

垂直円管内空気-水系気液二相流の流動様式に及ぼす壁の濡れ性の影響

寺内 幸生*・井口 学*²・小坂 博昭*³・横谷 真一郎*⁴・原 茂太*⁵

Wettability Effect on the Flow Pattern of Air-water Two-phase Flows in a Vertical Circular Pipe

Yukio TERAUCHI, Manabu IGUCHI, Hiroaki KOSAKA, Shinichiro YOKOYA and Shigeta HARA

Synopsis : The flow pattern of air-water two-phase flows in a vertical, circular pipe was experimentally investigated. The wettability of the pipe was changed by surface treatment. The original acrylic pipe had a contact angle θ_c of 77° , while two pipes after the surface treatment had θ_c of 36° and 104° , respectively. The flow patterns in the pipes having θ_c of 36° and 77° were the same and agreed favourably with previously published results for pipes of good wettability ($\theta_c < 90^\circ$). On the other hand, different types of bubbly and slug flows appeared in the pipe of $\theta_c = 104^\circ$, being caused by attachment of bubbles and slugs to the wall of the pipe. The bubbly flows for θ_c of 104° were classified into two categories and slug flows for the same contact angle were classified into three categories. The boundary between the bubbly and slug flows, however, was hardly dependent on the wettability of the pipe.

Key words : gas-liquid two-phase flow; vertical pipe; submerged entry nozzle; flow pattern; wettability; bubbly flow; slug flow.

1. 緒言

機械工学や化学工学などの分野でみられる気液二相流の大部分は濡れ性のよい管路内を流れており、古くから行われてきた膨大な研究によって、流動様式はもとよりのこと、各流動様式における気体と液体の流動特性についても豊富な情報が蓄積されている¹⁻⁴⁾。

一方、本研究で対象とする鉄鋼精錬の分野でも、気液二相流は多くのプロセスでみられるが、壁から融体への汚染をできるだけ少なくするために、反応容器や管路には融体との濡れ性の悪い材料が用いられている⁵⁾。ところが、管路は一般に不透明であり、融体の温度も高く、しかも実験に危険が伴うことから濡れ性と上記諸特性との関係について系統的知見は得られていない。わずかにレイノルズ数が小さい場合の水平円管内における流動形態の一端が水モデル実験に基づいて報告されているに過ぎない⁶⁾。周知のように、濡れ性は接触角 θ_c で定量化される。ここでは $\theta_c < 90^\circ$ のとき濡れがよい、 $\theta_c > 90^\circ$ のとき濡れが悪いと定義する。

既存のプロセスの効率向上はもとより、新しいプロセスを開発するに際しては、反応容器や管路内の融体の流動特性や気泡の分散状況を正確に把握する必要がある。このような認識に基づき、最近では流動と濡れ性との関係についても注目が集まり、活発な研究が開始されつつある^{7,8)}。

著者らもRH脱ガス装置やガス吹込み浸漬ノズル内の流

動特性を把握するための基礎的研究として、空気-水系の垂直管内気液二相流の流動様式および流動特性と濡れ性との間の関係に着目し、実験を始めている^{9,10)}。本研究では、実際の連続鋳造設備における浸漬ノズル内の溶鋼とアルゴンガスの流れの向きとは異なるが、まず水と空気がともに上向きに流れている場合の流動様式に着目し、管路と水との接触角 θ_c を 36° 、 77° 、 104° と広範囲に変化させて流動様式に関する実験を行った。

2. 実験装置と測定方法

実験装置の概要をFig. 1に示す。直径Dが 5.0×10^{-3} m、 10.0×10^{-3} m、 15.0×10^{-3} mの透明アクリル樹脂製円管内にポンプを用いて上向きに水を循環させ、円管下部側壁に取付けた直径 4.0×10^{-3} mのポーラスプラグ(平均気孔径 270×10^{-6} m、気孔率25%)から空気を吹込んだ。水の流量 Q_w と空気流量 Q_g を広範囲に変化させ、気液二相流の流動様式に及ぼす濡れ性の影響をスチールカメラと高速度ビデオカメラ(200コマ/s)を用いて調べた。

測定部は助走区間の影響が無視できるように、ノズルからの距離が $L/D=53$ となる位置から 3.0×10^{-1} m上方までの区間に設定した。また、管壁の濡れ性は親水材あるいははっ水材を管路の内側に管径の変化が無視できる程度に薄く塗布して変化させた。本実験では前進接触角 θ_c が 36° 、

平成11年3月5日受付 平成11年6月9日受理 (Received on Mar. 5, 1999; Accepted on June 9, 1999)

