

京都大学	博士 (工 学)	氏名	小 瀬 裕 男
論文題目	沸騰現象の直接数値予測手法構築に関する研究		

(論文内容の要旨)

本論文は、沸騰・凝縮現象の詳細メカニズムを解明するための膨大に蓄積された高時空間分解能可視化実験画像の定量化による詳細データベースの構築と、それに基づく沸騰現象の直接数値予測手法の構築に関する研究成果を纏めたものであり、序論および結論を含め全6章から構成されている。

第1章では本研究に至る背景を要領よく纏め、従来の沸騰に関するレビューを整理して現在までに提案されている沸騰モデルの課題や問題点を整理して本研究の目的や内容について記述している。

第2章では沸騰現象の直接数値予測手法の基礎となる混相流数値解析手法 MARS の概要について記述している。具体的には、基礎方程式である連続式と運動方程式、気液界面勾配を考慮した界面体積追跡法、表面張力モデルや接触角モデルおよび、沸騰現象の解析に必要なエネルギー保存式と沸騰・凝縮モデルについて分かり易く記述している。

第3章では本論文の一つの核となる、沸騰・凝縮モデルの検証のために必要なサブクール・プール沸騰の詳細実験データベースの構築について記述している。具体的には、既往の高時空間分解能の可視化実験で得られている膨大な可視化画像を精密に定量化し、数値解析結果の検証に耐えうる高精度データベースを構築した結果、(a) 気泡成長はサブクール度の増加に伴って抑制され、気泡発生から気泡離脱までの時間は短くなること、(b) 気泡形状はサブクール度が増加するほどより縦長に伸長し、伝熱面から離脱すること、(c) 伝熱面と気泡との見かけの接触角を評価した結果、サブクール度が大きい場合には見かけの接触角の大きな状態が気泡離脱時まで継続されること等を明らかにしている。本データベースを構築したことにより、サブクール・プール沸騰時の詳細な時系列の気泡形状データを参照することが可能となり、沸騰現象の数値解析モデルの検証を可能としている。さらに、サブクール度に依存した離脱時の気泡形状に関する重要な知見が得られ、また、気泡成長過程に対する既存の気泡成長理論式との比較検討により、気泡成長過程の適用範囲を明らかにしている。

第4章では、本論文のもう一つの核となる、MARS に組み込まれている沸騰・凝縮モデルで予測された気泡成長や気泡凝縮・消滅の過程における相変化量の時間変化を構築した可視化実験詳細データベースを用いて検証した結果を述べている。具体的には、構築した可視化実験データベースから得られたサブクール・プール沸騰の気泡成長サイクルのうち、①気泡成長過程および②気泡凝縮・消滅過程に着目した検証を行い、従来の沸騰・凝縮モデルは、詳細データベースや理論式と比較して相変化量を過小評価する問題点を摘出している。この点を解決するため、従来モデルの前提である「準静的熱平衡過程」の適切なモデル表現を検討し、修正相変化モデルおよび相変化時の緩和時間モデルを導入して新たに構築した非経験的な沸騰・凝縮モデルについて詳述している。さらに、この非経験的な沸騰・凝縮モデルに基づく沸騰気泡の成長過程に関する検証計算を通して、可視化実験詳細データベースや既往の気泡成長理論式

