

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：12614

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18292

研究課題名(和文)低GWP冷媒の扁平多孔管内蒸発熱伝達におよぼす流路形状とオイルの影響

研究課題名(英文) Effects of flow channel shape and lubricant oil on evaporation heat transfer of low GWP refrigerant in multiport tubes

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) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：水力直径1 mm以下の微細流路を多数有する扁平多孔管を対象に、冷媒R32を用いて、気液二相流動様相の観察、熱伝達および摩擦圧力損失に関する実験を行い、扁平多孔管内蒸発熱伝達に及ぼす流路形状とオイルの影響について実験的に明らかにした。まず、並列微細流路内を流れるR32の流動様相を観察し、並列微細流路内の流動様式の出現条件を明らかにした。次に、管内面にフィン有する扁平多孔管の実験を行い、熱伝達および圧力損失に及ぼすフィンの影響を明らかにするとともに、伝熱促進効果について検討した。さらに、R32に相溶性オイル(PVE)を混入し、熱伝達および圧力損失に及ぼすオイルの影響について定量的に明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this work, we performed experiments involving the observation of two-phase flow, evaporation heat transfer, and friction pressure drop in multiport tubes consisting of minichannels with hydraulic diameters less than 1 mm, using R32 as the test refrigerant. The two-phase flow patterns of R32 flowing in parallel minichannels were observed and classified. Experiments were performed to determine the heat transfer and pressure drop in a multiport tube consisting of rectangular minichannels with straight microfins. We clarified the effect of microfins on the heat transfer and pressure drop, and on the enhancement of the heat transfer. Furthermore, a compatible oil (PVE) was mixed in R32, and the effect of the oil on the boiling heat transfer and pressure drop was quantitatively evaluated.

研究分野：熱工学

キーワード：扁平多孔管 気液二相流 流動様式 蒸発熱伝達 伝熱促進 圧力損失 油 熱交換

1. 研究開始当初の背景

フロン排出抑制法などの空調機器用冷媒に対する規制により、環境負荷の小さい代替冷媒への転換が進められており、地球温暖化係数 (GWP) の小さい新規代替冷媒やそれらを用いた機器の開発が進められている。

一方、空調機器用熱交換器の小型化、高性能化の観点から、水力直径 1 mm 以下の微細流路を多数有する扁平多孔管が注目されている。扁平多孔管内の沸騰熱伝達に関しては、これまでもいくつかの研究が報告されており、従来径管とは異なる扁平多孔管特有の熱伝達特性がみられることが報告されている。

扁平多孔管は押出により製造され、比較的容易に様々な流路断面形状の製造が可能であり、最適流路形状についても検討が進められている。また、実機では圧縮機から潤滑油が高温・高圧の冷媒に混入して吐出され、熱交換器内での流動様相、熱伝達および圧力損失特性に影響することが知られている。蒸発器の高性能化を図るためには、流動および熱伝達特性に及ぼす油の影響について正確に把握する必要がある。しかしながら、冷媒と油の組み合わせや流路形状により油の影響は異なり、扁平多孔管内での沸騰熱伝達および圧力損失特性に及ぼす油の影響に関しては十分な知見が得られていない。

2. 研究の目的

扁平多孔管の最適流路形状の検討および冷媒+油混合物の伝熱流動特性の解明を最終目的とし、本研究では、(1)扁平多孔管内の気液二相流動様相、(2)沸騰熱伝達および圧力損失特性に及ぼす流路断面形状の影響、(3)沸騰熱伝達および圧力損失に及ぼす油混合の影響について実験的に明らかにする。

3. 研究の方法

実験装置は、水予冷器、電気予熱器、テストセクション、凝縮器、過冷器およびレシーバから構成される強制循環ループである。冷媒の温度および圧力は、電気予熱器前およびテストセクション前に設けた冷媒混合器において、K型シーツ熱電対および圧力変換器を用いて測定した。冷媒の質量流量および圧力は、それぞれバイパスバルブの開度および凝縮器での熱交換量により調整した。

