

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 10 月 31 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289040

研究課題名(和文) 微細流路内沸騰における界面挙動と熱伝達特性の高精度把握・冷却能力評価方法の確立

研究課題名(英文) Accurate Understanding of Interfacial Behaviors and Corresponding Heat Transfer and the Establishment of Methods for Evaluating Cooling Performance of Flow Boiling in Mini-channels

研究代表者

大田 治彦 (Haruhiko, OHTA)

九州大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：50150503

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：電子機器の発熱密度の上昇に対応するために、細管内での沸騰による蒸発潜熱を利用した冷却システムを適用することができる。しかし微細流路においては発生した気泡が管断面を充満し、管上流側も含めて軸方向に成長するために流量変動が生じやすく、高精度の実験データを得にくいために現象の解明に至っていない。気泡成長速度が流動安定性に与える影響の検討及び単一細管における強制流動沸騰熱伝達特性の把握のために、強制流動沸騰実験を行った。その結果、混合媒体の使用により気泡成長速度を抑えることで流動安定性が増し、熱伝達特性は流れに支配的な力によって影響を受け、その力の種類は熱流束の増加に伴って変化することがわかった。

研究成果の概要(英文)：As a solution against the increasing heat flux density of electronics, cooling systems using the latent heat transportation during flow boiling in mini tubes can be applied. However, generated bubbles occupy the entire cross section of a mini tube and grow towards both axial directions. The resulting flow fluctuation makes the phenomena more complicated and it disturbs the clarification of the phenomena in detail.

To investigate the effect of bubble growth rate on the flow stability and the effect of thermal properties on the heat transfer characteristics of flow boiling in a single mini tube, a series of experiments were conducted. As a result, it became clear that the suppression of the bubble growth rate increases flow stability. The heat transfer characteristics differ with the force dominating the flow and they change with the increase of heat flux.

研究分野：伝熱工学

キーワード：熱工学 沸騰二相流 狭あい流路 高性能熱交換器 混合媒体 強制流動沸騰 プール沸騰

### 1. 研究開始当初の背景

近年の電子機器の急速な小型・高性能化に伴い、半導体素子からの発熱密度が上昇している。これに対応するために小型で高性能な冷却システムの開発が求められており、矩形微細流路や細管といったミニチャンネルやマイクロチャンネルを用いた強制流動沸騰熱伝達を利用した冷却システムが注目されている。しかし、微細流路における沸騰二相流では発生する気泡の直径が流路直径に対して大きすぎるために生じる気泡の管軸方向への成長や相対的に浮力に対する表面張力の影響が大きくなることなどが原因となり、流動特性、熱伝達特性、圧力損失特性が通常流路とは異なることが明らかになっている。小型で高性能な冷却システムを実現するためには、微細流路における沸騰熱伝達特性を明確にすることが極めて重要である。しかし、微細流路における沸騰二相流に関する多くの研究報告において、流動変動を伴った現象の複雑さによって結果に大きな差異を生じており、現象の十分な解明には至っていない。

### 2. 研究の目的

微細流路における沸騰二相流に関する研究においてその結果にばらつきが生じている原因としては流路内で発生した気泡が全管断面を占めて、管軸方向に成長することにより引き起こされる流動変動の影響が大きい。本研究では微細流路内強制流動沸騰における流動不安定の抑制のために非共沸混合媒体の気泡成長速度の低下に着目し、混合媒体を作用流体として用いたときの流動安定性を確認することによって、気泡成長速度が微細流路内強制流動沸騰の流動安定性に与える影響を調査し、同時に流動不安定が生じるメカニズムの解明および非共沸混合媒体の熱伝達特性に関する評価を行う。また、強制流動沸騰熱伝達特性を把握し、沸騰二相流現象を支配する力の支配領域およびその境界を明らかにするために単一細管を用いた実験を実施した。

### 3. 研究の方法

図1に微細流路を用いた強制流動沸騰の実験装置を示す。

微細流路に流体を流すポンプには微小流量を実現可能であり、吐出圧力が大きく、流量変動が小さいシリンジポンプ (PHD4400, Harvard 社) を使用している。このポンプはモーター駆動によりシリンジを押し込むことで流体を押し出す仕組みとなっており、その流量は体積流量で設定することができる。本実験においては流体の質量速度を条件として与

