

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420150

研究課題名(和文)非共沸混合冷媒の遷移領域における管内凝縮に関する研究

研究課題名(英文) Study on the Characteristics of condensation in the transition region of the non-azeotropic refrigerant mixture

研究代表者

党 超鋈 (Dang, Chaobin)

東京大学・新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号：30401227

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)：管内凝縮伝熱特性は流動様式の変化と壁面付近の液膜厚さおよびその乱れに密接な関係がある、その薄液膜の挙動を直接計測することは細管内相変化伝熱特性の解明の鍵となる。さらに、伝熱管の形状、寸法、表面特性、そして作動流体の密度、表面張力、粘性などの熱物性により薄液膜挙動(液膜厚みの平均値、時間変化など)の把握が重要である。

本研究は、5種類の物性の異なる流体に対して、内径0.5mm～2mmまでのガラス細管内における薄膜厚さの挙動を、レーザー共焦点変位計を用いて直接測定し、膜厚の時間変化などの結果と伝熱管の形状、流動パラメータおよび表面特性(親水、撥水)などの関係を解明した。

研究成果の概要(英文)：In-tube condensation characteristics are closely related to the liquid film thickness in the vicinity of the wall and its turbulence. A precise measurement of the behavior of thin liquid film during condensation is crucial to understand the phase-transition process. Furthermore, it is important to investigate the effect of the shape of the heat transfer tube, dimensions, surface characteristics, and thermophysical properties of the working fluid (density, viscosity and surface tension) on the thin liquid film behavior.

In this study, direct measurement of the behavior of thin film of five types of different working fluids were tested inside a small sized glass tube with inner diameter ranging from 0.5 mm to 2 mm by using a laser confocal displacement sensor successfully. The relationship of averaged value and transient variation of film thickness with the structure and geometry of the test tube, flow parameters and surface properties (hydrophilic, hydrophobic) were elucidated.

研究分野：熱工学

キーワード：flow pattern microchannel film thickness slug flow condensation laser measurement

1. 研究開始当初の背景

微細流路内を流れる気液二相流の物理的メカニズムの解明は、従来型の熱交換器よりも微細な流路を有するマイクロチャンネル熱交換器やマイクロリアクター、マイクロヒートパイプを用いた宇宙機器や、電子機器の冷却システムなどの発展に寄与するとして、伝熱工学や電子工学、医用生体工学や宇宙工学などの多くの分野から注目を受けている。

特に近年の伝熱工学分野においては、従来型の熱交換器と異なる性質を示すことで扱いが困難な一方、伝熱効率の向上へ大きく貢献することが期待されるマイクロチャンネル熱交換器に関する研究が盛んに行われている。熱交換器の微細流路を流れる気液二相流の流動様式と液膜厚さが、伝熱特性を決める重要な要因であることがよく知られている。そして、流動様式や液膜厚さに関する研究の中で、いくつかの実験的な結果や相関式が提言されているが、限られた実験条件でしか適用できず、作動流体の表面張力や粘性などの物性や、流路の形状・寸法の影響について広く考慮した例はない。そのため、微細流路における流動様式や液膜厚さに与える、液相の物性や流路の形状・寸法の影響を体系的に整理するための知見が未だ十分に得られていないといえる。

一方で、ヒートポンプ用冷媒（現在使用されている R410A の GWP は 2088）の環境問題により、充てん量の削減のために熱交換器の細管化、扁平管化が検討され、低 GWP 冷媒（とその混合物）への転換が重要となり、それに関する技術開発が求められている。混合冷媒の利用は従来から研究されてきたが、近年低 GWP 冷媒（R1234yf, R1234ze などの GWP は 4~7）が冷媒の低 GWP 化への切り札として再び注目されている。ただし、混合冷媒の伝熱メカニズムの解明、伝熱性能の計算および伝熱管の最適設計には、蒸気、液体側それぞれの物質移動特性と濃度分布情報の把握が必要である。そのような物質移動特性の定量的な把握には混合冷媒の凝縮過程の数値計算が唯一合理的な手法と言えるが、このような研究はまだ行われていない。

