

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月8日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560204

研究課題名（和文）高温面上での固液接触発生時のぬれ開始条件

研究課題名（英文）Study on wetting criterion during liquid-solid contact on hot surface

研究代表者

光武 雄一（MITSUTAKE YUICHI）

佐賀大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号：20253586

研究成果の概要（和文）：

液体による高温面の非定常沸騰冷却中の高温面上のぬれ状態の回復は、高温面の急速冷却開始を決定づける重要な因子である。本研究では、沸点を大きく超える高温金属表面へ液滴を滴下したとき、高々10msの短時間内で生じる非定常沸騰に対応可能な高速応答性に優れた熱伝達測定法を確立した。そして、高速ビデオによる沸騰観察との同期測定によって、固液接触後の急速加熱による蒸気膜形成でぬれ状態の維持が阻害されるまでの非定常伝熱の素過程についての測定データを得た。

研究成果の概要（英文）：

Rewetting on a hot surface is an essential phenomenon governing inception of rapid cooling with boiling heat transfer. A fast response local surface temperature measurement technique has been developed to capture the transient boiling heat transfer during impact of a single ethanol droplet on a hot surface being much higher than the boiling temperature. Typical liquid-solid contact time is below 10 milliseconds. Transient boiling heat transfer processes with/without rewetting phenomenon were elucidated with visual observations by a high speed video camera synchronized with the local heat transfer measurement.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：沸騰熱伝達，非定常遷移沸騰，高速温度測定，ぬれ

1. 研究開始当初の背景

(1) 沸騰曲線による沸騰現象理解

抜山による先駆的な沸騰研究開始以来、沸騰熱伝達は主に沸騰曲線を用いて議論されてきた。しかし、沸騰熱伝達が内包する様々な素過程に起因する非定常性や空間的不均

一性、表面性状の影響を全て含む代表値を示すため、沸騰伝熱の素過程の理解には不十分だと認識されている。そのため、非定常性と空間的な不均一性が強い沸騰熱伝達特性を局所の非定常測定から解明する試みが、沸騰研究初期より幅広く行われている。

(2) 沸騰熱伝達の非定常測定技術

近年 MEMS センサーや IR カメラなどの測定技術がプール核沸騰の非定常局所熱伝達特性計測に適用可能となり大きな成果を上げているが、膜沸騰や遷移沸騰域の測定に限定するとまだ不十分である。すなわち、高過熱度での表面酸化性や高温面上での瞬間的なぬれに対応した熱衝撃など厳しい使用条件のため、耐久性と高い応答性を両立させた表面温度測定センサーの開発が必要である。

(3) 膜沸騰遷移におけるぬれ開始条件

膜沸騰から遷移沸騰域の沸騰冷却は、工業的にもその利用価値が高い。遷移沸騰は、固体側の非定常熱伝導との連成のため強い非定常性を有すると同時に不確定なぬれ現象で特徴づけられる。ぬれ状態の回復によって、膜沸騰からの非定常冷却中の熱伝達率の急増と急冷開始が決定づけられるため、ぬれ回復条件の定式化は重要な課題である。一般に、沸騰曲線上でぬれ回復と対応づけられる極小熱流束点の定式化は、Berenson らの蒸気膜安定理論に基づく熱流束支配型と Spiegler らの液体の過熱限界温度に基づく 2 つの考え方が存在するが、現象論に基づく高温面のぬれ開始条件を明らかにする上で、局所の熱伝達と沸騰状況についての非定常測定データが決定的に不足している。

2. 研究の目的

(1) 高速非定常熱伝達測定技術の開発

膜沸騰から遷移沸騰域をカバーする比較的高い壁面過熱度域で動作可能かつ高温面上で生じるぬれや乾き状態の変動に対応して局所非定常熱伝達が測定可能な計測システムを開発する。

(2) 固液接触後の非定常沸騰現象の把握

液体の過熱限界温度を含む幅広い初期温度範囲に設定した高温面上へ単一液滴を落下させた非定常沸騰実験装置を用いて、突然の固液接触開始後急速加熱を受ける液体の非定常沸騰熱伝達データを取得する。高速ビデオ画像から、時間進行と共に固液接触面上でぬれ面が維持可能な場合と蒸気膜の形成による膜沸騰への遷移でぬれ状態の維持が不可能となる場合について、非定常熱伝