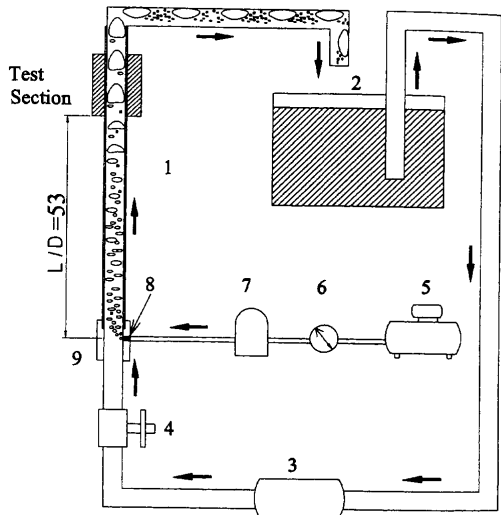
* 北海道大学研究生(現:ヘレウスエレクトロナイト(株))(Research Student, Hokkaido University, now Heraeus Electronite, Japan)

* 2 北海道大学大学院工学研究科(Graduate School of Engineering, Hokkaido University, North 13 West 8 Kita-ku Sapporo 060-8628)

* 3 ヘレウスエレクトロナイト(株)技術管理部(Technical and Quality Control Department, Heraeus Electronite, Japan)

* 4 日本工業大学(Nippon Institute of Technology)

* 5 大阪大学大学院工学研究科(Graduate School of Engineering, Osaka University)



- 1. Acrylic Pipe
- 2. Water Tank
- 3. Water Pump
- 4. Needle Valve
- 5. Air Compressor
- 6. Air Regulator
- 7. Mass Flow Controller
- 8. Porous Plug
- 9. Connector

Fig. 1. Experimental apparatus.

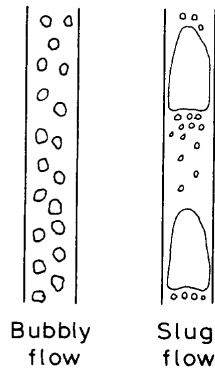


Fig. 2. Schematic of bubbly flow and slug flow in a pipe of good wettability.

77°, 104°で行い,それぞれの条件下で気泡流 (Bubbly flow) からスラグ流 (Slug flow) への流動様式の変化を調べた。ここで θ_c が 36° と 77° の管路は濡れ性のよい管路, 104° の管路は濡れ性の悪い管路に属する。

なお, 管路の濡れ性がよい場合に知られている気泡流とは, Fig. 2 に示すように, 直径が管路内径よりも小さな気泡が管内に分散した状態を, スラグ流とは気体スラグと呼ばれる弾丸状の大きな気泡がほぼ周期的に上昇する状態を表す。ここでのスラグ (slug) は片仮名で表示すると紛らわしくなるが, 精錬で用いるスラグ (slag) とは全然別ものであることに留意されたい。

3. 実験結果と考察

3.1 流動様式

接触角 $\theta_c=36^\circ$ の管路内の流動様式はいずれの直径の管路についても, Fig. 3 に示すように $\theta_c=77^\circ$ の管路内の流動様式とほぼ同じであった。そこで本報告では, 濡れ性がよい場合については $\theta_c=77^\circ$ の結果のみを取挙げる。

内径が $D=5.0 \times 10^{-3} \text{ m}$, $10.0 \times 10^{-3} \text{ m}$, $15.0 \times 10^{-3} \text{ m}$ の円管内における流動様式を Fig. 4~9 に示す。慣例に従い, 図の縦軸には水の空塔速度 $j_w (=4Q_w/\pi D^2)$, 横軸には空気の空塔速度 $j_g (=4Q_g/\pi D^2)$ を用いている。図中に示した各管路内の流動様式は, j_w が管路の高さの中央に対応する値, j_g が管路の中心軸に対応する値をとるときの流動様式を表すことに留意されたい。なお, 各流動様式図は写真をトレースして貼りつけたものである。気泡流とスラグ流の境界近傍ではもっと多くの写真を撮っているが, 煩雑さを避けるため, 図中には代表的なもののみを示している。Fig. 4, 6, 8 は管路の濡れ性がよい場合, Fig. 5, 7, 9 は濡れ性の悪い場合の流動様式である。濡れ性がよい場合は気泡や気体スラ

