

令和 3 年 6 月 18 日現在

機関番号：12614

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13935

研究課題名（和文）プレート式蒸発器内における低環境負荷混合物の伝熱・流動特性の解明に関する研究

研究課題名（英文）Study on heat transfer and flow characteristics of environment-friendly mixtures in plate type evaporators

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、地球温暖化係数の小さいHFO系冷媒およびHFO/HFC系混合冷媒のプレートフィン蒸発器内での熱伝達および流動特性を明らかにした。オフセットフィンを入蔵した冷媒流路および加熱水流路から構成されるプレートフィン熱交換器を用いて、断熱流および蒸発流の流動様相を可視化するとともに、蒸発熱伝達率を測定した。また、流路出入口の非対称性に起因してプレートフィン蒸発器の流路幅方向および流れ方向に形成される非共沸混合冷媒の温度分布をIRカメラを用いて測定し、非共沸混合冷媒の蒸発流動特性および蒸発熱伝達特性に及ぼすクオリティ、質量速度、熱流束および混合組成比の影響について明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

温室効果ガス排出抑制の観点から、環境負荷の小さい次世代冷媒の開発とそれに適応した機器の開発が望まれている。プレート式熱交換器は単位体積あたりの伝熱面積が大きく、熱交換器の小型化による冷媒充填量の削減が期待できるが、流路の出入口が非対称であり、アスペクト比の大きい流路から構成されるため、流路内で複雑な熱伝達および流動特性を示す。本実験では地球温暖化係数の小さいHFO系冷媒とその混合物について、蒸発器の流路幅方向および流れ方向に変化する蒸発熱伝達および蒸発流動特性を実験的に明らかにした。得られた成果は次世代冷媒に適応した熱交換器の高性能化への貢献が期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, the evaporation heat transfer and flow characteristics of lower-GWP refrigerants such as hydrofluorolefins (HFOs) and HFO/HFC mixtures in plate-fin heat exchangers were experimentally investigated. This study visualized adiabatic and evaporation flows and measured evaporation heat transfer coefficients using the test evaporator comprising a refrigerant channel and heat-source water channels. The temperature distributions of zeotropic refrigerant mixtures in the width- and flow-directions of the channel owing to the asymmetry of the inlet and outlet of the channel were also measured using an IR camera. The effects of the vapor quality, mass velocity, heat flux, and circulation composition on the evaporation heat transfer and flow characteristics were clarified.

研究分野：熱工学，船舶海洋工学

キーワード：プレート式蒸発器 蒸発熱伝達 可視化 流動様相 混合冷媒 IRカメラ

### 1. 研究開始当初の背景

省エネルギー化の観点から、単位体積あたりの伝熱面積が大きく、熱交換器の小型化による冷媒充填量の削減が期待できるプレート式熱交換器の利用が拡大している。プレートフィン熱交換器は、伝熱面積拡大のために流路内にインナーフィンが内蔵され、プレートとインナーフィンが面接触された上で一体ロウ付け加工によって流体が密封されるため、シェブロン型プレート式熱交換器に比べ高い耐圧性を有している。プレート式熱交換器は一般的に流路の出入口位置が非対称かつアスペクト比の大きい流路から構成されており、蒸発器として使用する場合には流路幅方向の不均一な速度分布と気液の分配が生じ、流路幅方向および流れ方向で蒸発流動特性および蒸発熱伝達特性が大きく異なることが予想される。

一方、温室効果ガス排出抑制の観点から、地球温暖化係数 (GWP) の小さい HFO 系冷媒が注目されている。これまでに様々な HFO 系冷媒が提案されているが、機器性能、安全性、経済性などの点で課題があり、近年は HFO 系冷媒と HFC 系冷媒あるいは自然冷媒を混合した多成分混合冷媒が提案されており、これらの次世代冷媒に適応した高性能な熱交換器の開発が望まれている。非共沸混合冷媒の場合、沸点と露点の温度差に起因して蒸発の進行にともない流体温度が変化する。プレートフィン熱交換器においては流路幅方向および流れ方向に複雑な冷媒温度分布が形成され、蒸発熱伝達特性はより複雑になることが予想される。これまでにプレートフィン熱交換器内での水-空気断熱二相流の流動観察および流路断面方向の気泡速度分布に関する報告<sup>1)</sup>はあるものの、プレートフィン熱交換器内での次世代冷媒の蒸発流動様相および蒸発熱伝達特性に関しては十分な知見が得られていない。

