

博士（工 学） 坂 下 弘 人

学 位 論 文 題 名

飽和プール沸騰の伝熱機構に関する研究

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

沸騰伝熱は、火力発電所や各種化学プラント、高集積素子の冷却など広範な工学分野で利用されており、原子炉の設計や安全性評価に当たっても重要な伝熱過程である。また、今後は新型原子炉や核融合炉、超伝導マグネットの冷却、宇宙プラントへの応用など最先端工学分野への適用が考えられている。

沸騰伝熱に関しては過去に膨大な研究が行われており、緊急を要する工学的諸問題についてはそれまでに培われた経験則によって対処してきた。しかし、今日に至るまで沸騰伝熱の基本的な機構の多くは未解決のまま残されており、学問としても十分に洗練された体系とはなっていない。今後の沸騰研究の理論面での発展を促し、沸騰が学問体系として望ましい発展を遂げるためには、沸騰の基本的な諸問題について物理的かつ実験事実と矛盾のない理論モデルを構築することが不可欠である。

沸騰を伝熱面周囲の液の温度や流れの状態によって分類すると、飽和プール沸騰、サブクールプール沸騰、飽和強制流動沸騰、サブクール強制流動沸騰に大別される。これらの沸騰は、低熱流束域では液のサブクール度や流れによってそれぞれ異なる特徴を示す。しかし、熱流束が高く十分に発達した核沸騰域から限界熱流束点を経て遷移沸騰域にかけては、飽和プール沸騰とその他の沸騰は極めて類似した沸騰伝熱特性を示す。したがって、上記4種類の沸騰現象を理解するためには、その基本となる飽和プール沸騰についての十分な知見が必要である。

本研究は、各種沸騰形態の基本である飽和プール沸騰において未解決の問題、すなわち「核沸騰における伝熱機構」、「マクロ液膜形成機構」、「遷移沸騰域の伝熱機構」、「垂直面の限界熱流束機構」について、物理的に妥当な理論モデルを提案し、これらのモデルに基づいて検討を行ったものである。本論文は、全6章より構成されている。各章の要旨は以下の通りである。

1章は序論であり、沸騰研究における本論文の位置付けと各章の概要について述べた。

2章では、核沸騰伝熱の相関式と核沸騰曲線の推算法について検討した。核沸騰の伝熱は一次気泡底部のミクロ液膜を通じての熱伝導が支配的であるとして、これに一次気泡の生長と離脱による伝熱促進効果を加味したモデルを提案した。このモデルを定式化して、熱流束 $q$ 、壁面過熱度 $\Delta T_{sat}$ 、発泡点密度 $n$ 、気液の物性値より成る新しい核沸騰伝熱の相関式を導出した。また、伝熱面上のキャビティの発泡は周囲気泡の生長速度と濡れ特性によって影響を受けると考え、発泡点密 $n$ 、壁面過熱度 $\Delta T_{sat}$ 、伝熱面特性を表す定数、および気液の物性値より成る、特定の伝熱面の発泡点密度を与える相関式を提案した。これら二つの相関式を組み合わせること

とにより核沸騰曲線の推算式を得た。この推算式は、大気圧以下の低圧域から臨界圧力までの広範な条件で測定された既存の沸騰曲線を、実用上十分な精度で推算できる。

3章では、限界熱流束に関するマクロ液膜蒸発モデルを定式化するため、マクロ液膜の形成機構について検討した。従来の液膜厚さの測定はプローブ法を用いて行われていたが、この方法では測定誤差が大きく、また測定は大気圧に限られていた。そこで、プローブ法に替わりマクロ液膜蒸発モデルより得られる熱収支の式を用いて限界熱流束と合体泡離脱頻度よりマクロ液膜厚さを決定する方法を提案した。この方法により、上向き面での限界熱流束点における各種液体の液膜厚さを0.03MPa～0.5MPaの圧力範囲で求めた。また、既存の各種実験事実と矛盾しない液膜形成モデルとして、マクロ液膜は伝熱面上で発生した一次気泡が複数個接合した二次気泡の接合によって形成されるとする新しいモデルを提案した。このモデルに基づいて、マクロ液膜厚さと二次気泡径の比が気泡に働く各種の力の比の‘べき’の積で与えられると近似してマクロ液膜厚さの相関式を導出した。この相関式は、液膜厚さのデータを既存の相関式に比べて非常に高い精度で整理することができる。次に、従来より不明であった中・高圧域におけるマクロ液膜蒸発モデルの妥当性を検討するため、伝熱面から複数個の合体泡が離脱する場合の合体泡離脱頻度の式を導出し、本研究で提案したマクロ液膜厚さの式とともに用いることで中・高圧域の限界熱流束予測式を導出した。この式は、各種液体の臨界圧力までの限界熱流束の実験データを高い精度で予測できることが分かった。

4章では、遷移沸騰の伝熱機構について今まで明らかになっていない疑問点について検討した。周囲からの液進入を防ぐために前方にガラス板を設置した垂直面を用いて実験を行い、高速ビデオにより沸騰様相を観察した。その結果、伝熱面と合体泡の間には液膜が存在し、遷移沸騰域では合体泡離脱前に伝熱面が完全に乾く様子が観察された。これにより、遷移沸騰域においても、限界熱流束点と同様にマクロ液膜蒸発モデルが成立することを明らかにした。次いで、3章の限界熱流束点の場合と同様に、熱収支の式に基づいて遷移沸騰域の時間平均熱流束と合体泡離脱頻度よりマクロ液膜厚さを決定し、遷移沸騰域のマクロ液膜厚さは限界熱流束点に対して提案したマクロ液膜厚さの式で良く整理できることを示した。この知見は、遷移沸騰の液膜形成機構を明らかにしただけではなく、プール沸騰の限界熱流束点を越える高熱流束を実現できる強制流動沸騰に対しても同一の液膜厚さの式を使える可能性を示唆している点でも重要である。