えるため、条件として設定される質量速度を実験時の液温における流体の密度およびテスト管の断面積に対して規定した。流量変動の抑制の程度を確認するためには流量の変動状況をモニタリングすることが不可欠である。そこで、テストセクションの上流部配管の途中に流量変動計測部を設けた。流量変動計測部は内径 0.5 mm、長さ 100 mm の非加熱細管部であり、その前後に差圧計を設けて、差圧を計測することで流量変動を高精度で計測できるようにした。テストセクションは内径 0.5 mm の細管であり、上流側から順に 25 mm の非加熱助走区間、100 mm の加熱区間、気泡挙動を観察するための 90 mm のガラス管区間で構成されている。加熱区間は SUS 管であり、両端の管壁に電流導入端子と電圧測定端子をはんだ付けすることで通電し、加熱を行っている。SUS 管の外壁には 19 本の K 型極細熱電対を 5 mm 間隔ではんだ付けし、管外壁温度を測定した。熱電対の冷接点器には 0 基準温度装置 (ZERO-CON, COPER 社) を使用した。

非共沸混合媒体を用いた流動不安定の抑制効果および気泡成長速度が流動安定性に与える影響を調査する実験においては非共沸混合媒体として 1-Propanol-Water および 1-Butanol-Water を使用した。実験の準備として作用流体への溶存空気を排出するために真空引きを十分に行った後、シリンジポンプへの充填を行い、再度真空引きにより非加熱状態での沸騰を生じさせた。その後、実験ループが完全に密閉状態であることを確認し、出力電圧をチェックし、実験ループ内の残存気泡や実験ループ内からの漏れが生じていないことを確認してから、加熱を行った。

沸騰二相流現象を支配する力の支配領域およびその境界を明らかにするための実験では、作用流体として FC72 を使用した。

### 4. 研究成果

本研究では混合媒体の気泡成長速度係数と

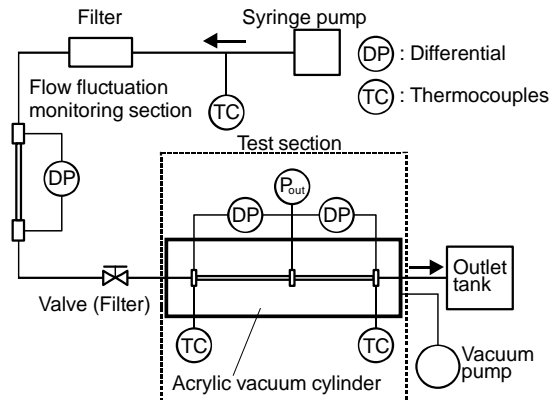


図1 実験装置概略図

混合媒体と同一物性を持つ仮想純成分媒体の気泡成長速度係数の比を比較することで混合媒体における気泡成長速度についての検討を行った。図2はこの2つの係数の比に影響を与える飽和温度  $T_{sat}$ 、乾き度  $\beta$ 、液相中の1-Propanolの重量分率  $x$ 、気相中の1-Propanolの重量分率  $y$  という4つのパラメータが各熱電対の位置  $z$  に対してどのように変動しているかを示している。

図3は測定したパラメータから計算した気泡成長速度比と1-Propanolの重量分率の関係を示したものであり、超低濃度域に気泡成長速度の極小値が存在していることが分かる。図3の低濃度域を拡大したものを図4に、図4と同様の条件で熱流束を変更したものを図5、図6に示す。この結果より、本研究の実験範囲においては濃度約2.3-4.3 wt%の1-Propanol/Waterを使用することで、気泡成長速度を単成分媒体に対して約70%まで抑えることが可能であると考えられる。

図7はテストセクション部の差圧  $\Delta P_{ts}$  の変動を示しており、1-Propanol/Water (3 wt%)を媒体としたときの圧力変動はPure Waterを媒体としたときの圧力変動と比較して、極めて安定している。また、図8,9は壁面温度  $T_w$  の変動

