

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 27 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420148

研究課題名(和文)非円形微細流路水平流の沸騰熱伝達促進メカニズムの解明と熱伝達予測法の確立

研究課題名(英文) Enhancement of flow boiling heat transfer in horizontal noncircular mini-channels and prediction of heat transfer performance

研究代表者

森 英夫 (MORI, HIDEO)

九州大学・工学研究院・教授

研究者番号：70150505

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)：内径1 mm程度の微細流路を有する矩形と三角形の非円形流路を対象に、主に冷媒R410AとR32を用いて、水平流における気液二相流動様相の観察と沸騰熱伝達に関する実験を行い、円形流路とも比較して、沸騰熱伝達に及ぼす流路形状の影響を検討した。非円形流路では、低流量低クオリティ低熱流束条件で生じるスラグ流蒸気プラグ周り辺上の液膜熱伝導蒸発熱伝達により特に伝熱促進が達成されることを明らかにし、従来径流路でも生じる核沸騰と強制対流蒸発の熱伝達とあわせて、熱伝達予測方法を示した。

研究成果の概要(英文)：Experiments were performed on two-phase flow pattern and boiling heat transfer of refrigerants R410A and R32 flowing in horizontal rectangular and triangular mini-channels with hydraulic diameter of about 1 mm, and their characteristics were clarified, compared with results for circular mini-channels, to examine the effect of flow channel geometry. In noncircular mini-channels, enhancement of heat transfer was successfully accomplished mainly with liquid film conduction evaporation at low mass flux, low quality and low heat flux in slug flow, in which thickness of liquid film around vapor plug was very thin especially on the sides of channel cross-section perimeter. Prediction of heat transfer in noncircular mini-channels was proposed considering liquid film conduction evaporation contribution in addition to nucleate boiling and forced convection evaporation heat transfers resulting even in conventional diameter channels.

研究分野：熱工学

キーワード：伝熱機器 非円形微細流路 水平流 沸騰熱伝達促進 熱伝達予測方法

1. 研究開始当初の背景

近年、民生用冷暖房空調に占めるエネルギー需要が急激に増大し、省エネルギーの観点から、空調機・ヒートポンプの格段の性能向上が求められている。これには、熱交換器、すなわち蒸発器と凝縮器の高性能化が急務であり、その方策の一つとして、1 mm 程度の非円形微細流路を並列に配置した水平流の扁平多穴管を用いた熱交換器の開発が進められている。しかしながら、冷媒の非円形微細流路水平流における伝熱促進について、メカニズムはまだ十分に明らかにされておらず、熱伝達予測方法も確立されていない。

2. 研究の目的

空調機用高性能熱交換器の伝熱管として期待される扁平多穴管を主たる対象として、表面張力作用が大きい非円形微細流路における水平流の沸騰熱伝達の特性と伝熱促進メカニズムを、微細流路銅管の加熱試験と流動様相可視化試験による現象観察を行って解明し、熱伝達予測法を検討する。微細流路では表面張力作用が大きく、従来径管の流動とは異なったものになると考えられ、さらに角を有する非円形流路では、断面周上の液膜分布の非一様性により、辺上での薄液膜による大きな伝熱促進が期待される。

3. 研究の方法

水力直径 1 mm 程度の矩形および三角形のガラス管微細流路における水平流の二相流動可視化観察試験を行い、デジタル高速度カメラの撮影により、流動様式の変化を明らかにして、伝熱促進メカニズムを検討するための基礎データを得る。

次いで、水力直径 1 mm 程度の矩形および三角形の非円形微細流路を対象に、銅製試験管を既存の冷媒循環試験装置に組み込み、水平流の沸騰熱伝達試験を行い、得られた局所熱伝達率のデータに基づき、熱伝達特性を検討して非円形微細流路における伝熱促進メカニズムを明らかにするとともに、熱伝達予測方法を検討する。

これらの流動可視化観察試験および沸騰熱伝達試験では、水力直径 1 mm の円形流路のガラス管および銅管を用いた試験を行い、非円形流路における伝熱促進メカニズムを検討するための比較データを得た。

(1) 試験装置は、循環ポンプ、予熱器、試験部、凝縮器からなる冷媒の強制循環テストループで、試験部に、ガラス管と銅製試験管を組み込んで、試験を行った。

(2) 用いた銅製試験管の断面写真を図 1 に示す。加熱は直接通電により行い、流れ方向局所の熱伝達率を算出するために、非円形管では外面各辺上に、また円形流路では外面周上の頂点と定点の位置に、流れ方向等間隔で熱電対を設置している。ガラス管の矩形、三角

