

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 2 日現在

機関番号：11101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03169

研究課題名(和文) 沸騰熱伝達における臨界熱流束メカニズムに対する波動仮説の検証

研究課題名(英文) Verification of wave hypothesis for critical heat flux in nucleate boiling heat transfer

研究代表者

城田 農 (Shirota, Minori)

弘前大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：40423537

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：加熱面へ液滴が衝突すると、液滴が衝突する数ミリ秒程度の時間に、加熱面と液滴との界面上を、激しい膨張収縮運動を伴うリング状のサブクール沸騰波が広がる。臨界熱流束が得られる温度領域付近で見られるこのような衝突液滴内特有の沸騰現象を、私たちは衝突液滴沸騰と名付けた。本研究では、衝突液滴沸騰を特徴付ける蒸気泡の運動を、高速度拡大撮影によって詳細に捉えた。また、球形気泡の運動方程式に基づく数理モデルを構築し、実験結果と比較することで、その妥当性を検証した。その結果、衝突液滴沸騰では、加熱面上に発達する温度境界層と、気泡底部に形成されるマイクロレイヤーからの熱供給が支配的であることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

情報技術の高度化や、半導体デバイスの高集積・大型化に伴う半導体チップ冷却技術の向上が求められる中、噴霧冷却が有力視されている。従来の噴霧冷却では、加熱面上に液膜が形成されるほどに、液滴を大量に吹き付けてきた。対して申請者は、本研究において、衝突液滴が急加熱されることで生成される蒸気気泡が、液滴の衝突変形過程において、激しく凝縮するいわゆるサブクール流動沸騰領域が高温領域へ自発的に広がって行く現象に着目し、数理モデルを構築した。

本研究成果によって、より最適な噴霧冷却手法が今後見出され、それにより現代科学を象徴する高度技術の飛躍的な性能向上や高効率化へとつながることが期待される。

研究成果の概要(英文)：Drop impact on a hot surface causes a sub-cooled boiling wave with violent bubble volume oscillations. The sub-cooled wave covers all the contact area between the drop and the surface in several milliseconds of drop impact event. We call the unique boiling phenomena in an impacting drop as impact drop boiling. In the present research, we captured in detail the dynamics of vapor bubbles in impact drop boiling with a high-speed camera and a long-distance microscope. We also developed an analytical model to describe the bubble dynamics based on the spherical bubble model. By comparing the model with experimental results on the time variations of bubble radius, we evaluated the validity of our model.

As a result, we clarified that the thermal boundary layer developed on a heated surface and the microlayer formed in between the bubble and the surface play dominant roles in the bubble dynamics in impact drop boiling.

研究分野：流体力学，熱工学

キーワード：沸騰 液滴衝突 臨界熱流束 マイクロレイヤー 蒸発 凝縮

1. 研究開始当初の背景

沸騰熱伝達を利用した液体による加熱固体の冷却は、様々な工業用熱伝達に用いられている。例として、大きいものでは火力発電所における熱交換器や原子力発電所での核燃料の冷却など、小さいものではマイクロエレクトロニクス集積回路の放熱を目的としたヒートパイプや噴霧冷却(Spray cooling)などが挙げられる。加熱固体から冷却液体への伝熱特性には、固体表面に生成される気泡の運動が大きく関与していることが良く知られている。すなわち、固体表面が液体の沸点をわずかに越えると、固体表面に気泡が形成され、この気泡の成長と離脱が繰り返されることにより、加熱固体表面近傍に対流が生じ、熱が効率的に輸送される。いわゆる核沸騰領域である。さらに温度を上げると、伝熱面が蒸気膜で覆われる膜沸騰領域へと遷移し、伝熱特性は極端に悪くなり、伝熱面のバーンアウトを引き起こす場合がある。

液体による加熱固体の冷却において、もっとも高い伝熱効率を得られる臨界熱流束(Critical heat flux)は、核沸騰から膜沸騰へ遷移する温度において得られる。しかし、この臨界熱流束のメカニズムは、未だに解明されていない。

