



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	扁平矩形流路における気液二相流の流動様式におよぼす壁面撥水性の影響
Author(s)	熊谷, 剛彦; 井口, 学
Citation	実験力学, 7(1), 50-56 https://doi.org/10.11395/jjsem.7.50
Issue Date	2007-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/75038
Type	journal article
File Information	J. JSEM 7.50.pdf



論文

扁平矩形流路における気液二相流の流動様式におよぼす壁面撥水性の影響

熊谷剛彦*、井口 学*

Wettability Effect on Flow Pattern in Horizontal Air-Water Two-Phase Flow in Rectangular Small Channels

Takehiko KUMAGAI* and Manabu IGUCHI*

The flow patterns for gas-liquid two-phase flow have been experimentally investigated using “mm scale” rectangular channels. In this scale the transition of dominant forces from body forces such as the inertial force and buoyancy force to the surface force occurs. The surface force is changed in this study by coating repellent on the inner wall of the channel. The observed flow patterns are basically classified into three categories; bubbly flow, slug flow and annular flow just like those in wetted channels. The boundaries among them, however, become to depend on the wettability of the channel wall as the scale of the channel decreases.

Keywords: Water-repellent, Flow pattern, Rectangular channel, Air-water two-phase flow

1. 緒言

現在、材料製造プロセスや、化学プロセス、あるいは、分析プロセスにおいて、反応の温度、時間の精密なコントロールが容易となるスケールのマイクロ化が精力的に進められている。特に、マイクロリアクターに関しては、リアクター同士をつなぐチャンネル、液を送り出すポンプや制御用のバルブなど、周辺技術も含めて、大きな進歩を遂げ、その効果はすでに広く知られる通りである⁽¹⁻⁶⁾。これらのリアクターでは現在のところ、単相の液体あるいは気体を対象としているが、通常の液体を扱うプロセスでは反応あるいは沸騰に伴い発生する気体が含まれ、気液二相となっている事が一般的である。しかしながら、これまでにマイクロチャンネル内での、気液二相流に関する研究は少なく、基礎的な研究としては、流動様式を観察した報告⁽⁷⁻¹⁴⁾があるに過ぎない。また、実際の微小経路を流動搬送される、気体と液体が混在した流れのハンドリングは未だに不得手であり、流動のコントロールも未だ困難である。

これは、従来の研究により明らかにされてきた様々な流体力学的知見が、重力、浮力、慣性力などの物質の体積に代表される力に基づいて蓄積されてきたのに対し、微小流路における実際の流動は、表面張力による支配、すなわち表面積による効果が相対的に大きく、これまでに蓄積された大きな管径に対する知見および、その制御手法がそのまま適用できないことによる。

そこで、本研究では慣性力が支配的な従来スケールの領域と表面張力が支配的なマイクロスケールの領域をつなぐ中間スケールにおける気液二相流に関し、スケール変化に伴い誘起

される個々の現象を明らかにすることで、体積力支配から表面力支配への遷移を理解することを目的とする。

本研究で対象にする中間スケールとは、慣性力と表面張力の比率が逆転する領域であるから、その指標としてウェーバー数 We を考える。液流速は従来の研究によれば通常、 $0.1 \sim 1.0 \text{ m/s}$ の間にあり、慣性力、表面張力双方の力が釣り合う ($We = 1$) 場合の代表長さ L を求めると、およそ $0.1 \sim 10 \text{ mm}$ となる。したがって、中間スケールを $0.1 \sim 10 \text{ mm}$ の範囲に設定した。

まずその手始めに、狭隘な扁平矩形流路において、流動様式の調査を行う。高さが mm オーダーの扁平矩形流路に関しては、圧力損失、流動様式に対してはこれまでに、いくつかの報告⁽¹⁵⁻¹⁷⁾がなされているが、スケールの縮小に伴い変化する壁面と二相流体との表面力に起因する相互作用を考慮したものはほとんど無い。本研究で対象にした気固液三相における表面力では、その大きさの絶対値は表面張力で変化し、方向は接触角で変化する。そこで、この角度を変化させるために壁面に撥水処理を施した場合と、未処理の場合の流動様式を観察、比較し、スケールの縮小に誘起された変化を明らかにしようとした。なお、壁面に塗布した撥水剤により気液二相との相互作用を変化させた場合の流動様式に関する報告は、従来スケールの研究⁽¹⁸⁻²¹⁾に限られている。そこでマイクロチャンネルと同様の性質を見せ始めると言われる⁽²³⁾、気液界面の曲率半径を下回る流路スケールにおいて壁面との相互作用に起因する遷移的な現象を明らかにした。

