

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：17104

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13706

研究課題名（和文）ミクロスコピック熱流体輸送計測による微小流路内沸騰熱伝達機構の解明

研究課題名（英文）Microscale observation of heat transfer mechanisms in water flow boiling in a minichannel

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・准教授

研究者番号：70734143

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,700,000円

研究成果の概要（和文）：電子機器の冷却などを用途に持つ微小流路内の流動沸騰における熱伝達メカニズムを、微細な熱流束センサを集積したMEMSセンサや高速に温度場・熱輸送場が取得できる高速度赤外線カメラを用いて調べた。沸騰時の壁面上で生じる伝熱素過程の様子を詳細にとらえることに成功し、気泡下に形成される薄液膜の蒸発が支配的な伝熱素過程であり、対流やリウェッティングに伴う熱輸送量は小さいことが示された。本研究の結果を踏まえると、人工発泡点などを用いた上流における核生成の促進によって薄液膜面積を増やすとともに気泡の更新頻度を増やすことで熱伝達率促進（乾きによる熱伝達劣化の抑止）が実現できると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高分解能な計測技術を駆使して詳細な観察を行ったことで、微小流路内の沸騰の描像を明らかにすることができた。得られた知見が具体的な熱伝達促進のアイデアにつながっていくことが期待され、電気自動車用パワーデバイスをはじめとする高発熱密度体を冷却するための新規熱輸送デバイスの開発に貢献する研究が実施できたと考えている。また、高時空間分解能で計測した実験データは数値計算における境界条件や計算結果の検証にも有用であり、今後一層重要性を増す沸騰二相流の数値計算技術の発展にも寄与する。

研究成果の概要（英文）：In this study, we investigated the heat transfer mechanisms in water flow boiling in a minichannel, which is used for cooling electronic devices, by using a MEMS heat flux sensor and a high-speed infrared camera. We succeeded to observe dynamic behavior of fundamental heat transfer phenomena on the wall. The thin liquid film evaporation indicated a high local heat flux that was well over 1 MW/m² and provided a dominant contribution to the wall heat transfer. On the other hand, the contributions of liquid-phase forced convection and rewetting were small.

研究分野：熱工学

キーワード：沸騰熱伝達 熱伝達機構 MEMSセンサ 高速度赤外線カメラ

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

CPU やパワー半導体、高輝度 LED 等の高発熱密度体の冷却や、自動車やプラントにおける排熱再利用のための高効率、長距離熱輸送には、空冷や液冷と比較して高い熱伝達率を持つ沸騰、蒸発熱伝達の利用が必須である。各種電子機器の発熱密度が今後さらに増大すると予想される中、マイクロチャネル内流動沸騰の利用がコンパクトで高性能な冷却デバイスの実現に有力とされ、多くの研究が行われてきた。

気泡がチャネル内壁から拘束を受けて流れ方向に細長く成長するマイクロチャネル内沸騰二相流では、強制対流熱伝達や気泡と壁面との間に形成されるマイクロ液膜と呼ばれる薄液膜の形成、蒸発、ドライアウト、ドライアウト領域のリウエットが生じることが分かっている。これら伝熱素過程は非常に小さな時空間スケールで生じるため、従来計測技術では詳細な計測ができず、いずれの伝熱素過程がどれだけ熱輸送の総量に寄与しているかなど、熱伝達メカニズムが明らかになっていない。なぜ微小流路内沸騰が高熱伝達率を持つのかという学問的問いを解決して現象の描像を明確にすることは、正確な伝熱機構の理解に基づく高性能冷却デバイスの開発、熱伝達予測モデルの構築につながる。また、高時空間分解能で計測された温度データは数値計算における境界条件や計算結果の検証にも有用であり、今後一層重要性を増す沸騰二相流の数値計算技術の発展にも寄与する。

