T字型分岐管の濡れ性の差を利用した気液分離*

Separation of Gas and Liquid using Wettability Difference of T-Junction

井上 努** 井口 学*** 水野 義照**
INOUE Tsutomu IGUCHI Manabu MIZUNO Yoshiteru

Abstract Bubbles never attach to the surface of a solid body of good wettability, while bubble attachment is usually observed when the wettability of the surface of a solid body is poor. This phenomenon was used to separate gas and liquid in gas-liquid two-phase flows in a vertical pipe. Air and water ascending in the vertical pipe was satisfactorily separated by using a T-junction. The dispersed gas phase, i.e., bubbles and slugs, passed preferably through the poorly wetted side of the T-junction. The separation efficiency increased with a decrease in the air flow rate.

Keywords :Gas-Liquid Two-Phase Flow, Wettability, Bubbly Flow, Slug Flow, T-Junction, Separation of Gas and Liquid

1. 緒言

金属精錬プロセスにおいては気泡の発生する反応過程が多く見られる。地上重力下では気泡に働く浮力によって、特に微細な気泡を除き、大部分の気泡は熔融金属表面から離脱し、所定の清浄な製品が得られる。ところが、微小重力下において気泡が発生すれば、浮力による除去はもはや困難であり、別途方策を講じる必要がある。また、宇宙構造物における凝縮器や冷媒循環システムの高効率化のためには気液分離が必要とされる。しかし、この場合にも浮力を利用した気液分離は不可能である。そこで、以下に示すように多くの気液分離法が提案されている。

- (1) 容器に回転を与えて遠心力を発生させ、液体と気泡の密度差を利用して気泡を容器の中心へ集める。[1]
- (2) 超音波を用いて定在波を容器内に発生させ、気泡に働く音圧を利用して気泡を特定の場所に集めて捕集する。[2,3]
- (3) 容器内に温度勾配を与え、気泡に働く表面張力

の差を利用して気泡を移動させる。[4-6]
 (4) 静電氣を利用して気泡を移動させる。[7]
 (5) 電磁氣を利用して気泡を移動させる。[8-10]
 (6) 濡れ性のよいY字型分岐管を用いる。[11-13]
 これらの方法のうち、高温熔融金属中の気泡除去に関しては、現在のところ(2)～(6)の方法の適用は難しく、最も簡便な方法として期待されているのが、(1)の遠心力の利用である。しかしながら、反応容器に回転を与えると、気泡には遠心力(求心力)が働き、気泡は容器の中心へ向かおうとするが、同時に半径方向速度勾配の存在や気泡の回転によって、半径方向外向きに働く力が現れ、気泡は必ずしも容器中心に向かって移動し、除去されるわけではない。

著者らはいままでに、気液二相流の流動特性に及ぼす管路の濡れ性の影響や[14,15]、濡れ性の悪い固体壁に付着する微小気泡の挙動に関して研究を進めてきた[16]。その結果、濡れ性のよい固体壁に気泡は付着しないが、濡れ性が悪くなるにつれて、気泡の固体壁への付着が強くなることが明

* 2000.12.4 受付

** 北海道大学大学院工学研究科学生 〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目
TEL(011)706-6335 FAX(011)706-7810

*** 北海道大学大学院工学研究科物質工学専攻

らかになった。なお、液体と固体との接触角が 90° よりも小さいときを濡れ性が良い、 90° 以上のときを濡れ性が悪いと定義する。この現象に着目すれば、固体壁の濡れ性を変えることによって気泡の除去が可能になると考えられる。

Y字型分岐管は濡れ性がよい場合にも気液分離性能があるといわれている[11-13]。本研究では、まずY字型分岐管よりも分離性能が極端に劣るT字型分岐管[17]を用いて、分岐部分の片側の濡れ性を悪くすることにより、気液二相流における相分離を促すことが可能かどうかを地上重力下で調べた。

