

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 10 月 21 日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420165

研究課題名(和文)高温面スプレー冷却中の非定常遷移沸騰の素過程モデルの構築

研究課題名(英文)Fundamental transition boiling heat transfer during spray cooling

研究代表者

光武 雄一 (Mitsutake, Yuichi)

佐賀大学・海洋エネルギー研究センター・教授

研究者番号：20253586

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

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、高温面スプレー冷却の素過程を理解するため、スプレー冷却を模擬した高温面上での液滴列非定常沸騰実験装置を開発した。そして、高速ビデオカメラによる観察と応答時間0.07msの表面温度計を用いて、膜沸騰から遷移沸騰を経てクエンチに至る非定常沸騰遷移過程について、エタノール・水を用いて広範囲のサブクール度、高温面初期温度に対して実験を行なった。高温面のぬれを支配する支配パラメータとして、固液接触から蒸気膜生成時間の特性について検討を行った。

研究成果の概要(英文)：Rewetting on a hot surface is an essential phenomenon governing inception of rapid cooling during transient cooling with boiling heat transfer.

This study was conducted to elucidate rewetting phenomena during spray quenching. An experimental apparatus to evaluate fundamental transition boiling phenomena simulated with boiling of single or multiple sessile droplets on a hot nickel surface. High speed video imaging technology and fast response surface temperature measurement techniques were applied. As a governing parameter of the wetting phenomena, vapor generation time delay after sudden contact of liquid and solid surface was characterized.

研究分野：熱工学

キーワード：遷移沸騰 高温面上のぬれ 非定常熱伝導 液滴

1. 研究開始当初の背景

(1) 非定常沸騰熱伝達の測定技術

沸騰伝熱研究への MEMS センサーや IR カメラなどの温度計測技術の適用が進んでいるが、一般的な金属表面上において自発核生成温度を超える膜沸騰や遷移沸騰の温度域での計測には不適合である。一方、過去の研究課題(基盤(C) 22560204)で表面酸化や急冷に伴う熱衝撃に対して十分な耐久性と応答時間遅れ 70 μ s の高速応答性を両立させた Cr-Ni 薄膜熱電対を Ni 円板上に多数形成した高温伝熱面を開発し、遷移沸騰実験への適用を行った。

(2) スプレーエンチでのぬれ開始条件

高温面のスプレー冷却は、材料製造プロセスやシビアアクシデント時の緊急冷却などの幅広い工業分野で利用される。近年、自動車用高張力鋼板などの高付加価値熱間圧延鋼板の製造プロセスでは、圧延終了後の急速冷却における冷却終了温度制御の精度向上の要求が高まっている。飽和温度を遥かに超える高温面の液体冷却では、高温面のぬれ回復によって膜沸騰から核沸騰へ移行する遷移沸騰領域が含まれ、ぬれ回復により熱伝達率が 1 ~ 2 桁増大して冷却速度が増大するクエンチが生じる。このため、遷移沸騰域でのぬれ回復条件の定式化は、高温面冷却特性の予測・制御に不可欠となるが、固体側の非定常熱伝導と連成した強い非定常性、さらには評価困難な表面ぬれ性のため、重要な課題のまま取り残された状態にある。

2. 研究の目的

(1) 非定常熱伝達測定技術の開発

高温面のスプレー冷却中の非定常遷移沸騰の素過程を模擬するため、液滴列が高温面上に衝突する状況下での沸騰状況観察と局所非定常熱伝達の計測装置を構築する。

(2) 液滴列衝突面上の非定常沸騰現象の把握

自発核生成温度を含む幅広い初期温度範囲の高温面上へ液滴が繰り返し衝突する状況下での非定常沸騰実験によって、安定な固液接触が生じない膜沸騰状態から冷却の進行に伴う局所表面温度、表面熱流束変化データを取得する。併せて固液接触面での液体の急速加熱に伴う蒸気生成と高温面上でのぬれ状態を観察する。そして、冷却の進行に伴い固液接触が蒸気膜で断たれた膜沸騰状態から遷移沸騰の開始に伴う高温面のぬれ開始

条件を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 液滴列沸騰実験装置の構築

液滴 1 個が高温面に衝突したときの除熱量が計測可能レベルとなるよう数 mm 程度の比較的大きな液滴列を高温面上に供給する制御方法を検討する。伝熱面として厚さ 5 mm の Ni 表面から 3 μ m の深さに熱電対の測温点を格子状に配列し、逆問題解析により液滴直下の局所の表面温度・表面熱流束の評価手法を確立する。作製した試験伝熱面を液滴列供給装置、高速ビデオカメラと顕微鏡による沸騰状況観察装置と高速温度計測器と組み合わせることにより、液滴列の非定常遷移沸騰実験装置を構築する。

