

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 9 月 8 日現在

機関番号：12614

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420861

研究課題名(和文) 低GWP冷媒を用いた高性能アルミニウム熱交換器の凝縮・蒸発熱伝達および圧力損失

研究課題名(英文) Condensation/Evaporation Heat Transfer and Pressure Drop of High-Performance Aluminium Heat Exchanger Using Low-GWP Refrigerants

研究代表者

井上 順広 (INOUE, NORIHIRO)

東京海洋大学・その他部局等・教授

研究者番号：80251677

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、冷凍空調分野でもまだ十分な伝熱実験が行われていない温暖化係数の小さい冷媒および管内径3mm～4mmの細径伝熱管から8mm程度の通常径を用いている。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も利用可能なコスト低減が可能な総アルミニウム製の高性能熱交換器の開発に寄与するための単相・凝縮・蒸発熱伝達および圧力損失について実験を行った。その結果、冷凍空調機器や船舶機関システムへ適用可能な総アルミニウム熱交換器の熱的設計、高性能化に資する詳細な知見を提供した。

研究成果の概要(英文)：In this research, a refrigerant with a low warming potential, small-diameter heat transfer tubes with an inner diameter ranging between 3-4 mm, and a conventional tube having a diameter of approximately 8 mm are being used. Till date, sufficient heat transfer experiments have not been conducted using the low GWP refrigerant, even in the refrigeration and air conditioning industry. Experiments on single-phase/condensation/evaporation heat transfer and pressure drop have been conducted in order to contribute toward the development of a high-performance heat exchanger, entirely made of aluminum, which can lower the cost and be used for recovering self-evaporative latent heat of cargo on LNG carriers and for low-temperature waste heat recovery in ship engines. We have provided detailed information that supports the thermal design and the improvement in performance of the aluminum heat exchanger, which can be applied to refrigeration and air conditioning equipment and ship engine systems.

研究分野：船舶海洋工学・冷凍空調工学

キーワード：熱交換器 凝縮 蒸発 熱伝達, 圧力損失 低GWP 冷媒

1. 研究開始当時の背景

船舶・海洋分野では、地球温暖化および原油価格再高騰の懸念から、船舶機関からの排熱や低質熱源の更なる有効活用が望まれている。一方で、近年の銅地金価格の高騰から、冷凍空調機器の熱交換器については、従来の加工性、熱伝導性等に優れる銅製伝熱管に代わり、アルミニウム製伝熱管とアルミニウムフィンからなるオールアルミニウム熱交換器への関心が高まりつつある。これまでに、銅製内面溝付管内の凝縮・沸騰流に関する研究は数多く行われているが、アルミニウム製平滑管・内面溝付管に関する熱伝達および圧力損失の研究は数少なく、熱的最適設計を行う上で十分な学術情報があるとは言えない。

2. 研究の目的

本研究では、冷凍空調分野でもまだ十分な伝熱実験が行われていない温暖化係数の小さい低GWP冷媒および管内径3mm～4mmの細径伝熱管から8mm程度通常径を用いて、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も利用可能なコストを低減できる総アルミニウム製の高性能熱交換器を開発に寄与するための単相・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総アルミニウム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た。

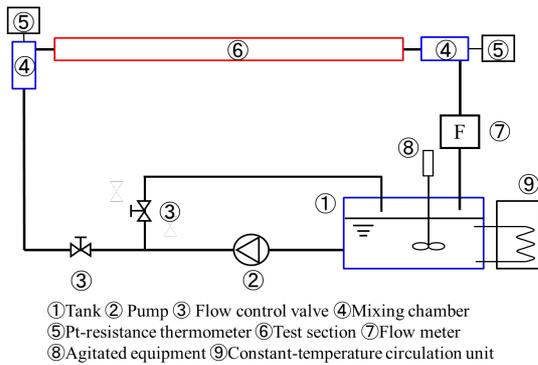


Fig.3-1 Schematic diagram of experimental apparatus.

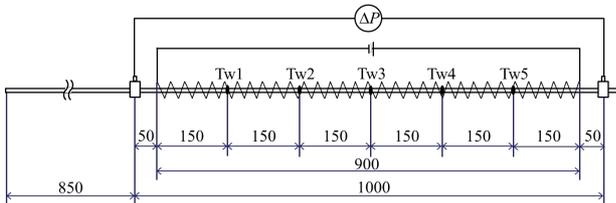


Fig.3-2 Schematic diagram of test section.

