

令和 5 年 6 月 28 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04320

研究課題名（和文）高熱流束データセンター冷却用放射拡張流路冷却器の開発

研究課題名（英文）Development of Radial Expansion microchannel Cooler for High Heat Flux Data Center Cooling

研究代表者

党 超鋌（Dang, Chaobin）

福井大学・学術研究院工学系部門・准教授

研究者番号：30401227

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）：まず、レーザー共焦点変位計及び数値解析により微細流路における薄液膜の特性を評価し、三角管や矩形管の液膜が薄いことが確認された。また、拡張流路を用いた流動沸騰と自己吸引沸騰特性を評価した。流路内の気泡の自発的な流動特性を研究し、膨張力や表面張力が気泡の運動に影響を与えることを明らかにした。そして、拡張流路を使用した流動沸騰特性を試験し、冷却器の直列接続や並列接続により冷却器ネットワークの構成を可能とした。さらに、拡張流路を用いた加熱面下向け条件での沸騰伝熱特性と、流路の上に多孔質層を設けた自己吸引沸騰性能の評価を行った結果、自己吸引沸騰がプール沸騰より高い冷却性能を持つことを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

データセンターなどの電子機器やシステムの性能が向上するとともに、効率的な冷却手法の開発が求められている。本研究では、拡張流路を用いた流動沸騰および自己吸引沸騰手法を提案した。従来のシステムより流動安定性と伝熱性能が優れている上に、高熱流束や多熱源への対応も可能である。また、加熱面が下向きの条件での高性能な冷却を確認し、微小重力環境でも相変化伝熱システムの構築が可能になる。さらに、薄液膜蒸発の流動と伝熱特性について実験、数値解析を行った結果、伝熱管の形状、流体の物性、運転条件が伝熱特性にどのように影響を与えるかを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Firstly, the characteristics of thin liquid films in microchannels were evaluated using a laser confocal displacement meter and numerical analysis, confirming that the liquid films in triangular and rectangular tubes are thin. In addition, the characteristics of flow boiling and self-suction boiling using expanded channels were evaluated. The spontaneous flow characteristics of bubbles in the flow path were studied, revealing that expansion forces and surface tension affect the movement of the bubbles. Flow boiling experiment using expanded channels confirmed the configuration of a cooler network is possible through the series and parallel connection of coolers proposed. Furthermore, experimental results of boiling heat transfer characteristics of the heated surface facing downwards using expanded channels, and the self-suction boiling with a porous layer on the expanded flow path, confirmed that self-suction boiling has a higher cooling performance than pool boiling.

研究分野：熱工学

キーワード：流動安定性 自己吸引沸騰 高熱流束冷却 データセンター冷却 薄液膜蒸発 濡れ性 レーザ共焦点変位計

1. 研究開始当初の背景

データセンターの処理能力増加のために HPC と呼ばれる高性能なサーバが急速に使用拡大し、それらは処理能力が高い半面、電力消費量、発熱量も増大している。データセンターのサーバを確実に冷却でき、かつ省エネルギーシステムの構築が求められている。現状では、データセンターの冷却手法は主に部屋全体を空調機による間接冷却に依存している。しかし、データセンター内部のサーバラックの集約化やサーバ上の CPU 数の増加、発熱密度の増大に対応するため、冷却手法は部屋全体の空冷からサーバの CPU の液冷化への転換が進行中である。

CPU の発熱を直接冷媒の相変化冷却で除去する方式は、液浸冷却のプール沸騰よりも高い伝熱性能と高い CHF (限界熱流束) が得られるため、長らく注目されてきた。だが、並列マイクロチャネル沸騰時に発生する流動不安定による伝熱性能の低下や、各 CPU、サーバ間の流量分配などの問題が解決されていないため、実際のサーバへの搭載例はまだ存在しない。

2. 研究の目的

本研究は、次世代高性能データセンターの確実な冷却と潜熱回収の新たな手法として、循環ポンプ駆動選択的給液型相変化冷却方式 (アクティブ方式) と、循環ポンプを必要としない自己吸引式冷却方式 (パッシブ方式) の二つを提案する。流路内の流動様式と沸騰様式の可視化観察、薄液膜厚みの計測、および伝熱性能の評価を通じて、選択的な液体供給による局所ドライアウト抑制効果 (アクティブ方式) と、液体の自己吸引による薄液膜蒸発から膜沸騰への遷移抑制効果 (パッシブ方式) を確認する。さらに、高性能データセンター冷却に固有の多熱源、大冷却面積、高熱流束条件への適用性を検証する。

