

機関番号：12608

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20560180

研究課題名（和文） 固体微粒子添加による自励振動ヒートパイプの性能向上と
熱輸送機構の解明研究課題名（英文） Study on improvement of pulsating heat pipe by solid particles,
and its heat transport mechanism

研究代表者

長崎 孝夫 (NAGASAKI TAKAO)

東京工業大学・大学院総合理工学研究科・准教授

研究者番号：30155923

研究成果の概要（和文）：

自励振動ヒートパイプの性能向上を図るため、外径3mmの銅管を用いた12ターン流路を用い、作動媒体を水、エタノール、R141bとし、アルミナ、銅、銀の微粒子を添加する実験を行い、固体微粒子添加による性能向上効果を明らかにした。また矩形直線流路内の1個の液柱の自励振動につき可視化実験を行い自励振動機構の詳細を調べるとともに、液膜蒸発・凝縮を考慮したモデルにより実験結果を概ね説明できることを示した。

研究成果の概要（英文）：

The effect of small solid particles on the performance of pulsating heat pipes (PHPs) was investigated using a 12 turn PHP made of copper tubes. Alumina, copper or silver particles were added into the working fluid, water, ethanol or R141b, and the enhancement of heat transport performance by small particles was clarified in detail. In addition, the mechanism of PHP was investigated by a visualization experiment and analysis on the oscillation of a liquid column in a square straight channel.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：ヒートパイプ、自励振動、固体微粒子

1. 研究開始当初の背景

(1) CPU, パワーエレクトロニクス素子など電子素子の発熱量増加に伴い、より高性能の冷却方法が必要となる。

(2) 電子機器冷却のための熱輸送デバイスとして従来ウィック式ヒートパイプが用いられているが、熱輸送限界のさらなる向上が

望まれている。

(3) 以上の観点から今後の電子機器冷却における熱輸送デバイスの候補として自励振動ヒートパイプが注目され、その作動機構の解明と高性能化が重要となる。

2. 研究の目的

- (1) 自励振動ヒートパイプの性能向上のため作動液体に固体微粒子を添加することを提案し、その効果を実験的に明らかにする。
 (2) 自励振動ヒートパイプの可視化実験と解析を行い、その作動機構を明らかにする。

3. 研究の方法

- (1) 固体微粒子添加による性能向上の実験に用いた装置の概略を図1に示す。外径3mm、内径2mmの銅管を用い、6ターンの蛇行管2組を両端部に連結し、12ターンの閉ループ流路としている。加熱部と冷却部では図2のように銅板上のU字型の溝に銅管を半田付けし、加熱部では銅板背面をセラミックヒーターにより加熱し、冷却部では銅板内部に流路を設け、冷却部壁温が一定となるよう、冷却水により冷却する。
 (2) 自励振動ヒートパイプの作動機構解明のために用いた可視化実験装置テスト部概略を図3に示す。流路は銅板上に形成した断面2mm×2mmの正方形溝流路であり、上面を透明ポリカーボネート板とし、液柱の振動を高速度ビデオカメラにより撮影する。この流路の内部を真空排気した後、作動液体であるエタノールを流路長さの半分程度、封入する。流路の両端部は電気ヒーターにより加熱、中央部は冷却水により冷却されており、加熱量の増加とともに液柱の自励振動が発生する。なお流路両端は円筒チャンバーに接続し、液柱が大きな振幅で振動できるように、蒸気部分の体積を大きくしている。また、このチャンバー一部で蒸気圧力を測定する。

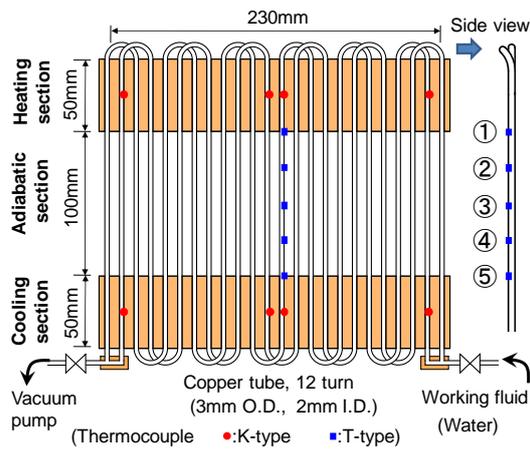


図1 実験装置 (多管ループ型)

