

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：12614

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04497

研究課題名（和文）次世代冷媒の流下液膜蒸発の熱伝達と流動特性に関する基礎研究

研究課題名（英文）Fundamental Study on Heat Transfer and Flow Characteristics of Falling Liquid Film Evaporation of Next Generation Refrigerants

研究代表者

地下 大輔（Jige, Daisuke）

東京海洋大学・学術研究院・准教授

研究者番号：30708368

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、地球温暖化係数の低い次世代冷媒の流下液膜蒸発の熱伝達と流動特性の解明を目的として、HFO系冷媒を対象に、熱伝達率の測定、沸騰気泡、液膜破断および乾き部の形成を伴う液膜の流動様相の観察を行った。また、液膜流量、熱流束および蒸発温度が流下液膜蒸発の熱伝達および流動特性に及ぼす影響を評価するとともに、伝熱面の表面性状、試験流体の種類を変化させた実験を行い、流下液膜の熱伝達に関するデータベースを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

環境負荷の小さいHFO系冷媒を試験流体に用いて、沸騰を伴う流動様相の可視化と熱伝達率の同時計測を行い、熱伝達および流動特性に関する詳細な情報を提供した本研究の学術的意義は大きい。さらに、伝熱面の表面性状、試験流体の影響に関する評価結果は、今後の流下液膜蒸発の伝熱促進、蒸発器の性能向上につながると期待できる。

研究成果の概要（英文）：This study investigated the heat transfer and flow characteristics of falling film boiling of next-generation refrigerants with low global warming potential. In the visualization experiments, the effects of boiling bubble behavior, liquid film breakdown, and dry patches on the heat transfer and flow characteristics were evaluated. Furthermore, the effects of the liquid film flow rate, heat flux, evaporation temperature, surface properties, and test fluids on the heat transfer characteristics were clarified.

研究分野：熱工学

キーワード：流下液膜蒸発 熱伝達 流動様相 次世代冷媒

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

冷凍空調機器で使用される冷媒は、高い温室効果を有することから国際的な規制強化が進められている。2016年のモントリオール議定書の改正により、代替フロン生産・消費量の段階的な削減が求められている。温室効果ガスの中で排出量が増加傾向にある代替フロンに関しては、地球温暖化係数 (Global Warming Potential, GWP) の極めて低い次世代冷媒を用いた機器の開発が急務となっている。流下液膜式蒸発器は、現在広く普及している滴液式蒸発器に比べて、冷媒使用量の大幅な削減が期待でき、低熱負荷条件でも優れた熱伝達特性が期待できる。沸騰現象を伴う流下液膜の熱伝達および流動特性は、液膜流量、熱流束、作動流体の物性等によって大きく変化するため、蒸発器の熱設計のためには熱伝達特性の把握が重要である。さらに、流下液膜の熱伝達および流動特性は、液膜の破断および乾き部の形成により大きく変化するが、次世代冷媒の沸騰を伴う流下液膜の熱伝達および流動特性に関する知見は十分とは言い難い。

2. 研究の目的

本研究では、流下液膜の流動様相の可視化と熱伝達率の同時計測により、環境負荷の小さい次世代冷媒の流下液膜蒸発の熱伝達および流動特性の解明を目指す。本研究では、地球温暖化係数の低い HFO 系冷媒に着目し、沸騰気泡、液膜破断および乾き部の形成を伴う流下液膜の流動様相の可視化を行うとともに、熱伝達率の測定を行い、流動様相と熱伝達との関係を明らかにする。さらに、伝熱面の表面性状、試験流体の種類を変化させた実験を行い、流下液膜の熱伝達特性に関するデータベースの構築を目指す。

3. 研究の方法

実験装置の概略を図 1 に示す。本研究では、冷媒ポンプによる強制循環ループを用いて、平板を流下する液膜の流動様相の可視化と熱伝達率の測定を行った。実験装置は、主に冷媒ポンプ、質量流量計、プレクーラ、テストセクション、凝縮器およびサブクーラから構成される。試験冷媒の圧力は主に凝縮器での熱交換量により調整し、テストセクション入口での冷媒温度はプレクーラによって調整した。

試験流体は、幅 50 mm、長さ 165 mm、深さ 5 mm の流路を垂直に流下し、片面からヒータ加熱される。流路は透明な可視化窓により密封され、流動様相はハイスピードカメラを用いて観察した。有効加熱面は幅 50 mm、長さ 50 mm である。冷媒の圧力はテストセクションの前後に設けた絶対圧変換器によって測定し、冷媒の温度はテストセクション前後の流路内に挿入した K 型シース熱電対を用いて測定した。

