

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04324

研究課題名（和文）マイクロ翼型チューブを利用した低温環境ヒートポンプ用高性能熱交換器の開発

研究課題名（英文）Development of a high performance heat exchanger for low temperature environmental heat pumps using micro airfoil tubes

研究代表者

大西 元 (Onishi, Hajime)

金沢大学・機械工学系・助教

研究者番号：80334762

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）：ヒートポンプの性能向上・省エネルギー化に向け、低温環境下の熱交換器における着霜低減技術は重要な課題であるので、本研究では低温環境下の熱交換器における着霜低減技術を追究する。具体的には、吸着剤を塗布したマイクロ翼型チューブ熱交換器の空気側と冷媒側の伝熱性能向上を目指し、氷点下の吸着剤への水蒸気の吸着が着霜挙動に与える影響を検討する。さらに、冷媒側細径流路内の相変化熱伝達を詳細に検討し、低温環境ヒートポンプ用高性能熱交換器に関する知見を得ることを目的とする。

研究成果の学術的意義や社会的意義

着霜現象は、学術的・社会的に極めて重要な現象であるが、それに対する物理的な理解は十分とは言えず、着霜低減技術の確立は重要課題である。本研究では、伝熱面における吸着剤による直接水蒸気除去の観点から着霜低減を試み、水蒸気が吸着と着霜に分かれるメカニズムを追究することに学術的意義がある。また、本研究の成果を用いれば、既往の研究よりも耐着霜性に優れたコンパクトで高性能なヒートポンプの開発に繋がるなど、大きな波及効果が期待できる点で社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：To improve the performance and energy efficiency of heat pumps, frost reduction of heat exchangers in low temperature environments is an important issue. Therefore, this study investigates frost reduction techniques for heat exchangers in low temperature environments. In particular, the effects of water vapor adsorption on the adsorbent at freezing temperatures on the frost behavior are investigated for both the air and refrigerant sides of an adsorbent-coated micro airfoil-tube heat exchanger to improve the heat transfer performance of the heat exchanger. In addition, a detailed study of phase change heat transfer in small diameter channels on the refrigerant side is conducted to gain insight into high performance heat exchangers for heat pumps for low temperature environments.

研究分野：熱工学

キーワード：熱交換器 冷凍・空調 翼型チューブ 着霜低減 吸着剤

1. 研究開始当初の背景

世界的にエネルギー問題が深刻化しており、その解決策の一つとして製品の省エネルギー技術の推進が重要である。機器の省エネルギー化、CO₂排出削減に向けたキーテクノロジーの一つがヒートポンプ技術である。ヒートポンプの重要な構成要素の一つである気液熱交換器においては近年、研究代表者らを中心に新しいタイプの小型・高性能気液熱交換器として、フィンレスチューブ熱交換器が提案されている。このコンセプトは、微細な扁平チューブを多数用いれば、体積当たりの表面積は増大し、チューブ表面だけで空気側伝熱面積を稼げるようになり、フィンの必要性は弱まることにある。また、研究代表者が国内外で先駆けて報告した流線形のマイクロ翼型チューブを用いれば空気側の大幅な流動抵抗低減も期待できる。一方で、ヒートポンプのウィークポイントの一つが低温環境下での熱交換器(蒸発器)への着霜が引き起こす流動抵抗の増大や交換熱量の減少による性能低下である。すなわち、低温環境下の熱交換器における着霜低減技術は現代社会に欠かせないヒートポンプの性能向上・省エネルギー化に向けた重要な課題である。

2. 研究の目的

熱交換器への着霜抑制手法は様々なものが検討されている。超音波や外部電界の導入や伝熱面を表面処理する方法が検討されている。最も一般的な方法は、表面を親水、疎水処理することである。また、吸水剤をコーティングする方法も試みられている。さらに、乾燥剤(水蒸気吸着剤)によって着霜の原因となる空気中の水分を除去することで着霜を抑制する方法もある。研究代表者は、着霜の原因である水蒸気を連続的に伝熱面から除去できれば着霜低減効果が期待できることに着目した。本研究では、マイクロ翼型チューブ熱交換器の空気側伝熱面に吸着材を塗布し、水蒸気を吸着させながら熱伝達の向上と着霜低減を図り、熱交換器空気側の高性能化に繋げる。そして、耐着霜性向上のために吸着剤を塗布したマイクロ翼型チューブ熱交換器の空気側と冷媒側の伝熱性能向上を追究し、低温環境ヒートポンプ用高性能熱交換器の開発を目指すことを目的とする。