3. 研究の方法

(1) 単相実験装置および方法

Fig. 3-1 に実験装置の概略図を示す。試験流体である水は、熱源タンクにて25℃一定に保たれ、ポンプ、流量調整バルブ、テストセクション、および容積式流量計を経て、熱源タンクに戻る。試験流体の混合平均温度は、テストセクションの前後に設けた混合室にて、白金測温抵抗体を用いて測定した。

Fig. 3-2 にはテストセクションの詳細を示す。テストセクションの有効加熱区間は900mm、圧力測定区間は1000mmであり、上流には850mmの助走区間を設けた。伝熱管の加熱部は、伝熱管上に絶縁のためにポリイミド絶縁テープを巻き、ピッチ9mmで螺旋状に巻いたニクロムリボンによって加熱される。Fig.3-2には管壁温度の測定のために取り付けたT熱電対の温度接点位置および圧力測定用タップの位置を合わせて示す。T熱電対の温接点は、150mm間隔で計5点、管上部にニクロムリボンと重ならないように取り付けられている。また、圧力タップは伝熱管の入口から850mmと1850mmの位置に取り付けており、その間の圧力差はフルスケールの100kPaの差圧計で測定した。

Table 3-1 に、試験伝熱管として使用した平滑管SD8と3種類の溝付管(D8L0, D8L10およびD8L20)の仕様を示す。溝付管の仕様は、外径8.0mm、フィン高さ0.3mm、リード角0, 10および20°である。

(2) 単相熱伝達および圧力損失の結果

Fig. 3-3 に単位長さあたりの圧力損失 $\Delta P/\Delta Z$ を質量流量 W に対して示す。べて約18%高い値を示している。

Fig. 3-4 に摩擦係数 f とレイノルズ数 Re の関係を示す。

Fig. 3-5 に、平滑管および溝付管のヌセルト数 Nu を、レイノルズ数 Re に対して示す。

Table 3-1 Specifications of the test tubes.

Test tube	SD8	D8L0	D8L10	D8L20
Outer diameter [mm]	8.0	8.1	7.9	7.9
Maximum I.D. [mm]	6.0	6.8	6.6	6.7
Fin height [mm]	-	0.30	0.28	0.27
Helix angle [°]	-	0	10	20
Number of fins [-]	-	36	36	36
Surface enlargement	-	1.90	1.83	1.83
p/d_i [-]	-	0.087	0.086	0.082

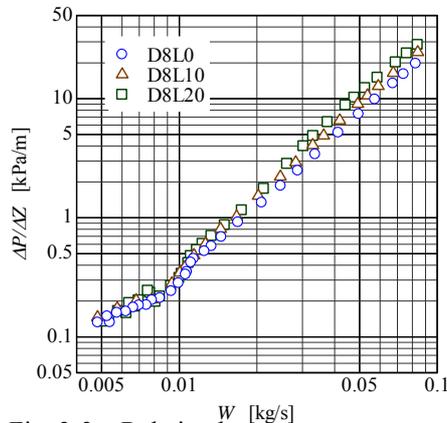


Fig. 3-3 Relation between pressure drop and mass flow rate.

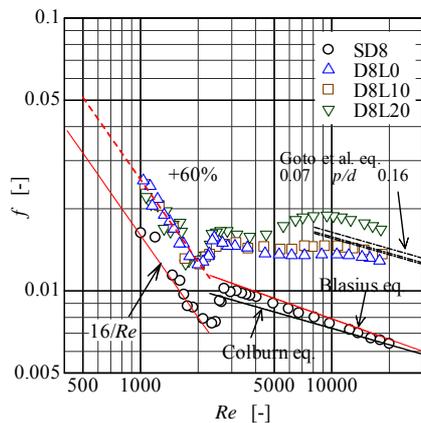


Fig. 3-4 Relation between friction factor and Reynolds number.