を示したものであり、テストセクション部の差圧と同様に、1-Propanol/Water (3 wt%)を媒体としたときの温度の変動はPure Waterを媒体としたときと比較して、極めて安定している。これらのことから、同様の実験条件においても、ごく少量の1-Propanolを加えることによって流動の安定化が可能であると考えられる。これらの結果から、微細流路内強制流動沸騰において非共沸混合媒体を使用することによって気泡成長速度を抑制すれば、流動を安定

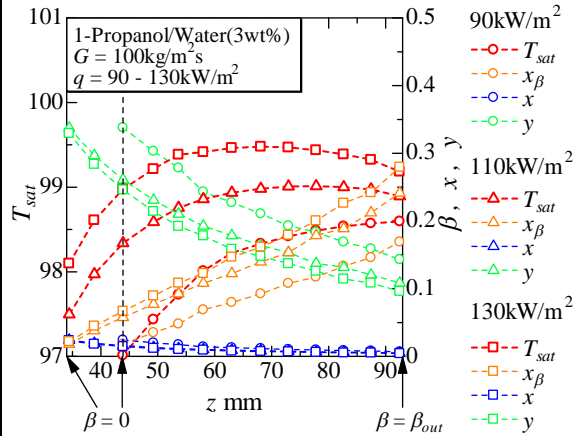


図2 1-Propanol/Water (3wt%)における相平衡パラメータの管軸方向遷移

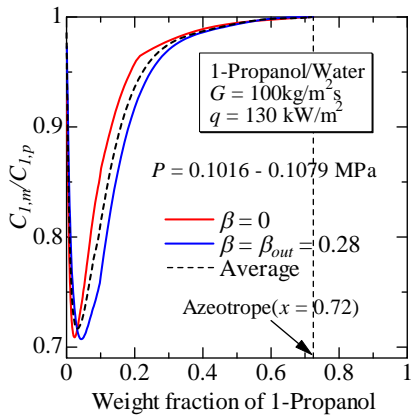


図3 1-Propanol/Water (0-72 wt%)における気泡成長速度 ( $q = 130 \text{ kW/m}^2$ )

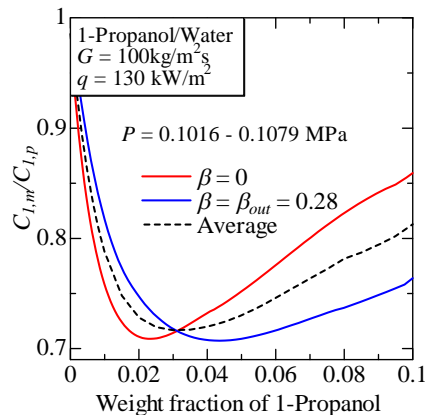


図4 1-Propanol/Water (0-10 wt%)における気泡成長速度 ( $q = 130 \text{ kW/m}^2$ )

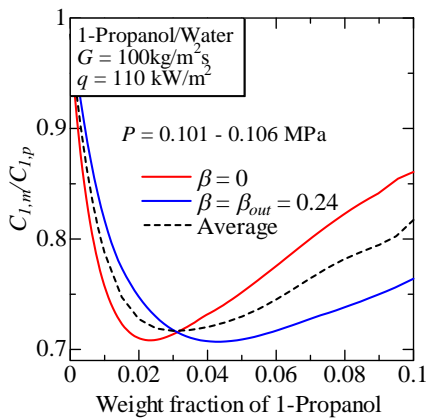


図5 1-Propanol/Water (0-10 wt%)における気泡成長速度 ( $q = 110 \text{ kW/m}^2$ )

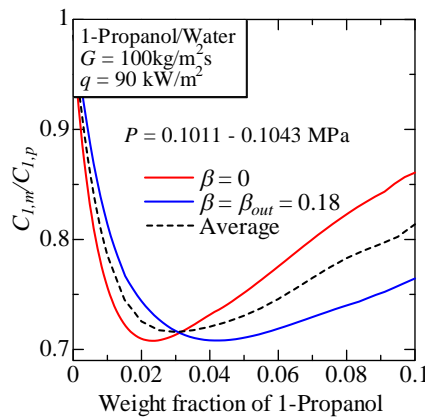


図6 1-Propanol/Water (0-10 wt%)における気泡成長速度 ( $q = 90 \text{ kW/m}^2$ )

