

令和 2 年 5 月 26 日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K18322

研究課題名(和文)次世代エコシップにおける環境調和型排熱回収システムに関する研究

研究課題名(英文) Study on environmentally conscious waste heat recovery system for next generation ECO ship

研究代表者

柴原 誠 (Shibahara, Makoto)

神戸大学・海事科学研究科・特命助教

研究者番号：70628859

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)：本研究では、航行中の排熱を蓄熱材により蓄熱する環境調和型排熱回収システムの検討を目的に、蓄熱材のエンタルピーや温度履歴などの蓄熱過程及び熱交換器用伝熱管の熱伝達率を明らかにした。実験では潜熱量を評価するために、断熱比熱測定装置を用いて蓄熱材の固相から液相までの比熱を実測した。本測定では、入熱が蓄熱材の温度履歴に及ぼす影響を明らかにし、比熱に関する温度依存性を明らかにした。また、温度履歴から比熱を求める計算コードを独自に開発し、種々の物性を伴った蓄熱材の評価が可能となった。さらに、排熱回収に必要な蓄熱側と水側の熱伝達率について、実験および数値解析により明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

停泊時における内航船からの排ガスは、港湾周辺の大気を汚染するため環境改善が課題である。停泊時における排ガスは主に発電機からであり、消費電力は燃料油加熱用の電気ヒーターが大半を占める。一方、大型船では燃料油の保温には蒸気が不十分となるため、停泊時の蒸気は補助ボイラーにより補う状況である。本研究成果は航行時だけでなく停泊時も含めた船舶の省エネルギー化を促進し、停泊時における燃料油加熱を念頭にした蓄熱型排熱回収システムの構築に寄与できる。蓄熱材における自然対流熱伝達や熱交換器用伝熱管の熱伝達率は本システムの設計データに必須であるが、実測でしか得られないため、実験的研究が学術的にも評価された。

研究成果の概要(英文)：This study is about the heat transfer characteristics for the waste heat recovery system of ship using phase change materials (PCMs). The latent heat of PCMs was evaluated using adiabatic specific heat measurement. The enthalpy and temperature profiles of PCMs were measured in the experiment. Developing the evaluation software of PCMs, the effect of temperature on the specific heat was revealed during the phase change from the solid state to liquid one. Moreover, the heat transfer coefficients of water and PCM were obtained with various incident heat fluxes, experimentally and numerically.

研究分野：船舶工学

キーワード：排熱回収 熱工学 蓄熱材

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、排ガスの規制が強化され環境調和型の船舶(エコシップ)の開発が注目されている。排ガス規制への対策として、現在は排熱回収後に排ガス中の不純物を分離し大気に放出する方式など、航行中の排ガス処理に関する研究は活発に行われている。一方、荷役などの停泊時はディーゼル発電機の使用により排ガスが港湾周辺の環境に悪影響を与えてしまうため、停泊時の排ガス削減が課題とされている。停泊時のディーゼル発電機による電力は、主に燃料油の加熱及び給湯のために使用される電気ヒーターである。燃料油である C 重油の粘性は温度に大きく依存し、燃焼効率に大きく影響を及ぼす。C 重油の動粘度は、約 35 で 500mm<sup>2</sup>/s であるため、適切な噴射燃焼の動粘度である 18mm<sup>2</sup>/s に達する温度(約 110 )まで加熱し、保温する必要がある。

従来、大型船では航行中の排熱は排ガスエコマイザーにより回収され、蒸気として再利用し燃料油の加熱を行っている。しかし、停泊中の給湯や燃料油の保温には蒸気が不十分となるため、停泊時の蒸気は補助ボイラーにより補う状況である。そのため停泊時の外航船や大型の内航貨物船では、燃料油の加熱のために蒸気ボイラーやディーゼル発電機の排熱を利用した熱媒ボイラーを利用している。

