

研究終了報告書

「沸騰熱伝達特性スペクトルの計測・制御による新熱デバイス創出」

研究期間：2017年10月～2021年3月

(新型コロナウイルス感染症の影響を受け2021年9月まで延長)

研究者：矢吹 智英

1. 研究のねらい

沸騰熱伝達は他の伝熱形態と比較して高い熱伝達率を持っているため、パワー半導体などの高発熱密度体の冷却への応用が考えられている。しかしながら、沸騰が内包する伝熱素過程や核生成現象の時空間スケールの小ささから精密な計測が難しく、熱伝達メカニズムに不明な点が残されている。沸騰冷却器の熱設計に必要な熱伝達予測技術や高性能沸騰伝熱面の構築のためには沸騰熱伝達メカニズムの正しい理解が重要になる。

沸騰は気泡核生成とその後の気泡生成に伴う熱輸送の二つのプロセスから構成されている。熱輸送については、沸騰伝熱素過程である気泡底部薄液膜(マイクロ液膜)の蒸発、乾き面のリウエットング、気泡運動が誘起する対流、のそれぞれが壁面熱輸送にどの程度の寄与を持つかが明確になっておらず、沸騰がなぜ高い熱伝達率を持つかという問いに対する答えが得られていない。核生成については、nm オーダ粗さの平滑な伝熱面上でも、理論で予測される気泡核生成温度を一桁下回る極めて低い壁面温度で沸騰が生じることが報告されており、核生成理論と実験結果の間に乖離が生まれる要因が明らかでない問題がある。核生成現象は沸騰熱伝達率に大きな影響を及ぼす因子であるため、核生成機構を明らかにすることは重要な課題である。

本研究では、(A) 高分解能壁面温度場計測による熱伝達機構の研究と(B) 平滑面上での沸騰核生成機構の研究の、大別して二つの課題に取り組んだ。(A)熱伝達機構の研究では、高い時空間分解能を持つ熱計測技術を駆使して沸騰伝熱を精密に計測して熱輸送機構を調べることを方針とし、高速度赤外線カメラやMEMS熱流束センサを用いた壁面熱輸送の直接計測を通じて伝熱素過程の局所熱輸送特性や総壁面伝熱量に対する寄与を調べた。(B)核生成機構の研究では、まずは、高速顕微鏡を用いた核生成過程の直接観察により、平滑なサファイア伝熱面において核生成が生じる要因を調べた。次に、溶存酸素濃度を10ppb程度まで脱気した水を沸騰媒体に用いることで溶存不凝縮性気体の影響を極力排した条件で沸騰核生成温度を観察することで、核生成理論と実験結果の乖離を生み出す要因を調べた。さらに、溶存酸素濃度を制御・同定できる実験系を生かし、気泡の凝縮効率が壁面熱輸送を左右する可能性のあるサブクール沸騰において不凝縮性ガスと沸騰伝熱特性の関係を調べた。

これらの研究を経て、沸騰の正しい描像を獲得することは将来的な高性能沸騰伝熱面の創製や沸騰熱伝達の数値予測技術の発展に寄与し、高発熱密度を持つ電子機器の冷却技術や、排熱の高効率輸送・利用技術に貢献する。

2. 研究成果

(1)概要

本研究では、沸騰熱伝達機構と平滑面上の沸騰気泡核生成機構の二つの課題を研究した。以下に、最も基本的な沸騰条件である水のプール沸騰において得られた成果の概要を述べる。熱伝達機構については、高速度赤外線カメラを用いた壁面温度場の高速可視化を通じて壁面熱輸送分布を取得し、伝熱素過程の局所伝熱特性と総伝熱量への寄与を調べた。素過程の局所伝熱特性として、マイクロ液膜蒸発の気泡成長に対する寄与、対流熱伝達の促進機構、リウエットング伝熱機構などが明らかになった。伝熱素過程の中では、対流熱伝達が壁面熱輸送に対して最大の寄与を持つことがわかった。粗さや熱物性などの伝熱壁の条件によって各種素過程の総伝熱量への寄与に変化があらわれるが、対流熱伝達が沸騰の高い熱伝達率の基盤をなすという結果は沸騰の理解を前進させる重要な結果と言える。核生成機構については、高速顕微鏡を用いた伝熱面上の観察により、サファイア伝熱面のような平滑面上で沸騰気泡核生成が生じるメカニズムを調べている。気泡核が壁面上に生成する過程を直接可視化することに成功し、壁面上のごみと壁面の間に気泡の一部がトラップされる核生成機構と、壁面上に形成された撥水性堆積物上に気泡の一部が取り残される核生成機構の存在を明らかにした。以下に得られた成果の詳細を述べる。

(2)詳細

研究テーマA「高分解能壁面温度場計測による熱伝達機構の研究」

高速度赤外線カメラを用いて沸騰時のサファイア伝熱壁の温度分布を高速可視化し、得られた伝熱情報を画像解析して熱輸送パーティショニングを実施することで水の飽和プール沸騰における熱伝達機構を調べた。得られた成果を以下にまとめる。