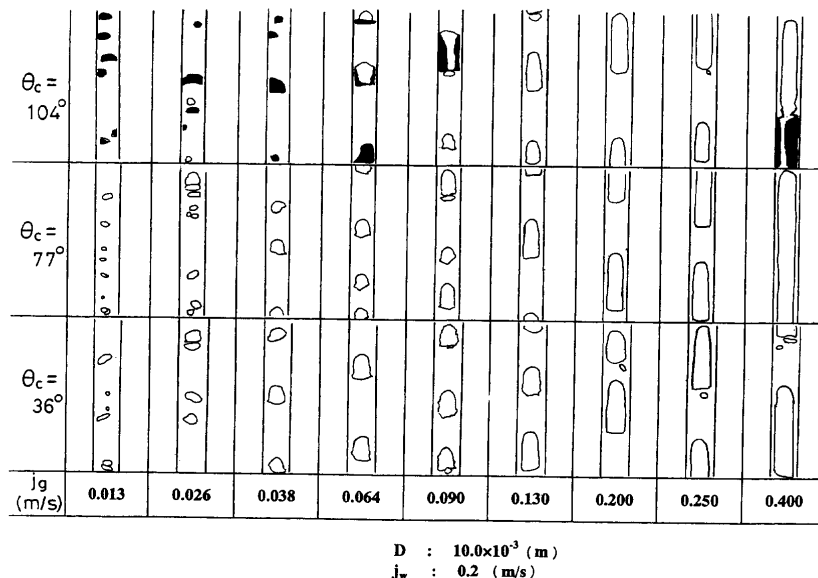


Fig. 3. Flow patterns in pipes with different contact angles.

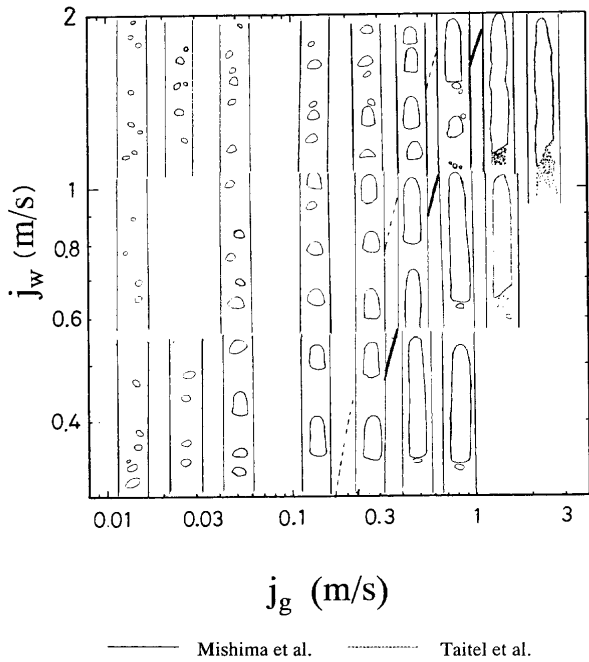


Fig. 4. Observed flow regimes for good wettability pipe ($D=5.0 \times 10^{-3}$ m and $\theta_c=77^\circ$).

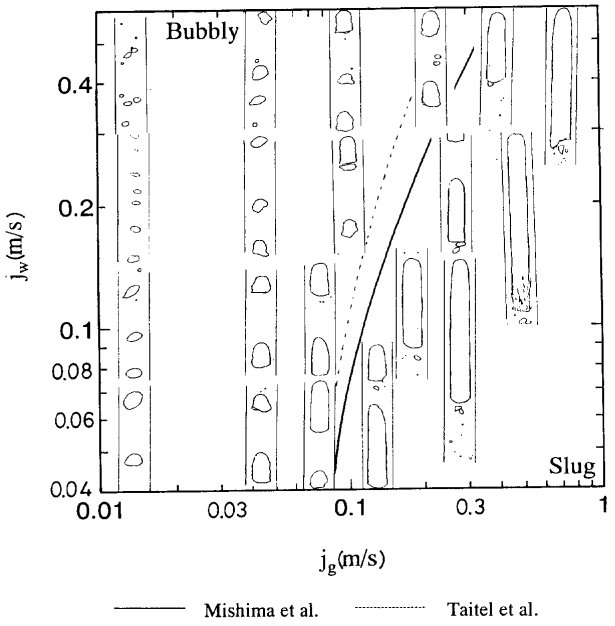


Fig. 6. Observed flow regimes for good wettability pipe ($D=10.0 \times 10^{-3}$ m and $\theta_c=77^\circ$).

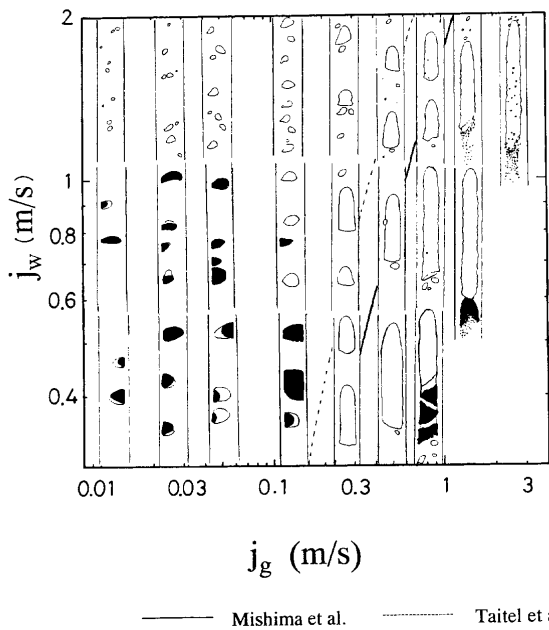


Fig. 5. Observed flow regimes for poor wettability pipe ($D=5.0 \times 10^{-3}$ m and $\theta_c=104^\circ$).