加えて、放射拡張流路における気液二相の安定性、多冷却ユニットにおける気液二相流の不安定性解析と分配特性、管内スラグ流における薄液膜のレーザ共焦点計測などの基礎研究も行われている。一般的に使用される流動沸騰またはプール沸騰よりも高い伝熱性能を得られる自己吸引沸騰冷却手法の確立と、その動作メカニズムの解明が目指されている。

3. 研究の方法

(1) レーザ共焦点変位計を用いて、水力直径 1 mm 以下の円管、矩形管および三角管に流れるスラグ流の流動特性を計測し、スラグと壁面之间に形成する薄液膜の挙動を把握する。

(2) 数値解析手法を使用して液膜の形成と気泡の流動特性を調査する。また、断熱条件で得られた薄液膜の予測モデルを用いて薄液膜蒸発の伝熱性能予測へと適用性を評価する。

(3) 拡張流路を用いた冷却器を直列及び並列に繋いだ場合の流動安定性と伝熱性能を評価し、複数の熱源を同時に冷却するための冷却ネットワークの構築の可能性を評価する。

(4) 拡張流路における加熱面向下条件や加熱面が斜め配置条件での伝熱性能を評価する。

4. 研究成果

(1) 微細流路における薄液膜特の研究

① 実験計測

微細流路におけるスラグ流の流動と伝熱特性を理解するため、まず高精度なレーザ共焦点変位計を用いて内径 1 mm 以下の円管及び矩形管内のスラグ流のスラグと壁面之间に形成する薄液膜を計測し、気泡速度、流動抵抗との関係を調べた。さらに、数値解析手法を用いて、実験結果との比較を行った。

図 1 には、同じ水力直径 1 mm の円管、三角管と矩形管の液膜の厚みの比較を示す。三角管及び矩形管の場合、表面張力の効果により液体が角に吸い込まれるため、円管と比べて気泡中心部の液膜が薄くなるのが分かった。それは微細円管と比べて、定常状態では微細矩形管、三角管の流動沸騰伝熱性能が高くなる理由である。

内径 1 mm の円管において、気泡速度が 0.385 m/s の条件での液膜の厚みは約 32 μm である。同じ水力直径の三角管及び矩形管について、液膜の厚みはそれぞれ 8 ~ 11 μm 、5 μm である。

また、水力直径 1 mm の矩形管における表面張力の異なる三種類の流体の気泡の形状と液膜厚みの比較

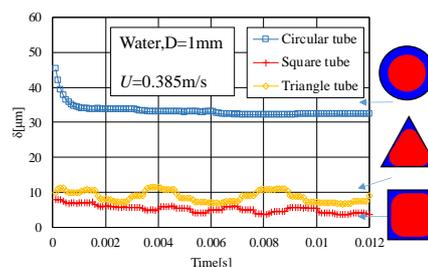


図 1 円管、矩形管と三角管の液膜厚み比較

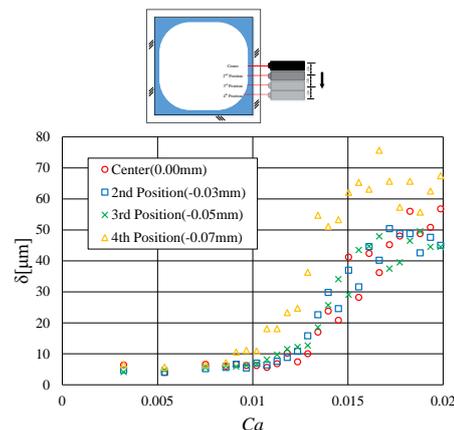


図 2 側面位置における液膜厚みの変化

から。表面張力の大きい順で、液膜が薄くなるということが分かった。特に水が、FC72 及びエタノールより遥かに液膜が薄くなるということが分かった。液膜が薄いほど、定常状態での流動沸騰伝熱性能が高くなる。ただし、流動不安定、乱流の発生により、局所的なドライアウトが発生すると、急激に伝熱性能が低下する可能性もある。

図2には気泡速度が側壁の位置による液膜の厚みの変化を示す。中心部が一番薄く、角に近づくほど液膜が厚くなるということが分かった。また、気泡キャピラリー数が0.012になるまでは液膜の厚みがほぼ一定に維持するが、キャピラリー数が0.012を超えると急激に液膜が厚くなるということが分かった。

② 数値解析

数値解析を行うことで、微細流路内のスラグ流の流動特性と液膜厚みの変化を調べた。直円管の場合、気泡が一定の速度で下流方向に運動するため、相対座標系を用いて、液体、気泡の流動特性および液膜の厚みの変化を計算した。