管内凝縮伝熱には相変化時の流動様式変化と壁面付近の液膜厚さおよびその乱れに密接な関係がある。Han&Shikazono「1」はレーザー共焦点変位計を用いて直径 1mm 以下のマイクロチャンネル内の断熱流れ条件における空気スラグと液体（水とエタノール）で出来た薄液膜の直接測定に成功したが、提案したモデルの冷媒のような高気液密度比、低粘性、低表面張力媒体への適用可能性はまだ不明である。さらに、凝縮過程における壁面付近に生成した薄液膜挙動について検討された例はない。その様な薄液膜の挙動の測定は、数値解析結果の検証、および液膜挙動を考慮した凝縮伝熱モデルの作成にきわめて重要である。

2. 研究の目的

本研究では、微細流路を流れる気液二相流の流動様式とスラグ流、環状流における液膜厚さおよび圧力損失などを、既存研究と比較しながら包括的に整理するため、レーザー共焦点変位計と高速度カメラを用いて実験的に観察を行う。微細流路として、内径がそれぞれ 0.5 mm, 1.0 mm, 2.0 mm のガラス円管を用い、液相には密度、粘性と表面張力の異なる 5 種類の液体を用いて比較検討を行う。更に、伝熱管表面特性のより微細流路内の流動特性と薄液膜挙動を調べて、凝縮伝熱モデル作成に必要な実験データの提供を目的とする。

3. 研究の方法

3.1 実験装置

図 1 には実験装置の概要と写真を示す。液相と気相(空気)はシリンジポンプ(射出精度 0.35%, 再現性 0.05%)によってあらかじめ定められた流量で射出し、T 型管継手で混合し気液二相流となってガラス管へ流入する。ガラス管内を流れる気液二相流の流動様式および気泡速度は、高速度カメラ(KEYENCE 製, VW-600C)を用いて、気泡速度に応じて、フレーム数を 15000fps から 35000fps まで変化させ撮影を行う。また、液膜厚さはレーザー共焦点変位計(KEYENCE 製, LT9010, 分解能 0.01 μ m, 出力応答時間 640 μ s, レーザースポット径 2 μ m)を用いて測定を行う。さらに、伝熱管の表面特性が流動および伝熱特性への影響を調べるため、伝熱管の内表面を親水、撥水処理を行った。管内スラグ流および管状流条件における圧力損失と薄液膜の厚みの計測結果に与える、管径、流速、流体物性による影響と、伝熱管表面特性との関係を研究した。

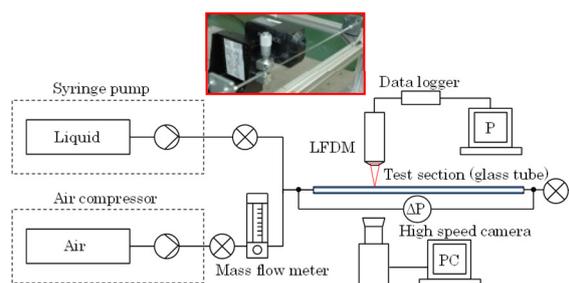


Fig. 1 Schematic diagram and picture of experimental apparatus

3.2 ガラス表面への親水性表面処理の方法

ガラス表面はヒドロキシ基を有することで親水性であるが、ガラス表面に付着する有機物を完全に除去し、かつヒドロキシ基を露出させることで親水性を向上させる。以下に、本研究で行うガラス表面への親水性表面処理の手順を示す。

(1) 濃度 95%の硫酸(H₂SO₄)と、濃度 35%の

過酸化水素水(H₂O₂)とを、3:1の割合で
 攪拌しながら混合する。

- (2) 混合した溶液内にガラス管を浸す。その際、反応を促進させるため、90℃の温水の中にメスシリンダを入れて30分反応させる。これにより、ガラス表面の有機物が除去される。
- (3) ガラス管をメスシリンダから取り出し、純水で洗浄する。それにより、ガラス表面に均一に親水基であるヒドロキシ基が露出する。

3.3 ガラス表面への撥水性表面処理の方法

疎水性処理は、図2に示すように、親水性であるヒドロキシ基を表面に露出させる親水性処理を行った後に行う。疎水性処理では、ガラス表面に存在する親水性のヒドロキシ基を倒し、疎水性であるSi-Oの結合部を表面に露出させるための処理を行う。以下にガラス表面への疎水性表面処理の手順を示す。