(2) 高温面上への液滴列衝突実験

開発した高温面液滴列衝突実験装置を用いて、Ni 高温面への液滴列衝突実験を行う。試験流体は、エタノール、水、FC-72 を用いて液サブクール度が 30 K ~ 60 K の範囲で直径 3mm 程度の液滴列を衝突頻度と衝突速度を制御する。高温面の初期温度は、大気圧下のエタノール、水に対する自発核生成温度 197 , 300 , 134 を含む上下 50K の温度範囲で実験を行う。

(3) ぬれ開始条件の検討

高温面への液滴衝突毎の高々数 ms の間の液滴の非定常沸騰過程に注目し、表面温度・表面熱流束変化に基づいた局所のぬれとかわき状態の時間割合の評価、光学観察結果による液膜直下全体のぬれ状態に基づく沸騰様式の判定、を行い、高温面上での安定なぬれ面が形成されて急冷(クエンチ)が生じる熱的境界条件について明らかにする。さらに、固液の連成熱伝達の観点より、ぬれ開始条件の支配因子について、検討する。

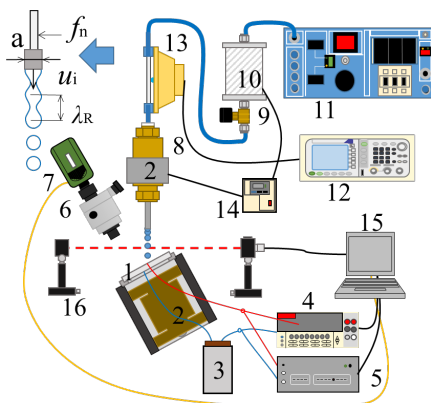
4. 研究成果

(1) 液滴列非定常沸騰評価装置の開発

図 1.2 にそれぞれ液滴列実験装置全体と Ni 高温面の測温位置を示す。図 1 において液滴列は、一定圧で空気加圧した液タンク 10 より試験流体を内径 1 乃至 2 mm のノズル 8 から噴出させた円形ジェットが Plateau-Rayleigh 不安定による液滴列への分断により生成させた。液柱の不安定波長と噴流速度に応じた周波数の圧力変動を印加して分裂を

促進して安定化させた．一般的な圧電素子などによる液滴生成法より大きな 3 mm 程度の液滴生成が可能で，基本周波数 280 Hz の 2, 3 次高調波まで液滴列生成を確認した．しかし，一定間隔の液滴列生成が可能なノズル出口速度や液サブクール度の範囲が非常に狭く，衝突速度 4 m/s での滴衝突頻度は，エタノール：280 ~ 840 Hz，水：580 Hz であった．

図 2 に示される直径 50 mm 厚さ 5 mm の Ni 円板の試験伝熱面の中心部に 2.5 mm 間隔で 3x3 の 9 箇所に Cr-Ni 熱電対を作製し $j_1 \sim j_3$ で図示した 3 か所の代表測温点で同時温度計測を実施した．液滴衝突点が j_1 の位置にノズル位置を調節してある．



1. Nickel hot disk 2. Heater 3. Ice box 4. Data logger 5. Isolation DC amplifier 6. Microscope 7. High speed camera 8. nozzle 9. Solenoid valve 10. Liquid Tank 11. Pressure regulator 12. Function generator 13. Moving coil 14. Thermostat 15. PC 16. Photo detector

図 1 液滴列沸騰実験システム

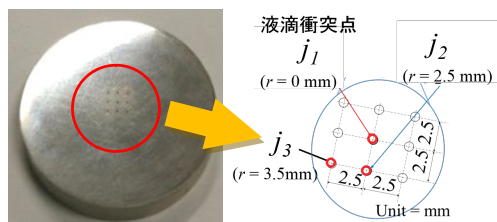


図 2 Ni 試験伝熱面と測温位置

(2) 単一液滴衝突実験

無限間隔の液滴列に対応する単一液滴衝突時の高温面上での非定常沸騰実験を先行して実施した．図 3, 4 にそれぞれエタノール液滴が初期温度 $T_{s0} = 180, 223$ の高温面に衝突したときの j_1 測温点（衝突点直下）温度履歴 T_j と逆問題解析による表面温度 T_w と表面熱流束 q_w の時間変化，およびグラフ中の (a) ~ (d) の矢印の各時刻での沸騰状況を一例として示す．時刻 0 は， j_1 測温点への液滴衝突