気液二相流動様相については、扁平多孔管を模した1辺が1.0 mmの並列微細正方形流路を水平に設置し、上方からハイスピードカメラを用いて観察した。

沸騰熱伝達および圧力損失実験は、管上下面に設置した面状ヒータにより試験伝熱管を加熱して行った。加熱量は面状ヒータの電圧と電流から求め、管外壁面温度は管外壁面に所定の間隔で取り付けられたK型熱電対により測定した。油混合の実験を行う際は、テストセクション出口に設けた充填・分離ループから油を充填し、油濃度はサンプリング方式により測定した。

試験流体には、比較的GWPが小さく、現在の家庭用空調機に使用されているR32を用いた。実験は、飽和温度15°Cの条件で、主に質量速度50-400 kgm⁻²s⁻¹の範囲で行った。

4. 研究成果

(1) 気液二相流動様相

観察された代表的な流動様相を図1に示す。冷媒は右から左方向へ流れている。本実験では、スラグ流 (プラグ流)、スラガー環状流、チャーン流および環状流が観察された。

スラグ流は主に低質量速度、低クオリティ域で観察され、流路内を蒸気プラグと液スラグが交互に流れる流動様式である。蒸気プラグ周りの液膜は薄く、クオリティが大きいほど長い蒸気プラグが観察された。スラガー環状流では、流路内壁面に沿って流れる滑らかな液膜と流路を閉塞しない程度の波が観察された。チャーン流では、気液界面の擾乱が大きく、流路内壁面には比較的厚い液膜流が観察された。環状流では、気液界面に強い擾乱をともなう液膜流が観察された。

図2に質量速度Gとクオリティxに対して流動様式線図を示す。質量速度によらず、低クオリティ域でスラグ流が観察された。質量速度100 kgm⁻²s⁻¹以下では質量速度が大きい程、より低いクオリティでスラグ流からスラガー

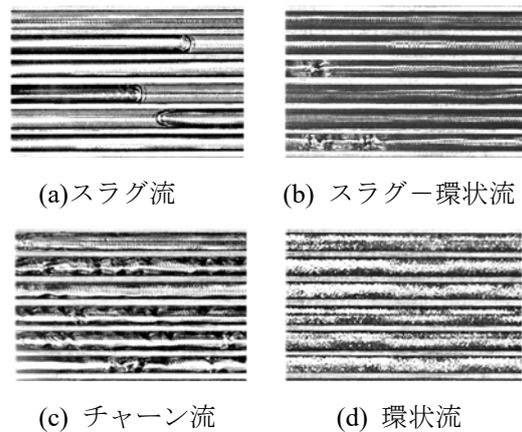


図1 流動様相

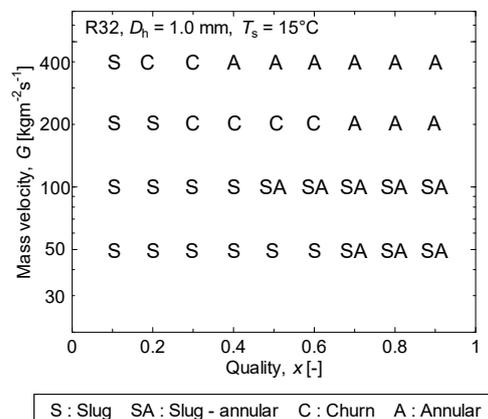


図2 流動様式線図

環状流へと遷移し、また、質量速度 $200 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 以上の中・高クオリティでチャーン流および環状流が観察された。

(2) 流路断面形状の影響

フィン付矩形微細流路を有する扁平多孔管 (Rib0.82) を用いて、伝熱面積の拡大と表面張力による伝熱促進効果について検討を行った。試験伝熱管の断面を図 3 に示す。



図 3 試験扁平多孔管 (Rib0.82)

図 4 に、熱流束 10 kWm^{-2} におけるフィン付扁平多孔管内での沸騰熱伝達率 α を、クオリティ x に対して示す。熱伝達率はフィンを考慮した実伝熱面積基準の熱流束を用いて算出した。質量速度 $400 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ の条件では、クオリティの増加にともない熱伝達率は増大しており、従来径円管と同様に強制対流の影響がみられた。ドライアウト開始クオリティに着目すると、質量速度の増大にともない、その値は増加しており、質量速度 $50, 100, 200$ および $400 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ でそれぞれ $0.2, 0.65, 0.7$ および 0.95 であった。クオリティ $0.3-0.7$ では、熱伝達率は質量速度 $200 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ でもっと高い値を示し、クオリティ 0.7 以上では質量速度 $400 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ が最も高い熱伝達率を示した。