一方、総トン数 500 トン未満の貨物船は内航貨物船全体の約 50%を占めているが、ボイラーの据え付け面積が不十分であるため、電気ヒーターによる加熱及び保温がされており、停泊期間に応じてディーゼル発電機の稼働が必要となる。排熱エコマイザーなどの据付面積が不足する内航船では電気ヒーターにより燃料油を加熱し、保温している。そのため、停泊期間に応じてディーゼル発電機の稼働が必要となる。つまり、航行中は主機からの排熱を大気に放出し熱エネルギーの供給が需要を上回るのに対し、停泊中は熱需要が不足する状況が続いている。

### 2. 研究の目的

近年では、航行時だけでなく停泊時も含めた内航船の省エネルギー化が課題となっている。上述したように、港湾周辺の大気を汚染する停泊時のからの排ガスは、主に発電機からであり、その消費電力は燃料油の加熱のための電気ヒーターが大半を占め、航行中と停泊中の熱需要が異なることが原因で、航行中は余剰な熱を保有し、停泊中は熱が不足する反転現象が続いている。

そこで本研究では、内航船における不均一な熱エネルギー問題に着目し、高性能な相変化蓄熱材による蓄熱型排熱回収システムを構築することで、熱需要の不均衡の解決に取り組む。特に停泊時の燃料油加熱を念頭に、航行中の排熱を相変化蓄熱材により蓄熱する蓄熱型排熱回収システムの検討を目的とし、蓄熱材の潜熱量、蓄熱過程及び熱交換器用伝熱管の熱伝達率を明らかにする。

### 3. 研究の方法

本研究では、航行中の排熱を相変化蓄熱材により蓄熱する高性能蓄熱材の開発を念頭に、比熱および蓄熱量を種々の蓄熱材で調べ、また、蓄熱・放熱に影響を及ぼす自然対流現象を明らかにするため熱物性の測定を行った。さらに、蓄熱側の自然対流熱伝達および排熱回収側のサブクール水の熱伝達を実験および数値シミュレーションを実施することで多角的な検討を行った。

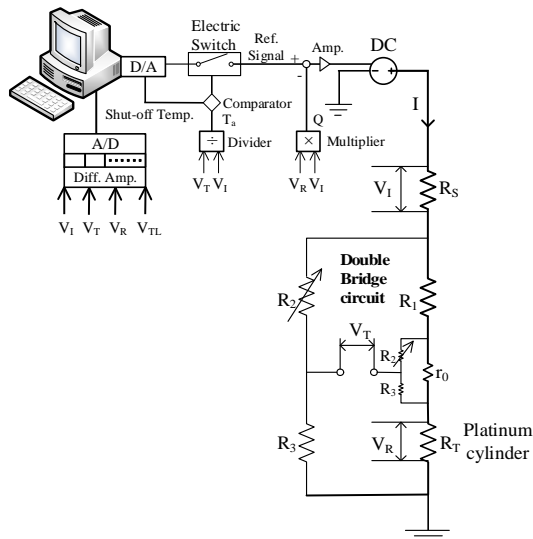
相変化蓄熱材は、物質の状態変化中に発生する潜熱を利用した有機及び無機材料であるが、その潜熱量及び利用できる温度範囲は材料に依存する。さらに、温度応答性も蓄熱材により異なるため、初年度である平成 28 年度は、蓄熱材の潜熱量及び温度応答性について検討した。まず、蓄熱材の潜熱量評価を念頭に、種々の蓄熱材を用いた断熱比熱測定を実施した。相変化蓄熱材は、上述したように潜熱量及び利用できる温度範囲は材料に依存し、温度応答性も蓄熱材により異なる。そのため、蓄熱材の潜熱量及び温度応答性が特に重要である。

実験では、種々の熱入力を蓄熱材に与えることで、入熱が温度履歴に及ぼす影響について調べ、蓄熱材の比熱に関する温度依存性を調べた。蓄熱材の比熱測定には、断熱比熱測定装置を使用し、白金 ロジウム細線の電位をデータロガーで高速サンプリングすることで、相変化時における温度履歴を計測した。また、得られた温度履歴から相変化時の比熱及びエンタルピーを算出する計算コードの開発を行った。

