

令和 5 年 5 月 25 日現在

機関番号：11101

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14658

研究課題名（和文）温度・速度・加熱面熱伝達率の時空間同時計測による相変化材料内熱流動現象の解明

研究課題名（英文）Study of thermofluid phenomena in phase change materials using simultaneous visualization of temperature, velocity, and heat transfer coefficient

研究代表者

岡部 孝裕（Okabe, Takahiro）

弘前大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：70772713

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では相変化材料の融解過程で生じる液相内レイリーベナール対流の熱流動現象を、新たに開発した温度・速度・加熱面熱伝達率の時空間同時計測システムを用いて検証を行った。特に、潜熱と顕熱の比であるステファン数や傾斜角、容器形状の影響に着目し、詳細な検証を行った。結果として、各条件にて融解段階毎に液相内熱流動現象が大きく遷移する様子の可視化に成功し、それらが加熱面熱伝達特性に及ぼす影響を定量的に明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

相変化材料の融解過程で生じるレイリーベナール対流の熱流動現象の理解は、近年注目を集める潜熱蓄熱システムの最適な熱設計に必要不可欠である。本研究で開発した温度・速度・加熱面熱伝達率の時空間同時計測手法は、既存技術では難しかった複雑な当該熱流動現象の詳細な評価を可能とし、最適な熱設計に有用な多くの新たな学術的知見を提供した。さらに、本研究で得た同時可視化データは相変化材料の融解に関連する数値シミュレーションコードのベンチマークに有用である。

研究成果の概要（英文）： In this study, we investigated a natural convection on melting process of phase change materials using a simultaneous visualization of temperature, velocity, and heat transfer coefficient. We clarified that the heat transfer mechanism varies continuously based on melting stages of the phase change material, and it is considerably affected by the variations in the Stefan number and inclination angle. In addition, we obtained the scaling law of the Nusselt number and the Rayleigh number for each condition and found to be different values of the Nusselt number depending on the tested conditions. These variations were attributed to the changes in the number of ascending and descending plumes, solid-liquid interface, convection structure, and supply of cold fluid at each melting stage. Our experimental results can be used to enhance the understanding of the relevant phenomena and validate numerical simulations related to the melting of phase change materials.

研究分野：熱工学

キーワード：相変化材料 赤外線サーモグラフィ 2色レーザー誘起蛍光法 粒子画像流速測定法 レイリーベナール対流 可視化計測

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

相変化材料は融解潜熱によって温度を変化させることなく熱を吸収できるため、エネルギー貯蔵のための潜熱蓄熱システムや電子機器の受動的冷却に応用されている。これらの用途では、相変化材料が入れられた矩形容器の下面から一定熱流束加熱される場合も多く、熱性能は融解によって生じる液相内のレイリーベナール対流に依存する。融解による液相高さの増大に伴い、液相のレイリー数と縦横比が経時的に変化することで、規則的な対流セル形成、その崩壊と不規則な流動、乱流のように熱流動状態が大きく遷移する。さらに、この現象は潜熱に対する顕熱の比であるステファン数にも強く依存すると考えられるが、定量的な説明はされていない。つまり、機器の発熱密度や形状が異なると、熱性能が大きく変化することを意味する。そのため、様々な用途における最適な熱設計の指針を得るには、ステファン数や容器形状が異なる条件での相変化材料レイリーベナール対流の複雑な熱流動現象を詳細に理解する必要がある。

これまで相変化材料内レイリーベナール対流に関する様々な研究報告がある。例えば、Joneidi et al. (Joneidi et al., *Exp Ther Fluid Sci*, (2017)) は熱電対を用いて相変化材料の融解に伴い発生する自然対流の熱伝達特性に関する実験的検証を実施した。しかしながら、相変化材料内自然対流は複雑な時空間分布を有するため、熱電対等による点計測では詳細な物理現象の説明は困難である。一方、Favier et al. (Favier et al., *J Fluid Mech*, (2019)) は相変化材料内レイリーベナール対流の2次元数値解析を実施した。しかしながら、融解初期段階に生じる3次元対流構造や3次元融解面形状はその後の対流構造の分岐に影響を与えると考えられ、2次元解析では正確な熱流動現象を記述できない可能性がある。さらに、高レイリー数領域における数値解析は、計算力学的にもチャレンジングであり、実験的検証によるベンチマークの必要がある。

