



高温作動ヒートポンプシステムに関する研究

式地, 千明

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2018-03-25

(Date of Publication)

2019-03-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第7185号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1007185>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



論文内容の要旨

氏 名 式地 千明

専 攻 機械工学

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

高温作動ヒートポンプシステムに関する研究

指導教員 浅野 等

(注) 2, 000 字～4, 000 字でまとめること。

2015 年 12 月にパリで開催された気候変動枠組条約第 21 回国際会議(COP21)では、日本を含む 167 カ国が参加する中、地球温暖化防止に関する国際条約(ゆわゆるパリ協定)が、協議、採択され、2016 年 11 月に発効の要件が満たされ発効された。

省エネルギーの方策としては、① 廃棄熱の有効活用と② 機器効率の改善がある。廃棄熱の有効活用としては、熱を効率よく採集できる高効率熱交換器が必要であり、機器効率の改善では成績係数 4 から 7 を達成でき、熱供給の大幅な効率改善ができるヒートポンプが注目されている。

ヒートポンプは空調機で使用されており、給湯に対してもエコキュートの商標で販売され、空調・給湯の高効率機器として認知され普及してきた。しかし、エネルギー消費量が最も大きいのは産業部門である。直近 10 年で低下がみられるが、これは景気後退や工場の海外移転によるものであり、省エネルギー、省炭素化がすすんでいないのが現状で、この部門での低炭素化が課題である。産業部門での熱供給を、工場廃熱を熱源としたヒートポンプに置換できれば、大幅な低炭素化が進むと期待できる。

ここで、本研究では、高温作動ヒートポンプシステムの実現に向けて、その開発課題として、1. 廃熱回収用蒸発器の熱流動特性の解明、2. サイクル性能に及ぼす冷媒熱物性の影響評価に関する研究、そして 3. 冷媒にメタノールを使用したサイクル構築と高温作動条件での性能評価を行った。課題 1 から 3 の成果は、それぞれ第 2 章から第 4 章にまとめた。以下にそれぞれの概要をまとめる。

第 2 章では、「高効率熱交換器の検討」とし、廃熱回収コンパクト熱交換器としてプレートフィン熱交換器をとりあげ、圧力損失特性および熱交換特性に関する実験結果を示した。プレートフィン熱交換器は積層された流路隔壁間に熱源流体もしくは冷媒を流し、その流路を交互に積層することで熱交換を行う機器であり、各流路には伝熱面積拡大のためフィンが挿入されている。ここでは、単流路の冷媒流に対し、気液二相流の流動特性解明を目的とした空気-水断熱二相流実験、作動流体に蒸発潜熱が比較的小さいフロンナート FC72 を用いた沸騰二相流実験、潜熱が大きく実用冷媒に近い物性の R-134a を用いた沸騰熱伝達実験を行い、以下の知見を得た。

水単相流の圧力損失について、層流の場合、オフセットフィンの流れ方向の繰り返し長さによって圧力損失が増大することを示した。また、摩擦係数のレイノルズ数(以下 Re 数とする)に対する勾配が緩やかになる層流から乱流への遷移 Re 数は、通常円管より小さくなり、フィンピッチによらずおよそ 300 であった。

気液二相流の場合、Martinelli パラメータ χ が 1 以下の条件では、二相増倍係数の液相容積流束の依存性は小さく、Chisholm の式で整理でき、実験結果から求められた C の値から三島・日引の式によって逆算した水力等価直径は、オフセットを流れ方向に投影した水力等価直

径に近い値となった。一方、 $\square > 1$ の条件では、二相増倍係数は Chisholm の式の値より大きくなり、その傾向は j_L が低いほど大きくなった。流路内での偏流や脈動が要因と考えられる。しかし、フィンピッチが小さい Type2.0 では、その増大は抑えられ、特に、下降流の場合には、 j_L の影響が小さく、ヘリンボーン型プレート熱交換器に対する Tribbe and Müller-Steinhagen の式とよく一致した。流路内での偏流が抑制されたためと考えられる。

