

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06193

研究課題名（和文）高温面スプレー沸騰冷却における局所的濡れ開始条件の可視化・温度計測と伝熱解析

研究課題名（英文）Visualization, Temperature Measurement and Heat Transfer Analysis on Initiation Condition of Localized Wetting during Spray Cooling by Boiling on Hot Surface

研究代表者

永井 二郎 (Nagai, Niro)

福井大学・学術研究院工学系部門・教授

研究者番号：70251981

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：沸点以上に過熱された高温面を液体スプレー沸騰で冷却する場合、固液接触の無い膜沸騰状態はいずれ局所的・間欠的に崩壊し、局所的な固液接触（濡れ）が発生し急冷が始まる。その発生条件（いわゆる濡れ開始条件）を、実験（可視化と温度計測）と伝熱モデル解析により検討した。これまで、濡れ開始条件での可視化が困難であった水スプレー沸騰において、装置の改良・工夫により初めて可視化に成功した。また、低沸点流体HFE-7100のスプレー沸騰においては、様々な流量密度における濡れ開始条件を可視化・計測により把握できた。また、固体と液体が接触後の非定常熱伝導と自発核生成を連成させた伝熱モデルを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

一般的に、沸点以上に過熱された高温面を液体で沸騰冷却する場合、固液接触の無い膜沸騰状態はいずれ局所的・間欠的に崩壊し、局所的な固液接触（濡れ）が発生し急冷が始まる。その発生条件（いわゆる濡れ開始条件）を汎用的に把握することは、鉄鋼業における製造プロセスの高度化、原発等の事故時安定性評価、超低温流体応用システムの起動安定性などに応用されるとともに、学術的な長年の課題解決を意味する。本研究では、液体沸騰冷却の内スプレー冷却条件下において、応用事例の多い水スプレー時の濡れ開始近傍の現象を直接観察することに成功し、また濡れ開始条件を検討するための伝熱モデルを構築することができた。

研究成果の概要（英文）：During spray cooling of high temperature surface over boiling point, film boiling collapses by initiating localized and intermittent liquid-solid contacts on superheated surface, and rapid cooling begins. This criteria, i.e. wetting initiation condition was investigated by visual observation of localized and surface temperature measurements. As a result, localized liquid-solid contacts situations were successfully visualized during water spraying, which had not been so far realized due to experimental difficulties. Under spraying conditions of HFE-7100, which has lower boiling point, the above criteria had been grasped with several liquid flow densities. In addition, heat transfer modeling was conducted which can simulate simultaneously spontaneous nucleation process and unsteady heat conduction in solid and liquid layers.

研究分野：伝熱工学

キーワード：沸騰 固液接触 濡れ開始 スプレー冷却 MHF点 可視化 伝熱モデル

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

### (1) 沸騰素過程からの数値シミュレーションの必要性

沸騰現象は工業上、蒸気生成や冷却制御技術として幅広く利用されており、その熱伝達特性は沸騰曲線で表現される。蒸気生成の例としては火力・原子力発電におけるボイラー、冷却制御の例としては製鋼・熱延工程、焼入れ等の熱処理が挙げられる。これらの例では核・遷移・膜沸騰全ての沸騰領域が関与し、熱設計の一部に数値シミュレーションが導入されているものの基本的には実験整理式をベースに沸騰熱伝達特性を利用してきた。

しかし近年、冷却制御の更なる高度化・安定化のため CAE のニーズが高まり、材料内部構造解析や熱流動の数値解析の境界条件として、沸騰曲線全領域を素過程から数値シミュレーションする技術が強く求められている。

### (2) 沸騰素過程に関する根本的な未解決課題

近年、孤立気泡域の核沸騰について、既存核活性化から気泡成長・離脱に至る素過程の直接数値シミュレーションの成功例が報告されている<sup>[1]-[3]</sup>。また純粋な膜沸騰については蒸気膜ユニットモデル<sup>[4]</sup>による解析的計算も可能となっている。

ところが、局所的・間欠的固液接触が発生する高熱流束核沸騰領域から遷移沸騰領域を経て低熱流束膜沸騰領域については、現状では下記 ~ の根本的な未解決課題が残っているため、素過程からの数値シミュレーションは極めて困難な状況である。