2. 研究の目的

本研究では温度場・速度場・加熱面熱伝達率分布の同時可視化システムを構築し、相変化材料の融解過程で生じる液相内レイリーベナール対流の熱流動現象を明らかにする。特に、ステファン数や容器形状、傾斜角が融解過程における自然対流熱伝達現象に与える影響を明らかにし、潜熱蓄熱システムの最適な熱設計の指針を得ることを目指す。

3. 研究の方法

上記研究目的の達成のために、具体的な方法として(1) 温度場・速度場・加熱面熱伝達率分布の同時可視化システムの構築、(2) 諸種条件下における相変化材料内熱流動現象の可視化実験、(3) 当該現象の無次元化・データベース構築を設定した。

(1)では、研究代表者が構築してきた赤外線カメラを用いた計測系を拡張した可視化システムを構築する。精度・非接触・簡素化の観点から、温度場のための2色レーザー誘起蛍光法(2色LIF法)と速度場のための粒子画像流速測定法(PIV法)を1台のカラーカメラで同時に行う手法を導入する。(2)では、蓄熱材によく使用されるn-オクタデカンを用いて実験を実施し、ステファン数や容器縦横比、傾斜角が融解過程における熱流動現象に与える影響に着目する。(3)では、得られた可視化計測データを無次元数によって整理し、潜熱蓄熱システムの最適な熱設計の指針を得る。

4. 研究成果

(1) 温度場・速度場・加熱面熱伝達率分布の同時可視化システムの構築

図1(左)に本研究で構築した温度場・速度場・加熱面熱伝達率分布の同時可視化システムの概略図を示す。これまで研究代表者が開発してきた赤外線サーモグラフィと金属箔ヒーターを用いた固液界面熱流束分布計測法を拡張するために、2色レーザー誘起蛍光法(2色LIF法)と粒子画像流速測定法(PIV法)を1台のカラーカメラで同時に行う手法(Funatani et al., *Meas Sci Technol*, (2004))を導入した。本手法では、カラーカメラのRGBフィルターと試験流体に混ぜた蛍光塗料の蛍光(ローダミンB: RhBとローダミン110: Rh110)、レーザー出力波長(青色: 445 nm)の波長帯を利用して、図1(右)に示すようにR, G画像に2色LIF法, B画像にPIV法を適用し、1台のカメラで温度場と速度場の同時計測を実現した。

開発した計測システムと画像処理手法の妥当性を検証するために、下面および側面より加熱された矩形容器内グリセリン水溶液の自然対流可視化計測実験を実施した。試験流体のプラントル数やレイリー数、容器縦横比、傾斜角等をパラメータし、幅広い実験条件にて計測システムの妥当性を検証した。図2は側面から加熱された矩形容器内自然対流現象の温度場・速度場・加熱面熱伝達率の可視化結果を示す。可視化結果より、既存研究の矩形容器内自然対流熱伝達の傾向と良い一致を示し、構築した液相内温度場・速度場および加熱面熱伝達率分布の可視化計測システムの妥当性を示すことができた。

