

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 18 日現在

機関番号：12614

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2013～2014

課題番号：25889027

研究課題名(和文) 扁平多孔管による低温排熱回収用高性能熱交換器の開発

研究課題名(英文) Development of heat exchanger for exhaust heat recovery using multiport tubes

研究代表者

地下 大輔 (JIGE, Daisuke)

東京海洋大学・海洋科学技術研究科・助教

研究者番号：30708368

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：微細流路を有する扁平多孔管について、円形、矩形および三角形流路を対象に冷媒R32の沸騰熱伝達および摩擦圧力損失に関する実験を行い、蒸発熱伝達および摩擦圧力損失に及ぼす流路断面形状の影響について明らかにした。矩形流路内の沸騰熱伝達率は水力直径が小さいほど高く、また、円形流路に比べて矩形および三角形流路は低流量、低クオリティ域において辺部に形成される薄液膜を介した良好な熱伝達により、高い伝熱促進効果を示した。流路断面形状による伝熱促進効果は管内蒸気速度が大きくなる高流量、高クオリティ域で小さく、ドライアウト発生クオリティは矩形流路の場合に小さく、水力直径が小さいほど小さくなる結果を得た。

研究成果の概要(英文)：The flow boiling heat transfer and frictional pressure drop characteristics of a refrigerant R32 in horizontal multiport tubes with circular, rectangular and triangular mini-channels are investigated experimentally. The effect of channels geometry on the frictional pressure drop and boiling heat transfer characteristics were clarified. The boiling heat transfer coefficient of rectangular channels increased with decreasing hydraulic diameter. The heat transfer coefficients of triangular and rectangular channels were found to be higher than those of circular channels at low mass velocities and low vapor qualities. The effect of channel geometries on enhancement of boiling heat transfer was small at high mass velocities and in the high vapor quality region. The dryout qualities of rectangular channels were lower than those of circular channels, and decreased with decreasing the channels size.

研究分野：熱工学

キーワード：扁平多孔管 ミニチャンネル 沸騰熱伝達 伝熱促進

1. 研究開始当初の背景

船舶・海洋分野においても地球温暖化、原油価格の高騰から、更なる省エネルギー化と環境負荷低減が期待されている。また、船舶の冷凍・空調機器に使用されている冷媒に関しても今後使用の制限が予想され、地球温暖化係数 (GWP) の小さい冷媒およびそれらを用いたシステムの開発が必要となる。一方で、熱交換器性能の向上およびシステムへの冷媒充填量削減の観点から、主要要素機器である熱交換器の小型化、高性能化が望まれており、その手法の一つとして熱交換器性能の向上および省スペース化が期待できるアルミニウム製扁平多孔管が注目されている。しかしながら、水力直径 1 mm 以下の複数の微細流路からなる扁平多孔管内の冷媒の沸騰熱伝達および摩擦圧力損失特性については十分に明らかにされていない。

2. 研究の目的

次世代熱交換器用の伝熱管として期待されているアルミニウム製扁平多孔管は、管内流路形状の自由度が比較的高く、円形流路に限らず矩形流路などの非円形流路形状も採用されている。微細流路内気液二相流では、従来径管に比して表面張力の作用が大きく、数多くの研究が報告されている従来径管とは異なる伝熱流動特性を示すことが予想される。本研究では扁平多孔管を用いた低温排熱回収などにも利用可能な高性能熱交換器の開発に資するため、扁平多孔管内沸騰熱伝達特性と伝熱促進メカニズムの解明を目指し、以下の課題に取り組む。

(1) 摩擦圧力損失および沸騰熱伝達に及ぼす流路形状の影響

流路断面形状が圧力損失および沸騰熱伝達特性に及ぼす流路断面形状の影響を明らかにするために、水力直径および流路断面形状の異なる円形、矩形および三角形流路形状を有する水平扁平多孔管内での実験を行う。

(2) ドライアウト発生クオリティ

流路断面に隅部を有する非円形流路においては隅部への液膜の引き付け効果により、辺部に形成される薄液膜による伝熱促進が期待される。一方で、熱交換器性能の低下を招くドライアウト発生クオリティが低下することが予想され、このドライアウト発生クオリティに及ぼす流路形状の影響を明らかにする。

3. 研究の方法

水力直径および流路形状の異なる微細流路を有する水平扁平多孔管内での摩擦圧力損失および沸騰熱伝達の実験を行い、摩擦圧力損失および沸騰熱伝達特性に及ぼす水力直径および流路断面形状の影響を明らかに

