

垂直円管内気液上昇流の流動様式と気体部の上昇速度に及ぼす濡れ性の影響

福士 恵介*・井口 学*

The Effects of Wettability on the Flow Pattern and Rising Gas Velocity of Gas-Liquid Two-phase Flow in Vertical Pipe

Keisuke FUKUSHI and Manabu IGUCHI

Synopsis : In the steelmaking processes the wall material is chosen to be poorly wetted by molten steel to prevent contamination of the molten steel. Information on gas-liquid two-phase flows in a poorly wetted pipe however is very limited. In this water model study the flow pattern, the rising velocities of slugs and bubbles, and liquid flow near the outlet of the pipe were experimentally investigated. The shape and size of bubbles and slugs were affected by the wettability, but the boundary between the slug flow and bubbly flow regimes was not sensitive to the wettability. The rising velocities of bubbles and slugs became higher in the poorly wetted pipe than in the wetted pipe for a low water flow rate. At the outlet of the poorly wetted pipe, periodic generation of small bubbles was observed. The liquid flow near the outlet was measured with particle image velocimetry (PIV). The poorly wetted pipe promoted the horizontal spread of the liquid flow issuing from it.

Key words: wettability; flow pattern; slug; bubble; rising velocity; jet.

1. 緒言

管内の気液二相流については、数多くの研究事例が報告されてきたが、その大部分は濡れ性の良い管内におけるものであった¹⁻⁷⁾。鉄鋼精錬プロセスでも、溶鋼と各種ガスからなる気液二相流が多く配管でみられるが、耐火物による溶鋼への汚染を防ぐために、管壁の濡れ性を悪くし溶鋼を管壁に付着しにくくしている、したがって従来の濡れ性の良い管路に関する結果がそのまま適用できるのかどうか明らかでない。濡れ性の悪い管内での気液二相流に関しては、これまで流動様式についての知見は得られているが⁸⁻¹⁵⁾、それ以外の特性に対する研究はあまり行われていないのが現状である⁸⁾。そこで本研究では、以前よりも濡れ性を悪くしたときの流動様式の調査に加え、管内における気体部の上昇速度および管から出てきた流れの挙動を、水モデルを用いて調査した。

鉄鋼精錬プロセスにおける流動は浸漬ノズルに代表されるように、下降流が主となっている。しかし下降流では気泡の浮力と水の慣性力の向きが逆なので、それらの力のバランスによって気泡が停止したり、上昇したり、下降したりといった様々な挙動が考えられ、気泡の挙動が複雑になる。そこで実機でよく見られる下降流とは逆向きではあるが、気泡に働く浮力と水の慣性力の向きが等しく、気泡の挙動が調査しやすい上昇流を対象とした。

2. 実験方法

実験装置の概要を Fig. 1 に示す。液相には常温の水、気相には空気を用いた。管路は内径 D が 1.0, 1.5, 1.9 cm、長さ L が 1 m の透明アクリル樹脂製円管である。実験方法は前報¹⁵⁾の傾斜管の場合とよく似ているが、再度詳しく述べる。

- (1) ポンプから水を供給し、その流量 Q_w をボールバルブにより制御し、垂直アクリルパイプに供給した。
- (2) コンプレッサーから供給された空気を、エアフィルターを用いて清浄化し、マスフローコントローラーで空気流量 Q_g を調整した後、垂直アクリルパイプに供給

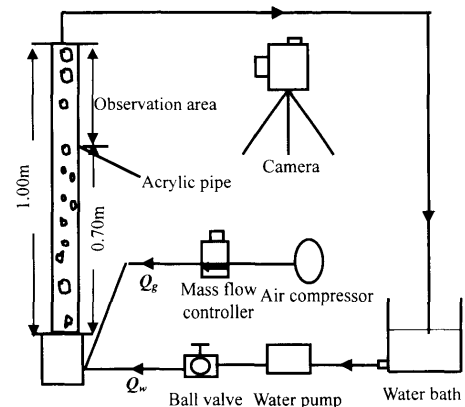


Fig. 1. Experimental apparatus.

