濡れ性を利用した水平 Y 字型分岐管による気液分離*

水 野 義 照^{*1}, 井 口 学^{*2}Separation of Gas and Liquid Based on Wettability Difference
of a Horizontally Placed Y-junctionYoshiteru MIZUNO^{*3} and Manabu IGUCHI^{*3} Product Development Planning Div., SYSMEX CORPORATION,
4-4-4 Takatsukadai, Nishi-ku, Kobe-shi, Hyogo, 651-2271 Japan

A horizontally placed Y-junction was used to separate gas and liquid in gas-liquid two-phase flows in a pipe of circular cross section. The original wettability of the Y-junction was good because it was made of acrylic resin. The wettability of one side of the Y-junction was changed to become poor by coating fluororesin. The motions of bubbles and slugs were observed with a high-speed video camera. The bubbles attached preferably to the wall of poor wettability, and accordingly, the separation of gas and liquid was satisfactorily achieved. The efficiency of the separation decreased as the air flow rate increased and it became zero when the gas flow rate exceeded a certain critical value.

Key Words: Pipe Flow, Bubble Removal, Flow Visualization, Flow Control, Bubble, Y-junction

1. 緒 論

気液分離は、材料プロセスや宇宙における気液二相流の輸送システム⁽¹⁾⁽²⁾において重要な問題である。とくに、微小重力下における気液二相流の輸送システムでは気泡に働く浮力は期待できず、別途方策を講じる必要がある。これまでに、気液分離の手段として、遠心力⁽³⁾、超音波⁽⁴⁾、表面張力の差⁽⁵⁾、静電気力⁽⁶⁾、電磁力⁽⁷⁾⁽⁸⁾などを利用した方法が報告されているが、その分離効率は高いとは言えない。また古くより、濡れ性の良い分岐管を用い、気体と液体との慣性力の差を利用して気液を分離する方法⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾が考案されているが、高い分離効率を得るためには、各分岐管内の質量流量を調整する必要があり、簡便性に乏しい。著者らは、これまでに、固体への気泡の付着における固体の濡れ性の影響⁽¹¹⁾⁽¹²⁾について、あるいは、内壁の濡れ性が悪い鉛直管内を流れる気液二相流における気泡の挙動⁽¹³⁾について調べてきた。それらの総合的な知見から、固体の濡れ性を利用した種々の気液分離操作の可能性を見出し、内壁の濡れ性が悪い鉛直管内にお

る気泡の挙動にヒントを得て、本手法の分岐管への適用を思い立った。⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾そこで、まず基礎的検討として地上重力下での気液分離性能を評価した。

一般に固体の濡れ性(wettability)が良いとは、液体が固体表面と大きな界面を形成して広がる場合を言い、濡れ性が悪いとは、液体が固体と界面を形成しにくく、球状になろうとし、むしろ気体が固体と界面を形成しようとする場合を言う。通常、濡れ性の程度は気体中で固体と液体が形成する接触角 θ_c で評価される。すなわち、 θ_c が 0° から 90° 未満のとき、濡れ性が良い、

Fig. 1 Definition of contact angle

 θ_c : Contact angle (deg.)

* 原稿受付 2002年2月12日。

^{*1} 正員, シスメックス㈱(☎651-2271 神戸市西区高塚台4-4-4)。^{*2} 正員, 北海道大学大学院工学研究科(☎060-8628 札幌市北区北13条西8)。

E-mail: Yoshiteru_Mizuno@sysmex.co.jp

90° から 180° 以下のとき、濡れ性が悪いと定義される。図 1 にその定義図を示す。すなわち、気液二相流が濡れ性の悪い固体壁と境界を持って流れる場合、上記の理由により気泡は固体表面と付着しやすくなる。本研究はこの気泡付着を分岐管による気液分離に応用した。本方式の利点は、外部から電気力、超音波力等のパワーを加える必要がないこと、流路が単純であること、また分岐後の各枝管の流量比制御が不要であることが挙げられる。何よりも本方式の気液分離効果は流路部材の物性に依存するものであるため、複雑な機械を必要とせず、容易に他の方式と組み合わせることができる点にある。前報では地上重力下で、内面の濡れ性に差を持たせた鉛直 T 字型、および Y 字型分岐管による気液分離の可能性を評価し、可能であることを示した⁽⁴⁾⁽⁵⁾。しかしながら、完全な相分離は実現できなかった。そこで今回は、従来の分岐管の研究^{(3)~(6)}に習い、Y 字型分岐管を水平に配した。その結果、地上重力下の所定の流量条件下で、100%の気液分離能力が得られたので報告する。

