

## 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 5月22日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560201

研究課題名（和文） 微細流路内沸騰熱伝達特性と伝熱促進メカニズムの解明

研究課題名（英文） Boiling Heat Transfer in Small Flow Channels and its Enhancement Mechanism

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

研究成果の概要（和文）：内径 1 mm 程度の微細流路を有する円管と矩形および三角形の非円形管を対象に、冷媒 R410A を用いて、垂直上昇流と下降流および水平流における気液二相流動様相の観察と沸騰熱伝達および摩擦圧力損失に関する実験を行い、沸騰熱伝達に及ぼす流動方向と流路形状の影響を明らかにした。微細流路では、低流量低クオリティのスラグ流における蒸気プラグ周りの液膜が薄く、低熱流束では、その薄液膜を通じた良好な熱伝達により、伝熱促進が達成されることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Experiments were performed on two-phase flow pattern, boiling heat transfer and pressure drop of a refrigerant R410A flowing vertically upward and downward, and horizontally in small circular, rectangular and triangular tubes with hydraulic diameter of about 1 mm, and their characteristics were clarified. In small flow channels, enhancement of heat transfer was realized mainly in slug flow at low mass flux and low quality, in which thickness of liquid film around vapor plug was very thin, resulting in good heat transfer at low heat flux.

交付決定額

(金額単位：円)

|        | 直接経費      | 間接経費      | 合計        |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2010年度 | 1,800,000 | 540,000   | 2,340,000 |
| 2011年度 | 1,000,000 | 300,000   | 1,300,000 |
| 2012年度 | 700,000   | 210,000   | 910,000   |
| 年度     |           |           |           |
| 年度     |           |           |           |
| 総計     | 3,500,000 | 1,050,000 | 4,550,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：微細流路、沸騰熱伝達、伝熱促進

## 1. 研究開始当初の背景

空調分野は近年のエネルギー需要の中でも大きな割合を占めており、そのエネルギー消費量低減のためには、空調機器の高効率化、特に主要要素機器である熱交換器の高性能化を図る必要がある。その一つの方法として、扁平多穴管など、従来と比べてかなり小さい

水力直径の 1 mm 程度の微細流路を用いる熱交換器の開発が進められている。しかしながら、微細流路を流れる冷媒の気液相変化の熱伝達と気液二相流動様相ならびに圧力損失の特性は、まだ十分に明らかにされていない。

## 2. 研究の目的

次世代型空調機用高性能熱交換器の伝熱管として期待されてい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微細流路を流れる流体の流動様相と圧力損失および沸騰熱伝達の実験を行い、非円形流路を含む伝熱促進のメカニズムを明らかにする。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、非円形流路では、断面周上の液膜分布の非一様性により、大きな伝熱促進が期待される。

## 3. 研究の方法

内径 1 mm 程度の微細流路を有する円管と矩形および三角形の非円形管を対象に、主に冷媒 R410A を用いて、垂直上昇流と下降流および水平流における気液二相流動様相の観察と摩擦圧力損失および沸騰熱伝達に関する実験を行い、それらの特性を明らかにするとともに、微細流路における伝熱促進について検討した。

(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、流動様相の観察にはガラス管を、圧力損失と沸騰熱伝達の実験には銅製試験管を組み込んで、試験を行った。

(2) 用いたガラス管と銅製試験管の断面写真を、以下に示す。いずれも、流路断面の水力直径は 1 mm 程度である。

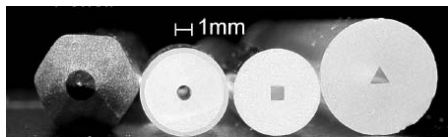


図 1 流動様相観察用ガラス管

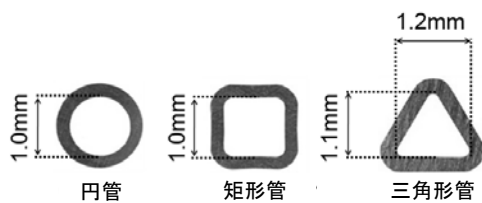


図 2 銅製試験管

(3) 試験流体には、現在の実用冷媒である R410A を主に用いた。また、新冷媒として期待される低温暖化係数冷媒の HFC32 についても、一部試験を行った。これらの冷媒の物性値は、NIST REFPROP Ver9.0 を用いて算出した。

