

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：32613

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06207

研究課題名(和文)鉄鋼の金属結晶微粒子化と延性向上化の最適化に関する沸騰熱伝達の検討:液膜クエンチ

研究課題名(英文) Boiling heat transfer on optimization of metal crystal grain refinement and ductility improvement of steel:quench of liquid film

研究代表者

大竹 浩靖(Ohtake, Hiroyasu)

工学院大学・工学部・教授

研究者番号：40255609

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文):加熱面として、銀平板、透明サファイア板および石英ガラス板を用いた。サファイアおよび石英ガラス加熱面では裏面からの直接観察結果を画像解析した。実験は、600℃に加熱した加熱面を水ノズルで非定常冷却をし、この時の冷却時の様相を、赤外線サーモグラフィおよび高速度ビデオカメラにて計測し、濡れ開始条件を定量化するものである。この結果、濡れ開始温度に関して、銀は熱力学的過熱限界温度に近い。サファイアは、液サブクール度0,10K条件では熱力学的過熱限界温度に近く、液サブクール度30,50K条件では約600℃となった。石英ガラスでは、液サブクール度によらず約600℃と、熱力学的過熱限界温度より高い。

研究成果の学術的意義や社会的意義

目的は、沸騰冷却分野の面より、次世代鉄鋼材料創製技術を構築するものである。すなわち、鉄鋼業界では、高強度かつ延性に優れた材料の生産が強く求められている。そのためには、圧延プロセスと熱処理技術を融合させて、金属結晶の成長を熱制御し、結晶の微粒子化を図ると同時に延性を持たせるための熱処理が欠かせない技術となる。つまり、結晶の微粒子化が高強度化を図る上で重要な因子ではあるが、結晶の微粒子化は、延性が著しく低下し、圧延加工が困難になる。それ故、強度と延性のバランスを取りながら加工、すなわち、鉄鋼を冷却するための技術開発が鉄鋼材料分野での長年の課題となっている。そのため沸騰冷却分野の研究が必要となる。

研究成果の概要(英文):As the heating surface, a silver flat plate, a transparent sapphire plate and a quartz glass plate were used. Image analysis of the direct observation results from the back side of the heated surface of sapphire and quartz glass was performed. In the experiment, the heating surface heated to 600℃ was unsteady cooled with a water nozzle, and the appearance of cooling at this time was measured with an infrared thermography and a high-speed video camera to quantify the wetting start condition. As a result, with respect to the wetting onset temperature, silver is close to the thermodynamic limit superheat. Sapphire was close to the thermodynamic superheat limit temperature under liquid subcooling conditions of 0 and 10K, and about 600℃ under liquid subcooling conditions of 30 and 50K. In the case of quartz glass, the temperature is about 600℃, which is higher than the thermodynamic limit superheat regardless of the liquid subcooling degree.

研究分野：伝熱工学

キーワード：熱伝達 沸騰 金属結晶微粒子化 熱力学過熱限界温度 濡れ開始温度 二次元温度場計測 赤外線放射温度計 高速度撮影

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、研究者個人に帰属されます。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

- (1) 鉄鋼製造過程において、クエンチ点、すなわち、濡れ開始温度最も重要な物理量である。その現象の本質を捉えることは重要である。
- (2) 赤外線サーモグラフィおよび高速度ビデオカメラの性能の進歩により、高速かつ詳細な非接触型温度計測および気泡画像観測が可能となった。
- (3) 透明サファイア伝熱面および石英ガラス伝熱面を利用することで、濡れ面温度の直接計測が可能となった。

2. 研究の目的

鉄鋼の製造工程、特に金属組織の生成は、水冷時の冷却特性と密接な関わりを持つ。多くの場合、この冷却には沸騰現象を伴い、沸騰熱伝達の詳細な理解、特に高温面上での濡れ開始条件の把握が必要である。過去、濡れ開始条件および濡れの挙動、すなわち膜沸騰崩壊条件と遷移沸騰熱伝達に関して多くの報告⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾が行われてきたが、詳細な理解に至っておらず、未だ不明瞭な点が多い。本研究では膜沸騰崩壊温度条件の定量的把握として、水平上向き伝熱面に液ジェットを衝突させ、高温加熱面上での濡れの挙動を実験的に検討し、固液接触の温度条件およびその熱伝達特性を得ることを目的とする。本講演では、赤外線放射温度計を用いた非接触型の温度計測および高速度ビデオカメラによる液挙動の高速撮影を通して、MHF 点温度、膜沸騰熱伝達率および液膜先端温度である濡れ開始温度の定量化を行った。