時刻に対応する．図中 Wet/Dry の時間範囲は，それぞれ j_1 近傍で核沸騰を生じるぬれ状態と蒸気膜で覆われた乾き状態を q_w の変化と観察結果に基づき判定したものである．また，NB, TB, FB の各時間範囲は，液滴下の高温面上の沸騰様式の分類を示し，それぞれ高温面全体が安定なぬれ状態となる核沸騰，部分的なぬれと乾き状態が共存する遷移沸騰，高温面全体が蒸気膜で覆われた乾き面となる膜沸騰状態を示す． T_i で示す一点鎖線は，半無限体の固液の接触後の固液界面温度の非定常熱伝導厳密解を示す．

初期温度 T_{s0} がエタノールの自発核生成温度 $T_{sp} = 197$ より 15 K 低い図 3 では，衝突開始より核沸騰を生じるぬれ状態が維持され q_w の上昇と T_w の降下を示す．そして，一時的な乾き状態とぬれ回復に伴う不規則な T_w と q_w の変動を示す遷移沸騰域を経て，1.82 ms 以降乾き面上が安定な蒸気膜で覆われた膜沸騰状態へ移行する．膜沸騰域で q_w はほぼ 0 を示し， T_w は温度回復を開始する．その後，液膜の破断による Dry patch を生じて高温面上で小液滴に分裂した，一方， T_{s0} が T_{sp} より約 27 K 高い図 4 では，図 3 と同様に固液接触開始後に温度降下を開始する．しかし， T_w が T_{sp} を超えているため，不規則なぬれと乾きに伴う T_w や q_w の変動を伴わず，急速な蒸気生成により接触開始後 34 μ s の短時間で安定な膜沸騰状態への移行が完了する．

図 3, 4 の例より，たとえ T_{sp} を超える表面であっても固液接触直後の短時間はぬれ状態が維持される．接触界面での蒸気生成で形成された蒸気膜下の液が Dryout して膜沸騰状態への移行が完了することが分かる．

次に，高速ビデオ観察に基づき膜沸騰への完了に要する蒸気膜生成時間 t_{film} と高温面上の液滴の液膜破断時間 t_{break} を評価した．図 5 にエタノールと水の単一液滴に対する t_{film} と t_{break} を初期温度 T_{s0} で整理した結果を示す．図 5(a) のエタノールの結果に注目すると， T_{s0} が T_{sp} を超えて上昇するに従い，蒸気膜生成時間 t_{film} は液サブクール度 ΔT_{sub} に関わりなく減少し，ある一定値に漸近する．一方，図中矢印で示される蒸気膜生成下限温度 T_{LF} まで T_{s0} が低下するに従い t_{film} は単調増加し，膜沸騰への遷移が観察された．しかし， $T_{s0} < T_{LF}$ の範囲では，液膜の破断が生じて乾き面となる． T_{LF} は T_{sp} に対して 10 ~ 30 K 程度低く， ΔT_{sub}

