

冷媒の水平内面ら旋溝付鋼管内蒸発流における流動様相と熱伝達に関する研究

長崎大学大学院生産科学研究科

東井上 真哉

管内蒸発流は、主に冷凍機や空調機、ヒートポンプなどの蒸発器で起こる現象で、流路内の流動と伝熱を明らかにすることは、これらの機器を開発・設計する上で重要である。気体(蒸気)と液体が混在して管内を流れる場合、圧力や流量などの運転条件、粘性や表面張力などの流体の物理的性質に依存して流動様相は多様に変化し、熱伝達特性も流動様相に追従して変化する。さらに、近年では、蒸発器には管の内面に微細な溝をら旋状に施した内面ら旋溝付管が、通常使用されてきた平滑管に代わり広く使用されており、その場合の流動様相は平滑管の場合と比べてより一層複雑になる。管内蒸発熱伝達係数を精度よく予測するためには、熱伝達特性が異なる流動様相毎に伝熱整理を行うべきである。しかし、内面ら旋溝付管内の流動様相を判定するための十分な情報は得られておらず、また、物理的根拠、例えば流動様相、を考慮して熱伝達係数を予測する方法は現在のところほとんどみあたらない。

本研究では管内蒸発流の実験を容易に実現できるフロン系冷媒 HCFC123 と HCFC22 を試験流体に用いて実験を行い、水平内面ら旋溝付鋼管内の熱伝達特性と流動様相について詳細に検討する。また、実験データを基に熱伝達特性を決定していると考えられる内面ら旋溝付管内の流動様相を明確に分類し、これらの流動様相を予測するための整理式を提案する。さらに、物理的な根拠に基づいて熱伝達係数を予測するため、流動様相を考慮した熱伝達係数の予測手法を提案する。

第 1 章では、本研究の背景および目的を述べ、本研究の意義を明確にし、本論文の構成を記述するとともに、これまで数多く報告されている水平管内蒸発流の研究から本研究に関連する流動様相と熱伝達に関する文献を調査している。文献調査は、本研究を遂行するにあたって基本的な考えとなる水平平滑管を対象とした研究と水平内面ら旋溝付管を対象とした研究で構成されている。

第 2 章では、実験装置、試験伝熱管、実験方法、実験データの整理方法、管周平均熱伝達係数の定義について説明している。また、沸騰を伴う熱伝達は伝熱面表面の粗さに強く影響されることから、試験伝熱管の伝熱面表面をレーザー顕微鏡で撮影し、通常使

用されている平滑銅管および平滑鋼管との表面性状の差異を事前に検証している。

第3章では、液单相流の流動と伝熱の実験を通じて実験装置および計測機器の妥当性を検証している。また、内面ら旋溝付管内の液单相流熱伝達係数は平滑管に対して提案されている Dittus-Boelter の形式で整理することができる。

第4章では、内面ら旋溝付管内の気液二相流の流動と伝熱の実験を行い、圧力損失、管周平均蒸発熱伝達係数および流動様相の測定結果についてそれぞれ考察している。伝熱の実験に関しては、圧力 0.2~1.1MPa、質量速度 100~300kg/(m²・s)、熱流束 5~25kW/m² の範囲で管周平均熱伝達係数を測定し、圧力、流量、熱流束の影響を考察している。さらに、管周方向の壁温分布の測定値から伝熱面上における液膜の状態についても検討し、熱伝達特性に影響すると考えられる内面ら旋溝付管内の流動様相を (1) 管頂側が乾く分離流、(2) 管頂側が濡れる分離流、(3) 環状流、および(4) 管周全域に極めて薄い液膜が形成される環状流、の4種類に分類できることを示している。

第5章では、内面ら旋溝付管の流動様相を予測するための整理式を作成している。分離流と環状流の境界となるクオリティに関する予測式は、平滑管に対して提案された森らの濡れ境界角度の予測式を基に整理している。管頂側が乾く分離流から管頂側が濡れる分離流へ遷移するクオリティおよび環状流と管周全域に非常に薄い液膜を形成する環状流へ遷移するクオリティに関する予測式をそれぞれ作成している。これらの予測式から判定した流動様相は実験データと良く一致する。

第6章では、内面ら旋溝付管において主要な4種類の流動様相に対して熱伝達係数の予測式を作成し、予測値と実験データとを比較検討している。環状流域の熱伝達係数の予測式は Chen の形式で整理し、Chen の式に含まれる核沸騰の寄与分に関しては高松らの方法を用いて整理している。管周全域に非常に薄い液膜が形成される環状流域の熱伝達係数については、この流動様相での伝熱機構が熱伝導支配という仮定に基づき整理している。分離流域における管頂側の熱伝達係数については、伝熱面が乾く場合と溝構内に液膜を形成する場合の2種類に対してそれぞれ予測式を作成している。流動様相を予測し、管周平均熱伝達係数を予測した結果、全実験データ数の89%を±30%の範囲内で予測でき、物理的な根拠に基づいて熱伝達係数を予測することで従来の経験的な熱伝達係数の整理式と比べて大幅に予測精度を改善することができた。このような熱伝達係数の予測手法は従来の研究にはみあたらず、新しい手法である。

第7章では、第3章から第6章で得られた重要な知見をまとめている。