2. おもな記号

θ_c : 接触角 [deg]
 Q_g : 全吹き込み空気流量 [m³/s]
 Q_{wi} : a 側, b 側へ流れる水の初期流量 [m³/s]
 Q_{na} : a 側へ流れる水の流量 [m³/s]
 Q_{nb} : b 側へ流れる水の流量 [m³/s]
 Q_{gi} : a 側へ流れる空気流量 [m³/s]
 Q_{gb} : b 側へ流れる空気流量 [m³/s]

3. 実験装置および実験方法

図 2 に今回用いた Y 字型分岐管の概略図を示す。分岐管は透明アクリルブロックで製作した内径 10mm の円形断面を持ち、分岐角は 45° である。この分岐管は図 2 の鉛直中心線を境界として *a* 側、*b* 側の二つに分割できる。ここで、*a*、*b* は分岐後の流れ方向を表す。分岐管内面の濡れ性は分割した状態で *a* 側ある

Fig.2 Detailed structure of Y-junction

いは**b**側の内面へテフロン系撥水剤をコーティングすることにより制御した。撥水剤のコーティング範囲は鎖線で示した約 100mm の部分とした。アクリルブロックの水に対する接触角は 77° 、テフロン系撥水剤をコーティングした面の接触角は 142° であった。

図 3 に実験装置の概略図を示す。ポンプからの水はボールバルブによって流量制御され、内径 10mm の透明アクリル製パイプ（以降、水平パイプという。）へ供給される。Y 字型分岐管はこの水平パイプの端に接続した。水の汚れによる撥水処理面の濡れ性劣化を防ぐために、特に油分が溶出しないポンプを採用した。コンプレッサからの空気をエアフィルタで清浄化し、質量流量計で空気流量 Q_a を調整したのち水平パイプ内へ導いた。これにより、水平パイプ内に水-空気系気液二相流を生成させた。空気を吹き込む前に、いずれの実験においても、 a 側、 b 側へ流れる水の初期流量が Q_{wi} となるように設定した。分岐後 a 側、 b 側へ流れる空気の流量 Q_{ga} 、 Q_{gb} および水の流量 Q_{wa} 、 Q_{wb} は、装置上部の水槽で捕集した空気、水をそれぞれビーカーおよび電子天秤を用いて測定した。分岐管内および分岐管から 170mm 上流における水平パイプ内の気泡の挙動を高速度ビデオカメラを用いて観察した。実験条件を表 1 に示す。

Fig. 3 Schematic of the experimental apparatus

Table 1 Experimental conditions

Air flow rate : Q_g	$0.75 \sim 80 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$
Initial water flow rate : Q_{wi}	$8.3, 25.0, 67.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$

4. 実験結果と考察

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、前報の結果を参考にして、 Q_w の初期流量 Q_w を 3 段階に変化させた。これらの水流量は、水の流れがもつ慣性力がほぼ同じ比率で大きくなるようにしているが、便宜上、低液流量領域、中間液流量領域および高液流量領域と呼ぶことにする。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。

4.1 低液流量領域 ($Q_w=8.3 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$)

図 4 に水の初期流量が $8.3 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ における空気流量比および水流量比の実験結果を示す。横軸には全空気流量 Q_g を、縦軸には Q_{ga} と $(Q_{ga}+Q_{gb})$ の比、および Q_{wa} と $(Q_{wa}+Q_{wb})$ の比をとった。分岐管の両枝管に流れる流量が等しいとき、これらの比の値は 0.5 となる、すなわち、分離効率（ここでは、 $|Q_{ga}-Q_{gb}|/Q_g$ と定義する。）は 0 である。図中白抜きの記号は空気流量比、黒色の記号は水流量比のデータを表す。

a 側と b 側の濡れ性がともに良いときの空気の流れは、 Q_g が約 $10.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ より小さい条件では a 側へ多くなり、分岐管の両枝への均等な流れは得られなかった。この現象は鉛直に配した Y 字型分岐管では見られなかった。主な原因として、以下のことが考えられる。比較的小さい径の気泡を含む気液二相流が鉛直上向きに流れる場合は、気泡は液体中を分散しながら上昇するため、分岐点での気液二相流の気泡分布はほぼ均一となる。したがって、流れは Y 字型分岐管特有の鋭いエッジ部でほぼ均等に分けられる。一方、気液二