- (1) 親水処理後のガラス管をチューブポンプに接続し、ガラス管内壁における水分を除去し洗浄するため四塩化炭素を5分間流す。
- (2) 上記のガラス管に、トルエン10mlを2時間流す。
- (3) エタノール(C₂H₆O)10ml
- (4) エタノール水(1:1)10ml
- (5) 水10ml
- (6) エタノール10mlをそれぞれ5分間流す。
- (7) 最後に、水10mlを5分間流して洗浄する。

※(2)~(7)の処理はそれぞれ2回ずつ行う。

- (8) ガラス管内の水分を真空チャンバで乾燥させる。

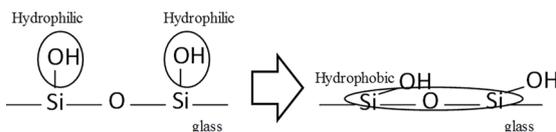


Fig.2 Chemical reaction at glass surface
 for hydrophilic

4. 研究成果

4.1 スラグ流における液膜厚み計測

まず、微細流路を流れる気液二相流の流動様式およびスラグ流における気泡速度と液膜厚さを、レーザー共焦点変位計と高速カメラを用いてそれぞれ実験的に観察を行った。そして、それらの諸特性に与える液相の物性や微細流路の寸法の違いを評価し包括的に整理を行うため、内径がそれぞれ0.5mm, 1.0mm, 2.0mmのガラス円管を用いる。また、液相には水、エタノール、FC72, KF-96L-0.65cs, KF-96L-2csを用いて実験を行った。図3にはレーザー共焦点変位計によ

て計測されたスラグ流の液膜厚さ計測の概要図を示す。グラフの平坦部の液膜厚さを δ として記録する。

図4に計測した液膜厚みと従来モデルの予測値との比較を示す。内径1.0mm管に対して、

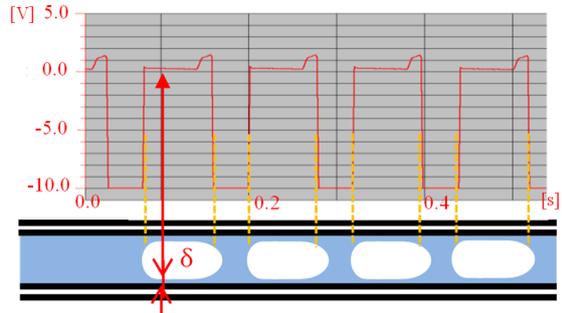


Fig. 3 Measured signal by using laser displacement meter

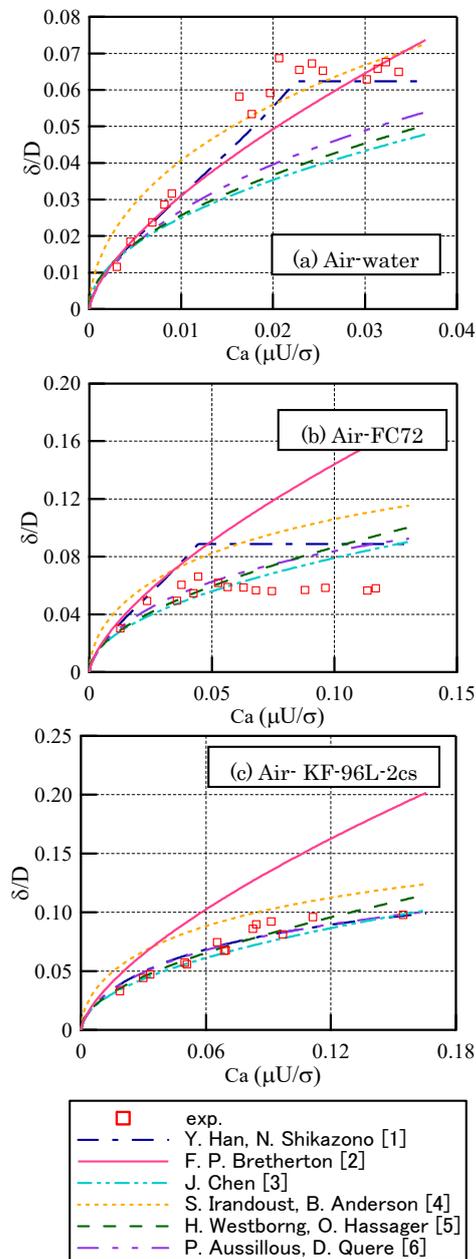


Fig. 4 Comparison between measurement results with prediction models ($D=1.0$ mm)