### 2. 研究の目的

本研究では、環境負荷の小さい HFO 系冷媒および HFO/HFC 系混合冷媒のプレートフィン熱交換器内での蒸発熱伝達および蒸発流動特性の解明を目的とし、以下の実験的研究を行った。

- (1) オフセットフィンを内蔵した冷媒流路および加熱水流路から構成される可視化用テストセクションを製作し、HFO 系冷媒 R1234ze(E)の気液二相断熱流および蒸発流の流動様相を可視化し、流動特性に及ぼすクオリティ、質量速度および熱流束の影響を明らかにする。
- (2) オフセットフィンを内蔵した冷媒流路および加熱水流路から構成されるプレートフィン蒸発器内での R1234ze(E)の蒸発熱伝達特性に及ぼすクオリティ、質量速度および熱流束の影響を明らかにする。また、中小型空調機器の作動冷媒として広く使用されている HFC 系冷媒 R32 との比較を行うとともに、流路内局所位置での蒸発熱伝達特性を明らかにする。
- (3) 純冷媒 R1234ze(E)および非共沸混合冷媒 R1234ze(E)/R32 のプレートフィン蒸発器の流路幅方向および流れ方向に形成される冷媒温度分布を IR カメラにより測定し、非共沸混合冷媒の蒸発流動特性および蒸発熱伝達特性に及ぼすクオリティ、質量速度、熱流束および混合組成比の影響について明らかにする。

### 3. 研究の方法

実験装置の概略を Fig.1 に示す。本装置はポンプを用いた強制循環ループであり、ギヤポンプ、コリオリ式質量流量計、電気予熱器、テストセクション、凝縮器、レシーバおよびサブクーラから構成される。ギヤポンプから圧送された冷媒は、電気予熱器において所定のクオリティまで加熱され、テストセクションへ流入する。冷媒は、テストセクション内において加熱され、凝縮器、レシーバおよびサブクーラを経てポンプへ戻る。冷媒の圧力および流量は、主に凝縮器での熱交

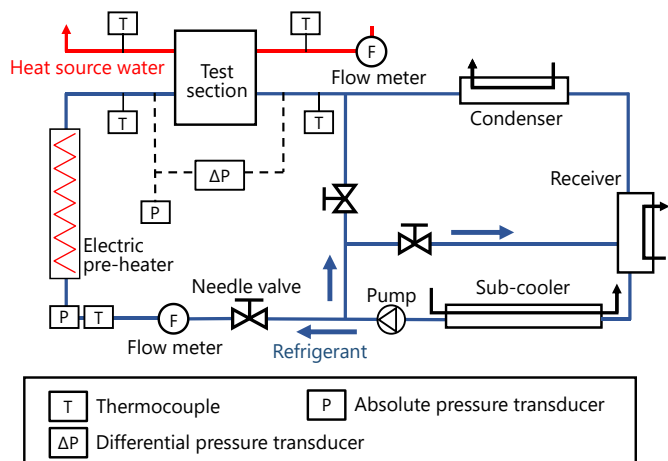


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus.

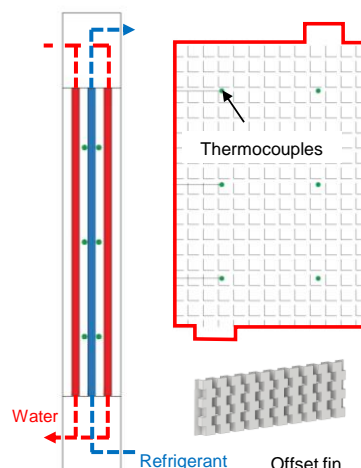


Fig.2 Schematic view of test section.

換量およびループに設けた流量調整バルブの開度により調整した。冷媒圧力はテストセクションに設置した絶対圧変換器によって測定し、冷媒温度はテストセクションの前後の流路内に挿入された K 型シース熱電対によって測定した。混合冷媒の循環組成比はループ内を循環する液冷媒を少量採取し、膨張・気化させ、ガスクロマトグラフィにより測定した。