Fig.4 Gas flow rate ratio and water flow rate ratio for $Q_w=8.3 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$

- Air, a,b: good wettability
- △ Air, a: poor wettability
- Air, b: poor wettability
- Water, a,b: good wettability
- ▲ Water, a: poor wettability
- Water, b: poor wettability

相流が水平に流れる場合は、気泡は浮力により鉛直上向きに移動するため、円形断面をもつ管内の流動様式はプラグ流、あるいは層状流となる。よって、分岐点における気泡は、流路断面の鉛直上側へ偏っている。すなわち、鋭いエッジの最上部のみで流れ方向が左右されることになり、このような現象は分岐部の加工精度（対称性の有無）や圧力変動等に大きく影響されると考えられる。これらの理由により、 a 側、 b 側への均等な流れが得られなかったものと推察される。

分岐管の a 側、 b 側のどちらかの濡れ性が悪い場合は、 Q_g が約 $3.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ より小さい条件では、ほぼ全空気が濡れ性の悪い側へ流れた。 Q_g が $5.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ より大きくなると、 $Q_{ga}/(Q_{ga}+Q_{gb})$ の値は、 Q_g の増加に伴って 0.5 に近付くが、0.5 になることはなかった。すなわち、 Q_g の広い領域にわたり、気液分離効果が得られ、 Q_g の低い領域においてはほぼ完全分離が可能と言える。

Q_g の低い領域における気液分離のメカニズムは以下のとおりである。分岐点手前の気泡は、円形断面流路の上層、かつ濡れ性の悪い側を壁に付着しながら流れ、濡れ性が悪い側の枝管へ流れ込む。濡れ性が悪い側の枝管の内部には、空気溜まりが生成しており、気泡が空気溜まりに吸収される現象も見られた。このため分離能力が高められたものと考えられる。一方、 Q_g が $5.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ より大きくなると、気泡の寸法が大きくなることにより、気泡が濡れ性の悪い側の壁部だけでは収まらなくなる。よって、気泡は濡れ性の良い側へはみ出た部分を分岐管のエッジにより分断され、濡れ性の良い側へ流れ込む。 Q_g の増加に伴い、この現象は顕著となり、分離効率が低下する。

図 5(a)~(c)は、異なる 3 種類の全空気流量 Q_g 、すなわち $0.75 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $5.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ および $20.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ における、観察域内を流れる気泡およびスラグのビデオ画像である。左の縦列は分岐管の 170mm 上流の水平パイプ内における気泡およびスラグを示す。図 5(a)、(b)の流動様式はプラグ流であり、図 5(c)はスラグ流である。したがって、本気液分離法はスラグ流領域には適用できない。

図 5 の中央の縦列は、分岐管の左側の濡れ性が悪い場合の気泡およびスラグの挙動を示す。一方、図 5 の右の縦列は同様に分岐管の右側の濡れ性が悪い場合の挙動を示している。図 5(a)、すなわち図 5 の上段の横列から、気泡はすべて分岐管の濡れ性が悪い側に沿って流れ、濡れ性が悪い側の枝管へ流入していることがわかる。

図 5(b)は、気泡の一部が初めて濡れ性が良い側へ流入する際の様子を示している。この時点で完全分離はできなくなる。図 5(c)においては、流れ場が分岐管の

Fig. 5 Behavior of bubbles in the Y-junction whose one side is poorly wetted
for $Q_m = 8.3 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$

中心軸に関してほぼ対称な形をなしており、このような場合には空気流量比は 0.5 に近くなる。したがって、 Q_g が $20.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ のとき、気液分離はほとんど期待できない。画像は添付していないが、さらに Q_g が大きくなると、周期的に配管中で空気の吹き抜けが発生