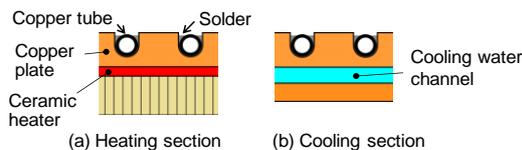


図2 加熱部と冷却部の詳細

(3) 解析モデル

高速度ビデオカメラ撮影より、液柱が冷却部側に移動した後の壁面が液で濡れているように観察された。このような壁面上の液膜の蒸発・凝縮を考慮した解析として、図4のように、液柱振動に伴い一定厚さの液膜を残し、蒸気部分について液膜からの蒸発または凝縮量、及び壁面からの顕熱伝熱量を計算することにより、蒸気のエネルギー式、状態方程式を解く。状態方程式より得られた左右の蒸気圧力の差に従い液柱の運動方程式を計算し、液柱の速度変化を算出する。本モデルでは液膜厚さは場所によらず一定とするが、実現象を考えると、蒸発域では薄く、凝縮域で厚くなっていると考えられるべきである。そこで本研究では液膜厚さにより定まる蒸発・凝縮熱伝率について蒸発時には1より大きい係数を乗じ、蒸発時の熱伝達係数を凝縮時より大きい値とした。

4. 研究成果

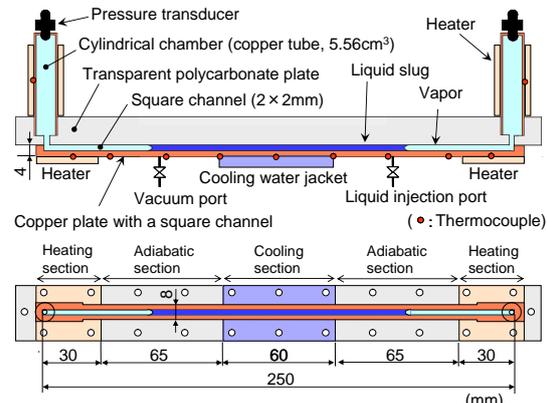


図3 矩形直線流路内の液柱振動の可視化実験テスト部

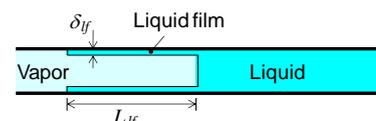


図4 解析モデル

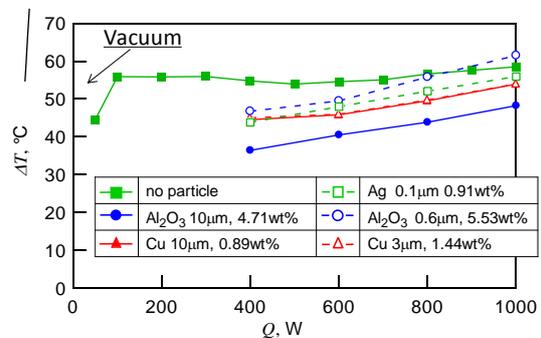
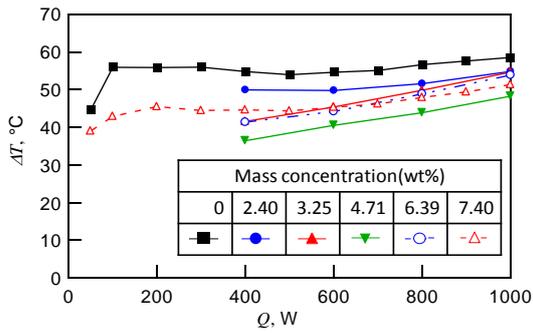
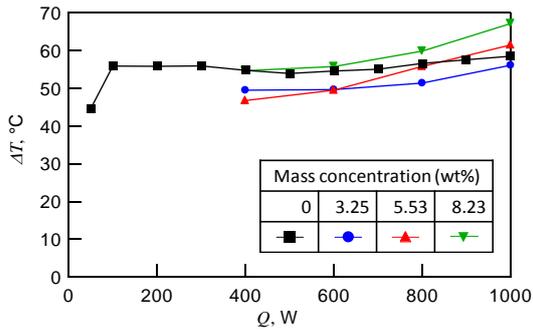


図5 加熱部温度上昇に及ぼす固体微粒子添加の影響 (水平設置)