蒸発熱伝達率の測定に用いたテストセクションの概略を Fig. 2 に示す。冷媒は流路左下の入口部から流路右上の出口部へと鉛直上向きに流れ、また、加熱水は流路左上の入口部から流路右下の出口部へと鉛直下向きに流れる。テストセクションは加熱水流路 2 つ、冷媒流路 1 つから構成され、冷媒は両面から加熱される。有効伝熱部は幅 88 mm、長さ 130 mm である。伝熱壁面温度は冷媒流路を挟むように壁面に計 12 本挿入された K 型シース熱電対により測定した。加熱水の流量は体積流量計を用いて、混合平均温度はテストセクション前後にて K 型シース熱電対を用いてそれぞれ測定した。テストセクションでの熱交換量は加熱水の流量、比熱および温度変化から求めた。蒸発流動様相の可視化に用いたテストセクションは冷媒流路 1 つ、加熱水流路 1 つから構成され、おもて面に設けた観察窓から断熱流および蒸発流の流動様相をハイスピードカメラを用いて撮影した。蒸発熱伝達率の測定および流動様相の可視化に用いたテストセクションの流路内部には、フィン高さ 3 mm、板厚 0.5 mm、水力直径 2.7 mm のオフセットフィンが内蔵されている。

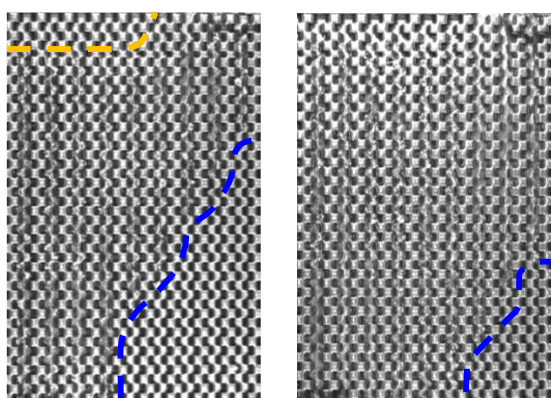
プレートフィン蒸発器に形成される非共沸混合冷媒の温度分布の測定実験には、R1234ze(E)/R32 を試験冷媒に用いた。テストセクションは流路右下の入口部から流路右上の出口部へと鉛直上向きに流れる単一冷媒流路と、面状ヒータから構成される。蒸発器の外表面には黒体塗料を塗布し、蒸発器の外表面に形成される冷媒流れ方向および流路幅方向の冷媒温度分布を IR カメラにより測定した。また、ヒータの代わりに加熱水を用いて加熱するテストセクションを製作し、同様に冷媒温度分布の測定も行った。

純冷媒の実験では、テストセクションに流入する冷媒クオリティ、質量速度および熱流束をパラメータとして蒸発熱伝達率の測定および流動様相の可視化を行った。非共沸混合冷媒の実験では、テストセクションに流入する冷媒クオリティ、質量速度、熱流束および混合組成比をパラメータとして温度分布の測定を行った。

#### 4. 研究成果

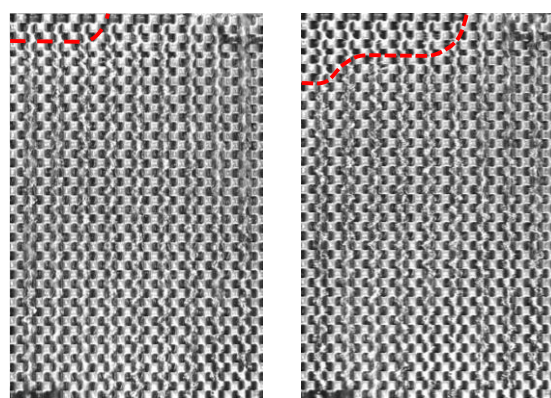
R1234ze(E)の断熱気液二相流の流動様相の観察結果を Fig.3 に示す。冷媒は流路左下の入口部から流路右上の出口部へと上向きに流れる。低質量速度条件では流路幅方向の不均一な速度および気液分布が生じ、流路左上には液相が流れない領域が観察された。質量速度が小さい場合には間欠的な流れが観察されたが、質量速度およびテストセクションに流入する冷媒クオリティの増加にともない流れは連続的となり、質量速度  $50 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$  のクオリティ 0.7 以上では連続的な流れが観察された。流路の出入口の非対称性に起因し、質量速度あるいはクオリティが低いほど流路右下に大きなよどみ部が観察された。

R1234ze(E)の蒸発流動様相の観察結果を Fig.4 に示す。冷媒は流路左下の入口部から流路右上の出口部へと鉛直上向きに流れる。図中には、乾き部の発生箇所を破線で示す。断熱流と同様に、質量速度  $20 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$  では間欠的な流れであり、流路左上の乾き部の領域が時間経過により変化する様子が観察された。この流路左上の乾き部の面積はクオリティの増加にともない拡大した。また、質量速度の増加にともない乾き部は減少するものの、断熱流の場合とは異なり質量速度  $50 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$  においても流路左上には乾き部が形成された。



(a)  $G = 20 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$  (b)  $G = 50 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$

Fig.3 Typical observation results for adiabatic two-phase flow of R1234ze(E) at inlet quality of 0.3.