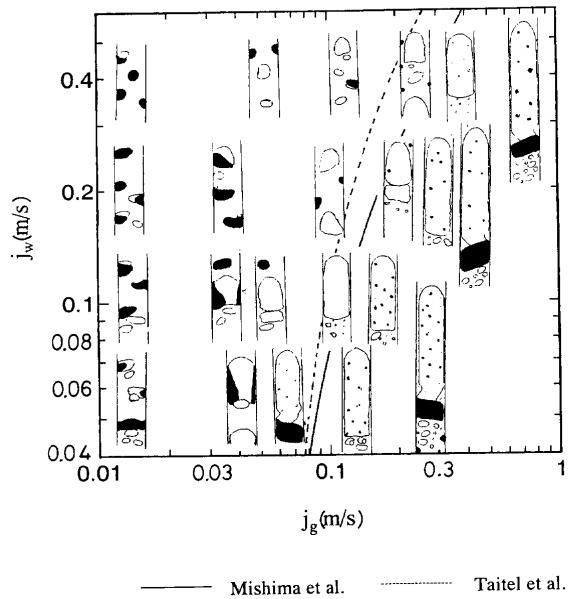


Fig. 7. Observed flow regimes for poor wettability pipe ($D=10.0 \times 10^{-3}$ m and $\theta_c=104^\circ$).

グが壁に付着することはないが、濡れ性が悪い場合 ($\theta_c=104^\circ$) については壁への付着が観察された。Fig. 5, 7, 9 中の黒く塗ってある部分は壁に付着している気泡や気体スラグの一部分を表している。

全ての図において、実線はMishima-Ishii¹¹⁾、破線はTaitelら¹²⁾の流動様式判別式に基づいて計算した線であり、濡れ性がよい管路に対する気泡流とスラグ流の境界を表す。ただし、いずれの判別式がより正確であるのかの判断は、今のところなされていない。本研究で観察された濡れ性の

よい管路における気泡流からスラグ流への遷移は、これらの境界線の近傍で起こっている。濡れ性が悪い場合については、気泡や気体スラグの挙動が濡れ性のよい管路内のもとは明らかに異なっている。そこでまず、それらの分類を行った後に、気泡流とスラグ流の境界についての論議を行う。

3・2 気泡流

Fig.10に内径 $D=10.0 \times 10^{-3}$ m、液体の空塔速度 $j_w=0.400$ m/s、気体の空塔速度 $j_g=0.013$ m/sにおける気泡の写真を示す。一般によく知られているように、濡れ性のよい円管内

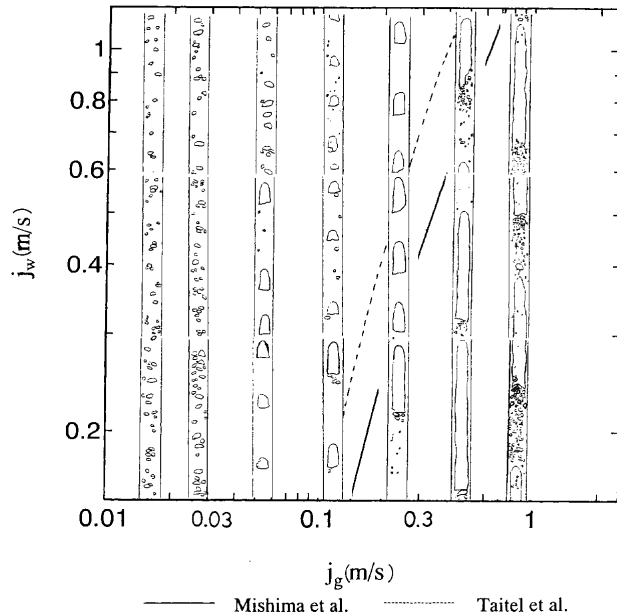


Fig. 8. Observed flow regimes for good wettability pipe ($D=15.0 \times 10^{-3}$ m and $\theta_c=77^\circ$).