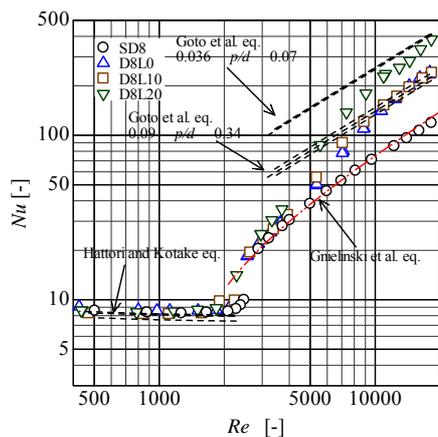


Fig. 3-5 Relation between Nusselt number and Reynolds number.

(3) 凝縮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サイクルであり、その概略を Fig. 4-1 に示す。実験装置は主に圧縮機、オイルセパレータ、予冷器、テストセクション（凝縮器）、過冷却器、液溜め、流量計、膨張弁および蒸発器から構成される。テストセクション入口での湿り度は予冷器によって調整される。テストセ

Table 4-1 Specifications of the test tubes.

Test tube	D8L0	D8L20
O.D. [mm]	7.95	7.83
Maximum I.D. [mm]	6.66	6.59
Equivalent I.D. [mm]	6.38	6.27
Helix angle [deg.]	0	20
Groove height [mm]	0.27	0.27
Number of grooves [-]	36	36
Area ratio [-]	1.63	1.61

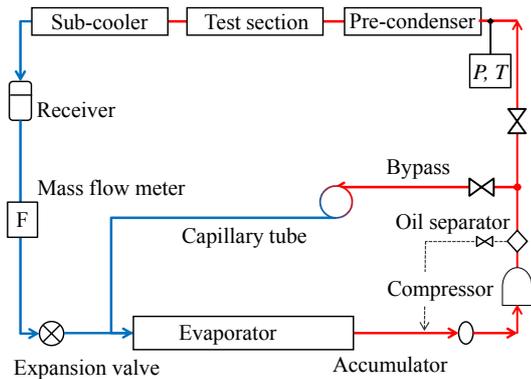


Fig. 4-1 Schematic diagram of experimental apparatus for condensation flow.

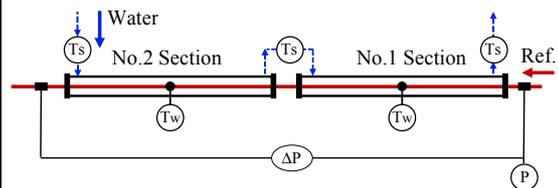


Fig. 4-2 Detail view of the test section.

クション入口圧力および冷媒流量は、膨張弁の開度および流量調整バルブによって調整される。

Fig. 4-2 にテストセクションの概略を示す。テストセクションは二重管式対向流型熱交換器であり、有効伝熱長さ 0.5 m の 2 つのサブセクションから構成される。溝付管内を流れる冷媒は、環状部を流れる冷却水と熱交換することで凝縮される。伝熱管外壁面温度は、サブセクション中央位置の管上下に T 型熱電対を取り付けることで測定した。テストセクション出入口の冷媒圧力および差圧は、テストセクション出入口に設けた圧力測定タップにおいて、絶対圧計および差圧計を用いて測定した。環状部冷却水の温度はサブセクション前後に設けた水混合器において白金測温抵抗体を用いて測定し、質量流量はコリオリ式質量流量計によって測定した。

試験伝熱管はアルミニウム製内面溝付管であり、その主な仕様を Table 4-1 に示す。表中における等価内径(Equivalent I.D.)とは溝付

Table 4-1 Specifications of the test tubes.

Test tube	D8L0	D8L20
O.D. [mm]	7.95	7.83
Maximum I.D. [mm]	6.66	6.59
Equivalent I.D. [mm]	6.38	6.27
Helix angle [deg.]	0	20
Groove height [mm]	0.27	0.27
Number of grooves [-]	36	36
Area ratio [-]	1.63	1.61

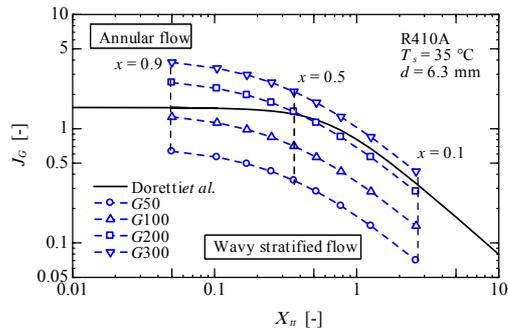


Fig. 4-3 Flow pattern map for microfin tube.