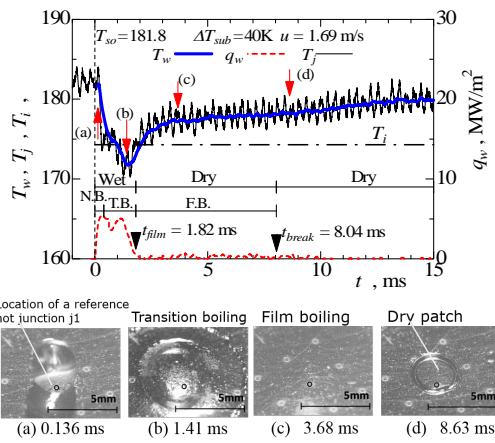


図3 エタノール単一液滴衝突実験結果
 $T_{s0} = 181.8$, $\Delta T_{sub} = 40$ K, $u = 1.7$ m/s

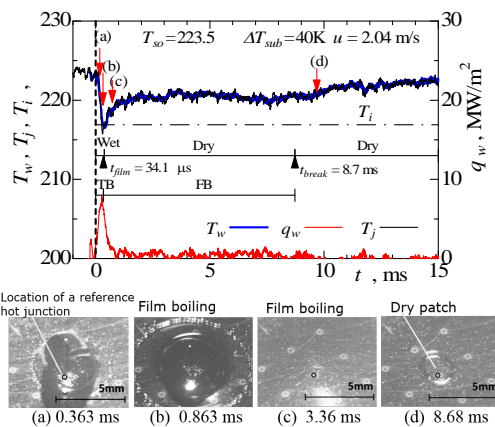
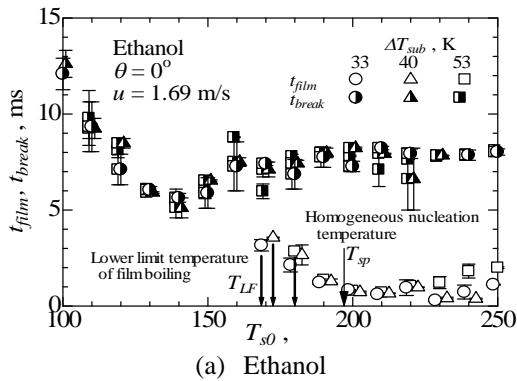
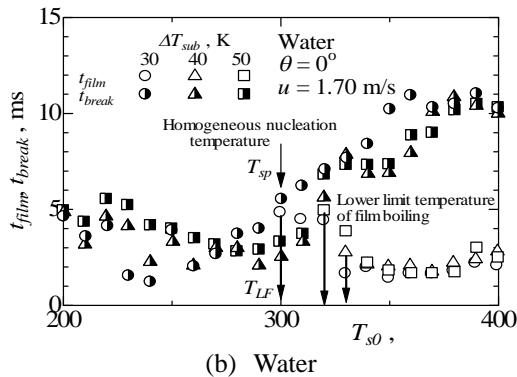


図4 エタノール単一液滴衝突実験結果
 $T_{s0} = 223.5$, $\Delta T_{sub} = 40$ K, $u = 2$ m/s



(a) Ethanol



(b) Water

図5 蒸気膜生成時間 t_{film} , 液膜破断時刻 t_{break} と高温面初期温度 T_{s0} との関係

の増加と伴に高くなる事が分かる。

一方、図5(b)で示される水の場合についても、エタノールの結果とほぼ同様である。ただし、水に対する T_{LF} はいずれの ΔT_{sub} に対しても T_{sp} より高い温度を示し、 t_{film} の時間スケールは、エタノールの約2倍となっている事が分かる。

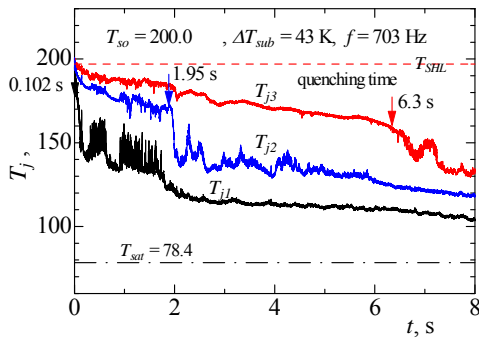
(3) 液滴列衝突実験

図6に液滴列衝突実験結果の一例として、直径 $\phi 2.5$ mm, $\Delta T_{sub} = 43$ K のエタノール液滴が初期温度 200 のNi高温面上に平均液滴衝突頻度 $f = 703$ Hz, $u = 4.2$ m/s で衝突したときの測温点 j_1, j_2, j_3 (図2参照) での温度履歴を示す。図6(a),(b)はそれぞれ時間スケールを変えて示した同一結果である。図6(b)のパルス信号列は、光センサーで検知した衝突液滴の通過信号を示す。

