

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 29 日現在

機関番号：52605

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420137

研究課題名(和文) 界面追跡法直接計算を用いた熱輸送デバイス内気液二相流のモデル化に関する研究

研究課題名(英文) Study on modeling of gas-liquid two-phase flow in heat transport device using direct calculation of interface-tracking method

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・助教

研究者番号：40401450

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：細管接続方法の異なる二つの熱輸送デバイス、並列細管型および蛇行細管型熱輸送デバイスを対象に、熱輸送量と内部流動様相の同時計測をし、数値計算におけるベンチマークデータになり得る定量的な内部流動の情報を得る事を目的とし実施した。その流動様相は、高速度カメラによって撮影され、可視化画像に対して画像解析し、流動様相の時間的、空間的变化を特定した。これにより、気液二相流の内部流動特性を理解する上で重要となる各流動様式の出現率、気液界面数、気液界面速度、および特徴周波数を求めることができた。そして熱輸送性能予測を行なう上で重要となるベースデータを得た。

研究成果の概要(英文)：In this study, simultaneous measurement of heat transport rate and internal flow pattern was performed for two different heat transport devices: Parallel-Tube Heat Transport Device (PTH) and Oscillating Heat Pipe (OHP). The purpose was to obtain quantitative internal flow information that could be benchmark data in numerical calculation. The internal flow patterns were captured by using a high-speed camera, and the temporally and spatially changing of flow patterns were identified by laterally averaged brightness of the captured images. From this analysis results, the internal-flow characteristics: appearance ratio of flow patterns, gas-liquid interfacial velocity, the number of interfaces, and the characteristic frequency of internal flow could be calculated in this study. These can become benchmark data usable for future development of the numerical models and this type of quantitative data has not been supplied in the open literature.

研究分野：熱工学

キーワード：熱工学 流体力学 伝熱機器 気液二相流 熱輸送 内部流動

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、高出力レーザ、データセンター内サーバー群など冷却に高効率で高熱輸送能力を有する熱輸送デバイスが必要とされるものは数多く、そこで要求される大きさ・輸送長さなどは多種多様である。その代表である蛇行細管型自励振動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、高い熱輸送性能を発揮する。一方、本研究では加熱部・冷却部ヘッダを複数の細管でつなげた並列細管型を提案し、ヘッダでの内部流動自由度の高さによって鉛直設置時には蛇行細管型よりも高い熱輸送量を達成することを実験で明らかにした。この蛇行細管型、並列細管型ともにさらなる熱輸送性能向上には、(1)熱輸送量の変化による流動様式と顕熱・潜熱輸送割合の変化、(2)表面張力の熱輸送性能への寄与、(3)数値計算での性能予測と諸条件の最適化、といった解決すべき不明点・問題点が存在する。これまでに、広範な実験パラメータに対する熱輸送デバイスの実験が行われているが、熱輸送性能と内部流動の関係を定量的に評価した例はない。そこで従来定性的にしか計測されていない流動様式の時空間変化を熱輸送量と同時に計測し、画像解析による流動様式の特特定量的な各種統計量の算出を行うことで、並列細管型の熱輸送性能と内部流動の定量的評価をすることは大きな意味を持つ。このデバイス内部の気液二相流は流動様式によって圧力損失、熱伝達率が大きく変化するため、この熱輸送・内部流動データベースを得ることは、熱輸送デバイスの性能予測・性能向上のために重要であり、気液二相流が関係する機器（例えばボイラ、エアコン）の性能予測・性能向上にも同様に重要である。

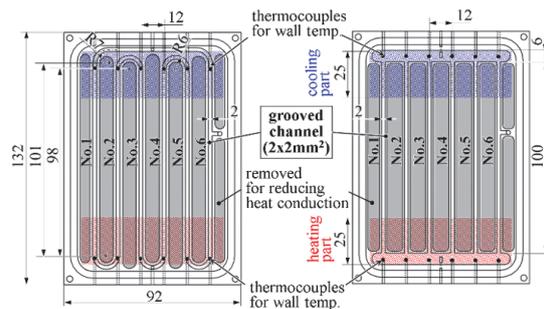
2. 研究の目的

電子機器やパワー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、顕熱と潜熱での熱輸送を行う。しかし高熱輸送量域では気液二相内部流動は複雑に変化するため性能予測、現象理解は進んでいない。そこで本研究は、金属製溝型テストコアを用いた熱輸送デバイスの熱輸送量と内部流動の同時計測により熱輸送・内部流動データベースを構築し、二流体モデルによる性能予測、界面追跡法非定常三次元直接計算による構成方程式の高精度化のため、気液二相流界面輸送現象の理解を深め、熱輸送デバイスの性能予測・性能向上を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