化することができることがわかった。

図 10, 11 に示すように、同一の熱流束条件下で異なる濃度をという条件で乾き度に対する熱伝達係数を比較した場合は Pure Water において熱伝達係数が最大となり、濃度 0-5 wt% においては濃度が増加するにつれて熱伝達係数が減少する傾向が見られた。このことから、流動の安定化は必ずしも熱伝達特性の向上にはつながらないということが考えられる。

これらの結果を以下にまとめる。

- (1) 非共沸混合媒体とそれと同一物性を持つ仮想純成分媒体の気泡成長速度の比は超低濃度域(1-Propanol 質量濃度 2-4 wt%)に極小となる濃度が存在し、その時の気泡成長速度比は約 0.7 である。
- (2) 非共沸混合媒体の流動安定・不安定の判定を行ったところ、もっとも流動安定であると判定した濃度は気泡成長速度比が極小となる濃度とほぼ一致した。このことから微細流路内強制流動沸騰においては気泡成長速度の抑制によって流動を安定化することができると考えられる。

- (3) 非共沸混合媒体の熱伝達係数は単成分媒体と比べて低い値を示した。このことから、流動安定が必ずしも熱伝達特性の向上につながるわけではない。

次に沸騰二相流現象を支配する力の支配領域およびその境界を明らかにするための実験についての結果について述べる。図 12 は各質

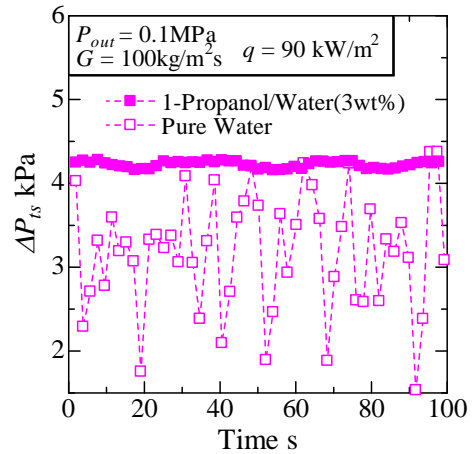


図 7 テストセクション部差圧変動

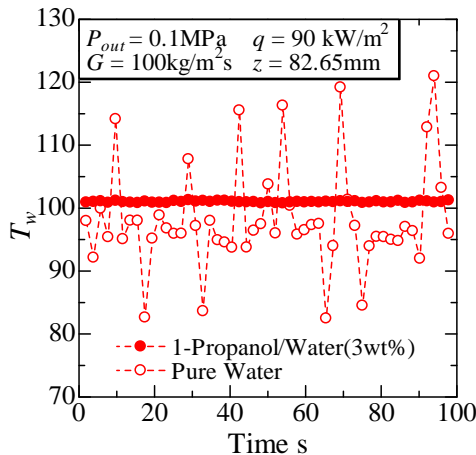


図 8 テストセクション部出口近傍の壁面温度変動 ( $z = 82.65$  mm)

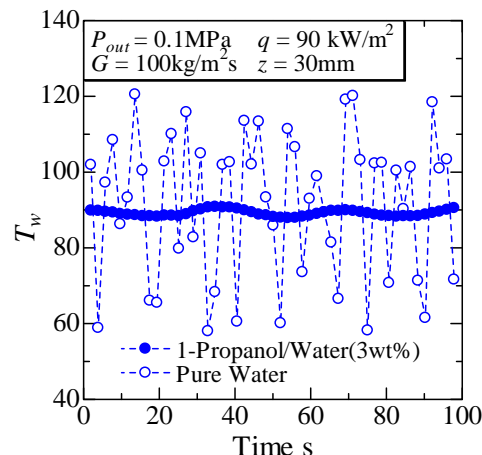


図 9 テストセクション部入口近傍の壁面温度変動 ( $z = 30$  mm)