相対座標系を用いることで、壁の液体が気泡速度と同じ速度で逆方向に移動させることで、気泡が初期位置に固定されることにある。気液界面の位置も固定になるため、気液界面のメッシュを精細化することで、計算の精度を上げることメリットがある。0.24～1 mmの円管において、実験結果とよく一致する数値解析結果が得られた。

加熱条件では、気泡が大きくなるとともに、加速する様子が見える。また、気泡周りの液膜の厚みは、局所の気泡速度を用いて計算した断熱条件での液膜とはほぼ一致することが分かった。断熱条件で整理した液膜厚みモデルを、近似的に流動沸騰（正しく言うと薄液膜蒸発）条件での気泡周りの液膜の予測に用いられることを示唆している。

(3) 拡張流路を用いたポンプ駆動流動沸騰と自己吸引沸騰特性の評価

① 拡張流路内のスラグ流の流動特性

自己吸引沸騰の作動原理の解明と最適設計を行うため、流路内の気泡の自発流動の駆動力と流動方向を解明する必要がある。

図5に示すように、拡張流路内気泡が膨張する時、その膨張力により、自発に拡張方向に動く傾向がある。また、流路の壁面の濡れ性により、表面張力も気泡の運動方向へ影響を与える。親水性の流路には、表面張力の合力が流路の拡張と同じのため、気泡が拡張方向に運動する。一方、撥水性の流路には、表面張力の合力の方向が拡張方向と逆なので、気泡が流路の小さい方向へ自発的に移動する傾向がある。

膨張力及び表面張力が気泡の自発運動方向に与える影響を明らかにするため、3次元の数値計算を行い、拡張流路内の相変化による気泡の生成、成長、合体と排出過程を解析した。相変化モデルには、Thermal Phase Change Modelを用いて、液体から気液界面、気液界面から蒸気へのそれぞれの伝熱性能を考慮して計算を行った。

図6には、加熱面と側面が共に親水条件（接触角 60°）での加熱面からの気泡生成と流路内の気泡流動の様子を示す。加熱面から気泡が生成したら、素早く加熱面を離脱し、流動の中央付近に移動する。加熱液の蒸発により気泡が膨張し、また隣の気泡と接触して合体して大きくなる。流路の側面と接触すると、膨張力及び表面張力によって気泡が流路の拡張方向に移動する結果が得られた。更に加熱面親水、側面撥水性条件での計算結果を示す。加熱面から撥水した気泡は、中央付近に移動し、流路の側面と接触すると、表面張力により、流路の縮小方向に自発的に移動する結果が得られた。また加熱面が撥水性の場合、発生した気泡が加熱面から離脱できず、壁に付着したままで膨張し、また側面の表面張力により拡張方向へ移動する様子が観察された。

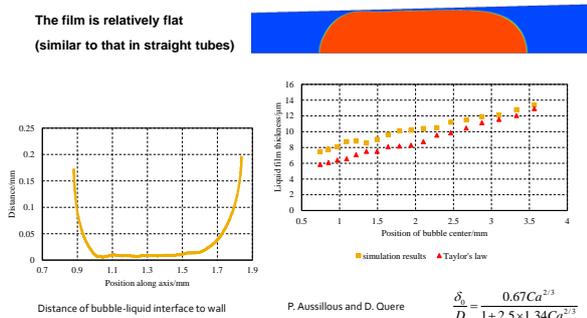


図3 気泡周りの液膜厚みの変化

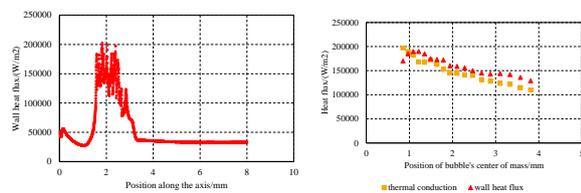


図4 気泡周りの熱流束及び熱伝導モデルとの比較

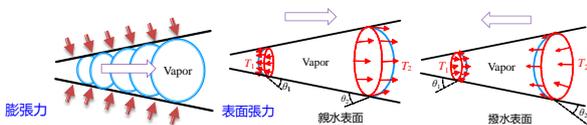


図5 拡張流路内の気泡流動の駆動力と流動方向

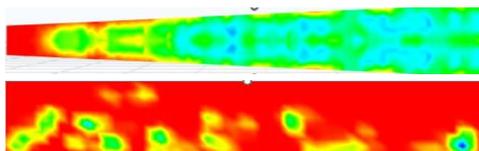


図6 加熱面親水、側面親水条件の計算結果。
左：上面図、右：側面図

② 拡張流路を用いた流動沸騰特性

データセンター冷却用相変化冷却器に拡張流路を適用するメリットは、流動安定性及ぶ伝熱性能向上効果が期待できるのみならず、複数の熱源（CPU、サーバーなど）からの排熱を同時に除去可能な冷却器の直列接続、並列接続による冷却器ネットワークの構成が可能である。