京都大学	博士 (工 学)	氏名	小 瀬 裕 男
<p>との比較および検証を行うとともに、気泡成長に関する支配因子の検討を行い、初期温度場に考慮するサブクールの影響や、過熱液による気泡表面での蒸発の寄与が大きいことを明らかにしている。また、効率的に気泡成長段階の時間発展計算を行うパッチワーク計算を考察し、気泡成長初期（慣性支配）から後期（熱伝達支配）にかけての遷移段階について、構築した非経験的な沸騰・凝縮モデルによる数値解析手法により予測できる見通しを得ている。</p> <p>第5章では、サブクール・プール沸騰における単一気泡離脱挙動の数値シミュレーションを実施し、気泡離脱時の気泡形状に対するサブクール度や初期温度場の影響について検討した結果、サブクール度の増加とともに気泡形状はより縦長へと伸長し、気泡発生から短時間で伝熱面より離脱する傾向があること、および気泡アスペクト比の時間変化は実験結果と定性的に良く一致することを示している。さらに、初期温度場が気泡離脱に及ぼす影響について、離脱履歴のある初期熱流動場を用いることで離脱時の気泡形状予測が大幅に改善され、実験結果とも定量的に一致することを示している。また、離脱気泡に伴って温度の異なる複数のプルームが形成される機構を見出すとともに、気泡離脱に及ぼす表面張力と伝熱面濡れ性の影響について検討し、表面張力係数を大きく変化させた場合には、気泡の離脱が促進される傾向を示し、気泡に作用する表面張力係数の大きさが気泡離脱に影響すること、ならびに伝熱面の濡れ性が向上にするに伴い、気泡の離脱が促進され、伝熱基盤内部の温度も低下することを明らかにしている。</p> <p>第6章では、本研究の総括結論を述べるとともに、構築した非経験的な沸騰・凝縮モデルを用いた直接数値予測手法によって、工学上特に重要な役割を果たす限界熱流束の予測の実現に向けた展望や課題について言及している。具体的には、サブクール・プール沸騰可視化詳細データベースの構築を通して得られた知見を整理するとともに、非経験的な沸騰・凝縮モデルの構築と検証に関する研究成果とその新奇性や独創性について記述している。特に、本研究で構築した沸騰現象の直接数値解析手法により、サブクール・プール沸騰時の沸騰気泡核からの気泡成長あるいは気泡の凝縮や消滅に関する素過程を数値シミュレーションによって再現できることを示した点、および従来の二相流モデルにおいて不可欠であった実験相関式を不要とする、新たな非経験的な微視的モデル、準静的熱平衡に基づく「相変化時の緩和時間」という新たな概念を確立できた点に独創性がある。最後に、バーンアウトに至る沸騰現象のメカニズム解明やその限界熱流束の予測を本論文で構築した直接解析手法により可能とすることが、本研究における最終目標であると記述されている。特に、伝熱面上の発泡点密度に従った気泡核（径）分布のモデル化を実現することができれば、過熱度の上昇に伴う発泡点の増加を再現でき、最終的に本研究で構築した直接数値解析手法を基盤とした、非経験的な限界熱流束の予測法の確立が可能になるものと期待している。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、沸騰・凝縮現象の詳細メカニズムを解明するための膨大に蓄積された高時空間分解能可視化実験画像の定量化による詳細データベースの構築と、それに基づく沸騰現象の直接数値予測手法の構築に関する研究成果を纏めたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. サブクール・プール沸騰可視化詳細データベースの構築

既往の高時空間分解能の可視化実験で得られている膨大な可視化画像を精密に定量化し、数値解析結果の検証に耐える高精度データベースを構築した結果、(a) 気泡成長はサブクール度の増加に伴って抑制され、気泡発生から気泡離脱までの時間は短くなること、(b) 気泡形状はサブクール度が増加するほどより縦長に伸長し、伝熱面から離脱すること、(c) 伝熱面と気泡との見かけの接触角を評価した結果、サブクール度が大きい場合には見かけの接触角の大きな状態が気泡離脱時まで継続されること等が明らかとなった。本データベースを構築したことにより、サブクール・プール沸騰時の詳細な時系列の気泡形状データを参照することが可能となり、沸騰現象の数値解析モデルの検証が可能となった。さらに、サブクール度に依存した離脱時の気泡形状に関する重要な知見が得られ、また、気泡成長過程に対する既存の気泡成長理論式との比較検討により、気泡成長過程の適用範囲が明らかとなった。

2. 非経験的な沸騰・凝縮モデルの構築と検証

構築した可視化詳細データベースを用い、「準静的熱平衡過程」を具現化する非経験的な沸騰・凝縮モデルを構築し、混相流数値解析手法 MARS を基礎とした沸騰現象の新たな直接数値解析手法を確立した。具体的には、相変化界面領域に対し、「瞬間的に熱平衡に至る過程」を表現する修正相変化モデルの適用条件として、全界面領域が相変化を終了するのに必要な時間（緩和時間）を導入する、すなわち「無限にゆっくりと変化する過程」をモデル化することによって、非経験的な沸騰・凝縮モデルを実現した。これにより、気泡成長時の蒸発量や気泡凝縮・消滅過程の凝縮量の評価は従来モデルに比べて大幅に改善され、可視化詳細データベースや気泡成長理論式とも定量的に良い一致を得た。これらの結果より、相変化界面における緩和時間の考慮が気泡成長速度や凝縮速度の高精度な予測に対して非常に重要であることを明らかにした。

本論文は、サブクール・プール沸騰実験可視化詳細データベースとそれに基づく非経験的な沸騰・凝縮モデルの構築と実装により、沸騰現象の直接数値解析手法の構築とその検証に成功したものである。本論文により、実験相関式を一切用いずに沸騰気泡核からの気泡成長および凝縮・消滅の素過程を再現できる非経験的な沸騰・凝縮モデルが提示され、その直接数値解析手法が確立されたことは、学術上、実用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、平成24年2月17日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行い、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。