キャピラリー数, つまり気泡速度が速いほど液膜が厚くなる傾向が見えるが, 従来モデルと比べると, 液相が水, エタノール, KF-96L-2cs の場合はよく一致した結果が得られたが, 表面張力の低い FC72 あるいは液気密度比の小さい KF-96L-0.65cs ではキャピラリー数の大きい乱流膜領域では大きいずれが生じる. この結果の物理的メカニズムについては, 詳細な検討が必要と示唆される.

4.2 環状流における液膜厚み計測

環状流の計測一例を図5に示す. スラグ流と比べ流動速度が速いため, 気液界面が乱れている様子が分かる. 図6に内径0.5mm管における実験結果と, モデルから予測される値を比較した結果を示す. 本研究における実験条件の多くは, 液相気相共にレイノルズ数が2300以下であるが, 液相が乱れる影響を考慮して, 乱流圧力損失計算モデル中のChisholmの変数Cを5から20に修正し, 実験値とよく一致した結果が得られた. ただし, 5種類の液相内で表面張力および粘性が最も小さいFC72と, 液気密度比の小さいKF-96L-0.65csにおいては, 他の液相と比べ予測値の精度が悪くなり, 管径, 質量流束, 液相表面張力と粘性による液膜厚さに関する更なる詳細の検討が必要である.

4.3 微細流路内の薄液膜挙動の数値計算

流動速度, 物性による液膜厚みの変化を理解するため, 自由界面の数値解析を行った. 計算ソフトはANSYS-FLUENT 14.5で, 自由界面追跡はVOF-LEVEL SET法を用いた. 計算結果の一例を図7に示す, 液膜が乱れている様子が見える. その乱れは蒸気流速に従って大きくなり, 計算した液膜厚みは蒸気流速に従って薄くなる結果が得られた. また, 計算した液膜厚みは実験計測とおおよそ一致した. 平均誤差は4.1%~20%程度であった.