した。これによって、管内に上昇水-空気系二相流を発生させた。

(3) アクリルパイプの下端から0.7mまでの部分を助走区間とみなし、それよりも上の部分の0.3mを観測域として、気泡の挙動をデジタルカメラおよびハイスピードビデオカメラで撮影した。また、ハイスピードビデオカメラによって録画した画像を用いて、気泡 (Bubble) やスラグ (Slug) の上昇速度を求めた。なお、本実験では流動状態に着目し、助走距離を0.7mと判断した。また、長さ1m以上の管は、スプレー状のフッ素系撥水剤を塗布するのに困難が生じるので、過去に本研究室で行われた研究と同様に¹⁵⁾測定部長さは0.3mとした。

(4) 濡れ性を変化させるために、 $D=1.0, 1.5$ cmのアクリルパイプに、フッ素系撥水剤を塗布した。これに、何も塗布しないものを含め、全部で2条件の濡れ性で実験を行った。なお、フッ素系撥水剤はアクリルパイプの片側からスプレーで吹き込み、反対側から吸引することで、均一に塗布した。光学顕微鏡にて観察したところ、フッ素系撥水剤を塗布した管の膜の厚さはおよそ80~100 μ mとなっている。したがって、内径が1.0, 1.5 cmといった管内の流れには、膜の厚さは影響を及ぼさないとみなすことができる。塗布直後のパイプと20分使用した後のパイプの濡れ性に変化が見られないことを接触角に基づいて確認し、流動様式にも変化がないことを確認した。

何も塗布しない濡れ性の良い管には $D=1.0, 1.5, 1.9$ cmのものを用いた。空気流量 Q_g は1.00~80.0 cm^3/s 、水流量 Q_w は10.0~100 cm^3/s の範囲内で測定した。結果を整理する際には空塔速度 j_g, j_w を用いた。空塔速度とは流量 Q_g, Q_w を管の断面積で除したもので、管内における流体の見かけの速度を表す。この定義を下の式(1), (2)に示す。

$$j_g = 4Q_g / (\pi D^2) \dots\dots\dots (1)$$

$$j_w = 4Q_w / (\pi D^2) \dots\dots\dots (2)$$

室温が25 $^{\circ}\text{C}$ 、水温が20 $^{\circ}\text{C}$ なので、空気の動粘度 ν_g は15.6 mm^2/s 、水の動粘度 ν_w は1.00 mm^2/s となる。水の密度 ρ_w は998 kg/m^3 、空気の密度 ρ_g は1.18 kg/m^3 である。濡れ性は前述のように接触角 θ_c で評価することができる。Fig. 2に示すように $\theta_c \geq 90^{\circ}$ のときは濡れ性が悪い、 $\theta_c < 90^{\circ}$ のときは濡れ性が良いと定義する。濡れ性が悪いときは、水をはじくため固体の表面には空気が付着しやすくなる。また、濡れ性が良いときは水が付着しやすくなり、空気が付着しづらくなる。何も塗布しない濡れ性の良い管、フッ素系撥水剤を塗布した管の水滴との接触角 θ_c はそれぞれ77 $^{\circ}$ 、142 $^{\circ}$ となった。この接触角142 $^{\circ}$ は、前の実験⁹⁾で用いた濡れ性の悪い管路の接触角104 $^{\circ}$ に比べて非常に大きくなっている。

なお、本実験は直径の小さな円管を用いているため内壁に撥水剤を塗布して半透明になった状態で動的接触角を測

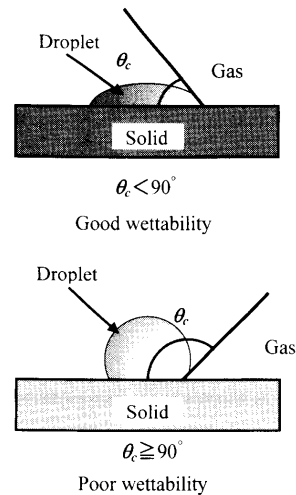


Fig. 2. Definition of contact angle.