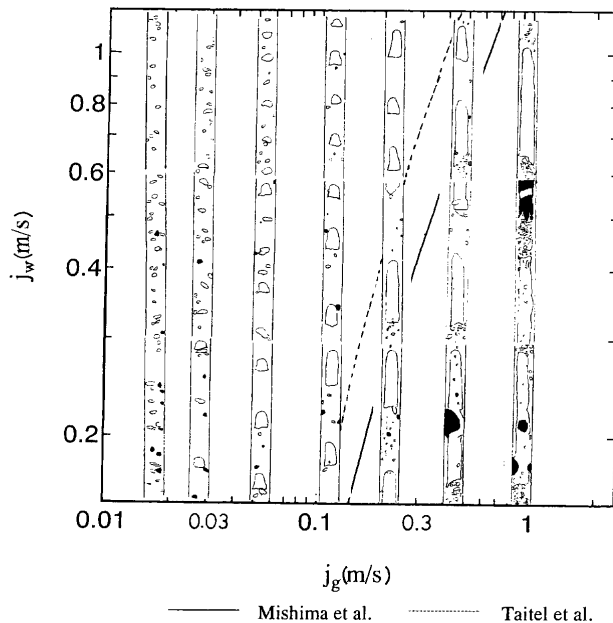
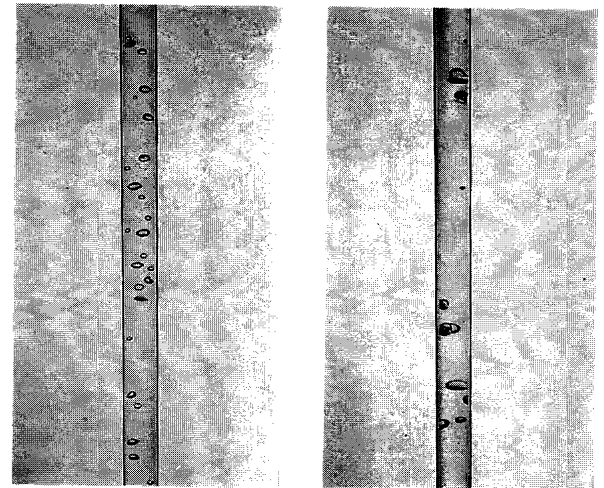


Fig. 9. Observed flow regimes for poor wettability pipe ($D=15.0 \times 10^{-3}$ m and $\theta_c=104^\circ$).

では回転楕円体に近い気泡が管路の中心近くに多くみられた。一方、濡れ性の悪い円管では管路壁への付着、離脱を繰り返しながら上昇する気泡が現れた。

濡れ性の悪い $D=5.0 \times 10^{-3}$ m, 10.0×10^{-3} m の円管では、 j_w の小さいとき、壁に付着し円周方向に伸びた形状の気泡が観察された。Fig.11 に 1 例として $D=10.0 \times 10^{-3}$ m, $j_w=0.050$ m/s, $j_g=0.013$ m/s での濡れ性が異なる場合の気泡の写真と比較して示す。気泡が濡れ性の悪い壁に沿って円周方向に広がる理由としては、次のように考えられる。多孔性ノズルで生成した気泡が上昇中に壁に付着した後、こ



Good Bubbly Poor Bubbly a

Fig. 10. Photographs showing bubbly flow and bubbly flow a ($j_w=0.400$ m/s, $j_g=0.013$ m/s, $D=10.0 \times 10^{-3}$ m).

れに他の気泡が合体し大きな気泡となることがある。ここで j_w が小さいと、気泡が受ける流動抵抗に比べて、表面張力の影響が顕著になるため、大きくなった気泡は垂直方向に壁に接触しつつ移動するよりはむしろ円周方向に伸びるほうがエネルギーが少なく、安定になるのであろう。

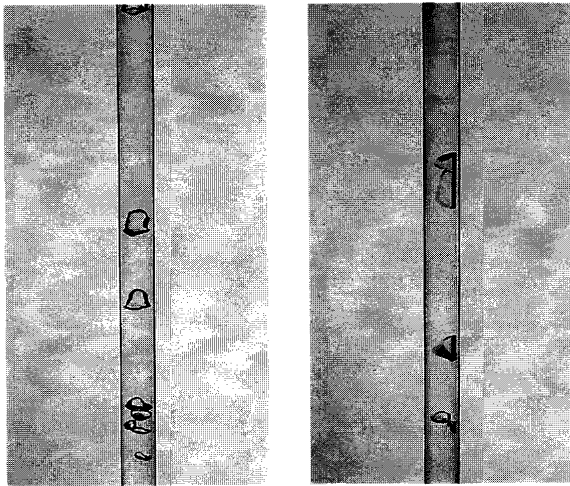
ここには示していないが、内径 D が 5.0×10^{-3} m の円管では、濡れ性の悪いとき、円周方向に伸びた気泡の両端が合体してしまい、ドーナツ状や円柱状になった気泡もみられた。円柱状の気泡はいわゆるピストン状になっており、その気泡の上部の液体と下部の液体を完全に分離している。

壁への付着、離脱を繰り返す気泡はこれまで濡れ性のよい場合の流動様式にはみられないことから、区別するため、Fig.10 のような比較的小さく回転楕円体に近い気泡が壁への付着、離脱を繰り返しながら上昇する場合を気泡流 a, Fig.11 のように円周方向に大きく広がった気泡が存在する場合を気泡流 b と定義する。

