



減圧沸騰を伴う管内気液二相流の流動特性に関する研究

浅野, 等

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2000-04-28

(Date of Publication)

2012-07-26

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

乙2404

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.11501/3173160>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D2002404>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



氏名・（本籍）	あさのひとし 浅野 等	（大阪府）
博士の専攻分野の名称	博士（工学）	
学位記番号	博ろ第201号	
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当	
学位授与の日付	平成12年4月28日	
学位論文題目	減圧沸騰を伴う管内気液二相流の流動特性に関する研究	

審査委員	主査 教授 藤井 照重	
	教授 中島 健	
	教授 蔦原 道久	教授 森田 喜保

論文内容の要旨

サブクール水が断熱条件下で急減圧されることにより生じる沸騰現象は、原子炉の冷却材消失事故時の流量の予測及び低乾き度蒸気やサブクール熱水より仕事を取り出すための二相膨張機におけるエネルギー変換、さらに冷凍サイクルの絞りにおける流量特性において重要とされる。これらは、流路の急縮小による減圧の場合と壁面摩擦による減圧の場合に分けられるが、入口がサブクール水の場合には急減圧により流体が沸騰する場合には、入口温度に対する飽和圧力で必ずしも沸騰は開始せずに遅れが生じる。この遅れは臨界流量及び沸騰開始後の二相流の流動挙動に対し影響することが考えられ、作動流体の減圧沸騰現象を取り扱う機器を設計するには、沸騰遅れの程度と機器性能に及ぼす影響を明らかにする必要がある。減圧時の沸騰核は流体中の溶存ガスや不純物もしくは流路壁面に存在するキャビティより生成されることが考えられる。これは作動流体の種類、流路形状・材質、熱物性の影響を受けると予測されるため不明な点が数多く残されている。

本研究では、サブクール熱水のもつ熱エネルギーを減圧沸騰、膨張させ、力学的エネルギーに変換することを目的とする二相膨張ノズル、そして冷凍サイクルの絞りとして用いられるキャピラリーチューブを取り上げ、沸騰遅れに伴う圧力アンダーシュートの機器性能に及ぼす影響を明らかにし、機器設計の一助とすることを目的とした。

第1章では、上述の機器が利用される背景とシステム概要について述べ、従来の研究内容を示すとともに、これを踏まえたうえで本研究の目的を示している。

第2章では、先細末広形状の二相膨張ノズルに対し、入口をサブクール熱水とした流動実験を行い、ノズル出口噴流による推力、ノズル内軸方向静圧分布の測定結果から沸騰開始圧力を見出し、熱平衡等エントロピー変化を仮定したIHE (Isentropic Homogeneous Equilibrium) モデルによる計算結果との比較から沸騰遅れのノズル性能への影響を評価した。また、推力向上には末広部において液相を十分に加速することが有効であるとの観点から、沸騰遅れによる圧力アンダーシュート及びノズル推力への広がり角と末広部長さの最適化を図った。これより、末広がり率が一定のもとでは広がり角を小さくするほど圧力アンダーシュートは減少し、ノズル性能が向上する、また広がり角が一定のもとでは

末広がり率を大きくするほど液滴が加速され、ノズル性能が向上することが明らかとされた。しかし、広がり角を小さくすること及び末広がり率を大きくすることはいずれも末広部における壁面せん断力の増大を招き、広がり角、末広がり率には最適値が存在することが明らかとされた。また、入口圧力の増大により圧力アンダーシュートが減少し、ノズル性能は向上することが示された。

第3章では、ノズル性能低下の要因の一つに挙げられる、のど部での沸騰遅れに伴う圧力アンダーシュートの低減を目的として、のど部上流に金属製細線を設置する方法を提案し、細線設置の有無及び細線径のノズル性能に及ぼす影響を実験的に考察した。すなわち、のど部上流近傍への細線の設置により圧力アンダーシュートは大きく減少し、ノズル推力係数も向上することが明らかとされた。また、細線設置による圧力アンダーシュート低減効果は入口圧力が低いほど、細線径が太いほど大きくなることが示された。

二相膨張時の流動特性を明らかにするには、流動挙動の可視化と気液間のスリップ速度に関連したボイド率分布の把握が重要である。沸騰核の生成は流路形状・材質の影響を受ける事から実用材料での可視化が望まれる。ここでは、放射線を利用した透過手法の一つである中性子ラジオグラフィ法の適用を検討した。