2. 実験

装置の概略を Fig. 1 に示す。液体には脱イオン水、気体には空気をを用いた。空気はマスフローコントローラで流量制御した後、底部に配置した内径 1.0 mm の金属製ガスノズルより流路内

原稿受付：2006年8月8日

* 正会員 北海道大学大学院工学研究科 (札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

部に導入した。ノズル形状によっては、流動様式が異なる可能性もあるが、本研究の目的は、流路スケールを変化させることにより流動様式に現れる変化を明らかにすることであり、本論文ははその緒であることから、気相の導入形式として最も簡単な形を選択した。また水は流路の下に配置した水溜り、ポンプで汲み上げ、上部に設置した脱気槽に導いた。ここで微細な気泡を取り除いた後、回転式流量計を通してその流量を計測し、端面より流路に導入した。水流量の調整はポンプへの給電を制御するインバータの出力と流量調整バルブにより行った。導入された水と空気は気液二相流を形成し、反対側の端面に設けた出口より排出されるが、気泡の形態を観察、記録する目的で、流路の上方にデジタルビデオカメラおよびデジタルスチルカメラを設置した。出口より排出された気液二相流は、下方の水溜りで気液分離された後、再び水だけがポンプで流路に送り出される。

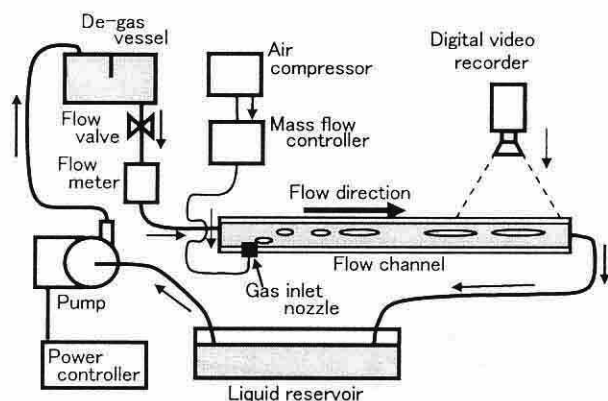


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Fig. 2(a)に流路の寸法を示す。流路全長(L)は1,100mm、幅(w)は50mmで高さ(h)を2mm、5mm、10mm、20mmの4段階に変化させた。この部分は全て透明アクリル製で、気液二相流の流動様式を外側から観察することが可能である。

また、撥水剤の塗布に関しては Fig. 2(b)に示すように、(i)塗布をしない場合、(ii)上下、両側面の4面の場合、(iii)上面のみの場合と(iv)下面のみの場合の4通りを設定した。

アクリル樹脂と水を直接に接触させた場合の接触角は 72° 度、撥水剤を塗布した場合には 141° 度であった。なお、撥水剤にはテフロン系撥水剤 (NTTアドバンステクノロジー社製、HIREC-1550) を使用し、上下に二分割可能な流路の内側に適宜マスキングを施しながら、スプレー塗布を行った。

ガス流量 Q_g 、水流量 Q_w は共に空塔速度に換算して、それぞれ $j_g = 5.0 \sim 80.0 \text{ cm/s}$ 、 $j_w = 5.0 \sim 120.0 \text{ cm/s}$ の範囲で変化した。空塔速度と流量の関係を式(1),(2)に示す。

$$j_g = Q_g / (hw) \quad (1)$$

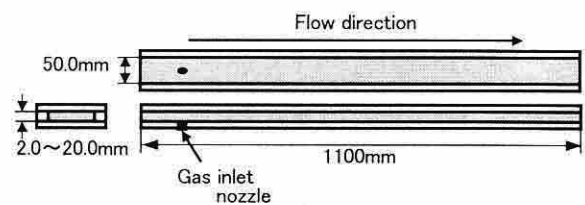
$$j_w = Q_w / (hw) \quad (2)$$

ここで、 h は流路高さ(gapとも表記)、 w は流路幅である。

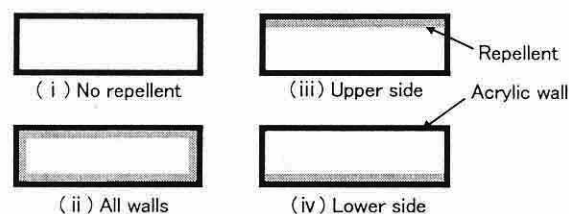
3. 実験結果および考察

3.1 撥水处理なし

Fig.2(b)の(i)のように、撥水剤を全く塗布しない流路の上方



(a) Dimensions of channel



(b) Repellent coating patterns on the channel walls

Fig. 2 Details of channel

より、気液二相流の発達の様子を観察し、十分発達した状態に至るまでの助走距離を求めた。その結果、ガスと空気空塔速度を様々変化した場合でも最大で 65cm であった。したがって流動様式観察は、この助走区間を通過した後の試験区間で行った。

