

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月10日現在

機関番号：12614
 研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2010～2012
 課題番号：22560788
 研究課題名（和文）自然冷媒を用いた細管型・プレート式熱交換器の凝縮・蒸発熱伝達および圧力損失
 研究課題名（英文）Condensation and Evaporation Heat Transfer, Pressure Drop of Small-Diameter Tube and Plate Types Heat Exchanger for Natural Refrigerants
 研究代表者
 井上 順広（INOUE NORIHIRO）
 東京海洋大学・海洋科学技術研究科・教授
 研究者番号：80251677

研究成果の概要（和文）：

本研究では、温暖化係数（GWP）の低い次世代冷媒（自然冷媒）に転換する過程での候補冷媒の一つである R 32 冷媒および現状で家庭用空調機に使用されている R 410A 冷媒を用いた外径 4mm の細径管内の伝熱実験を行った。さらに混合冷媒として R32 と R152a についても同様の実験を行い、それらの冷媒の圧力損失・熱伝達特性を明確にした。そして次世代冷媒用熱交換器の設計に寄与する圧力損失・熱伝達性能の予測式を提案した。

研究成果の概要（英文）：

In this study, we conducted an experimental study on heat transfer and pressure drop in a small-diameter tube with an outside diameter of 4.00 mm using R32 (which is one of the new-generation candidates for alternative low-GWP refrigerants) and R 410A (which is currently used in household air-conditioning systems). Furthermore we conducted the same experimental study using pure R152a and R32+R152a refrigerant mixtures, and it was made clear that pressure drop and heat transfer characteristics. Also we proposed that the empirical correlation of heat transfer coefficient and pressure drop for equipment design can be applied for heat exchangers using the next generation refrigerants.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2010年度 | 2,400,000 | 720,000 | 3,120,000 |
| 2011年度 | 500,000 | 150,000 | 650,000 |
| 2012年度 | 500,000 | 150,000 | 650,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,400,000 | 1,020,000 | 4,420,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：船舶機関・熱交換器・熱伝達・圧力損失・冷媒・細径管

1. 研究開始当初の背景

船舶・海洋分野では地球温暖化防止・環境保護重視の国際的情勢と原油価格の高騰から、廃熱や低質熱源の更なる有効利用と省エネルギー技術の進展が期待されていた。このような社会状況に対応して低質熱源を有効

に利用するための新しい高性能熱交換機器の開発や低温エネルギーを有効に利用するためのエネルギー変換促進技術の進展、環境負荷軽減のためのエネルギー利用フローの再構築などが急務となっていた。そのため、LNG 船における積荷の LNG 自己蒸発潜熱や船

船舶機関からの低温廃熱回収に利用可能な高効率熱交換器の開発が進められ、その圧力損失・伝熱性能などの基礎特性を把握することが求められていた。

また、同様に地球温暖化防止の観点から、民生部門でのエネルギー消費に占める割合の大きい冷凍空調分野でも、フロン系冷媒に替わる温暖化係数(GWP)が小さい自然冷媒としてCO₂を使用することが様々な観点から模索されていた。しかしながら、空調機器にCO₂を冷媒として用いた場合、検討されている機器技術では、従来のシステム性能程度に維持することはほぼ困難であった。そのようなことから、自然冷媒であり、熱物的にはフロン系よりも優位でありながら、可燃性冷媒であるがために空調機用途では十分な検証が行われていないHC系冷媒を用いた凝縮・蒸発伝熱特性および圧力損失についての実験課題を構想した。

2. 研究の目的

本研究では、冷凍空調分野でまだ十分な伝熱実験が行われていない炭素(HC)系冷媒を含む低GWP冷媒、細径管(内径3mm~4mm程度)とLNG船における積荷のLNG自己蒸発潜熱や船舶機関からの低温廃熱回収に利用可能な高効率熱交換器を用いて、凝縮・蒸発伝熱特性および圧力損失について実験を行い、冷凍空調機器や船舶機関システムへ適用可能な熱交換器の熱的設計、高性能化に資する知見を得ることを目的として行った。

3. 研究の方法

本研究は、代表研究者および研究協力者3名(技術職員、大学院生、学部生)の4名にて分担して遂行した。研究は、冷凍空調分野でまだ十分な伝熱実験が行われていない低GWP冷媒、細径管(内径3mm~4mm程度)と新型プレート式熱交換器を用いて、実験装置の製作を行い、伝熱特性および圧力損失について、熱交換器の熱的設計、高性能化に資する知見を得るための実験を行った。