2. 研究の目的

MEMS 熱センサや高速度赤外線カメラを用いたミニチャネル内流動沸騰熱における壁面温度の高速計測により熱伝達メカニズムを解明することを目的とする。

3. 研究の方法

まず、二つの薄膜微細測温抵抗体を、絶縁層を挟んで積層した構造をもつ MEMS 熱流束センサを開発した。次に、実際に水のミニチャネル内流動沸騰を実施して、局所温度・熱流束を計測し、それと同時に撮影した気泡挙動との対応関係から局所熱輸送特性を詳細に調べた。さらに、壁面熱輸送の時空間分布を詳細に観察して支配的な伝熱機構を特定したり気泡成長機構を調べたりするために、高速度赤外線カメラを用いてミニチャネル内流動沸騰における壁面温度を観察した。

4. 研究成果

(1) 積層型 MEMS 熱流束センサの開発

二つのアルミ製薄膜測温抵抗体を、絶縁層を挟むように積層した構造 (図 1(a)) をもつ MEMS 熱流束センサを開発した。これを用いることで沸騰時の局所壁面温度・熱流束を高速に計測することができる。センササイズ (図 1(b)) に対応する空間分解能は $110\mu\text{m}$ で、熱伝導解析によりカットオフ周波数は 10kHz 程度と見積もられた。センササイズ、絶縁層厚さなどを変えることで、計測対象に合わせて時空間分解能を高める (変更する) ことが可能である。絶縁層に、フォトレジストの一種で、低熱伝導率の SU-8 薄膜を採用することで二センサ間に十分な温度差が得られるようにした。シリコン基板上に七つの熱流束センサを流れ方向に 3mm 間隔で配置することで流れ方向の熱輸送分布を捉えられるようにした (図(c))。上層、下層それぞれにおいて、測温抵抗体を直列に接続することで各センサが駆動電流を共有しており、四線式計測の高い精度を保ちながら配線数を減らす工夫を施している。

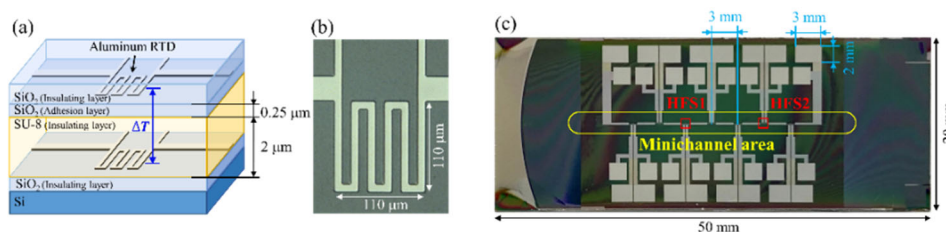


図 1 積層型 MEMS 熱流束センサ

(2) 水のミニチャネル内流動沸騰における局所熱輸送機構

図 2 は、上流部で発生した孤立気泡が成長しながら下流に流れ去る過程で、赤線で囲った二つの熱流束センサで計測した温度と熱流束を示している。ミニチャネルの幅は 3mm 、高さは 0.5mm で加熱部の長さは 18mm である。上流に位置する HFS1 の計測結果から現象を説明すると、(A) において、発生した気泡がセンサ上を覆い始め、それ以降、薄液膜が形成されて蒸発が起るため、熱流束が急上昇して伝熱面温度が急激に低下している。(B) で熱流束が最高値に達した後、熱流束が急速に低下している。これは、壁面のドライアウトによるものである。撮影結果から、ドライアウトはミニチャネルの側壁近傍で発生し、時間経過とともに流路中央部に向かって拡大していくことが読み取れた。側壁近傍で界面の曲率が大きいこと由来して排除流れが生じ、液膜が薄くなり乾きが早く生じることが二相流の理論、数値計算で予測されており、本研究により、