3.1.1 高さが 2.0mm の場合

流路高さ(h)が 2.0mm の流路の実験で観察された典型的な流動様式を Fig. 3 に示す。

(1)気泡流(Bubbly flow): 連続相の水の中に長径にして 15~45mm の気泡が分散している。気泡径が小さいときは水平断面がほぼ楕円形をなすが、気泡が大きくなるに従い Cap 形に変化する。気泡高さはほぼ 2.0mm であり、気泡と上下面のアクリル壁との間には水膜が形成されて、直接接触することはない。相対的にガス流量が小さい場合に観察される流動様式である。

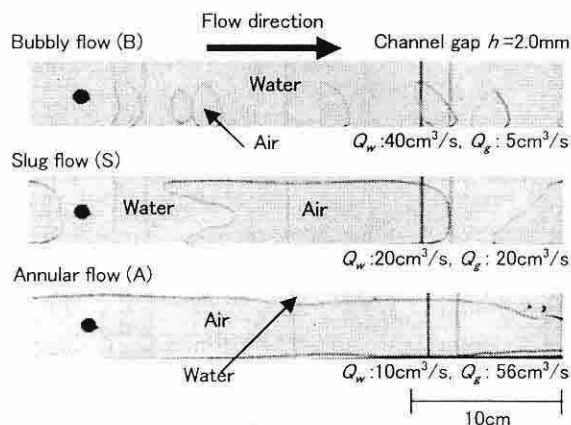


Fig. 3 Typical flow patterns (top view, non-repellent)

(2)スラグ流(Slug flow): 連続相をなす水の中にスラグと呼ばれる水平断面が砲弾形の気泡が現れる。気泡長さ(L_B)が流路幅(w)よりも大きい場合をスラグと分類した。スラグは気泡流で観察される小気泡が複数合体して形成される。

(3)環状流(Annular flow)：気泡が合体して空気も水と同様に連続相となった流動様式である。上方から観察すると、液相は流路の側壁に沿って流れ、気相はその内側を流れる。気泡と上下面のアクリル壁との間には水膜が形成されている。相対的にガス流量が大きい場合に観察される流動様式である。

流路高さ(h) が 2.0mm の流路の実験で観察された流動様式の領域マップを Fig. 4 に示す。

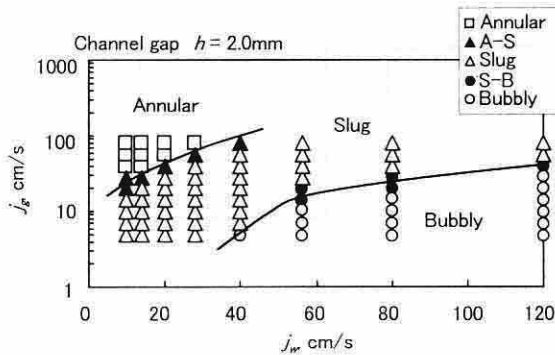


Fig. 4 Typical flow pattern regime (non-repellent)

流動様式をボイド率 α から整理する手法は多くの論文で見受けられるが、ボイド率の測定を必要としない、ガス、液体の両空塔速度により整理した流動様式線図も従来より多くの報告で用いられている。断面形状の変化に伴う流動様式の変化を明らかにすることを目的とする場合には、有効な整理法であるので、縦軸にガス空塔速度 j_g 、横軸に水空塔速度 j_w をとり、それぞれの条件で観察された流動様式をプロットした。水空塔速度が小さくガス空塔速度が大きな左上の領域は環状流、水空塔速度が大きくガス空塔速度が小さな右下の領域は気泡流となった。それ以外の領域はスラグ流となったが、環状流とスラグ流、スラグ流と気泡流との境界付近ではそれぞれの中間的性質を示す相 (Fig. 4 中に A-S, S-B と表記) が観察された。これらは、周期的にそれぞれの流動様式に変化するものであり、A-S 相であれば、環状流とスラグ流が時間的に交互に観察されるものである。本研究では基本となる流動様式に気泡流、スラグ流、環状流の3様式を挙げ、それぞれの境界線の示す条件を比較検討した。