・ 過熱面での濡れ性評価<sup>[5]</sup>、既存核活性化による発泡点位置・条件の予測<sup>[6]</sup>

・ 高温面上に発生する局所的固液接触（濡れ）の開始条件の解明

は、従来の平衡接触角による濡れ性評価の限界が指摘されており、三相界線ダイナミクスも含めたマイクロ・ナノスケールパラメータによるアプローチが期待されている。は、与えられた固体表面と液体の組合せに対して、実験整理式ではなく理論的かつ実施可能な発泡点予測手法が無い点である。は、前述の局所的・間欠的固液接触が発生する領域の沸騰曲線（特に MHF 点の決定）に関わる問題で極めて重要であり、実験的・解析的<sup>[7]</sup>アプローチの研究はあるものの、ととも関連して解明には至っていない。

### (3) 濡れ開始条件に関する研究の進展と課題

未解決課題 に関して、最近、門出・光武<sup>[8]</sup>および大竹ら<sup>[9]</sup>の衝突噴流沸騰に関する先駆的研究により、MHF 点近傍の高温面上の濡れ開始条件が実験的に明らかになりつつある。これらの結果は、高温面固体内部の熱伝導と固液界面からバルク液体への熱伝達の連成が重要であることを示唆している。

以上をふまえて研究代表者は、高温面上に液滴を落下させた場合に発生する局所的濡れが初生・限定される過程、および噴流・スプレー冷却時の局所的濡れ開始状況を、可視化計測と数値解析により検討した<sup>[10]-[12]</sup>。透明な単結晶サファイア板を過熱面とし、噴流冷却時の局所的濡れ生成・拡大プロセスを可視化<sup>[10]</sup>し、また高温面内の非正常熱伝導と局所的濡れ領域内熱伝達とを連成して数値計算するプログラムを構築した<sup>[11]</sup>。さらに図 1 に示すように、スプレー冷却系での局所的濡れ開始条件を実験的に検討し、局所的濡れが開始する時のスプレーノズル直下局所表面温度が、ライデンフロスト温度と自発核生成温度の間に分布することを見出した<sup>[12]</sup>。

<課題> 上記の研究<sup>[10]</sup>と<sup>[12]</sup>は、実験装置の技術的課題（装置の耐熱性）のため有機液体（HFE-7100）に限られており、例えば製鋼・熱延工程での冷却等、実用上非常に重要な水の冷却系では知見が得られていない。また、スプレー冷却系の場合、局所的濡れは必ずしもスプレーノズル直下から開始するとは限らず、可視化・温度計測を行った高温面のサイズが小さいこともあり、濡れ開始温度の分布に関する情報は得られていない。さらに、濡れ開始条件は温度と熱流束の両方で決定されるとの報告<sup>[13]</sup>があるが、これまでその情報は得られていない。

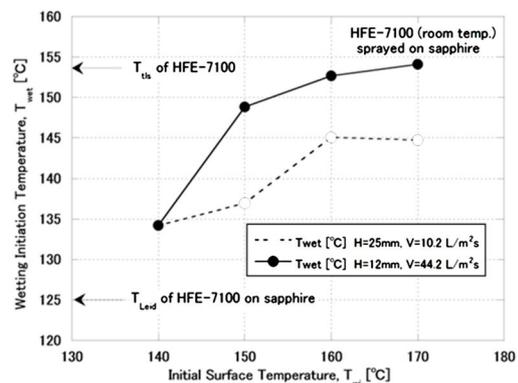


図 1. 濡れ開始温度測定結果<sup>[12]</sup>

## 2. 研究の目的

上記の課題をふまえて本研究は、スプレー冷却系を対象として、局所的濡れ開始条件の可視化および表面温度計測と伝熱逆問題解析を行う。

【可視化・表面温度計測】: 装置耐熱性の課題を解決し、高温面初期温度が 400 での実験を可能とさせ、試験液体に水や HFE-7100 を用いた膜沸騰からの冷却を実現し、180mm の大サイズ単結晶サファイア面上がスプレー冷却される場合の局所的濡れ開始状況を高温面裏側および上方から可視化・画像計測する。同時に、スプレー領域内の局所表面温度を計測し、局所的濡れ開始の位置と温度条件を実験的に把握する。