3. 研究の方法

本実験装置は、加熱面、試験容器、循環ポンプから構成される大気開放のループ系である。試験液体には市販の蒸留水を脱気した純水を使用した。加熱面は厚さ 2 mm の銀平板(熱伝導率: 405 W/mK)を幅 41.5×41.5 mm に加工した薄板および厚さ 2mm、幅 25 mm×奥行 25mm の透明単結晶サファイア平板(同: 42 W/mK)および石英ガラス平板(同: 1.5W/mK)である。次に実験手順を示す。加熱面を約 600 まで加熱した後、液ジェットを加熱面中心に衝突させ、これを冷却する。銀平板の加熱には高温熱風発生機(ノンフレームトーチ)を使用した。この熱風発生機の作動流体には、試験部に用いた銀平板の酸化防止のためにアルゴンガスを使用した。この冷却時の加熱面の二次元温度場の時間変化を、加熱面裏面より金平面ミラーを介して赤外線放射温度計(FLIR A677sc)によって計測する。また、温度計測と同時に、加熱面上の液挙動を高速度ビデオカメラ(FASTCAM MAX)にて記録する。なお、二次元温度場の計測速度は 200 fps、放射率は予備実験より 0.90 と決定した。高速度カメラの撮影速度は、冷却速度に応じて設定した。実験条件である液サブクール度は 0, 10, 20, 30, 40, 50 および 75 K、液流速は 1.33 m/s、2.66 m/s および 4.00 m/s である。

4. 研究成果

Fig.1 に、本実験により得られた赤外線放射温度計による温度可視化画像及び高速度ビ

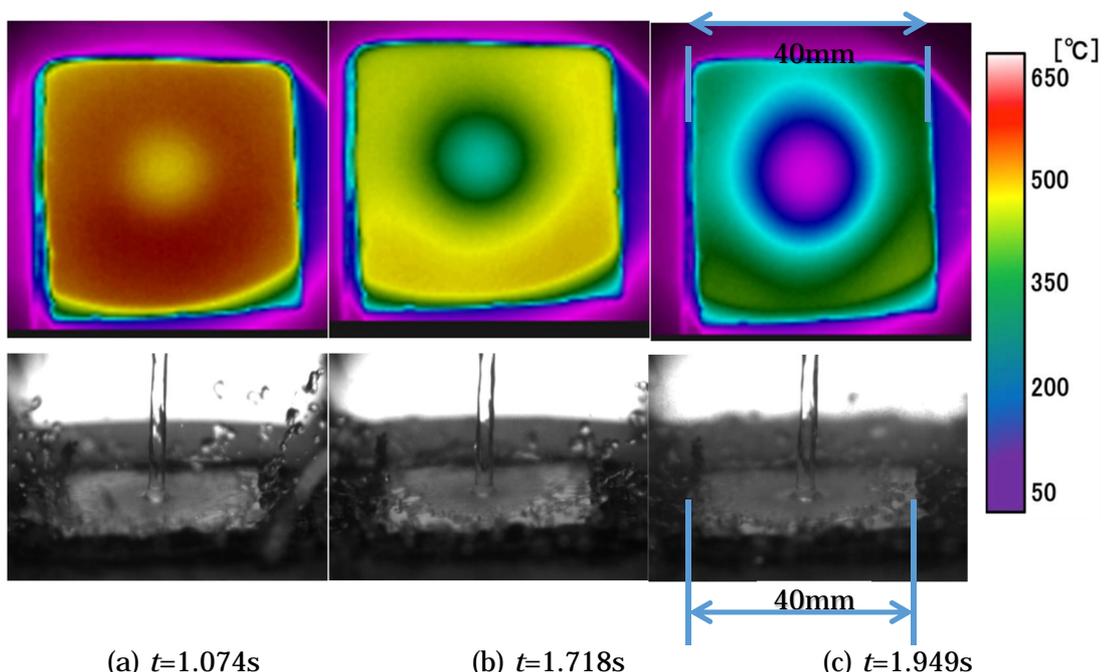


Fig.1 Two dimensional temperature field and liquid behavior
(Liquid subcooling: 40K, Liquid flow velocity: 2.66 m/s, Ag)