図8に二つの放射拡張流路冷却器が直列に繋いだ場合の流動安定性と伝熱性能の評価装置を示す。図9に示すように、1つ目の熱源の発熱量が変化した場合、2つ目の冷却器の性能がほとんど変化しない。複数の熱源を同時に冷却する場合での熱源の数、発熱量の変化に対応できることを示唆している。更に、冷却器の伝熱性能の比較から、2つ目の冷却器の入口の乾き度が大きいいため、1つ目の冷却器より高い性能が得られた。

図9には二つの放射拡張流路冷却器を直列に繋いだ場合の流動安定性と伝熱性能の比較を示す。入口に絞機構が設けられていなくても、二つの冷却器が同一の性能が得られた。拡張流路の高い安定性を利用して、複数の熱源を同時に対応する複雑な冷却器ネットワークを構築することが可能であることを示唆している。

③ 拡張流路を用いた加熱面下向け条件での沸騰伝熱特性

自己吸引沸騰が加熱面下向け条件での適用性を評価するため、平滑面、ストレート流路加工面と拡張流路加工面での沸騰伝熱特性の実験計測を行った。図10には評価対象の伝熱面の写真と、実験装置のイメージ図と写真を示す。作動流体はFC72、加熱面下向け条件で伝熱面の温度変化を計測した。

図11には熱伝達率の比較を示す。圧力0.78 atm、過冷却度20°C条件で熱流束と壁面温度から熱伝達率を算出した。加熱面が下向けのため、平面から発生した蒸気が加熱面から離脱できず、熱流束が12W/cm²条件でCHFが到達し、その後熱伝達率が急激に低下する結果となった。ストレート流路の場合、発生した蒸気がストレート流路のから加熱面の垂直方向に排出し、隣の流路の気泡と合体して、大きく揺れながら伝熱面から離脱する様子が観察された。平面より、伝熱性能が2倍ぐらい高くなった。一方、拡張流路の場合、気泡が流路の拡張方向に向けて流れて、流路の出口から排出する様子が観察された。隣の気泡との合体も発生しないため、非常に高い熱流束まで安定した流れが維持でき、高い伝熱性能が得られた。

④ 拡張流路を用いた自己吸引沸騰の伝熱特性

加熱面が下向け条件での拡張流路の優位性を示したため、流路の上に多孔質層を設けて、自己吸引沸騰性能の評価を行った。

図12には自己吸引沸騰の伝熱性能評価用加熱面と多孔質の写真を示す。流路の深さが1mm、長さが10mm、幅が0.2~0.86mmに変化する。多孔質層の材質は銅で、厚みは0.5mm、空隙率は90%、PPIが5、20と60の三種類を用いた。作動流体は水で、飽和温度は100°Cである。加熱の熱流束

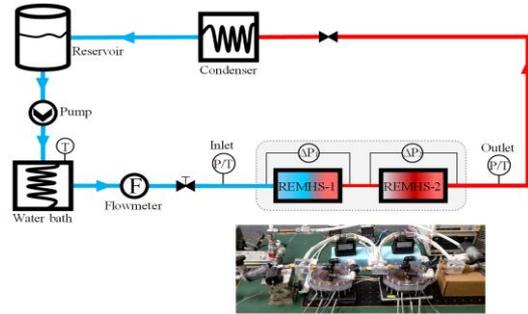
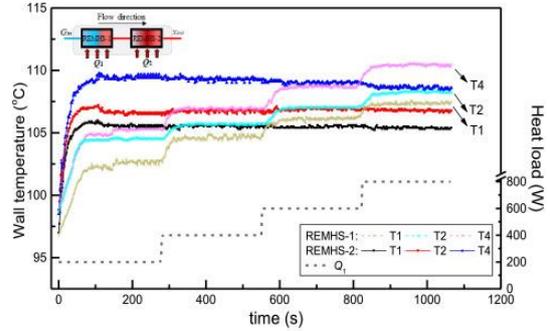


図7 冷却器の並列・直列接続時の性能評価用実験装置



(a) $G = 44.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $T_{in} = 85 \text{ }^\circ\text{C}$, $Q_1 = 200\text{-}800 \text{ W}$, $Q_2 = 800 \text{ W}$