第4章では、画像処理によるボイド率分布の定量計測に焦点をあて、中性子ラジオグラフィシステムの性能評価及び精度改善の手法についての検討結果を述べている。すなわち、被写体表面で受ける中性子束の強度が高いほど、平行度が高いほど、より鮮明な画像を得ることが出来るが、強度が低い場合に対しても定常流であれば約0.5秒の時間積分を施すことで画質の改善が可能であり、カメラの放射線障害による画像のランダムノイズに対してはモロフォロジ空間フィルタにより空間情報を劣化することなく除去可能であることが示された。また、定量計測に対する可視化システムに依存した技術課題についても示した。

第5章では、サイクロトロン加速器を利用した比較的中性子束の低い中性子ラジオグラフィシステムによる、二相膨張ノズル内流動挙動の可視化結果を示している。中性子束が不安定で低い場合のボイド率定量計測法を提案し、軸方向ボイド率分布を計測し、入口条件の影響を評価した。その結果、ボイド率はのど部から急速に増大すること、入口圧力が高いほど出口のボイド率が高くなることが示された。

第6章では、先細末広ノズル内流動に対し一次元二流体モデルによる数値解析を行い、細線設置ノズルでの実験結果及びボイド率分布の計測結果と比較検討した。構成式には原子炉内熱流動問題の安全評価用としてすでに実績のあるPFIモジュールを用いた。その結果、細線設置ノズルに対して軸方向静圧分布が非常に良い一致を得た。

第7章では、サブクール水の急減圧による減圧沸騰を伴う二相流動の実用例として、冷凍空調機器での絞りとして利用されているキャピラリーチューブ（極細管）を取り上げ、流動挙動の可視化の観点から現象解明を試みた。すなわち、先ず実用機器での現状を把握するため、実用機器（内径0.8mm、銅製）に対し実用条件での流動挙動の可視化を中性子ラジオグラフィ法により行い、ボイド率分布の計測を行った。その結果、冷媒はチューブ内では沸騰せず、出口で急速に沸騰しボイド率が急上昇することが明らかにされた。これは、液冷媒に混入した冷凍機油によるチューブの詰まりを避けるため入口サブクール度を大きくする、もしくはチューブ長さを短く、チューブ径を太くすることでチューブでの圧力損失を小さくした結果であると考えられ、流量に対するチューブの長さの影響が小さいことが示された。また、この可視化実験ではボイド率計測での空間分解能が80 μm であり、詳細な計測を実現している。さらに、内径2mm、長さ1000mのアルミニウム製チューブに対し、フロンR22を

用いたブローダウンによる流動実験を行い、ボイド率分布の計測結果から沸騰遅れに伴う圧力アンダーシュートを推定した。ここでは、簡単な手順により中性子散乱の影響を除去し、ボイド率の定量的に計測する手法を示している。得られた結果から実験条件に対する整理を行うとともに、分離流モデルによる数値解析結果との比較から沸騰直後の熱非平衡状態にあると考えられるボイド率分布に考察を加えた。実験結果では沸騰遅れがあるため沸騰開始時には液冷媒が過熱状態にあり、沸騰開始後のボイド率の上昇勾配が計算結果に対し大きくなることが示された。

第8章では、本研究で得られた結果を総括して示し、合わせて今後の課題について述べた。

論文審査の結果の要旨

本論文は、サブクール液が断熱条件下で急減圧されることにより生じる沸騰現象、例えば原子炉の冷却材消失事故時の流量予測及び湿り蒸気やサブクール熱水より仕事を取り出すための二相膨張機のノズルにおける沸騰遅れに伴う圧力アンダーシュート現象の流動や性能特性に及ぼす研究の成果をまとめたものである。

第1章は序論であり、研究の背景とシステム概要について述べ、従来の研究内容を示すとともに、本研究の目的を説明している。

第2章では、先細末広型の二相膨張ノズルに対し、入口をサブクール熱水とした流動実験を行い、ノズル出口噴流による推力、ノズル内軸方向静圧分布の測定結果から沸騰開始圧力を見出し、熱平衡等エントロピー変化を仮定したIHE (Isentropic Homogeneous Equilibrium) モデルによる計算結果との比較から沸騰遅れのノズル性能への影響を評価している。また、推力向上には末広部において液相を十分に加速することが有効であるとの観点から、沸騰遅れによる圧力アンダーシュートやノズル推力に及ぼす広がり角と末広部長さの最適化を図っている。広がり角を小さくすること及び末広がり率を大きくすることはいずれも末広部における壁面せん断力の増大を招き、広がり角、末広がり率には最適値が存在することを明らかにしている。