3.3 スラグ流

濡れ性がよい場合 ($\theta_c=77^\circ$) については、Fig. 4, 6, 8 に示すように従来報告されているのと同じスラグ流が観察された。しかし、Fig. 5, 7, 9 に示す濡れ性が悪い場合 ($\theta_c=104^\circ$) については、気体スラグは以下のように複雑な挙動を示した。

Mishima-Ishii¹¹⁾ と Taitel ら¹²⁾ の流動様式境界線付近の領域では Fig.12 に示すような濡れ性がよい場合と同じ砲弾状の気体スラグが観察された。しかしながら、液体スラグ中の微小な気泡は、気泡流 a と同様に壁への付着離脱を繰り返しながら上昇した。また、 $D=5.0 \times 10^{-3}$ m, 10.0×10^{-3} m の円管では、 j_w を減少させていくと、Fig.13 に示すように



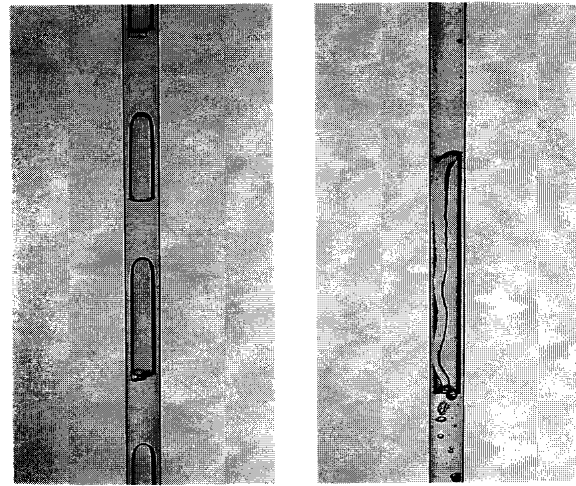
Good

Poor

Bubbly

Bubbly b

Fig. 11. Photographs showing bubbly flow and bubbly flow b ($j_w=0.050$ m/s, $j_g=0.013$ m/s, $D=10.0 \times 10^{-3}$ m).



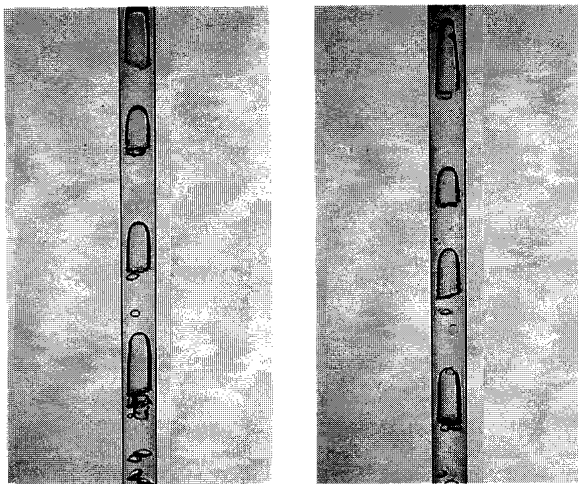
Good

Poor

Slug

Slug a

Fig. 13. Photographs showing slug flow and slug flow a ($j_w=0.050$ m/s, $j_g=0.130$ m/s, $D=10.0 \times 10^{-3}$ m).



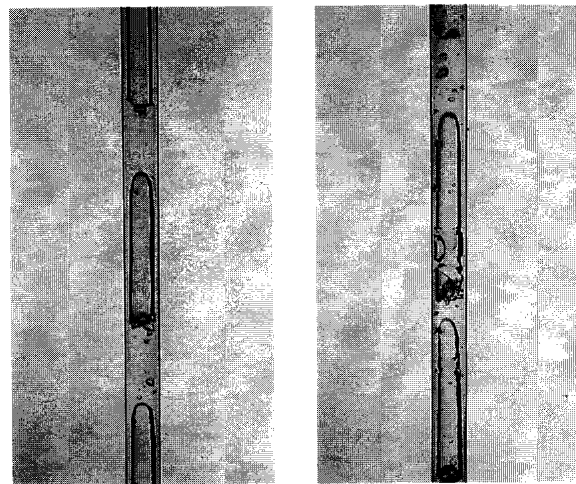
Good

Poor

Slug

Slug b

Fig. 12. Photographs showing slug flow and slug flow b ($j_w=0.400$ m/s, $j_g=0.250$ m/s, $D=10.0 \times 10^{-3}$ m).



Good

Poor

Slug

Slug c

Fig. 14. Photographs showing slug flow and slug flow c ($j_w=0.400$ m/s, $j_g=0.640$ m/s, $D=10.0 \times 10^{-3}$ m).