するとともに、伝熱促進効果について検討した。

(1) 実験装置

実験ループはポンプによる強制循環ループであり、冷媒循環ポンプ、予熱器、テストセクション、凝縮器およびレシーバーから構成される。テストセクションへ流入する冷媒のクオリティは予熱器での加熱量から算出した。テストセクションは上下対称であり、アルミニウム製の扁平多孔管、面状電気ヒータ、均熱板から構成される。扁平多孔管は伝熱管の上下に設置した面状電気ヒータによって加熱され、ヒータへの投入電力は熱流束が所定の値になるように調整される。試験伝熱管の壁面温度は伝熱管の外壁面に取り付けられた K 型熱電対により測定した。また、冷媒圧力および伝熱管出入口での差圧は、伝熱管出入口に設けた圧力測定ポートにて絶対圧計および差圧計を用いて測定した。

図 1 に実験に用いた扁平多孔管の流路断面図を、表 1 にその詳細を示す。Rec1.1 と Rec0.4 の比較により水力直径の影響について検討し、また、水力直径がほぼ同じ Cir0.5、Rec0.4 および Tri0.4 の比較により流路断面形状の影響について検討した。試験伝熱管の有効伝熱長さは、Rec1.1 は 600 mm、Rec0.4、Cir0.5 および Tri0.4 は 300 mm である。

(2) 実験方法およびデータ整理

実験は低 GWP 冷媒 R32 を用いて、冷媒飽和温度 15 °C、質量速度 50~400 kg/(m² s)、熱流束 5~20 kW/m² で行った。

テストセクション入口クオリティは、電気予熱器前に設置した混合室で測定した過冷

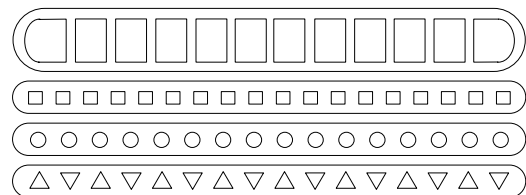


Fig. 1 Cross sectional views of test multiport tubes.

Table 1 Dimensions of the test multi-port tubes.

Test tube	Rec1.1	Rec0.4	Tri0.4	Cir0.5
Tube thickness [mm]	2.0	1.0	1.0	1.0
Tube width [mm]	16.0	16.0	16.0	16.0
Flow area [mm ²]	16.1	3.3	3.0	3.4
Total perimeter [mm]	57.0	30.8	31.7	26.1
Hydraulic dia. [mm]	1.13	0.42	0.38	0.52

液状態の状態量を基準に、電気予熱器への投入電力と周囲からのヒートゲインから算出した。伝熱管内の冷媒比エンタルピおよび圧力分布は、冷媒の熱収支および運動量収支から算出した。

断熱気液二相流の摩擦圧力損失 ΔP_F は、伝熱管出入口に設けた圧力測定ポート間で測定した差圧 ΔP_{mes} から次式で求めた。

$$\Delta P_F = \Delta P_{mes} - \Delta P_E \quad (1)$$

ここに、 ΔP_E は伝熱管と圧力測定ポート間での流路形状の変化に伴う圧力損失である。

管軸方向局所の熱伝達率は、管内実伝熱面積を基準とし、次式で求めた。

$$\alpha = q / (T_w - T_{ref}) \quad (2)$$

ここに、 q は実伝熱面積基準の熱流束、 T_w は管壁温度、 T_{ref} は冷媒飽和温度である。

4. 研究成果

(1) 摩擦圧力損失特性

図2に飽和温度 15 °C における矩形流路内断熱気液二相流の摩擦圧力損失 ($\Delta P_F / \Delta Z$) に及ぼす水力直径の影響を示す。図中には、それぞれ水力直径 0.4 mm および 1.1 mm の矩形流路の摩擦圧力損失を質量速度ごとに示す。いずれの伝熱管においても同クオリティ条件では質量速度が高い条件ほど摩擦圧力損失は大きく、また、クオリティの増加に伴い

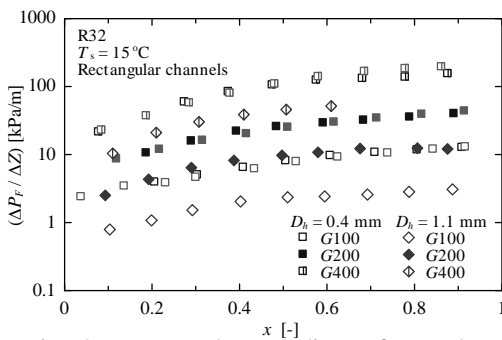


Fig. 2 Pressure drop gradient of two-phase adiabatic flow in rectangular channels.