達特性の相違を見出して、ぬれ状態と非ぬれ状態を決定する条件について検討する。

3. 研究の方法

(1) 高速温度計測システムの構築

大気中での高温使用による表面酸化や液滴衝突に伴う急激な温度変化による熱応力に対する耐久性と早い時間応答性を両立させた固体表面温度測定センサーを設計し、製作する。センサーの周波数応答の目標は 100 kHz (100 μ s) で、高温面上に複数の測温点を作成して表面上の温度分布を取得可能とする。さらに、熱伝導逆問題解析手法に基づく、熱流束推定方法を確立し、温度センサーで取得した温度変化から局所の非定常熱伝達を評価できるようにする。

(2) 高温面上への液滴衝突実験

伝熱面上に設置した高速応答熱電対の出力を広帯域アンプ、高速サンプリング A/D 変換器と組み合わせて最大 1 MHz の高速温度収録装置を構成する。沸騰状況と表面のぬれ・乾き状態は、長い作動距離を有する顕微鏡と高速ビデオを組み合わせた光学系を用いて観察を行う。

サブクール度 33K, 40K, 53K, 衝突速度 1.2m/s, 1.7m/s, 2.0m/s, 直径 4mm の単一エタノール液滴を測温点上に滴下して高温面上での非定常沸騰過程の観察と測定を行う。高温面の初期温度は、大気圧下のエタノールの自発核生成温度 197°C を含む 160°C ~ 250°C までの温度範囲で 5K おきに設定して実験を行う。

(3) ぬれ開始条件の検討

高温面上に単一液滴を滴下した時、液滴が高温面上に滞在する高々 10ms の非定常沸騰現象に注目する。液滴のサブクール度と衝突速度、高温面の初期温度の組み合わせに対して、液滴滞在時間中の沸騰過程を①固液接触面全体が蒸気膜で覆われた膜沸騰状態に移行して乾き面となる場合、②固液接触面上が遷移沸騰状態に移行して、ぬれ状態と非ぬれ状態が共存する場合、③固液接触面全体で核沸騰を生じて、定常的なぬれ状態が保たれる場合の 3 つに分類する。

そして、上記①に対応する初期のぬれ状態

の高温面が非定常沸騰により定常的な膜沸騰へ遷移し、非ぬれ状態へ移行する過程を詳細に調べる。具体的には、特性時間となる膜沸騰遷移時間 t_{film} を沸騰状況高速撮影画像から取得し、その間の表面温度と表面熱流束変化の測定値に基づき、膜沸騰への遷移に必要な表面温度、膜沸騰遷移時間内の固体側から液体側への積算熱流束の条件を検討した。

4. 研究成果

(1) 高速温度計測システム

図1に試作した高速表面温度測定用伝熱面を示す。熱電対は、φ50 mm x 5 mm のNi円板表面に放電細穴加工法を用いて垂直に加工された細孔内に SiO₂ の絶縁被膜を付けた0.32mmのクロメル線を挿入・固定し、端面を伝熱面と面一になるまで研磨仕上げした後、厚さ3 μmの無電解ニッケルメッキを伝熱面上全体に施して表面直下の3 μmにクロメル-ニッケルの測温点を多数形成した。

図2は、非沸騰条件下で測温点上への液滴滴下時の非定常温度変化を示し、ノイズ除去のローパスフィルター(LPF)のカットオフ周波数 f_c の設定の効果を比較したものである。時刻基準0は測温点上での固液接触時刻である。図2より、 $f_c = 100$ kHzでノイズレベルは

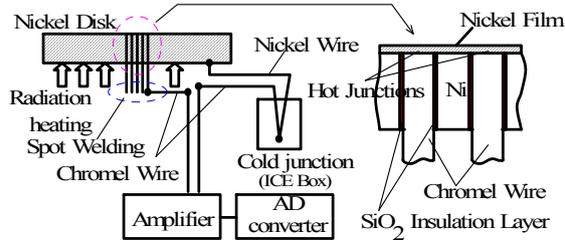


図1 高温面高速温度計測システム

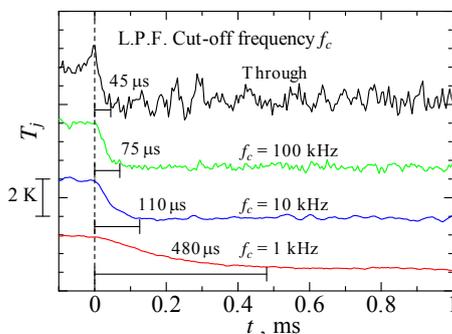


図2 固液接触時の測温点の温度応答 (非沸騰条件 $T_{so} = 68^\circ\text{C}$, $T_l = 25^\circ\text{C}$)