図8 冷却器が直列接続時の性能

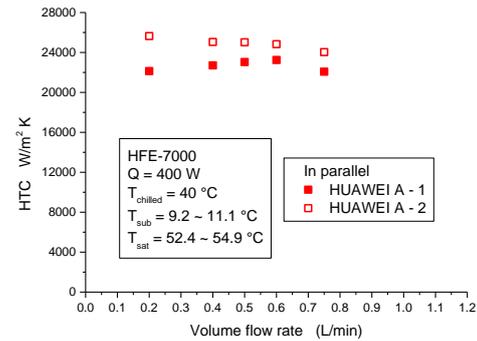


図9 冷却器が並列接続時の性能

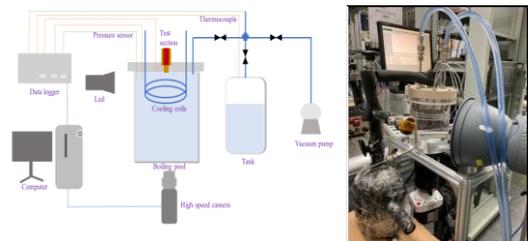
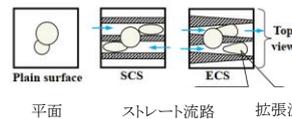
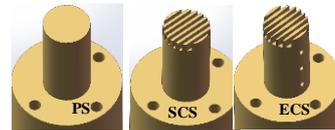


図10 評価対象、実験装置のイメージ図と写真

は $10 \sim 220 \text{ W/cm}^2$ に変化して実験を行った。

図 13 には多孔質層の PPI による自己吸引沸騰の伝熱性能の比較を示す。すべての条件において、気泡が拡張流路に沿って流れて、流路の先端で排出されることが観察された。また、熱流束が 200 W/cm^2 まで高くしても、CHF の発生が見られなかった。自己吸引沸騰がプール沸騰より高い CHF が得られることが証明した。また、PPI の異なる三つの多孔質層の比較から、PPI が 20 の多孔質の性能が一番高いことが分かった。PPI が大きすぎると、多孔質層を通る液体の流動抵抗が大きくなるため伝熱性能が低下する。PPI が小さすぎると、多孔質層からの気泡の離脱が観察され、液体の流路内への吸引の力が弱くなると推測される。

図 14 には加熱面が斜め配置条件での自己吸引沸騰の伝熱性能比較を示す。加熱面水平条件と比べて、 30° 配置した場合の伝熱性能の低下がみられたが、 45° 、 60° の伝熱性能は、水平面とほぼ同じなるまで回復した。 30° での伝熱性能の低下は、流路の先端から排出した気泡は、液体に吸い込まれて、また加熱面に移動した影響と推測される。拡張流路から出た気泡を加熱面から分離する構造を設ける改善を計画している。