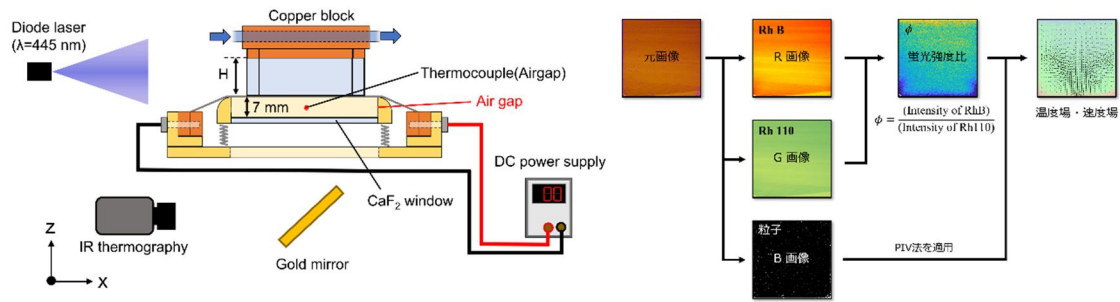


図1 同時可視化システムの概略図(左), 液相内温度場・速度場のための画像解析(右)

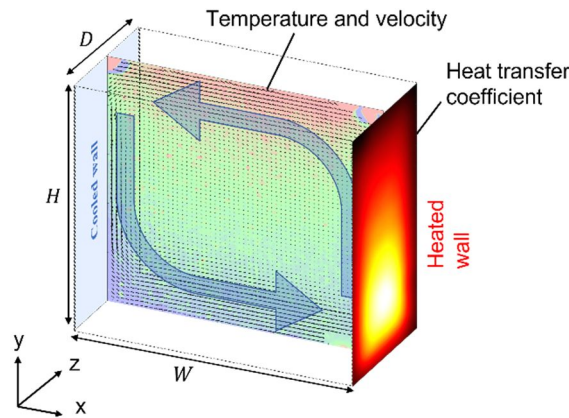


図2 側面から加熱された矩形容器内自然対流の可視化結果

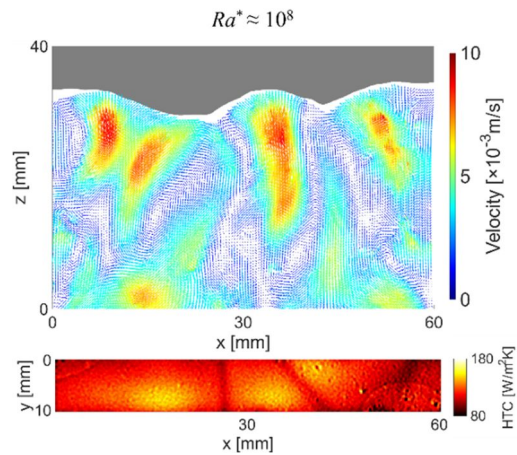


図3 下面より加熱された矩形容器内相変化材料内自然対流の可視化結果

(2) 諸種条件下における相変化材料内熱流動現象の可視化実験

構築した可視化システムを用いて、蓄熱材としてよく使用される n -オクタデカンの融解過程で生じる液相内レイリーベナール対流の可視化実験を行った。実験ではレイリー数, ステファン数, 液相縦横比, 容器縦横比等をパラメータとし, 融解面形状変化や熱流束分布, 熱伝達率分布, 熱量, ヌセルト数, 上昇および下降プルームの数, 対流構造の遷移挙動, 液相内速度場・温度場などに着目して検証を行った。図3は平均液相高さを代表長さとする修正レイリー数 $Ra^* = 10^8$ における液相内速度場と加熱面熱伝達率分布の可視化結果の一例であり, 液相内流動と加熱面熱伝達率分布, 融解面形状の同時可視化に成功した。これにより, 融解面形状変化と液相内速度場, 加熱面熱伝達率分布の経時変化と相関を詳細に明らかにすることができた。

図4はステファン数 $Ste = 2.4$ における融解挙動と加熱面熱伝達率分布の経時変化を表す。融解段階によって液相内の自然対流構造が変化し, 加熱面熱伝達率分布に大きく影響を及ぼすことが明らかとなった。融解初期段階 ($Ra^* \approx 10^3$) では, 液相内のレイリー数が臨界値に達せ