十分除去され、その時のステップ状の温度指示値の応答時間遅れは 70 μs であり目標の応答周波数 100 kHz (=100 μs) 程度の性能を確認した。また、表面温度と表面熱流束については、既に報告した一次元半無限体熱伝導逆問題解析法の推定精度の大幅な改善手法を提案し、後で示す固液接触状態の変化に基づく不規則な温度変動に対しても逆問題解析解は不安定化することなく高精度で表面熱流束を推定可能とした。

(2) 高速撮影画像と温度計測結果

図3,4,5にそれぞれ代表的な高温面上での液滴衝突時に出現する沸騰状況写真と同期測定された測温点温度 T_j と逆問題解析で評価された表面温度 T_w と表面熱流束 q_w の時間変化のグラフを示す。なお、図3は液滴滞在中に遷移沸騰域に留まる先に述べた②の条件、図4,5はいずれも膜沸騰へ遷移する①の条件に対応するものである。

各グラフ上の T_w の温度変化の曲線上の括弧付きアルファベットは、対応する時刻の写真のアルファベット記号を示す。図中赤丸で

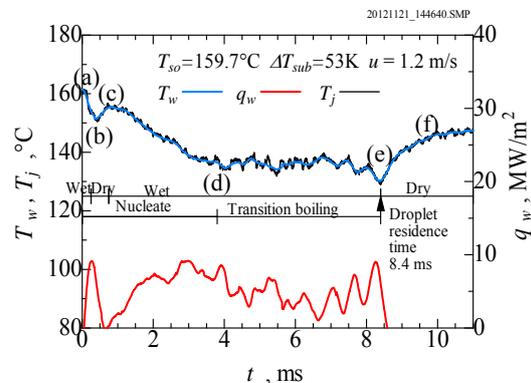
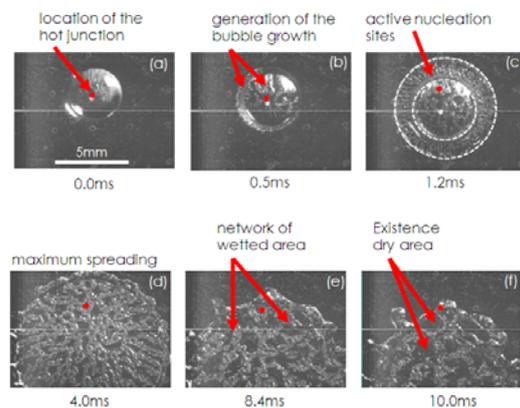


図3 $T_{so} = 160^\circ\text{C}$, $\Delta T_{sub} = 53$ K, $u = 1.2$ m/s における固液接触状況と表面温度表面熱流束変化 (遷移沸騰域)

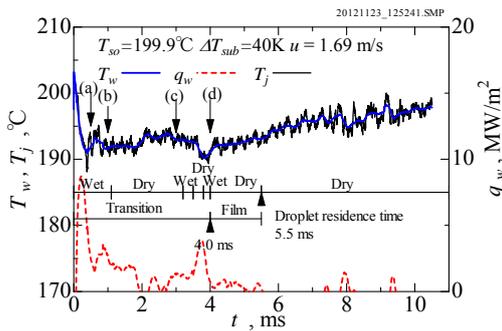
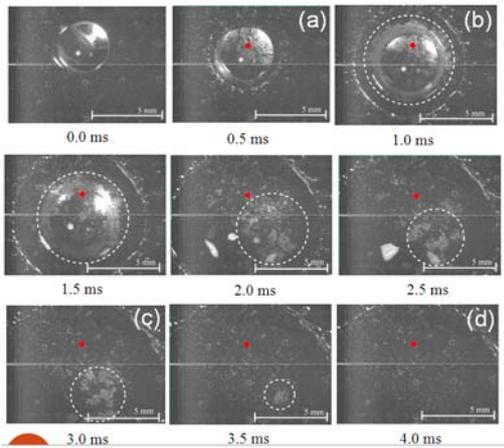