- 伝熱素過程の局所伝熱特性について得られた知見は次の通りである。マイクロ液膜蒸発の気泡成長に対する寄与は50%前後で気泡サイズ、過熱度に対する依存が小さい。残りの約半分の熱量は気泡周囲過熱液の蒸発によって供給される。ドライパッチのリウエットング直後の伝熱は流入液層内の一次元過渡熱伝導に支配されており流入液の温度はバルク液よりも壁面の温度に近い。孤立気泡の運動による対流の促進は小さく、対流熱伝達は気泡間干渉の過程で大きく促進される。
- 気泡表面で生じる蒸発によって過熱液層内の液体が冷やされ、冷やされた液体が気泡間干渉の過程で生じる境界層の攪拌によって壁面近くに輸送されることが、対流熱伝達が大きく促進される要因と考察した。この熱流動過程を伝熱モデルにすることは、残された今後の課題である。
- 伝熱素過程の総伝熱量に対する寄与について得られた知見は次のとおりである。大きな専有面積を示す対流熱伝達が7割を超える寄与を示し、支配的な伝熱素過程であった。1MW/m²、50kW/(m²K)を優に超える高い熱流束・熱伝達率を持つものの面積占有率が10%に満たないマイクロ液膜の蒸発の総伝熱量に対する寄与は30%を下回っている。素過程の寄与は、伝熱壁の粗さや熱物性に依存して変化すると考えられるが、気泡表面での蒸発がアシストする対流熱伝達が沸騰の高い熱伝達率の基盤をなすという点は、沸騰の理解を進める重要な知見と言える。

- より広い条件の沸騰に対する知見を獲得することを目的に、壁面に超撥水材料をインクジェットパターンニングして直径約 150 μm の円形マイクロ人工発泡点を複数付与することで発泡点密度を制御した実験を実施した。基本的には発泡点密度が増加するほど沸騰熱伝達率が向上したが、過剰に発泡点を配置すると気泡の合体によって大きな乾き面がいたるところで生じて熱伝達率が減少する様子が観察された。熱流束パーティションングを通じ、人工発泡点を付与により熱伝達率が大きく変化したものの、平滑面の場合と同様に対流熱伝達が支配的な伝熱素過程であることが示された。（※コロナ延長後の成果）

研究テーマB「平滑面上での沸騰核生成機構の研究」

平滑な伝熱壁上で沸騰核生成が生じるメカニズムを調べた。まずは、サファイア基板の上にITO 薄膜ヒータを成膜して作製した透明伝熱壁の下部から高速顕微鏡を用いて気泡核生成過程を観察し、鏡面加工された平滑な伝熱面上で核生成が生じるメカニズムを調べた。次に、沸騰媒体内の溶存ガスが核生成過程に与える影響を調べるため、超脱気水を用いたマイクロヒータ上の沸騰実験を実施して、核生成温度を観察した。得られた知見は以下のとおりである。

- 高速顕微鏡観察の結果、壁面上のごみと壁面の間に気泡の一部がトラップされる核生成機構と、壁面上に形成された撥水性堆積物上に気泡の一部が取り残される核生成機構の存在が明らかになった。
- 10 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ の濃度まで溶存酸素を軽減した超脱気水を用いて 1cm 角の薄膜ヒータ上の沸騰実験を行ったところ、表面粗さ数 nm から予想される核生成温度を大きく下回る 20K 程度の過熱度で発泡が観察された。清潔な環境を維持したつもりであったが、壁面に付着した微小なゴミや不純物が低過熱度での核生成につながったと考えられる。
- cm オーダの大きな加熱領域では、核生成温度の低下につながる壁面の汚染や微小なゴミの付着が避けられないと判断し、平滑なガラス基板上に成膜した薄膜細線ヒータ（線幅約 25 μm 、長さ 2mm）を用いた局所加熱により加熱領域を限定した沸騰核生成実験を実施した。その結果、水の過熱限界である約 300 $^{\circ}\text{C}$ に近く、130K 程度の大きな過熱（壁面温度が約 230 $^{\circ}\text{C}$ ）を観察できた。この結果を踏まえると、nm オーダ粗さの平滑面を用いた従来研究で核生成過熱度が 10K オーダと低く古典的核生成理論を大きく下回った要因は、加熱壁全域の清潔度を維持できなかったためと考えることができる。本研究においても依然として核生成温度が過熱限界温度を下回っている要因については、古典的理論で考慮されていない壁面上の分離圧（固液分子・原子の相互作用）の影響などが考えられるが、現時点では不明である。AFM を用いた表面性状の詳細な観察と核生成箇所の照らし合わせや分子動力学計算の援用などにより、今後詳細な実験を行う必要がある。（※コロナ延長後の成果）

3. 今後の展開

本研究では、蒸発熱輸送がアシストする対流熱伝達が支配的な伝熱素過程であることが明らかになった。この伝熱素過程を伝熱モデル化して沸騰熱伝達予測式を構築することが今後の課題である。また、研究期間中に、水以外の冷媒に対しても高速度赤外線カメラを用い

