

論文審査の結果の要旨

氏名 田中 千歳

冷凍空調機器用冷媒として、以前からフルオロカーボンが使用されている。オゾン層保護の観点からクロロフルオロカーボン(CFC)冷媒やハイドロクロロフルオロカーボン(HCFC)冷媒の使用が規制され、ハイドロフルオロカーボン(HFC)冷媒への転換が進んでいる。しかし、地球温暖化係数(GWP)値の高い HFC 機が普及するにつれ、使用時の冷媒漏洩や廃棄機器から回収されない冷媒の大気漏洩が多いことが問題になり、その抜本的な解決のためには、GWP 値の低い冷媒への転換が急務であることが認識されてきた。様々な冷凍空調機器のうち、カーエアコンは冷媒 R1234yf への転換が見えてきたが、ルームエアコンやパッケージエアコン用冷媒の低 GWP 化の研究は、端緒についたばかりである。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 1 前後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必要とされている。また、R1234yf 冷媒は、現行の定置用空調機冷媒 R410A と比較して蒸発潜熱が小さい為、冷媒循環量が多くなり、配管や熱交換器での圧力損失が増大するので、低 GWP 冷媒の実用化のためには低圧力損失熱交換器の開発も必要である。以上のような背景から、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として、熱交換器の細管化に注目している。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、細管化することにより、熱伝達性能が向上し、伝熱管をマルチフロー化させることにより、圧力損失の低減も可能になる。

アルミ製扁平多穴管を伝熱管とする熱交換器は機械拡張工程を含まない為、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。扁平多穴管にフィン等をロウ付けしたコンパクト熱交換器は、低GWP冷媒に適した次世代の低圧損熱交換器である。本研究では、さまざまな流路形状を有する扁平多穴管を試作し、管内部の冷媒流動を観察するとともに、伝熱性能を測定し、特に定置用空調機用途である低流量・低熱流束域に適した形状を発見している。また、伝熱性能を推定する上で重要な環状流域域における液膜形成モデルを提案し、その妥当性について考察している。

本論文は 6 章より構成されており、第 1 章では研究背景として、次世代冷媒の選択と、熱交換器の細管化の必要性について述べられている。第 2 章では、従来研究との比較と、本研究の目的が述べられている。第 3 章では、扁平多穴管内の細管流路を流れる冷媒の挙動を可視化した実験についてまとめられている。第 4 章では、扁平多穴管内流動沸騰伝熱実験について、結果と考察が述べられている。第 5 章では、矩形細管流路内の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て実験値と比較し、考察されている。第 6 章は、結論で本研究を総括している。

細管流路内冷媒流動の可視化実験については、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、流路内流動伝熱様式を観察している。流路は矩形断面のものと円形断面のものを製作し、隅部の曲率半径が流動や沸騰現象に与える影響を明らかにしている。流動様相は高速度カメラを用いて観察し、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している。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を観察し、ドライパッチの発生が熱伝達に大きく影響していることを見出している。また低熱流束、低流量の条件では、ドライパッチの発生が抑制され、液膜が安定的に存在しやすい傾向が見られることを見出している。

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ている。通電加熱方式を採用することにより、高精度な熱伝達率の測定に成功している。矩形流路を有する扁平多穴管と、円形流路を有する扁平多穴管の熱伝達率の実験結果の比較から、全ての実験条件下で矩形流路の方が円形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を発見している。従来、凝縮器では矩形流路では凝縮液が四隅に吸い寄せられ、平板部の液膜が薄くなり、円形流路より伝熱性能が高いことが知られていたが、蒸発器においても矩形流路の方が伝熱性能が高いことを示したことは本研究が初めてである。このことにより、ヒートポンプ用熱交換器（冷暖房の切り替えによって、蒸発器としても凝縮器としても使われる）として、矩形流路を有する扁平多穴管が優れていることを見出した。また、既存の伝熱相関式では、このような実験結果を推定できないことが示されている。

矩形流路内の伝熱機構を考える時、隅部液の沸騰による熱伝達と平板部液膜蒸発熱伝達が寄与していると考えられるが、本研究では後者が支配的であると考えている。液膜蒸発熱伝達において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と考えている。本研究では、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ている。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表面張力による圧力差と等しいというモデルを作成している。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ている。本モデルにより低流量である程、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ている。気液の等速度ヘッドモデルで液膜形成を予測できることを示したことは、今後の本分野の研究進展への寄与は大きい。しかし、熱伝達率を定量的に予測するには、未確定な要素が多く、今後の研究の継続が必要となっている。

本研究では、矩形流路を有する扁平多穴管と、円形流路を有する扁平多穴管の熱伝達率の実験結果の比較から、全ての実験条件下で矩形流路の方が円形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を発見し、ヒートポンプ用熱交換器として矩形流路扁平多穴管を低流量・低熱流束条件で使用することが最も良いことを示している。これは、低 GWP 冷媒の実用化へ向けて、工学的、工業的貢献は顕著である。

本研究の全般にわたって論文提出者が主体となって実験及び解析を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（環境学）の学位を授与できると判定する。