本研究での実験結果は Tribbe and Müller-Steinhagen の式の係数の修正で整理でき、 $\pm 15\%$ の精度で一致した。

FC72 沸騰二相流実験では、冷媒流量の低下で圧力損失が低減し、その結果、飽和温度が低下したため熱交換温度差の拡大によって熱交換量が增大した。また、熱源温水の流動方向の影響を実験的に評価したところ、並流の方が向流よりも高い熱交換量であり、冷媒が入口サブクール液である場合に顕著であった。冷媒流動の可視化結果から、並流の場合、冷媒入口拡大部の液相滞留域において沸騰を促進させ、この沸騰が熱交換器内での冷媒偏流を抑制し、高い熱交換量をもたらしたと考えられる。

R134a 沸騰二相流実験では、温水流量の増大によって熱交換量が增大するが、出口近傍での冷媒側ドライアウトによる伝熱劣化で熱交換量が飽和する傾向にあった。熱交換器内での出入口平均クオリティが 0.1~0.3 の範囲、すなわち出口クオリティがおおよそ 0.6 以下では並流の方が向流より熱交換量が大きくなるが、出入口平均クオリティが 0.4、すなわち出口クオリティが 0.8 以上になると向流の方が、熱交換量が大きくなる傾向を得た。

総括熱通過率は Djordjević らや Saitoh らの結果より大きい値となったが、クオリティの出入口差が大きいこと、出入口形状の影響を受けていることと考えられ、実用的な相関式の構築は今後の課題である。

第3章では、「高温ヒートポンプシステム最適化のための冷媒の検討」として、家庭用ヒートポンプ給湯器で採用されている二酸化炭素 (CO₂) を基本とし、他の成分を組み合わせた混合冷媒を提案し、実験用ヒートポンプサイクルを用いてサイクル性能と作動圧力を検討し、以下の成果を得た。

すべての動作モードで以下の結果が確認された。いずれの試験用冷媒においても、冷媒充填量の増加に対応し吐出圧力が上昇するが、COP は極大となる最適値が存在することが明らかとされた。第2成分の CO₂ への添加は、本研究で試験した第2成分が揮発性の低い物質であったため、吐出圧力の低下をもたらし、吐出温度を上昇させた。

暖房モードでは、CO₂ / R32 混合冷媒で最大 COP が得られ、その値は 100%CO₂ の場合とほとんど同じであった。

給湯モードでは、CO₂ に第2成分を添加することにより、最大 COP を低下させることなく吐出圧力を低下させることができた。最大 COP は 100%CO₂ と比較して、CO₂ / R32 混合冷媒においてそれは少し高くなった。

冷却モード I, II では、いずれの混合冷媒においても最大 COP は、100%CO₂ の値より少し高くすることができた。

サイクル性能の評価から、95%CO₂ / 5%R32 の混合冷媒が、冷媒圧力を低減できる 100%CO₂ の代替冷媒として有効であることを示した。

第4章では、100 \square の廃熱が存在し、200 \square クラスの加熱を必要とするケースを想定して、市販で調達できる部品をベースに高温ヒートポンプを構築し、実証検証をした。

冷媒としてはメタノールを選定し、200 \square 以上の加熱を COP 2.16 の性能で運転できることを確認した。低い COP の主要因は圧縮機の断熱効率であることを明らかにし、以下の改善点を踏まえることで、COP 3.0 以上が実現可能であることを示した。

- ・ 圧縮機の吸入口、吐出口形状等の改善、全密閉型圧縮機の導入などによって、圧縮機の新断熱効率を市場実機と同等の新断熱効率 (0.75) に向上できる。
- ・ 圧縮機からの吐出冷媒に伴ってヒートポンプサイクルを循環する潤滑油の循環量を減少させるために、圧縮機の吐出口にオイルセパレータを取り付ける必要がある。
- ・ 実験装置からの熱損失。特に圧縮機から凝縮器の回路での熱損失を低減させることで冷媒循環量を低減でき、圧縮機の回転数を低下させることができる。