定するのは困難である。そこで、今回は平衡接触角に着目し、濡れ性評価の基準とした。さらに細かい議論をするには、前進接触角と後退接触角に着目しなくてはならない。

管壁近傍の水の流動をPIV (粒子画像流速計) により調査した。PIVとは、レーザーシートを液体にあてて液体中にトレーサーとなる粒子を投入し、粒子がある短い時間内に動いた距離から流速を測定するものである。

3. 実験結果と考察

3.1 流動様式

観察された気泡やスラグの写真をFig. 3, 4に示す。管内における流動様式を分類する際には、気体部の流れ方向の長さが管内径より短いものを気泡 (bubble) と定義し、気泡のみが存在する流れを気泡流、長いものをスラグ (slug) と定義し、スラグのみが存在する流れをスラグ流とした。また、気泡とスラグが混在するものを気泡-スラグ流とした。

3.1.1 気泡流

Fig. 3に気泡流の例を示す。上の二つは何も塗布しない濡れ性の良い管において観察されたもので、下の二つはフッ素系撥水剤を塗布した濡れ性の悪い管において観察されたものである。何も塗布しない管で水の空塔速度が小さい領域においては偏平な気泡がみられたが、水の空塔速度が大きい場合には、球形に近い分散型の気泡が上昇の様子が観察された。

フッ素系撥水剤を塗布した管においては、管が半透明なので、気泡を線でなぞった。水の空塔速度に係わらず、濡れ性が悪くなったことにより、いくつかの気泡が管壁において合体し、気泡が流れ方向に対し垂直、すなわち管内面の周方向に成長し管壁に接触しながら上昇の様子が観察された。これは前報⁹⁾の接触角104 $^{\circ}$ の管内の気泡とよく似ている。

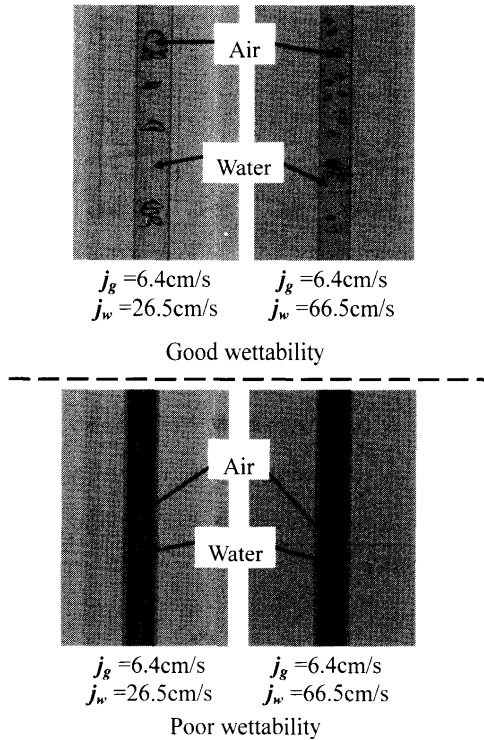


Fig. 3. Bubbly flow ($D=1.0$ cm).