有効加熱面中央における壁面温度は、伝熱面から 3 mm、9 mm および 15 mm の位置に挿入したシース熱電対の測定値から外挿して求めた。本実験では、試験流体に HFO 系冷媒である R1234ze(E) を用いて、蒸発温度、液膜流量および熱流束をパラメータとして、流動様相の観察および熱伝達率の測定を行った。さらに、伝熱面の表面粗さの影響に着目し、異なる表面粗さを有する伝熱面について評価を行うとともに、作動流体の物性値の違いによる影響を明らかにするために、HFO 系冷媒 R1336mzz(E) についても評価した。

4. 研究成果

液膜流量、熱流束および蒸発温度を変化させて流下液膜の流動様相の可視化を行った (文献 [1])。液膜流量 $\Gamma = 0.054 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ における R1234ze(E) の流下液膜の流動様相の一例を図 2 に示す。液膜流量 Γ が大きく、熱流束の低い $q = 5 \text{ kWm}^{-2}$ の条件では、伝熱面全体が液膜で覆われており、加熱による気泡の形成および破裂が観察された。また、流動に起因する波立ちおよび気泡の破裂に起因する小さな波紋が観察された。熱流束の増加に伴い、気泡の形成および破裂がより激しくなるとともに、薄液膜部および乾き部の形成がみられた。熱流束の高い $q = 100 \text{ kWm}^{-2}$ の条件では、薄液膜部から乾き部が形成されるとともに、液膜の破断に起因する大きな乾き部の形成も観察された。

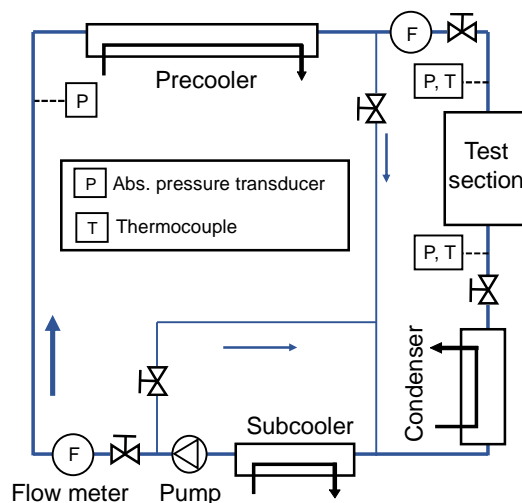
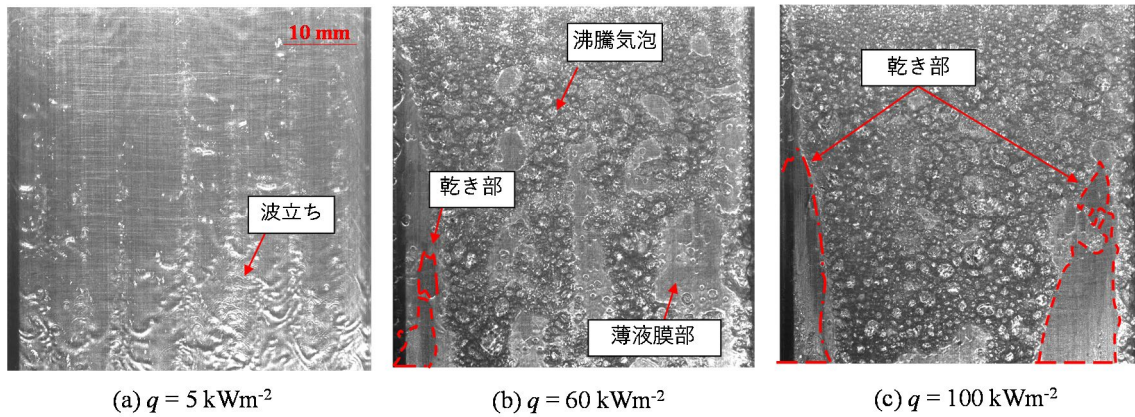


図 1 実験装置



(a) $q = 5 \text{ kWm}^{-2}$ (b) $q = 60 \text{ kWm}^{-2}$ (c) $q = 100 \text{ kWm}^{-2}$

図2 流下液膜の流動様相に及ぼす熱流束の影響

(試験流体 R1234ze(E), 蒸発温度 $T_R = 15 \text{ }^\circ\text{C}$, 液膜流量 $\Gamma = 0.054 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)