液滴が加熱平面へ衝突する場合、衝突液滴底部は下方から加熱される一方で、上方からは過冷却液体が供給されることになる。その結果、液滴底部にて核沸騰により生成された気泡は、過冷却液相へ貫入することで凝縮する。このような高サブクール沸騰を非常に簡単に実現できることが、噴霧冷却が高い冷却熱流束を有する原因であると申請者は考えた。

これまでに広く議論されてきたプール沸騰においても、バルク液中に高熱流束にて加熱することによって、圧壊や分裂を伴う非常に激しい蒸気泡運動を誘起することができる。現象を理解するうえで、このような高サブクール度プール沸騰は適しているが、冷却技術への応用を考えると、応用範囲が極めて限定される。

プール沸騰と比較すると、液滴を衝突させるだけで実現可能な高サブクール度沸騰は、すでに噴霧冷却等で利用されていることからわかるように、応用範囲が非常に広い。申請者は、衝突液滴内特有の高サブクール度沸騰を「衝突液滴沸騰」と名付けた。

衝突液滴沸騰では、過熱面上に形成された気泡核から蒸気泡が形成され、また過冷却液層にて凝縮する(図1)。このような膨張・収縮運動を伴いながら、液滴衝突時間である数msの間に、液滴衝突面全領域に気泡領域が広がるのが特徴である。

気泡運動が活発化したサブクール沸騰領域内部では、液の攪拌が促進される温度境界層が鈍るため、気泡運動の激しさが緩和する。他方、気泡によって乱されていない過熱領域と接するサブクール沸騰周縁領域では、激しい体積変動を伴いながら気泡領域が自ずと広がっていく。

以上のような特徴を持つことから、衝突液滴沸騰は非常に優れた冷却技術要素であるにも関わらず、これまでにモデル化が行われていないのはもちろんのこと、現象自体すら十分に認識されてこなかった。

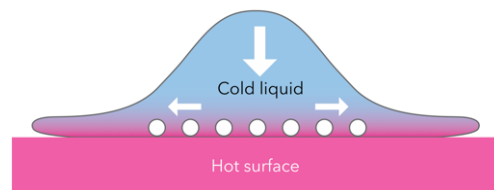


図1 衝突液滴サブクール沸騰の概念図。加熱面へ向かい過冷却液が供給される。

2. 研究の目的

以上の背景のもと、本研究では衝突液滴沸騰に見られる単一気泡の体積変動と気泡領域の広がり運動について、高速度拡大撮影とデジタル画像処理に基づき定量的に計測する。また、それら気泡運動を表す数理モデルを構築し、実験結果と比較することでその妥当性を検証することを目的とする。

なお、申請書作成時にはライデンフロスト温度よりわずかに低い遷移沸騰領域に見られる接触界面の波動現象のみを研究対象としていた。しかし、研究を進めるにつれて、より低い温度領域にて観察される気泡の成長・圧壊を伴う波動現象の方が、より冷却能力が高いことが明らかとなった。また、この比較的低い温度領域で見られる球形気泡運動のモデルを、蒸気膜のモデルへと拡張することで、遷移沸騰領域に見られる波動現象を合理的に説明することができる。これは、蒸気膜成長モデルよりも蒸気泡成長モデルの方が、後述するマイクロレイヤの形成・枯渇を含み、より現象が複雑であるためである。

以上のことから、本研究の2年目からは、核沸騰領域～遷移沸騰領域に見られる気泡運動により焦点を当てて研究を遂行した。

3. 研究の方法

実験研究と数理モデル解析の2通りの方法によって研究を進めた。

実験装置概略図(図2)に示すように、加熱したサファイア平板上に衝突する液滴の沸騰現象を撮影した。まず、サファイア平板を設置したアルミブロックを熱電対、カートリッジヒーター、

温度調節器を用いて表面温度が目標温度になるよう PID 制御を行う。次に、注射針をシリジポンプにつなぎ、液滴をサファイア平板に滴下する。背景光撮影におけるディフューザーと液滴の落下経路の干渉を避けるため、ステップモーターにディフューザーを取り付け、液滴の落下をレーザーセンサで感知した後にモーターを回転させた。これにより先行研究よりも鮮明な衝突液滴内の観察を可能とした。さらに、レーザーセンサの出力を高速度カメラのトリガに用いた。

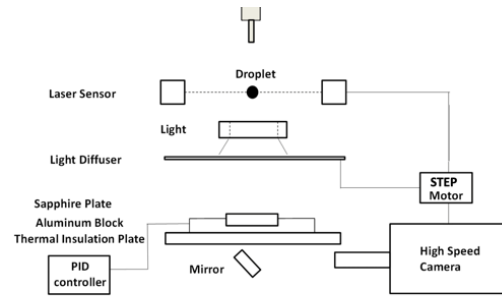


図2 実験装置概略図

液体試料は水、液滴径は 4.6 mm, 落下高さは 15 cm で固定とした。加熱壁面の温度は 100 °C ~ 185 °C の範囲、液滴温度は 25 °C, 65 °C の 2 条件とした。高速度撮影は 50, 400 ~ 500, 000 fps で行った。

衝突液滴沸騰においては、加熱面近傍の温度境界層と、蒸気泡底部に形成されるマイクロレイヤーが支配的要因であると考えた。そのため、本研究では、この 2 つの要素を取り入れた固体表面上の単一半球形気泡運動を表す数理モデルを構築した。モデル解析に取り入れた基礎方程式を図 3 に示す。なお、マイクロレイヤー表面温度 T_{lv} は、界面における熱力学的非平衡を考慮して分子運動論的解析から求められる熱伝達モデルから求めた。

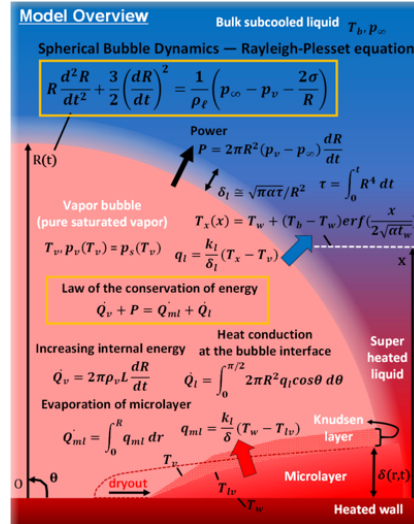


図3 気泡運動数理モデルの概要

構築した数理モデルの妥当性検証においては、最も基本的な温度境界層とマイクロレイヤーが共に存在しないモデルの計算結果と実験との比較から始め、次に新しい仮定を導入してモデルを拡張し再度計算結果と実験値を比較するというサイクルを繰り返すことで、最終的なモデルの妥当性を検証した。

4. 研究成果

高速度拡大撮影で得られたサブクール沸騰波の代表的な画像と、画像処理結果を図 4 にまとめる。図 4(a) に示すように、直径 5mm 程度の水液滴衝突によって形成されたサブクール沸騰波

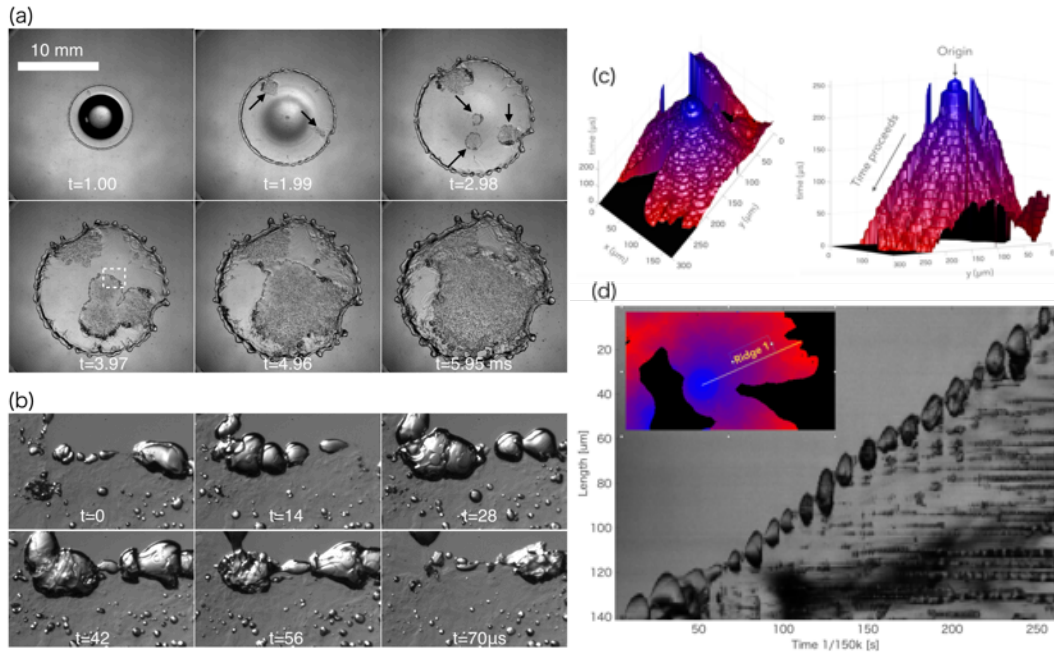


図4 (a)サブクール沸騰波(矢印)の伝播の様子と(b)サブクール沸騰波前線の気泡運動, (c)サブクール沸騰波の広がりを示す3次元画像, (d)蒸発凝縮を伴う気泡運動。

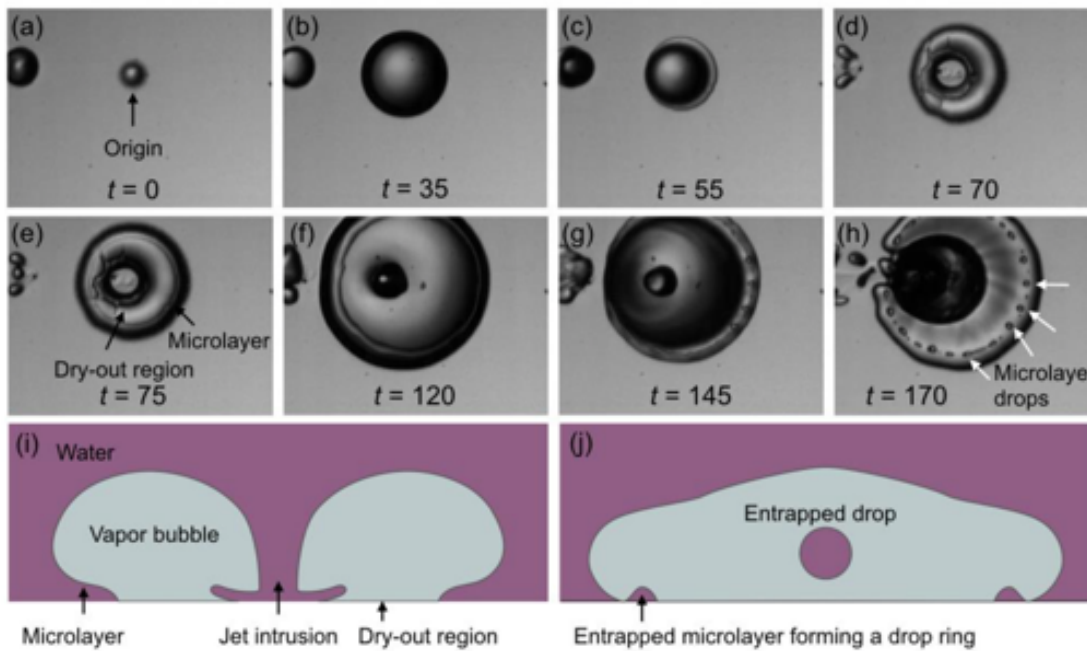


図 5 サブクール沸騰波初生の瞬間。圧壊時に液ジェットが気泡を貫通している様子と、マイクロレイヤーが気泡にトラップされることで、微細液滴リングが形成される様子が示されている。時間(t)の単位は μs 、壁面温度は $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ である。