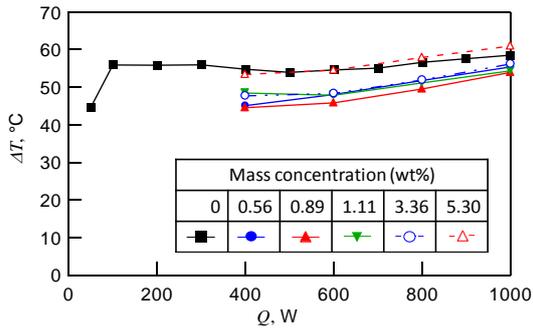


(a) 10 μm

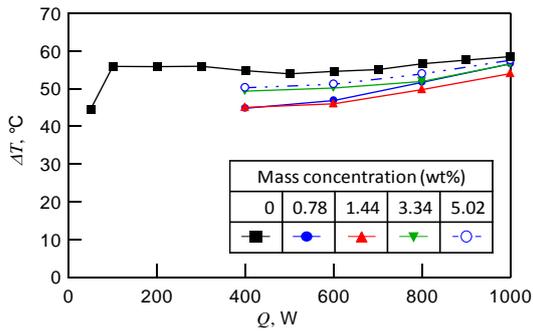


(b) 0.6 μm

図6 微粒子添加濃度の影響
(アルミナ粒子、水平設置)



(a) 10 μm



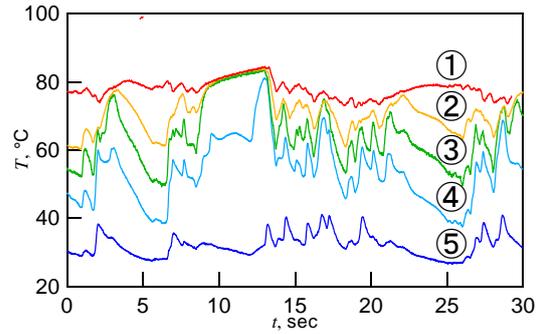
(b) 3 μm

図7 微粒子添加濃度の影響
(銅粒子、水平設置)

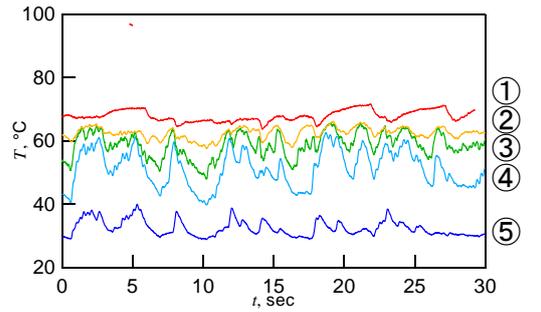
(1) 固体微粒子添加による高性能化

① 各種固体微粒子の性能向上効果 (作動流体が水、設置姿勢が水平の場合):

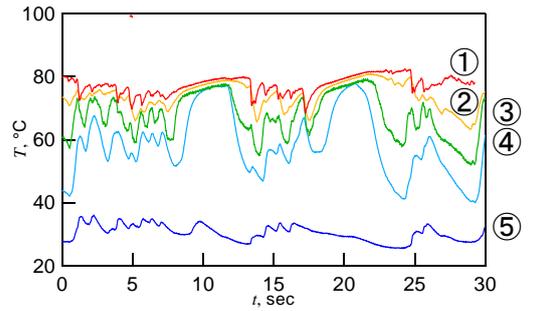
作動流体を水とし、自励振動ヒートパイプの設置姿勢を水平とした場合について、アル



(a) 粒子なし (純水)



(b) Copper 10 μm , 0.89wt%



(c) Copper 10 μm , 5.30wt%

図8 壁温変動 (400W)

ミナ粒子 (10 μm , 0.6 μm)、銅粒子 (10 μm , 0.3 μm)、銀粒子 (0.1 μm) を添加した場合の実験結果を図5に示す。図の横軸は加熱量、縦軸は加熱部と冷却部の温度差であり、それぞれの材質とサイズの粒子について最も性能が優れる、すなわち加熱部・冷却部温度差が小さくなる粒子添加濃度の結果が示されている。微粒子を添加しない場合に比べ、粒子添加により加熱部・冷却部温度差が減少し、アルミナ 10 μm 粒子を 4.71wt% 添加した場合が最も性能の優れることが分かる。