管と等しい流路断面積を持つ等価な平滑管の内径である。D8L0 および D8L20 は溝数、溝高さ、面積拡大率はほぼ同じであり、リード角が異なる。

実験は R410A を用いて、凝縮温度 35 °C、質量速度 50 ~ 300 kg/(m²s) の範囲で行った。また、比較のために R32 についても凝縮実験を行った。冷媒 R410A および R32 の物性値は REFPROP Ver. 9.0 から求めた。

(4) 凝縮熱伝達および圧力損失の結果

Fig. 4-3 に溝付管に対する流動様式線図(Doretti et al.)を示す。

Fig. 4-4 に 質量速度 50 および 200 kg/(m²s) において溝付管 D8L20 での R410A と R32 の凝縮熱伝達率の比較を示す。

Fig. 4-5 に冷媒 R410A の凝縮温度 35 °C における圧力損失勾配を湿り度に対して示す。

(5) 蒸発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サイクルであり、その概略を Fig. 5-1 に示す。実験装置は主に圧縮機、オイルセパレータ、予冷器、テストセクション(凝縮器)、過冷却器、液溜め、流量計、膨張弁および蒸発器から構成される。テストセクション入口でのクオリティは電気予熱器によって調整される。テストセクション入口圧力および冷媒流量は、膨張弁の開度および流量調整バルブによって調整される。

Table 4-1 に試験伝熱管の主な仕様を示す。試験伝熱管は外径 8 mm でリード角 0°および

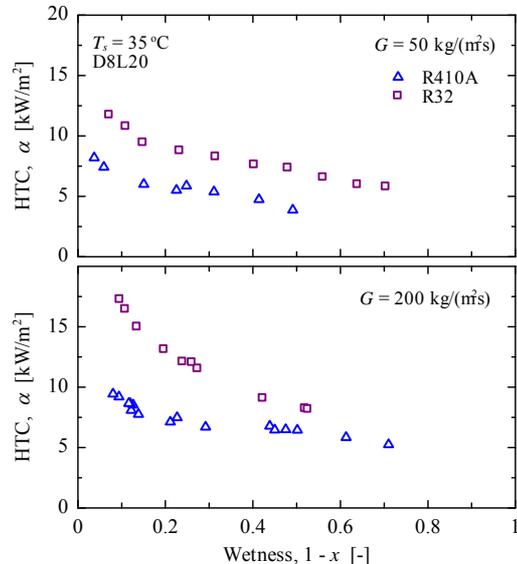


Fig. 4-4 Comparison of condensation heat transfer coefficients between R410A and R32.

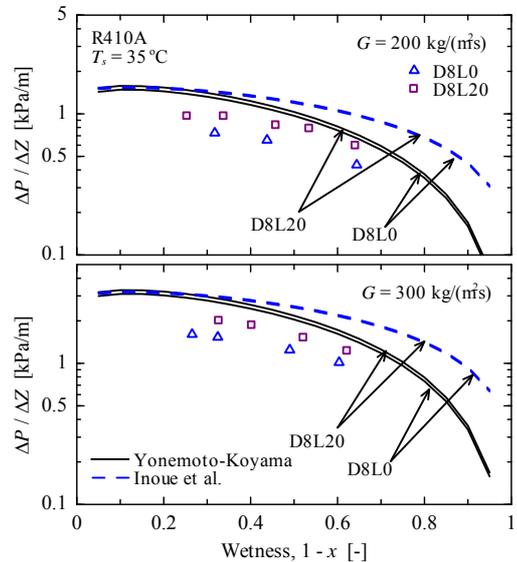


Fig. 4-5 Measured pressure drop gradients of R410A in microfin tubes.

