

論文の内容の要旨

論文題目 扁平多孔管内流動沸騰の伝熱特性
(Characteristics of Flow Boiling Heat Transfer
in Rectangular Minichannels)

氏 名 田中 千歳

本論文は、定置用空調機の熱交換器用途として注目されている扁平多穴管に着目し、扁平多穴管としては一般的な水力直径1mm程度の矩形流路内流動沸騰現象について調べ、まとめたものであり、全6章より成っている。

第1章では研究背景として、次世代冷媒の選択と、熱交換器の細管化について述べている。

本研究の実験で使用したR1234yfには、オゾン層破壊係数がゼロ、地球温暖化係数が4という利点がある一方で、二重結合の化学的不安定性に起因して微燃性を有するという欠点があり、室内等の密閉空間への冷媒漏洩時の安全対策が課題である。この為、冷媒充填量を削減できるコンパクト熱交換器の開発がR1234yf冷媒の定置用空調機導入への必須事項である。また、R1234yf冷媒は、現行の定置用空調機冷媒R410Aと比較して低圧作動である為、気液密度比が大きく、二相配管内での圧力損失が増大するので、低圧損熱交換器の開発も必要と考えられている。

熱交換器のコンパクト化と低圧損化を同時に実現する技術が熱交換器の細管化である。熱交換器内伝熱管を細管化すると、管内体積が減少し、冷媒充填量を削減できる。また細管熱交換器では、細管化しても冷媒流量を維持する為に伝熱管をマルチフロー化させるので、配管内圧力損失の低減も可能になる。

従来型のクロスフィンチューブ式熱交換器の細管化は、管内径3mm程度が限界であったが、近年オールアルミでろう付けにより製造され、扁平多穴管を伝熱管とする熱交換器が着目されている。扁平管熱交換器は機械拡管工程を含まない為、管内形状の任意設計が可能であり、水力直径1mm程度の細管化も実現できる。扁平管は管断面積に有効に穴を配置する為に、矩形流路を有することが一般的である。しかし、矩形流路内の流動沸騰現象に関する研究で、特に定置用空調機用途である低流量・低熱流束域における知見は少なく、研究が望まれていると述べられている。

第2章では、従来研究と比較することで、本研究目的を述べている。

一般に矩形細管流路内で、特に低流量域では、流動の慣性力の影響よりも冷媒の表面張力の影響が大きくなり、流動伝熱様式が従来伝熱管と異なると考えられている。矩形流路では特に表面張力により流路四隅に冷媒が集積することで、管内ボイド率や液膜厚さの分布が変化し、従来円管の強制対流と核沸騰による伝熱モデルだけではその流動伝熱現象を説明できないと考えられている。既に多くの研究者が水力直径1mm程度の円形細管や矩形細管流路内において低流量時に熱伝達率が向上する実験結果を示している。一方でその伝熱様式に関しては、細管内では流動がプラグ流となり、特に矩形流路では蒸気プラグにより液冷媒が四隅に

集積し、流路平面に生成されるごく薄い液膜の蒸発熱伝達率が円流路よりも高い熱伝達率をもたらすという報告や、矩形流路では流路四隅が沸騰核として機能し、核沸騰が伝熱を促進するという報告や、矩形細管においても強制対流が伝熱を向上しているという報告もあるなど、一貫した理解は未だ得られていない。

以上を踏まえ、研究目的を以下のように述べている。①水力直径1mm程度の矩形細管内流動沸騰熱伝達率を、低流量・低熱流束域にて測定すること、②矩形細管内流動沸騰を可視化し、伝熱様式を考察すること、③矩形細管流路内伝熱機構を解明し、適切な伝熱モデルを提案すること、の三つである。

第3章では、矩形細管流路内可視化実験についてまとめている。銅ブロックの表面に0.9mm角の並列16流路を切削し、上面をガラスで蓋をすることで、矩形流路内流動伝熱様式が観察できる。矩形流路の寸法と、流量・熱流束・使用冷媒等の実験条件は、全て次章にて述べる伝熱実験に供した扁平多穴管の実験と全く同じであり、比較や考察がしやすいように工夫した。観察は高速度カメラを用いて行い、銅ブロックの裏面に貼られたヒーターで加熱熱流束を、ポンプやバイパス弁で冷媒流量を調節する。

可視化映像から、矩形流路では液冷媒が表面張力により四隅に集積し、流路平面部にごく薄い液膜が生成されることが観察された。この液膜は、特に低流量である程薄く、ドライパッチを伴いながら蒸発していることも観察された。また低熱流束の方がドライパッチは少なく、液膜が安定的に存在しやすい傾向が見られた。矩形流路内流動沸騰では核沸騰は流路四隅にて観察され、高熱流束の方が沸騰は盛んであった。