デオカメラによる液膜挙動画像の一例を時系列で示す。(a) $t=1.074$ s 時点で銀平板中央に液ジェットが衝突、冷却が開始される。(b) $t=1.718$ s 時点にて中心部から部分的な固液接触状態であるスパッタリングが始まる。その後、(c) $t=1.949$ s 時点にて中心部から部分的な固液接触が終了し、液膜が同心円状に広がる様子が確認できる。

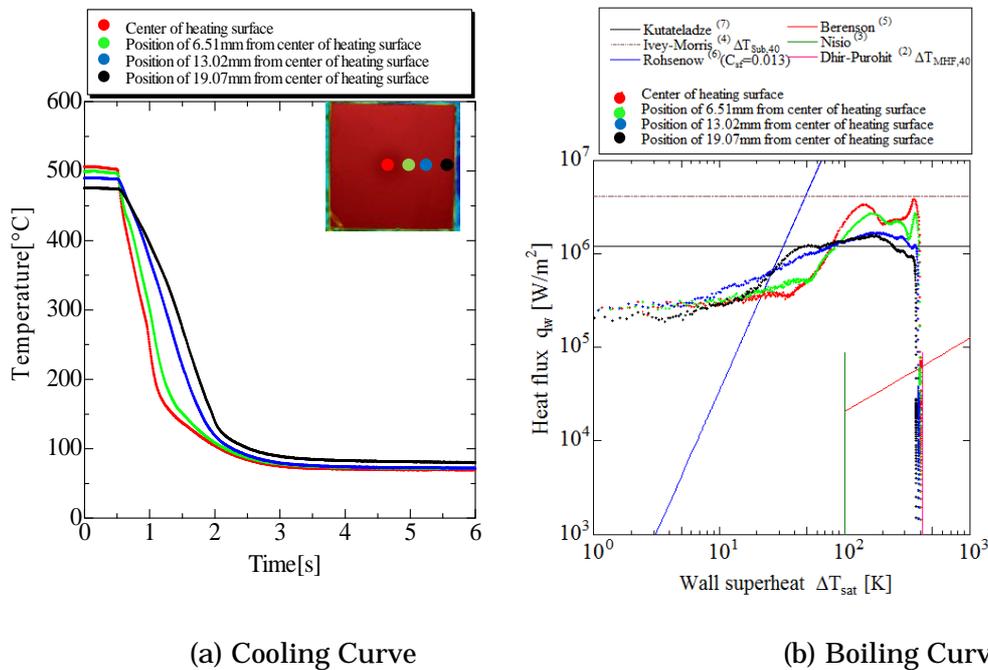
Fig.2 に(a)に冷却曲線(温度履歴)と(b)に沸騰曲線の一例を示す。冷却曲線と沸騰曲線は、加熱面中心より 0 mm, 6.5 mm, 13.0 mm, 19.0 mm 離れた位置のそれらである。沸騰曲線は横軸に壁面過熱度, 縦軸に熱流束を取ったものある。熱流束は膜沸騰時において, $Bi < 0.1$ であるため, 熱流束は式(1)に示す集中熱定数近似式を利用して求めた。また沸騰曲線中には既存の相関式⁽²⁾⁻⁽⁷⁾による計算値を各直線にて併記した。

$$q_w = \rho c \delta \left(\frac{\Delta T}{\Delta t} \right) \quad (1)$$

なお, ρ : 密度, c : 比熱, δ : 厚さ, T/t : 加熱面温度低下率である。

(a)の冷却曲線より約 300 °C 付近にクエンチ点, 急冷期間が確認できる。また, 加熱面中心(よどみ点,)では $t=0.5$ s 付近での冷却開始時より急冷が開始されるものの, 約 350 °C で冷却量の減少を確認できる。これは, 中心部で大気圧水の過熱限界温度に達し, 固液接触が発生し急冷が開始するものの, 周辺領域が高温のため加熱面内の温度差が大きく, 熱伝導による復熱効果で冷却速度が減少したためと考えられる。その後, 約 300 °C で再び急冷が開始される。固体内部の熱伝導と表面の(沸騰)熱伝達で決められる Rewetting 条件に達し, 中心部より濡れが外周部に進展していったものと考えられる。これらの主因により, (b)において, CHF が 2 点現れたものと考えられる。なお, よどみ点の影響が少ない中心から 13.0 mm, 19.0 mm 離れた位置での CHF はプール沸騰の CHF の相関式である Kutateladze の式より算出した値に近い値を示した。