② 粒子添加濃度の影響:

アルミナ粒子および銅粒子について粒子添加濃度が加熱部温度上昇に及ぼす影響を図6, 7に示す。アルミナ粒子の場合、粒径 10 μm では約 5wt%, 0.6 μm では約 3wt%, 銅粒子の場合、粒径 10 μm および 3 μm とともに約 1wt% の時に最も性能向上効果が大きいことが分かる。

③ 壁温変動：

粒子添加による性能向上の機構を検討するため壁温変動を調べた結果を図8に示す。壁温の測定位置は図1に示されている。この図は水に銅微粒子を添加した場合で、加熱量が中程度である400Wの時の結果である。粒子を加えない場合には図8(a)のように振動が間欠的であるが、粒子添加濃度を0.89wt%とすると振動は連続的となり、粒子添加濃度を5.3%とすると振動は再び間欠的となる。このように粒子添加濃度に最適値が存在する理由として、粒子添加濃度が大きすぎると混合液の粘性係数増加のため性能が低下することが考えられる。

④ 設置姿勢の影響：

作動流体を水とし、アルミナ粒子(10 μ m, 5.19wt%)を添加した場合について設置姿勢の影響を調べた結果を図9に示す。鉛直ボトムヒート、水平、鉛直トップヒートの順に性能が優れるが、いずれの設置姿勢においても固体微粒子添加により性能が向上することが分かった。

⑤ 作動媒体の影響(粒子添加なし)：

作動媒体を水、エタノール、R141bとし、固体微粒子を添加しない場合の結果を図10に示す。鉛直ボトムヒートの場合には全加熱

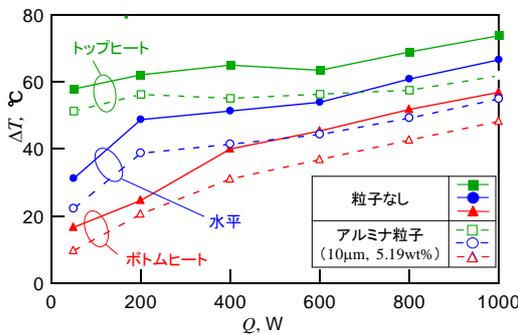


図9 設置姿勢の影響(水、アルミナ粒子)

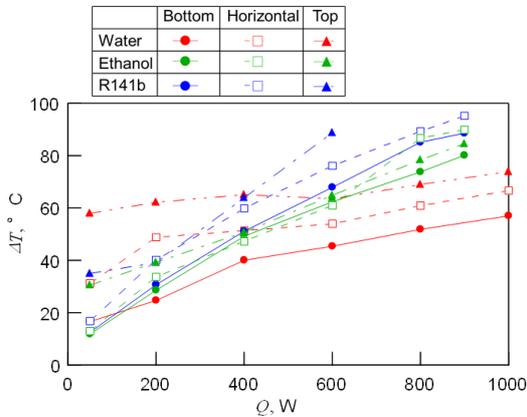


図10 設置姿勢の影響(粒子なし)

量範囲で水が最も性能が優れる。水平および鉛直トップヒートの場合、高加熱領域では水が最も性能が優れるが、加熱量が中程度以下では水に比べて沸点の低いエタノールおよびR141bの方が性能が優れることが分かった。

⑥ R141bの場合の粒子添加の効果：

R141bに10 μ mアルミナ粒子を加えた場合の結果を図11に示す。設置姿勢によらず粒子添加により性能が向上し、特に鉛直トップヒートの場合、および高加熱量域において性能向上効果が大きいこと、また添加濃度2.76%に比べ4.82%の方が性能が優れることが分かった。

さらに水平設置についてR141bに銅微粒子を加えた場合の結果を図12に示す。20 μ mに比べ10 μ m粒子を添加する方が性能が良いこと、また10 μ m粒子の場合の最適濃度は1%程度であり、R141bの場合には銅微粒子とアルミナ微粒子で性能向上効果は同程度であることが分かった。