(a)  $G = 20 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$  (b)  $G = 50 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$

Fig.4 Typical observation results for evaporation flow of R1234ze(E) at heat flux of  $6 \text{ kWm}^{-2}$  and inlet quality of 0.5.

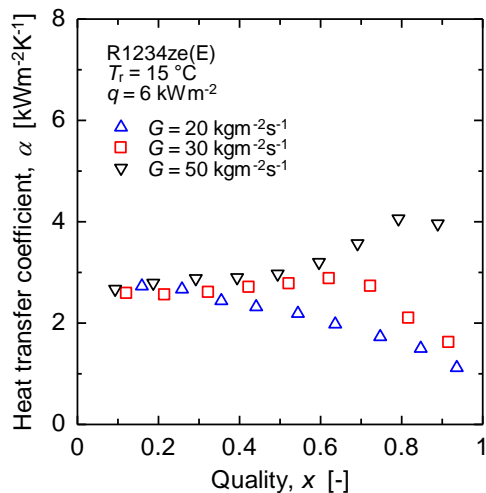


Fig.5 Effect of mass velocity on heat transfer coefficient of R1234ze(E) at heat flux of  $6 \text{ kWm}^{-2}$ .

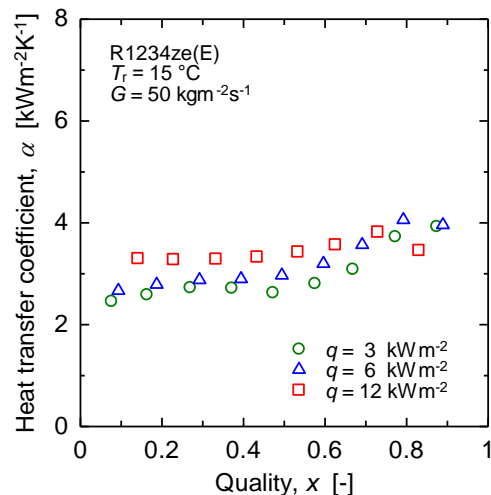


Fig.6 Effect of heat flux on heat transfer coefficient of R1234ze(E) at mass velocity of  $50 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ .

Fig.5に、R1234ze(E)の蒸発熱伝達率 $\alpha$ を、テストセクション入口および出口の平均クオリティ $x$ に対して示す。図より、低クオリティ域では熱伝達率に及ぼす質量速度およびクオリティの影響は小さいことがわかる。質量速度  $20 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$  の場合、クオリティの増加にともない熱伝達率は緩やかに減少した。これは、質量速度が小さい場合に流路上部に発生する乾き部の影響であり、クオリティの増加にともない乾き部の面積が拡大することで熱伝達率が減少したと考えられる。一方、質量速度  $50 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$  ではクオリティの増加にともない熱伝達率は増大する傾向がみられた。これは、流路内の流速が大きく、流路上部での乾き部の発生が抑制されることに加え、強制対流熱伝達が促進されたためと考えられる。熱伝達率が減少に転じるクオリティに着目すると、質量速度  $20 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$  ではクオリティ 0.2、質量速度  $30 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$  ではクオリティ 0.6 から熱伝達率は減少した。蒸発流動様相の観察結果から質量速度の減少にともない流路幅方向の偏流が顕著となり、流路上部で乾き部が拡大する傾向が観察されており、質量速度が低いほど流路上部に乾き部が発生しやすく、クオリティの増加にともない乾き部が拡大することで低クオリティから熱伝達率が低下したと考えられる。

R1234ze(E)の蒸発熱伝達特性に及ぼす熱流束の影響を Fig.6 に示す。クオリティ 0.7 以下では、熱流束の増加にともない熱伝達率は増大しており、核沸騰熱伝達の促進がみられた。蒸発流動様相の可視化では、特に流路右下部において熱流束が高いほど沸騰気泡の生成が促進される様子が確認された。熱流束が高いほど熱伝達率が減少に転じるクオリティは低下しており、これは熱流束が高いほど流路上部で乾き部が拡大しやすいためと考えられる。