形、円形流路の寸法は銅製試験管とほぼ同様で、非円形流路では角部の丸みはほとんどない。また、三角形流路の試験配置は正立と倒立の 2 種類行った。

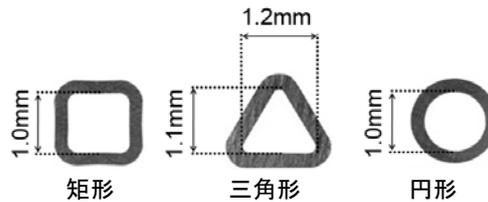


図 1 銅製試験管

(3) 非円形流路の熱伝達試験には、物性の影響を検討するために、R410A と R32 の 2 種類の实用冷媒を用い、円形流路の熱伝達試験では、さらに低 GWP 冷媒の R1234yf についてデータを得た。ガラス管による流動可視化観察試験には、主に R410A を用いた。冷媒の物性値は NIST REFPROP Ver9.1 を用いて算出した。

(4) 流動観察および熱伝達の試験は、飽和温度 10 °C の湿り蒸気条件で、流量は、従来径管より低流量の条件を含む質量速度 30~400 kg/(m²·s) の範囲で行った。また、加熱試験の内面熱流束は 2~20 kW/m² の範囲で、流動様相観察試験は断熱状態で行った。

4. 研究成果

(1) 水平流における非円形流路の気液二相流動様相について、以下の結果が得られた。矩形流路の場合の流動様相を図 2 に示す。

スラグ流の発生クオリティ域は全流量条件において、円形と非円形流路ではほぼ同じであった。ただし、気体プラグ後端の形状は、非円形流路では、円形流路の場合と比べて滑らかである。これは、表面張力により流路角部に液が引っ張られるためだと考えられる。

質量速度 200 kg/(m²·s) 以上の高流量では、流路形状の違いで流動様式、様相に大きな違いは見られない。

一方、質量速度 100 kg/(m²·s) 以下の低流

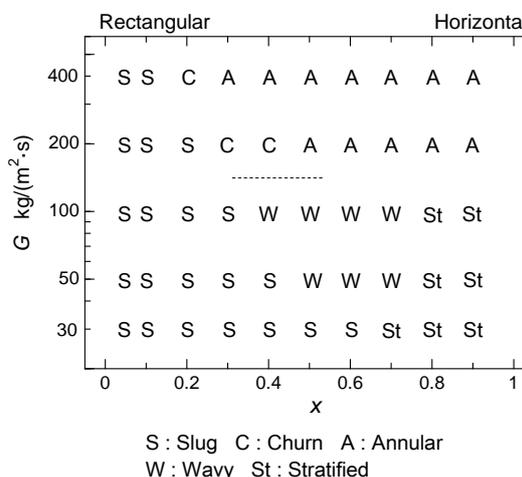


図 2 矩形流路における R410A の流動様相

量では、倒立配置の三角形流路と矩形流路では、円形流路の場合と同様、層状流が観察された。層状流が観察されたクオリティ範囲は、倒立三角形流路では、矩形流路より低クオリティ側に幾分広い。他方、正立配置の三角形流路の場合、高クオリティ域においても、管頂側の角部に液が保持され、分離流は生じていない。三角形流路の正立と倒立配置では、表面張力の影響のほか、重力の向きの違いが大きいと考えられる。なお、倒立三角形流路の場合、分離流の場合でも、流路上部2か所の角部に液が保持されていることが確認された。

(2) 沸騰熱伝達実験で得た熱伝達率から、クロスプロットングにより、熱伝達率の代表値を得た。得られた沸騰熱伝達率の特性から、ドライアウト発生前の良好な熱伝達域においては、垂直流および円形流路の場合と同様に、液膜熱伝導蒸発、核沸騰および強制対流蒸発の3つの支配的な伝熱様式の特徴が認められた。液膜熱伝導蒸発、強制対流蒸発および核沸騰の各熱伝達について、流路形状の違いによる差異の例を、順に、図3に示す。

高質量速度の環状流において、熱流束が比較的小さい場合、熱伝達は強制対流蒸発が支配的になる。このとき、中段の図に示すように、熱伝達特性に流路形状の影響はみられない。これに関し、擾乱を伴う液膜の特徴として、流路形状の影響を受けないことが様相観察から確認されている。