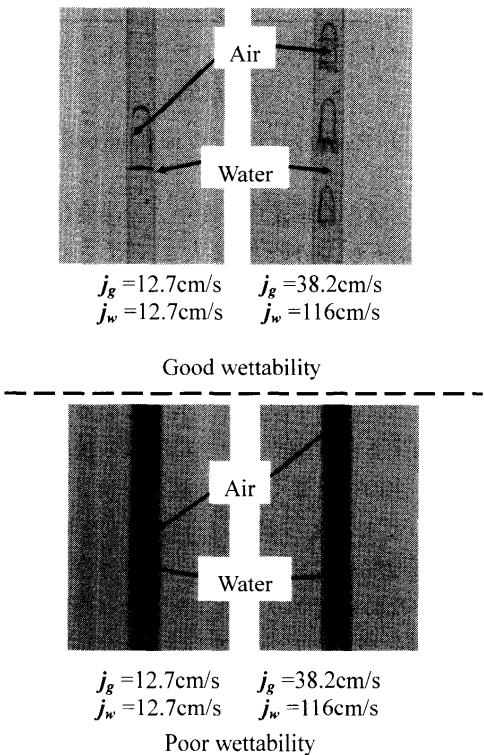


Fig. 4. Slug flow ($D=1.0$ cm).

3・1・2 スラッグ流

Fig. 4にスラッグ流の例を示す。上の二つは何も塗布しない管において観察されたもので、下の二つはフッ素系撥水剤を塗布した管において観察されたものである。濡れ性の

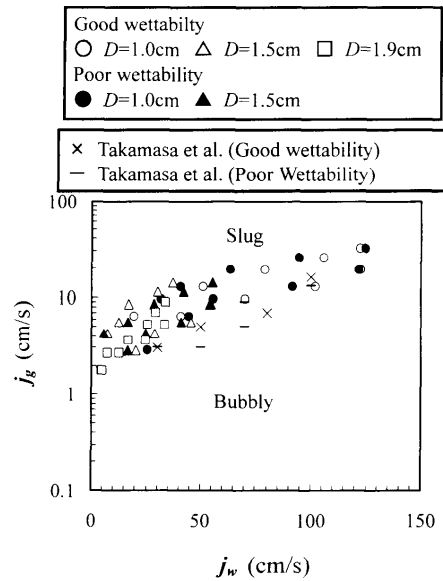


Fig. 5. Boundary between bubbly flow and slug flow regimes.

良い管内では、水の空塔速度が低い場合には弾丸状のスラッグが観察されたが、水の空塔速度が大きい場合には気液界面が乱れたスラッグが観察された。フッ素系撥水剤を塗布した濡れ性の悪い管においては、水の空塔速度が小さい場合には、空気が膜状になって管壁に接触しながら上昇の様子が観察された。水の空塔速度が大きくなると通常のスラッグ流にほぼ近い流れが観察されたが、スラッグは横方向に広がり管壁に接触しながら上昇した。この現象も接触角が104°の管の場合⁹⁾とよく似ている。

3・1・3 流動様式の境界（気泡-スラッグ流の存在領域）

Fig. 5は、横軸に水の空塔速度、縦軸に空気の空塔速度をとり、気泡-スラッグ流の存在領域をプロットしたものである。水の空塔速度を一定としたとき、空気の空塔速度が小さいときには気泡流が観察された。プロットの範囲内で、気泡とスラッグが混在し、空気の空塔速度をさらに大きくするとスラッグ流が観察された。気泡-スラッグ流の存在領域は濡れ性、管内径にかかわらずほぼ一致した。これは、賞雅らの実験結果¹¹⁾ともほぼ一致している。

3・1・4 管路出口近傍の流動状態

Fig. 6に示すように、濡れ性の良い管では、スラッグが管を出るときにちぎれていくつかの気泡となる様子が観察された。管内径は1.5 cmである。濡れ性の悪い管では、濡れ性の良い場合とは形状の大きく異なるスラッグが管壁に接触しながら上昇し、管から出るときに、管壁側でいくつもの大きな気泡が発生した後に小さな多くの気泡が発生するという様子が繰り返し観察された。濡れ性の悪い管で、周期的に小さな気泡が発生する原因として、最初管壁側から大きな気泡が発生するが、その後、管壁に残留した空気の薄い膜が水の流れにより押し出されることが考えられる。