また, 液サブクール度と MHF 点温度の関係は, 液サブクール度 20 K までは Dhir-Purohit の式⁽²⁾と相関が確認できた。しかし, 液サブクール度 30 K 以降は Dhir-Purohit の式より低く約 400 程度に収束した。これは, MHF 点温度すなわち濡れ開始温度を決めるのは Dhir-Purohit の式ではなく, 熱力学的過熱限界温度が限界値として関連すると考えられる。



(a) Cooling Curve (b) Boiling Curve
Fig.2 Cooling curves and boiling curves
(Liquid subcooling: 40K, Liquid flow velocity: 2.66m/s, Ag)

Fig.3 に濡れ開始温度を示す。これは, 横軸に高速度カメラより得られる液膜先端の位置, 縦軸に同期を取り計測した赤外線放射温度計より得られる液膜先端温度をプロットしたものである。また, Fig.3 中には, 大気圧水の過熱限界温度と異なる温度の二物体接触時の熱伝導も考慮に入れた加熱面の過熱限界温度の値, 理想条件下の飽和プール沸騰の MHF 点温度の相関式である Nishio の式⁽³⁾を併記した。液ジェット中心(よどみ点)付近の温度はサブクール度が高くなるほど上昇するが, 熱力学的限界温度を超えることはない。なお, 後述するサファイア伝熱面の液膜先端温度は Fig.4 にまとめた。

Fig.5 に透明サファイア伝熱面による直接濡れ挙動の観察の結果を示す。Fig.5 に示すように, Fig.5(a)に冷却開始, Fig.5(b)に膜沸騰状態および Fig.5(c)に濡れ開始条件が観察できる。それぞれの条件に対応する 2 次元温度場も直上に併記してある。なお, 紙面の都合上 2 次元温度場の併記を割愛したが, Fig.5(c)の濡れ開始後に生じる液膜の外周への進展の様相

を Fig.5(d)および Fig.5(e)に示した。加熱面上での“リウエットング”が直接観測可能となり、各条件の温度および液膜位置の観測結果より前出の Fig.4 を得た。

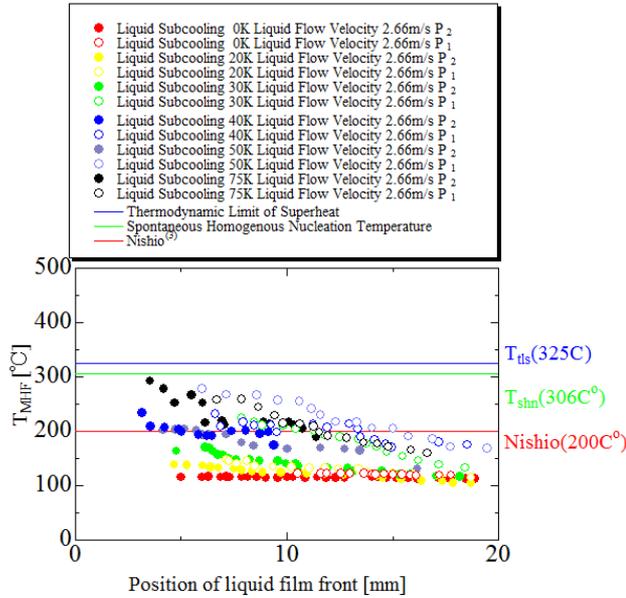


Fig.3 Temperature of liquid film front (Silver)