(4) 試験は、飽和温度 10 °C の湿り蒸気条件

で行った。流量は、従来径管より低流量の条件を含む、主に質量速度 50~400 kg/(m<sup>2</sup>·s) の範囲であり、流動様相の観察と圧力損失の実験は断熱状態で、また沸騰熱伝達の実験は、試験管の内面熱流束 1~20 kW/m<sup>2</sup> の条件で行った。なお、加熱は、銅製試験管に直接通電して行った。

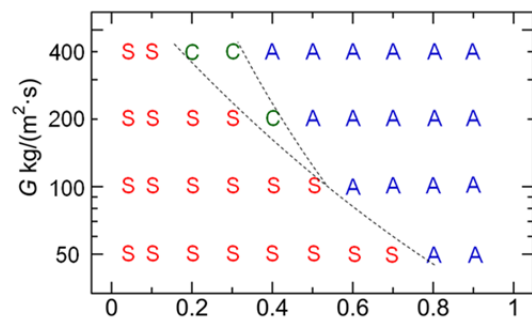
(5) 流動様相の観察は、ガラス管内を流れる気液二相流の流動様相を、高速度カメラにより撮影し、観察した。また、圧力損失は、試験管の出入口に設置した圧力タップ間の差圧を測定して、摩擦圧力損失を求めた。さらに、加熱時の沸騰熱伝達率は、管内面熱流束と、管外面に取り付けた熱電対の測定温度から求めた内面温度を用いて、算出した。

## 4. 研究成果

(1) 垂直流の場合の流動様式の変化を、円管を例にして、図 3 に示す。垂直流の場合、いずれの管でも、流動様式は、低クオリティのスラグ流から、チャーン流を経て、高クオリティの環状流に遷移する。スラグ流のクオリティ範囲は低流量ほど広く、高流量では低い流量で環状流に遷移した。さらに、上昇流より下降流の方が、下降流では非円形管の方が、低いクオリティで環状流に遷移した。また、スラグ流気泡プラグ周囲の液膜厚さは、非円形管では断面周上で大きな分布を生じ、角部の間の辺上の液膜厚さは、円形管と比べてかなり薄くなることを確認した。一方、高流量の環状流では、流路形状による液膜厚さ分布の違いはみられなかった。

水平流の流動様式は、図 4 に円管の結果を示すように、全般に垂直流と類似するが、低流量の中高クオリティでは、重力の影響のため、気液が上下に分離して流れる波状流や層状流が現れた。全般に流路形状の影響は小さく、スラグ流における気泡プラグ周囲の液膜厚さは、管底側で厚く、管頂側でより薄くなるのが観察された。