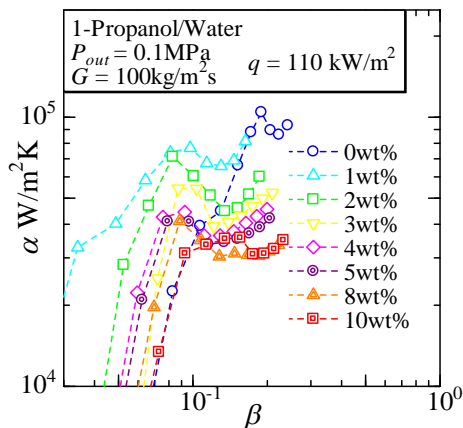


図 10 各質量濃度における熱伝達係数と乾き度の関係 ( $q = 110$  kW/m<sup>2</sup>)

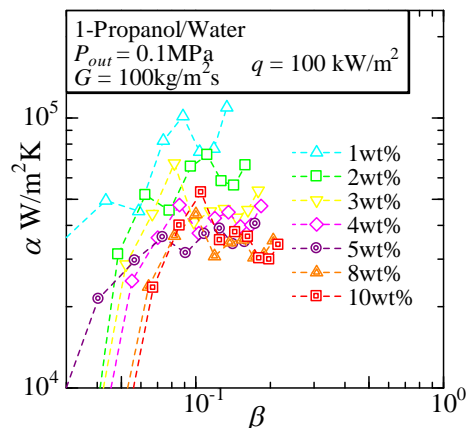


図 11 各質量濃度における熱伝達係数と乾き度の関係 ( $q = 100$  kW/m<sup>2</sup>)

量速度における乾き度と熱伝達係数の関係を示している。低熱流束においては、熱伝達係数は乾き度や質量速度にかかわらず一定の値を示しており、また、熱流束の増加にともない熱伝達係数が増大する核沸騰域の傾向がみられる。一方で、高熱流束域では、細管を用いた研究において報告されているパーシャルドライアウトが生じており、 $0.3 \leq x \leq 0.4$  という低乾き度域においても、ドライアウトが生じることが確認できた。熱流束の増加に伴い気泡生成の周期が速くなるために、流路に気泡が充満するドライパッチが拡大し、パーシャルドライアウトが生じやすくなるためである。

図 13 に各質量速度、熱流束条件における、観察部で撮影した加熱部出口直後の気液挙動を示す。流動様式として、孤立気泡流、合体気泡流、チャーン流、環状流、噴霧流が確認できた。低熱流束域では流動様式はチャーン流であり、気泡が管上部に位置していることが確認できることから、重力の影響を受けているとみられる。一方、高熱流束域では環状流、噴霧流が確認でき、高乾き度域では環状液膜が周方向に様に分布しているため、慣性力の影響を強く受けられているとみられる。

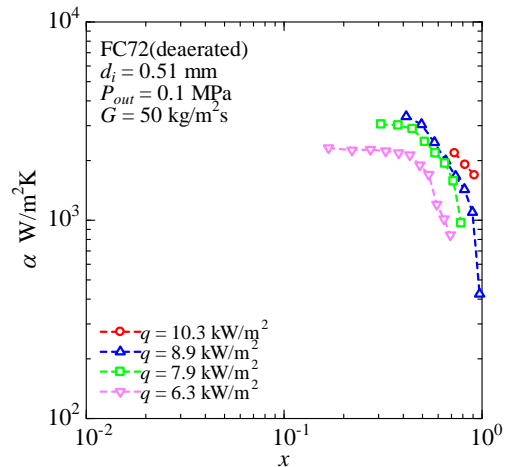
図 14 に Baba ら[1]によって提案された力の支配領域線図における実験条件範囲を示す。本研究の実験条件では、ボンド数  $Bo = 0.51$  であり、体積力と慣性力の支配領域の境界は、フルード数  $Fr = 4$ 、すなわち、ウェーバー数  $We = 8.2$  である。