気泡流bを大きくしたような形状の気泡が壁から離脱し、砲弾状の気体スラグになる様子が観察された。

さらにFig.14に示すように、 j_g が流動様式境界線より大きい領域になると壁に付着した多くの微小な気泡と気体スラグが合体してより大きな気体スラグとなって、壁に付着し、螺旋を描きながら離脱する挙動を繰り返しながら上昇した。この際に気体スラグがちぎれ、再び多くの微細な気泡が生成した。

スラグ流についても気泡流と同様の理由から、気泡流bを大きくしたような気泡が壁から離れ砲弾状の気体スラグ

になる場合をスラグ流a、壁に気体スラグが付着しておらず濡れ性がよい場合と同じ様な砲弾状の気体スラグである場合をスラグ流b、砲弾状の気体スラグが壁との間で付着、離脱を繰り返す場合をスラグ流cと定義する。ただし、いずれの場合も微小な気泡は壁への付着、離脱を繰り返した。

3・4 気泡流a, bおよびスラグ流a, b, cの存在領域

濡れ性が悪い管路について、2種類の気泡流a, bと3種類のスラグ流a, b, cの存在領域をFig.15~17に示す。なお、各流動様式の境界を定めるに際してはFig. 5, 7, 9だけでの

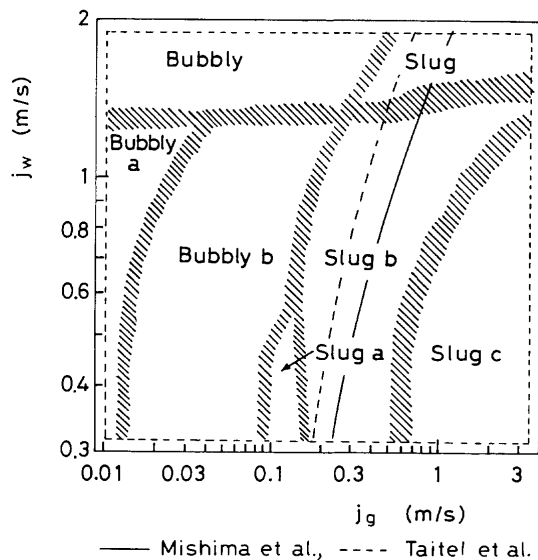


Fig. 15. Flow regimes for pipes of $D=5.0 \times 10^{-3}$ m and $\theta_c=104^\circ$.

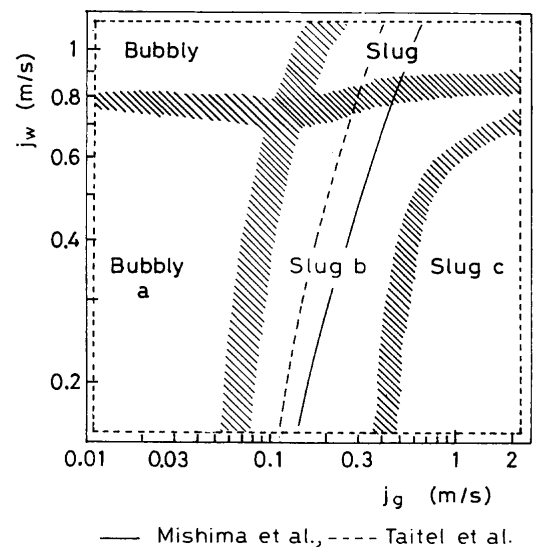


Fig. 17. Flow regimes for pipes of $D=15.0 \times 10^{-3}$ m and $\theta_c=104^\circ$.

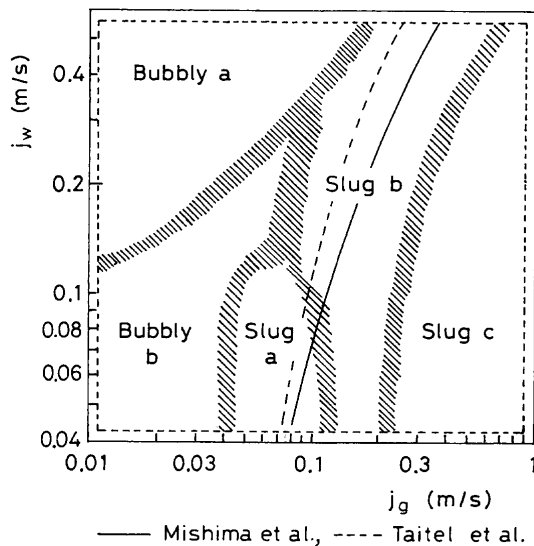


Fig. 16. Flow regimes for pipes of $D=10.0 \times 10^{-3}$ m and $\theta_c=104^\circ$.