4. 研究成果

以下に主な研究成果を示す。

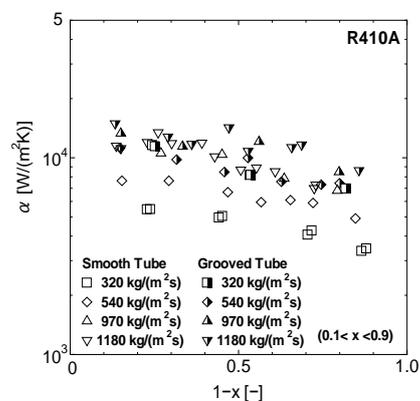
(1) 実験装置および実験方法

実験装置は、蒸気圧縮式ヒートポンプシステムであり、冷媒経路と3つの冷却、加熱水経路から構成されている。冷媒経路は、圧縮機、油分离器、プレコンデンサ、試験区間、ポストコンデンサ、受液器、ドライヤ、質量流量計、電子膨張弁、蒸発器から構成されている。冷却水・加熱水の経路は、タンク、恒温循環水槽、ポンプおよび流量計からそれぞれ構成されている。試験区間の全長は3.6mであり、4つの小区間から構成されており、小区間それぞれの長さは900mmである。小区

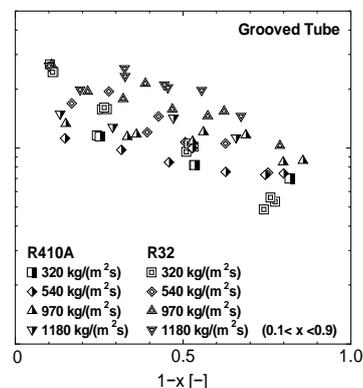
間は、環状部には冷却水が流れ、管内を冷媒が流れる対向流式二重管熱交換器である。また、小区間における圧力損失の計測区間長さは800mmで、有効伝熱長さは660mmである。実験に使用した平滑管および溝付管の外径はいずれも4.00mmの細径である。

冷媒および冷却水流量については、コリオリ式質量流量計でそれぞれ計測した。冷媒温度は、第1区間入口、第2区間出口、第3区間入口、第4区間出口において、シース型K熱電対により計測している。伝熱管壁温度は、それぞれの小区間入口から80mm、330mm、580mmの箇所上下面および側面の3箇所にT熱電対を設置して測定を行った。冷却水温度は各小区間出入口の混合器で白金測温抵抗体により測定を行った。冷媒圧力は、プレコンデンサ入口、テストセクション出入口で歪ゲージ式絶対圧力計で測定し、試験区間内の圧力損失は各小区間毎に歪みゲージ式差圧変換器によって計測を行った。

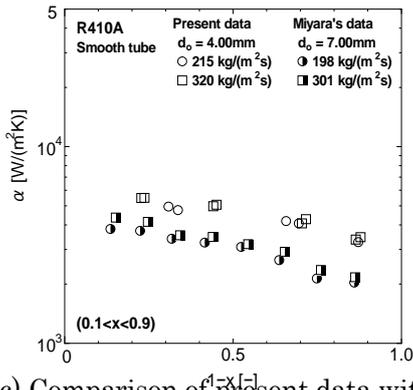
実験は、試験区間への冷媒入口圧力を飽和蒸気温度が約35℃または40℃となるよう熱源条件と圧縮機回転数を制御することにより行った。冷却水温度は凝縮温度が35℃の時は25℃、40℃時は20℃としている。冷媒流量は電子膨張弁の開度により変化させ、冷媒質量速度が215~1290 kg/(m²s)の範囲で実験を行った。



(a) Comparison of smooth and grooved tube.



(b) Comparison of R410A and R32.



(c) Comparison of present data with Miyara's data.

Fig. 1 Relation between local heat transfer coefficient and vapor quality.