本研究により、プレートフィン熱交換器におけるフィン構造による圧力損失の差異が明らかとなり定式化でき、また加熱媒体の流動方向による熱交換特性の影響を明らかされ、プレートフィン熱交換器の性能向上の可能性が示された。プレートフィンの流入部における流路拡大部についても、液淀み部の影響、そして淀み部による熱交換性能劣化を解決する方策を示した。

一方、高温作動ヒートポンプとして部品調達のしやすさ、安全性を重視した部品で構成したシステムを構築し、COP 2.16 が達成されることを実証した。本研究では、主要構成要素である圧縮機として、安全性が高い既製品としてレシプロ型半密閉式二段圧縮機を選択したが、現在、作動温度 200 \square を超える密閉式圧縮機も開発が進められており、圧縮機の断熱効率改善によって、本研究で目標とした COP 3.0 を達成できる見通しがたてられた。

氏名	式地 千明		
論文題目	高温作動ヒートポンプシステムに関する研究		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	准教授	浅野 等
	副査	教授	山根 隆志
	副査	教授	大村 直人
	副査	教授	福田 勝哉
要 旨			
<p>2015年12月にパリで開催された気候変動枠組条約第21回国際会議(COP21)では、日本を含む167ヵ国が参加する中、地球温暖化防止に関する国際条約(パリ協定)が協議・採択、2016年11月に発効された。これによって日本は地球温暖化ガス、特にCO₂の排出量削減の義務を負うことになった。しかし、東日本大震災以降、停止した原子力発電所の発電分を火力発電所でカバーしており、9割以上の電力が化石燃料依存である。CO₂排出量削減のためには、原子力発電再稼働、再生可能エネルギーの導入、省エネルギーが有効とされるが、エネルギー需要を下げることなく一次エネルギー供給を削減するには熱供給の高効率化が強く求められる。これは、①機器効率の改善と②廃棄熱量の有効活用で実現できる。一方、ヒートポンプは入力エネルギーに対し4~7倍の熱出力が得られるため、高効率な熱供給機器であるが、高温熱源と低温熱源の温度差が大きくなるほど成績係数が低下する問題もある。家庭用給湯器としてはエコキュートとして認知され、普及してきてはいるが、産業用には導入が進んでいない現状にある。廃熱回収を前提として低温熱源温度を高くすれば、高い成績係数の熱供給ヒートポンプを実現でき、産業部門での省炭素化が推進されると期待できる。</p> <p>そこで、本研究では、高温作動ヒートポンプシステムの実現に向けて、その開発課題として廃熱回収用蒸発器の熱流動特性の解明、サイクル性能に及ぼす冷媒熱物性の影響評価に関する研究が行われている。それらの成果は、第2章から第4章以下の通りまとめられている。</p> <p>第2章では、「高効率熱交換器の検討」とし、廃熱回収用コンパクト熱交換器としてプレートフィン熱交換器をとりあげ、圧力損失特性および熱交換特性に関する実験が行われている。プレートフィン熱交換器は積層された流路隔壁間に熱源流体と冷媒を交互に流すことで熱交換を行う機器であり、各流路には伝熱面積拡大のためのフィンが挿入されている。ここでは、単流路の冷媒流に対し、気液二相流の流動特性解明を目的とした空気-水断熱二相流実験、作動流体に潜熱が比較的小さいフロンナートFC72を用いた沸騰二相流実験、潜熱が大きく実用冷媒に近い熱物性のHFC-134aを用いた沸騰熱伝達実験を行い、以下の知見を得ている。</p> <p>(A-1) 水単相流の圧力損失について、レイノルズ数(Re数)に対する摩擦損失係数の傾向から乱流への遷移Re数は、フィンピッチによらずおよそ300であった。</p> <p>(A-2) 断熱気液二相流の圧力損失特性について、以下の知見を得た。</p> <ul style="list-style-type: none"> • Martinelliパラメータχが1以下の流動条件では、二相増倍係数の液相積流束の依存は小さく、Chisholmの式で整理できる。 • Chisholmパラメータcの実験値から、細管における管径とChisholmパラメータcの相関式である三島・日引の式によって逆算した水力等価直径は、オフセットを一体化した投影に対する水力等価直径に近い値となった。 			