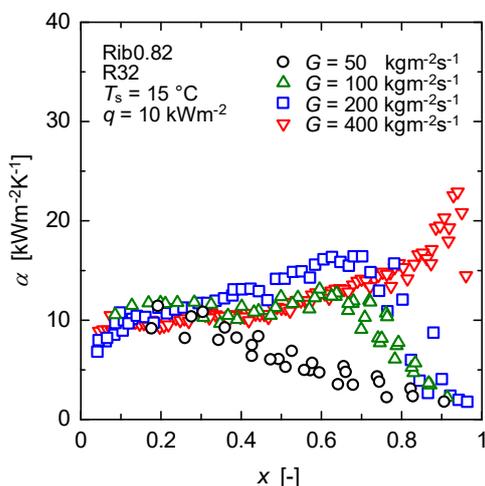


図 4 フィン付扁平多孔管の沸騰熱伝達

図 5 に、フィンによる伝熱促進効果を検討するために、水力直径が 0.85 mm とほぼ同じでフィンの無い矩形平滑流路を有する水平扁平多孔管内の沸騰熱伝達率[1]との比較結果を示す。フィンによる伝熱面積の影響を含む実伝熱面積基準の熱伝達率で比較しても、フィン付扁平多孔管の方が良好な熱伝達率を示しており、流路内面にフィンを設けることで伝

熱が促進されていることが確認できる。特に、質量速度 $200 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ の中・高クオリティおよび質量速度 $400 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ の低・中クオリティにおいて、フィンによる伝熱促進効果が大きいことがわかる。これは、フィン付矩形流路の場合、表面張力の作用により流路断面辺部およびフィン先端部に伝熱に優れる薄液膜が形成され、伝熱が促進されたものと考えられる。

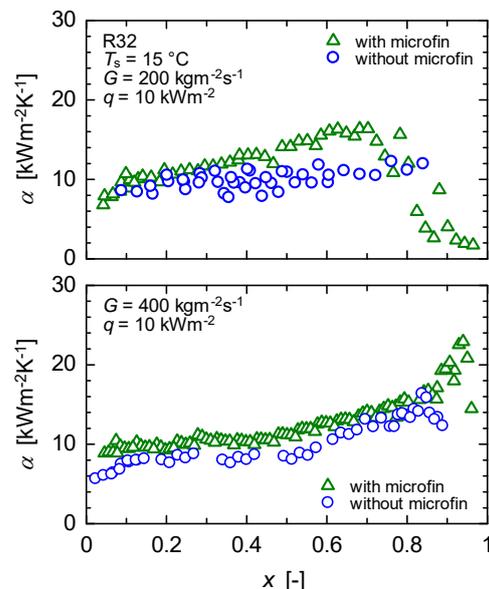


図 5 フィンによる伝熱促進効果

図 6 には二相摩擦損失増倍係数 ϕ_L と Lockhart-Martinelli パラメータ X の関係を示す。図中には、水力直径 0.85 mm の矩形平滑流路を有する水平扁平多孔管の結果[1]と、水力直径の影響を考慮した Mishima-Hibiki の予測式[2]による計算値を実線であわせて示す。図より、二相増倍係数は、Mishima-Hibiki の式と良好な相関を示しており、二相増倍係数に及ぼす流路内面のフィンの有無の影響は小さく、その影響は水力直径により整理できると考えられる。

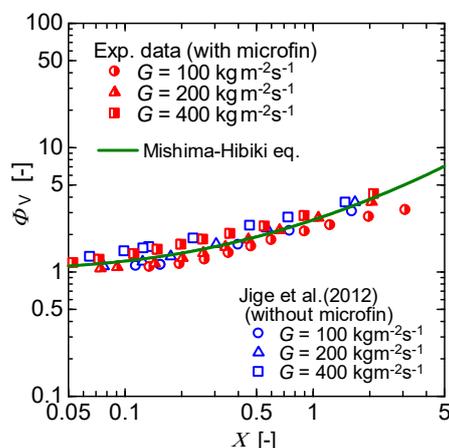


図 6 二相摩擦増倍係数と L-M パラメータ

(3) 潤滑油混合の影響

潤滑油の混合が沸騰熱伝達および圧力損失に及ぼす影響について明らかにするために、円形微細流路を有する水平扁平多孔管内での R32 純冷媒と PVE 系相溶性油の混合物の沸騰熱伝達率および圧力損失の測定を行った。実験に用いた扁平多孔管(Cir0.81)の流路断面を図 7 に示す。