図4 $T_{so} = 200^\circ\text{C}$, $\Delta T_{sub} = 40\text{ K}$, $u = 1.7\text{ m/s}$ における固液接触状況と表面温度表面熱流束変化 (遷移沸騰から膜沸騰への遷移域)

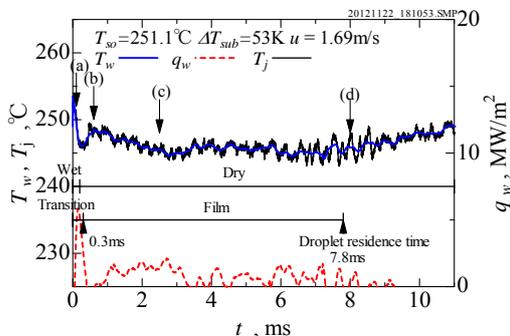
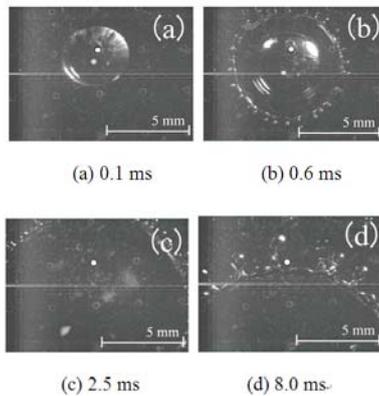


図5 $T_{so} = 251^\circ\text{C}$, $\Delta T_{sub} = 53\text{ K}$, $u = 1.7\text{ m/s}$ における固液接触状況と表面温度表面熱流束変化 (固液接触とほぼ同時に膜沸騰遷移)

示す位置は、測温点位置を示す。グラフ中の Wet の時間範囲は、測温点上で核沸騰を生じて表面が固液接触でぬらされた状態を、Dry の時間範囲は測温点上で安定な蒸気膜で覆われ、核沸騰が生じていない状態をそれぞれ示す。また、Nucleate, Transition および Film boiling の各時間範囲は、液滴と壁面の接触面全体で固液接触による核沸騰、一次気泡の合体による合体泡下に乾き面が観察される遷移沸騰域、安定な蒸気膜で覆われた膜沸騰領域をそれぞれ示す。遷移沸騰域の写真上には、核沸騰が生じている範囲を白点線で囲んで示した。

図3は、高温面初期温度 T_{so} がエタノールの液過熱限界温度 196°C 以下となる 160°C に対するもので、沸騰状況写真から明らかなように液滴滞在期間内で遷移沸騰が維持され、測温点上の q_w は 1 MW/m^2 のオーダーの高い値を示し、ぬれ状態が維持されている。

一方、図4,5は、液滴滞在中に膜沸騰への遷移が生じる条件であり、液過熱限界温度を超えて T_{so} 高くなる程より短時間で膜沸騰へ遷移することが分かる。膜沸騰へ遷移後の q_w は 0.1 MW/m^2 のオーダーに急減して、 T_w は温度降下が非常に緩やかとなって、ほぼ一定値或いは復熱を開始する場合もある。また、図4,5のグラフから、たとえ固液界面の T_w の温度が液過熱限界を超える温度域でも、固液接触開始直後の短時間内は高温面をぬれ状態が維持され、通常の核沸騰伝熱が生じていることを確認した。

(3) 膜沸騰遷移時間遅れ t_{film}

図6に膜沸騰遷移の特性時間として、高温面上での液滴滞在時間中に固液接触面が非常沸騰で膜沸騰へ遷移するまでに要する膜沸騰遷移時間遅れ t_{film} を初期壁面温度 T_{so} で整理した結果の一例を示す。図中シンボルは液サブクール度 ΔT_{sub} 毎の分類を示す。また、↓で示される T_{so} は、各 ΔT_{sub} に対して膜沸騰への遷移が観測される下限温度を示す。この下限温度は、エタノールの液過熱限界温度付近に存在し、 ΔT_{sub} の増加とともに高過熱度側に偏倚することが分かる。

図6より、 t_{film} は T_{so} の上昇と共に単調に減

少し、 $T_{so} > 240^\circ\text{C}$ の高温域では T_{so} に関わらず t_{film} は100 μs のオーダー以下の値を示すようになる。このため、自発核生成による蒸気生成により膜沸騰上に遷移するものと考えられる。