2. 実験装置および方法

実験装置の概要をFig. 1に示す。気液二相流中の気相は空気であり、液相は常温の水である。はっ水剤を塗布する前の配管は全て内径10mm、外径16mmの濡れ性の良い透明アクリル管を用いた。接触角は 77° である。ポンプを用いて水を循環させた垂直試験管内に、ノズルから空気を吹き込むことによって気液二相流を形成する。気液二相流は分岐部分へ至って左右に分かれるが、図に示すように左側をa側、右側をb側と名付けた。

まず、水だけを流した状態でa側の水流量 Q_{wai} とb側の水流量 Q_{wbi} が等しくなるように設定した。添字*i*は初期値であり、 $Q_{wai} = Q_{wbi} = Q_{wi}$ と表す。垂直管内の水流量は終始 $2 Q_{wi}$ と一定である。そ

の後、流量 Q_g の空気を垂直管内に吹き込み、上部の水槽内において、a側に流れた空気量 Q_{ga} とb側に流れた空気量 Q_{gb} を捕集器を用いて測定した。したがって Q_g は次のように表される。

$$Q_g = Q_{ga} + Q_{gb} \quad (1)$$

左右の分岐管路は共通のオーバーフロータンクへ接続されており、各管路の出口側の条件が一定になるように配慮されている。しかしながら、このようにしたことによって、各管路を流れる空気流量 Q_{ga} 、 Q_{gb} は測定できるが、水流量 Q_{wa} 、 Q_{wb} は正しく測定することはできない。そのため、今回の研究では左右に流れる空気流量だけに注目し、水流量に関しては言及しないことにする。本研究では、濡れ性の制御によって気液分離が可能であるかどうかに着目したので、気液分離効率の定量的評価は今後の一連の研究に譲りたい。

緒言で述べたように、濡れ性の良し悪しを記述するために用いられる接触角とはFig. 2 (a)の θ のことである。パラフィンとテフロンを平板上に塗布し、その上に水滴を置いたときの写真をそれぞれ、Fig. 2 (b), (c)に示す。接触角はパラフィンを塗布したときは 105° 、テフロン系ははっ水剤を塗布したときは 142° であった。

パラフィンとテフロン系ははっ水剤を分岐部分のアクリル管内側に塗布することにより、濡れ性を変化させた。分岐部分には両側とも濡れ性が良い、右側の濡れ性が悪い、左側の濡れ性が悪い場合の3種類を設定したが、1例をFig. 3に示す。アクリルブロックに孔を開けてそこにアクリル管を通した全く同じものを2つ用意し、それを組み合わせることにより形成した。この方法により、管の片側だけの濡れ性を悪くすることを可能にした。 a_1, b_1 は内径10mm、長さ150mmの濡れ性の良いアクリル管であり、 a_2, b_2 はそれを縦に半分にしたものである。a側の濡れ性を悪くする場合は a_1 にパラフィンを塗布し、 a_2 にテフロン系はっ水剤を塗布した。ここで、パラフィンとテフロン系はっ水剤を使い分けたのは、本来なら、よりはっ水性の高いテフロン系はっ水剤で統一すべきであるが、テフロン系はっ水剤の塗布はスプレーによって行ったために、アクリル管を縦に割った形の a_2, b_2 部には容易に行うことができたが、 a_1, b_1 部には困難であったためにパラフィンをもって代用した。

実験は上記3通りの分岐パターンで、水の初期

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus.

Fig. 2 (a) Definition of contact angle.

Fig. 2 (b) Photograph of water droplet on paraffin coated plate.

Fig. 2 (c) Photograph of water droplet on Teflon coated plate.

Table 1 Experimental condition

Q_g		$3 \sim 120 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{sec}$
Q_{wi}		$8.3, 25, 67 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{sec}$
θ	Teflon coating	142°
	paraffin coating	105°

Fig. 3 Schematic of T-junction.

