

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 18 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01265

研究課題名（和文）沸騰熱伝達マルチスケールモデリングのための素過程研究

研究課題名（英文）Study on fundamental heat transfer processes in boiling heat transfer

研究代表者

矢吹 智英（Yabuki, Tomohide）

九州工業大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：70734143

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：高速度赤外線カメラと人工発泡点を用いた水の飽和プール実験により、広範な発泡点密度条件で、面積占有率が大きい対流熱伝達が壁面熱輸送を支配していることが明らかになった。少なくとも今回用いた界面活性剤種、濃度においては、界面活性剤添加による熱伝達促進はマイクロ液膜面積の増大によるもので、マイクロ液膜面積の増大は気泡軟化（表面張力低下）、気泡合体抑制、気泡スライド運動のためとわかった。新たに開発した薄膜積層型熱流束センサを用いて、2ミクロンの空間分解能でFC-72の沸騰における三相界線近傍の熱流束を計測した結果、三相界線がセンサ上を通過する過程で0.6MW/m²を超える高い局所蒸発熱流束が計測できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で明らかにした各種伝熱素過程の総熱輸送量への寄与は、電子機器の冷却などに用いられる沸騰伝熱面の開発において有用な知見である。例えば、マイクロ液膜蒸発が極めて高い局所熱伝達率をもつ一方で面積占有率が小さいために総熱輸送量への寄与が小さかったことを踏まえると、表面の微細構造化や濡れの制御等でマイクロ液膜蒸発を促進して全体の熱伝達率を向上させるアイデアが生まれる。界面活性剤水溶液に対する試験では、界面活性剤の添加がマイクロ液膜面積を増大させ、それが熱伝達促進につながっていることが明らかになった。

研究成果の概要（英文）：Water saturated pool experiments using a high-speed infrared camera and artificial nucleation sites revealed that convective heat transfer with a large area occupancy dominates wall heat transfer in a wide range of nucleation site density conditions. At least for the surfactant type and concentration tested in this study, the enhancement of heat transfer by surfactant addition was found to be due to an increase in microlayer area, and the increase in microlayer area was attributed to bubble softening (decrease in surface tension), bubble coalescence suppression, and bubble sliding motion. Using a newly developed thin-film stacked heat flux sensor with a spatial resolution of 2 microns, we measured the heat flux near the three-phase contact line in FC-72 boiling. A high local evaporative heat flux exceeding 0.6 MW/m² was measured as the three-phase contact line passed over the sensor.

研究分野：熱工学

キーワード：沸騰熱伝達 高速度赤外線カメラ 人工発泡点 ミクロ液膜 対流熱伝達

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

沸騰熱伝達は他の伝熱形態と比較して高い熱伝達率をもち、近年、高発熱密度の各種電子機器の冷却に沸騰熱伝達を利用する動きが高まっている。しかし、沸騰現象は固気液三相が相互作用する複雑な現象であるとともに、沸騰伝熱を構成している伝熱素過程が小さな時空間スケールで生じるため精密な実験が難しく、沸騰熱伝達メカニズムが明らかでない(高い熱伝達率を持つ理由も明確でない)。沸騰熱伝達の冷却技術への応用を考えると、沸騰熱伝達機構を正しく理解して、信頼性の高い数値計算技術や熱伝達モデルを構築する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、これまでの研究で水の飽和プール沸騰の壁面熱輸送を支配していることが分かっている対流熱伝達の特性を調べることで、接触線の運動を決める三相界線における熱物質輸送を観察すること、濡れや表面張力のような界面特性が沸騰熱伝達機構に与える影響を調べることを目的として研究を行った。

3. 研究の方法

(1) 高速度赤外線カメラと人工発泡点を用いた沸騰伝熱面の熱輸送可視化

対流熱伝達特性や界面活性剤を添加して界面特性を変化させた際の沸騰機構の変化は、高速度赤外線カメラを用いた壁面熱輸送の詳細可視化により調べた。図1が実験装置の概略図である。赤外線の透過率が高いサファイアを伝熱壁に用いている。表面にヒータ兼放射体としての役割をもつチタン薄膜(加熱領域サイズ 20mm×10mm)を成膜してあり、その上部に電気的絶縁のため、SiO₂ 薄膜を成膜している。SiO₂ 絶縁層は平滑であるため、通常の金属伝熱面と比較すると発泡点が極端に少ない。そのため、SiO₂ 絶縁層の表面に、超撥水材料のインクジェットプリンティングにより人工発泡点を配置した。本研究では、24個/cm²～318個/cm²の範囲の発泡点密度で実験を行った。人工発泡点である円形の超撥水斑点の直径は約150μmである。伝熱壁の下方から高速度赤外線カメラでチタン薄膜からの赤外放射強度分布を撮影しており、撮影速度は3000fpsで空間分解能は約100μm/pixelである。