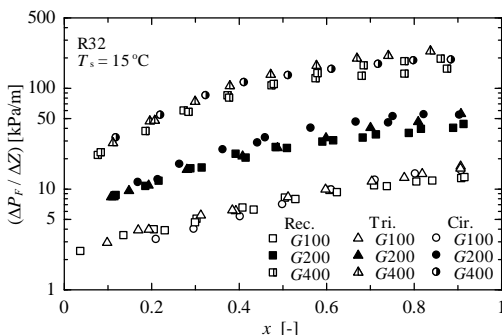


Fig. 3 Effect of channel geometries on frictional pressure drop gradient.

摩擦圧力損失は増加した。これは、管内蒸気速度の増加により、壁面および気液界面でのせん断力が増加するためである。水力直径の小さい 0.4 mm の摩擦圧力損失は水力直径 1.1 mm に比べて 2~4 倍程度高い値を示し、特に質量速度 100 kg/(m² s) の高クオリティ域で水力直径の影響が大きい。

図3に断熱気液二相流の摩擦圧力損失 ($\Delta P_F / \Delta Z$) に及ぼす流路断面形状の影響を示す。図中には、それぞれ、水力直径約 0.5 mm の矩形、三角形および円形流路の結果を示す。クオリティおよび質量速度に対する摩擦圧力損失の定性的な傾向には流路形状の差異はみられない。質量速度 100 kg/(m² s) に比べて、質量速度 200 および 400 kg/(m² s) では摩擦圧力損失に及ぼす流路形状の影響が大きい。水力直径は各試験伝熱管でわずかに異なるため、質量速度 400 kg/(m² s) では水力直径の最も小さい三角形流路の摩擦圧力損失が最も大きい。しかしながら、100 kg/(m² s) では流路形状の差異は小さいことから、管内流速の小さい場合には流路断面に隅部を有する非円形流路の摩擦圧力損失は円形流路に比べて小さくなると考えられる。

(2) 沸騰熱伝達特性

扁平多孔管の流路間の壁（以下、内柱と称する）には高さ方向に壁面温度分布が形成され、内柱中央部高さの温度は外壁面温度に比して幾分低い値を示す。この管断面温度分布が熱伝達率の算出に及ぼす影響について検討を行った。その影響は流路断面形状および管内熱伝達率によって異なり、本実験においては管断面温度分布を考慮した場合と考慮しない場合の熱伝達率の差異は、Rec1.1 の場合には 1~8 %、Rec0.4 の場合には 1 % 以下であった。すなわち、Rec1.1 のように内柱の厚さが薄く、内柱が高い場合は管断面温度分布の影響がみられるが、Rec0.4 のように内柱の高さに比して幅が十分に大きい場合には管断面温度分布は小さく、熱伝達率の算出に与える影響は十分に小さい。

図4に矩形流路断面を有する扁平多孔管 Rec1.1 および Rec0.4 の沸騰熱伝達率を、クオリティ x に対して示す。ドライアウト前の低クオリティ域においては、水力直径の小さい Rec0.4 の熱伝達率は Rec1.1 に比して最大で 3 倍以上高い値を示した。一方で、Rec0.4 は Rec1.1 に比していずれの質量速度条件においてもドライアウト発生クオリティが小さく、質量速度 200 kg/(m² s) ではクオリティ 0.3 で、50 kg/(m² s) ではクオリティ 0.1 から Rec0.4 は熱伝達率の低下がみられた。流路断面に隅部を有する矩形流路の場合、表面張力の作用により隅部に液膜が引き付けられ、辺部には薄液膜が形成される。水力直径の減少に伴い、液膜厚さはさらに薄くなる。したが