流下液膜の流動様相に及ぼす作動流体の物性値の違いについて評価した(文献[2]). 蒸発温度 $15 \text{ }^\circ\text{C}$ における R1234ze(E)と R1336mzz(E)の流動様相の比較の一例を図3に示す. 図より, R1234ze(E)と比較して, R1336mzz(E)は気泡のサイズが大きいことがわかる. これは, R1336mzz(E)の蒸気密度および蒸発潜熱が R1234ze(E)と比較して, それぞれ0.5倍, 0.86倍と小さいためであり, 同じ加熱条件においても R1336mzz(E)の方がより大きい気泡が形成された. この大気泡の崩壊に伴い液滴が飛散するとともに, 乾き部が形成される様子が観察された. このように, 沸騰気泡, 液膜破断および乾き部の形成に及ぼす作動流体の違いを可視化により明らかにした.

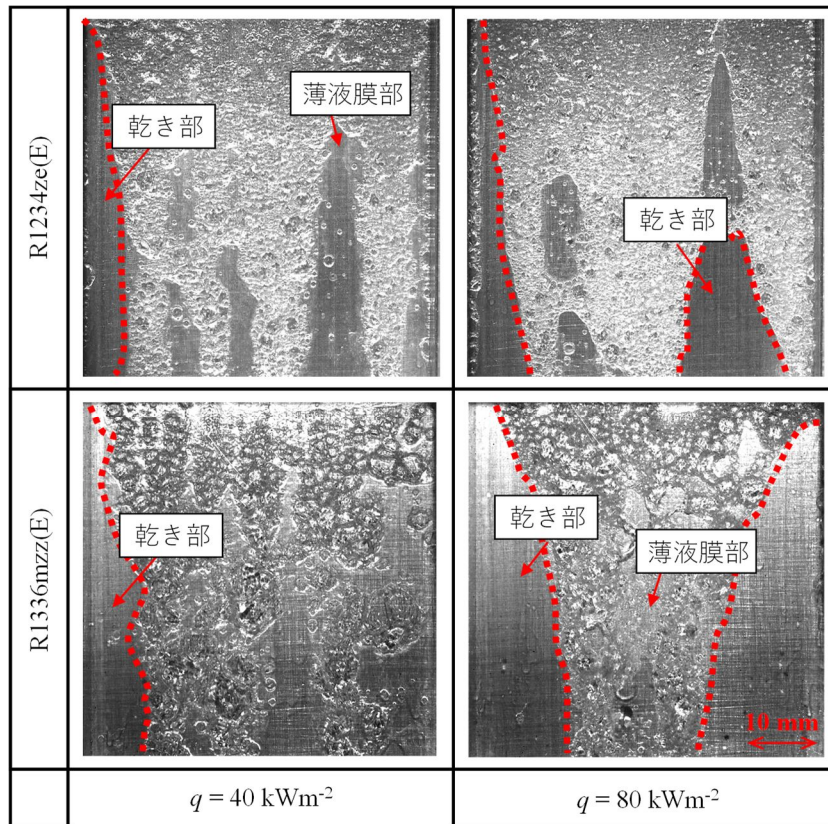


図3 R1234ze(E)と R1336mzz(E)の流動様相の比較

(蒸発温度 $T_R = 15 \text{ }^\circ\text{C}$, 液膜流量 $\Gamma = 0.054 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)

