結果について議論する。これは、水平設置流路（図 4(b)）および垂直設置流路（図 4(c)）のいずれの場合においても、液柱内 MEPCM 濃度を一定に保つことができなかったためである。水平設置流路の場合では、液柱の自励振動に伴い MEPCM が加熱部

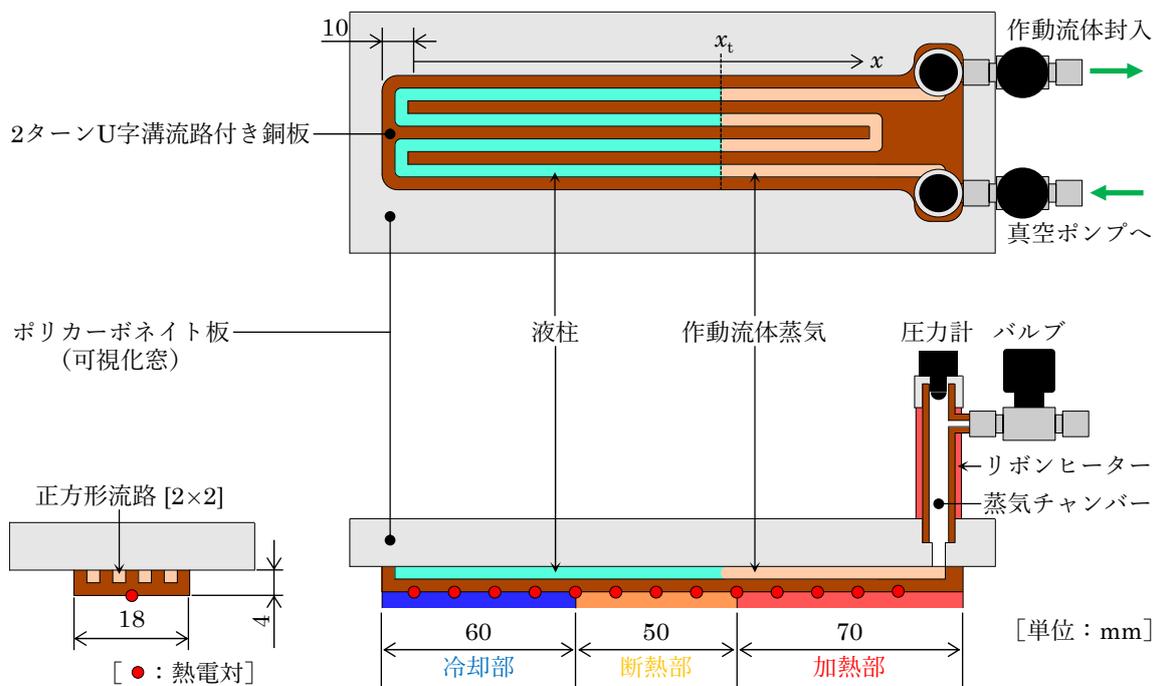


図 3. 実験装置

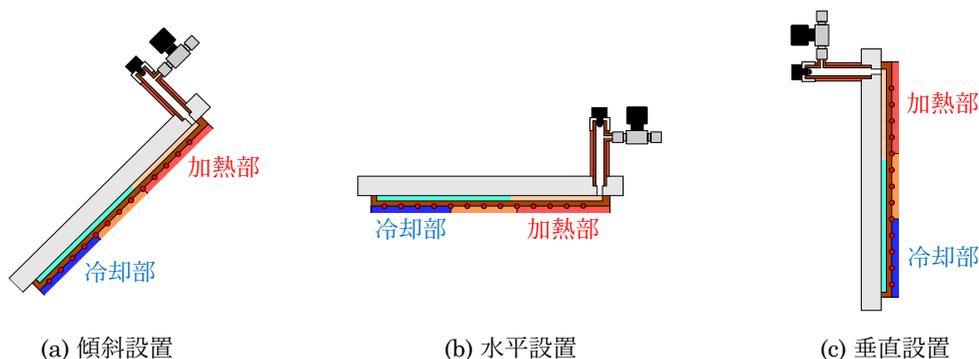


図 4. 流路設置方向

流路壁に押し出され加熱部流路壁端部に残留し、液柱内 MEPCM が存在しなくなった。また垂直設置流路（トップヒート）の場合では、MEPCM が冷却部の U 字ターン部に沈殿している様子が確認された。これらは、MEPCM の密度が作動流体として用いたエタノールの密度よりも大きいために発生したものである。