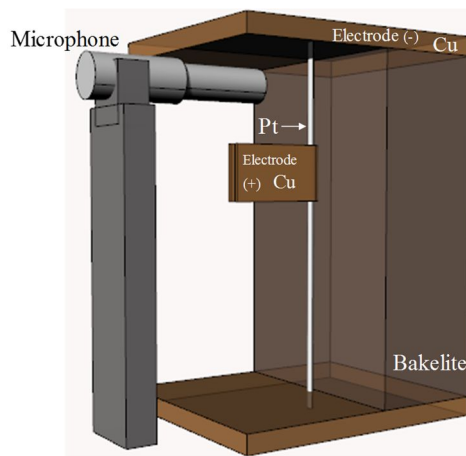
平成 29 年度は、蓄熱材の非定常熱伝達率を取得すると共に、蓄熱材の沸騰開始点及び沸騰熱伝達率を計測した。さらに、蓄熱材の使用限界を把握するために、種々の液温における沸騰開始時の熱流束を計測した。本実験の実験装置は、図 1 (a)に示すように直流安定化電源、オイルバス、ホットプレート、白金線、標準抵抗および蓄熱材(D-マンニトール)で構成され、白金線及び標準抵抗の電位を計測した。なお、白金線の温度は、予め純水において校正曲線を取得し、実験ではダブルブリッジ回路にて白金線の抵抗を計測した。

一方、排熱回収の管内側における熱伝達率を調べるため、水ループ強制対流試験装置により単相強制対流熱伝達実験及び流動沸騰実験を実施した。また、実験では、給水圧力を加圧器により調整し、サブクール度は予熱器を制御することで単相強制対流熱伝達率及び沸騰熱伝達率を計測した。

図 1 は、実験装置の概要を示している。図 1(b)に示すように、沸騰開始点を調べるために沸騰音を計測し、沸騰開始点をウェーブレット解析により検出する手法について検討した。



(a) 蓄熱材用計測装置



(b) 流動沸騰実験における試験部

図1 実験装置の概要

次に、平成30年度は蓄熱材の特性評価を行うためのプログラム開発および伝熱管の高サブクーリングにおける非定常熱伝達過程を実験的に調べた。さらに、取得した実験データに基づき数理モデルを構築し、熱流体解析ソフト（PHOENICS）を用いた気液二相流の数値シミュレーションを実施した。図2に数値シミュレーションの解析モデルを示す。ず中の  $d$  および  $L$  はそれぞれ直径および伝熱管の全長であり、 $L_e$  および  $L_{ex}$  は非加熱部の長さを表している。

境界条件は、サブクール水の流速 ( $u$ ) および系圧力は実験条件とし、熱流束 ( $q$ ) も実験条件と同様に時間経過と共に増加するモデルとした。本解析は、円筒座標系による3次元モデルとしており、計算領域は半径方向 ( $r$ ) に20分割、周方向 ( $\theta$ ) に12分割、そして軸方向 ( $z$ ) に150分割として非定常解析を実施した。

本解析ではソルバーにSIMPLEアルゴリズムを適用し、乱流モデルにはLam-Bremhorstが提案した低レイノルズ数  $k-\epsilon$  モデルを適用した。さらに、相変化を伴う熱流体シミュレーションを行うために、二流体モデルを適用し、モデルに関わる各係数は文献値を参考に決定した。