図1に(a)蛇行細管型(OHP)と(b)並列細管型(PTH)のテストプレート概略を示す。材質は真鍮で、テストプレート表面には、正方形断面(2×2mm²)の溝型流路が6本(No.1~No.6、

ピッチ:12mm)加工されている。両端部の接続方法は、OHPではターン部(曲率半径:6.0mm)により接続され、PTHではヘッダ(矩形断面:6×2mm²,幅:72mm)に接続される。金属壁内熱伝導による熱輸送の影響を低減するため、流路周辺に深さ2.8mmの除去加工を施しており、そこにシリコンラバーシートを設置し、除去部を通じて流路間を作動流体が行き来しないようにしている。加熱部と冷却部の長さは両熱輸送デバイスともに25mmであり、加熱部および冷却部の壁温計測はテストプレート裏面に埋め込んだK型シース熱電対(直径1mm)各6本により行った。



(a) 蛇行細管型(OHP) (b) 並列細管型(PTH)

図1 テストプレート概略

図2テストコア概略に示すように、テストプレートはポリカーボネイト製の可視化窓、セラミックヒーター及び冷却ジャケットで構成され、前後の金属フレームによりボルト締めされ、固定される。

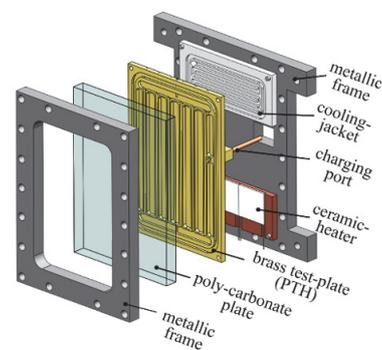


図2 テストコア概略

図3に実験装置系統図を示す。実験は鉛直設置条件で行なった。作動流体にはエタノール、フロリナート(FC-72)の2種類を用い、流路内容積に対し体積封入率50%とした。冷却ジャケットには温度23℃の冷却水を恒温水槽より供給し、冷却を行なった。またヒーターの印加電圧を調節し、テストプレートへの入力熱量を20~150W(1.1~8.0×10⁴ W/m²)の範囲で変化させた。また冷却水の入口・出口温度をK型熱電対(直径200ミクロン)により各1点測定し、冷却水による熱輸送量 $Q_{water} (= \rho c V (T_{out} - T_{in})) [W]$ で評価した。ここで ρ : 冷却水密度[kg/m³], c : 冷却水の比熱[J/(kg・K)], V : 冷却水流量[m³/s], T_{in} , T_{out} :

冷却水入口・出口温度 [K] である。テストプレートは金属製のため、壁内部の熱伝導による熱輸送量の影響を無視できない。そこで、加熱部と冷却部間で線形温度分布を仮定し、フーリエの法則で壁内熱伝導による熱輸送量を算出し、 Q_{water} の実測値から差し引くことで、熱輸送量 $Q[W]$ を評価した。尚、壁内熱伝導による熱輸送寄与割合は、PTH のエタノールの条件において 50.7~11.4% であった。

内部流動の可視化は、テストコア前方から 2 台のメタルハライドランプ (170W) により照明し、高速度カメラ (Photron, FASTCAM Mini ux50, 解像度 $768 \times 512 \text{pixel}^2$) により内部の流動の様子を撮影速度 250fps でメモリ容量限度の 116.452sec (29113frames) 撮影した。

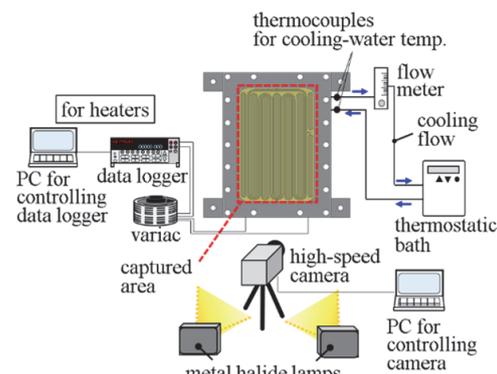


図3 実験装置系統図

画像解析は 6 本の流路 (No. 1~No. 6) について、内部に生じる気相・液相の時空間変化を特定した。図 4 に内部流動画像解析方法を示す。瞬時の撮影画像 (図 4(a)) から流路内画像を抽出し (図 4(b) 左), 更に画像の輝度値を反転させると、気液界面部分は高輝度 (白色) となる (図 4(b) 右)。この輝度値反転をした流路内画像から幅方向平均輝度値分布 (図 4(c)) を算出すると、気相と液相では輝度値に差が生じ、気相は高輝度、液相は低輝度となるため、流路内の気相と液相の空間的分布状態がわかる。