第3章では、ノズル性能低下の要因の一つに挙げられるのど部での沸騰遅れに伴う圧力アンダーシュートの低減を目的として、のど部上流に金属製細線を設置する方法を新しく提案し、細線設置の有無及び細線径がノズル性能に及ぼす影響を実験的に考察している。すなわち、のど部上流近傍への細線の設置により圧力アンダーシュートは大きく減少し、ノズル推力係数も向上することが明らかにされている。また、細線設置による圧力アンダーシュート低減効果は入口圧力が低いほど、細線径が大きいほど大きくなることが示されている。

二相膨張時の流動特性を明らかにするには、流動挙動の可視化と気液間のスリップ速度に関連したボイド率分布の把握が重要である。沸騰核の生成は流路形状・材質の影響を受けることから実用材料での可視化が望まれている。ここでは、放射線を利用した透過手法の一つである中性子ラジオグラフィ法の適用を検討した。

第4章では、画像処理によるボイド率分布の定量計測に焦点をあて、中性子ラジオグラフィシステムの性能評価及び精度改善の手法についての検討結果を述べている。すなわち、被写体表面で受ける中性子束の強度が高いほど、平行度が高いほど、より鮮明な画像を得ることが出来るが、強度が低い場合に対しても定常流であれば約0.5秒の時間積分を施すことで画質の改善が可能であり、カメラの放射線障害による画像のランダムノイズに対してはモロフォロジ空間フィルタにより空間情報を劣化することなく除去可能であることが示されている。また、定量計測に対する可視化システムに依存し

た技術課題についても明らかにしている。

第5章では、サイクロトン加速器を利用した中性子束の比較的低い中性子ラジオグラフィシステムによる、二相膨張ノズル内の流動挙動の可視化結果を示している。中性子束が不安定で低い場合のボイド率定量計測法を提案し、軸方向ボイド率分布を計測し、入口条件の影響を評価している。その結果、ボイド率はのど部から急速に増大すること、入口圧力が高いほど出口のボイド率が高くなることが示されている。

第6章では、先細末広ノズル内流動に対し二次元二流体モデルによる数値解析を行い、細線設置ノズルでの実験結果及びボイド率分布の計測結果と比較検討している。その結果、細線設置ノズルに対して軸方向静圧分布に対して実験結果と非常に良い一致を得ている。

第7章では、サブクール水の急減圧による減圧沸騰を伴う二相流動の実用例として、冷凍空調機器での絞りとして利用されているキャピラリーチューブ（極細管）を取り上げ、流動挙動の可視化の観点から現象解明を試みている。先ず実用機器での現状を把握するため、実用機器（内径0.8mm、銅製）に対し実用条件での流動挙動の可視化を中性子ラジオグラフィ法により行い、ボイド率分布の計測を行っている。その結果、冷媒はチューブ内では沸騰せず、出口で急速に沸騰しボイド率が急上昇することが明らかにされ、流量に対するチューブの長さの影響の小さいことが示されている。さらに、内径2mm、長さ1000mのアルミニウム製チューブに対し、フロンR22を用いたブローダウンによる流動実験を行い、ボイド率分布の計測結果から沸騰遅れに伴う圧力アンダーシュートを推定している。得られた結果から実験条件に対する整理を行うとともに、分離流モデルによる数値解析結果との比較から沸騰直後の熱非平衡状態にあると考えられるボイド率分布に考察を加えている。実験結果では沸騰遅れがあるため沸騰開始時には液冷媒が過熱状態にあり、沸騰開始後のボイド率の上昇勾配が計算結果に対し大きくなることが示されている。

第8章は、本研究で得られた結果を総括したものである。

本研究は原子炉の冷却材消失事故時の流出流量の予測、低乾き度蒸気やサブクール熱水を有効利用する二相膨張機、さらに冷凍サイクルの絞りなどにおいて重要となるエネルギー変換や減圧沸騰を伴う流量特性現象について研究したものである。すなわち、性能特性実験や中性子ラジオグラフィシステムを用いた可視化実験によりその現象を明らかにすると共に、先細末広ノズルに対しては二流体モデルなどによる数値解析を行い、実験結果と比較し、良好な一致を得ている。上記の様に管内の減圧沸騰現象について工学上重要な知見を得たものとして、価値ある集積であると認める。よって、学位申請者浅野等は、博士（工学）の学位を得る資格があると認める。