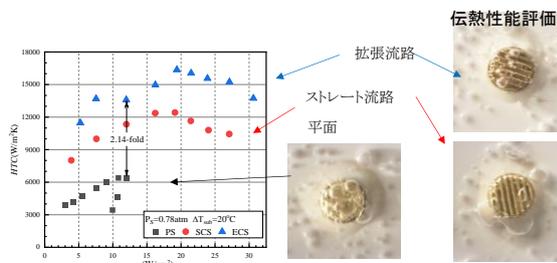


図 11 加熱面下向け条件での熱伝達率の比較

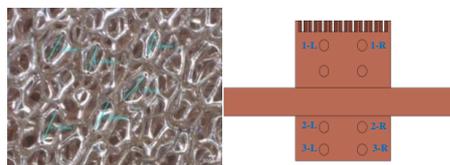


図 12 自己吸引沸騰の伝熱性能評価用加熱面と多孔質

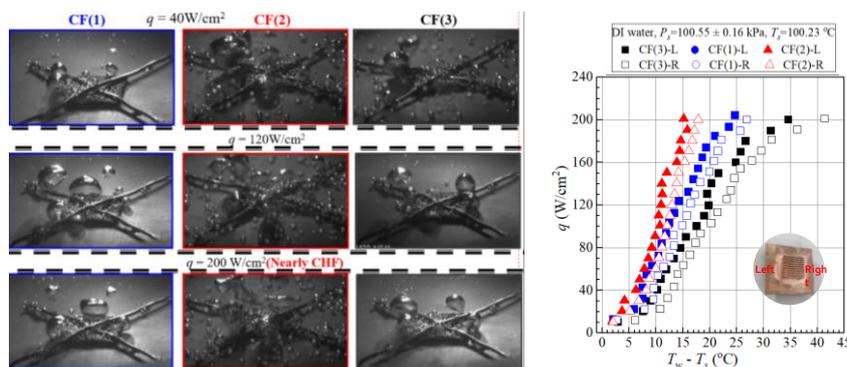


図 13 多孔質層の PPI による自己吸引沸騰の伝熱性能の比較

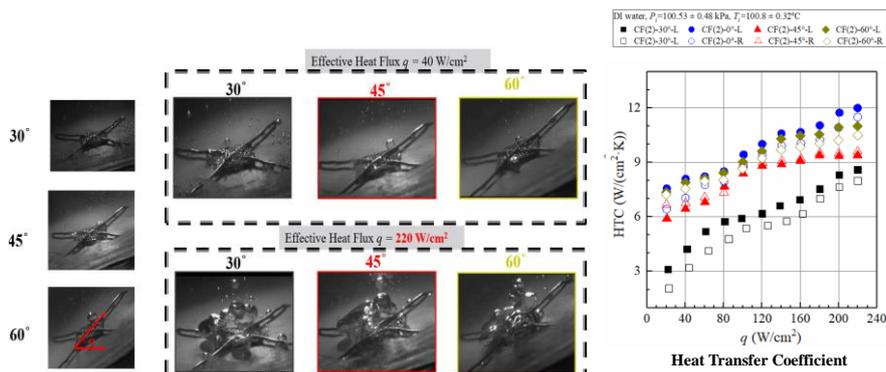


図 14 伝熱面が斜め配置条件での自己吸引沸騰の伝熱性能比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計19件（うち査読付論文 19件 / うち国際共著 17件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yong Cao, Xiaoxiao Xu, Dan Li, Chao Liu, Chaobin Dang	4. 巻 225
2. 論文標題 Experimental study on suppressing heat transfer deterioration of supercritical CO ₂ in vertical tubes based on Helmholtz oscillator	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Thermal Engineering	6. 最初と最後の頁 120198
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.applthermaleng.2023.120198	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 該当する
1. 著者名 Zhijie Gao, Sihui Hong, Chaobin Dang	4. 巻 226
2. 論文標題 An experimental investigation of subcooled pool boiling on downward-facing surfaces with microchannels	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Thermal Engineering	6. 最初と最後の頁 120283
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.applthermaleng.2023.120283	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 該当する
1. 著者名 Yongfang Huang, Xiaoxiao Xu, Shijie Zhang, Chuang Wu, Chao Liu, Chaobin Dang	4. 巻 227
2. 論文標題 Thermodynamic characteristics of gas-liquid phase change investigated by lattice Boltzmann method	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Thermal Engineering	6. 最初と最後の頁 120367
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.applthermaleng.2023.120367	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 該当する
1. 著者名 Yingling Li, Minxia Li, Chaobin Dang, Huanxin Chen	4. 巻 in press
2. 論文標題 Experimental Study of Frosting Cleaning Process on Superhydrophobic Copper Surface	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 International Journal of Refrigeration	6. 最初と最後の頁 in press
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijrefrig.2023.03.012	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 該当する

1. 著者名 Zhengyong Jiang, Mengjie Song, Chaobin Dang, Yuyan Jiang, Man Pun Wan, Christopher Yu Hang Chao	4. 巻 228
2. 論文標題 Two mathematical models of flow boiling and flow instability in rectangular expanding microchannel heat exchangers and structure optimization	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Thermal Engineering	6. 最初と最後の頁 120483
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.applthermaleng.2023.120483	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 該当する

1. 著者名 Yingling Li, Minxia Li, Chaobin Dang	4. 巻 229
2. 論文標題 Effect of surface wettability on dust removal characteristics during frosting cleaning process	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Thermal Engineering	6. 最初と最後の頁 120592
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.applthermaleng.2023.120592	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 該当する

1. 著者名 Sihui Hong, JiaXu Wang, Zhijie Gao, Chaobin Dang	4. 巻 144
2. 論文標題 Review on state-of-the-art research in pool and flow boiling under microgravity	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Experimental Thermal and Fluid Science	6. 最初と最後の頁 110848
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.expthermflusci.2023.110848	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 該当する

1. 著者名 Mengjie Song, Zhengyong Jiang, Chaobin Dang, Yuyan Jiang, Jun Shen, Xiaoyan Luo	4. 巻 190
2. 論文標題 Mathematical modeling investigation on flow boiling and high efficiency heat dissipation of two rectangular radial microchannel heat exchangers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 122736
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122736	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 該当する