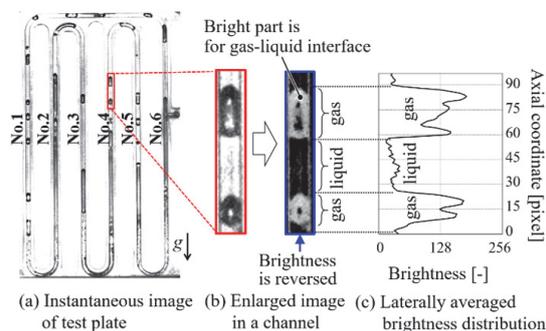


図4 内部流動画像解析方法

ここで画像解析結果の一例として、図 5(a) に OHP について幅方向平均輝度値分布を各時刻で算出し、時系列順に並べたものを示す。図の横軸は時間、縦軸は流路軸方向座標であり、図中の明るい箇所は気相、暗い箇所は液相を表す。また図の左に示す g の矢印は重力加速度の向きを表し、ターン部を含めた OHP

の流路中心軸上で座標を定義しているため、OHP の構造上、隣接する流路では向きが反転することとなる。図 5(a) より、本画像解析によって、加熱部から冷却部へと向かう上昇気相流や、逆向きに下降する液相流を捉えられることが確認でき、流路内の時空間的流動変化をこの画像によって表わすことができる。次に、図 5(a) の各直線流路部の画像に対し Sobel filter によりエッジ検出を行ない、更に二値化した結果を図 5(b) に示す。OHP のターン部分は、PTH との比較のため除外している。ここで二値化のための閾値は、判別分析法により決定した。先の図 4(b) より、気液界面で輝度値は大きく変化するため、本解析により気液界面をエッジとして検出できる。図 5(b) の図中白い部分は気液界面に相当しており、また界面数が急増している箇所は小気泡を伴うチャン流である。このようにして、気液界面の時空間変動も捉えることができる。また内部流動の特徴量として、気液界面数と気液界面速度の算出を行なった。気液界面数は、図 5(b) より輝度値のピーク数を数えることで各時刻の気液界面数を求め、その時間平均値により評価した。また気液界面速度の導出では、二時刻間の幅方向平均輝度値分布 (図 4(c)) について、軸方向座標をずらして相互相関係数を算出し、相互相関値の最も高い場合の変位量から、気液界面速度を決定した。なお、重力方向とは逆向き気液界面速度の正方向と定義した。

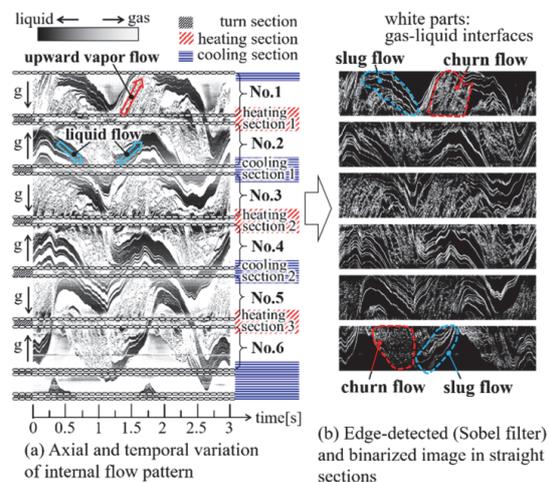


図5 内部流動の画像解析結果例

4. 研究成果

(1) 伝熱実験結果

加熱部および冷却部の壁温差 $\Delta T_{wall} [^{\circ}C]$ に対する、熱輸送量 $Q[W]$ の変化を図 6 に示す。デバイスの種類や作動流体の種類によらず、加熱部および冷却部の外壁温度差と共に、熱輸送量はほぼ単調増加する。また本実験の加熱条件範囲内では、加熱部の流路壁が乾き面となるドライアウトの状態は確認できなかった。熱輸送量は各壁温度差において、PTH のエタノールを作動流体とした条件が、最も高い値を示した。熱輸送性能には、作動流体

のもつ蒸発潜熱や熱伝導率, 比熱などの熱物性が関与すると考えられ. 本実験ではいずれの熱物性値も FC-72 より高い値を有するエタノールにおいて, より高い熱輸送性能が確認された.