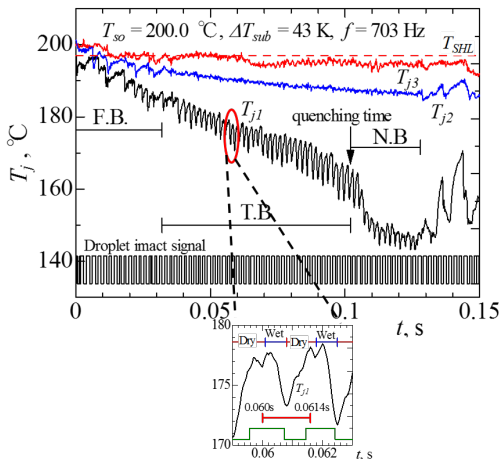
図6(a)より液滴列による冷却は、スプレーや噴流で得られる一般的なクエンチ冷却と同様の冷却曲線が得られる事が分かる。つまり、冷却開始直後からの緩やかな冷却速度で特徴づけられる膜沸騰域、部分的なぬれ回復が生じる遷移沸騰域で冷却速度が緩やかに増加し、定常的なぬれ開始に伴う急冷が生じて、核沸騰に至り再び緩やかな冷却速度を示す。なお、液滴衝突点 j_1 と j_1 からそれぞれ 2.5, 3.5 mm 離れた j_2, j_3 では、矢印で示す急冷開始時刻に大きな差が存在し、高温面上では不均一な温度分布が生じる事が分かる。この時間差は、 j_1 付近で生じるぬれ面が周辺の測温点位置まで拡大成長するまでに時間を要するためである。

時間軸を拡大した図6(b)のグラフ上での j_1 の温度履歴に注目する。冷却開始直後の膜沸騰域での不規則な温度変動は、0.03 s 以降の遷移沸騰域では液滴衝突周期と同期した温度降下と温度回復に伴う周期的な温度変化を示す。温度振幅は時間と共に大きくなり、0.102 s で急冷を開始して核沸騰域に遷移した後、再び温度振幅は小さくなる。

図6(b)に示す遷移沸騰域の 0.06 s ~ 0.0614 s での温度変動と同時撮影された 20 μ s 毎の沸騰状況を図7に示す。沸騰状況と温度変動との対応から、衝突直後(0.0602 - 0.0604 s)の高温面を覆う液膜下に衝突点近傍に濃い水色で図示した一時的なぬれ面が存在し、その間 j_1 での温度降下を生じる。その後(0.0606 s 以降)、ぬれ面は消失して液膜下全面が蒸気膜で



(a) 全時間範囲($t = 0 - 8$ s)



(b) 時間軸拡大図($t = 0 - 0.15$ s)

図6 エタノール液滴列衝突時の測温点 j1, j2, j3 の温度履歴の一例($f = 703$ Hz, $T_{s0} = 200$, $\Delta T_{sub} = 43$ K, $u = 4.2$ m/s)

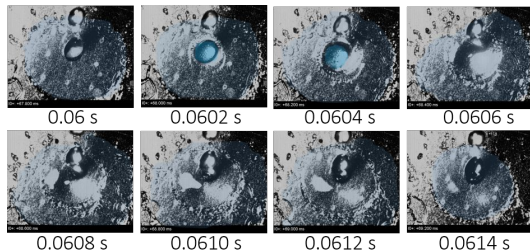


図7 エタノール液滴列衝突時の沸騰状況

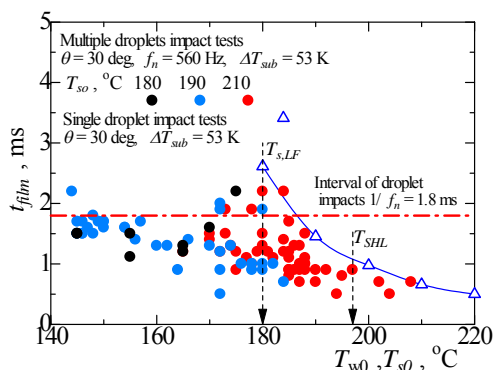


図8 液滴列衝突時の蒸気膜生成時間と壁面温度との関係

覆われた乾き面へ移行し、次の液滴衝突でぬれ面が形成されるまで温度回復する。遷移沸

騰域では、冷却の進行に伴い衝突点近傍でのぬれ状態の継続時間、つまり蒸気膜生成時間が長くなるため、温度降下幅が増大し、温度変動の振幅が増大することが分かる。

そこで、液滴衝突点での定常的なぬれ状態を支配する衝突液滴毎の蒸気膜生成時間について検討した。一例として、冷却開始時の高温面温度 $T_{s0} = 180 \sim 210$, $\Delta T_{sub} = 43$ K のエタノール液滴の衝突頻度 560 Hz に対して衝突液滴毎に評価した t_{film} を衝突直前の表面温度 T_{w0} で整理した結果を図8に示す。図中には、衝突周期に対応する単一液滴実験で得られた t_{film} と T_{s0} との関係を再録した。