する。吹き抜け現象は、気相が多く流動抵抗の小さい配管、すなわち濡れ性が悪い側の配管内で早く発生する。したがって、分離効率 Q_g の増加に伴い再び向上する。このような現象は本実験装置における分岐管と装置上部水槽の水面との間に 1.1m の水頭差があ

るため、 a 、 b 両枝管のボイド率に差が生じた場合、両枝管内の圧力バランスが崩れることに起因するものと考えられる。特にボイド率が高い、すなわち水流量が小さい本実験条件下において顕著に現れたものと考えられる。ここで示した吹き抜けが起きる場合よりも空気流量の小さい領域では、 a 、 b 両枝管内のボイド率は低く、水の流れがほぼ定常的であることから、実験精度に問題ないと判断した。このことは、 a 側の濡れ性が悪い場合と b 側の濡れ性が悪い場合の空気流量比データを表す Δ と $\square$ のプロットが、グラフ上で空気流量比=0.5 の水平線に対してほぼ対称な位置関係を示し、再現性が良いことから推測される。

4.2 中間液流量領域 ($Q_{wi}=25.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$)

図 6 に水の初期流量が $25.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ における空気流量比および水流量比の実験結果を示す。全空気流量 Q_g に依存した分離効率の変化の傾向は、 $Q_{wi}=8.3 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ の場合と同様であった。 Q_g が約 $3.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ より小さい条件では、ほぼすべての空気が濡れ性の悪い側へ流れた。 Q_g が大きくなるにつれて、分離効率はほぼ 0 に近付くが、 Q_g の広い範囲にわたり濡れ性の効果が見られる。

a 側と b 側の濡れ性が等しい場合に前節 4.1 の低液流量領域で見られた空気流量に関する非均一性は、本初期水流量においても、 Q_g が約 $5.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 以下の条件で現れた。

Fig.6 Gas flow rate ratio and water flow rate ratio for $Q_{wi}=25.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$

- Air, a, b : good wettability
- △ Air, a : poor wettability
- Air, b : poor wettability
- Water, a, b : good wettability
- ▲ Water, a : poor wettability
- Water, b : poor wettability

4.3 高液流量領域 ($Q_{wi}=67.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$)

図 7 には水の初期流量が $67.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ における空気流量比および水流量比の実験結果を示す。Y 字型分岐管を鉛直に配したときと同様に、考慮したすべての空気流量範囲にわたり、分岐管の濡れ性は気液分離に対して効果をもたない。水の流れに伴う大きな慣性力によって、流れ場は分岐管の中心軸に対してほぼ対称な形となり、濡れ性の差を利用した気液分離は期待できない。この場合のフローパターンは前報⁽⁴⁾に示したものと基本的に異なることはないので、省略した。

Fig.7 Gas flow rate ratio and water flow rate ratio for $Q_{wi}=67.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$

- Air, a, b : good wettability
- △ Air, a : poor wettability
- Air, b : poor wettability
- Water, a, b : good wettability
- ▲ Water, a : poor wettability
- Water, b : poor wettability

Fig.8 Separation efficiency

- $Q_{wi}=8.3 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, a : poor wettability
- $Q_{wi}=8.3 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, b : poor wettability
- ▲ $Q_{wi}=25.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, a : poor wettability
- △ $Q_{wi}=25.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, b : poor wettability
- $Q_{wi}=67.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, a : poor wettability
- $Q_{wi}=67.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, b : poor wettability

4.4 気液分離効率

最後に、今回の評価から得られた気液分離効率、すなわち、 $|Q_g - Q_{g0}| / Q_g$ を空気流量 Q_g に対してまとめた結果を図 8 に示す。水の初期流量 Q_{w0} が $25.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 以下、かつ Q_g が約 $3.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ より小さい条件においてはほぼ完全な気液分離が可能となる。 Q_g が $5.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ より増大するにつれて分離効率は低下する傾向が見られた。

5. 結 言

円形断面をもつ水平パイプ内を流れる気液二相流における気液分離は、内部壁面に濡れ性の差を持たせた Y 字型分岐管を用いることにより可能となった。気液分離性能は、以下のとおりである。