く、これらの図に示していない測定結果も参考にした。管路の直径が大きくなるにつれて、各流動様式の存在領域は多少変化しており、当然のことながらこの整理法で充分であるとは言い難い。しかしながら、本実験の範囲では、内径 D が 5.0×10^{-3} m と 15.0×10^{-3} m の管路に対する実験結果から判断するかぎり、 j_w がおおよそ 1 m/s よりも大きい場合、流動様式に濡れ性の影響はほとんど現れないといえる。また濡れ性の悪い場合の気泡流とスラグ流の境界は、単純な右上がり曲線ではないが、濡れ性のよい場合の境界近傍に位置しており、気泡流とスラグ流の境界に対して管路の濡れ性の影響は比較的弱い。

本論文では流動様式の分類に主眼を置いたが、今後、接触角を出きるだけ広範囲に変化させて、データを蓄積したうえで、流動様式を Reynolds 数、Froude 数、Weber 数など

の関数として整理したい。ただし、いまのところ液体と管路の濡れ性を含む適当な無次元数が見当たらないので、この点が今後の重要な課題として残されている。

4. 結論

直径が 5.0×10^{-3} m, 10.0×10^{-3} m, 15.0×10^{-3} m の 3 種類の垂直円管のそれぞれについて、接触角を 36° , 77° , 104° と変化させ、上昇する空気-水系二相流の気泡流からスラグ流までの流動様式を観察した。得られた成果をまとめると以下のようなになる。

(1) 濡れ性がよい管路に属する接触角 θ_c が 36° と 77° の管路内の流動様式は互いによく一致し、従来の濡れ性がよい管路に対する実験結果とも一致した。

(2) 気泡流とスラグ流の境界については濡れ性の影響は弱く、濡れ性のよい管路に対する従来の実験式で比較的良好に予測できた。

(3) 壁の濡れ性が流動様式に与える影響は円管内径が小さく、上昇流による慣性力が表面張力による力に比べて小さい領域で顕著に表れた。すなわち、管直径が小さいほど気泡の管路壁への付着が顕著となり、濡れ性のよい場合とは異なる気泡や気体スラグが観察された。そこで、濡れ性のよい管路内の気泡や気体スラグと区別するため、濡れ性の悪い管路に対して、気泡流を 2 種類 (気泡流 a, b) とスラグ流を 3 種類 (スラグ流 a, b, c) に分類し、それぞれの存在領域を Fig. 15~17 に示した。

(4) 本実験の範囲では、内径 D が 5.0×10^{-3} m と 15.0×10^{-3} m の管路に対する実験結果から判断するかぎり j_w がおおよそ 1 m/s よりも大きい場合、流動様式に濡れ性の影響はほとんど現れなかった。

記 号

- D : 管直径 (m)
 L : 多孔質ノズルからの距離 (m)
 j_g : 空気の空塔速度 $= Q_g / (\pi D^2 / 4)$ (m/s)
 j_w : 水の空塔速度 $= Q_w / (\pi D^2 / 4)$ (m/s)
 Q_g : 空気流量 (m^3/s)
 Q_w : 水流量 (m^3/s)
 θ_c : 接触角 ($^\circ$)

文 献

- 1) K.Akagawa: Gas-Liquid Two-Phase Flow, Corona Publishing Co. Ltd., Tokyo, (1974).
- 2) T.Ueda: Gas-Liquid Two-Phase Flow (Fluid Flow and Heat Transfer), Yokendo, Tokyo, (1981).
- 3) G.Hetsroni: Handbook of Multiphase Systems, McGraw-Hill, New York, (1982), 2-3.
- 4) Handbook of Gas-Liquid Two-Phase Flow Technology, ed. by Jpn. Soc. Mech. Eng., Corona Publishing Co. Ltd., Tokyo, (1989).
- 5) K.Sugita: *Bull. Iron Steel Inst. Jpn.*, **3** (1998), 891.
- 6) A.M.Barajas and R.L.Panton: *Int. J. Multiphase Flow*, **19** (1993), 337.
- 7) K.Mori and M.Sano: *Tetsu-to-Hagané*, **67** (1981), 672.
- 8) W.Zhe, K.Mukai, K.Yamaguchi and J.Lee: *CAMP-ISIJ*, **11** (1998), 24.
- 9) N.Sonoyama, M.Iguchi, Y.Terauchi, M.Takashima, Y.Yokoya and H.Kawabata: *CAMP-ISIJ*, **11** (1998), 200.
- 10) N.Sonoyama, M.Iguchi, Y.Terauchi and S.Hara: *CAMP-ISIJ*, **11** (1998), 753.
- 11) K.Mishima and M.Ishii: *Int. J. Heat Mass Transf.*, **27** (1984), 723.
- 12) Y.Taitel, D.Borner, and A.E.Dukler: *AIChE J.*, **26** (1980), 345.