実際の沸騰でそのような現象が生じることが確認できた。(C)の直後にドライパッチのリウエットイングが生じ、熱伝達率の急上昇に伴って素早い温度低下と熱流束の増加が観察できる。計測値と伝熱モデルの計算値の比較により、リウエットイング直後の局所熱輸送は流入した液体内の一次元過渡熱伝導で説明可能なことが明らかになった。その後は、液単相対流熱伝達が観察され、リウエットイングによって急低下した壁面温度が緩やかに上昇している。

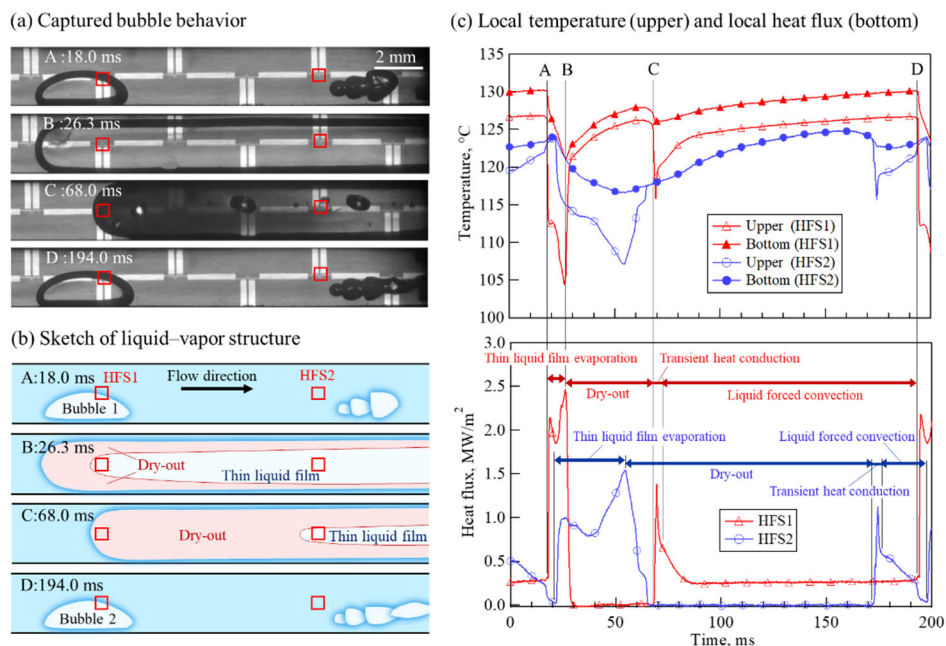


図2 局所熱輸送と沸騰挙動 (0.3 MW/m²)

図3は、0.3MW/m²~0.9MW/m²におけるセンサ上で生じる各種伝熱素過程の全熱輸送への寄与を示している。中流域(図3上段)については、低い熱流束条件では、気泡数が少なく、気相率が低いため対流の寄与が大きく、熱流束の増加に伴って薄液膜蒸発の寄与が増大して、高熱流束域ではほぼすべての熱輸送が薄液膜蒸発によって生じていることがわかった。気相率が高い下流域(図3下段)では、全熱流束条件で薄液膜の蒸発が支配的な伝熱機構であることがわかった。