また、蓄熱材に異なる物質を添加した際の温度応答およびエンタルピーを測定し、高性能化を試みた。

最終年度である令和元年は、本研究のまとめとして強制流動沸騰実験で得られた実験データと熱流動解析の結果を比較すると共に、本予測モデルの妥当性について検討した。

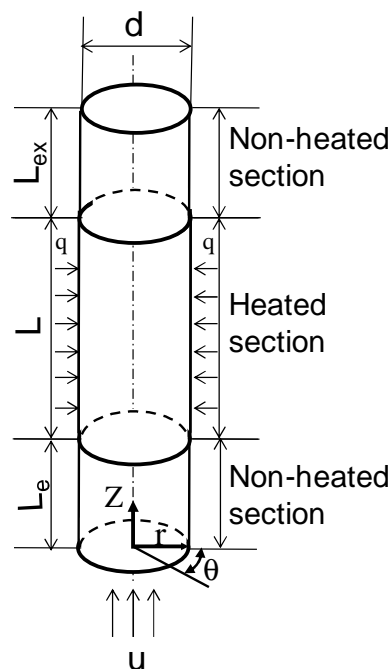


図2 解析モデル

#### 4. 研究成果

図3は、糖アルコール類のD-マンニトールの蓄熱材のエンタルピーを示す。ヒーターから蓄熱材への入熱は0.8Wとし、蓄熱材の質量は1.81gである。図に示すように蓄熱材の温度が上昇するにつれエンタルピーは増加し、約440Kで相変化が開始していることがわかる。相変化が始まると、エンタルピーが急に増加している。これは相変化中の潜熱であり、約450Kを過ぎるまでエンタルピーが増加した。一方、図4は、エンタルピーと温度の関係から算出した比熱を示している。相変化時には比熱が増加しているが、これは相変化により見掛けの比熱であると考えられる。

次に、蓄熱材による排熱回収の上限温度および伝熱特性を知られるため、自然対流領域から蓄熱材の沸騰開始および核沸騰までの広範囲の実験データを取得した。図5は、蓄熱材の沸騰開始点 (ONB: Onset of Nucleate Boiling) および核沸騰に関する沸騰曲線である。実験データは、自然対流熱伝達の式に沿って熱流束が増加し、表面過熱度が100Kで沸騰が開始していることが確認できる。沸騰開始後は、発達した核沸騰 (FDNB: Fully Developed Nucleate Boiling) が形成されており、水と同様に一般的な沸騰様式であることが確認された。本研究で特に着目した点は、蓄熱材の沸騰開始点であり、その予測式は広く活用が期待されるため、種々の液温および発熱率

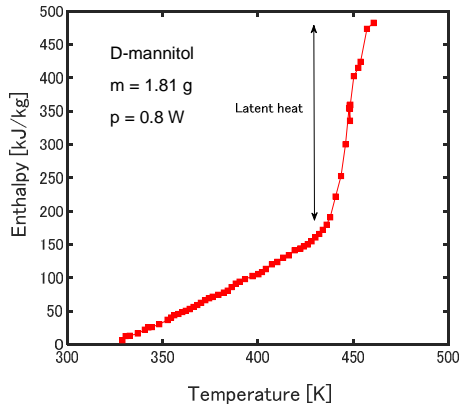


図3 エンタルピーと温度の関係

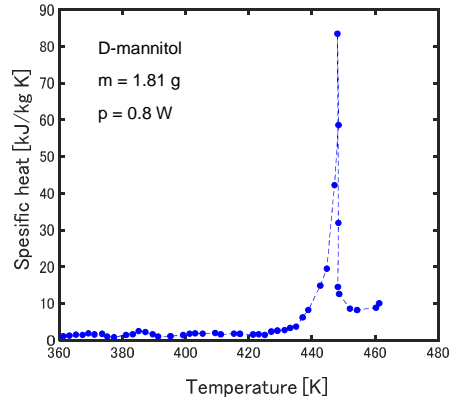


図4 比熱と温度の関係

の上昇速度をパラメータにした実験相関式を作成した．図6は沸騰開始点における熱流束と液温（蓄熱材）の関係を示している．実験結果より，液温が増加するにつれ沸騰開始点における熱流束が増加していることがわかる．そこで，下記に示す実験データに基づき最小二乗法による実験相関式を作成した．

$$q_{i,st} = c_1 \Delta T_L^{c_2} \quad (1)$$

ここで， $q_{i,st}$  および  $\Delta T_L$  はそれぞれ沸騰開始点における定常熱流束および液温と表面温度差を示す．また各定数は，それぞれ  $c_1=1965$  および  $c_2=0.88$  であった．