3. 1. 2 流路高さ 5.0mm の場合

流路高さ(h) が 5.0mm の場合の流動様式の領域マップを Fig. 5 に示す。

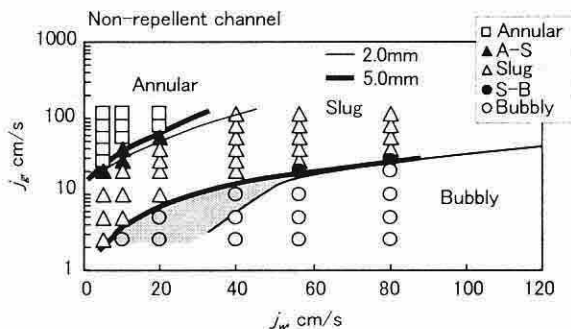


Fig. 5 Comparison of flow pattern regimes for different gaps ($h=2.0, 5.0\text{mm}$, non-repellent)

気泡流—スラグ流境界、スラグ流—環状流境界を太い実線で示す。比較のため、流路高さ 2.0mm の場合の境界線は細い実線で示されている。流路高さ 5.0mm と 2.0mm とではスラグ流—環状流境界線の位置にほとんど違いはないが、気泡流—スラグ流境界線の低ガス空塔速度域に関しては、Fig. 5 中に灰色で示すような開きがある。この領域において、流路高さ 5.0mm の場合、流動様式は気泡流であるが、2.0mm ではスラグ流になることを示している。このことから、流路高さ(h) が 2.0mm の場合には、5.0mm の場合に比較して気泡の合体傾向が強いことがわかる。

この気泡の合体傾向が、どのような流路高さ(h) を境にして生じるかを詳細に検討する前に、参考のため流路高さ $h = 10.0\text{mm}$ の場合の流動様式を観察した。流動様式の領域マップを Fig. 6 に示す。気泡流—スラグ流境界、スラグ流—環状流境界を灰色の極太実線で示す。比較のため、流路高さ 2.0mm、5.0mm の場合の境界線も先と同様の形式で示した。気泡流—スラグ流境界線に関して、低ガス空塔速度域での流路高さ 10.0mm の境界線は 5.0mm の境界線にほぼ一致し、スラグ流—環状流境界線についても、流路高さ 5.0mm と 10.0mm とではほとんど違いがない。

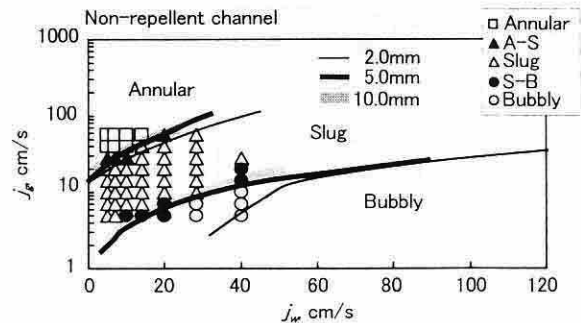


Fig. 6 Comparison of flow pattern regimes ($h=2.0, 5.0, 10.0\text{mm}$, non-repellent)

したがって、低ガス空塔速度域において、気体の合体傾向を示す流路高さ(h) の臨界値は 2.0mm と 5.0mm の間にあることがわかる。気泡の合体傾向を生じる臨界高さ(h_c) とは、どのような物理量なのかを考察する。その臨界値となりうる物理長さの例として、水平流路内を移動する気泡の垂直方向の曲率半径を挙げ、流路高さとの関係を考える^(22,23)。流路高さが、曲率半径よりも大きな場合、Fig. 7(a) に示すように、気泡は流路内で浮遊しており、気泡と上下両壁面との間には液体が存在する。この場合、形成される気液界面は水平方向に大きな面積を持ち、気体と液体との速度差に起因して、界面には揺らぎが生じ易い。液体中を浮遊流動する気泡はこの揺らぎにより再び分裂する可能性がある。

一方、流路高さが、曲率半径よりも小さな場合、Fig. 7(b) に示すように気泡は壁面に密着する水膜を介して上下壁面より拘束を受けており、気液界面には揺らぎが生じにくく、気泡が再び分裂する可能性は低い。気泡同士の合体、分裂が常に生じていることを考慮すると、このことは気泡の合体傾向と考えることができる。