20°のアルミニウム製溝付管(以下、L0 および L20 と称する)を凝縮流と同様に使用した。

Fig. 5-2 にテストセクションの概略を示す。試験伝熱管の加熱方式は電気加熱方式であり、試験伝熱管にニクロムリボン線をらせん状に一定ピッチで巻きつけ、ニクロムリボン線に交流電流を流すことにより試験伝熱管を加熱した。試験伝熱管外壁面には、T 型熱電対を所定の間隔で埋め込み、管外壁面温度を測定した。

実験は R410A を用いて、蒸発温度 10 °C、質量速度 50 ~ 300 kg/(m²s) の範囲で行った。冷媒 R410A の物性値は REFPROP Ver. 9.0 から求めた。

(6) 蒸発熱伝達および圧力損失の結果

Fig. 5-3 に D8L20 の蒸発熱伝達の実験結果

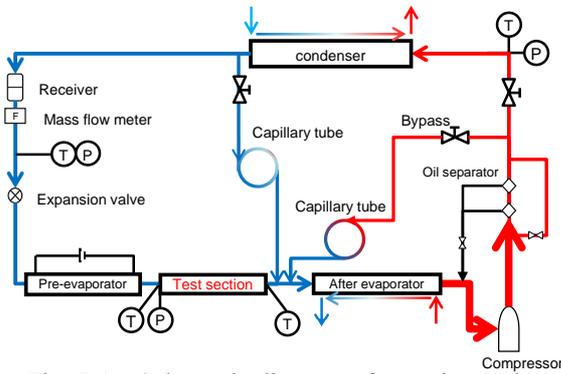


Fig. 5-1 Schematic diagram of experimental apparatus for evaporation flow.

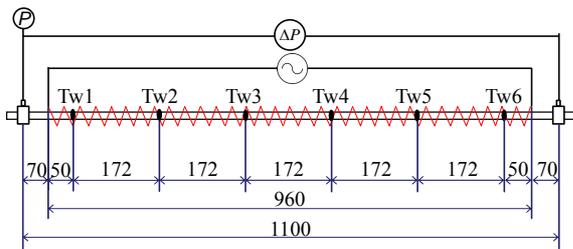
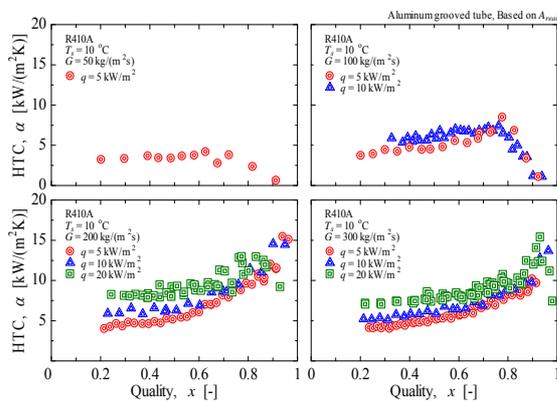
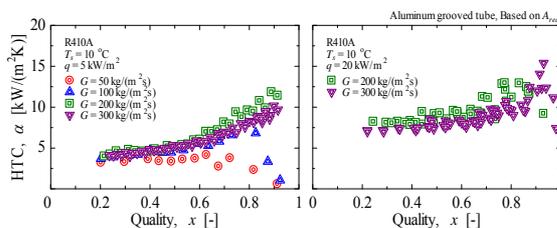


Fig. 5-2 Detail view of the test section.



(a) Effect of heat flux on HTC



(b) Effect of mass velocity on HTC

Fig. 5-3 Evaporation heat transfer coefficients of D8L20

を示す。Fig. 5-3(a)は熱流束の影響、Fig. 5-3(b)は質量速度の影響をそれぞれ示している。

Fig. 5-4にD8L0の蒸発熱伝達の実験結果を示す。

Fig. 5-5に圧力損失勾配をクオリティに対して示す。

4. 研究成果

アルミニウム製の溝付管内单相流・凝縮流・蒸発流の熱伝達および圧力損失特性について、実験的に検証を行った。その結果、アルミニウム熱交換器の熱的設計、高性能化に資する知見を提供した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計8件)

非共沸混合冷媒 R32 + R152a の水平細管内の凝縮熱伝達と圧力損失, 広瀬正尚, 地下大輔, 井上順広, 日本銅学会「銅と銅合金」, Vol.54, pp.206-210, 2015.