図7は発熱率の上昇速度の e-fold 時間( $\tau$ )を制御することで得られた沸騰開始点を示す．沸騰開始点は e-fold 時間が短くなるにつれ増加することが実験より明らかになった．また図8に示すように，定常熱流束の(1)式を基準に沸騰開始点と e-fold 時間( $\tau$ )の関係を整理することで次式に示す相関式を完成させた．

$$q_{i,tr}/q_{i,st} = (1 + c_3)\tau^{c_4} \quad (2)$$

ここで， $q_{i,tr}$  および  $\tau$  は沸騰開始点における非定常熱流束および発熱率が e 倍に達するまでの時間 (e-fold 時間) である．また，各定数は，それぞれ  $c_3=0.473$  および  $c_4=0.888$  であった．

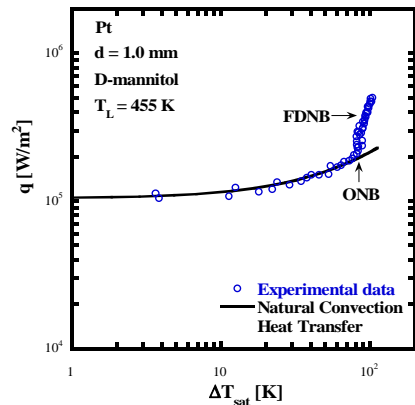


図5 蓄熱材の沸騰曲線

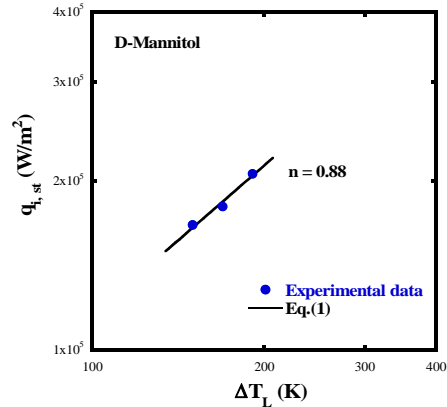


図6 沸騰開始点と液温の関係

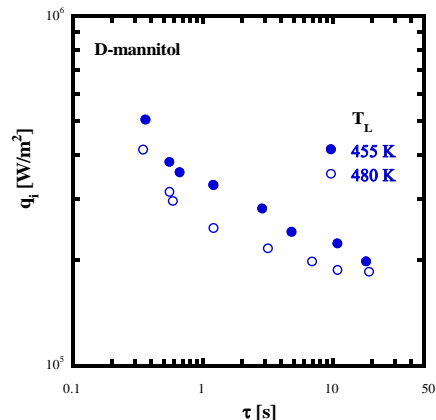


図7 沸騰開始点と e-fold 時間の関係

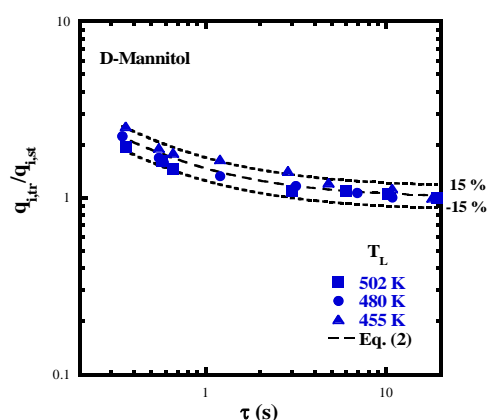


図8 実験データと実験相関式

図9は、沸騰音を計測し、ウェーブレット解析( $d_2$ )を行った結果を示す。比較のため、伝熱管表面温度の時系列データを合わせて示している。ウェーブレット解析により従来ポンプノイズ等で埋もれてしまった沸騰音の信号が鮮明に検出出来ており、表面温度が概ね一定になっていることからサブクール沸騰の開始点を捉えることができた。