(2) 局所熱伝達

Fig. 1 (a) ~ (c) に局所熱伝達の結果を示す。4mm 細径溝付管の局所熱伝達係数は、平滑管より約 1.2~2 倍大きな値を示した。また、4mm 細径溝付管のは、外径 6.35 mm 溝付管よりも R410A の場合で約 1.4~1.9 倍高い値を示した。R32 の場合は、蒸気クオリティが高い領域では R410A の実験値よりも高い値を示した。

(3) 平均熱伝達

R410A、R32 いずれの冷媒においても、4mm 細径溝付管の平均熱伝達係数は、低質量速度から平滑管に比べ高い値を示しており、内面溝が伝熱促進に有効であることを確認した。(Fig. 2)

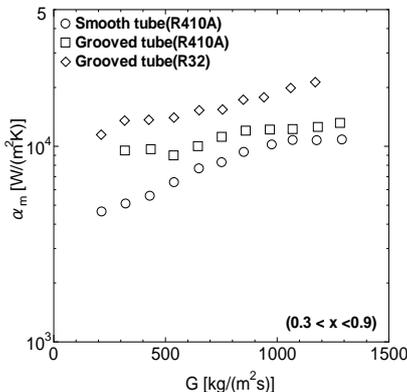
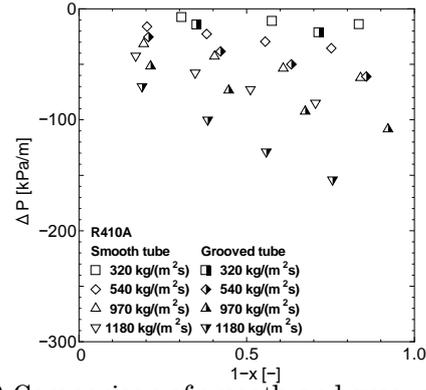


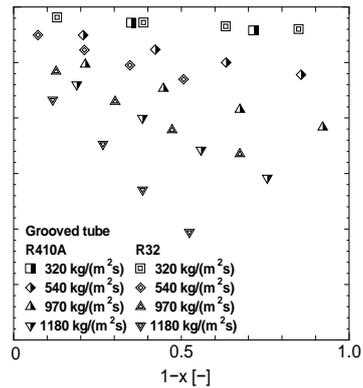
Fig. 2 Relation between mean heat transfer coefficient and refrigerant mass flux.

(4) 圧力損失

4mm 細径溝付管の圧力損失は、平滑管より約 2 倍大きな値を示した。R32 の圧力損失は、低質量速度では R410A とほぼ等しい値を示したが、質量速度が約 1000 kg/(m^2s) 以上の高質量速度領域では R410A より高い値を示した。(Fig. 3)



(a) Comparison of smooth and grooved tube.



(b) Comparison of R 410A and R 32.

Fig. 3 Relation between pressure drop and vapor quality.

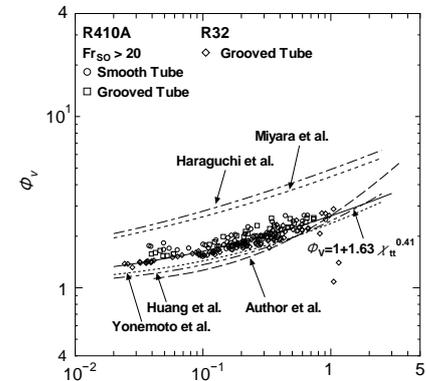


Fig.4 Relation between Φ_v and χ_{tt} .

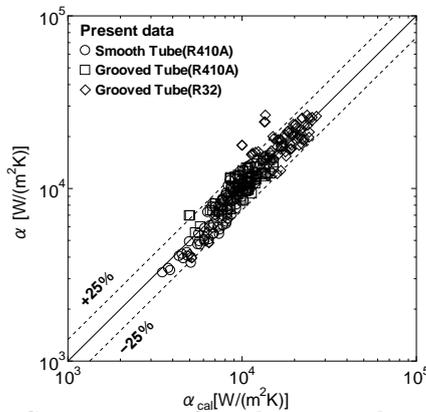


Fig.5 Comparison of condensation heat-transfer coefficient between predicted and measured data.

(5) 予測式の提案

4mm 細径平滑管および溝付管に適用できる冷媒 R410A、R32 の凝縮における圧力損失および凝縮熱伝達係数の相関式を提案した。Fig. 4 および Fig. 5 に提案した式と実験値の相関をそれぞれ示す。

(6) 混合冷媒の伝熱性能

冷媒毎の冷媒質量速度 G に対する平均熱伝達係数 α_m を示す。冷媒の種類によらず質量速度 G の増加に伴い α_m は増加している。R32+R152a 混合冷媒のは、R32 より約 10~25%、R152a より約 5~15% 低く、質量速度が大きいほど差異は小さくなった。また、R410A より約 10~30% 高い値を示した。(Fig. 6)

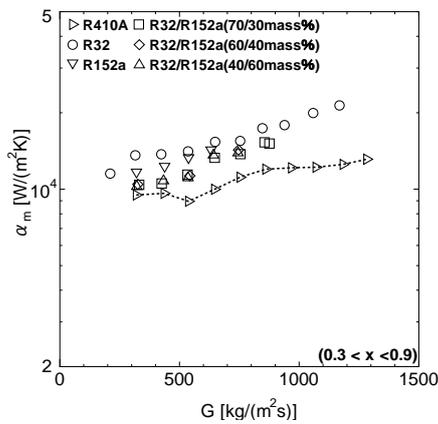


Fig. 6 Relation of refrigerant mixtures between mean heat transfer coefficient and refrigerant mass flux.