流路の出入口位置の非対称性に起因して流路内に形成される蒸発熱伝達率の分布について検討した。Fig.7 に流路左上および流路右上における局所熱伝達率を示す。質量速度  $20 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$  では乾き部の発生に起因して、流路左上では低クオリティから熱伝達率は減少に転じた。一方、乾き部が発生しない流路右下ではクオリティの増加に伴う熱伝達率の大きな低下はみられなかった。質量速度  $50 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$  では流路左上の乾き部の影響は小さく、流路左上および右下ともにクオリティの増加にともない熱伝達率が増大する傾向がみられた。

HFO 系冷媒 R1234ze(E)と HFC 系冷媒 R32 の蒸発熱伝達率の比較を Fig.8 に示す。R1234ze(E)と R32 の熱伝達特性に定性的な違いはみられなかったが、いずれの条件においても R32 の熱伝達率が高い値を示した。同じ質量速度、クオリティ条件で比較すると、R32 は R1234ze(E)に比して、質量速度  $20 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$  で 1.5 倍、 $50 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$  で 1.3-1.5 倍の高い熱伝達率を示した。この熱伝達率の差異は主に冷媒物性の違いに起因するものと考えられる。すなわち、R32 の液熱伝導率は R1234ze(E)に比して 1.7 倍と高く、いずれの質量速度、熱流束条件においても高い熱伝達率を示したと考えられる。また、R1234ze(E)の蒸気密度は R32 の約 0.5 倍と小さく、同じ質量速度、クオリティにおいて R1234ze(E)の蒸気速度は大きくなる。したがって、強制対流熱伝達の寄与が増大する質量速度  $50 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$  では R32 に比して R1234ze(E)の熱伝達率の増大割合が大きく、低質量速度に比して冷媒による熱伝達率の差異が減少したと考えられる。

露点および沸点の平均温度が  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  となる圧力において、蒸発器表面に形成される非共沸混合冷媒 R1234ze(E)/R32 (80/20 mass%) の温度分布を IR カメラで測定した結果を Fig.9 に示す。冷媒は流路右下の入口部から流路右上の出口部へと鉛直上向きに流れる。実験に用いた非共沸混合冷媒 R1234ze(E)/R32 (80/20 mass%) の温度グライドは約 12 K である。参考を示す純冷媒 R1234ze(E)の結果と比較すると、混合冷媒の場合には流路幅方向および流れ方向に大きな温度分

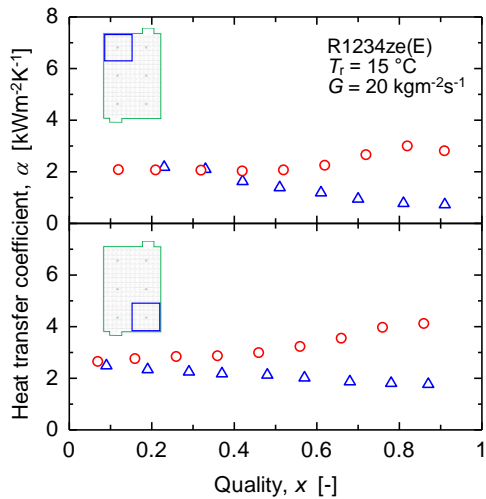


Fig.7 Local heat transfer coefficients of R1234ze(E) for upper-left and lower-right regions.

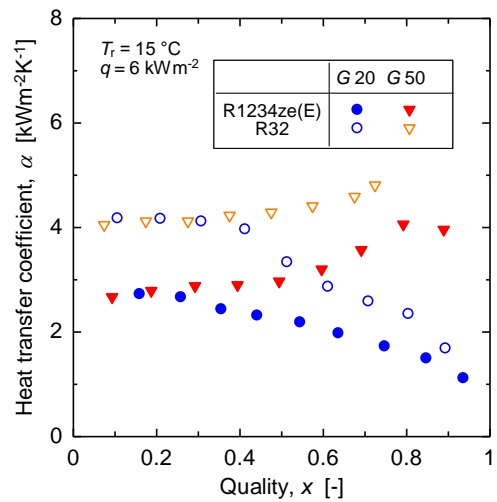


Fig.8 Comparison of heat transfer coefficients of R1234ze(E) and R32 at heat flux of  $6 \text{ kWm}^{-2}$ .