領域は、壁面衝突後 2ms 程度から発生し、 6ms 程度にはほぼ液滴全領域に広がる。また図4(b)に示されたサブクール沸騰波前線の拡大画像から、前線では気泡が激しく膨張収縮していることがわかる。(c)では時間軸を縦軸にとった3次元プロットにより、サブクール沸騰波がある点から初生しその後半径方向外側へと広がる様子が示され、(d)では半径方向に膨張収縮(蒸発凝縮)しながら広がる前線の気泡運動が示されている。

サブクール沸騰波の初生の瞬間を捉えた画像を図5に示す。急激に膨張することで過冷却液層へ突入するため気泡上部から凝縮する。その際に、壁面へ向かう液ジェットが気泡中央部に形成され、キャビテーション気泡崩壊時のようにドーナツ状に変形する様子が示されている。

図5(g)と(h)では、気泡内の周縁部付近に微細液滴が形成されていることがわかる。これは、マイクロレイヤーが気泡にトラップされ円環状になり、方位角方向の不安定性によって個々の液滴へと分裂したことによって作られたものである。このように、マイクロレイヤーの存在が直接観察によっても確認された。

続いて数値モデル解析結果を示す。

まずは、マイクロレイヤーも加熱壁面上の温度分布もない場合、すなわち気泡周囲が均一温度場であると仮定した場合の気泡半径 R の時間変化について、計算結果と実験結果を比較したグラフを図6に示す。この図に示されるように、当然ではあるが、気泡が下部から加熱されているだけでは、短調に気泡は成長し続けるだけである。

そこで、加熱壁面上に発達する温度境界層を取り入れた計算結果を図7に示す。今度は、条件によっては気泡径はある一定値に収束する。しかし、実験結果に見られるような凝縮による収縮運動は再現できていない。

そこで、温度境界層の影響に加えて、気泡底部のマイクロレイヤーの形成と枯渇も取り入れると、図8のピンクの波線に示されるように気泡の成長速度および収縮に転じる時刻までもが実験結果と良く一致した。

最後に、実験結果に見られる気泡径変化のばらつきについて考察する。これら気泡は、いずれも成長開始を $t=0$ としてプロットしているが、液滴衝突時刻からはそれぞれ異なる時間における気泡運動を重ねて表示している。すなわち、実験結果では個々の気泡の周囲温度場が異なることに着目した。特に、サブクール沸騰波内側の温度は、気泡運動による攪拌の程度によって大きく温度勾配が異なることが予想される。この温度場の非対称性を考慮するために、サブクール沸騰波内側の温度境界層形成時間 t_{w2} を導入し、フィッティングパラメータとした。

図9に t_{w2} を変化させたモデル解析結果と実験結果の比較を示す。この図に示される通り、気泡周囲の温度非対称性を考慮することで、実験で得られた気泡運動速度の大小を表すことが可能である。

以上の数値モデル解析結果から、衝突液滴沸騰に見られるサブクール沸騰波の運動には、加熱壁面上に形成される温度境界層と、気泡底部に形成されるマイクロレイヤーからの熱供給が支配的であると結論付ける。