図8より、冷却中の同一表面温度に対する t_{film} は、高温面の初期温度 T_{s0} の上昇と共に長くなる傾向を示し、単一液滴に対する t_{film} の傾向に漸近することが分かる。液滴列の t_{film} が液滴衝突周期に達する表面温度は、高温面の初期温度が高くなるに従い 145 から 175 の範囲で高温側にシフトすることが分かる。液滴衝突周期が液膜破断時間より短いため、液膜破断前に次の液滴で高温面上が覆われるため、液滴列に対する t_{film} は、単一液滴での蒸気膜生成下限温度 T_{LF} 以下の温度範囲までその存在範囲が広がる事が分かる。

なお、液滴列衝突実験において、高温面上でのぬれ状態の継続時間を支配する t_{film} の特性について、現在間欠的な固液接触による固体側の非定常熱伝導による定量的評価の検討を進めているところであり、今後の検討課題である。

(4) まとめ

高温面上でのスプレー冷却を模擬した液滴列非定常沸騰評価装置を開発し、液滴列固液接触時の遷移沸騰過程について、高速ビデオカメラによる沸騰状況観察と表面温度計測を実施した。高温面上での液滴列の非定常沸騰におけるぬれを回復を支配する因子として蒸気膜生成時間の特性について、検討した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計4件)

1) A.K. Mozumder, **Y. Mitsutake**, M. Monde, Subcooled water jet quenching phenomena for a high temperature rotating cylinder, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.68(2014), pp.466-478.

2) S. Illius, M. N. Hasan, **Y. Mitsutake**, M. Monde, Generation Time of Stable Vapor Film during Impact of a Droplet on Hot Surface, Thermal Science and Engineering, Vol.22(2)2014, pp.21-31.

3) **Y. Mitsutake**, S. Illias, K. Tsubaki, M. N. Hasan, M. Monde, Measurement and Observation of Elementary Transition Boiling Process after Sudden Contact of Liquid with Hot Surface, Procedia Engineering, Vol.105(2015), pp.5-21.

4) H. Soejima, **Y. Mitsutake**, S. Illias, K. Tsubaki, M. Monde, Application of the Spray Quenching to T6 Heat Treatment of Thick A6061 Hollow Cylinders, Procedia Engineering, Vol.105(2015), pp.776-786.

〔学会発表〕(計 8 件)

1) スハイミ イリヤス, 門 顕龍, 中野僚将, **光武雄一**, 門出政則, Visual studies and measurement of surface temperature and surface heat flux during impact of a droplet on hot surface, 第 50 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, Vol.1, (2013), pp.110-111.

2) スハイミ イリヤス, 小島悠平, 古藤愛美, 福島慎平, 山下義仁, **光武雄一**, 門出政則, Experimental study of generation time of stable vapor film during impact of a single and multiple droplet on hot surface, 第 51 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (2014), A113 (CD-ROM).

3) S. ILLIAS, S. FUKUSHIMA, H. SOEJIMA, **Y. MITSUTAKE**, M. MONDE, Experimental studies and investigation of wetting temperature shift during Multiple Droplets Impact on Hot Inclined Surface, Proceedings of 5th Asian Joint Workshop on Thermophysics and Fluid Science, (2014).

4) S. Illius, M. N. Hasan, **Y. Mitsutake**, M. Monde, High speed observation and measurement of surface temperature and surface heat flux during impact of a droplet on hot surface, Proceedings of the 15th International Heat Transfer Conference, IHTC-15, (2014.8, Kyoto).

5) **光武雄一**, スハイミ イリヤス, 小島悠平, 古藤愛美, 門出政則, 高温面上への液滴列衝突時の非定常遷移沸騰過程, 日本機械学会第 19 回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集, (2014), pp.357-385.

6) **Y. Mitsutake**, S. Illius, K. Tsubaki, M. N. Hasan, M. MONDE, Measurement and observation of elementary transition boiling process after sudden contact of liquid with hot

surface, 6th BSME International Conference on Thermal Engineering, (2014), Dhaka.

7) **光武雄一**, 副島久義, 椿耕太郎, 門出政則, 高温面上への液滴列衝突時の非定常遷移沸騰過程の計測, 第 52 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (2015), D132 (CD-ROM)

8) 福田章人, 椿 耕太郎, **光武雄一**, 高温面上への液滴衝突時の非定常遷移沸騰熱伝達特性, 日本機械学会九州支部長崎地方講演会論文集, (2015.9.25), E11(USB-Memory)

〔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

佐賀大学

海洋エネルギー研究センター・教授

光武 雄一 (MITSUTAKE YUICHI)

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