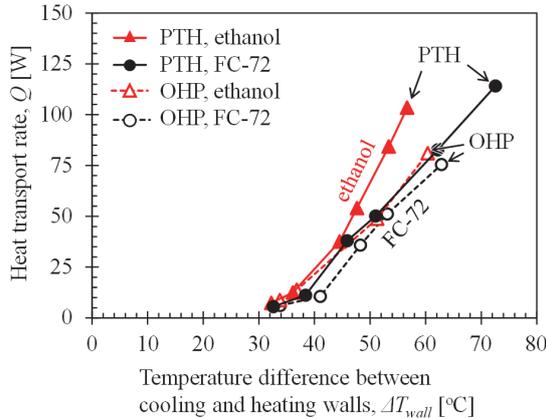
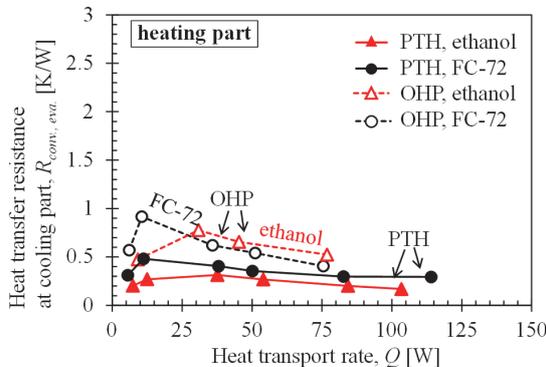
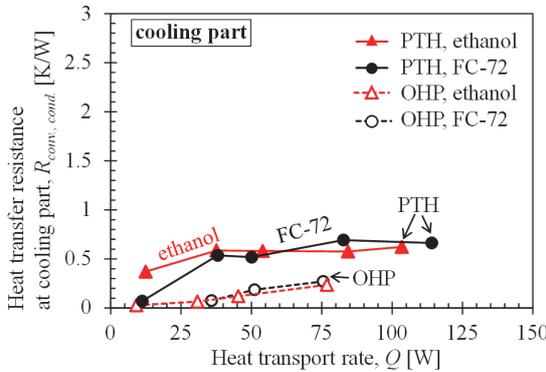


図 6 加熱部および冷却部の壁温差に対する熱輸送量の変化



(a) 加熱部側熱伝達抵抗



(b) 冷却部側熱伝達抵抗

図 7 加熱部および冷却部における熱伝達抵抗値

図 7(a), (b) に加熱部および冷却部における熱伝達抵抗値, $R_{conv,eva}$ [K/W] および $R_{conv,cond}$ [K/W] の結果をそれぞれ示す. 図 7(a) の加熱部の熱伝達抵抗は, 全ての条件において $Q > 25$ W の領域で, 熱輸送量と共に減少する傾向にあり, OHP よりも PTH の方が低い熱伝達抵抗値を示す. これは PTH のヘッダが, 沸騰に伴う蒸気泡の生成・成長のための十分な空間が確保でき, ヘッダ内での対流の自由度を高めているためと考えられる. 図 7(b) の冷却部の熱伝達抵抗は, 加熱部側とは異なる

り, PTH よりも OHP の方が低い値を示す. これは, 熱輸送量が増加すると PTH の冷却部ヘッダ内には液相が溜まるためであることが, 可視化実験結果からわかっている. OHP では振動的な流れが生じることにより, 冷却部の流路内には適宜, 新鮮な流体が流れ込むため, 高い熱伝達率を有すると考えられる.