4. 研究成果

(1) 作動流体の封入量の影響

初期液柱先端位置が $x_t = 55 \text{ mm}$ (●印), 75 mm (●印), 95 mm (●印) の場合における時間平均流路壁温度分布を図 5 に示す。このとき、ヒーター投入電力は一定であり、作動流体は MEPCM 添加 (1 wt%) エタノールを用いている。初期液柱先端位置 x_t が増加するほど、作動流体封入量が増加することに対応する。図 5 から、加熱部流路壁温度に着目すると、初期液柱先端位置 $x_t = 95 \text{ mm}$ のとき、加熱部流路壁温度が最も低くなっており、最も熱輸送性能が高くなっていることがわかる。

図 6 に熱輸送量 Q_t と初期液柱先端位置 x_t の関係を示す。熱輸送量 Q_t は、事前に見積もった周囲への熱損失をヒーター投入電力から差し引くことにより算出した。また、図 6 には、作動流体による熱輸送量 Q_{wf} 、流路壁による熱輸送量 Q_w が示されている。流路壁による熱輸送量 Q_w は、式 (1) を用いて算出した。

$$Q_w = A_w k_w \frac{T_{HA} - T_{AC}}{L_{ad}} \quad (1)$$

ここで、 A_w は流路壁断面積 (56 mm^2)、 k_w は流路壁熱伝導率、 T_{HA} は加熱部-断熱部境界温度、 T_{AC} は冷却部-断熱部境界温度、 L_{ad} は断熱部長さ (50 mm) である。作動流体による熱輸送量 Q_{wf} は、式 (2) のように熱輸送量 Q_t から流路壁による熱輸送量 Q_w を差し引くことで求めた。

$$Q_{wf} = Q_t - Q_w \quad (2)$$

図 6 から、初期液柱先端位置が 95 mm のとき最も熱輸送量が大きくなる。これは、初期液柱先端位置 $x_t = 95 \text{ mm}$ のとき液柱振動振幅が大きく、液柱が加熱部に深く浸入するためであると考えられる。このことは、初期液柱先端位置が増加するにつれ、作動流体による熱輸送量 Q_{wf} が増加していることから確認できる。ヒーター投入電力を一定にして実験を行っているため、初期液柱先端位置が増加すると、熱輸送性能が向上することによる加熱部流路壁温度の低下に伴い、流路壁による熱輸送量 Q_w は減少している。次節では、初期液柱先端位置 $x_t = 95 \text{ mm}$ の場合について議論する。

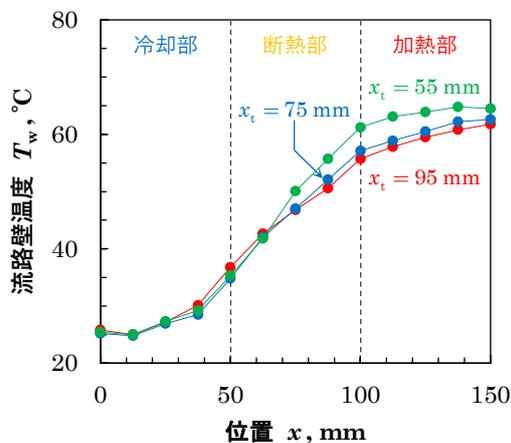


図 5. 流路壁温度分布 (封入量の影響)