【伝熱解析】: 計測する表面温度と高温面裏側熱境界条件の時系列データを用いて伝熱解析を行い、濡れ開始条件を表面温度と熱流束で表現可能かどうか検討を行う。

以上の計測と解析により、「高温面上に発生する局所的固液接触（濡れ）の開始条件の解明」に関して、実用上重要な水も含めたスプレー冷却時の局所的濡れが初生し持続される臨界条件を把握することを目的とする。

### 3. 研究の方法

前述目的達成を目指して 2017～2019 年度の研究期間内に実施した研究の方法概要を記す。

#### (1) 可視化・表面温度計測実験

図 2 に、180mmx5tmm の単結晶サファイア面を伝熱面として用いたスプレー冷却系の可視化・表面温度計測実験装置概要を示す。単結晶サファイアを用いる理由は可視光の透過性に加えて高熱伝導性(熱伝導率  $42\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ )を有するためである。可視化原理は文献<sup>[10][12]</sup>と同様で、光の全反射を利用する。すなわち、透明なサファイア面上の乾燥領域では全反射するが濡れ領域では透過するよう光の入射角を調整すると、下部から観察する高速度カメラ側では乾燥領域は明部、濡れ領域は暗部で撮影される。サファイア面裏側に高温用熱媒体油(最大  $400^\circ\text{C}$ )を接触させ、裏面で全反射が起きないようにする。スプレー試験液には、常温の水(沸点  $100^\circ\text{C}$ )または HFE-7100 (沸点  $60^\circ\text{C}$ )を用いた。

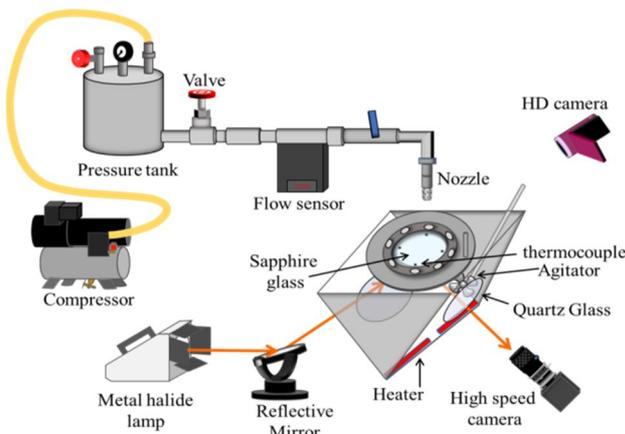


図 2. スプレー冷却系大サイズ可視化実験装置

当初は、サファイア円板周り及び観察用の装置下部円板窓周りの油リーク防止のために耐熱性パッキンやメタルシールを種々適用し実験を行ったが、結果的に使用した全てのパッキン・メタルシールでは、油高温時のリークを防止することができず、2018 年度途中より、装置の分解利便性は犠牲にしてリーク部分に耐熱性接着剤(耐熱温度  $250^\circ\text{C}$ )を塗布することとした。

表面温度測定のため、当初はサファイア面に  $0.4\text{mm}$  の穴あけ加工を行い、シース外径  $0.25\text{mm}$  の極細シース熱電対を挿入・固定した。極細シース熱電対は、ノズル直下(板中央)から  $5\text{mm}$  間隔で 10 カ所設置した。極細シース熱電対を用いた理由は、高速温度応答性のためである。しかし、数回の実験実施後に極細シース熱電対の破損頻度が増えるため、 $1.1\text{mm}$  の穴あけに変更し、シース外径  $1\text{mm}$  の熱電対に変更した。局所的濡れ開始温度は、可視化画像とシース熱電対測定データを同期させて評価可能となった。ただし、この  $1\text{mm}$  シース熱電対設置実験においても、複数回スプレー冷却実験を行うと、穴端部での熱応力によりサファイア板に破損が生じる頻度が増えたため、最終的には表面温度のリアルタイム測定も中止し、貫通穴をなくし、サファイア表面に貼り付けた熱電対素線による冷却開始時初期表面温度の測定のみとした。

比較のため、2014 年度に作成した矩形小サイズ( $50\text{mm}$  角  $\times 5\text{mm}$ )のサファイア板を用いて、図 2 と同様の装置による可視化・温度計測実験も並行して行った。この装置は耐熱性の限界により、試験液は HFE-7100 のみである。