3. 研究の方法

目的の達成に向けて、本研究では以下の3つの方法を検討した。

(1) 着霜環境下の吸着剤塗布熱交換器の伝熱特性

まず、着霜の原因である水蒸気の直接除去法に着目し、水蒸気吸着剤塗布フィンアンドチューブ熱交換器を蒸発器として利用できるか評価する。これまでに、吸着剤表面を直接着霜環境下に配置させることを扱った研究は見られない。それゆえ、吸着剤塗布がフィンアンドチューブ熱交換器の着霜特性や伝熱特性におよぼす影響を検討し、吸着剤の有用性を評価する。そこで、着霜条件下となる一定の温湿度の空気が連続的に流入する場合の吸着剤塗布フィンアンドチューブ熱交換器の基礎的な着霜特性を、吸着剤が塗布されていないフィンアンドチューブ熱交換器と比較し実験的に検討する。

図1に実験装置概要図を示す。室内の周囲空気は軸流ファンによって吸い込み口付近に設置された調温調湿部を介して試験部に供給される。上流側にある整流用のハニカムと縮流部により一様流になるようにしている。試験部には供試熱交換器が設置され、低温恒温槽で所定の温度に保たれたエチレングリコール 50wt% 水溶液を冷媒として冷却される。熱交換器の空気側の入口、出口および熱交換器の冷媒側の入口、出口の温度測定には熱電対、空気湿度は湿度センサ、風速は熱線風速計で計測する。また、デジタル微差圧計で熱交換器前後の差圧を測定する。

図2に吸着剤塗布熱交換器の概要を示す。この熱交換器は、流れ方向長さ 51 mm、スパン方向幅 176 mm、高さ 160 mm のフィンアンドチューブ熱交換器である。カラー部を含めた外径 9.6 mm の銅製チューブは千鳥配列の 4 列、4 段で構成されている。また、チューブの列ピッチ 13

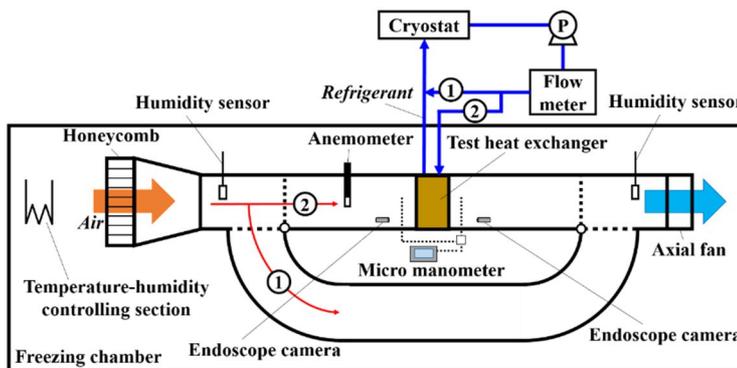


図1 吸着剤塗布熱交換器の実験装置概要図



図2 吸着剤塗布熱交換器の写真

mm, 段ピッチ 44 mm となっている。そして、フィンピッチ 2.0 mm で厚さ 0.18 mm のアルミニウム製のフラットと見なせるフィンの両面に AIPO 系ゼオライトの吸着剤塗布層が 0.1 mm 存在している。また、比較のため同一形状の吸着剤が塗布されていないフィンアンドチューブ熱交換器で実験も行った。ただし、フィン厚さは 0.18 mm のままであるため、吸着剤塗布熱交換器の方がフィン間流路幅は狭くなっている。なお、以降の考察では、吸着剤塗布熱交換器の場合を AC-HE 吸着剤塗布無しの熱交換器の場合を Normal-HE と呼称する。熱交換器の入口冷媒温度 -10 °C, 熱交換器の入口空気温度 5 °C および相対湿度 70 % で固定している。一方で、熱交換器の前面風速を変化させた。なお、実験中風量一定となるようにファン印加電圧を手動調節した。