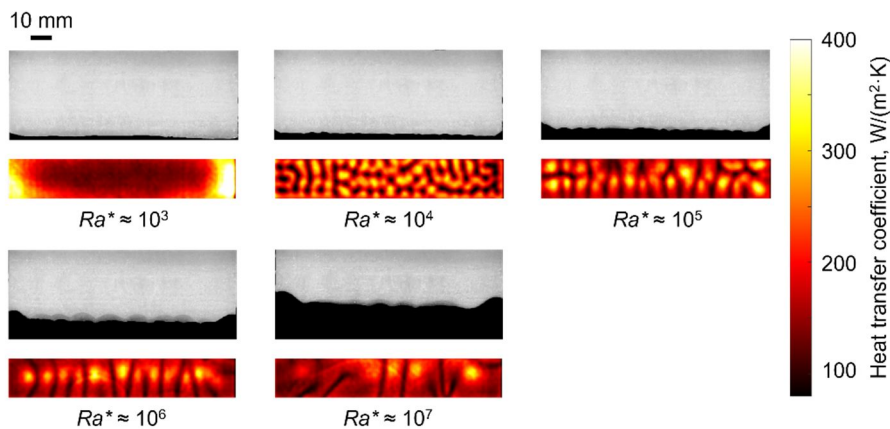


図4 ステファン数 $Ste = 2.4$ における融解挙動と加熱面熱伝達率分布の経時変化 (Okabe et al., *Int J Heat Mass Transf*, (2021))

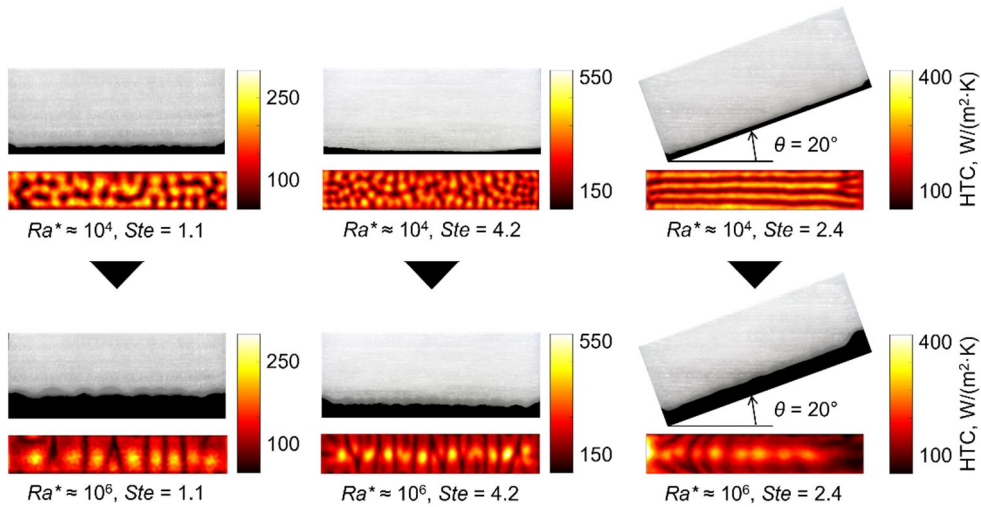


図5 各種条件下における融解挙動と加熱面熱伝達率分布の変化： $Ste = 1.1$ （左）， $Ste = 4.2$ （中），傾斜角 $\theta = 20^\circ$ （右）(Okabe et al., *Int J Heat Mass Transf*, (2021))

ず、伝熱は熱伝導に支配された。融解が進行すると液相内に3次元的な自然対流が発生し、融解面形状はその構造に従って凹凸状になった。さらに融解が進むと、液相のレイリー数や縦横比が経時的に変化することで、対流構造も大きく変化し、最終的に乱流に遷移した。このように本手法を用いることで、既存技術ではとらえることができない複雑な対流構造遷移に伴う加熱面熱伝達率分布を詳細に評価することができた。