下段の図に示す高熱流束条件で生じる核沸

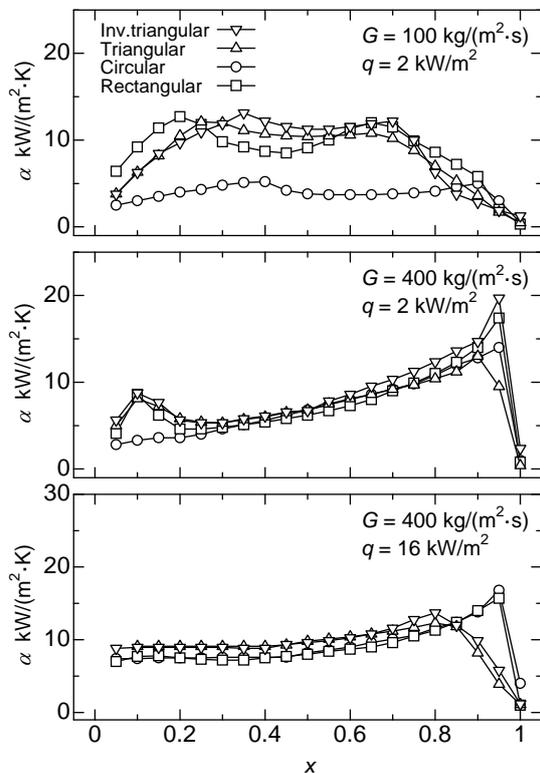


図3 矩形、三角形および円形流路のR410Aの熱伝達率の比較

騰支配域の熱伝達率は、円形および矩形流路では差はないものの、これと比べて、三角形流路では、20%程度高い値を示す。垂直流でも同様の結果が得られており、三角形流路では、角部が狭く、角部の表面張力で保持された比較的厚い液膜内で局所的に過熱液層が発達しやすいなど、周方向平均の壁面過熱度の割に核沸騰が盛んになる要因が考えられる。

微細流路特有の液膜熱伝導蒸発支配の熱伝達の例を上段の図に示している。非円形流路では、円形流路と比べて、およそ2から3倍高い値を示すが、矩形流路と三角形流路を比較すると、質量速度 $100 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 以上では同程度だが、質量速度 $50 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 以下の低流量では、質量速度が小さいほど、矩形流路の方が大きい値を示した。すなわち、流路形状の影響が確認された。

(3) R410A で得られた非円形流路の伝熱様式線図を、円形流路と比較して、図4に示す。なお、三角形流路では、正立配置と倒立配置で違いはみられない。

高熱流束域では核沸騰熱伝達が支配的となり、それより熱流束が小さい場合、高流量高クオリティ域すなわち高気相質量速度域では、強制対流蒸発熱伝達が、低流量低クオリティ域すなわち低気相質量速度域では、微細流路特有の液膜熱伝導蒸発熱伝達が支配的となる。核沸騰と強制対流蒸発および液膜熱伝導蒸発の境界には、さほど流路形状の影響はみられない。

微細流路特有の液膜熱伝導蒸発熱伝達は、スラグ流の気泡プラグ周囲など表面張力の効果により形成される薄い液膜を介した熱伝導の蒸発によるもので、熱伝達はかなり良好で、特に、角部間の辺上で液膜が薄くなる非円形流路で良好な特性を示す。このため、非円形流路では、円形流路に比べて高い気相質量速度まで、液膜熱伝導蒸発が支配的とな