気泡の曲率半径はどの程度の値をとるのか、概算を試みる。

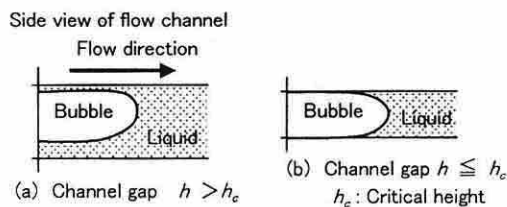


Fig. 7 Schematics of bubble and liquid geometry

1984年にCotterがマイクロチャンネルの定義を、気液界面の平均曲率と関連付けて提案した文献⁽²³⁾の中で、液中に存在する気泡の曲率半径 R を式(3)で与えている。

$$P_g - P_w = \sigma / R \quad (3)$$

ここで、 P_g は気体側圧力、 P_w は液側圧力、 σ は表面張力であり、 R は次式で表される。

$$1/R = 1/R_1 + 1/R_2 \quad (4)$$

R_1 を水中気泡の水平断面曲率半径、 R_2 を気泡の垂直断面曲率半径とする。これより、気泡の垂直断面曲率半径 R_2 を大気圧下、水-空気系で求める。ただし、 R_1 が流路幅最大となった場合の25.0mmの場合と、 $R_1 = R_2$ (気泡が球状)の場合を仮定する。ここで、 $\sigma = 72.88 \text{ mN/m}$ 、 $g = 980.1 \text{ cm/s}^2$ である。

$R_1 = 25.0 \text{ mm}$ の場合、

$$R_2 = 0.9 \text{ mm} \quad (5)$$

$R_1 = R_2$ (気泡が球状)の場合、

$$R_2 = 1.9 \text{ mm} \quad (6)$$

となる。したがって、気泡厚さとしてとり得る値(h_c)は1.8~3.8mmとなる。実験時に観察された気泡の水平断面曲率半径 R_1 が10mm~45mmであったことを考えると、流路高さが5.0mmでは、気泡の合体傾向が小さく、2.0mmのときに合体傾向が大きくなる事が説明できる。したがって、この値 h_c を臨界高さとして考えることができる。

3.2 撥水处理あり

3.2.1 撥水处理—全面

流路高さ(h)が2.0mmで、Fig.2(b)の(ii)のように、内側全面に撥水剤をコートした流路の実験で観察された典型的な流動様式をFig.8に示す。

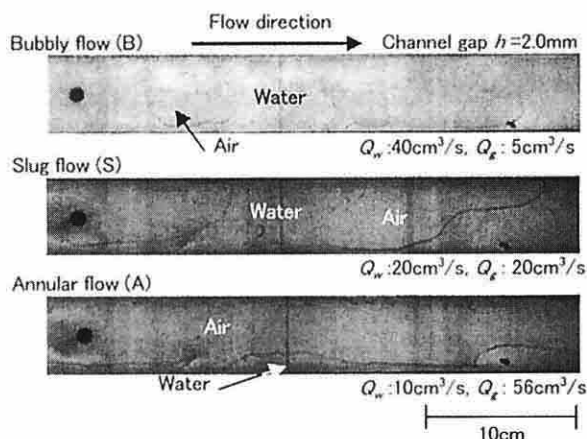


Fig. 8 Typical flow patterns (top view, water-repellent)

壁面に撥水处理を施すと、その表面はつや消し状となり、画像のコントラストが低下するので、流路下側に投光器を設置して記録したものである。観察の結果、主たる流動様式は、撥水处理をしない場合と同様に気泡流、スラグ流、環状流であることがわかった。

しかし、気泡形状は撥水处理なしの気泡流、スラグ流で見られた滑らかな曲線に囲まれたものではなく凹凸に富んだ形状を示した。これは、撥水处理なしの場合には気泡は壁面に接触することなく、水膜に覆われていたのに対し、撥水处理された場合は気泡が直接壁面に接触し、気固液三相界面(メネスカス)の移動に関して壁面から強い拘束を受けたためと考えられる。

次に、観察された流動様式の領域マップをFig.9に示し、気泡流—スラグ流境界、スラグ流—環状流境界を細い点線で示す。比較のため、撥水处理なし、流路高さ2.0mmの場合の境界線を細い実線で示す。

撥水处理の「あり」と「なし」とでは気泡流—スラグ流境界線の

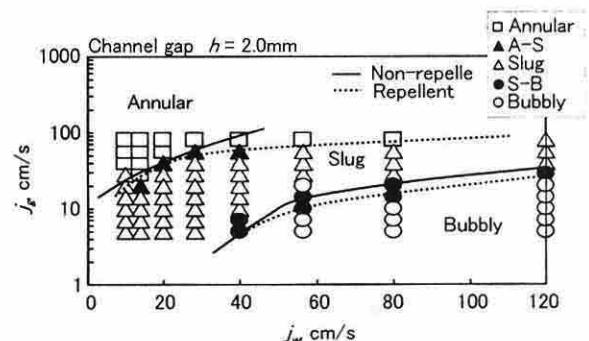


Fig. 9 Comparison of flow pattern regimes (repellent, non-repellent, $h=2.0 \text{ mm}$)