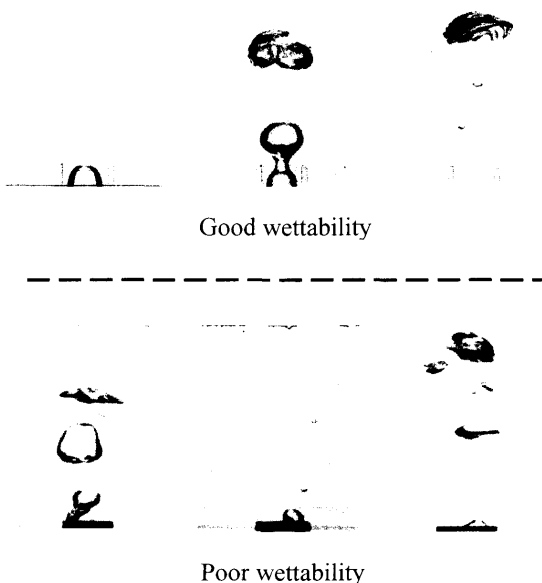


Fig. 6. Flow near the outlet ($j_g, j_w = 5.66$ cm/s).

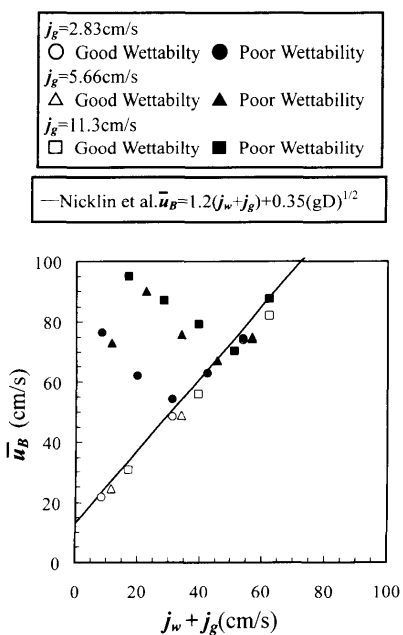


Fig. 7. Rising gas velocity in the pipe.

3・2 気泡およびスラグの上昇速度

3・2・1 管内における上昇速度

水と空気の空塔速度の和 $j_w + j_g$ を横軸に、 $D = 1.5$ cm の管内における気泡およびスラグの上昇速度 \bar{u}_B を縦軸にとって Fig. 7 に示す。いずれの条件下でも、上昇速度は何も塗布しない管においては、Nicklin らにより提唱された実験式(3)¹⁶⁾に一致した。

$$\bar{u}_B = 1.2(j_w + j_g) + 0.35(gD)^{1/2} \quad (j_w D / v_w > 8000) \dots\dots(3)$$

ここで g は重力加速度である。フッ素系撥水剤を塗布した管においては、 $j_w + j_g$ が小さい場合、すなわち j_g を一定と

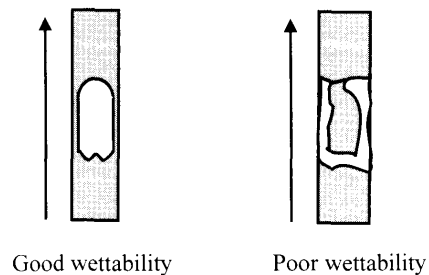


Fig. 8. Images of slugs.

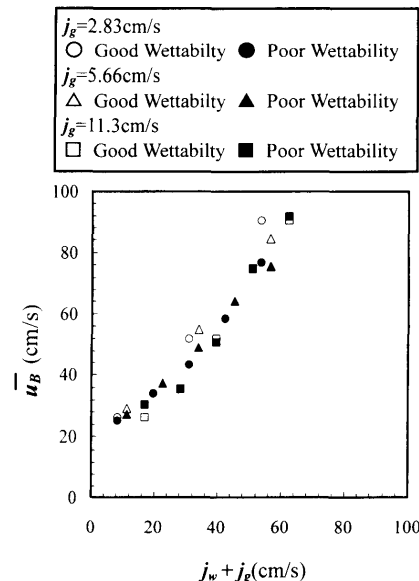


Fig. 9. Rising gas velocity near the outlet.