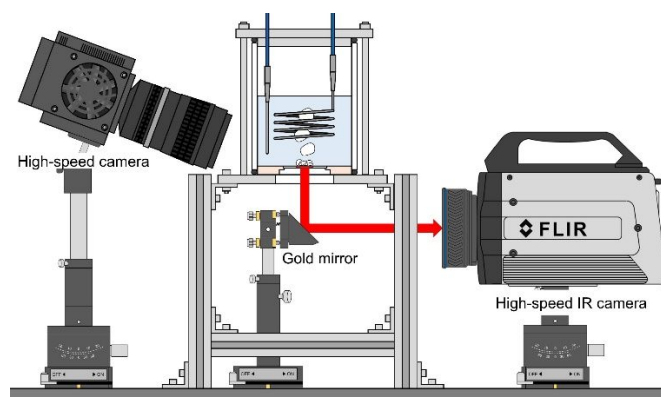


図1 高速度赤外線カメラを用いた沸騰伝熱面の温度分布観察のための実験装置

(2) 薄膜積層型熱流束センサによる三相界線熱輸送の観察

図2が積層型MEMS熱流束センサである。熱流方向に積層された二つの測温抵抗体で計測した温度からフーリエの法則より熱流束を算出するのが本センサの熱流束計測原理である。サイズ 20mm×30mm、厚さ 0.6mm の単結晶サファイア基板上に二つのアルミ薄膜四線式測温抵抗体(RTD)を、絶縁層を挟んで基板厚さ方向に積層した構造をもっている。RTDは膜厚が300nm、測温部長さが0.1mmで、上層、下層のRTDの線幅はそれぞれ、2μm、3μmであり、基板上に三つの熱流束センサが加工されている。裏面には基板下方から三相界線挙動が可視化できるように透明なITO薄膜ヒータを成膜している。熱流束測定において十分な感度を得るためには、絶縁層の熱抵抗を適切に高める必要があり、二センサ間には膜厚が2.8μmの低熱伝導率材料であるSU-8を成膜した。SU-8層上にバッファ層として膜厚200nmのSiO₂を成膜しており、SU-8層とアルミ製RTDの密着性を高めた。また基板の最表面には膜厚200nmのSU-8絶縁層を成膜した。各RTDには定電流電源で発熱が無視できる0.5mAの駆動電流を供給しており、RTDで生じた電圧降下は、低ノイズ差動型計装アンプで100倍に増幅したのち50kHzの速度で計測した。電圧降下と電流値から求まるRTDの抵抗値を、事前に取得した抵抗値の温度依存性を用いて温度換算した。

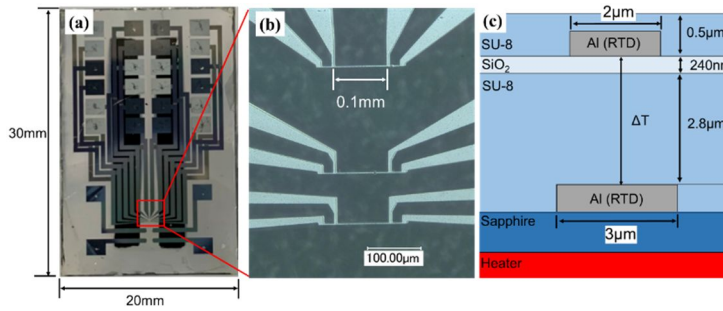


図2 三相界線熱輸送の計測に用いる薄膜積層型熱流束センサ

4. 研究成果

(1) 発泡点密度に依存した沸騰熱伝達特性

図3が赤外線カメラで観察した熱伝達率分布を示しており、人工発泡点の密度の増加に応じて壁面上の気泡数が多くなっていることが確かめられる。図4は沸騰熱伝達率を熱流束に対して示している。熱輸送分布を画像解析して各伝熱素過程（マイクロ液膜蒸発、対流熱伝達、乾き面）に分類する熱流束パーティショニングを行った結果、熱伝達率が熱流束に対して増加するのはマイクロ液膜の面積占有率が増加していくからであり、熱伝達率が89個/cm²~130個/cm²の間で最大値をとるのは、そこでマイクロ液膜の面積占有率が最大になるためと分かった。さらに、熱流束パーティショニングの結果、いずれの発泡点密度においても、全熱輸送量の七割以上を占める対流熱伝達が壁面熱輸送を支配していることがわかった。また、対流領域の平均熱伝達率は、発泡点密度の増加に伴って大きくなることもわかった。壁面熱輸送に最も大きな寄与をもつことが分かった対流の熱伝達メカニズムを調べるために、本課題の研究協力者である、ポール・シェラー研究所の佐藤陽平博士が開発した計算コードを基にして、人工発泡点を用いた実験を再現する数値計算を実施して、実験と近い熱伝達率を再現することができた。今後は数値計算を用いて対流の熱伝達メカニズムを調べていく。

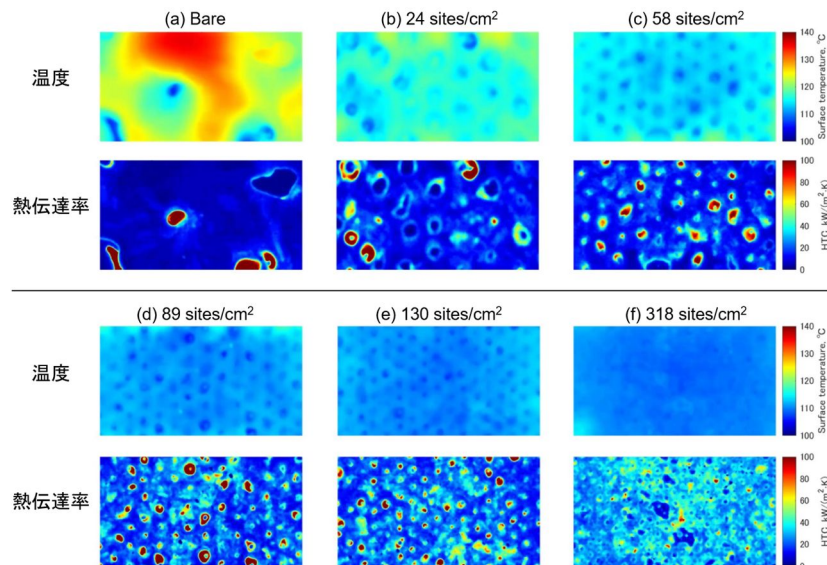


図3 人工発泡点付き伝熱面の温度と熱伝達率の分布 (0.3MW/m²)

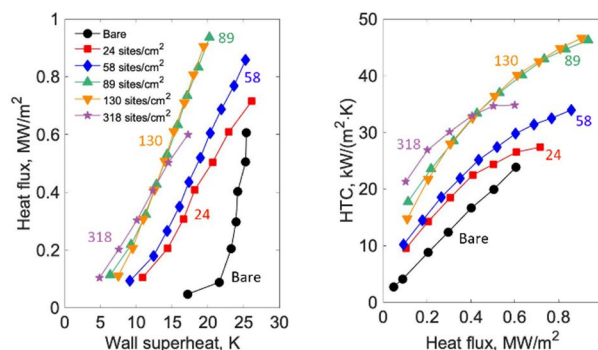


図4 発泡点密度に依存した熱伝達特性

(2) 界面活性剤添加の沸騰熱伝達促進機構

界面特性の変化が沸騰に与える影響を調べるために、界面活性剤添加による熱伝達促進のメカニズムを調べた。結果として、純水では大きくても 15% 程度であったマイクロ液膜の面積占有率が 50% を超え（図 5 の熱伝達率分布において界面活性剤水溶液のほうが高熱伝達率のマイクロ液膜領域の面積が大きいことが読み取れる）、このことにより熱伝達率が大きく向上していることが明らかになった。さらに、マイクロ液膜の面積占有率が向上するのは、気泡の軟化（表面張力低下）、気泡合体抑制、気泡のスライド運動によるマイクロ液膜の形成の三つによることが明らかになった。

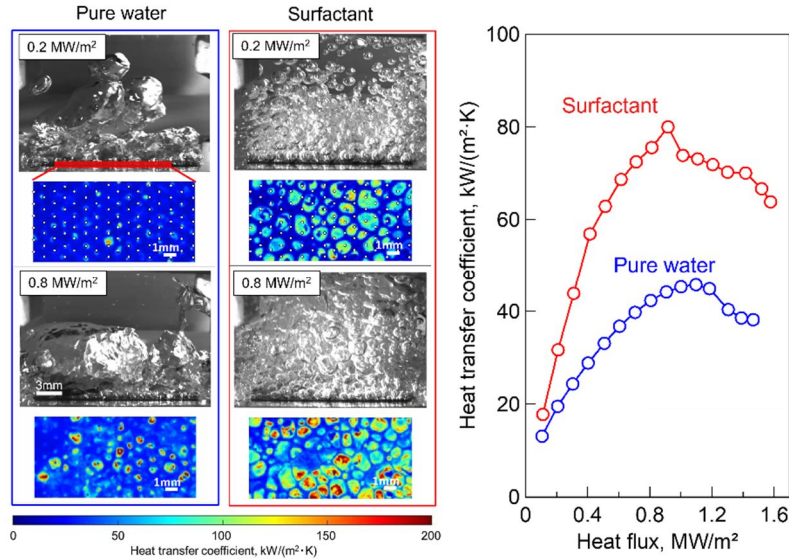


図 5 純水と界面活性剤水溶液の沸騰における熱伝達メカニズムの違い

(3) 三相界線近傍の局所熱輸送計測

図 6 は、過熱度が 10K で発生した孤立気泡の底部で生じる三相界線が熱流束センサ上を通過する過程の撮影結果と、壁面温度と壁面熱流束の時間変化を示している。本実験では、一番左のセンサのみでデータを取得している。液のサブクールの影響で気泡の振動が生じているため、接触線がセンサ上で前進、後退を繰り返している。C 点と D 点の間でセンサ上を後退する三相界線が通過し、 0.65 MW/m^2 の最大局所熱流束を計測した。その後 F 点、G 点においてもピークが見られるが、接触線がセンサに対して角度を持った状態で通過しているため、C、D 点と比較すると計測された熱流束の値は小さい。H 点では後退する三相界線がセンサに対して平行な状態で通過し、その際 0.66 MW/m^2 の最大局所熱流束が観察された。今後この結果を用いて、既存理論の正しさを検証していく。

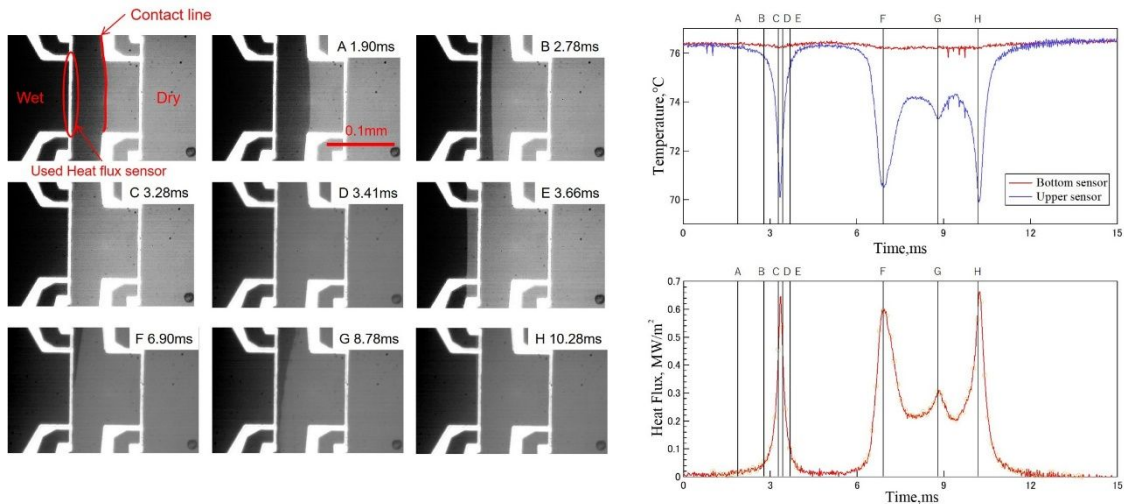


図 6 沸騰気泡底部の三相界線がセンサ上を通過する際に観察された局所蒸発熱輸送

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Yajima Shota, Io Nanako, Miyazaki Koji, Yabuki Tomohide	4. 巻 194
2. 論文標題 Heat flux partitioning and macrolayer observation in pool boiling of water on a surface with artificial nucleation sites	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 122924 ~ 122924
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122924	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 Io Nanako, Tamura Ryota, Tanaka Takanori, Nakamura Jun, Yabuki Tomohide	4. 巻 216
2. 論文標題 Observation of the mechanisms of boiling heat transfer enhancement through the addition of a nonionic surfactant using high-speed infrared thermometry	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 124589 ~ 124589
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124589	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 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 畑中健太, 丸山孝二, Bures Lubomir, Yohei Sato, 矢吹智英
2. 発表標題 MEMS熱流束センサを用いた三相界線近傍の蒸発熱輸送測定
3. 学会等名 第59回 日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井生奈那子, 矢島翔太, 田中孝典, 柴田修平, 宮崎康次, 矢吹智英
2. 発表標題 高速度赤外線カメラを用いた界面活性剤添加による沸騰熱伝達促進機構の観察
3. 学会等名 第59回 日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田村亮太, 井生奈那子, 宮崎康次, 矢吹智英
2. 発表標題 水のプール沸騰における高熱流束域での熱伝達機構の研究
3. 学会等名 熱工学コンファレンス2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井生奈那子, 田村亮太, 田中孝典, 中村淳, 宮崎康次, 矢吹智英
2. 発表標題 非イオン界面活性剤水溶液のプール沸騰熱伝達機構の観察
3. 学会等名 熱工学コンファレンス2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomohide Yabuki, Kenta Hatanaka
2. 発表標題 MEMS sensor measurements of boiling and evaporative heat transfer
3. 学会等名 The 13th Asian Thermophysical Properties Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中 孝典, 井生 奈那子, 森崎 仁紀, 宮崎 康次, 矢吹 智英
2. 発表標題 人工発泡点を付与した伝熱面上のプール沸騰における熱伝達機構の観察
3. 学会等名 第58回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomohide Yabuki, Takanori Tanaka, Nanako Ito, Shota Yajima, Koji Miyazaki
2. 発表標題 CONTRIBUTION OF FUNDAMENTAL HEAT TRANSFER PROCESSES TO WALL HEAT TRANSFER IN SATURATED POOL BOILING OF WATER OBSERVED BY HIGH-SPEED INFRARED THERMOMETRY
3. 学会等名 The Second Asian Conference on Thermal Sciences (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 丸山孝二, Lubomir Bures, Yohei Sato, 矢吹 智英
2. 発表標題 積層型MEMS熱流束センサを用いた三相界線のマイクロスケール熱輸送計測
3. 学会等名 第12回 マイクロ・ナノ工学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 矢吹 智英
2. 発表標題 プール核沸騰における壁面熱輸送機構の直接観察
3. 学会等名 化学工学会 第54回秋季大会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 矢吹 智英
2. 発表標題 水の飽和プール沸騰の熱伝達メカニズム
3. 学会等名 混相流シンポジウム2023 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tomohide Yabuki
2. 発表標題 Observation of heat transfer mechanisms in pool saturated boiling of water and a surfactant solution
3. 学会等名 NSF Thermal Transport Cafe Seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 庄野 竜生, 畑中 健太, Sato Yohei, 矢吹 智英
2. 発表標題 数値計算による水のプール沸騰熱伝達メカニズムの研究
3. 学会等名 第60回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 塚原健, 黒田容保, Shen Biao, 金子暁子, 畑中健太, 矢吹智英
2. 発表標題 ニューラルネットワークに基づく沸騰現象のサーモグラフィ可視化の高速解析システムの開発
3. 学会等名 第60回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 塚原健, 黒田容保, Shen Biao, 金子暁子, 畑中健太, 矢吹智英
2. 発表標題 機械学習を利用した核沸騰における気泡挙動のサーモグラフィ可視化システムの開発
3. 学会等名 混相流シンポジウム2023
4. 発表年 2023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
研究 分担者	Shen Biao (Shen Biao) (80730811)	筑波大学・システム情報系・助教 (12102)	

	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 協力者	佐藤 陽平 (Sato Yohei)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
スイス	ポール・シェラー研究所		