

## 高沸点冷媒HF0/HCF0系の水平管内沸騰・凝縮熱伝達 および圧力損失

|        |   |
|--------|---|
| 著者     | 劉 宇飛  |
| 学位名    | 博士(工学)  |
| 学位授与機関 | 東京海洋大学  |
| 学位授与年度 | 2020  |
| 学位授与番号 | 12614 博甲第574号   |
| URL    | <a href="http://id.nii.ac.jp/1342/00001983/">http://id.nii.ac.jp/1342/00001983/</a> |

博士学位論文内容要旨  
Abstract

|               |                                      |            |       |
|---------------|--------------------------------------|------------|-------|
| 専攻<br>Major   | 応用環境システム学専攻                          | 氏名<br>Name | 劉 宇 飛 |
| 論文題目<br>Title | 高沸点冷媒 HFO/HCFO 系の水平管内沸騰・凝縮熱伝達および圧力損失 |            |       |

モントリオール議定書の改正により、冷凍空調機器に使用される冷媒は現行の HFC 系冷媒に代わる新規の低温温室効果冷媒およびそれら新冷媒を適用した冷凍空調機器の開発が急務となっている。家庭用空調機に使用されている冷媒 R32 や R410A は臨界温度が低く、作動圧力が高いため、高温水や蒸気を生成するヒートポンプ機器およびバイナリー発電装置の作動媒体には適さないことから、臨界温度が高く、温室効果が小さい作動圧力が低くなる HFO および HCFO 系高沸点冷媒の開発が進められている。一方、冷凍空調機器の運転時の二酸化炭素排出量削減のためには、システム性能の向上が必要であり、システム性能に左右する比重の大きい熱交換器の高性能化は必要不可欠である。熱交換器性能の高性能化として、冷媒側伝熱促進は管内面に微細な溝加工を施したら旋状の溝付管が開発されており、空気側の伝熱促進を図るとともに単位面積当たりの伝熱促進の増大が図られている。

溝付管に関する伝熱性能や溝形状の影響については多数の研究が報告されているが、対象とする冷媒は HCFC および HFC 系であり、新規冷媒の HFO および HCFO 系冷媒の熱伝達および圧力損失特性に関する詳細な研究は少なく、次世代熱交換器の熱設計やサイクル性能解析を行う際に必要となるそれらの冷媒伝熱特性の把握は十分とは言えない。

そこで本研究では、高温用ヒートポンプやバイナリー発電サイクルに適用できる低 GWP 冷媒の沸騰および凝縮熱伝達および圧力損失特性を実験的に検証し、次世代の熱交換器設計に有用なデータベースの構築を行うとともに、溝付管による伝熱促進効果、これまでに提案されている平滑・溝付管内の熱伝達および圧力損失に関する整理式の適用性を検証したのちに、最適な予測式の提案を行った。実験では、外径 9.52 mm の平滑管と溝形状が異なる 2 種類の溝付管を使用し、HFC 系の R134a や R245fa の代替候補である低 GWP 冷媒の HFO 系 R1233zd(E), R1336mzz(E), R1336mzz(Z), HCFO 系 R1224yd(Z) およびそれら混合冷媒を対象に行った。本論文の概要は以下の通りである。

第 1 章では、研究の背景を示すと同時に、純冷媒および混合冷媒を対象とした水平平滑管および溝付管における沸騰流および凝縮流の摩擦圧力損失と熱伝達に関する先行研究を概説し、本論文の意義および目的を明確に示した。

第 2 章では、本研究で用いた実験装置、テストセクションの詳細および平滑管・溝付管の仕様についての詳細を示した。加えて、測定・実験方法および実験条件について示した。