(7) 混合冷媒の圧力損失

質量速度毎のそれぞれの冷媒の蒸気クオリティに対する単位長さ当たりの圧力損失を示す。図より、質量速度 G が増加すると圧力損失も増加し、高質量速度では圧力損失の増加割合は低質量速度よりも大きくなっている。混合冷媒は、R152a の組成比が大きいほど圧力損失は大きな値を示した。同程度

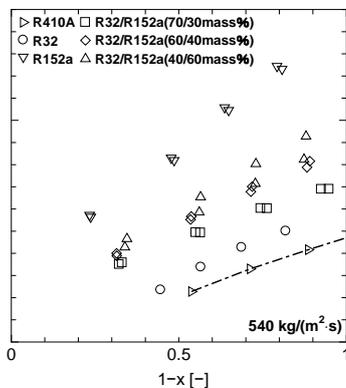


Fig. 7 Relation of refrigerant mixtures between pressure drop and vapor quality.

の蒸気クオリティにおいて、圧力損失を比較すると R152a の組成比が大きくなるほど圧力損失は大きくなり、質量速度 $540 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ では R152a の圧力損失は R32 より約 2.5 倍、R410A より約 3 倍大きい値を示した。これは R152a の液相における粘性が大きく、気液の密度差も大きいため、気液間の速度差が大きくなり壁面せん断応力が大きくなるためと考えられる。

(8) 今後の展開

本申請研究の期間内では、題目にある自然冷媒を用いた実験までは到達できなかったが、引き続き本実験装置を用いて研究を継続し、今年度以降 R32 に自然冷媒であるプロピレンを混合した共沸冷媒の結果について公表を予定している。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 11 件)

- ① INOUE, N., ICHINOSE, J., SINGLE-PHASE HEAT TRANSFER AND PRESSURE DROP INSIDE INTERNALLY HELICAL-GROOVED HORIZONTAL SMALL-DIAMETER TUBES, International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, 査読有, Vol.20 No. 4, 2012, 1-13, DOI: 10.1142/S2010132512500228.
- ② Norihiro INOUE, Junya ICHINOSE and Kazuhide WATANABE, HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS OF LOW-GWP REFRIGERANTS INSIDE A HORIZONTAL INTERNALLY HELICAL-GROOVED SMALL-DIAMETER TUBE, 環境と新冷媒 国際シンポジウム 2012, 査読無, 2012, 226-230.
- ③ Junya ICHINOSE, Shuichi TANAKA, Norihiro INOUE, THE CONDENSATION HEAT TRANSFER AND PRESSURE DROP OF R410A INSIDE A HORIZONTAL SMALL-DIAMETER TUBE, 日本マリンエンジニアリング学会誌 (ISME2011 再録), 査読無, 第 47 巻 3 号, 2012, 351-356.
- ④ Junya ICHINOSE, Norihiro INOUE, The Empirical Correlation for Heat Transfer and Pressure Drop in Single-phase Turbulent Flow inside Internally Helical-Grooved Horizontal Small-Diameter Tubes, The 6th Asian Conference on Refrigeration and Air-conditioning, 査読有, Paper ID 3044, 2012, 1-8.
- ⑤ 一瀬純弥, 井上順広, R32 および R410A 冷媒の水平内面溝付細管内の凝縮熱伝達および圧力損失, 第 2 報: 凝縮熱伝達および圧力損失の相関式, 日本冷凍空調学会論文集, 査読有, Vol. 28, No. 4, 2011,