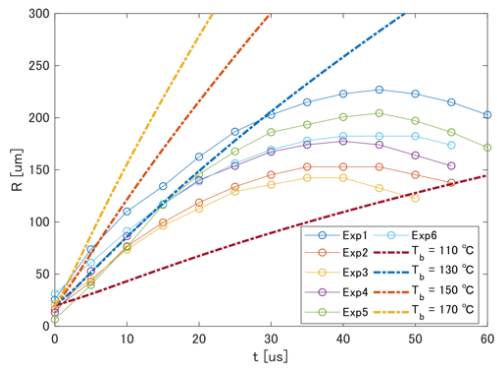


図 6 均一温度場を仮定したモデル計算結果と実験結果の比較

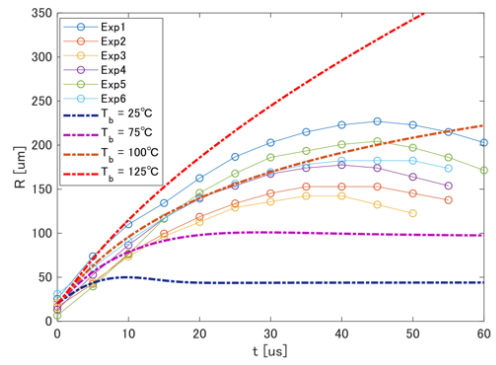


図 7 加熱面上に発達する温度境界層を仮定したモデル計算結果と実験結果の比較

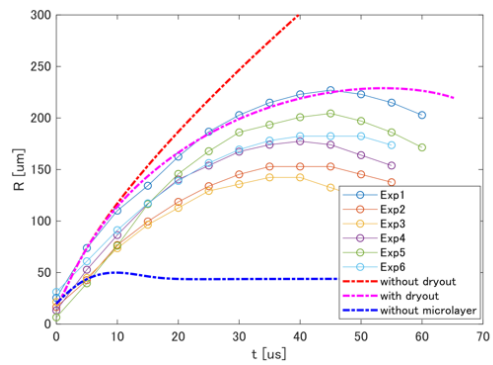


図 8 加熱面上に発達する温度境界層と気泡底部のマイクロレイヤーを仮定したモデル計算結果と実験結果の比較

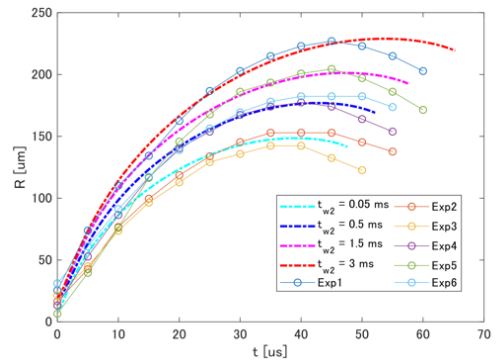


図 9 マイクロレイヤーと温度境界層の非対称性を仮定したモデル計算結果と実験結果の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 5件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 van Limbeek Michiel A. J., Hoefnagels Paul B. J., Shirota Minori, Sun Chao, Lohse Detlef	4. 巻 3
2. 論文標題 Boiling regimes of impacting drops on a heated substrate under reduced pressure	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Fluids	6. 最初と最後の頁 53601
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.3.053601	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 該当する
1. 著者名 川崎智弘, 城田農, 岡部孝裕, 稲村隆夫	4. 巻 Web予稿集
2. 論文標題 衝突液滴の広がりとの濡れの関係	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 混相流シンポジウム2018講演予稿集	6. 最初と最後の頁 A311
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 加藤将起, 城田農, 藤井沙弥佳, 川崎智弘, 岡部孝裕, 稲村隆夫	4. 巻 Web予稿集
2. 論文標題 高温表面と衝突液滴との界面における気泡の核生成と成長	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 混相流シンポジウム2018講演予稿集	6. 最初と最後の頁 A121
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 今野嘉友, 城田農, 加藤将起, 藤井沙弥佳, 川崎智弘, 岡部孝裕, 稲村隆夫	4. 巻 Web予稿集
2. 論文標題 ライデンフロスト液滴推進挙動に与える濡れ性の影響	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 混相流シンポジウム2018講演予稿集	6. 最初と最後の頁 A324
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 石尾藍, 城田農, 加藤将起, 藤井沙弥佳, 川崎智弘, 稲村隆夫, 岡部孝裕	4. 巻 Web予稿集
2. 論文標題 衝突ライデンフロスト液滴のリムの分裂	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 混相流シンポジウム2018講演予稿集	6. 最初と最後の頁 A323
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 M. Limbeek, M. Shirota, R. Kolderweij, D. Lohse, C. Sun	4. 巻 USB予稿集
2. 論文標題 Analysis and application of high-speed frustrated total-internal-reflection imaging	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the 32nd International Congress on High-Speed Imaging and Photonics	6. 最初と最後の頁 0
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 該当する