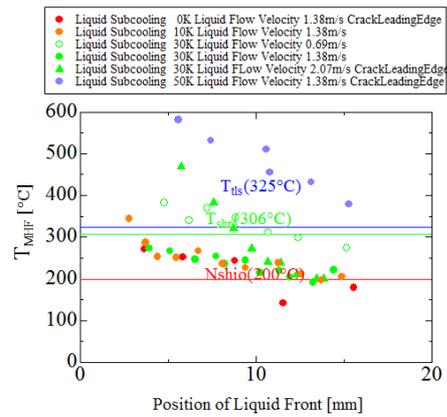
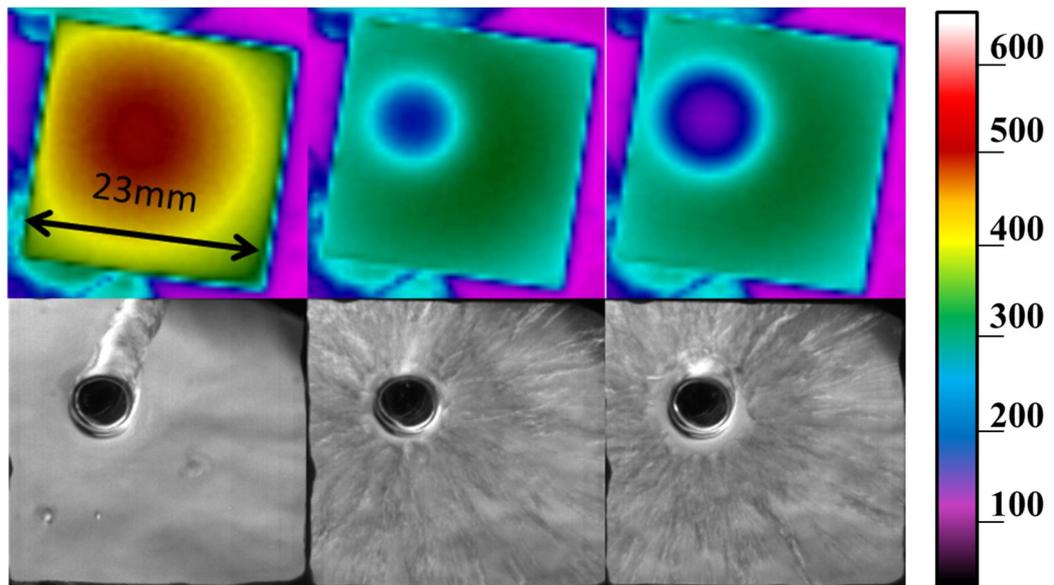
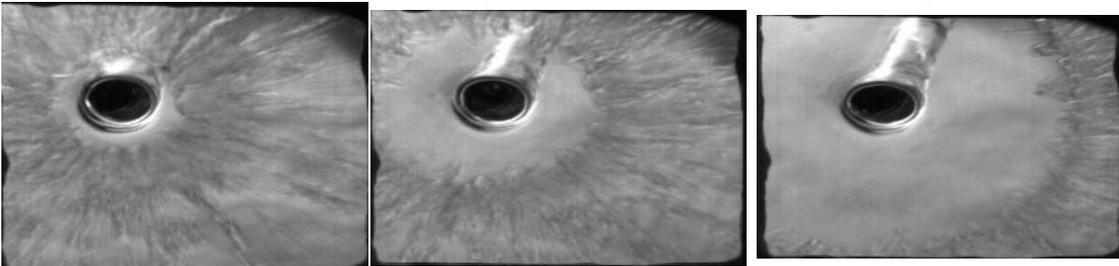


Fig.4 Temperature of liquid film front (Sapphire)



(a) Cooling start at 0.62 s (b) Film boiling at 3.07 s (c) Occurrence of rewetting at 3.35 s



(c) Occurrence of rewetting at 3.35 s (d) Advancing liquid film on heater at 4.21 s (e) Advancing liquid film at 5.93 s

Fig.5 Measurement on the temperature field by using infrared thermometer and observation on the liquid film by high-speed video camera; sapphire superheated surface at 10K liquid subcooling and liquid velocity 1.38mm

Fig.6 は、サファイア伝熱面における冷却曲線(温度 - 時間線図)を示す。各条件の結果、いずれも急冷が認められる。また Fig.6 内に、Fig.5(c)の濡れ開始条件の時間に対して2次元温度場によって計測されるよどみ点下の局所温度を●で示した。Fig.6 に示すように、液サブクール度 0K および 10K 条件では、冷却後の濡れ開始温度は、物理的に固液接触が許されると考えられる最大壁面温度条件、すなわち、

$$(T_i - T_{ts}) / (T_{ts} - T_i) = \sqrt{(\rho c k)_l / (\rho c k)_w} \quad (2)^{(1)}$$