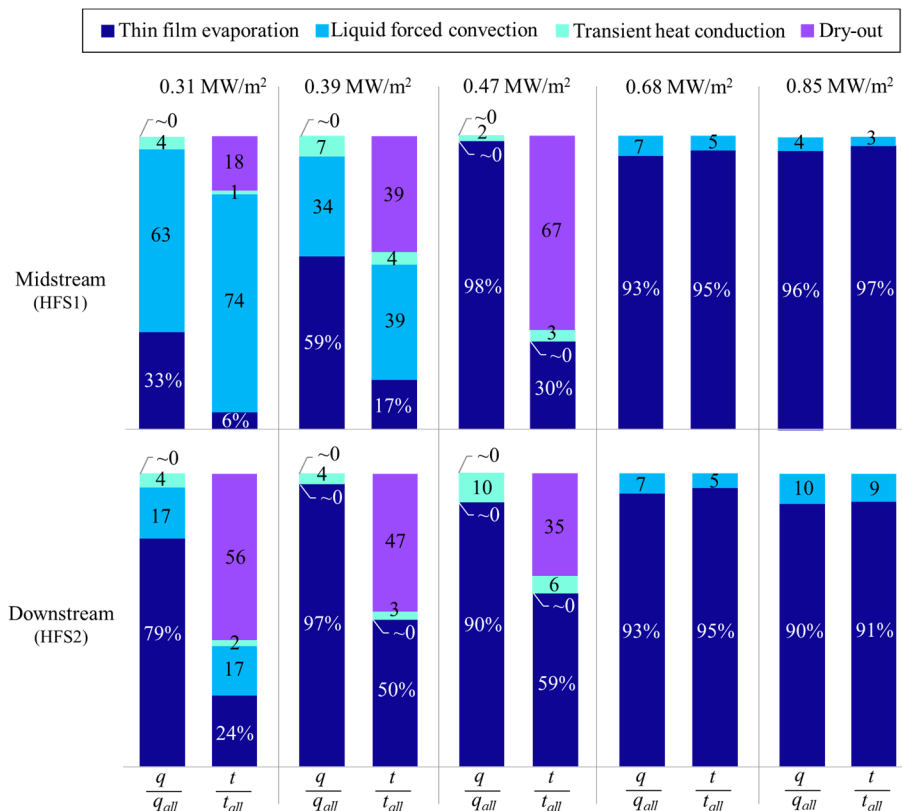


図3 各熱流束における各種伝熱素過程の総伝熱量への寄与(左)と時間割合(右)

(3) 高速度赤外線カメラを用いた熱輸送機構の観察

壁面熱輸送の時空間分布を詳細に観察して支配的な伝熱機構を特定したり気泡成長機構を調べたりするために、高速度赤外線カメラを用いて壁面温度を 4,000fps で観察し、局所熱輸送分布を解析した (図 4)。得られた温度分布や熱流束分布からは薄液膜蒸発、対流、リウエットイングなどの伝熱素過程を詳細に観察することができた。現在、熱輸送分布の画像解析により各種伝熱素過程の総伝熱量への寄与を評価している最中である。図 5 (左) のグラフは気泡体積の時間変化から算出した気泡内潜熱の増加率 (青)、高速度赤外線カメラで計測した薄液膜蒸発熱輸送 (赤)、とそれらの比に対応する薄液膜蒸発の気泡成長に対する寄与 (黒) である。気泡が小さい成長初期段階では薄液膜に触れている気泡の表面積が気泡の総表面積に占める割合が小さいため気泡は周囲の過熱液の蒸発で主に成長するが、気泡が成長して扁平で細長い形状になり壁面上を広く覆うと、薄液膜蒸発が気泡成長に必要な大部分の潜熱を供給していることが示された。ほかにも、伝熱劣化の要因になる乾きの発生の特徴や、上流部での核生成と気泡成長による乾き面への液供給過程を詳細に観察することができた。MEMS 計測の結果も踏まえると薄液膜の面積の増大と乾き面積の減少が高熱伝達率の実現に有効であるといえる。人工発泡点などを用いた上流における核生成の促進によって薄液膜面積を増やすとともに気泡の更新頻度を増やすことで熱伝達率促進 (乾きによる熱伝達劣化の抑止) が実現できると考えられる。