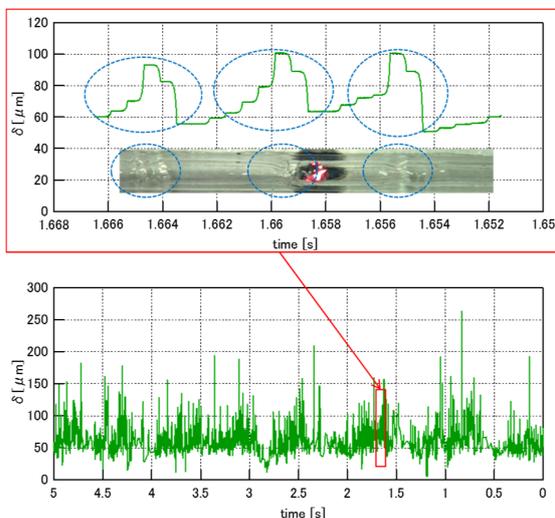


Fig. 5 Air-water annular flow, $D=1.0$ [mm], $G=50$ [kg/m²s], $x=0.2$

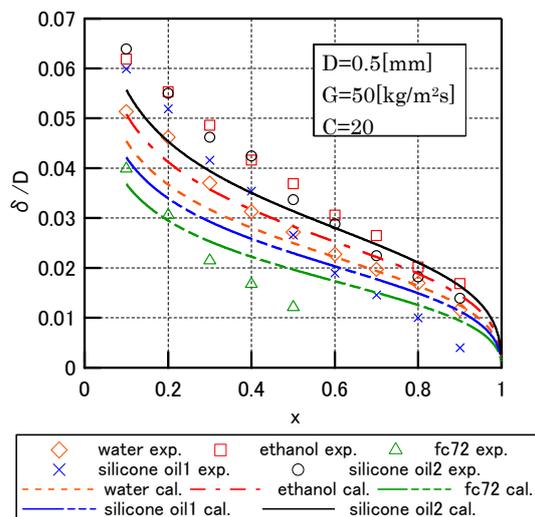


Fig. 6 Comparison with prediction models

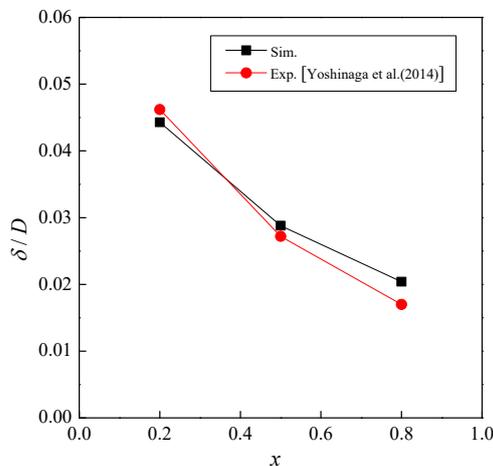
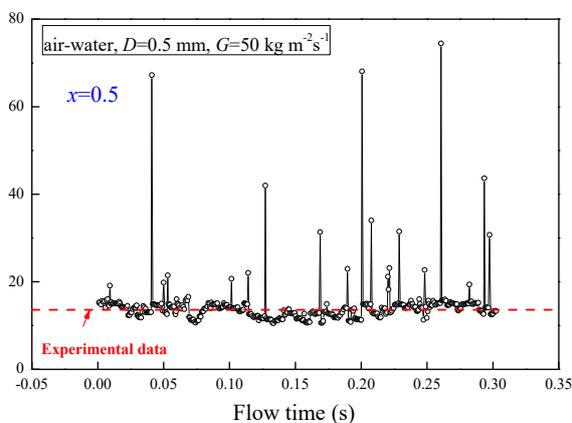


Fig. 7 Comparison of simulation results with experimental data

4.4 微細流路内の流動に与える濡れ性の影響

微細流路においては流路表面の濡れ性が, 流れに与える影響が従来管と比較して相対的に大きくなることが考えられ. 本研究は, 表面処理により濡れ性を変化させた, 微細円管内のスラグ流における流動様相, 液膜厚さと圧力損失を実験的に測定し, 表面の濡れ性, 管内径, 液相の物性による影響を考察した.

テストセクションは親水性と疎水性を有するガラス管を用いる. そして, 表面処理を行っていないガラス管を加えて3種類のガラ

ス管における流動様相、液膜厚さと圧力損失を比較し、濡れ性と管内径、および液相の物性による影響を考察する。図8に表面処理後の各チューブでの接触角の比較を示す。

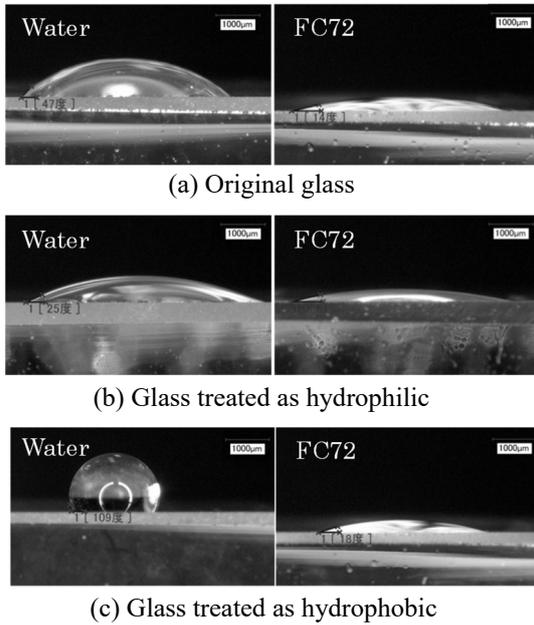


Fig. 8 Comparison of Contact angle θ_c between water-glass and FC72-glass interface

図9では表面の撥水加工により、気泡スラグの先端および末端部分の形状が変化し、スラグ平坦部の液膜厚さへ影響を与えたことが分かる。図10には、同一のキャピラリー数におけるスラグ流の液膜厚さは、オリジナルのガラス管に対し、親水性の表面処理を行ったガラス管内では小さく、疎水性の表面処理を行ったガラス管内では大きくなる傾向がみられた。