#### (2) 伝熱解析

当初は、上記のシース熱電対により計測される表面温度とサファイア面裏側境界条件(高温油との対流熱伝達境界条件)により熱伝導解析を行う予定であった。しかし(1)で述べた通り、最終的には表面温度測定を中止せざるを得なくなったため、計測データを用いず純粋な伝熱解析モデル構築を行った。すなわち、固液界面での自発核生成を伴う伝熱モデルの文献<sup>[7],[11],[13],[14],[15]</sup>を参考に、高温固体面に液滴が連続的に接触する系を対象として、固体側および液相側を要素分割し、固液接触直後以降のそれぞれの非定常熱伝導と液相内の自発核生成プロセスを連成させたプログラムを作成した。

### 4. 研究成果

#### (1) 可視化・表面温度計測実験

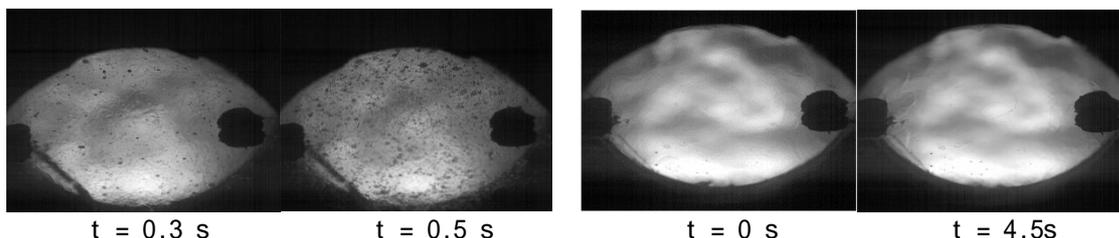


図 3. 水スプレー実験時の固液接触様相可視化(流量密度  $0.083\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ )

図3は、常温の水を流量密度  $0.083\text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$  でスプレーした場合の固液接触様相をサファイア面裏側から可視化した画像である。左側は初期表面温度が  $180^\circ\text{C}$ 、右側は  $220^\circ\text{C}$  の場合である。このように非常に流量密度が小さな条件では、初期温度  $220^\circ\text{C}$  の場合に高速度ビデオ(1000fps, シャッター定数  $1/20000\text{s}$ )の記録時間約  $4.5\text{s}$  内に固液接触(濡れ)は観察されず、ほぼ純粋な膜沸騰状態が実現された。一方、初期温度  $180^\circ\text{C}$  の場合は、スプレー開始直後  $0.3\text{s}$  時点以降、多数の固液接触点(暗点)が観察された。本来は、その後初期温度を  $180^\circ\text{C}$  と  $220^\circ\text{C}$  の間に設定し、固液接触(=濡れ)が観測され始める臨界条件を探るべきところであるが、 $180^\circ\text{C}$  の実験最後にサファイア面が破損し実験継続が困難となった。しかし、図3のように、水スプレー時の膜沸騰から遷移沸騰領域における固液接触状況の直接観察に初めて成功することができた。

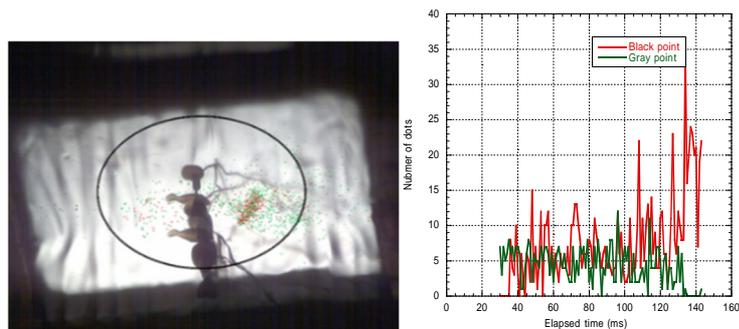


図4. HFE-7100 スプレー実験時の固液接触様相可視化(流量密度  $403\text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ )

図4左側は、常温の HFE-7100 を矩形小サイズのサファイア面に流量密度  $403\text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$  でスプレーした場合の固液接触様相を可視化した画像である。連続的な固液接触(=濡れ)が発生する直前の様相を詳細に検討すると、寿命が  $1\text{ms}$  以下の小さな濡れ点(図4左側画像上では赤点や緑点で記載)が表れ始めていることが分かった。濡れ点の大きさから考えると、1つ1つの濡れ点はスプレー中の液滴1つ1つに対応するものと考えられる。 $1\text{ms}$  以下の短時間で濡れが乾き状態に移行しており、(2)の伝熱解析で参照した文献<sup>[7],[11],[13],[14],[15]</sup>で想定される自発核生成によるものと推定できる。図4右側グラフは、左側の可視化画像中で観測される濡れ点の数を時系列に表示したものである。赤色で示される濡れ点数が時間の経過に伴い増加していることがわかる。この後に連続的な固液接触(=濡れ)が形成されるため、図4に示す濡れ点の発生・消滅メカニズムの解明が今後必要となる。

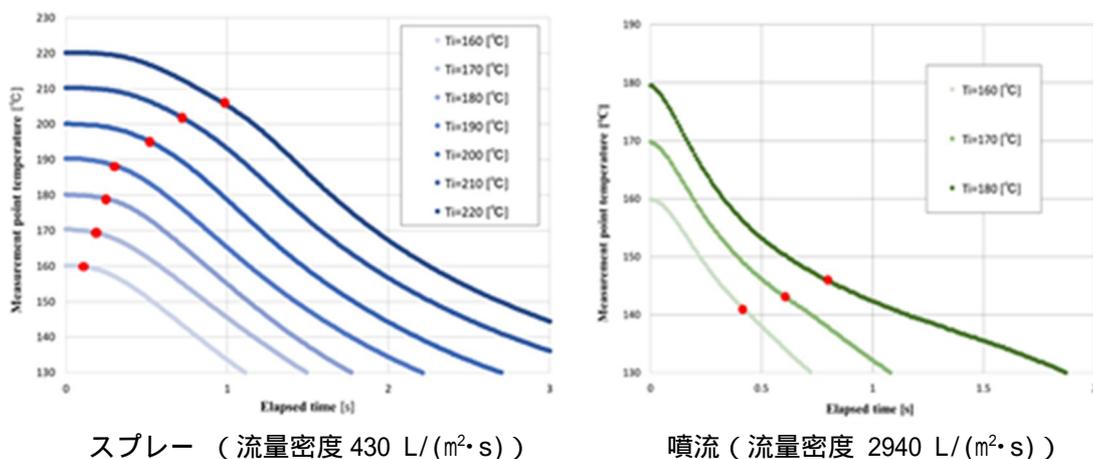


図5. HFE-7100 スプレーまたは噴流実験時の濡れ開始温度

図5左側は、常温の HFE-7100 を矩形小サイズのサファイア面に流量密度  $430\text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$  でスプレーした場合の表面近傍温度の時間変化を、右側は直径  $1.9\text{mm}$  の噴流衝突させた場合(流量密度  $2940\text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ )の表面近傍温度の時間変化を示している。それぞれ冷却開始初期表面温度を数パターン変化させた。図中の赤点は、表面温度箇所近傍に連続的な固液接触(=濡れ)が発生し始めた点を示す。この温度計測は、サファイア板表面から  $0.5\text{mm}$  残して穴空け加工し  $1\text{mm}$  のシーズ熱電対で計測した結果である。左側のスプレー実験結果より、濡れ開始温度は、HFE-7100の自発核生成温度約  $154^\circ\text{C}$  を大きく超え、約  $210^\circ\text{C}$  に漸近する様子が分かる。一方、右側の噴流実験結果は、流量密度は約7倍大きいにも関わらず、濡れ開始温度は  $140\sim 150^\circ\text{C}$  と相対的に低い。図には示さないが、スプレー実験において流量密度を大きくすると濡れ開始温度は高温化する。しかし、図5のようにスプレーと噴流という散布方法の違いにより濡れ開始温度が大きく異なっており、流量密度だけで濡れ開始が定まらないことが分かった。