している。水の空塔速度 j_w が小さい場合には、何も塗布しない管よりも上昇速度は大きくなった。しかし、 $j_w + j_g$ が増加すると何も塗布しない管とほとんど変化は見られなくなった。Fig. 8 に示すように、 $j_w + j_g$ が小さい、すなわち水の空塔速度が小さいときは、何も塗布しない管では、例えばスラグは管中央部を上昇しているが、フッ素系撥水剤を塗布すると気泡やスラグは管壁に接触しながら上昇するので、水の中を動くよりも抵抗が小さくなり、上昇速度が増加したと考えられる。 $j_w + j_g$ が大きいとき、すなわち水の空塔速度が大きいときは、上昇速度は水の慣性力に支配されるため変化がみられなかったと考えられる。また、上昇速度の増加がピークを迎えるような $j_w + j_g$ の領域では、気体部が膜状となって管壁に付着し、濡れ性の悪い壁を伝って上昇していく様子が観察された。なお、接触角が 104° の濡れ性の悪い管内の気泡やスラグの上昇速度は式(3)にほぼ一致していた⁸⁾。

3・2・2 管路出口近傍の上昇速度

管を出た 1 cm の区間で気泡やスラグの上昇速度がどのように変化するかを調査するために、 $D = 1.5$ cm の管の上部にアクリル製の水槽を設置した。その結果を Fig. 9 に示す。先ほどの管内の結果とは異なり、上昇速度に変化が

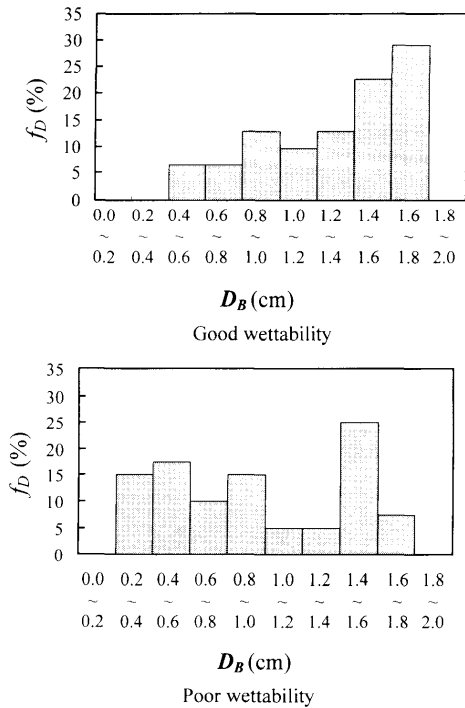


Fig. 10. Distribution of bubble diameter.

見られなかった。すなわち、管を出た直後に気泡やスラグへの濡れ性の影響がなくなる。この理由については今後の検討課題としたい。

3.3 管路出口で周期的に発生する小さな気泡

3.3.1 気泡径の頻度分布

ハイスピードビデオカメラを用いて、濡れ性の悪い管の出口で小さな気泡がどれくらいの割合で発生しているかを気泡径の分布に着目して調べた。Fig.10は気泡の直径の範囲を横軸にとり、縦にその出現割合をとった図である。実験条件は $j_g, j_w = 5.66 \text{ cm/s}$ 、管内径は 1.5 cm である。気泡は球形ではない場合が多いので、長軸と短軸の平均を気泡の直径 D_B とした。濡れ性の良い管では、径の大きい気泡ほどその出現割合が大きくなっていったが、濡れ性の悪い場合には、径の小さいものと大きいもの二つのグループに分れている様子がみられた。このことから径の小さな気泡が増加したということがわかる。

3.3.2 管路出口で単位時間あたりに発生する気泡の数 (気泡発生頻度)

