

京都大学	博士（ 工学 ）	氏名	竹 山 真 央
論文題目	Convective heat transfer of saturation nucleate boiling induced by single and multi-bubble dynamics （単一または複数気泡によって誘起される飽和核沸騰熱伝達）		
（論文内容の要旨） 沸騰熱伝達は、単相流よりもはるかに高い熱除去能力を備えているため、高エネルギー密度デバイスにおける主な熱伝達（冷却）方法として多くの研究がなされてきた。低熱流束領域で生じる核沸騰に関しては、実験および数値解析により固体伝熱面から流体への熱輸送素過程についての研究がなされてきたが、まだ十分明らかにされたとは言えない。本論文は、単一および複数の発泡点を制御し気泡運動が引き起こす対流の熱伝達への寄与の解明に関する実験研究をまとめたものである。 第1章では、本論文の研究背景として、近年の核沸騰の熱伝達機構に関するモデルおよび実験研究をまとめ、本研究での着目点とその意義が述べられている。また、従来行われてきた実験、特に固体面及び流体の温度計測と発泡点の制御について種々の方法とその特徴を述べている。また、従来提唱されている孤立気泡系核沸騰における対流モデル（Transient conduction モデル、Stagnationm モデル、Micro-convection モデル）について、各モデルの特徴を述べている。以上を踏まえて、本研究に用いた手法とその選定理由を紹介し、本論文の目的・各章の構成を示している。 第2章では、核沸騰気泡の発泡離脱サイクルにおける周囲流体の流れと気泡の運動の可視化計測結果が述べられている。実験は、核沸騰熱伝達の理解に向けて基礎となる上向き平板上の飽和沸騰条件にて行っている。試験部は気泡間の相互作用の生じない単一気泡に着目可能な制御を施しており、流体中に粒子を懸濁し、気泡運動とともに高速カメラで可視化計測を行なっているが、その際、極薄の焦点面に着目可能とするため、シートレーザーを用いない粒子追跡手法を用いたことを述べている。また、懸濁粒子可視化画像の処理方法についても詳細を述べている。気泡成長過程において、先行の直接数値計算の結果から示唆された気泡下部で蒸発する薄液膜への引き込みが存在しないことを明らかにしている。また、この結果から、周囲流体の運動は熱拡散に基づく気泡成長の式と三次元球対称での連続の式で整理できることを明らし、それに伴う界面圧力の変動も推定し、これがこの圧力上昇（仮想質量力）に必要なエネルギーが無視できないことを示している。また気泡の離脱・上昇による周囲流体の流れは気泡上部から下部に回り込む動きのみ観察され、その後すぐに静止することを明らかにしている。気泡の成長から離脱までのサイクルを通して、壁面近傍では気泡の見かけの接触線の動きに連動した水平方向の往復運動のみが観察され、従来のモデルで提唱された熱伝達に有効な流体の攪拌を起こすような渦が生じないことを明らかにした。 第3章では、まず、従来の温度計プローブによる高時空間分解能温度計測において、温度計測対象の相（気液）がカメラによる可視化では判別できない状況がある問題について述べている。その解決方法として、熱電対と既存の電気抵抗を利用した気液相判定方法を組み合わせた気液相判定支援温度計測法を独自に提案し、実際に、25μm 径の素線熱電対プローブの先端計測部分以外に 10μm 膜厚の絶縁コーティングを施した専用のプローブを製作している。原理検証実験として水中で静止した気泡内にプローブを侵入させ、電圧計測とともに可視化撮影を行っており、計測電圧から温度・相の時系列データを取り出して可視化映像と比較し、本手法により単一のプローブで温度計測と気液相判定を同時同位置で行えることを確認している。さらに、本計測システムの沸騰気泡を含む気液二相流に関しても適用し、成長する気泡界面は過熱液に覆われている一方、気泡内部は飽和温度で一定として			