図11には親水性・疎水性の表面処理を行ったガラス管及び表面処理を行っていないオリジナル管におけるスラグ流の圧力損失の測定結果の比較を示す。親水性のガラス管内における圧力損失の方が、疎水性のガラス管内における圧力損失よりも小さくなる傾向がみられた。また、Ca 数が0.004 以下の領域において、疎水性の表面処理を行ったガラス管での圧力損失の値が局所的に大きくなることが確認できた。これは、疎水性表面処理を行ったガラ

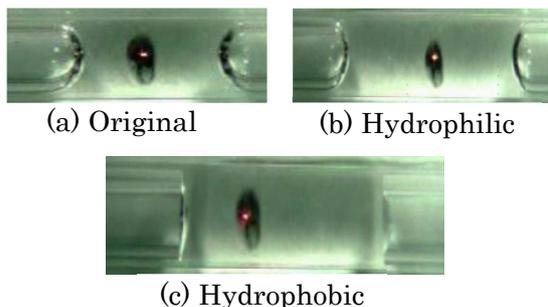


Fig. 9 Experimental results of flow regime for each glass tube (D=2.0mm, Air-water)

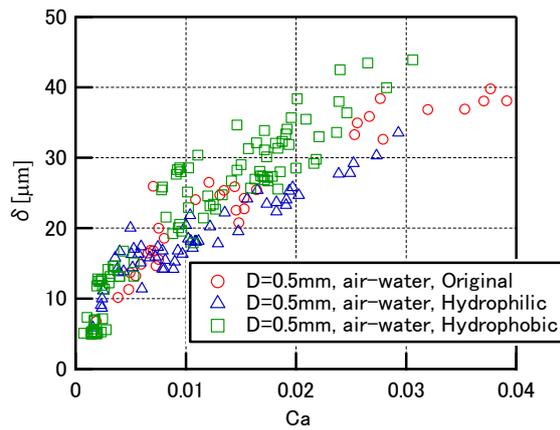


Fig. 10 Liquid film thickness due to surface treatment

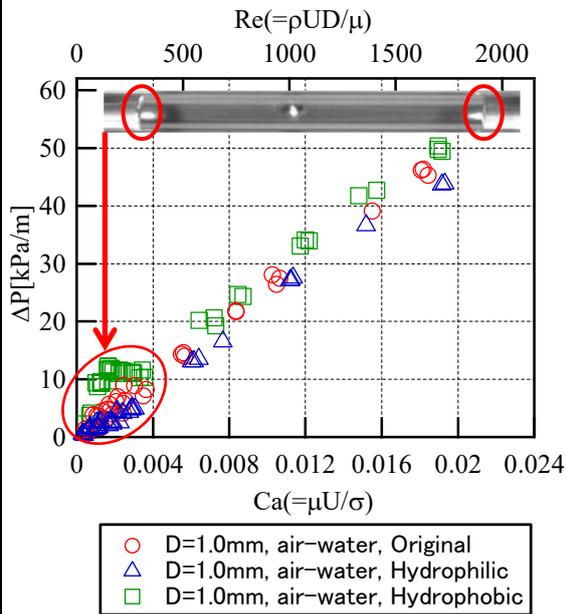


Fig. 11 Pressure drop due to surface treatment

ス管において、Ca 数の小さな領域でのみ観察される流動様式の変化に起因すると考えられる。図9 中に示すように、疎水性の表面処理を行ったガラス管内では、気泡スラグの先端と末端の曲率が他のガラス管内における場合と比べて大きくなる変化がみられた。これにより、気泡の前後に存在する液スラグ内の液体の流れが他のガラス管の場合と異なり、より損失の大きい流れ（渦などの発生）を発生し、圧力損失の値が上昇したことが考えられる。さらにその他の原因として、疎水性を有するガラス管内壁において、すべり速度が存在することが考えられる。流路のスケールがマイクロやナノオーダー流れにおいて存在することが考えられる。従って、気泡スラグとガラス管内壁との間に存在する薄液膜流れに関して着目すると、疎水性表面においてすべり速度が存在し、これも圧力損失が上昇した要因であると考えられる。さらに詳細な検討が必要である。