Fig.11は、管内径が 1.5 cm の管路について、横軸に水と空気の空塔速度の和、縦軸に気泡の発生頻度をとったものである。いずれの場合にも、発生頻度は濡れ性の悪い場合には良い場合より大きくなった。濡れ性の悪い管では周期的な小気泡の発生により頻度が増加したと考えられる。水の空塔速度が大きい場合の結果は図には載せていないが、もともと管内には多くの小気泡があり、それらが濡れ性が悪くなることにより合体したために、濡れ性の悪い管のほうが気泡の発生頻度が小さくなった。

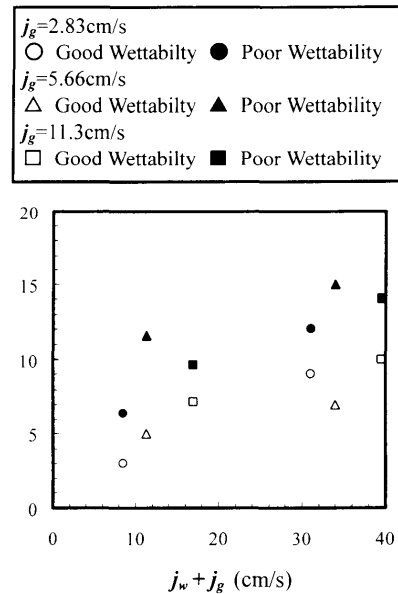


Fig. 11. Frequency of bubble formation at the outlet.

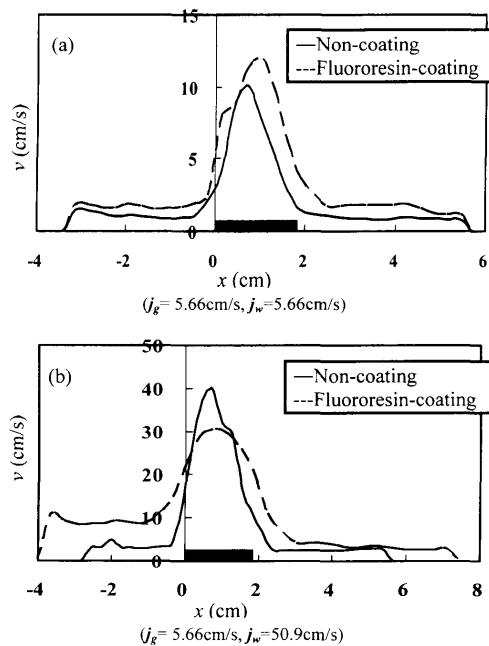


Fig. 12. Vertical velocity distribution near the outlet.

3.4 PIV (粒子画像流速計) による水の上昇速度の測定結果

Fig.12(a)に水の空塔速度が小さい場合について、PIVにより管路出口近傍における水の鉛直方向速度 v の分布を測定した例を示す。黒い四角は、内径が 1.5 cm の管の設置位置に当たる。管の中心で速度が大きくなり、管から遠ざかるほど速度が低下する様子が観察された。濡れ性の悪い管では速度分布の幅が広く、管から離れても速度低下が小さくなり、噴流の広がりが大きくなる。

Fig.12(b)に水の空塔速度が大きい場合の実験結果を示す。この場合でも、濡れ性の悪い管では速度分布の広がり

が水の空塔速度の小さい場合よりも、大幅に大きくなった。この原因としては、濡れ性の良い管では気泡は管の中心から上昇するので管の中心の水の流れが強くなり、管の中心の速度が増加する。しかし、濡れ性の悪い管では管壁側から気泡が上昇するので、管壁近傍の流れが誘起されることにより、速度分布が広がったと考えられる。

また、水の空塔速度が大きいと、Fig. 4に示したように、濡れ性の悪い管では濡れ性の良い管よりもスラグが広がり、気体部が管壁に接触して上昇するので、気泡として管から出るときに更に管壁近傍の水の流れが誘起されやすくなり、大幅に速度分布が広がったと考えられる。

4. 結論

濡れ性の良い管路（接触角 $\theta_c=77^\circ$ ）と悪い管路（ $\theta_c=142^\circ$ ）内を上昇する水-空気系気液二相流の特性を調査し、次の知見を得た。