図5は各種条件下における融解挙動と加熱面熱伝達率分布の変化を示す。図5(左)と(中)はそれぞれステファン数 $Ste = 1.1$, 4.2 における可視化結果であり、 $Ste = 2.4$ と比較して各レイリー数において対流構造（対流セルの大きさや数、流動特性など）と融解面形状に大きな違いが生じた。図5(右)は傾斜角 θ を 20° 傾けた時の融解挙動と加熱面熱伝達率分布である。結果より、傾斜角 0° の時と比較すると、加熱面熱伝達特性が全く異なる様相を示し、融解挙動も大きくことなる結果となった。これら知見は相変化材料を用いる場合、加熱・冷却対象の発熱密度や形状、傾斜角などによって大きくその性能が変化する可能性を示唆しており、産業的にも重要なものである。

(3) 当該現象の無次元化および可視化データベースの構築

得られた実験データを容器アスペクト比やステファン数、傾斜角度毎に液相高さを代表長さとする修正レイリー数 Ra^* とヌセルト数 Nu を用いたスケーリングを行った。さらに、得られたデータを幅広い条件毎に整理し、データベースの構築を実施した。

図6に各ステファン数におけるヌセルト数と修正レイリー数の関係を一例として示す。比較のために、Esfahani et al. (Esfahani et al., *Phys Rev Fluids*, (2018)) による融解境界のある場合（3D PCM）とない場合（3D RB）のレイリーベナール対流に関する3次元数値解析の結果を同じグラフに示す。結果より、相変化材料の融解を伴う系では、融解境界を伴わないレイリーベナール対流よりもヌセルト数が大きくなり、その効果はステファン数が大きいほど促進されることが示された。これは融解境界によって生じる液相内温度場の非定常性と融解面の非平面形状によるものと考えられる。さらに、ステファン数の増加に伴うヌセルト数の変化が観測され、対流構造や融解面形状、液相温度の変化に起因することが明らかとなった。これら知見は潜熱蓄熱システム等の熱設計に欠かせない重要な知見である。

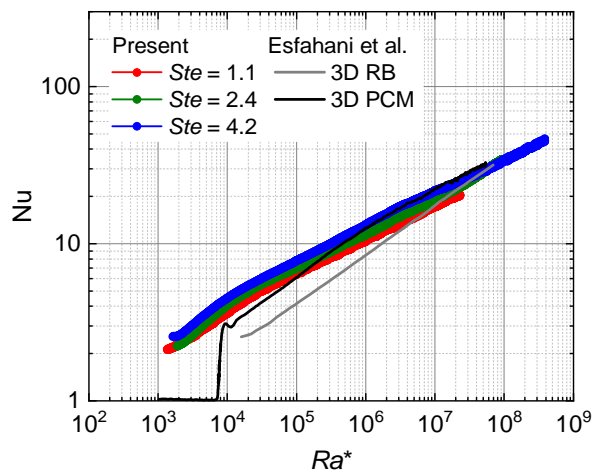


図6 各ステファン数におけるヌセルト数と修正レイリー数の関係(Okabe et al., *Int J Heat Mass Transf*, 2021)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7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 1件）