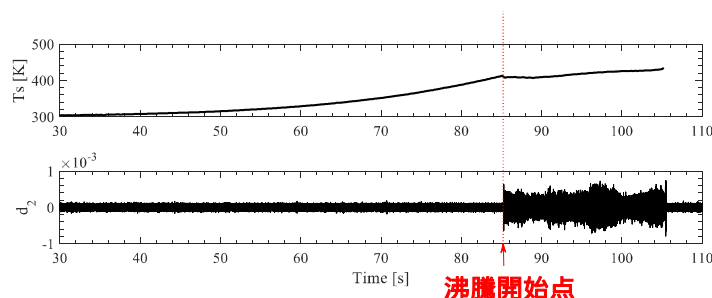


図9 沸騰音のウェーブレット解析結果

一方、伝熱管内におけるサブクール沸騰後の温度分布およびボイド率は、実験では検知することが困難であるため、数値シミュレーションを援用し、伝熱管内における温度分布および熱流束毎の平均ボイド率について調べた。図10は、伝熱管壁面における軸方向の温度履歴を示している。発熱率上昇速度のe-folding時間( $\tau$ )は18.4秒である。図10に示すように、後流になるにつれ温度境界層が発達していることがわかる。さらに、飽和温度を超えると温度分布が一様になっていることから、沸騰が開始したと考えられる。壁面で発生するサブクール沸騰を軸方向で平均化したボイド率を図11に示す。図に示すように、平均ボイド率( $\alpha$ )は熱流束の増加に伴い上昇している。壁面温度( $T_s$ )は平均ボイド率の上昇に合わせて一様になっていることから、二流体モデルによるサブクール沸騰を再現できていることがわかる。また、サブクール度水の温度( $T_l$ )は熱流束の影響を受けて上昇していることも図から読み取れる。

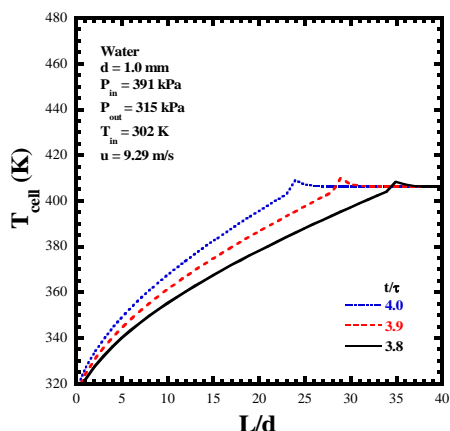


図10 伝熱管内の温度履歴

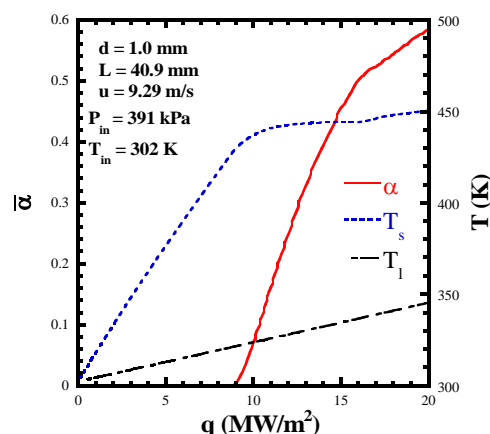


図11 熱流束と平均ボイド率の関係

次に、本伝熱流動解析と実験データの比較検討を行い、解析モデルに関する妥当性の検討結果について述べる。図12は熱流束と伝熱管壁面温度とバルクの流体温度の温度差( $\Delta T_L$ )を示している。図に示すように、解析結果は実験結果とよく一致している。本解析モデルは、非沸騰領域だけでなく沸騰領域においても $\Delta T_L$ を良好に評価していることから、図10および図11に示した管内の温度分布及びボイド率が高精度で予測可能となったと判断できる。さらに、図12の図中に示す矢印( )は限界熱流束(実測値)を表している。限界熱流束を超えると、核沸騰から膜沸騰に遷移し、伝熱管の焼損するため重要な設計パラメータとなる。今回の研究では、沸騰開始から限界熱流束までの広範囲の沸騰熱伝達率を取得でき、