(1) 管路の濡れ性は気泡やスラグの形状・寸法には大きな影響を及ぼすが、気泡流とスラグ流の境界に及ぼす影響はほとんどない。

(2) 濡れ性の良い管路内の気泡やスラグの上昇速度はNicklinらの式に一致するが、濡れ性の悪い管路では、水流量 Q_w の小さいときNicklinらの式よりも大きくなる。これは気泡やスラグが管壁にそって上昇するためである。ただし Q_w が大きくなるとNicklinらの式に一致する。

(3) 管路の出口の直上における気泡やスラグの上昇速度は管路の濡れ性の影響を受けなかった。

(4) 濡れ性の悪い管路の出口では、水流量の小さいとき、大きな気泡のあとで小さな多くの気泡が周期的に発生した。

(5) 濡れ性の悪い管路から出る噴流の広がりや、濡れ性の良い管路の場合よりも増加した。

本研究を進めるにあたり、鉄鋼研究振興助成金の援助を

受けた。ここに記して厚くお礼申し上げる。

記号

A	: 管断面積 (cm^2)
D	: 管内径 (cm)
D_B	: 気泡径 (cm)
f_D, f_B	: 気泡の直径の出現頻度 (%) および気泡の発生頻度 (1/s)
J_w, J_g	: 水と空気の空塔速度 (cm/s)
L	: 管長さ (cm)
Q_w, Q_g	: 水と空気の流量 (cm^3/s)
\bar{u}_B	: 気泡およびスラグの上昇速度 (cm/s)
v	: 鉛直方向の水の速度 (cm/s)
x	: 位置 (cm)
ν_w, ν_g	: 水と空気の動粘度 (mm^2/s)
θ_c	: 接触角 (deg)
ρ_w, ρ_g	: 水と空気の密度 (kg/m^3)

文献

- 1) 赤川浩爾: 気液二相流, コロナ社, 東京, (1974), 9.
- 2) 気液二相流ハンドブック, 日本機械学会編, コロナ社, 東京, (1989), 1.
- 3) 気液二相流の数値解析, 日本原子力学会編, 朝倉書店, 東京, (1993).
- 4) S.Hosokawa and A.Tomiya: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. B*, **69** (2003), 2208.
- 5) F.Yamamoto and Y.Murai: *J. Jpn. Soc. Multiphase Flow*, **14** (2000), 8.
- 6) K.Ito, M.Inoue, M.Ozawa and M.Shoji: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. B*, **70** (2004), 151.
- 7) Y.Nakahara and A.Tomiya: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. B*, **9** (2003), 2003.
- 8) M.Iguchi and Y.Terauchi: *ISIJ Int.*, **40** (2000), 567.
- 9) Y.Terauchi, M.Iguchi, H.Kosaka, S.Yokoya and S.Hara: *Tetsu-to-Hagané*, **85** (1999), 645.
- 10) M.Iguchi and Y.Terauchi: *Int. J. Multiphase Flow*, **27** (2001), 2189.
- 11) T.Hazuku, N.Tamura and T.Takamasa: Proc. JSMF Annual Meeting 2003, Osaka, (2003), 69.
- 12) A.M.Barajas and R.L.Panton: *Int. J. Multiphase Flow*, **19** (1993), 337.
- 13) K.Ishiguro and M.Iguchi: *ISIJ Int.*, **43** (2003), 663.
- 14) M.Iguchi, N.Sonoyama, Y.Terauchi and Y.Mizuno: *J. Jpn. Soc. Multiphase Flow*, **14** (2000), No. 2, 176.
- 15) K.Fukushi and M.Iguchi: *J. Jpn. Soc. Exp. Mech.*, **4** (2004), 20.
- 16) D.J.Nicklin, J.O.Wilke and J.F.Davidson: *Trans. Inst. Chem. Eng.*, **40** (1962), 61.