

論文の内容の要旨

1 申請者

防衛大学校 吉田 雅輝

2 論文題目

矩形微細流路沸騰熱伝達の高時空間分解測定と動的伝熱特性

3 論文の内容の要旨（博士:2,000 字程度）

エアコンをはじめとした冷凍空調機器などの熱交換器では、一般に沸騰・凝縮を伴う気液二相流の形態で熱交換が行われる。したがって、気液二相流の伝熱性能を向上させることは機器の省エネルギー化につながり、地球環境の負荷軽減に大きく貢献することになる。その一環として、流路の微細化による熱交換器の小型化・高性能化が進められており、業務用空調機では矩形微細流路を用いた扁平多孔管熱交換器が開発されている。そのため、矩形微細流路の熱伝達を予測するための研究が進められているが、流動沸騰に伴う高速かつ複雑な動的伝熱特性はあまり明らかにされていないのが現状である。動的伝熱特性が明らかになれば、微細流路内熱伝達の予測精度向上につながるとともに、沸騰の数値シミュレーションにおいても、高精度なモデル構築に貢献することが期待できる。

近年、Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) 温度センサを用いた熱伝達の高速度変動測定が可能になり、スラグ流の熱伝達変動測定に基づいた動的伝熱モデルが提案されている。ただし、MEMS センサのような点計測では、複雑な流動様相に対応した動的伝熱特性を実測することは困難である。また、数値シミュレーションの開発も進められているが、現状ではモデル化なしのシミュレーションは不可能である。

本研究では、矩形微細流路の沸騰熱伝達を高速度赤外線 (IR) カメラを用いて高時空間分解能で測定することを試みた。まず、IR カメラを用いて沸騰の素過程（核沸騰、ドライアウトなど）に起因した高速かつ複雑な熱伝達変動を十分な解像度で測定できるか確認するために、高温面に液滴を滴下して沸騰させる簡易な実験を行った。その際、赤外線透過窓材に酸化インジウムスズ (ITO) を成膜した測定面を独自に製作するとともに、測定面の放射率等の光学特性を評価した。また、IR カメラで測定した壁温分布の時系列データを基に、減衰のない熱流束分布の時系列データを算出する方法を構築した。その結果、本手法により、核沸騰気泡の生成、成長に伴う高速かつ微細な熱流束変動を測定できること、また、沸騰熱伝達（熱流束変動振幅 100 kW/m^2 ）を高時空間分解能（ $\sim 1 \text{ ms}$ かつ $\sim 0.1 \text{ mm}$ ）で測定可能であることを確認した。

次に、水平設置した辺長 2 mm の矩形微細流路内で水を流動沸騰させる装置を製作し、沸騰熱伝達を高時空間分解能 (4000 fps , 0.025 mm/pixel) で測定した。同時に、2 台の高速度カメラを用いて流動沸騰様相を可視化した。質量流束は $100, 200 \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$ とし、クオリティ

はスラグ流から環状流までの流動様相が得られる条件とした。また、各条件において壁面熱流束を $10\sim 220\text{ kW/m}^2$ の範囲で変化させた。その結果、流動条件の変化に伴う高速かつ複雑な熱伝達変動特性を明瞭かつ定量的に測定することができた。

さらに、測定した熱伝達率分布を画像解析することで、沸騰の素過程（強制対流、核沸騰、ドライアウト、三相界線、リウエット）に区分し、各素過程が伝熱に及ぼす寄与度を調査した。その結果、本実験条件では強制対流が支配的であり、総伝熱量のほぼ $85\sim 95\%$ を占めることを明らかにした。また、熱伝達率の時空間平均値を従来提案された熱伝達率の相関式と比較した結果、強制対流熱伝達についてはクオリティの上昇とともに上昇する傾向を示し、従来の相関式と定性的によく一致した。一方で、核沸騰熱伝達率は、いずれの相関式もクオリティの上昇と共に徐々に低下する傾向があるのに対し、本実験ではクオリティが上昇しても低下せず、むしろ徐々に上昇する傾向があった。これは、矩形流路ではクオリティが上昇しても角部付近での核生成が活発に行われるためと考えられる。また、低クオリティの条件であっても部分的なドライアウトの発生を確認した。ドライアウトの領域が部分的であれば、その周囲に形成される三相界線の寄与により熱伝達率の低下が抑えられたが、ドライアウトが全域に広がる時間帯が現れると熱伝達率の低下が顕著になることを明らかにした。このようなドライアウトや三相界線の寄与に伴う熱伝達率の変化は従来の研究では定量的に明らかにされておらず、本研究を通じて初めて明らかにすることができた。

また、圧力損失と熱伝達率の関係を調査した結果、全般的な傾向として、熱伝達率が上昇すると圧力損失も同時に上昇することを確認した。ただし、ドライアウトが広がると熱伝達率が低下する一方で圧力損失はあまり変化しないため、特に、ドライアウトが大きく広がって三相界線の寄与が低下すると、圧力損失に対する熱伝達率の低下が顕著になることを明らかにした。

4 キーワード（5 個程度）

「沸騰熱伝達」，「赤外線計測」，「矩形微細流路」，「時空間分解能」，「落下液滴」