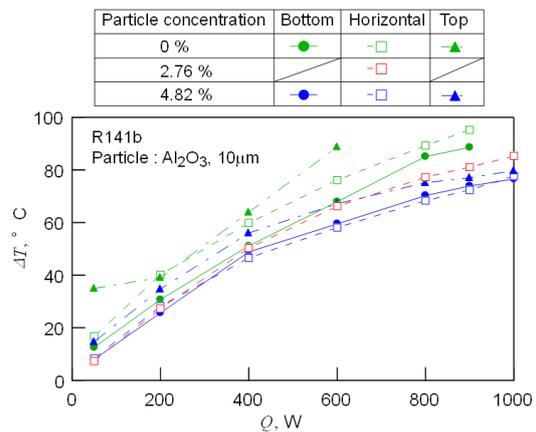


図11 R141bの場合の粒子添加(アルミナ粒子10 μ m)

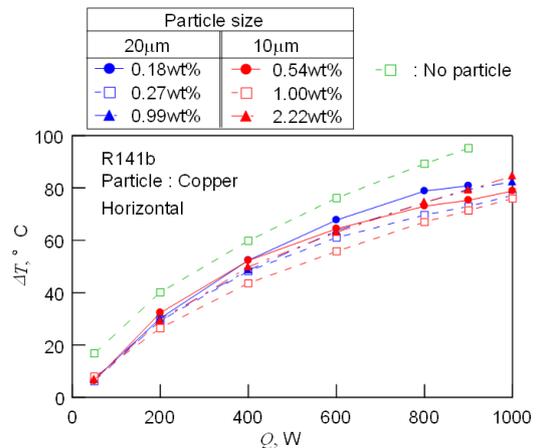


図12 R141bの場合の粒子添加の効果(銅粒子、水平設置)

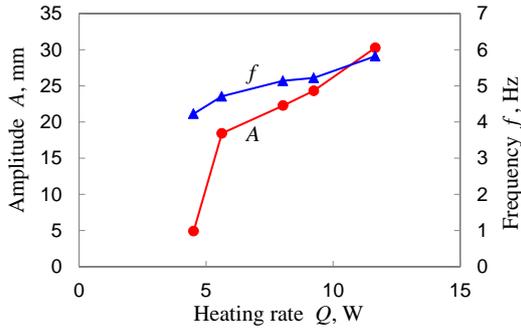


図 13 液柱振動の振幅と振動数

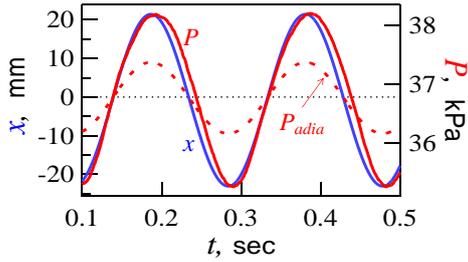


図 14 液柱変位と蒸気圧力の関係 ($Q=8.03W$)

(2) 液柱振動の可視化実験と解析

① 液柱振動の振幅と振動数：

図 3 の装置を用い、液柱の自励振動の可視化実験を行った結果として、液柱振動の振幅および振動数と加熱量の関係を図 13 に示す。加熱量の増加とともに振動数および振幅が増加することが分かる。

② 液柱の変位と蒸気圧力の関係：

液柱変位 x および蒸気側圧力 P の時間変化の実測値を図 14 に示す。ここで変位 x は液柱の振動中心を原点とし、液柱が加熱部（ここで示した蒸気圧力の側）に近づく方向、すなわち液柱変位により蒸気が圧縮される方向を正の符号としている。また液柱変位により蒸気が単純に断熱圧縮されたとした時の圧力 P_{adia} も示されている。実測された蒸気圧力の振動振幅は P_{adia} よりも大きいこと、また蒸気の圧力振動は液柱振動に対し位相遅れを持つことが分かる。このような断熱圧縮との差異は蒸発・凝縮の作用によるものであり、圧力と液柱変位の位相遅れによって正味の仕事が発生し、壁面摩擦に抗して液柱振動が維持されていることが分かった。

③ 蒸気圧力と壁温の関係：

正弦波的に振動する蒸気圧力の最大値と最小値に対する飽和蒸気温度を加熱部および冷却部壁温とともに図 15 に示す。液柱先端の振動中心位置は断熱部の中央位置にあるにも関わらず、蒸気圧力の飽和温度は加熱部壁温に近い値となっている。これは高速度