図 7 試験扁平多孔管 (Cir0.81)

図 8 に、R32 純冷媒と R32+油混合物 (油濃度 $C_0=3.7$ wt%) の沸騰熱伝達率 α を、クオリティ x に対して示す。低クオリティかつ高熱流束の条件では R32+油混合物は R32 に比して良好な熱伝達率を示すものの、その他の条件では R32+油混合物は純冷媒に比べて低い熱伝達率を示した。低・中クオリティ域では、R32 および R32+油混合物ともに、熱流束の増加にともない熱伝達率は増大しており、この熱流束の増加による熱伝達率の増大は純冷媒に比べて R32+油混合物で顕著であった。また、高クオリティ域では、熱流束によらず油の混入により熱伝達率は低下する傾向がみられた。

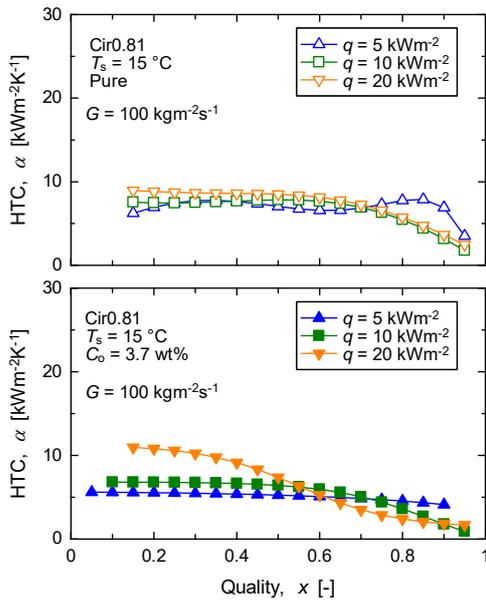


図 8 沸騰熱伝達率に及ぼす油の影響

図 9 に、R32 および R32+油混合物の沸騰熱伝達率 α を、質量速度 G に対して示す。図中には、従来径管に対する森らの沸騰熱伝達率の予測式[3]による計算値を実線で示す。いずれの質量速度条件において、熱伝達率は油濃度の増加にともない低下しており、特に、質量速度 $50 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ で油の混入による熱伝達率の低下が大きい。これは、高質量速度条件では、油濃度の増加にともない液粘度が増加することで強制対流熱伝達の寄与が減少するの

に対して、低質量速度条件では、油の混合により液粘度および表面張力が増大し、蒸気プラグ周りの液膜が厚くなることで液膜熱抵抗が増大することに加え、蒸気プラグ周りの液膜内の油濃度が増大することで、熱伝達率が大きく低下したものと考えられる。

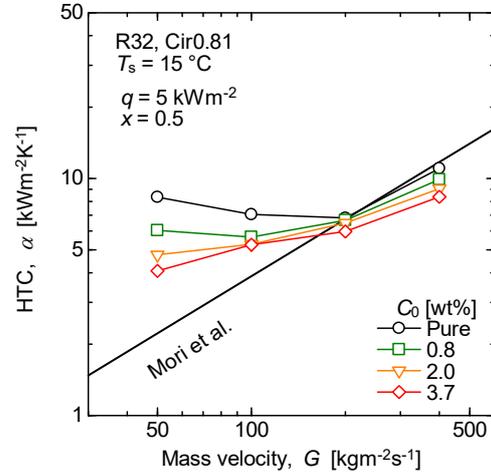


図 9 沸騰熱伝達率に及ぼす質量速度および油濃度の影響

図 10 に、R32 純冷媒および R32+油混合物の沸騰流の摩擦圧力損失の比較を示す。図より、R32+油混合物の摩擦圧力損失は R32 に比べ大きく、R32 の 1.3–1.8 倍程度の値を示した。また、R32 では摩擦圧力損失に及ぼす熱流束の影響はみられないが、R32+油混合物では質量速度 $400 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ のクオリティ 0.5 以下において熱流束の増加にともなう摩擦圧力損失の増大がみられた。これは、質量速度、熱流束の増加にともないフォーミングが促進され、フォーミングにより発生した多数の気泡により流動損失が増大したものと考えられる。