5章では、これまでに物理的に妥当なモデルに基づく検討が行われていなかった、伝熱面が重力と平行の向きに設置された垂直面体系の限界熱流束に対して検討を行った。まず、既存の実験データが少ない垂直線と片側加熱面について実験を行い、限界熱流束の特徴を把握した。その結果に基づき、1)限界熱流束は、合体泡の下に形成されたマクロ液膜が合体泡が直径分だけ移動する間に乾くことで発生する、2)合体泡の二次運動は限界熱流束の発生を抑制するため、線途中での限界熱流束は合体泡の二次運動開始直前の位置で発生する、とする限界熱流束モデルを提案した。気泡の運動を解析しマクロ液膜厚さに3章で提案した式を用いてモデルを定式化し、各種垂直面の限界熱流束予測式を導いた。これらの予測式は、本実験および既存の実験で得られた限界熱流束データを良い精度で予測できることを示した。以上の結果より、垂直面体系の限界熱流束が液膜蒸発モデルによって統一的に説明できることを明らかにした。

6章は結論であり、本論文で得られた新たな知見について総括している。

# 学位論文審査の要旨

主査 教授 熊田俊明  
副査 教授 日野友明  
副査 教授 粥川尚之  
副査 教授 工藤一彦  
副査 教授 飯田嘉宏(横浜国立大学大学院工学研究科)

## 学位論文題名 飽和プール沸騰の伝熱機構に関する研究

沸騰伝熱は、火力発電所や各種化学プラント、高集積素子の冷却など広範な工学分野で利用されており、原子炉の設計や安全性評価に当たっても重要な伝熱過程である。また、最近は新型原子炉や核融合炉、超伝導マグネットの冷却、宇宙プラントなどの分野で、より高い熱流束での利用が考えられている。しかし、沸騰伝熱の機構については、各種の沸騰の基本となる飽和プール沸騰伝熱の分野において多くの未解決の研究課題が残されている。

本論文は、飽和プール沸騰における伝熱機構の解明とその定式化に関する研究成果について述べている。

1章は、本研究の背景と目的および構成について述べている。

2章では、核沸騰伝熱の相関式と核沸騰曲線の推算法を提案している。核沸騰の伝熱では、液を通じての熱伝導が支配的であるとして、一次気泡径に比例する熱伝導層を考え、一次気泡の生長と離脱による伝熱促進効果を加味したモデルを構成している。このモデルを定式化して、熱流束 $q$ 、壁面過熱度 $\Delta T_{sat}$ 、発泡点密度 $n$ 、気液の物性値よりなる新しい核沸騰伝熱の相関式を導出している。この相関式を用いることにより、大気圧以下の低圧域から臨界圧力までの広範な条件で測定された既存の沸騰曲線を、実用上十分な精度で推算できることを示している。

3章では、限界熱流束に関するマクロ液膜蒸発モデルを定式化するため、マクロ液膜の形成機構について検討している。熱収支の式に基づいて、限界熱流束と合体泡離脱頻度よりマクロ液膜厚さを求める新しい方法により、上向き面での限界熱流束点における各種液体のマクロ液膜厚さを、0.03MPa～0.5MPa の圧力範囲で測定している。この測定結果に基づき、既存の各種実験事実と矛盾しないマクロ液膜形成モデルとして、マクロ液膜は伝熱面上の一次気泡が複数個接合した二次気泡の接合によって形成される新しいモデルを提案している。このモデルに基づいて、マクロ液膜厚さと二次気泡径の比が気泡に働く各種の力の比の‘べき’の積で与えられると近似して、マクロ液膜厚さの相関式を導出している。この相関式は、マクロ液膜厚さの測定値を既存の相関式に比べてより高い精度で整理できる。

4章では、遷移沸騰の伝熱機構について詳細に検討している。周囲からの液進入を防ぐために前方にガラス板を設置した垂直面を用いて実験を行い、高速ビデオにより沸騰様相を観

察している。この観察によって、遷移沸騰域においても限界熱流束点と同様にマクロ液膜蒸発モデルが成立することを明らかにしている。次いで、3章の限界熱流束の場合と同様に、熱収支の式に基づいて遷移沸騰域の時間平均熱流束と合体泡離脱頻度よりマクロ液膜厚さを決定し、遷移沸騰域のマクロ液膜厚さは3章で限界熱流束点に対して提案したマクロ液膜厚さの式で良く整理できることを示している。

5章では、これまで理論的検討がほとんどなされなかった伝熱面が重力と平行の向きに設置された伝熱面体系について、限界熱流束の機構を明らかにしている。限界熱流束のモデルを提案し、これを定式化して各種垂直面の限界熱流束の予測式を導いている。これらの予測式は、本実験および既存の実験で得られた限界熱流束データを良い精度で予測できることを示している。以上の結果より、垂直面体系の限界熱流束がマクロ液膜蒸発モデルによって統一的に説明できることを明らかにしている。

6章は、本論文で得られた結論をまとめている。

以上のように本論文は、飽和プール沸騰の物理モデルを構築し、さらにモデルを定式化して実験結果をよく説明しており、沸騰伝熱の進歩に寄与するところ大である。

よって、著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。