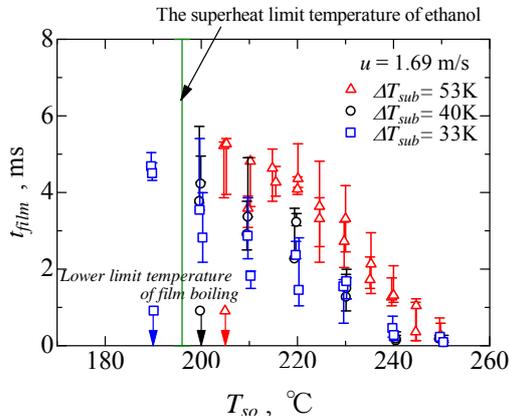


図6 膜沸騰遷移遅れ時間 t_{film} と初期温度 T_{so} との関係(サブクール度の影響)

(4) 膜沸騰遷移時の表面温度 $T_{w,film}$

膜沸騰遷移時刻 $t = t_{film}$ での表面温度 T_w を膜沸騰遷移時の表面温度 $T_{w,film}$ と定義する。

図7に $T_{w,film}$ を T_{so} で整理した結果の一例を示す。図中、破線の直線は半無限体の固液が突然接触したときの界面温度の厳密解を示す。図7より $T_{w,film}$ は液滴衝突速度が大きくなるに従って $T_{w,film}$ の下限温度が液過熱限界温度を超えて高温側にシフトする傾向を示す。しかし、 $T_{w,film}$ はほぼ固液接触界面の熱伝導の厳密解温度より約20 K低い、 T_{so} に対する傾向と良く一致することが分かる。

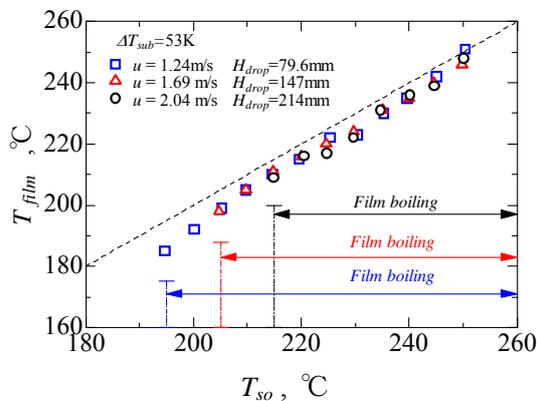


図7 膜沸騰遷移遅れ時間 t_{film} (サブクール度の影響)

(5) 液相温度境界層内単位体積当たりのエネルギー積算値 $Q_{w,film}$

先に示した実験観測結果からエタノールの過熱限界温度を大幅に超える 250°C までの T_{so} の範囲でも短い t_{film} の時間内固液接触のぬれ状態が維持され、この間の液側の急速加熱で生じた蒸気膜により膜沸騰へ移行し、最終的に非ぬれ状態に至ることが分かっている。

そこで、 t_{film} の時間内に固体側から液体側への伝熱量について検討するため、式(1)で示される液相側の単位体積当たりのエネルギー積算値を評価した。式(1)は、表面熱流束 q_w を $t=0$ から t_{film} まで積分して評価した積算熱流束を液相の温度浸透深さ δ_t で除して $Q_{w,film}$ を求めている。つまり、 $Q_{w,film}$ は固液接触後固体側からの急速加熱で液体側の温度境界層内に蓄積された単位体積当たりのエネルギー積算値を示す。

図8に $Q_{w,film}$ を T_{so} で整理した結果の一例を示す。図8より膜沸騰遷移に必要な $Q_{w,film}$ についての定性的な傾向は見出すことができなかった。図4,5に示されるように、液滴衝突時の固液界面の拡大に伴って表面上の沸騰状況が不均一となるため、今後、非定常熱伝達を評価する測温点数を増やして $Q_{w,film}$ の評価精度を向上させる必要がある。

$$Q_{w,film} = \int_0^{t_{film}} q_w(t) dt / \delta_t(t_{film}) \quad [\text{MJ}/\text{m}^3] \quad (1)$$