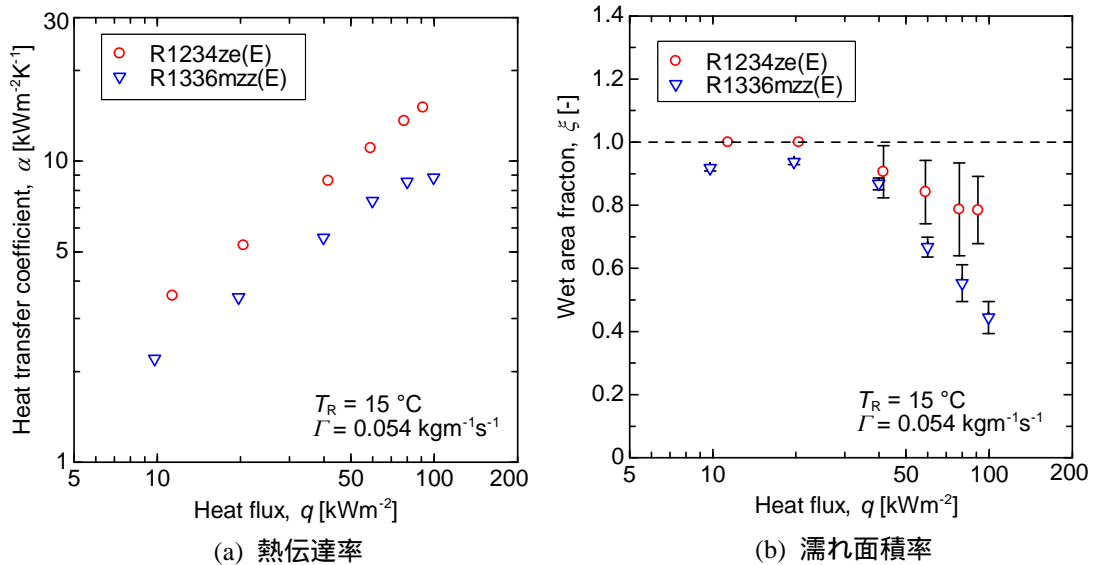


図4 R1234ze(E)とR1336mzz(E)の熱伝達率と濡れ面積率

図4にR1234ze(E)とR1336mzz(E)の熱伝達率と濡れ面積率の評価結果の一例を示す(文献[2])。熱伝達率は、ヒータ加熱量および有効伝熱面積から求めた熱流束、ならびに伝熱面と試験流体の温度差から求めた。濡れ面積率は、有効伝熱面に占める液膜が形成された面積の割合として定義した。濡れ面積率の算出にあたり、乾き部は時間とともに変化するため、複数枚の可視化画像の平均値を用い、その変動幅も図中にあわせて示す。熱伝達率はいずれの作動流体においても熱流束の増加に伴い増大しており、核沸騰熱伝達の促進が確認された。作動流体による熱流束に対する熱伝達率の傾きの違いは小さいが、熱流束条件に依らずR1234ze(E)の熱伝達率が高い値を示した。高熱流束条件においてR1234ze(E)とR1336mzz(E)の熱伝達率の差が増大したが、これは、熱流束 50 kWm^{-2} 以上でR1336mzz(E)の濡れ面積率が急激に低下し、有効伝熱面の大部分に乾き部が形成されたためと考えられる。また、低熱流束条件では濡れ面積率は1に近い値を示したが、熱流束の増加に伴う乾き部の発生、拡大により低下した。いずれの熱流束条件においても、R1336mzz(E)はR1234ze(E)よりも低い濡れ面積率を示した。これは、蒸発潜熱が小さく、蒸気密度が小さいR1336mzz(E)では同じ熱流束条件においても蒸発量が多く、大気泡が形成されやすく、この大気泡の崩壊に伴い液滴が飛散するとともに、乾き部が形成されやすいためと考えられる。

<引用文献>

- [1] 沼田 夏実, 地下 大輔, 井上 順広, 垂直平面における R1234ze(E)の沸騰を伴う流下液膜の熱伝達特性, 日本冷凍空調学会論文集, Vol.41, No.2 (2024), pp.141-148.
- [2] Natsumi Numata, Daisuke Jige, Norihiro Inoue, Boiling Heat Transfer and Flow Characteristics of Falling Film on HFO Refrigerant on Vertical Plate, The 20th International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, (2024).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 沼田 夏実、地下 大輔、井上 順広	4. 巻 41 (2)
2. 論文標題 垂直平面におけるR1234ze(E)の沸騰を伴う流下液膜の熱伝達特性	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 日本冷凍空調学会論文集	6. 最初と最後の頁 141-148
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11322/tjsrae.23-29HE_OA	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Natsumi Numata, Daisuke Jige, Norihiro Inoue
2. 発表標題 Boiling Heat Transfer and Flow Characteristics of Falling Film on HFO Refrigerant on Vertical Plate
3. 学会等名 The 20th International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 沼田夏実, 地下大輔, 井上順広
2. 発表標題 垂直平面における流下液膜の蒸発熱伝達特性に関する実験
3. 学会等名 2023年度日本冷凍空調学会年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 林起弘, 地下大輔, 井上順広
2. 発表標題 R32/R1234ze(E)の流下液膜蒸発の局所熱伝達特性に関する実験
3. 学会等名 第93回マリンエンジニアリング学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中村凜太郎, 村田保弘, 赤田郁朗, 地下大輔, 井上順広
2. 発表標題 流下液膜蒸発の局所熱伝達特性に関する実験
3. 学会等名 2021年度日本冷凍空調学会年次大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------