1. 著者名 T. Kawasaki, M. Shirota, Y. Akiyama, T. Okabe, T. Inamura	4. 巻 USB
2. 論文標題 Simultaneous Measurement of Wetting and Spreading Behavior of Impacting Drops	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of The 15th International Conference on Flow Dynamics	6. 最初と最後の頁 0
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 M. Shirota, M. Kato, T. Kawasaki, Y. Konno, S. Fujii, T. Okabe, T. Inamura	4. 巻 USB予稿集
2. 論文標題 Measuring Nucleate Boiling in Impacting Drops using a Combined Total-Internal-Reflection and Back-Lighting Imaging.	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of The 15th International Conference on Flow Dynamics	6. 最初と最後の頁 0
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 Y. Konno, M. Kato, M. Shirota, T. Okabe, T. Inamura	4. 巻 USB予稿集
2. 論文標題 Hybrid-wettability Ratchet Accelerates the Propulsion of Leidenfrost Drops.	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of The 15th International Conference on Flow Dynamics	6. 最初と最後の頁 0
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 川崎 智弘、城田 農	4. 巻 32
2. 論文標題 液滴衝突による液体粘度計測法	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 混相流	6. 最初と最後の頁 116 ~ 123
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.3811/jjmf.32.116	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 -

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 川崎智弘, 城田農, 岡部孝裕, 稲村隆夫
2. 発表標題 衝突液滴の広がり と濡れ の関係.
3. 学会等名 混相流シンポジウム2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 加藤将起, 城田農, 藤井沙弥佳, 川崎智弘, 岡部孝裕, 稲村隆夫
2. 発表標題 高温表面と衝突液滴との界面における気泡の核生成と成長.
3. 学会等名 混相流シンポジウム2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 今野嘉友, 城田農, 加藤将起, 藤井沙弥佳, 川崎智弘, 岡部孝裕, 稲村隆夫
2. 発表標題 ライデンフロスト液滴推進挙動に与える濡れ性の影響.
3. 学会等名 混相流シンポジウム2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石尾藍, 城田農, 加藤将起, 藤井沙弥佳, 川崎智弘, 稲村隆夫, 岡部孝裕
2. 発表標題 衝突ライデンフロスト液滴のリムの分裂.
3. 学会等名 混相流シンポジウム2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Limbeek, M. Shirota, R. Kolderweij, D. Lohse, C. Sun
2. 発表標題 Analysis and application of high-speed frustrated total-internal-reflection imaging.
3. 学会等名 The 32nd International Congress on High-Speed Imaging and Photonics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Kawasaki, M. Shirota, Y. Akiyama, T. Okabe, T. Inamura
2. 発表標題 Simultaneous Measurement of Wetting and Spreading Behavior of Impacting Drops.
3. 学会等名 The 15th International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Shirota , M. Kato, T. Kawasaki, Y. Konno, S. Fujii, T. Okabe, T. Inamura
2. 発表標題 Measuring Nucleate Boiling in Impacting Drops using a Combined Total-Internal-Reflection and Back-Lighting Imaging.
3. 学会等名 The 15th International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Konno, M. Kato, M. Shirota, T. Okabe, T. Inamura
2. 発表標題 Hybrid-wettability Ratchet Accelerates the Propulsion of Leidenfrost Drops.
3. 学会等名 The 15th International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Shirota
2. 発表標題 Bubbles in Drops Impacting Hot Surfaces
3. 学会等名 PHYSICS OF FLUIDS FOR THE 21ST CENTURY (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川崎智弘、城田農
2. 発表標題 液滴衝突による液体粘度計測法
3. 学会等名 混相流シンポジウム 2 0 1 7
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 液体の粘度計測システム及び液体の粘度計測方法	発明者 城田農	権利者 国立大学法人弘前大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-026036号	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 液体の粘度計測システム及び液体の粘度計測方法	発明者 城田 農	権利者 国立大学法人弘前大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2017-157597	出願年 2017年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
---------------------------	-----------------------	----