氏名	式地 千明
<ul style="list-style-type: none"> • $\chi > 1$ の条件では、二相増倍係数は流路内での偏流や局所的な重力による流動方向の変化の影響を受けChisholmの式より大きくなり、その傾向は液相積流束j_lが低いほど大きくなった。 • フィンピッチが2.0 mm (Type2.0) では、偏流や局所的な流動変動は抑えられ、液相積流束j_lの影響は小さくなった。ヘリンボーン型の波形状のプレート熱交換器に対して提案されたTribbe-Müller-Steinhausenの式を修正することで、±15%の精度で一致する実験式を得た。 <p>(A-3) FC72沸騰二相流実験では、以下の知見を得た。</p> <ul style="list-style-type: none"> • 入口サブクール液の場合、温水を向流で流すより並流で流す方が高い熱伝達率が得られた。 • 内部流動の可視化結果から、入口サブクール液の場合、熱交換器入口拡大部分において液の淀みが存在し、並流型の場合、この液の淀み域において核沸騰が得られたため、熱交換器内の冷媒流れを一様にし、高い熱伝達率をもたらしたことが明らかとされた。 <p>(A-4) R134a沸騰二相流実験では、以下の知見を得た。</p> <ul style="list-style-type: none"> • 熱交換器出口乾き度がおおよそ0.6以下では、熱通過率は向流型より並流型の方が高くなり、FC72沸騰二相流と同じ傾向であったが、出口乾き度が0.8以上になると、熱交換量が熱交換器出口でのドライアウトで飽和したため、熱通過率は向流型の方が高くなる傾向となった。 <p>第3章では、「高温ヒートポンプシステム最適化のための冷媒の検討」として、家庭用ヒートポンプ給湯器で採用されている二酸化炭素(CO₂)を基本とし、他の成分を組み合わせた混合冷媒を提案し、実験用ヒートポンプサイクルを用いてサイクル性能と作動圧力を検討し、以下の結果を得た。</p> <p>(B-1) 全ての試験用冷媒について、冷媒充填量の増大によって圧縮機吐出圧力は増大し、成績係数は向上するが、最適値が存在する。</p> <p>(B-2) CO₂に質量濃度5%のHFC-32を加えた非共沸混合冷媒によって、CO₂純冷媒の成績係数を維持し、動作圧力を低くできる。</p> <p>第4章では、冷媒にメタノールを使用したシステムを構築し、以下の知見を得た。</p> <p>(C-1) 100℃の廃熱が存在し、200℃程度の熱供給を想定して運転した場合、成績係数2.16が達成された。</p> <p>(C-2) 現状のヒートポンプシステムで使用される圧縮機と同等の断熱効率を得られれば、成績係数3を達成することができる。</p> <p>以上より、本研究では、高温作動ヒートポンプシステムの実現を目的とし、廃熱回収用プレートフィン蒸発器の熱流動特性を明らかにするとともに、非共沸混合冷媒を用いた場合の冷媒物性が成績係数に与える影響を明らかにしている。さらに、二段圧縮機を利用したヒートポンプシステムを構築し、100℃の廃熱で200℃の熱供給を成績係数2.16でなされることが実証された。特に、蒸発器については、一般に熱交換器の設計では向流型で熱交換させるのがよいとされているが、プレートフィン蒸発器の場合、並流型によって内部流動が改善され、高い性能が得られることを示している。よって本論文は、高温作動ヒートポンプシステムの実現に対して重要な知見を得たものとして価値ある集積である。提出された論文は工学研究科学学位論文評価基準を満たしており、学位申請者の式地千明は博士(工学)の学位を得る資格があると認める。</p>	