第 3 章では、実験時の熱平衡クオリティの算出など、全体にかかわるデータ整理法について示した。

第 4 章では、純冷媒 R1224yd(Z), R1233zd(E), R1336mzz(E) および R1336mzz(Z) の平滑管および溝付管の沸騰流の実験を行い、摩擦圧力損失および沸騰熱伝達率の実験結果を示すと同時に、先行研究で提案されている整理式との比較を行った。(1) 平滑管および溝付管の沸騰流における摩擦圧力損失は、従来提案されている整理式で予測可能である。(2) 平滑管の沸騰熱伝達率は、質量速度が  $100 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$  以下では R1224yd(Z), R1233zd(E), R1336mzz(E) および R1336mzz(Z) の同程度である。質量速度  $100 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$  の高クオリティ域および  $200 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$  の場合、R1336mzz(Z) は、他の冷媒に比して 2.4 倍程度と高い値を示した。溝付管の沸騰熱伝達率は、質量速度  $100 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$  以上では R1224yd(Z) および R1233zd(E) は、他の冷媒に比して 2.0 倍程度と高い値を示した。(3) 平滑管の沸騰熱伝達率は、対象とした高沸点冷媒の相違によって特性が異なり、従来の整理式で予測精度不十分である。溝付管の沸騰熱伝達率は、従来の整理式による予測値は溝形状の相違により予測精度が異なり、溝形状による促進効果を予測す

るには不十分である。

第5章では、従来の整理式で比較的良い相関を示した森らの整理式をもとに、低圧冷媒の水平平滑管の沸騰熱伝達率を最適に相関する整理式を示した。本整理式は、本研究で得られた R245fa, R1224yd(Z), R1233zd(E), R1336mzz(E), R1336mzz(Z)の実験値に加え、他の研究者によって報告された高沸点冷媒の実験値についても良好な相関を示した。

第6章では、純冷媒 R1224yd(Z), R1233zd(E), R1336mzz(E)および R1336mzz(Z)の平滑管および溝付管の凝縮流の実験を行い、摩擦圧力損失および凝縮熱伝達率の実験結果を示すとともに、先行研究で提案されている整理式との比較を行った。(1) 平滑管および溝付管ともに凝縮流の摩擦圧力損失は、従来提案されている整理式で予測可能である。(2) 平滑管における凝縮熱伝達率は、流動様相によって異なり、せん断力の影響が支配的となる強制対流凝縮域では熱伝達率は顕著に増加する。従来提案されている整理式は、層状流域で冷媒種類の相違によって予測傾向が異なっている。(3) 従来提案されている整理式による溝付管の凝縮熱伝達率の予測値は、いずれも溝形状の相違により予測精度が異なり、溝形状による促進効果を予測するには不十分である。

第7章では、平滑管に対して適用できる凝縮熱伝達率の整理式を示した。凝縮熱伝達率は、平滑管に蒸気せん断力が支配的な強制対流凝縮項で表面張力を考慮し、重力の影響が強い自由対流凝縮項ではヌセルトの水膜理論に基づき断面における液膜面積をボイド率で相関して、それぞれの項を実験データにより最適化を行った。

第8章は、非共沸混合冷媒 R245fa/R1234ze(E)の平滑管および溝付管の沸騰・凝縮流の摩擦圧力損失および熱伝達率の実験結果を示すとともに、冷媒組成による温度グライドが伝熱特性に及ぼす影響を実験的に検証し、非共沸性の影響について考察した。(1) 平滑管および溝付管における熱伝達率は、純冷媒 R245fa および R1234ze(E)よりも小さく、R1234ze(E)の質量分率の増加に伴って温度グライドが増大し、低下する。(2) 平滑管の熱伝達率については、従来の整理式により予測可能である。

第9章は、非共沸混合冷媒 R1336mzz(E)/R1336mzz(Z)の平滑管および溝付管の沸騰・凝縮流の摩擦圧力損失および熱伝達率の実験結果を示すとともに、純冷媒 R1336mzz(E), R1336mzz(Z)および R245fa と比較し、伝熱特性を検証した。(1) 平滑管および溝付管の沸騰熱伝達率は、R1336mzz(Z)は全質量速度域において R245fa の 0.5 から 0.8 倍低い値を示し、R1336mzz(E)は R245fa の 0.4 から 0.7 倍低い値を示した。非共沸混合冷媒 R1336mzz(E)/R1336mzz(Z)の沸騰熱伝達率は、温度グライドの影響でさらに低くなり R245fa の 0.3 から 0.5 倍低い値を示した。(2) 平滑管および溝付管の R1336mzz(Z)の凝縮熱伝達率は、沸騰流と異なり、R245fa と同程度の値を示した。R1336mzz(E)は、R245fa の 0.6 から 0.8 倍低い値を示した。非共沸混合冷媒 R1336mzz(E)/R1336mzz(Z)の凝縮熱伝達率は、温度グライドの影響で低湿度域では R245fa の 0.3 から 0.5 倍低い値を示した。

第10章は、本論文の総括を示した。