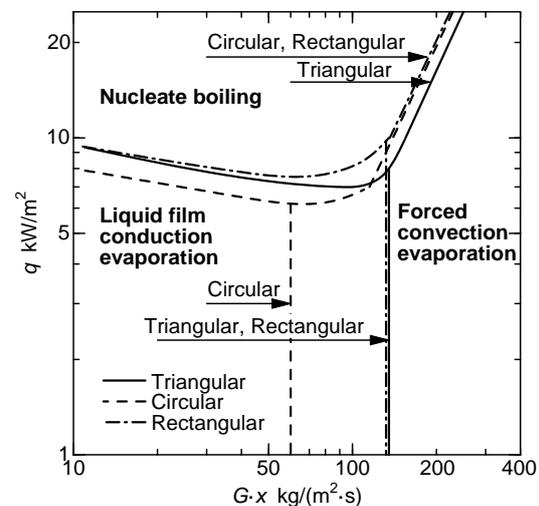


図4 矩形、三角形および円形流路の伝熱様式の比較

る。このとき、矩形流路と三角形流路の違いはない。ただし、熱伝達率の結果から、低流量では、液膜厚さに、角部の角度が影響すると考えられる。

(4) 非円形の矩形流路について、R410A と R32 の熱伝達の比較を行い、冷媒物性値の影響を検討した。核沸騰熱伝達支配域では、両者はほぼ同じ熱伝達率の値を示したが、液膜熱伝導蒸発と強制対流蒸発の支配域では、R32 が高い値を示し、特に液膜熱伝導蒸発の支配域では、2 倍から 4 倍の顕著な差異を示した。これは、R32 の液体の熱伝導率が、R410A と比べ、1.5 倍程度と大きいことに加え、気相密度が約 3/4 倍と小さくまた表面張力が約 5/4 倍と大きいため、大きい気泡プラグ、したがって薄い液膜が生じやすいためだと考えられる。

(5) 円形流路の熱伝達について、R410A と R32 に加え、R1234yf との比較を行い、冷媒物性値の影響を検討した。R1234yf は、液膜熱伝導蒸発域や強制対流蒸発域では R410A とほぼ同程度か幾分低い特性を示したが、核沸騰熱伝達支配域では他の 2 冷媒と比べて約 1/2 倍と低い熱伝達率の値を示した。これは、他の 2 冷媒と比べ、蒸気密度が 4/5 倍から 3/5 倍程度と小さいものの、液体の熱伝導率および蒸発潜熱が 1/2 倍から 0.7 倍程度とともに小さいためであり、液体の粘性係数が大きいことも寄与していると考えられる。

また、熱伝達特性の支配域を比較すると、液膜熱伝導蒸発域と強制対流蒸発域の境界は冷媒間でさほど違いはなく、熱伝達率の大きい R32 では、核沸騰支配域が狭くなる、すなわち高い熱流束まで液膜熱伝導蒸発および強制対流蒸発が支配的になること、一方、R410A と R1234yf では、核沸騰域と液膜熱伝導蒸発域の境界にほとんど違いはないものの、R410A では、核沸騰域と強制対流蒸発域の境界がより高い気相質量速度まで移動することがわかった。

(6) 矩形および三角形の非円形流路の熱伝達予測式については、次のように考えられた。

強制対流蒸発特性の熱伝達率は、水力直径を用いて、円形流路に対する予測式で、三角形や矩形流路の非円形流路に対して、そのまま使用できる。

核沸騰の熱伝達は、円形流路と矩形流路では、Jung らのプール核沸騰整理式で良く予測できるが、三角形流路では、20%程度高い値を示すことを考慮すれば良い。

液膜熱伝導蒸発熱伝達は、スラグ流のプラグ気泡周りの液膜厚さを粘性力と表面張力の比であるキャピラリ数で整理し、これに液膜の熱伝導率を考慮して、予測式を作成すると良い。その際、液膜は、管径の比として、流路形状の違いを反映して、整理式が作成できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

①Hideo Mori, Two-phase Flow and Boiling Heat Transfer in Small-diameter Tubes, Heat Transfer Engineering, 査読有, Vol. 37, 2016, 686–695. DOI: 10.1080/01457632.2015.1067073.

②宮田一司, 中津留拓哉, 平田健人, 森英夫, 濱本芳徳, 水平微細三角形流路内の沸騰熱伝達と気液二相圧力損失, 日本冷凍空調学会論文集, 査読有, 32 巻, 2015, 163–174.

〔学会発表〕(計 4 件)

①Shuro Tanaka, Boiling Heat Transfer and Pressure Drop of a Refrigerant HF01234yf Flowing in a Small Horizontal Tube, International Symposium on Innovative Materials for Processes in Energy Systems 2016, 2016 年 10 月 24 日, Taormina (Italy).

②平田健人, 水平微細三角形流路における気液二相圧力損失と沸騰熱伝達, 2015 年度日本冷凍空調学会年次大会, 2015 年 10 月 22 日, 早稲田大学 (東京都新宿区).

③中津留拓哉, 水平微細倒立三角形流路における沸騰熱伝達と流動様相, 日本冷凍空調学会第 15 回西日本地区技術交流会, 2014 年 09 月 25 日, 九州大学 (福岡県春日市).

④中津留拓哉, 水平微細倒立三角形流路における沸騰熱伝達, 2014 年度日本冷凍空調学会年次大会, 2014 年 09 月 10 日, 佐賀大学 (佐賀県佐賀市).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森 英夫 (MORI Hideo)

九州大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号：70150505

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

宮田 一司 (MIYATA Kazushi)

九州大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号：00610172