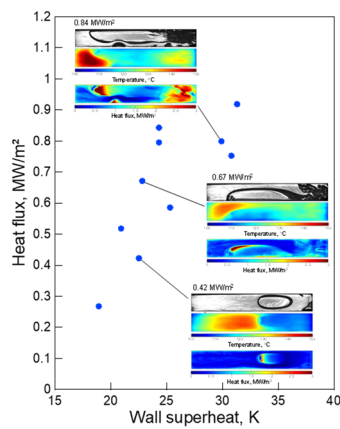


図 4 沸騰曲線

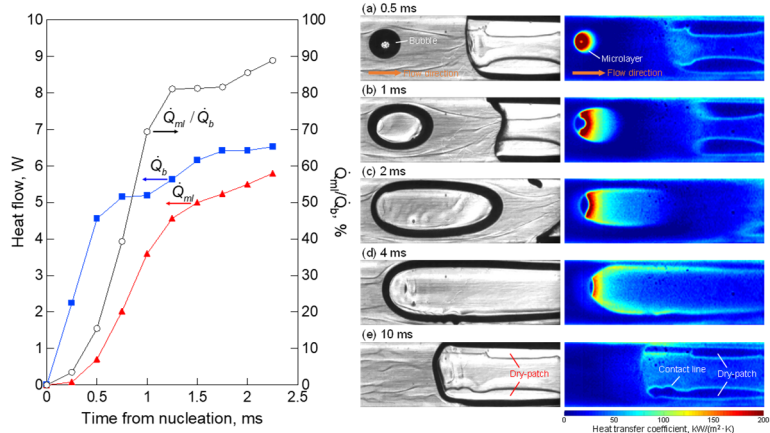


図 5 気泡成長特性 (左) と局所熱伝達率分布 (右)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Morisaki Masanori, Minami Shota, Miyazaki Koji, Yabuki Tomohide	4. 巻 121
2. 論文標題 Direct local heat flux measurement during water flow boiling in a rectangular minichannel using a MEMS heat flux sensor	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Experimental Thermal and Fluid Science	6. 最初と最後の頁 110285 ~ 110285
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.expthermflusci.2020.110285	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9件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 森崎仁紀, 南翔太, 宮崎康次, 矢吹智英
2. 発表標題 MEMS熱流束センサを用いたミニチャネル内流動沸騰熱伝達の高分解能計測
3. 学会等名 第57回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tomohide Yabuki
2. 発表標題 Heat transfer mechanisms in pool nucleate boiling observed by high-speed infrared thermography
3. 学会等名 The 6th Symposium on Theoretical and Applied Mechanics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 森崎仁紀, 南翔太, 宮崎康次, 矢吹智英
2. 発表標題 水のミニチャネル内流動沸騰における局所熱流束の直接計測
3. 学会等名 熱工学コンファレンス2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tomohide Yabuki
2. 発表標題 High-resolution measurement of fundamental heat transfer processes in pool nucleate boiling
3. 学会等名 Progress 100 Symposium and the Second ThermaSMART Annual Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 南翔太, 森崎仁紀, 宮崎康次, 矢吹智英
2. 発表標題 MEMS熱流束センサを用いたミニチャネル内流動沸騰の研究
3. 学会等名 熱工学コンファレンス2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 南翔太, 宮崎康次, 矢吹智英
2. 発表標題 MEMS熱流束センサを用いたミニチャネル内流動沸騰熱伝達の計測
3. 学会等名 第10回マイクロ・ナノ工学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡田幸大, 中野雅子, 矢吹智英, 宮崎康治
2. 発表標題 レーザー干渉法によるプール沸騰気泡底部のマイクロ液膜厚さの計測
3. 学会等名 日本機械学会九州支部北九州講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 近藤悠太, 南翔太, 宮崎康次, 矢吹智英
2. 発表標題 沸騰熱伝達を高分解能計測する薄膜積層型熱流束センサの開発
3. 学会等名 日本機械学会, 第9回マイクロ・ナノ工学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤井翔大, 宮崎康次, 矢吹智英
2. 発表標題 薄液膜の撥水型ドライアウト防止によるミニチャネル内流動沸騰熱伝達促進
3. 学会等名 日本機械学会, 第9回マイクロ・ナノ工学シンポジウム
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 熱流束計測センサ, 熱流束計測装置および熱流束計測センサの製造方法	発明者 矢吹 智英	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2021-048777	出願年 2021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

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		