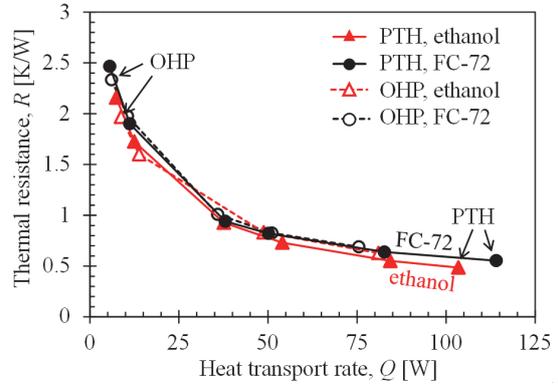


図 8 加熱部外壁から冷却部外壁までの全熱抵抗値

図 8 に加熱部外壁から冷却部外壁までの全熱抵抗値, R [K/W] の結果を示す. デバイスの種類や作動流体によらず, 全熱抵抗値は熱輸送量と共に減少し, PTH のエタノールを作動流体とした条件が, 最も低い熱抵抗値 $R=0.49$ K/W を示す. 熱輸送量に対する熱抵抗値の変化に着目すると, いずれの熱輸送デバイスも, 作動開始点から次の熱輸送量条件にかけて, 熱抵抗値の減少割合が大きい. これは内部流動の変化によるもので, 可視化実験結果からわかっている.

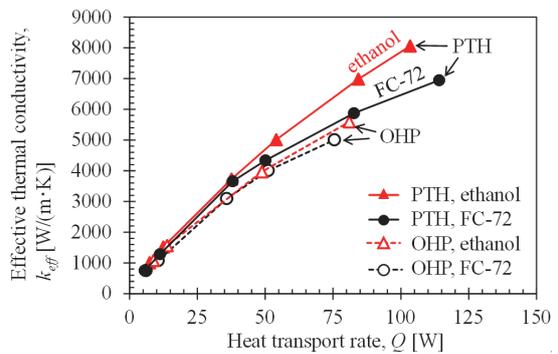


図 9 有効熱伝導率

図 9 に有効熱伝導率, k_{eff} [W/(m·K)] の結果を示す. デバイスの種類や作動流体によらず, 有効熱伝導率は熱輸送量と共にほぼ単調に増加する. 両デバイスを比較すると, いずれの作動流体についても, OHP よりも PTH の方が高い有効熱伝導率を示す. これは, 特に高い熱輸送域において, PTH の加熱部および冷却部の外壁温度差が OHP のものよりも低いためであるが, 両デバイスとも効果的に熱輸送が行えていると言える.

(2) 可視化実験結果

高速カメラにより撮影されたデバイスの内部流動に着目し、異なる二種類の熱輸送デバイス：並列細管型 (PTH)，蛇行細管型 (OHP)，および二種類の作動流体：エタノール，フッリナート (FC-72) について、内部流動の違いについて述べる。

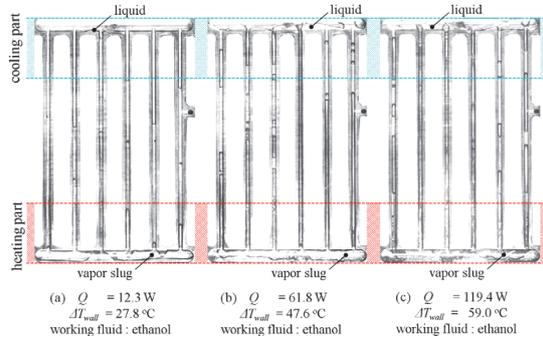


図 10 PTH 内部流動可視化画像 (エタノール)

図 10 に PTH の内部流動可視化画像の一例を示す。いずれの作動流体についても共通することは、熱輸送量が低い条件では、気液スラグ流支配の類似した流れ場が確認でき、熱輸送量が増加すると、作動流体によって異なる流れが生じることである。熱輸送量の増加に伴い、加熱部における蒸気泡の発生は活発化し、蒸気泡による冷却部への液相輸送もまた活発化し、冷却部ヘッダにおける平均的に見た液位が上昇する。特にエタノールは、加熱部ヘッダの流路幅全体を満たすサイズの気液スラグ流が生じており、液相を効果的に加熱部から冷却部へと輸送する気泡駆動型ポンプとしての動作が、FC-72 よりも優れていると言える。この結果、熱輸送量は PTH のエタノールを作動流体とした条件が、FC-72 よりも高い熱輸送性能を示した要因と考えられる。OHP は PTH と同様に熱輸送量が低い条件では、いずれの作動流体も気液スラグ流支配の類似した流れ場が確認でき、熱輸送量が増加すると作動流体によって異なる流れが生じる。熱輸送量が最大となる熱輸送量条件では、いずれの作動流体についても一方向流れが形成される。この一方向流れの向きは、各作動流体ともに全撮影時間 116.452sec において変化しなかった。

