

形状と材質が異なる有限垂直円柱の膜沸騰冷却に関する研究

荒木憲一

膜沸騰に関する研究は、伝熱面が単一面（垂直面、上向き水平面等）を取り扱ったものが多いが、産業上の利用を鑑みれば、三次元物体まわりの膜沸騰熱伝達に関する知見が不足している。金属の焼入れ、材料の製造過程、原子炉の緊急冷却等で生じる三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。原子炉の緊急冷却、例えば軽水炉の冷却水喪失事故等においては、原子炉圧力容器に水を注入することによって、炉心を冷却し破損を防止する必要がある。この場合、水を注入した際の冷却開始時に膜沸騰が不可避免的に発生するが、その際の熱伝達過程に関する知見は少ない。このような場合における膜沸騰熱伝達は、炉心健全性評価とも密接に関連しているため、その膜沸騰熱伝達を適切に予測し制御することは、非常に重要である。また、金属の焼入れに関する熱伝達に関しては、多くの研究がなされているものの、現状ではまだ知見が不足しており、水を用いた鋼材の冷却や熱処理を行う場合、冷却初期に発生する膜沸騰熱伝達に関する冷却速度を制御する条件、膜沸騰崩壊条件等の解明が必要である。

三次元物体まわりの膜沸騰熱伝達特性を推定するには、蒸気膜の形状・厚さや崩壊条件等に関する情報が必要であるが、単一伝熱面等に関する従来の研究では、その情報が不十分である。三次元物体まわりの膜沸騰熱伝達に関する研究は、端面を有する有限垂直円柱に関して、茂地・山田らが数多くの銀円柱を用いて実験を行い、半理論的な整理式を提案している。しかしながら、端面形状が水平あるいは半球の場合をそれぞれ独立に検討しているにすぎず、有限垂直円柱の端面形状の効果は熱伝達の観点から総合的に議論されていない。また、実用に供される金属の焼入れ、材料の製造過程、原子炉の緊急冷却等を適切に予測するためには、産業上の利用頻度の高い材料（鋼やステンレス）の材質の違いについての知見も必要であるが、その研究も見当たらない。したがって、産業上の利用可能性の観点から、形状と材質が異なる有限垂直円柱の膜沸騰冷却についての知見が必要となる。

本研究においては、供試円柱の垂直側面長さ L と円柱直径 D とが等しく構成された場合（アスペクト比（縦横比： L/D ）= 1 の場合）を中心に種々の考察を行った。これは、 L/D が極端に小さい場合には薄い円板に近い形状となり、 L/D が極端に大きい場合には細長い棒に近い形状となることから、これらの場合には、従来の単一な形状等に関する研究成果を用いることによって、実用的な精度で予測が可能であることによる。

第1章では、本研究の背景、有限物体まわりの膜沸騰熱伝達の研究動向、本研究の目的および論文構成について述べている。

第2章では、本研究において用いられる、実験装置、供試円柱（形状の異なる4種類の銀柱および材質の異なる4種類の金属円柱）、実験手順、物体内部の温度の測定と壁面熱流束の評価、および膜沸騰下限界点について述べている。

第3章では、有限垂直銀円柱（供試銀円柱）からの膜沸騰熱伝達に及ぼす底面形状と上面形状の影響について実験結果を提示し、考察を行った。本章にて使用される供試銀円柱は、 $L/D=1$ に設定されている。本章では、供試銀円柱として、（VC1）底面と上面が水平な円柱、（VC2）底面が水平で上面が半球状凸面の円柱、（VC3）底面が半球状凸面で上面が水平な円柱、および（VC4）底面と上面が半球状凸面を有する円柱を用い、大気圧水の飽和膜沸騰実験とサブクール膜沸騰実験を行い、銀製の有限垂直円柱まわりの沸騰現象の詳細な観察と実験データの蓄積を行った。ここで得られた実験データに基づき、冷却曲線、冷却速度曲線、沸騰曲線等を作成し、沸騰現象の詳細な観察とこれらのデータ、図表等に基づき、供試銀円柱か