位置にほとんど差はないが、スラグ流—環状流境界線の水空塔速度の高い領域には差が認められる。この領域の流動条件において、撥水处理「なし」の場合、流動様式はスラグ流であるが、「あり」では環状流になることを示している。撥水处理「あり」においては、「なし」に比較して気相が連続相になりやすく、気泡の合体傾向が強いことがわかる。これは「あり」の場合、気泡が液膜に包囲されることなく、壁面からの拘束を受けており、特に壁面に接するメネスカスは、移動が困難となる。つまり、ガスの輸送に際してガスが分散相となり、気泡がメネスカスと共に流路を移動する形式(気泡の形成)よりも、流路の長手方向に沿ってメネスカスが固定され、ガスも連続相として通過する形式(ガスチャンネルの形成)が優勢であったと考えられる。

この傾向を確認するため、高さが5.0mm、内側全面に撥水剤をコートした流路の実験で観察された典型的な流動様式をFig.10に示す。気泡流—スラグ流境界、スラグ流—環状流境界を太い点線で示す。比較のため、流路高さ2.0mmの場合の境界線を細い点線で示す。スラグ流—環状流境界線はほぼ一致しており、気泡の合体傾向が確かめられた。特徴的なのは、気泡流—スラグ流境界線で、高さが5.0mmの場合の位置が、撥水处理「なし」、高さが5.0mmの場合に比較すると右側に移動し、高さが2.0mm、撥水处理「なし」の場合の位置に近づいている

ことである。これは、撥水处理「なし」、高さが2.0mm の場合に見受けられた気泡の合体メカニズム(気泡が、上面一下面の間にブリッジする)が、高さ5.0mm であっても撥水处理「あり」の場合には発現したものと思われる。

実際には Fig. 11(a)に示すように撥水剤により壁面との親和性が高まった気泡が、気液界面の曲率半径より若干大きくてもブリッジを形成したことによると思われる。また、Fig. 11(b)に示す

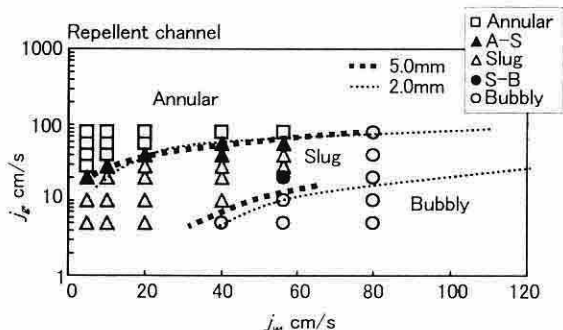


Fig. 10 Comparison of flow pattern regimes
($h=2.0, 5.0$ mm, repellent)

ように撥水处理した壁面に付着した気泡は壁面に沿って広がるため、複数の気泡が壁面を媒介して合体するメカニズムが考えられ、気泡合体の傾向はより一層強まっていたと考えられる。

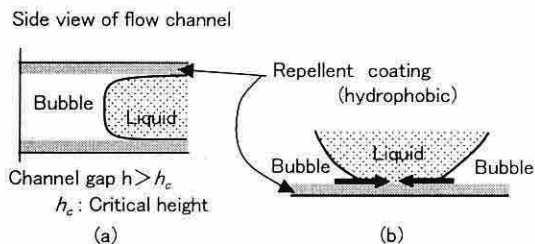


Fig. 11 Schematics of bubble and liquid geometry

3. 2. 2 撥水处理—上あるいは下のみの片面

流路高さ(h) が2.0mm で、Fig.2(b)の(iii)に示すように、上面にのみ撥水剤をコートした流路の実験で流動形態観察を行ったが、上部からの観察では画像にコントラストが全く現れず、不調に終わった。次に Fig.2(b)の(iv)に示すように下面にのみ撥水剤をコートした流路においても観察を行ったが、画像のコントラストが低く、流動形態の識別が困難であった。そこで、下方からの投光を、斜め上方からに切り替えて観察を行った。その結果を Fig. 12(a)に示す。この画像にはスラグ型の気泡が示されているが、主たる流動様式は全面撥水处理の場合と同様に気泡流、スラグ流、環状流であることがわかった。さらに、気泡を詳細に観察したところ、垂直断面構造は Fig. 12(b)に示すように気泡が下面に張り付いたまま移動すること、その周囲のエッジの仰角が小さいために、下あるいは上からの垂直方向からの投光では、コントラストがほとんど付かなかったこともわかった。さらに、気泡上側の気液界面には波動が生成しており、気液界面には剪断力が強く働くことがわかった。