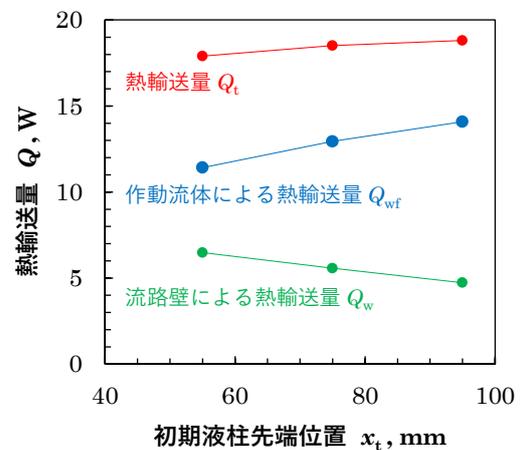


図 6. 熱輸送量と初期液柱先端位置の関係

(2) MEPCM 添加濃度の影響

種々のヒーター投入電力で実験を行うことで求めた熱輸送量 Q_t と加熱部流路壁平均温度と冷却部流路壁平均温度の温度差 ΔT の関係を図 7 に示す。□印は作動流体がエタノールの場合 (0 wt%), ●印は作動流体が MEPCM 添加 (1 wt%) エタノールの場合, ●印は作動流体が MEPCM 添加 (2 wt%) エタノールの場合, ●印は作動流体が MEPCM 添加 (3 wt%) エタノールの場合である。◇印は作動流体を封入しない場合、すなわち流路壁の単純熱伝導によるのみ熱輸送が行われる場合である。図 7 から、加熱部-冷却部温度差 ΔT がおよそ 23°C よりも小さいとき、作動流体を封入した場合としない場合における同じ温度差に対する熱輸送量が、およそ等しくなっている。これは、加熱部と冷却部の温度差に伴う蒸気圧力差が小さいために、液柱が自励振動せず、液柱往復振動に伴う熱輸送が行われなかったためである。加熱部-冷却部温度差 ΔT がおよそ 23°C より大きくなると、流路内の液柱は自励振動を開始し、作動流体を封入しない場合、すなわち流路壁熱伝導のみの場合と比較して、作動流体を封入した場合に

おける熱輸送量 Q_t が增大している。そして加熱部－冷却部温度差が約 27°C よりも大きくなると、作動流体がエタノールの場合と比較して、MEPCM 添加 (1wt%) エタノールの方が、同じ温度差に対する熱輸送量 Q_t が増加している。これは、MEPCM 内部の相変化蓄熱材の融解による潜熱吸収が行われ、熱輸送促進が行われたためである。一方、作動流体が MEPCM 添加 (3wt%) エタノールの場合では、作動流体がエタノールの場合と比較して、熱輸送量が減少している。この理由は、作動流体への MEPCM の添加量が多く、液柱質量が増加するとともに粘性係数が増すため、液柱振動振幅が小さくなった結果、液柱－流路壁間の対流熱伝達による顕熱輸送量が低下するとともに、液柱が加熱部深くまで浸入せず十分に MEPCM 内部の相変化蓄熱材が融解しなかったためであると考えられる。