流量 Q_{wi} と吹きこむ空気流量 Q_g を様々に変えて行った。実験条件をTable 1に示す。また、片側の濡れ性を悪くするのは、本来なら a 側の濡れ性を悪くする実験でよいのだろうが、再現性を確かめるために b 側の濡れ性を悪くする実験も行ったために3通りの分岐パターンになっている。

3. 実験結果

3. 1 気液分離に及ぼす水流量および空気流量の影響

水流量と空気流量が気液分離にどのような影響を与えるのかを調べるために、水の初期流量 Q_{wi} を3段階に変化させ、それぞれの水流量において空気流量を広範囲に変化させた。

3. 1. 1 $Q_{wi}=8.3 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ の場合

Fig. 4に $Q_{wi}=8.3 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ の実験結果を示す。横軸には吹きこんだ空気流量 Q_g を、縦軸には Q_{ga} と $(Q_{ga}+Q_{gb})$ の比をとった。これは縦軸の値が0.5のとき、 a 側に流れる空気量と b 側に流れる空気量が等しいことを示しており、0.5より大きいときは a 側に、0.5より小さいときは b 側により多く空気が流れていることになる。 a 、 b どちら側にも多く空気が流れているかを分かりやすくするためにグラフ左側に $b \leftrightarrow a$ と表示した。

気液二相流は気体流量の増加につれて気泡流、スラグ流、フロス流などと形態を変えていくが、ここでは分岐部前の垂直管路内において気泡流と

Fig. 4 Relationship between $Q_{ga} / (Q_{ga} + Q_{gb})$ and Q_g for $Q_{wi} = 8.3 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$.

スラグ流が現れる範囲に水と空気の流れを設定した。図中の破線は本実験で観察された気泡流とスラグ流の境界を示している。この境界は従来の研究結果ともほぼ一致した[15,18]。両側の濡れ性が良いときは全ての Q_{gl} において、○印で示すように $Q_{ga} / (Q_{ga} + Q_{gb})$ の値はほぼ0.5付近にある。 a 側の濡れ性が悪いときの $Q_{ga} / (Q_{ga} + Q_{gb})$ は0.5より大きく、 b 側の濡れ性が悪いときは0.5より小さい傾向がみられる。しかしながら、全ての Q_g でそうなるわけではなく、吹き込み空気流量の減少とともに顕著になる傾向が見られた。なお、気泡が濡れ性の悪い壁に付着する際の写真が文献(14)に掲載されているので参照されたい。また、半分コーティングした管路についての単相流の速度分布に及ぼす影響の有無については、今のところ、測定結果がないので言及できない。

3. 1. 2 $Q_{wi} = 25 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ の場合

Fig. 5に $Q_{wi} = 25 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ の実験結果を示す。

Fig. 5 Relationship between $Q_{ga} / (Q_{ga} + Q_{gb})$ and Q_g for $Q_{wi} = 25 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$.

Fig. 6 Relationship between $Q_{ga} / (Q_{ga} + Q_{gb})$ and Q_g for $Q_{wi} = 67 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$.

Fig. 4と同様に、横軸にはガス流量 Q_g を、縦軸には $Q_{ga} / (Q_{ga} + Q_{gb})$ をとった。この場合も、両側ともに濡れ性が良いときは全ての Q_{gl} において $Q_{ga} / (Q_{ga} + Q_{gb})$ はほぼ0.5付近にあり、片側の濡れ性が悪いときは濡れ性を悪くした側に多く空気が流れていることがわかる。また、空気流量の減少とともにこの現象が顕著に表れるのは先ほどの結果と同様である。

3. 1. 3 $Q_{wi} = 67 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ の場合

Fig. 6に $Q_{wi} = 67 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ の実験結果を示す。上述の結果とは明らかに異なり、両側の濡れ性が良い場合においてさえも、すべての Q_g で $Q_{ga} / (Q_{ga} + Q_{gb})$ の値は0.5付近にあるわけではなく、 $Q_g = 20 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ においては、 $Q_{ga} / (Q_{ga} + Q_{gb})$ の値は0.3付近にあり、これは Q_{gb} が Q_{ga} に比べて約2倍ほども大きい値であるということを示している。このような結果が得られた原因としては、水の流量 Q_{wi} が比較的大きく、したがって、水の慣性力も大きくなり、わずかな流動条件の相違によって一方の分岐管に空気が流れやすい状況が作られていたためではないかと考えられる。