(2) 低温環境下の吸着剤塗布面における着霜特性

水蒸気の吸着挙動と着霜メカニズムの関係等、着霜環境下における吸着剤への詳細な物質移動メカニズムは未知のことも多い。そこで、着霜環境下の吸着剤塗布面における詳細な物質移動メカニズム解明の立場から、マイクロ翼型チューブの壁面を水平平板とみなし、吸着剤が塗布された平板における着霜特性を、吸着剤が塗布されていないそれと比較しながら実験的に検討する。

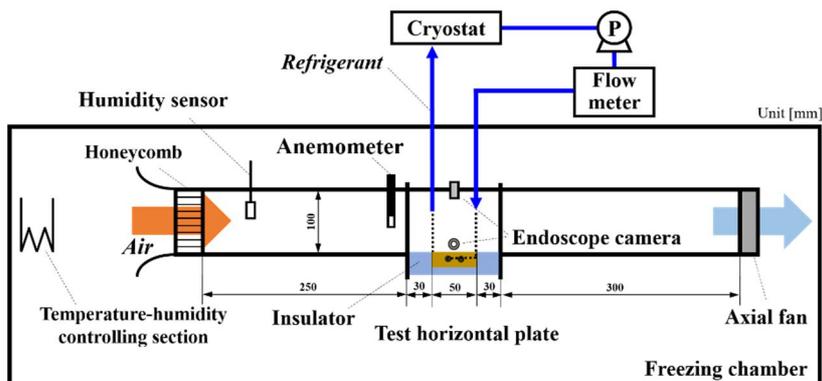


図 3 吸着剤塗布平板の実験装置概要図

図 3 に実験装置概要図を示す。恒温恒湿室内に整流部、ダクトおよび試験部が設置されている。調温調湿された空気は、下流部の軸流ファンによって吸引され、流入口にある整流用ハニカムにより一様流になった後、ダクト内の矩形流路を通過し、試験部に流入する。試験部における供試伝熱平板を図 4 に示す。伝熱平板は伝熱面積 2000 mm² で厚さ 16 mm の熱伝導性に優れた無酸素銅ブロックであり、アクリル製ダクトの底部に断熱材とともに埋め込まれている。そして、銅ブロックの供試表面のみ流入空気と接するように水平に設置され、水平平板面を実現している。なお、ダクト入口から水平平板の前縁までは 280 mm となっている。すなわち、本研究では温度・濃度境界層が遅れて発達していく熱流動場になっている。また、銅ブロック内部の穴あけ加工を施した部分に、低温恒温槽で冷やされたエチレングリコール 50wt% 水溶液を冷媒として流入出させることで伝熱面を低温等温面とした。空気、冷媒の温度は熱電対、空気湿度は湿度センサ、風速は熱線風速計で計測した。そして、着霜様相は内視鏡カメラで撮影した。この研究で使用した吸着剤はシリカゲルである。伝熱面である吸着剤塗布面は、バインダとして熱伝導シリコングリスを薄く塗り、その上に吸着剤を付着させて吸着剤塗布層を作成することで実現している。なお、塗布層の厚さは非常に薄くしている。それゆえ、今回の実験条件において、この塗布層による熱抵抗は無視できるとみなした。比較のために、吸着剤を塗布していない面での実験も行った。以降は、吸着剤を塗布していない面ときは Normal-Surface, 吸着剤を塗布した面ときは AC-Surface と呼称する。また、AC-Surface の実験では、霜質量計測のために毎回新たに塗布層を塗布している。さらに、AC-Surface の着霜実験終了後、塗布層をそのままに水蒸気脱着させることなく水分だけを乾燥させて、再度着霜実験を行った場合を AC-Surface(w/o ad) と呼称する。このとき、吸着剤は水蒸気の吸着能力をほぼ失っている状態であると考えられ、水蒸気吸着能力のない塗布層の議論ができる。平板の前面風速 0.5, 1.0 m/s とし、伝熱面温度 -10 °C, 入口空気温度 5 °C, 相対湿度 70% の温湿度条件とした。また実験時間は 90 min とした。霜層は内視鏡カメラで水平平板面の真上と側方から同時撮影した。そして、側方の画像から読み取れる巨視的な霜の厚さを画像処理し、霜層厚さを算出した。