以上のように、高流量では、流路形状や流動方向によらず同じ流動様式がみられるが、



S: スラグ流 C: チャーン流 A: 環状流

図 3 円管垂直上昇流の流動様式

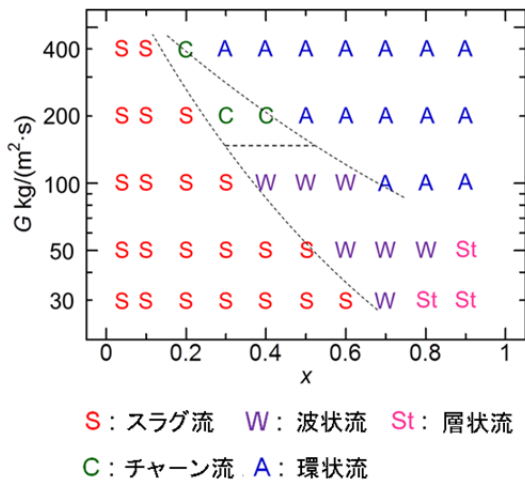


図4 円管水平流の流動様式

低流量では、流路形状や流動方向の影響が生じることを明らかにした。

(2) 垂直流における摩擦圧力損失は、いずれの管でも、全般に、クオリティの増大につれて増大する傾向を示すが、低流量低クオリティでは低下する傾向もみられた。矩形管と三角形管の摩擦圧力損失は、ほぼ同じで、中程度の流量では、円管より幾分低めの値を示した。また、水平流の場合も、垂直流と同様の特性を示すが、低流量では、クオリティの影響は小さく、垂直流と比べて小さい値を示し、さらに、矩形管では、円管と比べて、ほぼ同じか、条件によっては幾分低い値を示した。このように、流路形状や流動方向の影響は、流動様式に違いが現れる低流量で現れることを明らかにした。

(3) 沸騰熱伝達の実験結果を検討した結果、微細流路における沸騰熱伝達のみか、従来径管にみられる高熱流束で支配的な核沸騰熱伝達と高クオリティ高流量で支配的となる強制対流液膜蒸発熱伝達に加えて、低流量低クオリティの低熱流束のときに熱伝導液膜蒸発熱伝達のみが現れることを明らかにした。

この熱伝導液膜蒸発熱伝達は、スラグ流気泡プラグ周囲の極めて薄い液膜を介した熱伝導による液膜蒸発の熱伝達で、図5に示すように、核沸騰や強制対流液膜蒸発熱伝達と比べて、非常に良好な熱伝達を示し、微細流路に特有なメカニズムである。

前述のように、低流量低クオリティのスラグ流気泡プラグ周囲の液膜厚さには、流動方向や流路形状の影響が現れるため、核沸騰や強制対流蒸発熱伝達が支配的となる高熱流束や高気相質量速度では流路形状や流動方向の影響が全般にみられないのに対し、この熱伝導液膜蒸発が支配的となる低熱流束、低気相質量速度の条件では、流路形状や流動方

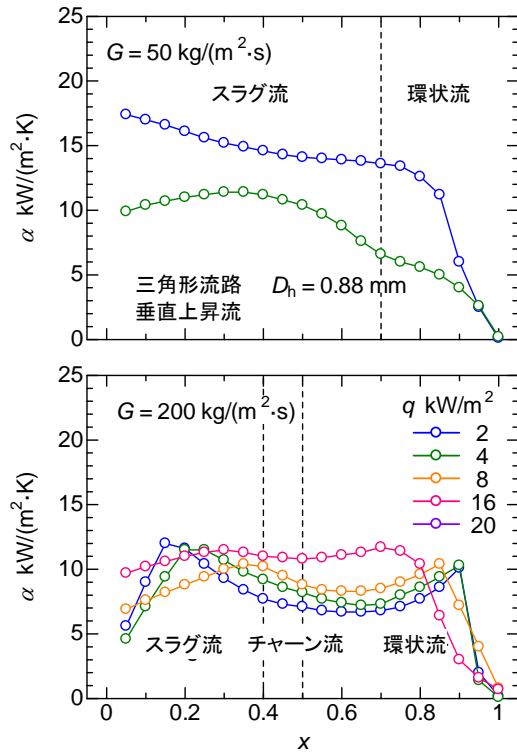


図5 三角形管の垂直上昇流における沸騰熱伝達率

向の影響が現れる。このとき、熱伝達は、一般に、垂直流より水平流の方が、また円管より非円形管の方が良くなっており、非円形形状の流路を用いることにより、伝熱促進が達成される。

これに関して、矩形流路のスラグ流における加熱時の流動様相の観察実験を行い、気泡プラグ周囲では、角部間の辺上に薄い液膜が存在し、その液膜が蒸発して良好な熱伝達が達成されることを確認した。

(4) 微細流路の円管に適用可能な熱伝達整理式の作成について検討し、核沸騰熱伝達と強制対流液膜蒸発熱伝達に加えて、微細管に特有の熱伝導液膜蒸発熱伝達のみを考慮した新たな整理式を作成した。本整理式は、垂直上昇流と水平流では、フロン系冷媒のみならず水やCO<sub>2</sub>にも適用可能であり、垂直下降流についてはフロン系冷媒に適用できる。本整理式は、他研究者の多数のデータを含む広範囲の実験データについて、従来の整理式より、良い予測精度を示した。

(5) 新冷媒として期待される低温暖化係数冷媒のHFC32を用いて、水平流における実験を行い、冷媒R410Aの結果と比較した。

流動様式は、全般に、R410Aの観察結果と類似しているが、R410Aと比べると、蒸気密度が小さいため、スラグ流から他の様式への遷移クオリティは全体に小さくなっていた。

また、摩擦圧力損失は、R410A と比べると、蒸気密度が小さく流速が大きくなるため、クオリティの増大とともに、特に環状流で、高い値を示した。ただし、スラグ流ではあまり差はみられなかった。さらに、沸騰熱伝達の熱伝達率は、液体の熱伝導率が大きいため、R410A と比べて、高熱流束域まで液膜蒸発域が拡がり、液膜蒸発域の熱伝達率の値は全体に大きくなっていった。一方、核沸騰支配域では差はない。

(6) 以上の結果より、薄い液膜を効果的に生じさせ、液膜蒸発領域を拡大することが、微細流路の沸騰熱伝達の伝熱促進に最も有効であると考えられる。また、流路形状が同じ形状の流路であれば、本結果を、扁平多穴管に適用できると考えられる。

#### 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3件)

① Koji Enoki, Kazushi Miyata, Hideo Mori, Keishi Kariya, Yoshinori Hamamoto, Boiling Heat Transfer and Pressure Drop of a Refrigerant Flowing Vertically Upward in Small Rectangular and Triangular Tubes, Heat Transfer Engineering, 査読有, Vol. 34, 2013, 966-975.

DOI: 10.1080/01457632.2012.753576.

②宮田一司、森英夫、濱本芳徳、微細管内流沸騰熱伝達の整理式、日本冷凍空調学会論文集、査読有、28巻、2号、2011、137-148.

③ Koji Enoki, Kazushi Miyata, Hideo Mori, Keishi Kariya, Yoshinori Hamamoto, Boiling Heat Transfer and Pressure Drop of a Refrigerant Flowing Vertically Upward in Small Rectangular and Triangular Tubes, Innovative Materials for Processes in Energy Systems, 査読有, 2010, 447-454.

[学会発表] (計7件)

① Koji Enoki, Boiling Heat Transfer and Pressure Drop of a Refrigerant Flowing in Small Horizontal Tubes, The 3rd International Forum on Heat Transfer, 2012. 11. 13, Brick Hall, Nagasaki.

②榎木光治、微細管内気液二相流の流動様相、2012年度日本冷凍空調学会年次大会、平成24年9月13日、北海道工業大学(札幌)。

③榎木光治、微細円管内水平流の沸騰熱伝達と圧力損失、2011年度日本冷凍空調学会年次大会、平成23年9月16日、東京大学(東京)。

④ Kazushi Miyata, Correlation for Flow Boiling Heat Transfer in Small Diameter Tubes, The 23rd IIR International Congress of Refrigeration, 2011. 8. 22, Prague, Czech

Republic.

⑤榎木光治、微細流路内気液二相流動様相の観察、日本冷凍空調学会第11回西日本地区技術交流会、平成22年10月1日、九州大学(春日)。

⑥ Koji Enoki, Boiling Heat Transfer and Pressure Drop of a Refrigerant Flowing Vertically Upward in Small Rectangular and Triangular Tubes, Kyushu University- KAIST Joint Seminar, 2010. 8. 26, Kyushu University, Fukuoka.

⑦榎木光治、微細流路内気液二相流の流動様相観察、第47回日本伝熱シンポジウム、平成22年5月26日、札幌コンベンションセンター(札幌)。

#### 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

仮屋 圭史 (KARIYA KEISHI)

九州大学・大学院工学研究院・助教  
研究者番号：80551895