

# フロン系冷媒を用いた水平微細溝付管外の凝縮熱伝達率の予測

著者	松野 友暢
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567号
URL	<a href="http://id.nii.ac.jp/1342/00002007/">http://id.nii.ac.jp/1342/00002007/</a>

# 博士学位論文内容要約

申請者氏名: 松野 友暢 (学籍番号 1562020)

論文題目: フロン系冷媒を用いた水平微細溝付管外の凝縮熱伝達率の予測

地球温暖化問題の深刻化を背景に行われたモントリオール議定書のキガリ改正により、冷凍空調業界では、低 GWP 冷媒やノンフロン冷媒への転換が進められている。このような中、ターボ冷凍機でも地球温暖化係数の小さい HFO 系冷媒への代替が進められつつある。また、環境面と安全面から熱交換器の一層の小型化が求められており、凝縮器には外面に 3 次元構造フィンを持つ伝熱促進管が使われている。一方、ターボ冷凍機で使用されるシェルアンドチューブ式の凝縮器における、管外凝縮熱伝達に関する研究は種々のフィン形状を持った伝熱管を用いて数多く行われている。しかしながら、3 次元構造フィン形状については、その形状と凝縮熱伝達率について体系的にまとめられたものは少なく、3 次元構造フィンが与える凝縮熱伝達率への影響が十分に解明されているとは言えない。また、近年使用されている HFO 系冷媒の伝熱特性については研究事例が少なく、多段で使用した場合のインアンデーション影響を考慮した研究はさらに少ない。

本研究では、ターボ冷凍機の凝縮器に用いられる、外径約 19mm の平滑管と種々の外面フィン形状を持つ伝熱促進管を用いて、HFC 系冷媒および HFO 系冷媒の水平管外凝縮熱伝達実験を行い、単管およびインアンデーション影響を模擬した場合の熱伝達特性を明らかにするとともに、フィン形状と冷媒物性が伝熱性能へ及ぼす影響を実験的に明らかにするとともに、機器設計や形状開発に有益となる 3 次元構造フィンを持つ 3 次元微細溝付管の凝縮熱伝達率の予測式の検討を行った。

実験は、シェルアンドチューブ型の凝縮器と電気ヒータを設置した蒸発器を配管で接続したもので行った。冷媒蒸気は、凝縮器下部に設置した蒸発器から凝縮器に供給され、凝縮器に設置した管内に冷却水が流れる試験伝熱管の外面で凝縮される。液化した冷媒は配管を通じて蒸発器に戻る。また、試験伝熱管の上段から冷媒液を散布することで、インアンデーションの影響を模擬できるようにした。実験には、試験伝熱管として、外径約 19mm の平滑管、ローフィン管 3 種類、3 次元構造フィンを持つ 3 次元微細溝付管 6 種類および、外径約 16mm の 3 次元微細溝付管を用いた。試験冷媒には、HFC 系冷媒 R134a および R245fa、HFO 系冷媒 R1234ze(E) および R1234yf を用いた。測定は冷媒飽和温度 40°C 一定、管内水流速一定とし、冷却水温度は 8°C から 36°C の範囲で行い、冷媒液の供給量は  $1.0 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$  から  $9.5 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$  の範囲で行った。

## 水平平滑円管の管外凝縮

R134a と R245fa を用いた水平平滑円管での管外凝縮熱伝達の単管およびインアンデーション実験を行い、凝縮熱伝達率の実験結果を示した。また、試験装置および評価方法の健全性確認のため、Nusselt の式との比較、Wilson-Plot 法および壁面温度を測定した場合の比較、液膜内の温度分布の考慮の有無について検証した。

結果、単管実験での凝縮熱伝達率を Nusselt の式と比較した場合、液膜の乱れの影響や液膜内の対流の影響のため、Nusselt の式に似た傾向を示すものの高い値を示すことを確認し、測定方法の健全性と整理方法について問題がないことを確認した。

インアンデーション実験では、膜レイノルズ数の増加に伴い凝縮熱伝達率は低下するが、膜レイノルズ数 300 から 500 で液膜の対流が促進されると凝縮熱伝達率は増加に転じることを明らかにするとともに、チューブピッチの相違により、給液管散布された冷媒液の下段管へ接触する速度が変化することで、凝縮液膜内の対流拡散が変化するため、凝縮熱伝達率に影響をすることを明らかにした。

## ローフィン管の管外凝縮

フィンピッチ 26 および 34 山/インチのローフィン管について、R134a および R245fa を用いた管外凝縮熱伝達の単管およびインアンデーション実験を行い、凝縮熱伝達率の実験結果を示した。

結果、単管実験ではいずれの試験条件でも、凝縮面過冷度の変化に対する凝縮熱伝達率の傾向は、Nusselt の式と同様の傾向を示すとともに、平滑管に対する面積拡大率よりも、表面張力によるフィン側面等の凝縮液膜の薄膜化により高い伝熱促進率を示すことを確認し、伝熱促進率はフィン高さ、フィンピッチ、冷媒液物性値の影響を受けることを確認した。また、過去提案されたローフィン管の予測式と実験値を比較し、面積拡大率と表面張力を考慮に入れることで、良い相関を示すことを確認した。

