

半球状の凸底面を有する垂直円柱まわりの膜沸騰熱伝達の研究

長崎大学大学院生産科学研究科 豊田 香

金属の焼入、材料の製造工程、原子炉の緊急冷却等で生じる 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。原子炉の緊急冷却においては、シビアアクシデント時の溶解燃料を原子炉容器内に保持し外から冷却を行う手法がとられるが、原子炉容器まわりに膜沸騰現象が起こることを避けられない。

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には、3 次元物体まわりの連続した蒸気膜の形状や厚さに関する情報が不可欠であるが、従来の数学的に取り扱いやすい単一伝熱面からの膜沸騰熱伝達の研究では、接続条件や接続部の気液界面の様相などが明らかでなく困難である。3 次元物体まわりの膜沸騰熱伝達に関する研究は、水平の底面と上面を有する垂直円柱に関して、山田らが数多くの円柱を用いて実験を行い半理論的な整理式を作製して報告しているが、産業利用されやすい曲面状の底面を有する有限の垂直円柱全体からの膜沸騰熱伝達に関する研究は見あたらない。

本研究では原子炉の原子炉容器の底面形状を模した底面が半球状の垂直円柱に関する膜沸騰熱伝達特性を取り扱うが、底面まわりの蒸気膜の気液界面が平滑であると仮定した場合の理論解析から、実際の原子炉容器における底面の膜沸騰熱伝達特性は半球状の凸底面の伝熱特性に対し 9%程度の補正を行えば良いことが推定されるため、底面の形状を半球で代表させ、半球状の凸底面を有する垂直円柱まわりの熱伝達特性を明らかにする。

山田らが報告している水平の底面と上面を有する垂直円柱において、水平の底面における蒸気膜内の水平方向の静圧勾配は蒸気膜厚さの流動方向の変化によって確立されるが、半球状の凸底面を有する垂直円柱における底面まわりの蒸気膜内の上向きの流れは、気液の密度差による体積力（浮力）によって確立され、底面における蒸気の流れのメカニズムに違いがある。そこで山田らが報告している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の研究結果と半球状の凸底面を有する垂直円柱の実験および解析結果の比較を行う。また、山田らが報告している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の研究結果が、半球状の凸底面を有する垂直円柱に適用可能であるかを検証する。

第 1 章では、本研究の背景と膜沸騰熱伝達に関する文献調査の結果について述べた。

第 2 章では、理論解析のモデル化の参考および解析結果との比較を目的に、半球状の凸底面を有する垂直円柱まわりの膜沸騰熱伝達の実験結果を報告した。大気圧水の飽和膜沸騰実験とサブクール膜沸騰実験から、現象観察、冷却曲線および沸騰曲線での伝熱の特性の考察および膜沸騰下限界点における伝熱面過熱度と熱流束についての考察を行った。

第 3 章および第 4 章では、伝熱整理の一般化を目的に半球状の凸底面を有する垂直円柱まわりの膜沸騰熱伝達に関する理論解析と測定値の予測式を作製する。現象観察から液体が飽和液であるか、サブクール液であるかで蒸気膜の様相が違うことが明らかであるため、

飽和膜沸騰の解析とサブクール膜沸騰の解析を分けて行った。

飽和膜沸騰およびサブクール膜沸騰においてそれぞれ、底面、側面および上面で構成される等温壁のモデルを提示し、各面に対して気液界面の性状に適応したモデルを適用した。飽和膜沸騰解析の場合は **Frederking** の簡単な解析を参考に、半球状の凸底面の気液界面が平滑な部分に、気液界面で蒸気が滑らない条件と気液界面で蒸気が完全に滑る条件を与え解析した。サブクール膜沸騰の場合は、半球状の凸底面の気液界面が平滑な部分に、より精密な 2 相境界層理論を適用し解析した。気液界面が波状である部分および上面の解析は飽和膜沸騰解析で得られる平均熱伝達係数にサブクール度の効果を反映させて評価した。

実験結果と理論解析結果の比較では、飽和膜沸騰解析において 2 相境界層理論による解析結果は上記の **Frederking** の 2 つの条件を与えた簡単な解析解のあいだに位置することを示し、2 相境界層理論による解析結果の妥当性を示した。さらに、気液界面が平滑な部分に 2 相境界層理論を適用した解析から得られる平均熱伝達係数に 1.7 の補正係数を乗ずることで、液体サブクール度が 0K から 30K における、直径 32mm、全長 48mm の過渡データを ±15% 以内の精度で予測できることを明らかにした。

第 5 章では、有限長さの円柱からの膜沸騰に関して、底面形状が半球状の凸底面である場合と山田らによって報告されている底面形状が水平である場合の比較を行った。

飽和膜沸騰においては、様相の観察、平滑な気液界面から波状の気液界面に移る位置での蒸気速度、蒸気膜厚さおよび蒸気の質量流量と各面からの平均熱伝達係数に関して比較した。現象観察から、底面と側面の接続部における気液界面は、底面形状が半球状の凸底面である場合は乱れているが底面形状が水平である場合は平滑であり、接続部での角の影響を受けている。平滑な気液界面から波状の気液界面に移る位置での蒸気速度、蒸気膜厚さおよび蒸気の質量流量の比較では、同じ伝熱面過熱度で比較したとき、底面形状が水平である場合が半球状の凸底面である場合よりもそれぞれ勝り、最大速度はおおよそ 1.8 倍、蒸気膜厚さはおおよそ 1.1 倍および質量流量はおおよそ 1.3 倍となる。底面形状が水平である場合は半球状の凸底面である場合と比較して、底面における蒸気の流れのメカニズムが異なり底面における蒸気膜が厚くなるため、平均熱伝達係数はおおよそ 0.5 倍の $100\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ となる。

サブクール膜沸騰においては、理論解析結果を基にした各面からの平均熱伝達係数の比較および山田らが報告している水平の底面と上面を有する垂直円柱に関する膜沸騰熱伝達の整理式が、底面形状が半球状の凸底面である垂直円柱の伝熱特性の予測にどこまで適用可能であるかの議論を行った。液体サブクール度が 0K および 10K の場合は、現象に違いはあるが、全体の蒸気膜が厚いため円柱全体の沸騰特性に角の影響はあまり現れず、山田らの整理式による予測値に近い。液体サブクール度が 20K および 30K になると底面で発生する蒸気が少なくなることに加え、底面と円柱側面の接続部で角の影響を受け蒸気膜が薄くなり円柱側面下端側の熱伝達が促進されるという底面形状の違いが現れ、水平の底面を有する垂直円柱の整理式を半球状の底面を有する垂直円柱に適用した場合の予測値が実験値と比較しておおよそ 25% 高くなる。

第 6 章では、第 2 章から第 5 章で得られた知見をまとめ総括を行った。