

水平の底面と上面を有する垂直円柱まわりの膜沸騰熱伝達に関する研究

山田 山 召

金属の焼入れ、材料の製造工程、緊急冷却時の原子炉等で発生する 3 次元物体まわりの膜沸騰熱伝達を適切に予測することは実用上重要な課題である。金属の焼入れの伝熱に関しては多くの沸騰研究が発表されているものの現状ではまだ知見が不足しており、3 次元物体まわりの膜沸騰熱伝達特性を十分な精度で推定することは困難である。金属の焼入れの初期の段階では、高温に過熱された 3 次元形状の物体は蒸気膜で覆われ膜沸騰で冷却される。従って、この冷却速度を正確に予測することは材質の制御に関連して重要である。一般に、沸騰冷却を行う場合にはサブクールされた液体が使用されるため、液体がサブクールされた条件下での膜沸騰熱伝達の沸騰特性を定量的に把握することが重要であるが、その前提として飽和膜沸騰熱伝達に関する知見が必要である。

第 1 章では、本研究の背景と目的および膜沸騰熱伝達に関する文献調査の結果について述べている。

第 2 章では、水平底面を有する膜沸騰として、伝熱面の姿勢が下向き水平面である場合の理論解析を行った。有限の下向き水平伝熱面から静止液体への膜沸騰においては、伝熱面は中心で最大厚さを持つ安定な蒸気膜で覆われ、伝熱面下の蒸気は伝熱面に沿って中心部から周辺部へと流れ、端部からバルク液体中へ垂直に上昇することが観察されている。観察結果を基にして、有限の下向き水平面からの膜沸騰熱伝達に及ぼす液体サブクール度の影響を実験と理論の両面から定量的に検討し、その結果について述べている。解析手法は液体境界層のエネルギー式を考慮した二相境界層方程式をプロフィール法を用いて解き、液体サブクール度がヌッセルト数に及ぼす影響を理論的に明らかにした。飽和液体のヌッセルト数に対するサブクール液体のヌッセルト数の理論解を、定常法と過渡法(焼入れ)で得られた実験値と比較し、それに基づいて実験値を整理する方法を提案した。実験において大気圧水のサブクール膜沸騰熱伝達の過渡的手法により実験を行い、沸騰特性に関するデータの蓄積を図った。伝熱面の直径は 50mm で、材質は銀製である。これは熱伝導率 $[410\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$ が高いことおよび冷却曲線の再現性が良好であることからである。液体サブクール度の実験範囲は 0 K から 70 K である。伝熱面熱流束は集中定数系近似の仮定のもとに評価されており、実験で得られた熱流束はサブクール度が増大するほど高くなることが明らかになった。提案した伝熱整理式は実験値を $\pm 15\%$ の精度で相関でき、有効性があることを明らかにした。

第 3 章では、水平の底面と上面を有する垂直円柱まわりの過渡飽和膜沸騰熱伝達の実験に基づく測定値を整理するために、伝熱整理法を提案し、その妥当性の検証結果について

述べている。伝熱整理の手法は、有限の垂直円柱を円柱底面(下向き水平面)、円柱側面(垂直面)および円柱上面(上向き水平面)の3面で構成される系としてモデル化し、各々の面で熱伝達係数を評価し、垂直円柱の熱流束を予測するものである。解析においては円柱底面端部と円柱側面下端部において蒸気の質量流量の連続性から定まる無次元パラメータを導出し、さらに、垂直面の熱伝達係数の予測精度を高めるために、蒸気膜ユニットモデルを導入した。実験は過渡的手法で行った。供試円柱の材質には銀を使用した。供試円柱は18種類でディスク状の円柱(直径 100mm、長さ 8mm)から細い棒状の円柱(直径 8mm、長さ 160mm)にいたり、アスペクト比(長さとの直径の比)は 0.08 から 20 の範囲である。伝熱面熱流束は集中定数系近似の仮定のもとに評価されており、実験で得られた熱流束は円柱の長さが長くなる程、また直径が小さくなる程、沸騰特性は良くなることが明らかになった。作成した伝熱整理式は 18 種類の供試円柱に基づく測定値を $\pm 15\%$ 以内で相関しており、整理法の有効性が確認された。また、垂直円柱の飽和膜沸騰下限界点における熱流束の測定値を $\pm 8\%$ の精度で相関できる整理式を作成した。飽和膜沸騰下限界点における伝熱面過熱度はアスペクト比に依存せず概ね 136K となることについても明らかにしている。

第 4 章では、水平の底面と上面を有する垂直円柱まわりの過渡サブクール膜沸騰熱伝達の実験に基づく測定値を整理するために、第 3 章で提案した飽和膜沸騰熱伝達の整理手法を適用し、その妥当性の検証結果について述べている。伝熱整理の手法は、円柱底面、円柱側面および円柱上面の各々の面に対して液体サブクール度の効果並びに熱伝達係数を評価し、垂直円柱の熱流束を予測するものである。円柱側面に対しては気液界面の性状が平滑な部分と波状な部分の2つがあることが膜沸騰現象の観察結果より確認されているので、性状に併せて 2 種類の熱伝達係数で評価を行っている。過渡実験で使用した銀製の供試円柱は 7 種類で、液体サブクール度は 2 K から 30 K の範囲である。伝熱面熱流束は集中定数系近似の仮定のもとに評価されており、実験で得られた熱流束は液体サブクール度が増大するほど高くなること、また膜沸騰下限界点が高過熱度側へ移動し、遷移沸騰領域への移行が早まることが明らかになった。作成した伝熱整理式は 7 種類の供試円柱に基づく測定値を $\pm 15\%$ 以内で相関しており、整理法の有効性が確認された。また、垂直円柱のサブクール膜沸騰下限界点での過熱度および熱流束に及ぼす液体サブクール度の影響についても明らかにしている。

第 5 章では、第 3 章および第 4 章で提案した垂直円柱まわりの飽和およびサブクール膜沸騰熱伝達の伝熱整理式を円柱表面の対流境界条件として適用し、2 次元非定常熱伝導解析により金属の焼き入れ時の冷却速度や円柱内部の温度分布を十分な精度で推定する方法とその結果について述べている。計算結果の妥当性を検証するため、銀および銀より熱伝導率が小さいアルミニウム、炭素鋼(S35C, S45C)、ステンレス鋼の材質を用いて過渡実験を行った。供試円柱の寸法は直径 45mm、長さ 45mm である。実験値と計算値との相関性を検討した。円柱中心部の冷却曲線の計算値は測定値と良く一致していることから、第 2 章および第 3 章で作成した伝熱整理式が妥当であることが裏付けられたものと考えられる。

第 6 章では、第 2 章から第 5 章で得られた知見をまとめている。