インナーデーション実験では、膜レイノルズ数の増加に伴い、平滑管同様に液膜厚さが増大し凝縮熱伝達率が低下するものの、凝縮液膜の対流拡散が促進されるため、凝縮熱伝達率が低下しづらいことを明らかにした。また、フィン高さが低い場合は対流拡散の影響よりも、液膜増加による熱抵抗増加の影響を受けやすくなることを明らかにした。

#### 凝縮熱伝達に与えるフィン先端形状の影響

フィンピッチ 34 山/インチの周方向の追加工を省略した 3 次元微細溝付管とすべての加工を施した 3 次元微細溝付管について、R134a および R245fa を用いて管外凝縮熱伝達の単管およびインナーデーション実験を行い、凝縮熱伝達率の実験結果を示した。

結果、単管実験では、いずれの試験伝熱管も、冷媒の相違およびフィン形状によらず Nusselt の式とおおむね同じ傾向を示すが、凝縮量の増加に伴い分断溝部を凝縮液が覆うため、凝縮面過冷度が大きい領域では伝熱促進率が低下することを明らかにした。また、フィン先端に施された周方向分断加工は、面積拡大および、角部が増えることで表面張力による薄液膜化される領域が増えるためローフィン管よりも伝熱促進率が向上し、その分断溝は鋭い方が凝縮液膜の薄膜化が促進されとともに、冷媒の表面張力の影響によっても伝熱促進率が変化することを明らかにした。さらに、分断溝の影響に加えて、周方向に延びる Y 字溝が伝熱促進効果に寄与することを明らかにした。

インナーデーション実験では、周方向分断部のフィン溝間の隙間が狭くなることで、膜レイノルズ数増加に伴う対流拡散の影響を阻害することと、液捌け性が悪くなり凝縮液の充満量が増えて熱抵抗が増加することにより、単管の時よりも凝縮熱伝達率が低下し、冷媒の液熱伝導率が凝縮熱伝達率低下に影響することを明らかにした。また、周方向に延びる Y 字溝による伝熱促進効果は、高膜レイノルズ数域においても保持され、インナーデーション影響による凝縮熱伝達率の低下は、周方向分断加工による影響が大きいことを明らかにした。

#### 凝縮熱伝達に与える管径と冷媒物性の影響

外径 19mm サイズおよび 16mm サイズの外面に先端交差分断型フィンをもつフィンピッチ 40 山/インチの 3 次元微細溝付管について、R134a および R245fa、R1234ze(E)、R1234yf を用いて管外凝縮熱伝達の単管およびインナーデーション実験を行い、凝縮熱伝達率の実験結果を示した。

結果、単管実験では、面積拡大率を考慮すれば管径の影響はほとんどないことを明らかにした、また、液充満角度の小さい冷媒、つまり冷媒液物性である表面張力と液密度の比  $\sigma / \rho_L$  が大きい冷媒が伝熱促進効果が大きく、同形状の伝熱管であれば凝縮熱伝達率の大小関係は  $\sigma / \rho_L$  の大小関係に準ずるものの、凝縮液の熱伝導率の影響によっても、凝縮熱伝達率の大小関係が入れ替わることを明らかにした。

インナーデーション実験では、3 次元構造フィン膜レイノルズ数 1200 以下において層流での対流熱伝達が支配的であり、乱流による対流拡散の影響が小さいものの、凝縮液量がフィン溝間に保持できる量を超えると、ローフィン管のように対流拡散の影響により凝縮熱伝達率の低下が抑制されることを明らかにした。

#### 予測式の提案

前述までの実験結果を元に、平滑管の管外凝縮熱伝達率について、インナーデーションの影響と管外径と管ピッチを考慮した予測式の検討を行うとともに、3 次元微細溝付管の管外凝縮熱伝達率について、平滑管の予測式を元にフィン形状と冷媒物性値、インナーデーションの影響を考慮した予測式の検討を行った。

平滑管について、Gstoehl-Thome(2006)の予測式に、 $Pitch / D_o$  を導入することでチューブピッチの影響を考慮し、冷媒液プラントル数  $Pr_L$  の指数を 0.42 と修正することで冷媒の相違による影響を考慮した式を提案した。実験値と提案した予測式を比較した結果、単管実験およびインナーデーション実験の相違、冷媒の違い、チューブピッチの違いにかかわらず、良い相関を示した。

1 種類の 3 次元微細溝付管について、従来ほぼ提案のなかった 3 次元構造フィンに対しての凝縮熱伝達率の予測式の検討を行った。平滑管の式に対して新たに無次元数  $\sigma / (\rho_L g s D_o)$  を導入するとともに、インナーデーション実験の結果より、層流域で平滑管と比べて膜レイノルズ数の影響が大きいこと、3 次元微細溝付管の伝熱促進効果は乱流域に比べて層流域で大きいことを考慮して予測式を提案した。実験値と提案した予測式を比較した結果、冷媒の相違および、単管実験およびインナーデーション実験の相違によらず良い相関を示した。また、提案した予測式を他の形状の実験結果に合わせて係数を最適化して実験値と比較し、他形状への適用や相関性の改善にはフィン高さの違いによって膜レイノルズ数が増大した時の対流拡散の影響が異なることと、凝縮面過冷度の違いを考慮することで改善することを示した。