京都大学	博士（工学）	氏名	竹山真央
みなすことができることを確認している。また、気泡後流の温度上昇ピークが蒸発の影響で界面から離れた位置で生じることも明らかにしている。 第4章では、第2章と同様の上向き平板上の単一気泡発泡環境を局所加熱により用意し、独自制作した 25μm 径の K タイプ素線熱電対プローブで 10Hz の温度計測を行なった結果を述べている。単一気泡と複数気泡の発泡条件で実験を行い、壁面近傍の温度変動から気泡運動による対流熱伝達促進の有無の判定を試みている。プローブは、発泡点に対して径方向垂直方向に移動させ数カ所で計測、同時に高速カメラで気泡運動の可視化およびプローブ先端位置の測定まで行うといった詳細計測手法が述べられている。各位置での周期的な温度変動トレースから、粒子追跡実験の結果と同様に水平方向の流れが気泡運動によって引き起こされ、固体面極近傍においてもその流れが存在することを明らかにしている。複数気泡に関しては、気泡間での相互作用による対流の促進効果を検討するために複数の発泡点を Si 基板上にイオンエッチング法で設置し、中間地点での温度を計測している。対流の熱伝達への影響を温度変動の大きさで評価した結果、固体面から 100μm 離れた位置においては対流の促進が確認されたが、固体面近傍 10μm の位置では依然温度変動は小さい状態を保つことを明らかにしている。これらのことから、気泡間相互作用による対流は壁面近傍の過熱液を剥がすことが出来ず、熱伝達への寄与が小さいことを明らかにしている。さらに、プローブが点計測である欠点を補うために赤外線カメラによる固体面温度の分布計測、プローブによる液温計測、高速カメラによる可視化の同期実験を行なっている。レーザー加工により発泡点を設置したステンレス箔をジュール加熱し、沸騰現象を制御しており、発泡点間において固体面から 100μm 離れた位置での温度変動を計測した場合においても固体面では有意に温度変動が生じないことを明らかにしている。 第5章では、これまでに得られた結果から、従来提唱されている孤立気泡系核沸騰における対流モデルで予想される現象との比較を行っている。Transient conduction モデルに関しては、モデルが記述する気泡離脱後の気泡下部に過熱液層の再形成は確認できたが、気泡から離れた位置での温度低下は生じることがなかったことを明らかにしている。Stagnation モデルに関しては、離脱後の気泡がその下部の流体を引き上げる動きは確認できたが、その範囲は気泡直下に限られ、また、気泡側部においては、逆に下降流が生じることを明らかにしている。Micro-convection モデルに関しては、気泡離脱時に気泡が下部の流体を引き上げる動きは確認できたが、モデルが記述する上部の低温流体を引き込む流れは生じないことを明らかにしている。また、対流熱伝達への寄与として、単一気泡条件では、発泡が引き起こす壁面近傍での流体の流れは見かけの接触線の動きに基づいた水平方向に限定された往復運動であり、壁極近傍（10μm）においてもそのような動きは生じるが、温度勾配が小さいためこの運動による温度変動は生じないことを明らかにしている。複数気泡条件では、壁面から離れた位置での気泡間相互作用（合体）による液攪拌促進が発生するが、それによる対流熱伝達へ寄与することが予想される垂直方向の流れは壁面近傍まで達しないことを明らかにしている。また、複数気泡の合体においては複雑な変形運動による温度変動が生じるがその変動は界面極近傍に限られ、合体時に界面が減面近傍を通過しない限り対流熱伝達には寄与しないことも明らかにしている。以上から、従来、核沸騰において固体伝熱面から流体の熱伝達は、マイクロレイヤーの蒸発に約 50% で、その残りは対流熱伝達により輸送されるとする従来の定説は、それを裏付ける現象は確認することができず、対流以外の伝熱機構を見出す必要があることを示している。			

(論文審査の結果の要旨)

論文は、低熱流束領域で生じる核沸騰に関しては、実験および数値解析により固体伝熱面から流体への熱輸送素過程解明を目的として、単一および複数の発泡点を制御し気泡運動が引き起こす対流の熱伝達への寄与に関する詳細伝熱実験の結果を纏めたものであり、得られた主な成果は以下の通りである。

1. 懸濁粒子を用いて、核沸騰気泡の発泡離脱サイクルにおける周囲流体の流れと気泡の運動の可視化計測を実施し、気泡成長過程において、先行の直接数値計算の結果から示唆された気泡下部で蒸発する薄液膜への引き込みが存在しないことを明らかにした。また、周囲流体の運動は熱拡散に基づく気泡成長の式と三次元球対称での連続の式で整理できることを明らかにし、それに伴う界面圧力の変動も推定し、この仮想質量力が無視できないことを見出している。また気泡の離脱・上昇による周囲流体の流れは気泡上部から下部に回り込む動きのみ観察され、その後すぐに静止する現象を見出している。
2. 従来の計測手法の欠点を補うために、熱電対と既存の電気抵抗を利用した気液相判定方法を組み合わせた気液相判定支援温度計測法を独自に提案、製作し、原理実証実験に成功した上で、沸騰気泡を含む気液二相流に関しても適用し、成長する気泡界面は過熱液に覆われている一方、気泡内部は飽和温度で一定としてみなすことができることを見出している。この結果から、気泡内部の温度を確認でき、周囲の流体の温度のみで議論が行うことができることを明らかにしている。
3. 単一気泡の運動によって引き起こされる流体の温度変動の詳細計測を行い、懸濁粒子による可視化実験で明らかになった気泡離脱時の壁面水平方向に生じる流体の往復運動を確認し、さらにその運動が可視化実験では計測できなかった壁極近傍においても生じていることを見出している。
4. 複数気泡の運動および気泡間相互作用によって引き起こされる流体の温度変動の詳細計測を行い、複数気泡の合体においては複雑な変形運動による温度変動が生じるがその変動は界面極近傍に限られ、合体時に界面が減面近傍を通過しない限り対流熱伝達には寄与しないことを見出している。

以上のように、本論文では、核沸騰における単一および複数気泡の発泡から離脱に至るまでの運動によって誘起される対流熱伝達の寄与を気泡周囲の流体運動および温度変動を詳細実験によって評価した結果を纏めたものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和2年11月24日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。