1. 著者名 Okabe Takahiro, Miyanishi Takuro, Miyagawa Taimei, Murata Hiroyuki	4. 巻 181
2. 論文標題 Spatio-temporal measurement of natural convective heat transfer on melting process using infrared thermography	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 121882 ~ 121882
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121882	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 Takahiro Okabe, Taimei Miyagawa, Hiroyuki Murata	4. 巻 USB予稿集
2. 論文標題 Effects of heating conditions on natural convective heat transfer with melting boundary in a rectangular cavity heated from below	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of 2nd Asian Conference on Thermal Sciences	6. 最初と最後の頁 -
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 Kohki Nishiyama, Takahiro Okabe, Taimei Miyagawa, Hiroyuki Murata	4. 巻 USB予稿集
2. 論文標題 Development of simultaneous visualization technique for temperature, velocity, and heat transfer coefficient and its application to natural convective flow	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of 2nd Asian Conference on Thermal Sciences	6. 最初と最後の頁 -
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 SHIROTA Minori, KIDACHI Haruka, OKAWA Takumi, NAKAGAWA Yusuke, MAEDA Kazuaki, OKABE Takahiro, FUKUDA Yasuyuki	4. 巻 2
2. 論文標題 Visualization and Measurement of Pore Formation with Solidification on Impaction Interface of Molten Metal Drops	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 JAPANESE JOURNAL OF MULTIPHASE FLOW	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3811/jjmf.2022.017	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 K. Nishiyama, T. Okabe, T. Miyagawa, M. Shirota	4. 巻 USB予稿集
2. 論文標題 High Spatial-Resolution Measurement of Unsteady Natural Convection in a Tilted Rectangular Enclosure	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of 18th International Conference on Flow Dynamics	6. 最初と最後の頁 -
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 無
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 T. Okabe, K. Nishiyama, J. Okajima, M. Shirota	4. 巻 USB予稿集
2. 論文標題 Study of Hydrothermal Behaviors of Impinging Droplets on a Heated Wall	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of 21st International Symposium on Advanced Fluid Information	6. 最初と最後の頁 -
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 無
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 岡部孝裕, 岡島淳之介, 城田農	4. 巻 USB予稿集
2. 論文標題 加熱壁面に衝突する液滴のリム不安定性が固液界面熱伝達現象に及ぼす影響	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 第58回日本伝熱シンポジウム講演論文集	6. 最初と最後の頁 -
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 無
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11件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 K. Nishiyama, T. Okabe, T. Miyagawa, M. Shirota
2. 発表標題 High Spatial-Resolution Measurement of Unsteady Natural Convection in a Tilted Rectangular Enclosure
3. 学会等名 18th International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1 . 発表者名 K. Nishiyama, T. Okabe, T. Miyagawa, H. Murata
2 . 発表標題 Development of simultaneous visualization technique for temperature, velocity, and heat transfer coefficient and its application to natural convective flow
3 . 学会等名 Proceedings of 2nd Asian Conference on Thermal Sciences (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 T. Okabe, T. Miyagawa, H. Murata
2 . 発表標題 Effects of heating conditions on natural convective heat transfer
3 . 学会等名 Proceedings of 2nd Asian Conference on Thermal Sciences (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 T. Okabe, K. Nishiyama, J. Okajima, M. Shirota
2 . 発表標題 Study of Hydrothermal Behaviors of Impinging Droplets on a Heated Wall
3 . 学会等名 21st International Symposium on Advanced Fluid Information (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 岡部孝裕
2 . 発表標題 VISUALIZATION OF NATURAL CONVECTIVE HEAT TRANSFER WITH MELTING BOUNDARY USING INFRARED THERMOGRAPHY
3 . 学会等名 第10回4校学術交流会
4 . 発表年 2021年

1. 発表者名 岡部孝裕, 岡島淳之介, 城田農
2. 発表標題 加熱壁面に衝突する液滴のリム不安定性が固液界面熱伝達現象に及ぼす影響
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 岡部孝裕, 宮西卓朗, 宮川泰明
2. 発表標題 下面より加熱されたn-octadecaneの融解過程で生じる自然対流熱伝達の時空間特性に関する実験的研究
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 Koki Nishiyama, Takahiro Okabe, Taimei Miyagawa, Hiroyuki Murata
2. 発表標題 Visualization measurement of transient heat transfer characteristics of Rayleigh-Benard convection using infrared thermography
3. 学会等名 17th International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Taimei Miyagawa, Takahiro Okabe, Hiroyuki Murata
2. 発表標題 Measurement of heat transfer of a sphere moving on the inclined wall using high-speed IR thermography
3. 学会等名 17th International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡部孝裕, 宮西卓朗, 宮川泰明
2. 発表標題 傾斜容器内相変化材料の融解における加熱面熱伝達特性の時空間計測
3. 学会等名 第41回日本熱物性シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takahiro Okabe, Yuka Akiyama, Junnosuke Okajima, Minori Shirota
2. 発表標題 Study of hydrothermal behaviors of impinging droplets on a heated wall
3. 学会等名 20th International Symposium on Advanced Fluid Information (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
---------	---------