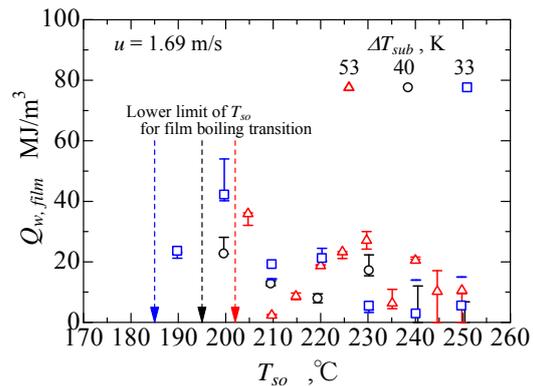


図8 固液接触開始から膜沸騰遷移までの積算熱流束の評価結果の一例

(6) まとめ

高温面上での固液接触時の非定常沸騰過程を評価するための実験ツールとしてニッ

ケル伝熱面上にクロメル細線+Ni 薄膜の高速応答性と耐久性に優れた表面温度測定システムを構築した。液滴衝突実験系においては、従来高速ビデオカメラによる観察が主体であったが今回非定常変化中の金属伝熱面表面上での非定常沸騰熱伝達のデータを取得できた。

一方、ぬれ開始条件の定式化の手がかりとして、高温面上で瞬間的な固液接触直後のぬれ状態が t_{film} の短時間を経て膜沸騰へ遷移可能か否かが決まっており、固液接触開始初期の非定常伝熱がぬれ状態維持に非常に重要であることが分かった。今後、高温面上に作成した多数の測温点の温度履歴を同時測定して液滴下の固液接触面上の分布データに基づく検討を進めていきたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

Mozumder Alok Kumar, Mitsutake Y., Monde M., Experimental Study of Heat Transfer for a Rotating Cylinder Water Jet Impingement Quenching, Journal of Energy and Power Engineering, Vol.7, No.3, (2013), pp.411-422. 査読有

〔学会発表〕(計9件)

①Illius S. 門 顕龍, 中野僚将, 光武雄一, 門出政則, 高温面上への液滴衝突時の表面温度と表面熱流束の測定と観察, 第50回日本伝熱シンポジウム講演論文集, Vol.1, (2013), pp. 110-111. 2013.5.29-31 仙台市

②Mozumder A. K., Mitsutake Y., Monde M., Cooling propagation and its effectiveness for a rotating cylinder jet Quenching, Proceedings of the 3rd International Forum on Heat Transfer, pp.1-6, 2012.11.13-15,長崎市

③Mitsutake Y., Illius S., Mozumder A.K., Monde M., Measurement and Observation of Transient Boiling Phenomena during Sudden Contact of Ethanol Droplet with Hot Surface, Proceedings of 4th Asian Joint Workshop on Thermophysics and Fluid Science, Busan, pp.1-10. 2012.10.15

④Mitsutake Y., Mozumder A., K., Monde M., Saitoh T., Measurement and Observation of Transient Boiling Phenomena during Sudden Contact of Ethanol Droplet with Hot Surface, Proceedings of ECI-8th Boiling and Condensation, Lausanne (Swiss)2012.6.3-7

⑤Mozumder A. K., Mitsutake Y., Monde M. Experimental Investigation of Heat Transfer for a Rotating Cylinder during Subcooled Water Jet Impingement Quenching, Proceedings of ECI-8th Boiling and Condensation, Lausanne,(Swiss) 2012.6.3-7.

⑥光武雄一, イリアス スーハイミ, モズミデル アロケ, 門出 政則, 高温面上への液滴衝突時の非定常沸騰中表面温度と表面熱流束の計測, 第49回日本伝熱シンポジウム講演論文集 VOL.1, pp.9-10, 2012.5.30-6.1 富山市

⑦光武雄一, 門出政則, 濱本清志, 高温面上への液滴衝突時の非定常沸騰現象, 日本機械学会熱工学コンファレンス講演論文集, pp. 199-200. 2011.10.29 静岡大学

⑧光武雄一, 齋藤孝雄, 門出政則, 呉雪松, 高温面上への液滴衝突時の非定常沸騰—高速応答性を有する表面温度計の試作—, 第48回日本伝熱シンポジウム講演論文集, Vol.3, pp.575-576. 2011.6.3 岡山コンベンションセンター

⑨光武雄一, 門出政則, 西田拓弥, 高温面上への液滴衝突時の急速蒸気生成過程, 第47回日本伝熱シンポジウム講演論文集, Vol.1, pp.183-184. 2010.5.26-28 札幌コンベンションセンター

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

光武 雄一 (MITSUTAKE YUICHI)

佐賀大学・工学系研究科・教授

研究者番号：20253586

(2)研究分担者

該当者なし

(3)連携研究者

該当者なし