参考文献

- [1] Y. Han, N. Shikazono, Measurement of the liquid film thickness in micro tube slug flow, International Journal of Heat and Fluid Flow, 2009, 30, 842-853.
- [2] F. P. Bretherton, The motion of long bubbles in tubes, Journal of Fluid Mechanics, 1961, 10, 166-188.
- [3] J. D. Chen, Measuring the film thickness surrounding a bubble, Journal of Colloid and Interface Science, 1986, 109(2), 341-349
- [4] S. Irandoust, B. Anderson, Liquid film in Taylor flow through a capillary, Industrial Engineering Chemistry Research, 1989, 28, 1684-1688.
- [5] H. Westborg, O. Hassager, Creeping motion of long bubbles and drops in capillary, Journal of Colloid and Interface Science, 1989, 133(1), 135-147.
- [6] P. Aussillous, D. Quere, Quick deposition of a fluid on the wall of a tube, Physics of Fluids, 2000, 12(10), 2367-2371.

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 1 件)

1. 吉永祐貴, 党超鋈, 飛原英治, " 水平微細流路における気液二相流の流動様式とスラグ流における液膜厚さ", 日本冷凍空調学会論文集 31 (4) (2014) (査読あり)

[学会発表] (計 10 件)

1. 吉永祐貴, 党超鋈, 飛原英治, 微細管内スラグ流における圧力損失に与える濡れ性の影響, 第 50 回空気調和・冷凍連合講演会, 2016 年 4 月 13 日—15 日, 東京海洋大学工学部 85 周年記念会館, 東京
2. 吉永祐貴, 党超鋈, 飛原英治, 微細円管内スラグ流の液膜厚さに与える濡れ性の影響, 2015 年度日本冷凍空調学会年次大会, 2015 年 10 月 20 日—23 日, 早稲田大学西早稲田キャンパス, 東京
3. Hao Peng, Yuki Yoshinaga, Chaobin Dang, Eiji Hihara, Analysis of liquid film characteristics for gas-liquid annular flow in micro-channel, The 24th IIR International Congress of Refrigeration, Aug. 16-22, 2015, Pacifico Yokohama, Yokohama, Japan
4. 吉永祐貴, 党超鋈, 飛原英治, 微細管内気液二相流の液膜厚さと圧力損失および表面状態に関する研究, 第 52 回日本伝熱シンポジウム, 2015 年 6 月 3 日—5 日, 福岡国際会議場, 福岡, 日本
5. Hao Peng, 吉永祐貴, 党超鋈, 飛原英治, Numerical Investigation of Liquid Film Characteristics in Adiabatic Analysis Two-Phase Flow in Microchannel, 第 52 回

日本伝熱シンポジウム, 2015 年 6 月 3 日—5 日, 福岡国際会議場, 福岡, 日本

6. Hao Peng, 吉永祐貴, 党超鋈, 飛原英治, 微細流路における薄液膜厚さの予測, 2014 年度日本冷凍空調学会年次大会, 2014 年 9 月 10 日—12 日, 佐賀大学本庄キャンパス, 佐賀, 日本
7. Yuki Yoshinaga, Hao Peng, Chaobin Dang, Eiji Hihara, Experimental study on liquid film thickness of annular flow, International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, July 14-17, 2014, Purdue University, West Lafayette, USA
8. 吉永祐貴, Hao Peng, 党超鋈, 飛原英治, 微細流路における環状流の液膜厚さの実験的計測と予測モデル, 第 51 回日本伝熱シンポジウム, 2014 年 5 月 21 日—23 日, アクトシティ浜松・コンgresセンター, 静岡
9. Yuki Yoshinaga, Chaobin Dang, Eiji Hihara, Experimental study on two-phase pattern and liquid film thickness in microchannels, The 8th Asian Conference on Refrigeration and Air-Conditioning, May 18-21, 2014, Jeju Grand Hotel, Korea
10. 吉永祐貴, 党超鋈, 飛原英治, 微細流路における気液二相流の流動様式とスラグ流における液膜厚さ, 第 48 回空気調和・冷凍連合講演会, 2014 年 4 月 16 日—18 日, 東京海洋大学工学部 85 周年記念会館, 東京

[その他]

ホームページ等

<http://www.hee.k.u-tokyo.ac.jp/dang.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

党超鋈 (DANG, Chaobin)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号 : 30401227