図 4 吸着剤塗布平板の写真

(3) 翼型チューブ内細径流路内における冷媒の相変化伝熱シミュレーション

OpenFOAM を拡張し、翼型チューブの内側にある細径流路内の冷媒の相変化を伴う熱流動特性を数値解析的に検討する。それを想定した冷媒側細径流路内での相変化熱伝達を検討するため、二相流の作動流体をポンプで循環させる閉ループ 3 ターンの蛇行細径流路を使用する。まずは、VOF 法ベースの温度回復法を利用した相変化モデルを、2 次元膜沸騰および凝縮問題でテストすることにより、モデルの信頼性を確認する。その後、細径流路内をポンプで循環する気液二相冷媒にモデルを適用し、液体-蒸気相互作用や相変化を伴う熱伝達などの熱流動特性をより深く理解するために数値シミュレーションを実行する。そして、ポンプの圧力差が細径流路内の冷

媒流れや小さな温度差下での伝熱性能に及ぼす影響を検討する。

図5に、閉ループ2次元細径流路と仮想的なポンプで構成される計算領域と境界条件を示す。流路は幅2mmの矩形チューブを想定している。ポンプは点線で仮想的に示され、ここに駆動圧力差が与えられる。具体的には、仮想境界に圧力差が適用され、ポンプによる駆動力が実現される。圧力差は、4つのケース ($\Delta P = 500, 1000, 2000, 3000$ Pa) で解析のパラメータとして使用される。断熱部は蒸発(加熱)部と凝縮(冷却)部を分離する。加熱壁温度 T_H は飽和温度 T_{sat} より 1 K ($=\Delta T_{sat}$) 高く設定され、冷却壁温度 T_C は T_{sat} より 1 K ($=\Delta T_{sub}$) 低く設定されている。また、加熱壁と冷却壁の温度差 ($\Delta T = T_H - T_C$) は 2 K である。加熱部と冷却部の伝熱面積はそれぞれ 36 mm^2 および 68 mm^2 であり、その面積比は $1:1.89$ である。

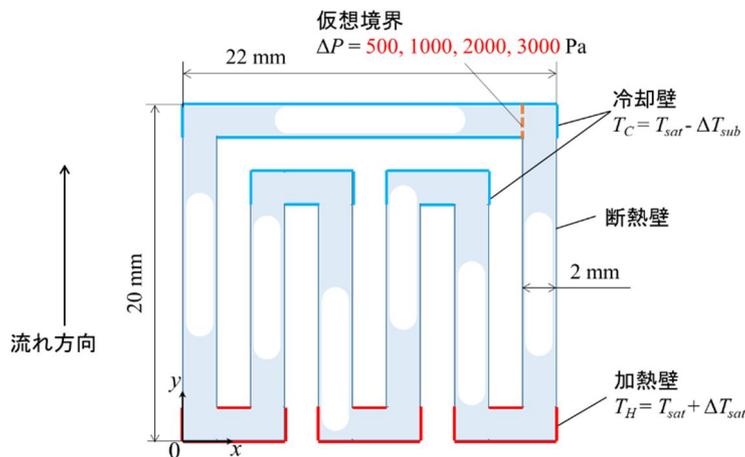


図5 冷媒用細径流路の計算領域

この細径流路は閉鎖系であるので流体の全体積は変化しない。非常に小さな温度差 (2 K) により液体と蒸気の体積分率は常に一定でなければいけない。したがって、わずかに過熱された液体および過冷却された蒸気を許容することにより、蒸発量および凝縮量が調整されて体積分率が一定に保たれる。また、壁の濡れ性に依存する接触角は 45° に設定している。また、液体スラグと蒸気プラグが任意に分布され、液体充填率が約 45.5% になるように配置されている。各蒸気プラグは幅 2 mm 、長さ 10 mm または 12 mm であり、各液体スラグは幅 2 mm 、長さ 6 mm から 12 mm である。冷媒の相変化の影響を検討するため、相変化なしのシミュレーションも実行している。さらに、比較のために液単相流のシミュレーションも実行している。