CONDENSATION HEAT TRANSFER AND PRESSURE DROP OF AZEOTROPIC MIXTURE REFRIGERANT R32/R1270 INSIDE HORIZONTAL SMALL-DIAMETER TUBES, Masataka HIROSE, Junya ICHINOSE, Daisuke JIGE, Norihiro INOUE, 24th International Congress of Refrigeration, IIR/IIF, Yokohama Japan, Paper ID. 702, 2015.

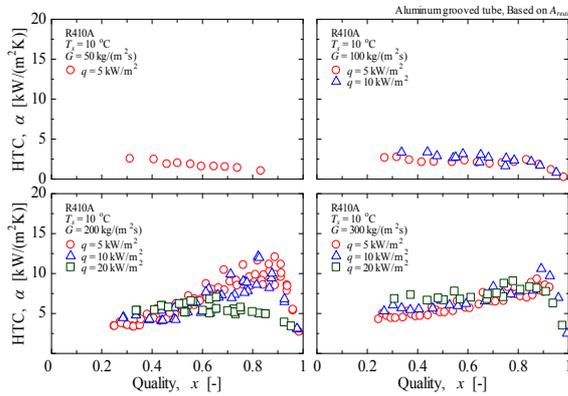
共沸混合冷媒 R32+R1270 を用いた水平内面溝付細管内の凝縮熱伝達率および圧力損失, 棚橋真美, 一瀬純弥, 地下大輔, 井上順広, 日本銅学会「銅と銅合金」, Vol.53, pp.249-254, 2014.

EXPERIMENTAL STUDY ON CONDENSATION OF THE AZEOTROPIC MIXTURE R32/R1270 INSIDE A HORIZONTAL INTERNALLY HELICAL-GROOVED SMALL-DIAMETER TUBE, Junya Ichinose, Mami Tanahashi, Daisuke Jige, Norihiro Inoue, Proceedings of the 7th Asian Conference on Refrigeration and Air Conditioning, ACRA2014-511, Jeju, KOREA, 2014.

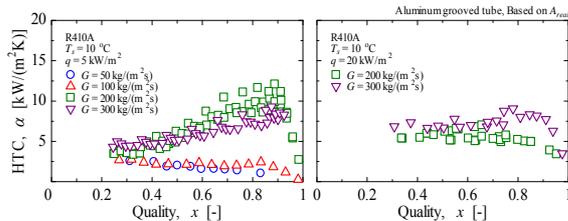
HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS OF AZEOTROPIC MIXTURE REFRIGERANT R32/R1270 INSIDE HORIZONTAL SMALL-DIAMETER TUBES, Junya ICHINOSE, Mami Tanahashi, Daisuke Jige, Norihiro INOUE, 環境と新冷媒 国際シンポジウム 2014, Kobe, (Japan), pp.327-331, 2014.

CONDENSATION HEAT TRANSFER AND PRESSURE DROP OF R32+R152a MIXTURES INSIDE A HORIZONTAL INTERNALLY HELICAL-GROOVED SMALL-DIAMETER TUBE, Norihiro Inoue, Junya Ichinose, Kosei Kurita, The 4th IIR Conference on Thermophysical Properties and Transfer Processes of Refrigerants, Paper No. TP-062, Delft, (The Netherlands), 2013.

CONDENSATION HEAT TRANSFER AND PRESSURE DROP OF R410A AND R32 INSIDE HORIZONTAL SMALL-DIAMETER TUBES, Junya Ichinose, Norihiro Inoue, The 4th IIR Conference on Thermophysical Properties



(a) Effect of heat flux on HTC



(b) Effect of mass velocity on HTC

Fig. 5-4 Evaporation heat transfer coefficients of D8L0

and Transfer Processes of Refrigerants, Paper No. TP-063, Delft, (The Netherlands), 2013.

低 GWP 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, 一瀬純弥, 栗田航世, 井上順広, 日本銅学会「銅と銅合金」, Vol.52, pp.218-224, 2013.

〔学会発表〕(計 1 3 件)

冷媒 R410A の 4 mm 溝付管内蒸発に関する実験的研究, 佐川賢太郎, 地下大輔, 井上順広, 第 50 回空気調和・冷凍連合講演会論文集, ID No. pp.1-4, 2016.