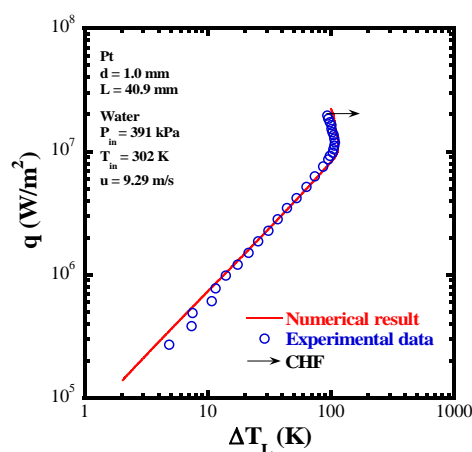


図12 解析結果と実験結果の比較

また、数値解析から限界熱流束近傍のボイド率も把握することができた。一方、平成30年度から試みた蓄熱材の高性能化については、蓄熱材に異なる物質(ナノスケールの炭素複合材料など)を添加すると融点が低下した。本学練習船「深江丸」の排熱回収として取り扱える温度範囲ではあるが、融点降下と共に相変化時のエンタルピーも低下したことから、排熱回収には寄与しないと判断した。しかし、熱伝導率の向上に伴う温度応答の改善が示唆されたことから、排熱回収量を適切に計算することで、新たな添加剤として利用することが期待できると考えられる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4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<br>Makoto Shibahara, Qiusheng Liu, Katsuya Fukuda   | 4. 巻<br>144           |
| 2. 論文標題<br>Transient Nucleate Boiling on a Horizontal Heated Cylinder in Liquid D-mannitol   | 5. 発行年<br>2018年       |
| 3. 雑誌名<br>Applied Thermal Engineering  | 6. 最初と最後の頁<br>342-348 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1016/j.applthermaleng.2018.08.072  | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>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<br>-             |
| 1. 著者名<br>Makoto Shibahara, Katsuya Fukuda, Qiusheng Liu, Koichi Hata, Suguru Masuzaki   | 4. 巻<br>132, 5        |
| 2. 論文標題<br>Boiling incipience of subcooled water flowing in a narrow tube using wavelet analysis   | 5. 発行年<br>2018年       |
| 3. 雑誌名<br>Applied Thermal Engineering  | 6. 最初と最後の頁<br>595-604 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br><a href="https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.12.110">https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.12.110</a> | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>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<br>-             |
| 1. 著者名<br>Makoto Shibahara, Katsuya Fukuda, Qiusheng Liu, Koichi Hata  | 4. 巻<br>54, Issue 2   |
| 2. 論文標題<br>Prediction of forced convective heat transfer and critical heat flux for subcooled water flowing in miniature tubes                     | 5. 発行年<br>2018年       |
| 3. 雑誌名<br>Heat and Mass Transfer   | 6. 最初と最後の頁<br>501-508 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br><a href="https://doi.org/10.1007/s00231-017-2155-8">https://doi.org/10.1007/s00231-017-2155-8</a>                       | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>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<br>-             |
| 1. 著者名<br>Makoto Shibahara, Qiusheng Liu, Katsuya Fukuda   | 4. 巻<br>99            |
| 2. 論文標題<br>Transient natural convection heat transfer of liquid D-mannitol on a horizontal cylinder  | 5. 発行年<br>2016年       |
| 3. 雑誌名<br>Renewable Energy   | 6. 最初と最後の頁<br>971-977 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1016/j.renene.2016.07.076  | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>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<br>-             |

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Makoto Shibahara, Qiusheng Liu, Koichi Hata, Katsuya Fukuda                                    |
| 2. 発表標題<br>Transient Boiling Heat Transfer Characteristics for Subcooled Water Flowing in a Vertical Tube |
| 3. 学会等名<br>29th International Symposium on Transport Phenomena (国際学会)                                     |
| 4. 発表年<br>2018年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Makoto Shibahara, Qiusheng Liu, Koichi Hata, Katsuya Fukuda  |
| 2. 発表標題<br>Numerical and Experimental Investigation of Boiling Heat Transfer for Subcooled Water Flowing in a Small-diameter Tube |
| 3. 学会等名<br>The 6th ASME International Conference on Micro/Nanoscale Heat and Mass Transfer (国際学会)                                 |
| 4. 発表年<br>2019年   |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

| 6. 研究組織 | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|---------|---------------------------|-----------------------|----|
|---------|---------------------------|-----------------------|----|