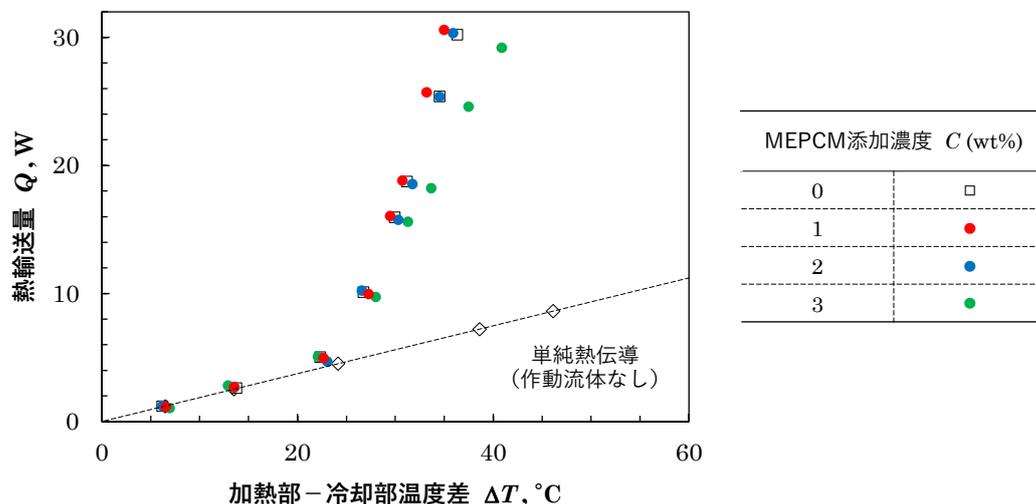


図 7. 熱輸送特性 (添加濃度の影響)

種々の加熱部－冷却部温度差 ΔT における熱輸送量 Q_t と作動流体への MEPCM 添加濃度 C の関係を図 8 に示す。作動流体への MEPCM 添加濃度 $C=0$ wt% の場合は、作動流体としてエタノールのみを封入した場合の結果である。作動流体への MEPCM 添加濃度 $C=1$ wt% の場合では、いずれの加熱部－冷却部温度差 ΔT においても熱輸送量 Q_t が最大となっている。このことから、作動流体への MEPCM 添加濃度 C には、自励振動ヒートパイプの熱輸送量を最大にするための最適値が存在することがわかる。これは、前述したように、MEPCM 添加濃度 $C=1$ wt% の場合では、液柱の振動振幅が大きく、MEPCM による熱輸送促進が活発に行われる一方で、MEPCM 添加濃度 $C=3$ wt% の場合では、液柱の振動振幅が小さく、MEPCM による熱輸送促進がされなかったためである。また、加熱部－冷却部温度差 ΔT が減少するにつれ、同じ温度差における MEPCM 添加濃度 0 wt% と 1 wt% の熱輸送量の差 (熱輸送促進量) が減少している。これは、温度差の減少に伴い圧力差が小さくなったことで液柱の振動振幅が小さくなり、液柱が加熱部に深く浸入しなくなるとともに、液柱振動数が減少し液柱内の MEPCM の攪拌が抑えられた結果、MEPCM 内部の蓄熱材が十分に融解しなくなったことが原因であると考えられる。

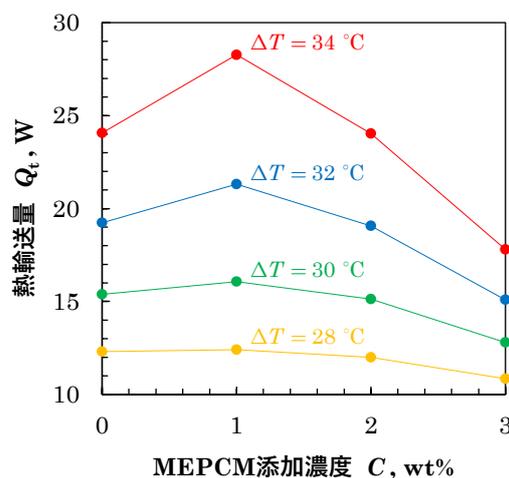


図 8. 熱輸送特性 (添加濃度の影響)

〈参考文献〉

- [1] Ma, *Oscillating heat pipes*, (2015), pp.1–11.
- [2] Han *et al.*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **59**, (2016), pp.692–709.
- [3] Miura *et al.*, *International Journal of Heat Mass Transfer*, **106**, (2017), pp.997–1004.
- [4] Senjaya *et al.*, *International Journal of Heat Mass Transfer*, **60**, (2013), pp.816–824.
- [5] Karthikeyan *et al.*, *Experimental Thermal Fluid Science*, **54**, (2014), pp.171–178.
- [6] Fumoto *et al.*, *ASME. Journal Electronic Package*, **132**, (2010), pp.031005-1–031005-4.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 0 件）

〔学会発表〕（計 0 件）

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

出願年：

国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。