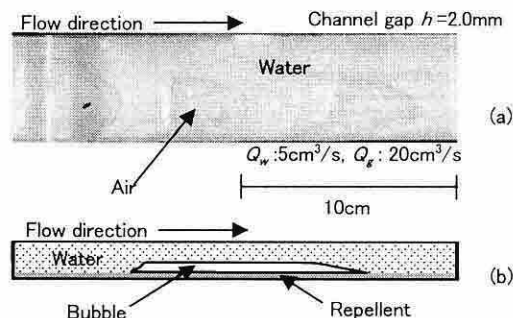


Fig. 12 Schematics of bubble and liquid geometry

次に、観察から得られた流動様式の領域マップを Fig. 13に示し、気泡流—スラグ流境界、スラグ流—環状流境界を太い一点鎖線で示す。

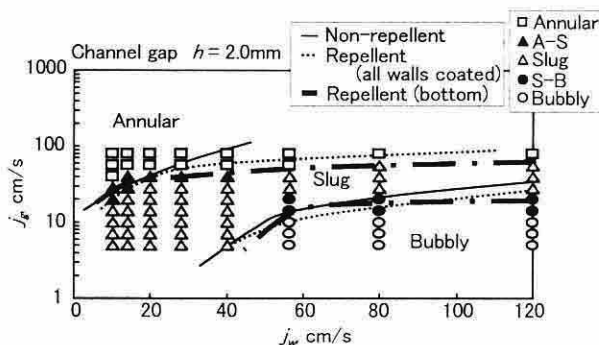


Fig. 13 Comparison of flow pattern regimes
(all walls coated, bottom wall coated, $h=2.0$ mm)

比較のため、撥水处理なし、流路高さ2.0mm の場合の境界線を細い実線、全面撥水处理、流路高さ2.0mm の場合の境界線を細い点線で示す。気泡流—スラグ流境界、スラグ流—環状流境界ともに全面撥水处理、流路高さ2.0mm の場合とほぼ同じ位置にあり、撥水处理が片面であっても気泡の合体傾向が強いことを示した。

4. 結論

慣性力が支配的なセンチスケールの領域と、表面力が支配的なマイクロスケールの領域とをつなぐ中間スケール(mm)における気液二相流の流動に関し、体積力支配から表面力支配へ遷移する際の現象として、狭い扁平矩形断面を持つ水平流路において以下のことを明らかにした。

4. 1 撥水剤を塗布しない場合

(1)流路壁面に撥水剤を塗布しない条件で、気液二相流の流動形態を観察したところ、主たる流動様式は気泡流、スラグ流、環状流からなることが判った。

(2)流路高さがある臨界高さ(h_c)よりも小さい場合、低ガス、低水空塔速度領域において気泡の合体が促進され、気泡流の領域が一部スラグ流領域に変化した。

4. 2 撥水剤を塗布した場合

(1)流路壁面に撥水剤を塗布した条件で、気液二相流の流動形態を観察したところ、主たる流動様式は気泡流、スラグ流、

環状流からなった。

(2)高ガス空塔速度領域における中-高水空塔速度領域での気泡の合体が促進され、スラグ流の領域が一部環状流領域に変化した。

(3)流路高さが前述の臨界高さより小さくなくとも、低ガス、低水速度領域において気泡の合体が促進され、気泡流の領域が一部スラグ流領域に変化する。

主な記号

g : 重力加速度 ($=980.1 \text{ cm/s}^2$)
 h : 流路高さ (mm)
 h_c : 気泡臨界高さ (mm)
 j_g : 空気空塔速度(cm/s)
 j_w : 水空塔速度(cm/s)
 L : 流路長さ (mm)
 L_B : 気泡長さ (mm)
 P_g : 気相側圧力 (g/cm^2)
 P_w : 水相側圧力 (g/cm^2)
 Q_g : 空気流量 (cm^3/s)
 Q_w : 水流量 (cm^3/s)
 R_f : 気泡の水平断面曲率半径 (mm)
 R_v : 気泡の垂直断面曲率半径 (mm)
 w : 流路幅 (mm)
 σ : 表面張力 ($=72.88 \text{ mN/m}$)
 $\Delta \rho$: 密度差 ($=0.997 \text{ g/cm}^3$)