アルミ製内面溝付管内単相流の熱伝達および圧力損失, 飯塚祥太, 地下大輔, 井上順広, 第 85 回マリンエンジニアリング 学術講演会論文集, pp.113-114, 2015.

R32/R1270 混合冷媒の 4mm 細管内凝縮熱伝達～低流量域における凝縮特性～, 広瀬正尚, 藤間航平, 地下大輔, 井上順広, 羽場恒夫, 第 55 回日本銅学会講演概要集, pp.145-146, 2015 年.

冷媒 R32 の 4mm 水平溝付細管内気液二相流の流動様相の観察, 地下大輔, 佐川賢太郎, 井上順広, 第 55 回日本銅学会講演概要集, pp.153-154, 2015 年.

冷媒 R410A のアルミ内面溝付管の凝縮熱伝達および圧力損失, 地下大輔, 広瀬正尚, 井上順広, 第 49 回空気調和・冷凍連合講演会論文集, ID No.9 pp.1-4, 2015.

冷媒 R32 の水平細管内沸騰熱伝達に関する実験的研究, 佐川賢太郎, 地下大輔, 井上順広, 羽場恒夫, 第 49 回空気調和・冷凍連合講

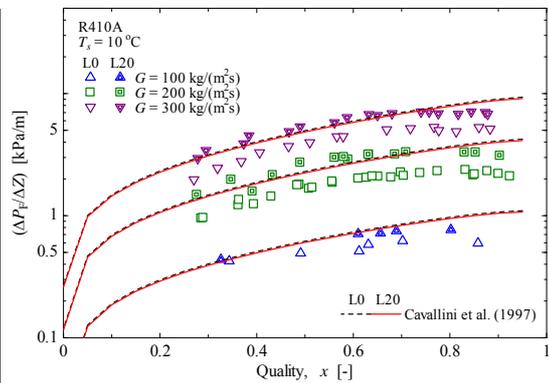


Fig.5-5 Pressure drop of evaporation flow

演会論文集, ID No.11 pp.1-4, 2015.

冷媒 R32 の水平溝付細管内蒸発に関する実験的研究, 地下大輔, 佐川賢太郎, 井上順広, 羽場恒夫, 第 52 回日本伝熱シンポジウム(福岡), ID No. D211 pp.1-2, 2015.

冷媒 R32 の内面溝付細管内における凝縮熱伝達と圧力損失 -低質量速度域における凝縮特性-, 広瀬正尚, 藤間航平, 地下大輔, 井上順広, 羽場恒夫, 日本冷凍空調学会 2015 年度年次大会講演論文集, No. A314 pp.1-4, 2015 .

冷媒 R32 の 4mm 溝付管内蒸発熱伝達および圧力損失, 佐川賢太郎, 地下大輔, 井上順広, 高橋宏行, 日本冷凍空調学会 2015 年度年次大会講演論文集, ID No.A322 pp.1-4, 2015.

非共沸混合冷媒 R32/R152a の水平内面溝付細管内凝縮 - 低流量域における凝縮特性 -, 藤間航平, 広瀬正尚, 地下大輔, 井上順広, 第 85 回マリンエンジニアリング 学術講演会論文集, pp.109-110, 2015.

非共沸混合冷媒 R32 + R152a の水平細管内の凝縮熱伝達と圧力損失, 広瀬正尚, 地下大輔, 井上順広, 羽場恒夫, 高橋宏行, 第 54 回日本銅学会講演概要集, pp.115-116, 2014 年.

アルミ内面溝付管の単相熱伝達および圧力損失, 渡邊和英, 地下大輔, 井上順広, 古村裕樹, 第 83 回マリンエンジニアリング 学術講演会論文集, pp.45 ~ 46, 2013.

共沸混合冷媒 R32/R1270 を用いた水平内面溝付細管内の凝縮熱伝達および圧力損失, 棚橋真美, 一瀬純弥, 地下大輔, 井上順広, 第 53 回日本銅学会講演概要, pp. 131-132, 2013.

〔その他〕

ホームページ

<http://www2.kaiyodai.ac.jp/~djige00/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

井上 順広 (INOUE Norihiro)

東京海洋大学 学術研究院 海洋電子機械工学部門・教授

研究者番号: 80251677