また、片側の濡れ性を悪くしたときには、 a 側の濡れ性を悪くした場合、両側の濡れ性が良い場合に比べて、 $Q_{ga} / (Q_{ga} + Q_{gb})$ の値は若干大きくなっているが、その差は $Q_{wi} = 8.3 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ および $25 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ のときに比べて顕著なものではない。 b 側の濡れ性を悪くした場合も同様な結果が得られた。

3. 2 濡れ性を悪くした分岐前垂直管路の長さの影響

垂直管と分岐管の片側の濡れ性を悪くすることにより、気液分離が可能であることが以上の実験結果から分かった。そこでつぎに、垂直管内の濡れ性を悪くした長さが気液分離に与える影響を調

Fig. 7 Schematic of T-junction with short Teflon coating.

Fig. 8 Relationship between $Q_{ga} / (Q_{ga} + Q_{gb})$ and Q_g for $Q_{wi} = 8.3 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ in T-junction with short Teflon coating. (The solid lines denote the result shown in Fig. 4)

べるために、分岐前の濡れ性の悪い箇所をFig. 7のように変化させた。

これまでは、 a_2 部には濡れ性を悪くする際に150mmのテフロンコーティングを施したが、それを約3分の1の55mmにした。Fig. 8はそのときの結果を示したものである。水流量 Q_{wi} は $8.3 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ とした。比較のために150mmのテフロンコーティングを施したときの結果(Fig. 4)を実線で示した。二つの結果を比較すると、55mmのテフロンコーティングでは150mmのときに比べて明らかに分離性能が劣っているのが分かる。このことから、濡れ性の違いによる気液分離は分岐前の管路

の濡れ性を変えた部分の長さに強く依存するといえる。

3. 3 分岐管の濡れ性の影響

上述の実験においては、 a 側の濡れ性を変えるときは a_1 部にパラフィンコーティングし、 a_2 部にはテフロンコーティングをするという要領で濡れ性を変化させたが、そのどちらが、気液分離に大きく寄与しているのかを調べるために a 側の濡れ性を変えるときは、 a_2 部にテフロンコーティングをし、 a_1 部にはコーティングを施さずに実験を行った。そのときの分岐部分はFig. 9のようになる。

実験結果をFig. 10に示す。 Q_{wi} は $8.3 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ であり、実線で a_1 部、 a_2 部ともにコーティングを施したときの結果(Fig. 4)を示した。二つの結果を

Fig. 9 Schematic of T-junction with bifurcated pipes of good wettability.

Fig. 10 Relationship between $Q_{ga} / (Q_{ga} + Q_{gb})$ and Q_g for $Q_{wi} = 8.3 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ in T-junction with bifurcated pipes of good wettability. (The solid lines denote the result shown in Fig. 4)

比較すると、 a_2 部だけにコーティングを施したときは、 a_1 部、 a_2 部ともにコーティングをしたときに比べて、多少劣るが、十分な気液分離の効果がある。したがって、 a_1 部にパラフィンコーティングを行わなくても、 a_2 部にテフロンコーティングをするだけで十分な気液分離が可能である。ただし、パラフィンとテフロン系は水剤とは接触角が異なるので、詳細は今後の研究に譲りたい。

4. 考 察

濡れ性を利用した気液分離の効果は水の流量がある臨界値を超えるとなくなり、また、濡れ性を変えた分岐前の垂直管内の長さにも強く依存することが分かった。このことから、濡れ性を利用した気液分離は水の慣性力と垂直管内壁の濡れ性による気泡の壁への付着力の大小関係によりその効果が決まってくるのではないかと考えられる。すなわち、水の慣性力が小さく、気泡の壁への付着力が大きいほど濡れ性による気液分離が顕著になる。このことから、濡れ性による気液分離の効果を最大限に発揮するためには、垂直管内の流動様式が気泡流の領域に来るようにし、しかも垂直管内の濡れ性を悪くした部分の長さを大きくすればよいということになる。

空気流量の減少にともない気液分離効率が上がる現象は以下のように説明できる。空気流量が十分に小さいときは、気液二相流は気泡流の状態であり、気泡径が管路の直径よりも小さくなる。そのため、気泡は濡れ性の悪い側の壁に付着しながら上昇することが可能である。しかしながら、空気流量が大きくなると気液二相流はスラグ流の状態になる。スラグ流領域においては、スラグの直径は管路の径とほぼ等しくなり、長さは管径に比べて何倍にもなるため、スラグは濡れ性の悪い壁側のみを上昇することができなくなる。したがって、このような場合には気液分離効率は悪くなる。