参考文献

- 1) Leu T. S. and Chang P. Y., : Pressure barrier of capillary stop valves in micro sample separators: *Sensors and Actuators*, A115(2004) 508-515
- 2) Garnier N., Grigorieff R. O. and Schatz M. F., : Optical manipulation of Microscale Fluid Flow, *Physical Review Letters*, 91(2003) 054501-1-4
- 3) Lee J., Moon H., Fowler J., Schoellhammer T. and Kim C. J., : Electrowetting and Electrowetting-on-dielectric for microscale liquid handling, *Sensors and Actuators*, A95(2002) 259-268
- 4) Nagayama G. and Cheng P., : Effects of interface wettability on microscale flow by molecular dynamics simulation, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 47(2004) 501-513
- 5) Verheijen H. J. J. and Prins M. W. J., : Reversible Electrowetting and Trapping of Charge: *Model and Experiments*, *Langmuir*, 15(1999) 6616-6620
- 6) Lee J., Moon H., Fowler J., Schoellhammer T. and Kim C. J., : Electrowetting and electrowetting-on-dielectric for microscale liquid handling, *Sensors and Actuators*, A95(2002) 259-268
- 7) Kawahara A., Chung P. M. Y. and Kawaji M., : Investigation of two-phase flow pattern, void fraction and pressure drop in a microchannel, *Int. J. Multiphase Flow*, 28(2002) 1411-1435
- 8) Triplet K. A., Ghiaasiaan S. M., Abdel-Khalik S. I. and Sadowski D. L., : Gas-liquid two-phase flow in microchannels Part I: two-phase flow patterns, *Int. J. Multiphase Flow*, 25(1999) 377-394
- 9) Hetsroni G., Mosyak A., Segal Z., and Pogrebnnyak E., : Two-phase flow patterns in parallel micro-channels, *Int. J. Multiphase Flow*, 29(2003) 341-360
- 10) Akbar M. K., Plummer D. A. and Ghiaasiaan S. M., : On gas-liquid two-phase flow regimes in micro-channels, *Int. J. Multiphase Flow*, 29(2003) 855-865
- 11) You L. and Liu H., : A two-phase flow and transport model for the cathode of PEM fuel cells, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 45(2002) 2277-2287
- 12) Li J. and Cheng P., : Bubble cavitation in a microchannel, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 47(2004) 2689-2698
- 13) Steinke Mark E. and Kandlikar Satish G., : Control and effect of dissolved air in water during flow boiling in microchannels, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 47(2004) 1925-1935
- 14) Zhang L., Koo J. M., Jiang L., Asheghi M., Goodson K. E., Santiago J. G. and Kenny T. W., : Measurements and Modeling of Two-Phase Flow in Microchannels With Nearly Constant Heat Flux Boundary Conditions, *J. Microelectromech. Syst.*, 11(2002) 12-19
- 15) Mishima K., Hibiki T. and Nishihara H., : Some Characteristics of Gas-Liquid Flow in Narrow Rectangular Ducts, *Int. J. Multiphase Flow*, 19-1 (1993), 115-124
- 16) Ide H. and Matsumura H., : Frictional Pressure Drops of Two-Phase Gas-Liquid Flow in Rectangular Channels, *Int. J. Exp. Thermal Fluid Sci.*, 3-4 (1990) 362-372
- 17) Ali M. I., Sadatomit M. and Kawaji M., : Adiabatic Two-Phase Flow in Narrow Channels Between Two Flat Plates, *Chem. Eng. Prog.*, 71 (1993) 657-666
- 18) Watanabe K., Yanuar and Watanabe H., : Drag reduction of Newtonian fluid in a circular pipe with a highly water-repellent wall, *J. Fluid Mech.*, 381 (1999), 225-238
- 19) Shibuichi S., Onda T., Satoh N. and Tsujii K., : Super Water Repellent Surfaces Resulting from Fractal Structure, *J. Phys. Chem.*, 100 (1996) 19512-19517
- 20) Fukushi K. and Iguchi M., *Tetsu-to-Hagane*, 91.(2005) 465-470
- 21) Takamasa T., Hakutsu T., Mishima K., Okamoto K. and Imai Y., *Thermal Science & Engineering*, 12-2 (2004), 39-44
- 22) Ma H. B. and Peterson G. P., : The minimum meniscus radius and capillary heat transport limit in micro heat pipes, *Journal of heat transfer*, 120(1998) 227-233
- 23) Cotter P. T., : Principles and Prospects for Micro Heat Pipes, 1984, *Proc. 5th Int. Heat Pipe Conf.*, Tsukuba, Japan, pp. 328-335.