## (2) 伝熱解析

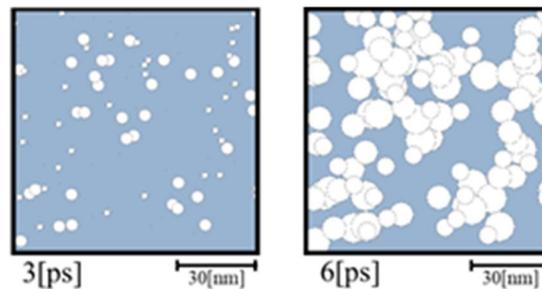


図 6. 自発核生成気泡の生成と成長プロセス

図 6 は、初期温度 1000K の純鉄表面に初期温度 300K の純水が接触した直後に、固体表面上に生成された自発核生成気泡の成長プロセスの一例である。古典的自発核生成理論式に基づき、固液界面近傍の液相内にランダムに自発核生成気泡を生成させ、その成長をモデル計算した。その結果、自発核生成を考慮しない場合の固体側・液体側の非定常熱伝導による温度変化と比べて、図 6 のように自発核生成を考慮した場合には固相の表面近傍の温度分布に大きな差が生じ、自発核生成を伴う気泡生成による界面近傍の伝熱が、固液接触 (=濡れ) 開始条件に大きな影響を及ぼすことが示唆された。今後は、(1)の実験で得られた結果と(2)の伝熱解析結果を照合させることで伝熱解析プログラムを改善させ、汎用的な濡れ開始条件の導出を目指す。

### <参考文献>

- [1] Koshizuka, S., et al., Int. J. Heat and Mass Transfer, 45-13 (2002), pp.2633-2642.
- [2] Dhir, V.K., et al., Trans. ASME, J. Heat Transfer, 128 (2006), pp.1-12.
- [3] Ose, Y. & Kunugi, T., Energy Procedia, 9 (2011), pp.605-618.
- [4] Ohtake, H. et al., Int. J. Heat and Mass Transfer, 36-10 (1993), pp.2541-2552.
- [5] Nagai, N. & Carey, V.P., Thermal Science and Engineering, 10-2 (2002), pp.1-9.
- [6] Nagai, N. & Nishio, S., Experimental Thermal and Fluid Science, 12-3 (1996), pp.373-379.
- [7] 西尾・永井, 日本機械学会論文集(B編), 58-549 (1992), pp.1490-1497.
- [8] Hasan, M.N. et al., Int. J. Heat and Mass Transfer, 54-13 (2011), pp.2837-2843.
- [9] Ohtake, H. et al., Int. J. Heat and Mass Transfer, 47-8 (2004), pp.1965-1977.
- [10] Nagai, N. et al., Proc. Int. Heat Transfer Conf. 15, IHTC15-9140, (2014), pp.1-9.
- [11] Nagai, N. & Okuno, K., Proc. 8th KSME-JSME Thermal and Fluids Eng. Conf., (2012), pp.1-4.
- [12] Nagai, N. & Obe, H., Int. J. Transport Phenomena, 14-4 (2017), pp.307-313.
- [13] Woodfield, P. L. et al., Int. J. Heat and Mass Transfer, 49 (2006), pp.187-197.
- [14] 門出ら, 日本機械学会論文集(B編), 76-770 (2010), pp.140-146.
- [15] Asai, A., ASME J. Heat Transfer, 113-4 (1991), pp.973-979.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0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 Niro Nagai, Shunsuke Hashimoto	4. 巻 USB
2. 論文標題 Initiation Process of Localized Wetting during Spray Cooling near MHF Point	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proc. 9th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference (TFEC9)	6. 最初と最後の頁 pp.1-4
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4件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Ryota Watanabe, Niro Nagai
2. 発表標題 Investigation of Local Wetting Start Condition near MHF Point in Spray Boiling Cooling through Liquid Pool
3. 学会等名 2018 International Symposium on Advanced Mechanical and Power Engineering（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Niro Nagai
2. 発表標題 Introduction of Japanese Boiling Research Activities and Research Summary on Wetting Initiation Condition during Film Boiling near MHF Point
3. 学会等名 2nd International Joint Conference on Advanced Engineering Technology & International Symposium on Advanced Mechanical Engineering and Power Engineering (IJCAET & ISAMPE) 2017（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Niro Nagai
2. 発表標題 What is Wetting Initiation Condition near MHF Point ? -Approaches by Visualization, Measurement and Modeling-
3. 学会等名 The 10th International Conference on Boiling & Condensation Heat Transfer(ICBCHT2018)（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 橋本峻佑 , 渡部綾汰 , 永井二郎 , 大部晴佳
2. 発表標題 液プールを通したスプレー沸騰冷却におけるMHF点近傍での局所的ぬれ開始条件の検討
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部第55期総会・講演会
4. 発表年 2018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