図 15 に示すように、 $q = 6.3 - 6.9 \text{ kW/m}^2$  の条件範囲ではその境界は妥当なものであると考えられる。しかしながら、 $q = 9.5 \text{ kW/m}^2$  の条件では  $We = 15$  においても核沸騰が支配的になっており、体積力支配領域に相当するものと考えられる。また、出口乾き度を用いて推算したウェーバー数から支配領域の境界を考えると、観察された気液挙動から、 $q = 6.3 - 6.9 \text{ kW/m}^2$  の条件範囲では  $We = 8.5 - 10.9$  であり、この領域では重力の影響を受けているのに対し、 $q = 9.5 \text{ kW/m}^2$  の条件では  $We = 19$  であり、重力の影響がみられないことから、体積力と慣性力の支配領域の境界は、本研究で行った実験条件範囲では  $10.9 \leq We \leq 19$  の範囲にあると考えられる。

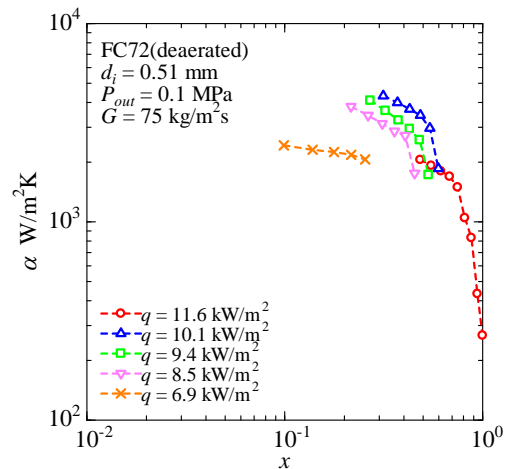
以上のことから、力の支配領域の境界は熱流束の条件によって遷移すると考えられ、熱流束が大きくなるにしたがって、ウェーバー数の大きくなる方向、すなわち、フルード数が大きくなる方向に遷移すると推測できる。また、熱流束が大きくなるとパーシャルドライアウトが生じやすくなる。

これらの結果を以下にまとめる。

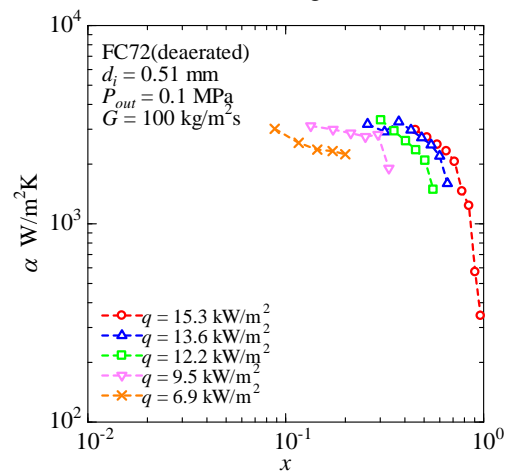
- (1) 乾き度  $x < 0.3$  の範囲において、低熱流束域では熱伝達係数の熱流束依存性が顕著に現れており、核沸騰が支配的である。
- (2) 乾き度  $x > 0.3$  の範囲において、質量速度や熱流束に関係なく、細管特有の性質である低乾き度におけるドライアウトによる伝熱劣化が確認された。
- (3) 高速度カメラを用いて気液挙動を観察し、



(a)  $G = 50 \text{ kg/m}^2\text{s}$



(b)  $G = 75 \text{ kg/m}^2\text{s}$



(c)  $G = 100 \text{ kg/m}^2\text{s}$

図 12 各質量速度における熱伝達係数と乾き度の関係

液膜の周方向分布から重力の影響を受ける範囲を見積もり、流動様式と熱伝達特性の関係性を確認した。

- (4) 力の支配領域について、熱流束が増加するにつれて体積力支配領域が拡大し、支配領域の境界として定めているウェーバー数またはフルード数が大きくなる方向に遷移する。

さらなる課題としては以下のようなことが挙げられる。

- (1) 系圧力を変更して実験を行い、圧力が熱伝達特性に及ぼす影響を明らかにする。
- (2) 予熱器を用いて入口流体温度や乾き度を変化させ、熱伝達特性に与える影響を明らかにする。
- (3) 加熱長さを変更し、より幅広い熱流束の条件で実験を行い、力の支配領域の境界をより明確なものとする。
- (4) 透明伝熱管を用いてテストセクション全体での流動様式を観察し、熱伝達特性との関連を調査する。

<参考文献>

- [1] Soumei Baba, Nobuo Ohtani, Osamu Kawanami, Koichi Inoue, Haruhiko Ohta,

"Experiments on Dominant Force Regimes in Flow Boiling using Mini-tubes", Frontiers in Heat and Mass Transfer, Vol. 3, No.4, 043002, 8 pages, 2012.