図 11 に内部流動画像解析により得られた PTH の最大熱輸送量時の内部流動の時空間変化を特定した結果を示す。横軸は時間、縦軸は流路軸方向座標である。全撮影時間は 116.452sec であるが、ここでは内部流動変化が見やすいように、5sec 分の解析結果のみを表示している。図中の暗部は液相、明部は気相に対応する。PTH では、作動流体によって流動状態の違いが生じている。エタノール (図 11(a)) の場合には、中間熱輸送量時 (図省略) に比べて気相割合は増加し、液相または気相支配の流れが各流路で入れ替わり生じる。FC-72 (図 11(b)) の場合には、流路 No. 1,

No. 3, No. 6 では液相支配の下降流、流路 No. 2, No. 4, No. 5 では気相支配の上昇流がそれぞれ生じる。このような各直線流路で発生した一方向流れは、全撮影時間 116.452sec の内に流動方向が変化しなかった。OHP (図省略) では、どちらの作動流体でも、PTH の FC-72 とは性質の異なり、振動流の伴った一方向流れが発生する。この一方向流れは OHP の特徴的な流動状態の一つである。全撮影時間 116.452sec の内に流動方向が変化することはなかった。OHP の各直線流路はターン部によって接続されるため、流路は単一ループの構造をもち、一方向流れの発生時には、流体を効果的に循環させることができるため、熱輸送に寄与する。

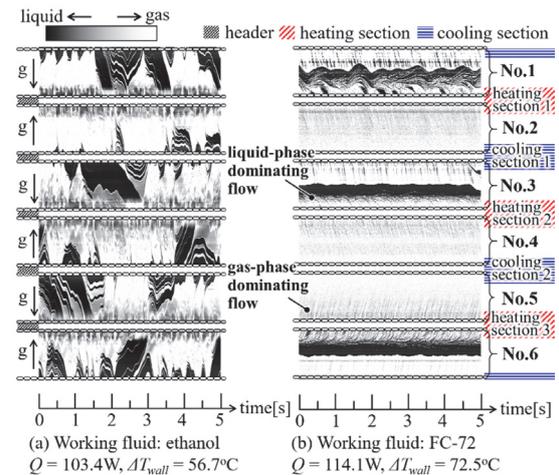


図 11 PTH の最大熱輸送量時の内部流動の時空間変化 (5 秒間分)

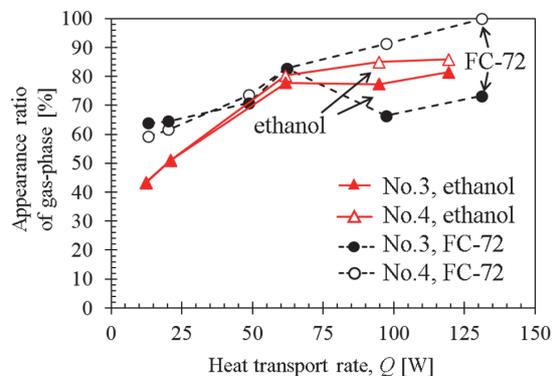


図 12 PTH の直線流路部 (No. 3, No. 4) における気相率の時空間の平均割合

図 12 に PTH の直線流路部における気相率の時空間の平均割合を算出した結果を、中央二つの流路: No. 3 および No. 4 について示す。いずれの作動流体についても、最小熱輸送量から $Q = 62\text{W}$ までの区間において、No. 3 および No. 4 の気相率は熱輸送量と共に増加する。これは加熱量の増加に伴い蒸気泡の発生が活発化して、加熱部から冷却部への流体輸送が活発になり、流路直線部における気相割合が増加したためである。 $Q = 62\text{W}$ 以上において、作動流体が FC-72 の場合は、No. 3 の気相率は一旦減少し、No. 4 と最大 27% の差が生じる。これは No. 3 では下降液相流、No. 4 では

上昇気相流が生じ、一方向流れが形成されたためである。一方、作動流体がエタノールの場合には、No. 3 と No. 4 の気相率には顕著な差が生じない。これは各流路における流動方向は一意に定まっておらず、時間的に変化するためである。