1. 著者名 Dan Li, Xiaoxiao Xu, Yong Cao, Chao Liu, Shijie Zhang, Chaobin Dang	4. 巻 202
2. 論文標題 The characteristics and mechanisms of self-excited oscillation pulsating flow on heat transfer deterioration of supercritical CO2 heated in vertical upward tube	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Thermal Engineering	6. 最初と最後の頁 117839
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.applthermaleng.2021.117839	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 該当する

1. 著者名 Shijie Zhang, Xiaoxiao Xu, Chao Liu, Xiaoxiao Li, Chuang Wu, Chaobin Dang	4. 巻 187
2. 論文標題 Experimental investigation and theoretical analysis on the heat transfer deterioration of supercritical CO2 in mixed and forced convection in vertical-straight tube with downward flow	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 122510
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122510	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 該当する

1. 著者名 Hong Seok Kim, Eiji Hihara, Chaobin Dang	4. 巻 23
2. 論文標題 Solidification Thermal Behavior of Fin Heat Exchanger with Phase Change Material for Electric Vehicle Thermal Management	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Automotive Technology	6. 最初と最後の頁 257-264
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12239-022-0022-1	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 -

1. 著者名 Yingling Li, Minxia Li, Chaobin Dang, Xuetao Liu	4. 巻 184
2. 論文標題 Effects of dissolved gas on the nucleation and growth of ice crystals in freezing droplets	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 122334
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122334	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 該当する

1. 著者名 Jiacheng He, Ryusuke Hirata, Eiji Hihara, Chaobin Dang	4. 巻 195
2. 論文標題 Desorption characteristic of LiBr-H ₂ O solution in hydrophobic hollow fiber membrane for absorption chiller	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Thermal Engineering	6. 最初と最後の頁 117164
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.applthermaleng.2021.117164	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 -

1. 著者名 Linlin Wang, Pengfei Jiao, Chaobin Dang, Eiji Hihara, Baomin Dai	4. 巻 170
2. 論文標題 Condensation heat and mass transfer characteristics of low GWP zeotropic refrigerant mixture R1234yf/R32 inside a horizontal smooth tube: An experimental study and non-equilibrium film model development	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Thermal Science	6. 最初と最後の頁 107090
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijthermalsci.2021.107090	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 該当する

1. 著者名 Sihui Hong, Bohan Zhang, Chaobin Dang, Eiji Hihara	4. 巻 212
2. 論文標題 Development of two-phase flow microchannel heat sink applied to solar-tracking high-concentration photovoltaic thermal hybrid system	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Energy	6. 最初と最後の頁 118739
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.energy.2020.118739	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 該当する

1. 著者名 Sihui Hong, Chaobin Dang, Eiji Hihara, Hitoshi Sakamoto, Mizuki Wada	4. 巻 181
2. 論文標題 Improved two-phase flow boiling in a minichannel heat sink for thermal management of information and communication technology (ICT) equipment	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Thermal Engineering	6. 最初と最後の頁 119957
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.applthermaleng.2020.115957	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 該当する

1. 著者名 Sihui Hong, Chaobin Dang, Eiji Hihara	4. 巻 157
2. 論文標題 A 3D inlet distributor employing copper foam for liquid replenishment and heat transfer enhancement in microchannel heat sinks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 119934
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119934	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 該当する

1. 著者名 Sihui Hong, Chaobin Dang, Eiji Hihara	4. 巻 151
2. 論文標題 Experimental investigation on flow boiling characteristics of radial expanding minichannel heat sinks applied for two-phase flow inlet	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 119316
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119316	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 該当する

1. 著者名 Juan Shi, Xi Jia, Dongyang Feng, Zhenqian Chen, Chaobin Dang	4. 巻 146
2. 論文標題 Wettability effect on pool boiling heat transfer using a multiscale copper foam surface	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 118726
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118726	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 該当する