4. 研究成果

(1) Normal-HE と AC-HE における 0.5 m/s 条件の上流側から見たフィン面における 50 min までの着霜様相の写真画像を図6に示す。全体を概観すると、時間の経過とともに伝熱面への着霜が顕著になっていることが見て取れる。また、どちらの場合も上流側の方が下流側よりも霜の量は多く、さらにフィン面のスパン方向に不均一な着霜となっている。具体的には、チューブに近いフィン面では、霜層が厚く成長し、そこから離れているフィン面では霜層はあまり厚くないことがわかる。これは、フィン内の熱伝導抵抗によるフィン表面温度の違いが影響していると考えられる。また、下流側で上流側ほど霜が成長していないのは、フィン上流部から下流部に向かって、壁面近傍の水蒸気濃度勾配が小さくなることや霜となることで水蒸気濃度が低下していくためと考えられる。また、AC-HE では吸着剤によって伝熱面近傍で水蒸気分圧の低下、および氷晶生成の駆動力の低下を引き起こすと考えられる。それゆえ、AC-HE では実験開始からしばらくは着霜していないことが見て取れる。図7に、各々熱交換器の上流側における霜層厚さの経時変化を示す。なお、 1.0 m/s のときの吸着平衡下の AC-HE(w/o ad)の経時変化も示す。この条件では、吸着平衡となっており水蒸気吸着は行われない。図において、Normal-HE で

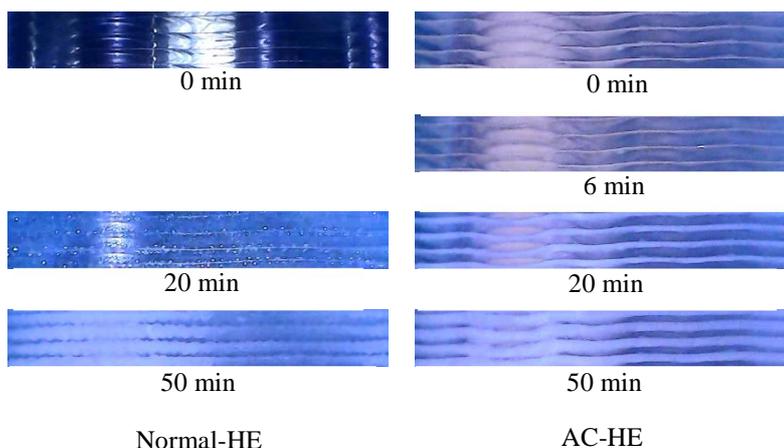


図6 0.5 m/s における Normal-HE と AC-HE の上流側の着霜様相

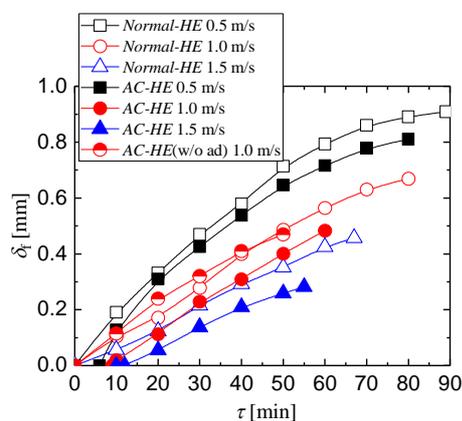


図7 上流側の霜層厚さの時間変化

は実験開始直後から霜層が成長するのに対し、AC-HE では 0.5 m/s のとき約 6 min, 1.0 m/s のとき約 9 min, 1.5 m/s のとき約 12 min の無着霜時間となっているので、着霜遅延効果が見られる。ここで、吸着平衡下の AC-HE(w/o ad)では無着霜時間がみられないことから、無着霜状態を実現したのは水蒸気吸着による効果だといえる。経時変化に着目すると、高風速条件ほど霜層は成長しにくくなっていることが見て取れる。これは、風速が高いと熱伝達と物質伝達は向上するものの、低くなってしまふフィン効率によりフィン面温度が入口空気温度に近づき、水蒸気濃度差が小さくなるので霜層が成長しづらくなるためと考えられる。無着霜時間の差異もそれに沿う結果になっており、風速が高くなるほど単位時間当たりの水蒸気吸着量が減るため無着霜時間が長くなっていると考えられる。どの風速条件においても Normal-HE に比べて AC-HE は経過時間に対する霜層厚さが小さくなっている。すなわち、低温環境下において吸着剤は、水蒸気を吸着することが可能であり、着霜を遅延させる効果があるといえる。