た実験を実施しており、その結果フロン系冷媒ではマイクロ液膜が形成されないことがわかった。マイクロ液膜の形成の有無には接触線における局所の力学バランスや熱物質輸送が関与していると考えられる。サブマイクロスケールでの界面形状観察や熱輸送計測を通じた接触線における熱物質輸送・動力学機構の解明も残された課題である。限界熱流束現象や気泡微細化沸騰現象、ライデンフロスト現象など、沸騰の除熱限界と密接にかかわる、高熱流束域での乾き拡大の機構や固液接触条件については、実験を行うことができなかった。本課題で培った、MEMS センサや IR カメラを用いた高速温度計測技術を用いて固液接触条件の解明にも取り組みたい。

4. 自己評価

なぜ沸騰が高い熱伝達率を持つかを明らかにすることを一番の目的として研究を開始した。本課題を通して、高速度赤外線カメラを用いた壁面温度測定技術を習得することができたのは非常に有意義であった。壁面熱輸送の解析を経て、蒸発がアシストする対流熱伝達が最大の寄与を持つという結果が得られた。発泡点密度や伝熱壁熱物性などの影響を受けて各種伝熱素過程の総伝熱量に対する寄与は変化する可能性があるものの、対流成分が沸騰熱伝達の基盤を形成するという知見は非常に重要な結果と考えており、沸騰の長い研究の歴史に刻まれる成果が得られたと考えている。得られた知見は、沸騰の数値計算技術の構築や、沸騰の制御により高熱伝達性を実現する新しい熱交換技術の創製のために重要な情報であるといえる。

研究開始当初は、伝熱促進技術や沸騰を用いた熱ダイオードの開発を研究項目に含めていたが、学術的新規性がより高い研究に集中すべきとの研究総括からの指摘を受けて、それらの課題は中断した。研究項目が多く、分散していたため、この方向修正により熱伝達機構や新たに総括との議論の中で生まれた超脱気水を用いた沸騰の研究に注力できた。

三年次より開始した超脱気水を用いた平滑面での核生成機構に関する研究に関しては、コロナ延長期間を利用して実験を進めることができた。清潔な環境が保証しやすいマイクロヒータ兼温度センサを用いた実験で、200°Cを超える高い核生成温度が観察することができた。依然として、古典的理論で予測される過熱限界温度を下回っている要因については明らかにすることができなかったが、本課題は極小熱流束現象(膜沸騰から核沸騰への遷移)やライデンフロスト現象の理解を深めるためにも重要な取り組みと捉えているため、今後も研究を継続していく。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 2件

1. Masanori Morisaki, Shota Minami, Koji Miyazaki, Tomohide Yabuki, Direct local heat flux measurement during water flow boiling in a rectangular minichannel using a MEMS heat flux sensor, Experimental Thermal and Fluid Science, 2021, 121, 1, 110285

温度センサを基板厚さ方向に積層することで局所熱流束を直接計測できる MEMS 熱流束

<p>センサを開発し、ミニチャネル内流動沸騰の熱輸送機構を調べ、薄液膜の蒸発が支配的な伝熱モードであることを明らかにした。</p>
<p>2. Takanori Tanaka, Koji Miyazaki, Tomohide Yabuki, Observation of heat transfer mechanisms in saturated pool boiling of water by high-speed infrared thermometry, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 170, 121006</p>
<p>高速度赤外線カメラを用いた壁面温度場の高速可視化を通じて水の飽和プール沸騰の熱伝達メカニズムを調べた。各種伝熱素過程の局所伝熱特性を詳細に調べるとともに、対流熱伝達が支配的な伝熱素過程であることを明らかにした。</p>

(2)特許出願

研究期間累積件数: 1件(特許公開前のものも含む)

1	発 明 者	矢吹 智英
	発 明 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,
	出 願 人	九州工業大学
	出 願 日	2021/03/23
	出 願 番 号	特願 2021-48777
	概 要	二つの微小薄膜測温抵抗体を、絶縁層を挟んで基板厚さ方向に積層させた構造をもつ熱流束センサの作製方法や使用方法に関する特許である。本研究では、気泡底部の三相界線近傍の蒸発熱流束の計測に本技術を用いた。

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. 矢吹智英, 日本機械学会奨励賞(研究), 沸騰熱伝達メカニズム解明の研究, 受賞(2021.3)
2. 矢吹智英, 沸騰熱伝達を支配する伝熱素過程, 伝熱, Vol. 57, pp. 20-25, 解説
3. Tomohide Yabuki, Heat transfer mechanisms in pool nucleate boiling observed by high-speed infrared thermography, The 6th Symposium on Theoretical and Applied Mechanics, 日本学術会議, 招待講演(2020.9)
4. Tomohide Yabuki, High-resolution measurement of fundamental heat transfer processes in pool nucleate boiling, Progress 100 Symposium and the Second ThermaSMART Annual Workshop, ThermaSMART, 基調講演(2019.12)