第4章では、扁平多穴管内流動沸騰伝熱実験とその結果と考察を述べている。扁平管は垂直に配置され、直流電源により通電加熱されることにより、R1234yf冷媒の垂直上昇流の流動沸騰熱伝達率を求めた。扁平管外壁温度は素線径0.1mmのT型熱電対により計測され、管内冷媒温度は、管出入口の冷媒圧力を直線近似して求めた冷媒圧力に対する飽和温度としてREFPROP9.0を用いて算出した。なお、本伝熱実験は測定精度を高めるために、試験蒸発管を断熱材で覆った上で扁平管外壁温度と同温度に設定した空気ダクト内に配置し、熱漏れを減らす努力を行った。また、ヒーター加熱や二重管式加熱では、管外壁温度測定は温度勾配のある表面での測温となり、種々の誤差が発生し測温精度が悪化する為、通電加熱方式を採用した。計測結果の不確かさ解析が行われ、また二次元熱伝導シミュレーションを用いて二次元的な管内温度分布や実験精度が評価され、巻末の付録に記載されている。

矩形流路を有する扁平多穴管と、円流路を有する扁平多穴管の熱伝達率の実験結果比較から、全ての実験条件下で矩形流路の方が円流路よりも高熱伝達率であることと、その傾向が低流量・低熱流束に特に顕著であることが分かった。可視化結果と併せて考慮すると、矩形流路では低流量時には表面張力の影響が増大し、より薄い液膜が生成され、また低熱流束にはその液膜ドライパッチが抑制され、伝熱が向上していると考えられ、矩形細管流路での伝熱は薄い液膜の生成とその安定的な存在が重要な伝熱要素であると考えられる。

矩形流路の実験結果同士を比較すると、低流量の実験で熱伝達率が向上し、また低熱流束の実験で熱伝達率が向上するという結果となった。これらは従来円管内の強制対流や核沸騰の伝熱モデルとは真逆の傾向にあり、従来モデルや伝熱相関式では、本実験条件下での矩形流路内流動沸騰を説明・予測できないことがわかる。この矩形流路特有の伝熱様式は、表面張力により生成される薄く伝熱抵抗

の小さな液膜の蒸発熱伝達と、そのドライパッチの抑制によって説明ができる。可視化実験では流路四隅での核沸騰も確認されたが、伝熱実験では低熱流束で伝熱が向上する結果となった為、矩形細管流路内の核沸騰の伝熱寄与効果は液膜蒸発と比較すると効果は限定的であると考えられる。

最後に、熱伝達率の実験データを、他の相関式と比較したが、いずれの式も、本実験値の傾向や値を予測できておらず、本研究分野は引き続き研究が必要であると述べている。

第5章では、可視化実験と伝熱実験から結論付けられた矩形細管流路内特有の良好な熱伝達率を有する液膜蒸発熱伝達を表現するモデルとして、管内液膜厚みモデルを作成し、実験値と比較考察している。

液膜蒸発熱伝達を考える際、気液界面における蒸発抵抗は、液膜厚み方向の伝熱抵抗より著しく小さいので、液膜蒸発熱伝達は液膜厚に関する一次元熱伝導で表現できる。

一般的に、二相流において気液界面形状を構成する因子は、界面張力と界面剪断力であると考えられている。界面張力が相対的に大きな系では界面曲率が一定となるような界面形状を採り、界面剪断力が大きな系では液膜内の剪断力も大きくなり、液膜厚みが一樣となるような界面形状を採ると考えられる。しかし、矩形流路内環状流を考える際、界面剪断力が主流方向に作用する力であるのに対し、界面張力は界面曲率の方向である流動断面方向に作用する力であり、二つの力の方向は直交するので力学的にそれらの関連性を定量的に評価することは困難である。

ここで、今回Smithによるボイド率算出モデルを参考に、矩形流路内液膜厚みを求める等速度ヘッドモデルを提案した。液膜を四隅に集積した一定の曲率を有する部分と、流路平面部に生成された曲率の無い部分の二つに分類したとすると、四隅部での液膜は界面曲率とYoung-Laplaceの式により、平面に生成した液膜より圧力が小さいことがわかる。しかし、液膜内に四隅方向に圧力の勾配があるとすると、平面部の液膜は四隅に全て引き寄せられてしまい、安定的な薄い液膜は存在し得ないことになる。この為、四隅部の液膜の低圧は冷媒流動によって補償されていると考え、液膜平面部の流速ヘッドと四隅液部の流速ヘッドの差が圧力差と等しいというモデルを作成した。なお、液冷媒は、四隅部と平面部においてそれぞれ別の一様な速度を有するものと仮定し、四隅部では液膜が厚く壁面での拘束を受けにくいことから、四隅の液速度は平面部の速度よりも大きいものとする。

本モデルでは、冷媒流量と乾き度を与えた時、液冷媒の速度ヘッド差と四隅部の界面形状による静圧差が一致するように界面形状を定める。本モデルは低流量である程冷媒の四隅集積量が増大し、生成される液膜が薄くなる定性的傾向を表現することに成功したが、熱伝達率の実験値と比較すると算出された液膜厚さは分厚く、熱伝達率を低く見積もってしまう。この為、液膜厚さから熱伝達率を算出するモデルとしては、更なる工夫が必要である、と結論付けている。

第6章では、可視化実験、伝熱実験、液膜厚み算出モデルの三つの研究結果から得られた知見をまとめている。