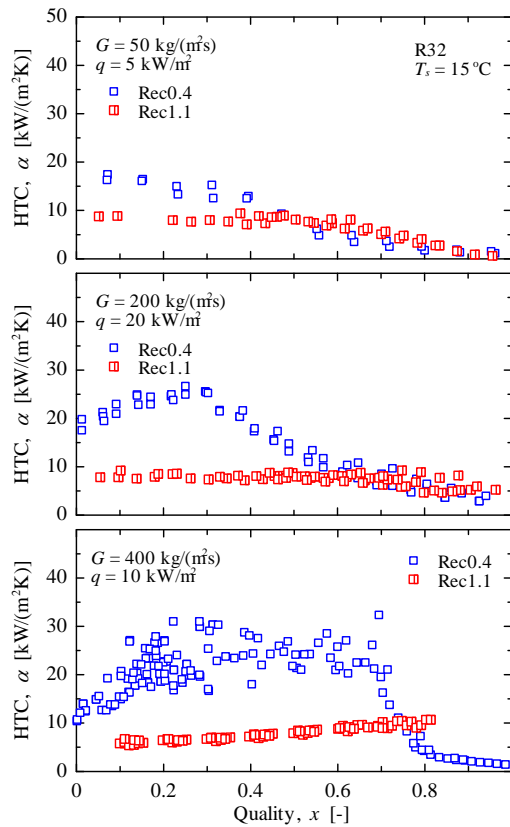


Fig. 4 Effect of hydraulic diameter on boiling heat transfer in rectangular channels.

って、Rec0.4はRec1.1に比して高い熱伝達率を示す一方で、Rec0.4は液膜が消失しやすく、低いクオリティにおいて熱伝達率の低下が観察されたものと考えられる。

図5に沸騰熱伝達特性に及ぼす流路断面形状の影響を示す。強制対流蒸発の影響が支配的となり流路断面形状の影響が小さくなる質量速度 $400 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$ の高クオリティ域を除き、矩形および三角形流路の熱伝達率は円形流路に比べて高い熱伝達率を示した。矩形流路は質量速度 $200 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$ のクオリティ 0.4 以下、 $400 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$ のクオリティ 0.6 以下で他の流路形状と比べて高い熱伝達率を示すが、ドライアウト発生クオリティも小さく、ドライアウト後は円形流路と同程度あるいは低い熱伝達率を示した。三角形流路は矩形流路に比べてドライアウトが生じるクオリティが大きい、これは矩形流路よりも隅部での液膜の引き付け効果が大きく、隅部に液膜が保持されるためと考えられる。 $200 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$ の場合、Rec0.43はCir0.52に比して低いクオリティでドライアウトが生じているが、これは円形流路に比して矩形流路の方が辺部の液膜が薄いため、液膜が部分的に消失し、熱伝達率が低下したものと考えられる。

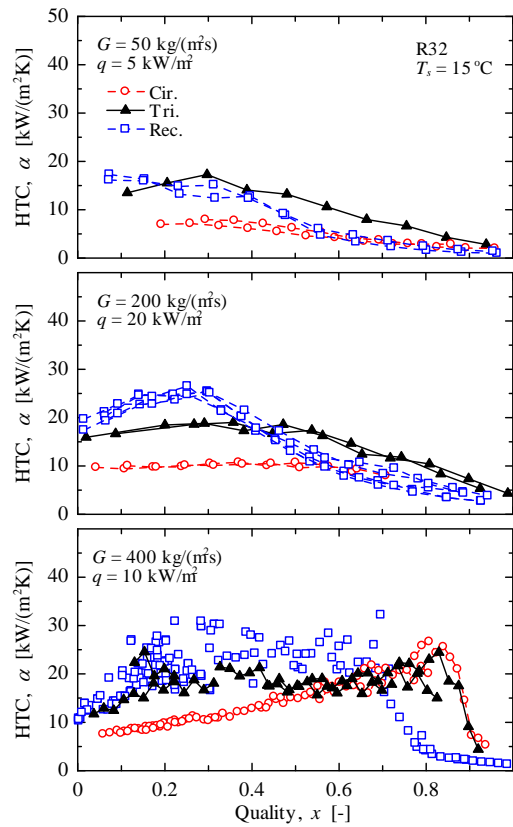


Fig. 5 Effect of channel geometry on boiling heat transfer.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 2 件)

- (1) Daisuke JIGE, Yusei TERASHIMA, Norihiro INOUE, Shigeru KOYAMA, Effect of channel geometry on boiling heat transfer and pressure drop of R32 inside horizontal multiport tubes, The 24th IIR International Congress of Refrigeration (ICR2015), August 16-22, 2015, Yokohama.
- (2) 地下大輔, 近藤智恵子, 小山繁冷媒, R32 の水平扁平多孔管内の流動沸騰熱伝達, 2014 年度日本冷凍空調学会年次大会, 2014 年 9 月 10 日, 佐賀.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

地下 大輔 (DAISUKE JIGE)

東京海洋大学 大学院海洋科学技術研究科
研究者番号: 30708368

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし