

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560237

研究課題名(和文)物性が大きく異なる流体へ適用可能な内面溝付管内蒸発統一物理モデルの構築

研究課題名(英文)Development of Unified Physical Model for Flow Boiling inside an Internally, Spirally, Grooved Tube, which is Applicable for Fluids with Much Different Thermophysical Properties

研究代表者

桃木 悟(MOMOKI, Satoru)

長崎大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60244034

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円、(間接経費) 780,000円

研究成果の概要(和文)：物性の大きく異なる流体、フロン系冷媒HCFC123と自然冷媒アンモニアそれぞれについて、内面ら旋溝付管内蒸発の実験を行い、管周方向の温度分布と熱伝達係数を測定し、管周方向局所の熱伝達特性の変化を利用して得られた流動様相と熱伝達係数の特性を検討した。

まず、流動様相の予測手法、熱伝達率のいずれも物性の異なる流体を統一的に取り扱うには従来のモデルでは不十分である事を明らかにした。次に、分離流域から環状流域に遷移する点、環状流から噴霧流もしくは環状噴霧流に遷移する点、環状流域の熱伝達率について、両方の流体に適用可能な整理法を作成するとともに、管内蒸発を取り扱うための物理モデルを提案した。

研究成果の概要(英文)： The flow pattern and heat transfer of evaporating ammonia inside a horizontally grooved tube were experimentally investigated. Test fluids used were HCFC123 and ammonia, whose physical properties are much different from each other. The characteristics of experimentally obtained flow pattern information and heat transfer coefficients were investigated.

At first the limit of currently available model and method to treat this problem were shown through this discussion. The measured flow pattern transition qualities were compared with some available correlations both for a smooth tube and a grooved tube. The new correlations for the transition quality between separated and annular flow regimes, for the transition quality between annular/separated to mist flow regimes, and for the heat transfer coefficients in annular flow regime were proposed for both HCFC123 and ammonia by one equation. Also physical model to treat fluids with much different physical properties were proposed.

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：伝熱機器 管内蒸発 気液二相流 熱伝達 流動様式 熱物性 内面ら旋溝付管

1. 研究開始当初の背景

(1) 背景 - 内面ら旋溝付管内蒸発

内面ら旋溝付管は、冷凍機の熱交換器として優れた性能を示すことから、研究開始当初の時点において既に、管内蒸発における流動と伝熱に関して従来より数多くの研究がなされており圧力損失や熱伝達係数の整理式も数多く提案されている。しかしながら気液の相変化現象は複雑でその詳細は未だに未解明である事から、上記の機器の設計における需要を満たすために、実験結果を経験的に整理して得られた単純な整理式が大半であった。それらは、物理的特性を厳密には考慮されておらず、全ての物質に対して適用できるものではない。近年、温暖化係数の小さい冷媒として注目されている HFO-1234yf 等や、小温度差を利用した高効率発電サイクルでの利用が提案されている水-アンモニア混合流体等、新しく開発される流体に対する整理式を迅速に開発するためには、より理論的な背景を有し、多くの物質に対して適用できるモデルの存在が望まれていた。

(2) それまでの内面管内蒸発熱伝達に関する研究成果の概要

管内の気液二相流では、気相と液相それぞれの物性が大きく異なるために、複雑な流動様相を呈する。液膜の物理的形狀は伝熱特性に大きな影響を及ぼすために、管内の沸騰現象を整理するためには、この流動様相に関する理解が必要である。流動様相は装置の安定性に大きな影響を及ぼすこともあり、多くの研究がされていたものの、伝熱促進管として使用される内面ら旋溝付管内の流れや伝熱現象と合わせて検討された結果は殆どなかった。流動様相を明確に考慮して熱伝達の整理を行っていたのは、平滑管内蒸発に関する J. Thome.らの研究、内面ら旋溝付管に対する東井上らの研究等、僅かしかなかった。なお、東井上らは比較的径が大きくかつ熱伝達率が小さい鋼製の溝付管を用いた実験的研究をフロン系冷媒に対して実施しており、図1に示すような伝熱特性の変化に着目した新しい流動様相の分類法(SD:上部が乾いた分離流, SM:上部が薄液膜で覆われた分離流, A:環状流, AM:全面が薄液膜で覆われた環状流)と予測手法を提案している。また、それぞれの流動様相に対して熱伝達率を予測する式を提案している。なお、申請者は、東井上らが使用した試験伝熱管と同じ内面ら旋溝付管内を流れるアンモニアの管内蒸発の実験的研究を行っており、フロン系冷媒に対す

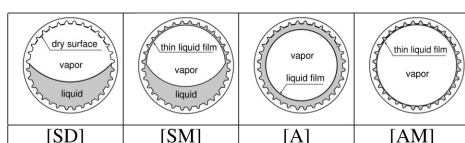


図1 溝付管の流動様式

る東井上らの予測手法ではアンモニアに対して適用できない事を明かにしている。

2. 研究の目的

(1) 以上の状況を鑑みて、本研究では、内面ら旋溝付管内蒸発流における一般的な流動と伝熱のモデルを構築する事を目標に、物性の大きく異なるフロン系冷媒 HCFC123 とアンモニアを用いた実験的研究を行う。それまでに得られている成果、フロン系冷媒に対する整理式やアンモニアを用いた実験結果を有効に利用しつつ、アンモニアとフロン系冷媒との物性を考慮しながら、より広範囲に適用可能な内面ら旋溝付管内蒸発熱伝達の物理モデルの構築を試みる。その過程を通じて、流動様式特性と熱伝達特性を構築した物理モデルに基づいて丁寧に整理する事で、内面ら旋溝付管内蒸発流の流動様式と熱伝達に及ぼす物性の影響を明らかにすることが第一の目的である。

(2) 直接観察や圧力変動により判定した管内気液二相流の流動様式を、伝熱特性を利用した手法で判定する点が、本研究の特色の一つである。これは、薄い液膜が存在する場合と通常の液膜が存在する場合には主たる伝熱機構が大きく異なるためである。両者を異なる流動様相であるとして取り扱う事で、複雑なら旋溝付管内蒸発現象をシンプルなモデルで取り扱い可能となる事を示す事が本研究のもう一つの目的である。

3. 研究の方法

(1) 実験装置および方法：フロン系冷媒とアンモニアそれぞれについて平均内径 12.5mm の鋼製の内面ら旋溝付管を用いて、水平管内蒸発の実験を行い、周方向の伝熱面温度分布の測定とそれに基づく流動様式の判定と、周方向平均熱伝達率の測定を行った。実験装置は、本研究を開始する前から使用していた物であるが、測定に先立ち、測定精度の向上と操作性の向上を意図した改良を行った。実験装置の形式は、オイルフリータイプのポンプを用いた強制対流循環ループタイプである。試験伝熱管は水平に配置された外径 15mm、平均内径約 12.5mm の鋼管で、交流を直接通電して加熱した。伝熱管は STB-340-SC 鋼製で、内面にはフィン高さ高さ 0.4mm、フィン数 32、リード角 15 度のら旋溝が施されている。試験蒸発器の外表面上には、伝熱管入り口からそれぞれ 1350、2150、2950mm の地点において、管の同一断面上に頂部からそれぞれ 60 度合計 18 対の熱電対を半田付けしており、その地点における局所伝熱特性を評価した。また、管周方向上部の 3 点と下部の 3 点、それぞれの平均値を測定し、その傾向から伝熱特性の周方向の変化を特定した。その結果、伝熱特性は伝熱面の液膜の形状に大きく依存することを利用して、液膜の様相すなわち流動の様相を推定した。

(2) 実験条件：試験流体にはフロン系冷媒 HCFC123 とアンモニアを使用した。質量速度  $G$ 、圧力  $P$ 、熱流束  $q$  の範囲は、フロン系冷媒の場合、それぞれ  $50 \sim 250 \text{ kg/m}^2$ 、 $0.2 \sim 0.3 \text{ MPa}$ 、 $0 \sim 20 \text{ kW/m}^2$  で、アンモニアの場合には、それぞれ、 $30 \sim 100 \text{ kg/m}^2$ 、約  $0.7 \text{ MPa}$ 、 $0 \sim 20 \text{ kW/m}^2$  である。HCFC123 とアンモニアで、質量速度の範囲が異なっているのは、主に蒸発潜熱と蒸気密度の相違が大きいためであり、原則として蒸気速度がほぼ同じ範囲となるように条件を設定した。

(3) データ整理：HCFC123、フロンそれぞれの実験で得られた局所熱伝達率の特性を整理し、それまでに提案されている熱伝達率の整理式と比較し、熱伝達特性の凡その傾向を整理する。なお、申請時点より以前に装置の改良前に得ていたデータについても精査し、有意義なデータについては、この検討にも使用した。管周方向局所の伝熱面温度の傾向より該地点の流動様相を判定し、測定結果を、環状流、分離流(上部が薄液膜で覆われている)、分離流(上部は乾いている)、噴霧流に分類する。まずはアンモニアについて、流動様式が遷移する点を予測する手法を構築し、それぞれの流動様相に対する管周方向局所の熱伝達率の予測式を開発した。その結果を踏まえて、物性の大きく異なる HCFC123 とアンモニアの測定結果に基づいて、両方の流体に適用可能な流動様相の予測手法を構築し、それぞれの流動様式に対する熱伝達のメカニズムを説明するためのモデルについて検討した上で、熱伝達率の予測式を開発した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 測定結果と考察：

まず、流動様式に及ぼす物性の影響を調査する目的で、内面ら旋溝付き管内蒸発におけるフロン系冷媒 HCFC123 とアンモニアの流動の様相の違いについて詳細に検討した。方法は、伝熱管の周方向に上部 3 点における伝熱面温度の測定値の平均値と下部 3 点の測定値の平均値の傾向を乾き度に対してプロットし、両者の変化の様子と周方向平均熱伝達率の傾向を同時に考察する事である。両者の傾向は、1~3 本の直線で表す事ができる事から、その傾向から伝熱抵抗の大きさがわかり伝熱抵抗の主要因である液膜の厚さが推測され、最終的には流動様相が推定できる。検討の結果、流体の種類にかかわらず測定結果の大半が、低乾き度域では管の上部が薄い液膜で覆われる分離流となり、高乾き度域では伝熱面全体が液膜で覆われる環状流となり、さらに乾き度が大きくなるとドライアウトとなった。しかしながら、環状流が形成された時の壁温の傾向や熱伝達率の傾向を詳細に比較すると、フロン系冷媒では、十分な厚さの液膜で覆われた一般的な環状流となるが、アンモニアでは非常に薄い液膜で覆われ、内

部の気体の部分を細かな液滴が飛んでいる環状流となる事が判明した。伝熱のメカニズムも異なるためにフロン系冷媒に対して提案された熱伝達率の予測式はアンモニアに対しては全く適用できなかった。この事は、これまでに多くの研究者が行ってきたような流動様式を視覚的に判断する手法や圧力損失の変動から判定する方法では、伝熱現象の検討に用いるには不十分である事を意味している。この検討によって伝熱特性をより精度よく整理するためには、本研究で使用した、伝熱特性も同時に考慮しながら流動様相の判定も行う必要がある事が明かになった。

##### (2) アンモニアの管内ら旋溝付管内蒸発における流動様相の予測手法：

アンモニアの流動様相が遷移するメカニズムは、フロン系冷媒とは異なる事を明らかにしたが、分離流領域から環状流に遷移する点のクオリティとドライアウトが生じるクオリティは、いずれも、東井上らのフロン系冷媒に対する予測式より求まる値とそれほど変わらない結果が得られた。アンモニアの流動様式が変化する点のクオリティを予測するには、メカニズムを改めて考慮する必要があるが、本研究では、遷移するクオリティの傾向を式で表す事を目的として、東井上らの予測式の一部を修正する手法で本実験結果に対する整理式を作成した。環状部が薄液膜で濡らされた分離流から環状流へ遷移する点のクオリティ  $x_{SA}$  の値は、伝熱面を濡らしている液膜が管底部となす角度  $\theta$  を森らが平滑管に対して提案した式による予測値  $x_{SA, \text{Mori}}$  と、本研究で得られたデータより作製した内面のら旋溝による拡大係数  $\gamma$  と組み合わせで求め、その値が  $x_{SA}$  になった点を分離流から環状流への遷移点とした。  $x_{SA, \text{Mori}}$  を利用したのは、この式が他の式よりも物性の影響をよく表す事ができたためである。拡大係数は、蒸気の粘性力と慣性力の比を表す Froude 数、完全蒸発に必要な熱量と加熱量の比を表す Boiling 数、蒸気密度  $[\text{kg/m}^3]$ 、液密度  $[\text{kg/m}^3]$ 、蒸発潜熱  $[\text{J/kg}]$ 、重力加速度  $[\text{m/s}^2]$  を使い、経験的に求めた。予測手法の詳細は煩雑であるため、ここでは省略する。

測定結果を精査した結果、アンモニアの熱伝達率は、質量速度が大きくなると溝による伝熱促進効果が小さくなると考えて、まず環状流域における熱伝達率の予測式を作製した。この式は、著者らが既に環状流域のフロン系冷媒に対して提案した式  $h_{grv}$  と平滑管に対する森らの式  $h_{smt}$  の和で表す形式で、両者の割合を表すパラメータを  $\alpha$  で表し、  $\alpha$  を求める式を測定結果に基づいて作製したものである。全測定結果を、この式に基づいて分類したところ、環状流と推測されるデータは 88 個であり、そのデータに対する測定値と計算値の偏差の平均値 (AD) は約  $-0.1\%$ 、

偏差の絶対値の平均値(MD)は約 11%であった。なお、分離流と推測された 118 点のデータに対して、濡れ境界角度 の計算式を前述の予測式より求め、十分な厚みの液で覆われている部分の熱伝達率を環状流域に対して作製した式より求め、薄液膜部の熱伝達を著者がフロン系冷媒の場合の薄液膜部分に対して提案した式より求めたところ、AD と MD の値はそれぞれ-15, 17%で整理できた。図 2 に熱伝達係数の推算結果と測定結果の比較の例を示す。本研究の対象外である噴霧流域(Mist)を除くと、本整理式(Present)が測定値(Experiment)をよく整理できている。

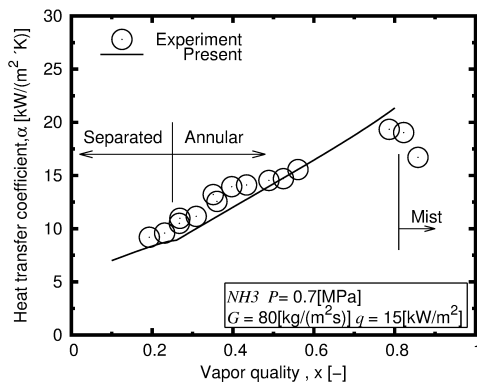


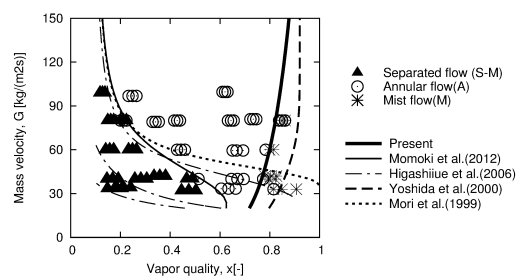
図 2 アンモニアの熱伝達率の測定値と推算値の例

これまで、アンモニアは取り扱いが難しい事、加工が容易な銅は腐食の問題から使用できない事、等の理由でアンモニアの溝付管内蒸発熱伝達に関する研究は殆ど為されてなかった。本研究により、流動様相と熱伝達特性両方の傾向が明らかになるとともに、フロン系冷媒に対して用いた方法は適用できない事が示された。また、熱伝達率の予測式を提案した事で、実用的にはアンモニアを用いた熱交換器の設計に大きく寄与できた。このように、フロン系冷媒に対しては使われなかった新しい考え方を導入してそれが適用できる事を示した事により、内面ら旋溝付き管内蒸発の現象を理解する事へ大きく寄与できたと考えている。

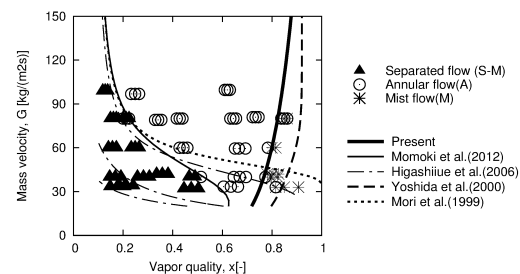
(3) フロン系冷媒 HCFC123, アンモニア両方に適用可能な流動予測と熱伝達率の予測手法:

前述のアンモニアの水平管内ら旋溝付管内蒸発と同様の考え方に沿って流動様相と熱伝達特性を整理するモデル構築を念動において、分離流から環状流へ遷移する点のクオリティ  $x_{SA}$  に関する予測式を作製した。ら旋溝による液膜の上昇効果を表す係数  $\gamma$  を求める式を、アンモニア、フロン系冷媒の両方の実験値を用いて経験的に修正したところ、物性が大きく異なっているにもかかわらず両方の流体に対して良好に予測できた。環状流から噴霧流へ遷移する点のクオリティ  $x_{do}$  については、吉田らのドライアウトクオリテ

イの予測式を参考にして、測定結果に基づいて作製した。図 3 には、測定で得られた流動様相と本研究で推定される流動様相の比較を示している。シンボルは測定値、実線は上述の整理式で求まる流動様相の境界を示している。参考までに破線や鎖線で他の研究者らによる推算値も示している。本研究で求めた整理式は、アンモニアとフロン系冷媒の両方に対して良好な予測精度を示している。アンモニアとフロン系冷媒の物性が大きく異なる事を考えると、本研究で用いた方法は内面ら旋溝付管内蒸発流の特性を精度良く再現しているといえる。この考え方によって、これまで、流体毎にそれぞれ経験的に行われていた管内蒸発の研究が、物理モデルに基づいた普遍的なモデルを利用するスタイルを採用する事が現実的になってきたと言える。



(a) アンモニア, P=0.7MPa, q = 5 kW/m<sup>2</sup>



(b) HCFC123, P=0.2MPa, q = 5 kW/m<sup>2</sup>

図 3 測定値より定めた流動様相と予測された流動様相の比較

環状流域では、前述のアンモニアの蒸発熱伝達率の予測式が用いてフロン系冷媒についても良好な予測性能を示したが、上面が薄液膜で覆われている分離流域では、まだ改善の余地があったため、さらに、前述のアンモニアの蒸発熱伝達率の予測式を作製した手法を導入して、フロン系冷媒とアンモニアの内面ら旋溝付管内沸騰流において環状流および上部が薄液膜で覆われている領域における熱伝達率  $m$  の予測式の改良を試みた。具体的には薄液膜で覆われた領域の熱伝達率を求める式の部分を測定結果に基づいて作製した式で置き換えた。置き換えた式の基本的な考え方は、薄い液膜の蒸発をベースとし、それが蒸気の数値に応じて変化するとし

て取り扱った。作製した周方向平均熱伝達率の整理式による予測値と測定結果を比較したところ、測定値と計算値の偏差の平均値(AD)と偏差の絶対値の平均値(MD)はアンモニアの環状流域でそれぞれ 0.3%, 2.93%, 分離流域で -16.16%, 17.88%, フロン系冷媒 HCFC123 の環状流域で 2.8%, 24.5%, 分離流域で 16.97%, 19.94%であった。分離流域のデータについてはまだ僅かに偏った値を示す傾向があり、改良の余地が残っているが概ね良好な予測精度が得られている。流動様相の予測と同様に、熱伝達率の予測についても、本研究の成果によって、物理モデルに基づいた普遍的なモデルを利用するスタイルを採用する事が現実的になってきたと言える。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

- (1) Satoru Momoki, Hirofumi Arima, Yasuto Takashiba, Tomohiko Yamaguchi, Soichi Sasaki, Correlation of Transition Boundaries To and From Annular Flow Regime of Ammonia Evaporating inside a Horizontal Internally Spirally Grooved Tube, Proc. of the 15<sup>th</sup> International Heat Transfer Conference, IHTC-15, Paper No.9876, Begell House Digital Library, 査読有り, 2014, 14 pages (掲載決定, DOIは2014秋頃に発行予定)

〔学会発表〕(計 9 件)

高芝 泰登, 桃木 悟, 上戸 隆徳, 佐々木 壮一, アンモニアの水平内面ら旋溝付管内沸騰流における熱伝達係数予測手法の開発, 2013年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集, No. A311, 東京, 2013.9.12

S. Momoki, T. Fukunaga, K. Narumiya, T. Arima, T. Yamaguchi, T. Shigechi, Correlation for Flow Boiling Heat Transfer Coefficients of Ammonia inside a Horizontally Spirally Grooved Tube, Proc. of the 23rd International Symposium on Transport Phenomena, ISTP-23, Paper No. 258, Auckland, New Zealand, 2012.11.22

福永 哲也, 桃木 悟, 成宮 克侑, 茂地 徹, アンモニアの水平内面ら旋溝付管内沸騰流における熱伝達係数予測手法の開発, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2012 講演論文集, No. A133, 熊本, 2012.11.17

S. Momoki, K. Narumiya, T. Fukunaga, T. Arima, H. Arima, T. Yamaguchi, T. Shigechi, Experiments and Correlation of Flow Pattern Transition for Evaporating Ammonia inside a

Horizontally Spirally Grooved Tube, Proc. of the third International Forum on Heat Transfer, Paper No. IFHT2012-179, 査読有り, Nagasaki, Japan, 2012.11.13

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

桃木 悟 (MOMOKI, Satoru)  
長崎大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 60244034

### (2) 研究分担者

茂地 徹 (SHIGECHI, Toru)  
長崎大学名誉教授  
研究者番号: 90100883