- (1) 気液分離性能を濡れ性の悪い枝側へ流れる空気流量比で評価すると、液体の慣性力が弱い所定の流動様式（本実験の場合はプラグ流と層状流）において、これまでの鉛直に配した分岐管では得られなかったほぼ 100% の分離が可能である。
- (2) このような高い分離効率は、濡れ性の差を有する水平 Y 字型分岐管内を流れる気液二相流が、気泡に働く浮力によりプラグ流あるいは層状流となることに起因する。すなわち、固体の濡れ性の悪さを利用する本分離法では、気泡が分散せず、集合した形態で固体表面に接触する必要がある。なお、著者らが JAMIC（北海道上砂川地下無重力実験センター）で行った実験によれば、気泡を濡れ性の悪い固体表面へ接触させることは比較的容易であり、したがって本気液分離法の微小重力環境下における適用の可能性も高いと考えられる。

6. 参考文献

- 1) Jpn. Soc. Prom. Sci., 19th Committee: Recent Development in Studies of Non-metallic Inclusions in Steel, (1994).
- 2) R. Imai and T. Yano: *Trans. JSME, (B)*, **63**-611(1997), 2296.
- 3) H. Shakutsui, K. Watanabe, H. Onari, T. Saga and H. Kadowaki: *Proc. of 4th JSME-KSME Thermal Engineering Conference*, October 1-6, kobe, Japan, **3**(2000), 69.
- 4) H. Kamimura, S. Yoshihara and H. Azuma: *J. Jpn. Soc. Microgravity Application*, **10**-4(1993), 129.
- 5) O. Mochizuki: *Proc. 5th Symposium on Short Period Microgravity Application*, (1996), 27.
- 6) Y. Miyazaki: Development of High Temperature Fluid Flow Technologies in Microgravity, NEDO-ITK-9507(1996), 159.
- 7) Jpn. Soc. Microgravity Application, *Frontiers in Experiments in Space*, B-1135(1996), 219.
- 8) H. Azuma et al.: *Proc. 27th Symposium on Science and Technology in Space*, (1983), 182.
- 9) R. Imai and T. Yano: *Preprint of Jpn. Soc. Mech. Eng.*, No.930-9(1993), 388; *Trans. JSME, (B)*, **60**(1994), 3979.
- 10) T. Okuzawa, Y. Kojima, K. Tsubouchi, Y. Takagi and T. Hamano: *Trans. JSME, (C)*, **58**(1992), 3543.
- 11) N. Wakayama: Development of High Temperature Fluid Flow Technologies in Microgravity, NEDO-ITK-9507(1996), 99.
- 12) T. Okuzawa et al.: *Proc. 7th Symposium on Microgravity Application*, (1990), 367.
- 13) R. T. Lahey, Jr.: *Nuclear Engineering and Design*, **95**(1986), 145.
- 14) B. J. Azzopardi, A. Purvis and A. H. Govan: *Int. J. Multiphase Flow*, **13**-5(1987), 605.
- 15) H. Asano, T. Fujikawa, N. Takenaka and T. Arakawa: *Proc. of 18th Multiphase Flow Symposium '99* (1999), 91.
- 16) Y. Mizuno, T. Shimizu, N. Sonoyama and M. Iguchi: *Jpn. J. Multiphase Flow*, **14**(2000), 166.
- 17) Y. Mizuno and M. Iguchi: *ISIJ Int.*, **41** Suppl.(2001), S56.
- 18) Y. Terauchi, M. Iguchi, H. Kosaka, S. Yokoya and S. Hara: *Tetsu-to-Hagane*, **85**(1999), 645.
- 19) M. Iguchi and Y. Terauchi: *Int. J. Multiphase Flow*, **27**(2001), 729.
- 20) T. Inoue, M. Iguchi and Y. Mizuno: *Proc. 1st Jpn. Soc. Multiphase Flow Conference*, (2000), 241.
- 21) Y. Mizuno, T. Inoue and M. Iguchi: *Proc. of PSFVIP, March 18-21, (2001), Maui, Hawaii*, F3486.
- 22) M. Iguchi and Y. Terauchi: *Int. J. Multiphase Flow*, **27**(2001), 2189.