で与えられる温度の異なる二つの半無限物体の熱伝導接触問題で界面温度が熱力学的過熱限界温度となる高温物体の初期温度 $T_i = 364$ に近い。一方、30K および 50K 条件では、冷却直後に濡れが開始していることがわかる。物理的に固液接触が許されると考えられる最大壁面温度条件 T_i よりかなり高温である。今後の詳細な検討が必要ではあるが、Fig.6 に示すように伝熱面下流での液膜先端の温度は T_i に近いことがわかり、どの液温度条件でも T_i に近いと考えられる。

なお、石英ガラスの濡れ開始温度は、液サブクール度によらず約 600 であることが確認できた。これは、熱力学的過熱限界温度より高く、サファイア加熱面の液サブクール度 30,50K 条件での濡れ開始温度と類似している。これもサファイア加熱面(熱伝導率: $k=20\text{W/mK}$)同様、石英ガラス加熱面の熱伝導率の低さ(1.5W/mK)と冷却速度の大きさより表面温度と裏面温度に差異があったと考えられる。今後、固体熱伝導率に基づく高い壁面温度条件での膜沸騰崩壊の物理モデル化を検討し、物理的妥当性をさらに検討する。

また、Fig.5 (a), (b), (c), (d)および(e)で確認されるように、濡れ面先端では、波動が観察された。濡れのメカニズムの一例として、観測された波長の波長を We 数 ($=\rho v^2 \lambda / \sigma$) で整理した結果、 $We = 5 \sim 35$ であった。壁面に衝突する液滴の分裂時の $We > 70$ より低く、別のメカニズムだと考えられる。

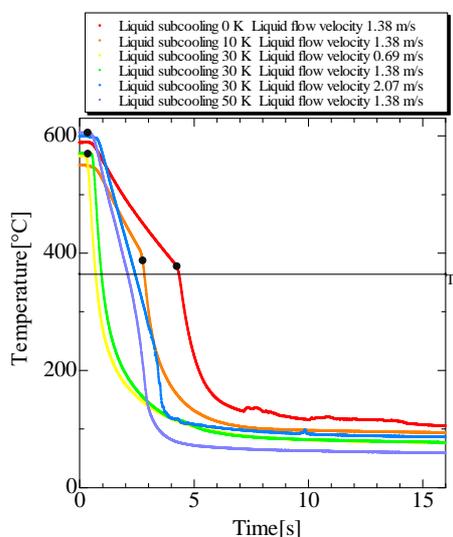


Fig. 6 Temperature at occurrence of rewetting

[参考文献]

- (1) 日本機械学会編, 沸騰熱伝達と冷却, (1989), 日本工業出版.
- (2) Dhir, V. K. and Purohit, G. P., Nucl. Eng. Des., 47(1978), 49.
- (3) Nishio, S., Int. J. Heat Mass Transf., 30-10 (1987), 2045.
- (4) Ivey, H. J. and Morris, D. J., Rept. AEEWR 137, (1962).
- (5) Berenson, P. J., Trans. ASME, J. Heat Transfer 83, (1961), 351.
- (6) Rohsenow, W. M., Trans. ASME, J. Heat Transf., 74-3(1952), 969.
- (7) Kutateladze, S. S., AEC-tr-3405, (1953).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 大竹 浩靖
2. 発表標題 Film Boiling Collapse Temperature and Boiling Heat Transfer Correlations through Two-Dimensional Temperature Field Measurement and Observation of Liquid-Solid Contact
3. 学会等名 第16回国際伝熱会議 (The 16th International Heat Transfer Conference, IHTC-16) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大竹浩靖
2. 発表標題 二次元温度場計測および直接高速度観察を通じた高温加熱面の濡れ開始条件
3. 学会等名 第55回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大竹 浩靖
2. 発表標題 二次元温度場計測および直接高速度観察を通じた高温加熱面の濡れ開始条件
3. 学会等名 高速度イメージングとフォトニクスに関する総合シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

伝熱工学研究室

https://www.kogakuin.ac.jp/faculty/lab/tech_lab55.html

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
研究分担者	長谷川 浩司 (Hasegawa Koji) (90647918)	工学院大学・工学部・准教授 (32613)	