(2) 図 8 に、各風速条件の Normal-Surface と AC-Surface における平均霜層厚さ δ_f の経時変化を示す。0.5 m/s のとき、霜層厚さはおよそ線形的に増加し、1.0 m/s のときの方が成長速度が高くなっている。また、図を見て明らかのように、Normal-Surface と比較すると AC-Surface の方が無着霜状態の維持により霜層の成長開始が遅くなっている。なお、0.5 m/s, 1.0 m/s のときにおける AC-Surface の無着霜時間はそれぞれ 10 min, 6 min であるので、高風速条件ほど無着霜時間が短くなっている。これは、風速が高くなるほど物質伝達が向上し水蒸気吸着量が増え、吸着量の限界に早く達しやすいからであると考えられる。すなわち、着霜遅延効果は低風速条件の方が大きいことがわかる。

次に、1.0 m/s のときの Normal-Surface と AC-Surface(w/o ad)における平均霜層厚さの経時変化を図 9 に示す。なお、図中の AC-Surface(after τ_{nf})は無着霜状態終了時を 0 min とみなしたときの霜層厚さの経時変化であり、他の条件と着霜開始からの霜層厚さの経時変化を比較するための仮想曲線である。図より、Normal-Surface と AC-Surface(w/o ad)は同じ霜層厚さになっていることが見て取れる。また、AC-Surface(after τ_{nf})もこれらの曲線とほとんど変わらないこともわかる。これらのことから、今回の吸着剤塗布層の場合、着霜が開始された後において吸着剤は霜層の厚さ方向の成長に影響を与えないと考えられる。

(3) 本研究で開発した VOF 法ベースの相変化モデルに対して、2次元膜沸騰と凝縮の2つの問題を利用して妥当性を評価した。その結果、2つのテスト問題での比較により、相変化を伴う二相流に対する現在のモデルの信頼性が確認された。その後、相変化モデルを細径流路内の冷媒流れに適用した。図 10 に相変化がある場合とない場合の圧力差に対する加熱部の壁面熱流束の時間平均値を示す。相変化がない場合では、圧力差が大きくなるほど流動が激しくなり対流熱伝達が促進され、熱流束は増加する。また、液单相流の方が熱流束は大きく、圧力差に関しては同様の傾向であることがわかる。一方で、相変化がある場合、熱流束が最も大きくなるものの圧力差 1000 Pa の条件で伝熱性能が最も高くなる。これは、圧力差が大きくなると流速も大きくなることで気泡プラグ周りの液膜の厚膜化が避けられず凝縮熱伝達が阻害されるためと考えられる。すなわち、相変化熱伝達の向上に繋がる潜熱移動を有効に活用できる液膜や気泡形状が存在し、それは圧力差に起因する冷媒流速に依存すると思われる。