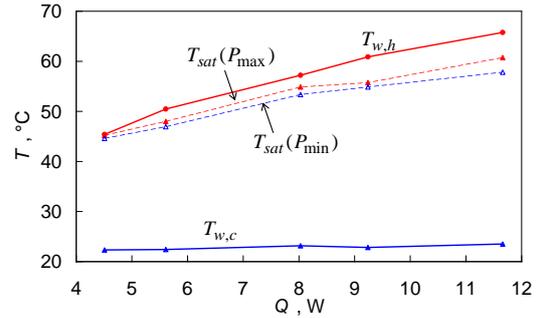
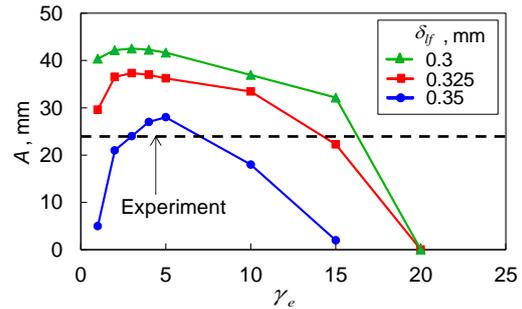
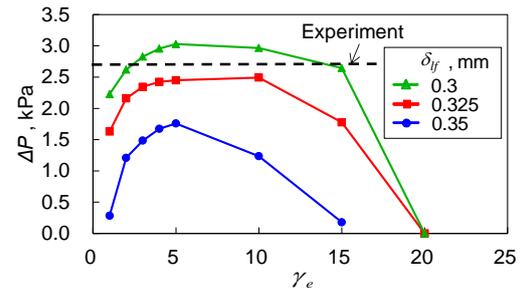


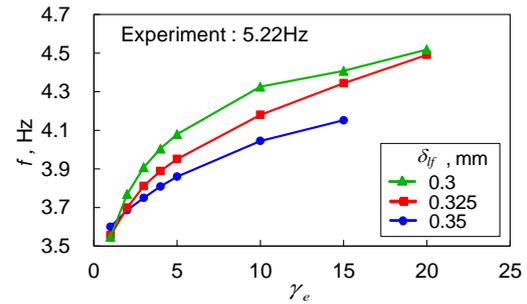
図 15 蒸気圧力に対する飽和温度と壁温の関係



(a) 液柱振動の振幅



(b) 左右の蒸気の圧力差の振動振幅



(c) 振動数

図 16 解析結果

ビデオ撮影による観察結果にも見られたように、液柱先端が冷却側に移動した後も加熱部付近の壁は液膜で濡れており、この薄液膜の蒸発のため蒸気部分の圧力が加熱壁と冷却壁の平均温度に対する飽和圧力よりも高くなっていると考えられる。

④ 解析結果：

第 3 章 (3) の解析モデルで述べた方法によ

る数値計算結果を図 16 に示す。ここで δ_{lf} は計算パラメータとして与えた凝縮液膜厚さであり、凝縮熱伝達率を λ_l / δ_{lf} (ただし λ_l は液の熱伝導率) で与える。 γ_e は蒸発熱伝達率と凝縮熱伝達率の比であり、この値も計算パラメータとする。図 16(a), (b) のように、液膜厚さ δ_{lf} を 0.3mm 程度、蒸発熱伝達率の増大係数 γ_e を 15 程度とすると、液柱振動および圧力差の振動の振幅が実測値と比較的よく一致する。このように凝縮熱伝達率に比べ蒸発熱伝達率を 15 倍程度と大きくすることによって実験値を説明できる理由として、液膜と加熱壁の固気液三相界線における急速蒸発が考えられる。ただし振動の周波数については解析結果は実測値よりも小さい。今後の課題として、液柱内温度場の非定常変化を含めた解析が必要と考えられるが、壁面上の液膜のみを考慮した解析でも、液柱の自励振動がかなりの程度説明できることが分かった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 2 件)

①海老名季学、長崎孝夫、伊藤優、固体微粒子添加による自励振動ヒートパイプの性能向上 (粒子サイズと材質の影響)、日本機械学会 2010 年度年次大会、2010. 9. 7、名古屋工業大学

②海老名季学、長崎孝夫、栗下悠斗、伊藤優、自励振動ヒートパイプの熱輸送性能に及ぼす固体微粒子添加の影響、日本機械学会熱工学コンファレンス、2009. 11. 7、山口大学工学部

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長崎 孝夫 (NAGASAKI TAKAO)

東京工業大学・大学院総合理工学研究科

・准教授

研究者番号：30155923