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計1件)

梅野晃太郎, 岩田圭介, 山崎優佑, 大田治彦, 「微細流路内における非共沸混合媒体の強制流動沸騰熱伝達」, 日本マイクロ重力ティ応用学会第28回学術講演会(JASMAC-28), 姫路市, 2014.11.27.

6. 研究組織

- (1) 研究代表者

大田 治彦 (OHTA, Haruhiko)  
九州大学・大学院工学研究院・教授  
研究者番号: 50150503

- (2) 研究分担者

新本 康久 (SHINMOTO, Yasuhisa)  
九州大学・大学院工学研究院・助教  
研究者番号: 30226352

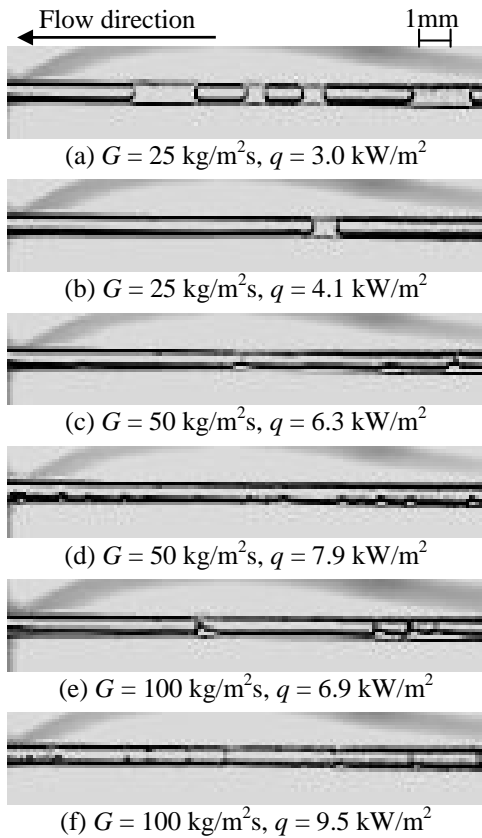


図13 各条件における気液挙動

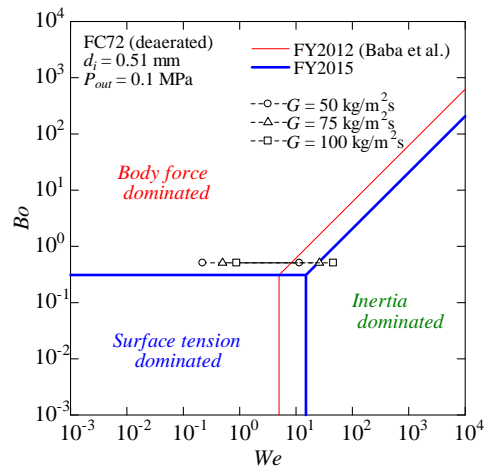


図14 力の支配領域線図上における実験条件範囲

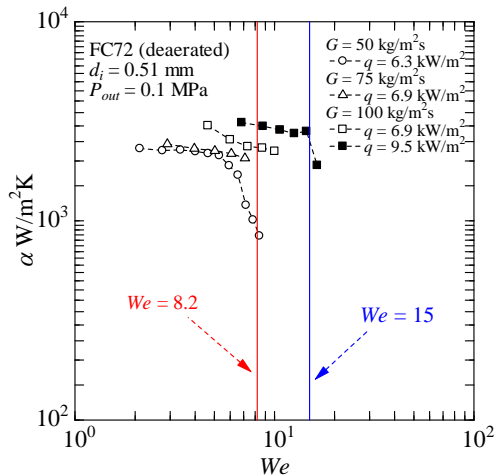


図15 熱伝達係数とウェーバー数の関係