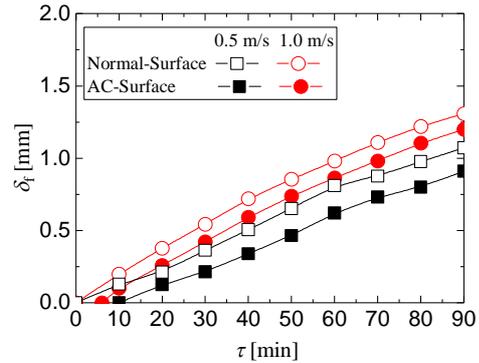


図 8 霜層厚さの経時変化に与える風速の影響

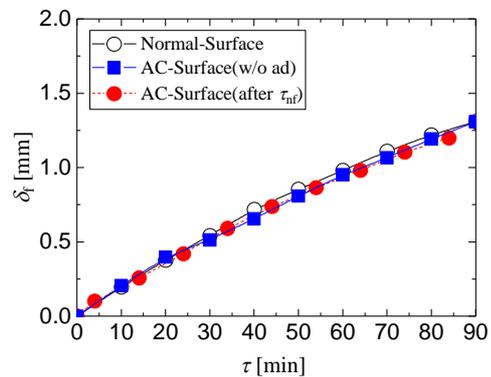


図 9 1.0 m/s における霜層厚さ

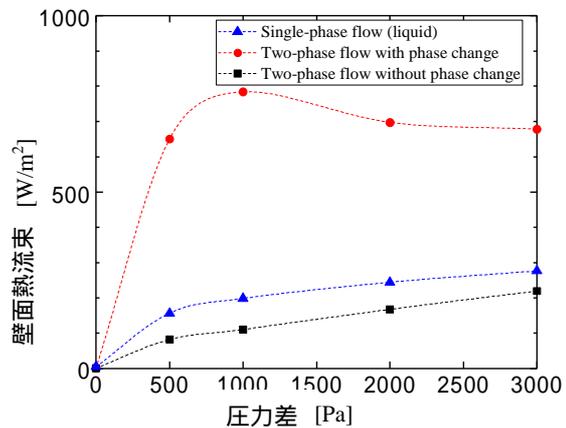


図 10 圧力差の壁面熱流束に与える影響

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 Onishi Hajime, Goto Takeaki, Haruki Masashi, Tada Yukio	4. 巻 186
2. 論文標題 Volume of fluid-based numerical analysis of a pump-driven phase change heat transport device	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 122429 ~ 122429
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122429	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 大西 元, 沈 浩, 中野紘佑, 春木将司, 多田幸生	4. 巻 38
2. 論文標題 吸着剤塗布平板上の着霜特性に関する実験的検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本冷凍空調学会論文集	6. 最初と最後の頁 163-172
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 大西 元, 中野紘佑, 春木将司, 多田幸生	4. 巻 37
2. 論文標題 吸着剤塗布熱交換器の着霜特性に関する実験的研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本冷凍空調学会論文集	6. 最初と最後の頁 459 - 469
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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8件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 大西 元, 角橋宏一朗
2. 発表標題 渦発生体を付設したフィンレス翼型チューブ熱交換器の伝熱性能
3. 学会等名 第59回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三木大貴, 多田幸生, 春木将司, 大西 元, 経田僚昭
2. 発表標題 蒸発器を設置した気液相変化型熱音響エンジンにおける入熱方式の検討
3. 学会等名 日本機械学会熱工学コンファレンス2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大西 元
2. 発表標題 ポンプ駆動相変化熱輸送デバイスの熱流動解析
3. 学会等名 第60回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大西 元, 後藤武揚, 春木将司, 多田幸生
2. 発表標題 小温度差の分岐流路を有する自励振動型ヒートパイプの熱輸送性能に関する数値解析的検討
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 大西 元, 表 智博, 春木将司, 多田幸生
2. 発表標題 翼型チューブ内異径並列微細流路の長さが冷媒の分配と蒸発特性に与える影響
3. 学会等名 第57回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 後藤武揚, 大西 元, 春木将司, 多田幸生
2. 発表標題 ポンプ駆動相変化熱輸送デバイスの熱流動に関する研究
3. 学会等名 混相流シンポジウム2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 角橋宏一朗, 大西 元, 後藤武揚, 春木将司, 多田幸生
2. 発表標題 スリット加工した拡張部を有する翼型チューブ熱交換器におけるブリッジによる熱伝導抵抗低減効果
3. 学会等名 2020年度日本冷凍空調学会年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 沈 浩, 大西 元, 中野紘佑, 春木将司, 多田幸生
2. 発表標題 吸着剤塗布水平平板上の着霜特性
3. 学会等名 2020年度日本冷凍空調学会年次大会
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
研究 分担 者	多田 幸生	金沢大学・機械工学系・教授	
	(Tada Yukio)		
	(20179708)	(13301)	

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
---------	---------