- 479-490.
- ⑥ 一瀬純弥, 井上順広, R32 および R410A 冷媒の水平内面溝付細管内の凝縮熱伝達および圧力損失, 第 1 報: 単相乱流熱伝達および圧力損失の相関式, 日本冷凍空調学会論文集, 査読有, Vol.28, No. 4, 2011, 469-478.
- ⑦ Junya ICHINOSE, Shuichi TANAKA, Norihiro INOUE, THE CONDENSATION HEAT TRANSFER AND PRESSURE DROP OF R410A INSIDE A HORIZONTAL SMALL-DIAMETER TUBE, 9th International Symposium on Marine Engineering, 査読有, Paper ID. 104, 2011, 1-6.
- ⑧ ICHINOSE J., INOUE N., TANAKA S, Condensation Heat Transfer and Pressure Drop of R410A inside a Horizontal Smooth Small-Diameter Tube, 23rd International Congress of Refrigeration, 査読有, Paper ID. 155, 2011, 1-8.
- ⑨ INOUE, N., ICHINOSE, J., Heat Transfer and Pressure Drop in Single Phase Turbulent Flow inside Internally Helical-Grooved Horizontal Small-Diameter Tubes, 23rd International Congress of Refrigeration, 査読有, Paper ID. 632, 2011, 1-8.
- ⑩ ICHINOSE, J., INOUE, N., Single-Phase Heat Transfer and Pressure Drop in Laminar and Transition Flow Regions inside Internally Helical-Grooved Horizontal Small-Diameter Tubes, 23rd International Congress of Refrigeration, 査読有, Paper ID. 633, 2011, 1-8.
- ⑪ 一瀬純弥, 井上順広, 佐々木直栄, 水平内面溝付細管内の層流および遷移域の単相熱伝達・圧力損失, 銅及び銅合金技術研究会誌「銅と銅合金」, 査読有, Vol. 49, 2010, 210-217.
- ④ 一瀬純弥, 栗田航世, 井上順広, R32 および R410A の水平内面溝付細管内の凝縮熱伝達 (東京), 2012/4/20, 139-142.
- ⑤ 栗田航世, 一瀬純弥, 井上順広, R32 および R410A の水平内面溝付細管内の圧力損失, 第 46 回空気調和・冷凍連合講演会 (東京), 2012/4/20, 135-138.
- ⑥ 栗田航世, 一瀬純弥, 井上順広, R32 を用いた水平溝付細管内の凝縮熱伝達および圧力損失, 第 51 回銅及び銅合金技術研究会講演大会 (京都), 2011/11/14, 19-20.
- ⑦ 一瀬純弥, 田中脩一, 井上順広, R410A の水平細径管内の凝縮熱伝達及び圧力損失, 第 81 回マリンエンジニアリング学術講演会 (東京), 2011/5/26, 113-114.
- ⑧ 一瀬純弥, 田中脩一, 井上順広, R410A の水平平滑細管内の凝縮熱伝達及び圧力損失, 第 45 回空気調和・冷凍連合講演会 (東京), 2011/4/22, 129-132.
- ⑨ 一瀬純弥, 田中脩一, 井上順広, 水平平滑細管内の凝縮熱伝達および圧力損失, 第 50 回銅及び銅合金技術研究会講演大会 (東京), 2010/11/5, 135-136.
- ⑩ 田中脩一, 一瀬純弥, 浅沼夢愛, 栗田航世, 井上順広, 水平平滑管内の凝縮熱伝達および圧力損失の実験, 第 80 回マリンエンジニアリング学術講演会 (新潟), 2010/8/31, 171-172.
- ⑪ 一瀬純弥, 井上順広, 佐々木直栄, 水平内面溝付細管内の層流・遷移域における単相流圧力損失および熱伝達 第二報: 圧力損失および熱伝達の相関式, 第 44 回空気調和・冷凍連合講演会 (東京), 2010/4/21, 39-42.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井上 順広 (INOUE NORIHIRO)

東京海洋大学・海洋科学技術研究科・教授
研究者番号: 80251677

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

[学会発表] (計 11 件)

- ① 井上順広, 栗田航世, 一瀬純弥, 低 GWP 冷媒の水平溝付細管内の凝縮熱伝達および圧力損失, 空気調和・衛生工学会北海道支部第 47 回学術講演会 (札幌), 2013/3/13, 177-180.
- ② 一瀬純弥, 栗田航世, 井上順広, 低 GWP 混合冷媒の水平溝付細管内の凝縮熱伝達および圧力損失, 第 52 回日本銅学会講演大会 (東京), 2012/11/4, 133-134.
- ③ 栗田航世, 小川駿, 一瀬純弥, 井上順広, R32+R152a 混合冷媒の水平内面溝付細管内の凝縮熱伝達および圧力損失, 日本冷凍空調学会 2012 年度年次大会 (札幌),