〔学会発表〕 計24件 (うち招待講演 7件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 Yang S., Hong S., Li C., Nishigawa R., Dang C., Chen Y.
2. 発表標題 Experimental Investigation on Effects of Inlet and Outlet structures in Expanding Micro Channel Heat Sinks
3. 学会等名 10th Asian Conference on Refrigeration and Air-conditioning (ACRA2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yang S., Hong S., Dang C., Chen Y.
2. 発表標題 Enhancement on two phase flow boiling via expanding micro channel heat sinks
3. 学会等名 International Conference on Power Engineering 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Li C., Dang C., Hong S., Song M., Sakamoto H., Wada M.
2. 発表標題 Performance evaluation of radial expanding minichannel heat sinks for thermal management of multiple information and communication technology (ICT) equipment with parallel/series connection configuration
3. 学会等名 The 32nd International Symposium on Transport Phenomena (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hong S., Dang C., Gao Z., Mo S.
2. 発表標題 Pool boiling enhancement via bubble elongation induced liquid-vapor separated flow paths
3. 学会等名 The 32nd International Symposium on Transport Phenomena (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yang S., Hong S., Zhang B., Dang C., Chen Y.
2. 発表標題 Study on Two Phase Flow Microchannel Heat Sink Applied to Solar-tracking High concentration Photovoltaic Thermal Hybrid System
3. 学会等名 11th international symposium on solar energy and efficient energy usage (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Chaobin Dang
2. 発表標題 Recent Progress in the High Heat Flux Electronic Cooling
3. 学会等名 FLUTE - 2021 : International Symposium on Fluids and Thermal Engineering (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 楊 少博, 洪 思慧, 党 超鋌, 陳昱
2. 発表標題 マイクロチャネルヒートシンクでの二相流沸騰に関する研究
3. 学会等名 第 58 回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 楊 少博, 洪 思慧, 党 超鋌, 陳昱
2. 発表標題 自発的な気泡の脱出と液体の補充メカニズムによるプール沸騰の強化に関する研究
3. 学会等名 第 58 回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 李 穎玲, 李 敏霞, 党 超鋌
2. 発表標題 凍結洗浄過程における伝熱面濡れ性の影響
3. 学会等名 2021年度 日本冷凍空調学会 年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金 洪碩, 党 超鋺, 飛原 英治
2. 発表標題 C2OH42を用いた2重管熱交換器の放熱特性に関する研究
3. 学会等名 2021年度 日本冷凍空調学会 年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 笹木 航大, 高山 晶帆, 党 超鋺
2. 発表標題 可変流路自励振動型ヒートパイプに関する研究
3. 学会等名 2021年度 日本冷凍空調学会 年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 党超鋺
2. 発表標題 微細流路における気液二相流の薄液膜挙動の計測
3. 学会等名 日本伝熱学会 北陸信越支部 2021 秋季セミナー(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 波多野颯太, 李 成智, 楊 少博, 党 超鋺
2. 発表標題 次世代データセンター用高効率省エネ冷却システムの開発
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部2022年合同講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡邊 寛仁、党 超鋺
2. 発表標題 衝撃波の可視化観察
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部2022年合同講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 笹木航大、李 成智、楊 少博、党 超鋺
2. 発表標題 可変流路自励振動型ヒートパイプに関する研究
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部2022年合同講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西川竜之介、李 成智、楊 少博、党 超鋺
2. 発表標題 放射拡張流路に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部2022年合同講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山田瑛大、李 成智、楊 少博、党 超鋺
2. 発表標題 マイクロチャンネル内における気液二相流の流動様式と液膜厚さの測定
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部2022年合同講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高山 晶帆, 党 超鋺, 洪 思慧, 飛原 英治
2. 発表標題 可変流路 自励振動型ヒートパイプの 起動特性 に関する研究
3. 学会等名 2020年度日本機械学会熱工学コンファレンス
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 党 超鋺, 洪 思慧
2. 発表標題 拡張流路を用いた高熱流束電子機器冷却性能向上に関する研究
3. 学会等名 2020年度日本機械学会熱工学コンファレンス
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 党 超鋺
2. 発表標題 高集光倍率太陽光発電・太陽熱コジェネレーションシステムの開発 ()システムデザイン
3. 学会等名 日本機械学会2020 年度年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 党 超鋺
2. 発表標題 高集光倍率太陽光発電・太陽熱コジェネレーションシステムの開発 ()太陽電池の冷却と発電性能
3. 学会等名 日本機械学会2020 年度年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Chaobin Dang
2. 発表標題 Development of two-phase flow microchannel heat sink applied to high-concentration photovoltaic thermal hybrid system
3. 学会等名 2nd International Conference on Future Learning Aspects of Mechanical Engineering (FLAME - 2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Chaobin Dang
2. 発表標題 Development of two-phase flow microchannel heat sink applied to high-concentration photovoltaic thermal hybrid system
3. 学会等名 2020 Dalian University of Technology-Overseas Partner Universities Series Online Exchange Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Chaobin Dang
2. 発表標題 Development of a radial expanding microchannel heat sink applied to solar-tracking high concentrating photovoltaic thermal system
3. 学会等名 Sino Japan UK Frontiers in Phase Change Heat Transfer and Its Applications in Energy (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------