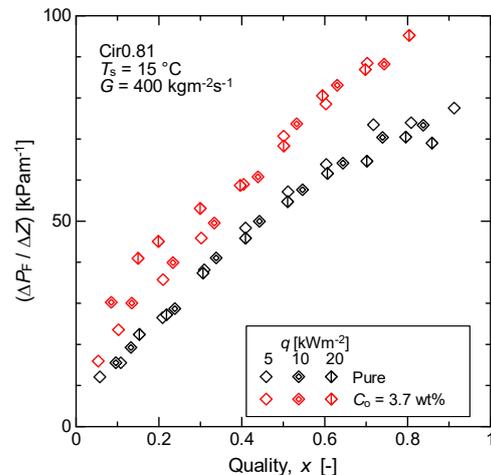


図 10 摩擦圧力損失に及ぼす油の影響

参考文献：

- [1] D. Jige and S. Koyama, Experimental study on flow boiling of R1234ze(E) and R32 in horizontal rectangular mini channels, *Proc. of the 3rd International Forum on Heat Transfer*, Nagasaki, 163 (2012).
- [2] K. Mishima and T. Hibiki: “Some Characteristics of Air-Water Two-Phase Flow in Small Diameter Vertical Tubes”, *Int. J. Multiphase Flow*, 22(4), pp.703-712, (1996).
- [3] 森 英夫, 吉田 駿, 柿本 益志, 大石 克己, 冷媒の水平平滑蒸発管内熱伝達係数の予測式の修正. *日本冷凍協会論文集*, 16 (2), pp.177-187 (1999).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

- ① Hikaru Eda, Daisuke Jige, Norihiro Inoue, Experimental study of boiling heat transfer and pressure drop of R32 inside horizontal multiport tube with circular minichannels, *Journal of the JIME*, Vol.53, No.3, pp.174-179, 2018.
- ② Daisuke Jige, Shogo Kikuchi, Hikaru Eda, Norihiro Inoue, Shigeru Koyama, Evaporation Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of R32 Inside a Multiport Tube with Microfins, *Int. J. Air-Cond. Ref.*, Vol.26, No.2, 1850017 (8 pages), 2018. DOI: 10.1142/S2010132518500177
- ③ Hikaru Eda, Shogo Kikuchi, Daisuke Jige, Norihiro Inoue, Shigeru Koyama, Effect of lubricant oil on flow boiling heat transfer characteristics of R32 in a horizontal multiport tube, *Trans. of the JSRAE*, Vol.35, No.2, 2018. (in press.) (in Japanese)

〔学会発表〕(計6件)

- ① 榎田晃, 菊池省吾, 地下大輔, 井上順広, R32 の水平扁平多孔管内沸騰熱伝達特性に及ぼす圧縮機潤滑油の影響, 2017年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集, A331, 2017.9, 東京.
- ② 菊池省吾, 榎田晃, 地下大輔, 井上順広, R32 の正方形細径流路内における流動様相, 2017年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集, A332, 2017.9, 東京.
- ③ 榎田晃, 地下大輔, 井上順広, R32 の円形流路を有する水平扁平多孔管内における沸騰熱伝達および圧力損失に関する実験, 第87回(平成29年)マリンエンジニアリング学術講演会, 東京, No.308, 2017.
- ④ Daisuke Jige, Norihiro Inoue, Shigeru Koyama, Evaporation heat transfer and pressure drop of R32 in a horizontal multiport tube with microfins, 2017, The 5th IIR Conference on Thermophysical Properties and Transfer Processes of Refrigerants (TPTPR2017), Seoul, 2017.4.
- ⑤ 榎田晃, 地下大輔, 井上順広, R32 の三角形流路を有する水平扁平多孔管内における蒸発熱伝達および圧力損失に関する実験, 2016年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集, 神戸, 2016.9.
- ⑥ 地下大輔, 佐川賢太郎, 井上順広, 水平正方形流路内でのR32の蒸発熱伝達に関する実験, 第53回日本伝熱シンポジウム講演論文集, 大阪, 2016.5.

6. 研究組織

(1) 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