らの膜沸騰熱伝達に及ぼす底面形状と上面形状の影響について考察を行った。

供試銀円柱まわりの膜沸騰の様相は概ね次の通りである。飽和膜沸騰においては、供試銀円柱の全表面は乱れた蒸気膜で覆われている。このような蒸気の様相は、伝熱面過熱度が250 K以上の温度領域について見られる。伝熱面過熱度が250 Kより低い温度領域では、供試銀円柱の底面が水平底面である場合には、水平底面と垂直面下端側には平滑な気液界面が構成され、供試銀円柱の底面が下向きの半球状凸底面である場合には、下向き凸面の底頂部近傍のみが平滑な気液界面で覆われ、下向き凸面の底頂部近傍以外の供試銀円柱表面は乱れた界面の様相を呈している。供試銀円柱のまわりに形成される蒸気膜は、飽和膜沸騰およびサブクール膜沸騰ともに、ほとんど斉時的に全面崩壊する。この蒸気膜崩壊の起点は、VC1とVC2のタイプについては供試銀円柱の水平底面の下端部で発生し、タイプVC3については水平上面の上端部で発生し、タイプVC4については半球状凸上面の支持管の付け根で発生する。飽和水において、膜沸騰熱伝達における底面形状の影響は、底面と垂直側面に生じる蒸気流れに依存して、平均壁面熱流束（円柱全面で平均化された壁面熱流束）の違いは18%程度となる。水平底面を有する供試銀円柱において、平均壁面熱流束は、液体サブクール度の増加に伴い、大きく増加する。これは、垂直側面表面における対流伝熱と表面積比率の両者が大きく支配的に作用することで、全体の伝熱を支配するためであると考えられる。上面表面の熱伝達率は垂直側面表面のそれに対して小さいので、膜沸騰熱伝達における供試銀円柱の上面の形状の影響は小さい。底面形状と上面形状の違いによる膜沸騰特性の違いは、各々の表面での熱伝達率と表面積比率から得られる平均熱伝達率を解析することによって説明可能である。蒸気膜崩壊に対応する膜沸騰下限界点における伝熱面過熱度は、飽和水の場合には供試銀円柱の4つのタイプにおいて、133 Kでほとんど一定である。サブクール水においては、膜沸騰下限界点における伝熱面過熱度は、水平底面を有する円柱の方が半球状凸底面を有する円柱よりも大きくなる。サブクール水中に浸漬された供試銀円柱まわりの膜沸騰を観察すると、水平底面を有する供試銀円柱の場合、底面端部（角部）を有するため、底面端部から垂直側面にかけて非常に薄い蒸気膜が形成される。このため、水平底面の角部では高速の蒸気流れが生じる。一方、半球状凸底面を有する供試銀円柱の場合、凸頂部から垂直側面にかけてその厚さが徐々に成長するように蒸気膜が形成される。したがって、水平底面の場合には、液体サブクール度の増加に伴い、角部の対流熱伝達に起因する垂直側面表面における平均熱伝達率が増加し、平均壁面熱流束の大きさが、飽和水の場合と比べて逆転し非常に大きくなる。

第4章では、有限垂直金属円柱（供試金属円柱）の膜沸騰冷却に及ぼす材質の影響について実験結果を提示し、考察を行った。本章では、供試金属円柱として、(1) 銀製円柱、(2) アルミニウム製円柱、(3) 炭素鋼製円柱、(4) ステンレス製円柱の4つの材料を用いて作製された有限垂直金属円柱を準備し、大気圧水の飽和膜沸騰実験とサブクール膜沸騰実験を行い、供試金属円柱まわりの沸騰現象の詳細な観察と実験データの蓄積を行った。ここで得られた実験データに基づき、冷却曲線、冷却速度曲線、沸騰曲線等を作成し、沸騰現象の詳細な観察とこれらのデータ、図表等に基づき、供試金属円柱の膜沸騰冷却に及ぼす材質の影響について考察を行った。また、ここでは、それぞれの材料にて作製された円柱として、底面形状が異なる二種類の供試金属円柱（水平底面、半球状凸底面）を用意し、底面形状の違いによる影響についても考察を行った。本章において、供試金属円柱の初期温度は、材料の融点に配慮して、550℃～620℃の範囲とした。

4種類の供試金属円柱について測定された冷却曲線は、液体サブクール度と供試金属円柱の熱容量（=密度 ρ ×比熱 c ）の大きさに強く影響を受ける。供試金属円柱の形状に関わらず、冷却曲線の形状は、略等しい ρc 値（ $\approx 2.5 \times 10^6 \text{ J/m}^3 \text{ K}$ ）を有する銀とアルミニウム、略等しい ρc 値（ $\approx 3.8 \times 10^6 \text{ J/m}^3 \text{ K}$ ）を有する炭素鋼とステンレス鋼の二つに分類されることが明らかとなった。また、冷却速度は、液体サブクール度の増加と共に大きくなる。本章においても、供試金属円柱の中心部近傍が温度測定箇所である。したがって、 ρc 値の低い2種類の供試円柱の場合、すなわち、炭素鋼製円柱とステンレス製円柱とについては、実験で得られた膜沸騰下限界点と実際に蒸気膜が崩壊する局所の位置の温度との間には、40 K程度の差があると考えられる。

第5章では、3章および4章で得られた知見をまとめて総括し、今後の展望を行った。