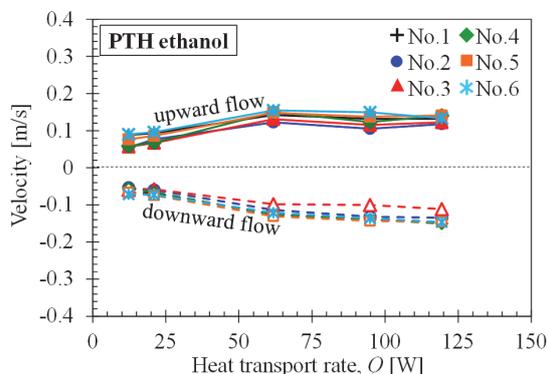


図 13 PTH 直線流路部における気液界面速度

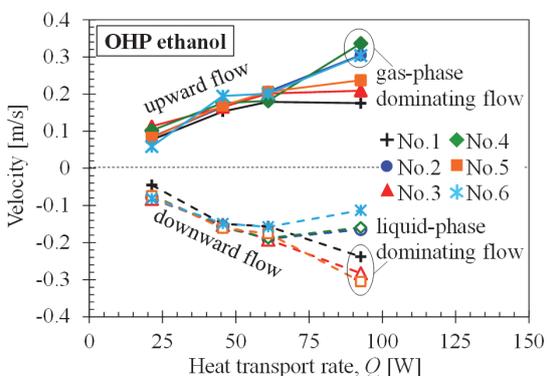


図 14 OHP 直線流路部における気液界面速度

図 13, 14 に各熱輸送デバイスの作動流体がエタノールの場合における、直線流路部における気液界面速度を示す。PTH の場合、各流路内の界面速度は中間熱輸送量域までは、熱輸送量と共に増加するが、それ以降では、ほぼ変化しない。これは、PTH のヘッダは各細管流路を連結した構造で、圧力伝播通路として機能することで、OHP に対し冷却部ヘッダでの圧力増加と加熱部ヘッダでの圧力減少を誘起し、それぞれ界面上昇速度と界面下降速度の増加は抑制される。また各流路間で比較すると、流路による速度差は生じない。これは各流路内で生じる流動状態が類似していたためである。一方、図 14 の OHP の場合は、流路内の界面速度は熱輸送量と共に増加し、一方向流れの生じる最大熱輸送量時において流路毎に異なる界面速度が得られている。一方向流れの際は、各流路内で同じ向きの圧力勾配が生じ、振動流の生じる条件よりも流体が加速されやすく、界面速度は高い値を示す。これはヘッダを持つ、PTH とは異なる傾向である。

(3) 総括および今後の展望

非接触計測により、チャーン流を含めた複数の流動様式の時空間変化を特定した研究は従来になく、新規性があり、本研究で得ら

れた並列細管型および蛇行細管型熱輸送デバイスの熱輸送特性と、内部流動特性を示す定量的なデータは、今後の数値計算による両デバイスの熱輸送性能予測を行なう上で重要となるベースデータとなり得る。

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)

[雑誌論文] (計 2 件)

(1) Abiko, K., Murata, A., Saito, H., and Iwamoto, K., Internal Flow Pattern and Heat Transport Performance of Oscillating Heat Pipe with Grooved Channels, J. of Flow Visualization and Image Processing, 査読あり, 2016, 81-96

DOI:10.1615/JFlowVisImageProc.201501568

5

(2) Abiko, K., Murata, A., Saito, H., and Iwamoto, K., Effects of Tube Diameter on Internal Flow Patterns and Heat Transport Performance of Parallel-Tube Heat Transport Device, Proc. of 15th Int. Heat Transfer Conf., 査読あり, 2014, 1-15

DOI:10.1615/IHTC15.hpp.009208

[学会発表] (計 2 件)

(1) 安孫子和沙, 村田章, 齋藤博史, 岩本薫, 相変化を利用した溝型熱輸送デバイスの内部流動と熱輸送性能, 第 52 回日本伝熱シンポジウム, 2015 年 6 月, 福岡

(2) Abiko, K., Murata, A., Saito, H., and Iwamoto, K., Effects of Tube Diameter on Internal Flow Patterns and Heat Transport Performance of Parallel-Tube Heat Transport Device, 15th Int. Heat Transfer Conf., Aug., 2014, Kyoto, Japan

[その他]

ホームページ等

国立大学法人 東京農工大学 / 村田研究室

<http://www.mmlab.mech.tuat.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 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・助教

研究者番号：40401450

(2) 研究分担者

村田 章 (MURATA AKIRA)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60239522