今回の実験では、気液分離に及ぼす幾つかのパラメーターの影響を定性的に明らかにしたが、今後は分岐管の形状寸法を変えるとともに接触角も変化させて実験的検討を行い、気液分離効率の最もよい条件を探りたい。

5. 結 論

分岐前の垂直管路ならびに分岐後の管路の濡れ性を変えることにより、気液分離の可能性を調べた。得られた主な成果は以下のとおりである。

- (1) 垂直管と分岐管の片側の濡れ性をよくし、片側を悪くすることによって、気液分離を行うことが可能であり、今回の測定範囲においては、濡れ性の悪い側に、よい側の最大2倍以上の空気が流れた。
- (2) 水流量が臨界値を超えると、濡れ性の違いを利用した気液分離の効果は期待できない。
- (3) 吹き込み空気流量の減少にともない気液分離の効果は顕著に表れた。
- (4) 分岐前の垂直管内に塗布したテフロン系は水剤の長さを短くすると、気液分離効果は小さくなった。すなわち、濡れ性の違いによる気液分離の効果は分岐前の管路の濡れ性を変えた長さに強く依存する。
- (5) 分岐後の管路の a_1, b_1 部にパラフィンコーティングをせず、分岐前の垂直管内の a_2 部にテフロンコーティングを施すだけでも濡れ性の悪い側により側に比べて最大2倍ほどの空気が流れており、気液分離は効率よく行われた。

参考文献

- [1] 今井良二、矢野歳和、機構論、63-611(1999), pp.2296-2302.
- [2] 上村ほか2名：日本マイクログラビティ応用学会誌、10-4(1993), pp.129.
- [3] 望月修、第5回短時間無重力利用に関する講演会講演集、(1996), pp.27-30.
- [4] 宮崎芳郎、微小重力環境利用高度高温流体技術開発、NEDO-ITK-9507(1996), pp.159-172.
- [5] 日本マイクログラビティ応用学会、宇宙実験最前線、ブルーバックス B-1135(1996), 219.
- [6] 東ほか2名：第27回宇宙科学技術連合講演会講演集、(1983), pp.182-183.
- [7] 今井良二、矢野歳和、機構論、No.930-9(1993), pp.388-390; 日本機械学会論文集B編、60(1994), pp.3979-3986.
- [8] 奥沢努、小島吉夫、坪内邦良、高木勇輔、浜野亘男、日本機械学会論文集C編、58(1992), pp.3543-3548.
- [9] 若山信子、微小重力環境利用高度高温流体技術開発、NEDO-ITK-9507(1996), pp.99-112.
- [10] 奥沢ほか5名、第7回宇宙利用シンポジウム講演論文集(1990), 367-372.
- [11] R. T. Lahey, Jr., Nuclear Engineering and Design 95(1986) 145-161.
- [12] B. J. Azzopardi, A. Purvis and, A. H. Govan,

- Int. J. Multiphase Flow, 13-5(1987), pp. 605-614.
- [13] 浅野仁, 藤井照重, 竹中信幸, 荒川哲矢, 混相流シンポジウム'99講演論文集(1999), pp. 91-92.
- [14] 寺内幸生, 井口学, 小坂博昭, 横谷真一郎, 原茂太, 鉄と鋼, 85-9(1999) pp. 7-13.
- [15] M. Iguchi and Y. Terauchi, Int. J. Multiphase Flow, 27(2001), pp. 729-735.
- [16] 水野義照, 清水知之, 園山希, 井口学, 混相流, 14-2(2000), pp. 166-175.
- [17] T. Stacey, B. J. Azzopardi and G. Conte, Int. J. Multiphase Flow, 26(2000), pp. 845-856.
- [18] 日本機械学会編, 気液二相流技術ハンドブック, (1989), コロナ社, 東京, p. 17.
-