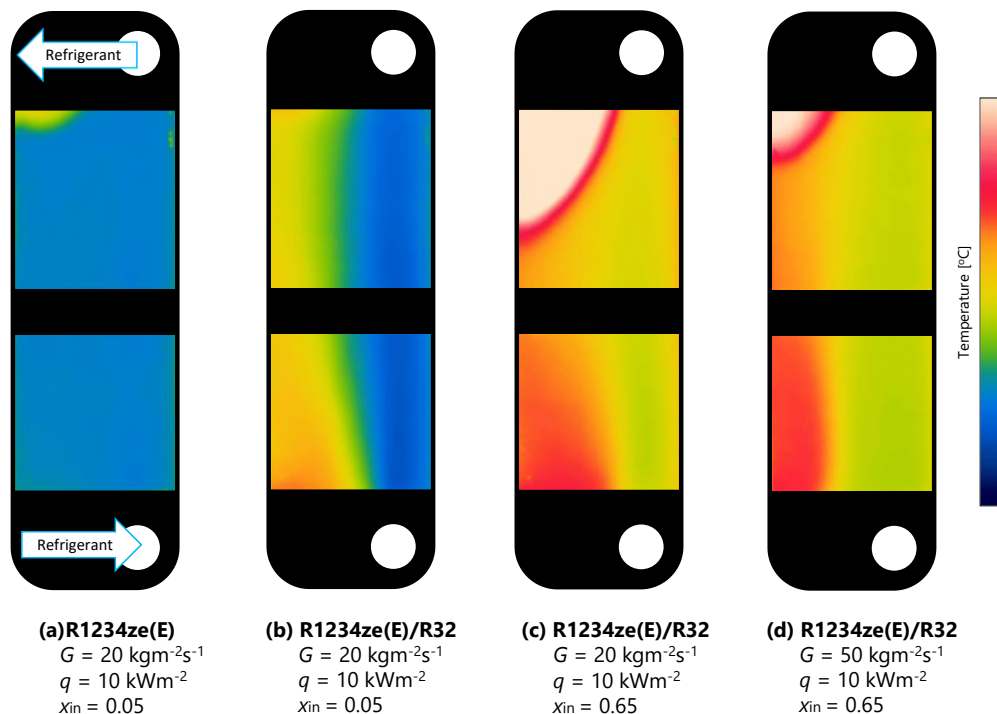


Fig.9 Temperature profiles of pure R1234ze(E) and binary mixture R1234ze(E)/R32 (80/20 mass%).

布が形成された。これは、流路出入口の非対称性に起因して、流路右側に比べて流路左側では液冷媒流量が減少し、蒸気冷媒が相対的に多く流れ、その結果として流路幅方向に大きな温度分布が形成されたと考えられる。流路左側の相対的に温度の高い領域は、質量速度の増加にともない減少する傾向がみられた。これは、質量速度の増加にともない流路幅方向の速度分布が均一化され、流路左側へも液冷媒が流れやすくなり気液の偏流が改善されたためと考えられる。また、非共沸混合冷媒でも純冷媒と同様に、テストセクション入口クオリティが高い条件では流路左上では乾き部が発生し、露点温度よりも高い温度（乾き部）が測定された。

<引用文献>

- 1) Shikichi, K., Minoura, K., Asano, H., 2018. Effect of flow direction of heating medium on boiling heat transfer, characteristic in a single-channel plate-fin heat exchanger, International Refrigeration and Air Conditioning Conference. Paper 1959.
- 2) E.W. Lemmon, I.H. Bell, M.L. Huber and M.O. McLinden, NIST Standard Reference Database 23, REFPROP Ver. 10.0, (2018).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 沼田夏実, 杉原弘太, 地下大輔, 井上順広
2. 発表標題 非共沸混合冷媒のプレートフィン蒸発器内における冷媒温度分布の可視化
3. 学会等名 第54回空気調和・冷凍連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 杉原弘太, 地下大輔, 井上順広
2. 発表標題 R1234ze(E)のプレートフィン熱交換器内の蒸発熱伝達に関する実験
3. 学会等名 2020年度日本冷凍空調学会年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 地下大輔, 杉原弘太, 井上順広
2. 発表標題 プレートフィン熱交換器内における垂直上昇沸騰熱伝達に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会熱工学コンファレンス2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 杉原弘太, 地下大輔, 井上順広
2. 発表標題 低GWP冷媒のプレート式熱交換器の流動沸騰特性に及ぼす流動方向の影響
3. 学会等名 第89回（平成31年）マリンエンジニアリング学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 杉原弘太, 地下大輔, 井上順広
2. 発表標題 プレートフィン熱交換器内におけるR1234ze(E)の流動沸騰特性に関する実験的研究
3. 学会等名 2018年度日本冷凍空調学会年次大会, 2018
4. 発表年 2018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
---------	---------