

# 気液二相系におけるオリフィスへの環状気泡の付着と液流速

前田 大介\*・井口 学\*\*

Attachment of an Annular Bubble to an Orifice Placed in Gas-Liquid Two-phase Flow and Velocity of Liquid Flow

Daisuke MAEDA and Manabu IGUCHI

## 1. 緒言

濡れ性とは液体と固体の付着のしやすさを示す指標であり、表面張力と接触角によって表される<sup>1)</sup>。一般に液体の流動に及ぼす濡れ性の影響は小さい径を持つ管内などで顕著に現れることが知られており、研究が活発に行われている<sup>2-5)</sup>。例えば、熱交換器やマイクロリアクターなどに応用が期待されているマイクロオーダーの径を持つチャンネル内では、表面力が支配的となり、流動現象には濡れ性が重要な役割を演じる。一方、径が大きい管内では表面力の影響は小さくなり、濡れ性の影響も小さいと考えられる。しかし、管路の形状によっては濡れ性を無視できない場合がある。連続鑄造において、鑄型に供給される溶鋼の流量を調節するスライディングゲートがその一例である。著者らは前にスライディングゲート内溶鋼流動の水モデル実験を行い<sup>6)</sup>、ゲートの周辺に形成された流れの剥離領域に、介在物除去のために吹き込まれたArガスが付着することで、浸漬ノズル内の溶鋼流れの速度が大きく変化する可能性があることを示唆した。気泡付着による溶鋼流量の変動は鑄型内溶鋼流れの変動を誘起し、ひいてはモールドパウダーの巻き込みをもたらす可能性もある<sup>7)</sup>。したがって、気泡付着に関連する浸漬ノズル内の溶鋼流れの挙動を知ることが重要である。ただし、スライディングゲートの構造は複雑であるため、気泡の付着状況がわずかに異なるだけで流れが大きく変化する。そこで流路内に軸対象な凸部を有する円筒オリフィスを用いて、オリフィスへの気泡付着がオリフィスを通る液体の流れに及ぼす影響について調査した。

## 2. 実験装置と方法

Fig. 1に実験装置の概要を示す。内径 $D=50$  mmの透明アクリル製円管に内径 $D_{OR}=16, 27, 35$  mmの円形状の穴が開

いた透明アクリル平板を取り付け、Fig. 2のようにオリフィスが設置された管路とした。上部のオーバーフロータンクから水を、内径0.4 mmのガラス製トップランスから空気を供給し、円管内に気液二相流を発生させた。水流量 $Q_L$ は下部のバルブで調節し、空気流量 $Q_g$ は $10 \text{ cm}^3/\text{s}$ に固定した。このときの流動様式は、水の中に多くの小さな気泡が分散した気泡流(Bubbly flow)となっている。空気流量の選定に際しては、前報のスライディングゲートへの気泡付着に関する実験結果を参考にし<sup>6)</sup>、空気と水との流量比がアルゴンガスと溶鋼との流量比にほぼ等しくなるように選んだ<sup>8)</sup>。アクリル平板は、厚さ $S=5, 10$  mmのものを用意し、撥水剤(NTTアドバンステクノロジー株製HIREC1550)を全体に塗布した。その際の水との接触角は $144^\circ$ であり、濡れ性は悪い。何も塗布をしない場合は $67^\circ$ であり、濡れ性は良い。オリフィスの内径と円管の内径の比を表す絞り比 $\beta(=D_{OR}/D)$ は0.32, 0.54, 0.70となる。このように、オリフィスの内径、厚さ、濡れ性を変化させ、オリフィスへの気泡の付着挙動の観察を行うとともに、粒子画像流速計(PIV)を用いて水の流速の測定を行った。ただし、本実験の場合、気泡の直径が小さく、気泡に働く浮力が液体の流れに及ぼす影響は小さいため、PIVによる測定時には空気の吹き込みを一時停止した。

上述のように、オリフィスには濡れ性の良いものと悪いものの2種類を用いたが、気液二相流の水流量と空気流量を調整することにより、濡れ性の良し悪しに関わらずオリフィスの開口端および下面に気泡を付着させることができる。ただし、濡れ性の悪いほうが気泡を付着させやすい。本研究では気泡付着の影響をより明確に見出すために、濡れ性のよいオリフィスへは気泡が付着せず、濡れ性の悪いオリフィスへのみ付着するように水流量と空気流量を調整した。

平成18年2月9日受付 平成18年5月24日受理 (Received on Feb. 9, 2006; Accepted on May 24, 2006)

\* 北海道大学大学院工学研究科大学院生 (Graduate Student, Hokkaido University, North 13 West 8 Kita-ku Sapporo 060-8628 Japan)

\*\* 2 北海道大学大学院工学研究科材料科学専攻 (Division of Materials Science and Engineering, Graduate School of Engineering, Hokkaido University)

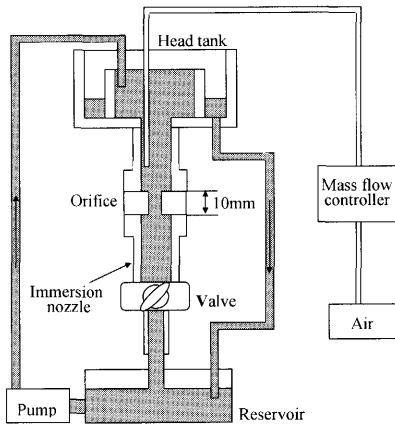


Fig. 1. Experimental apparatus.

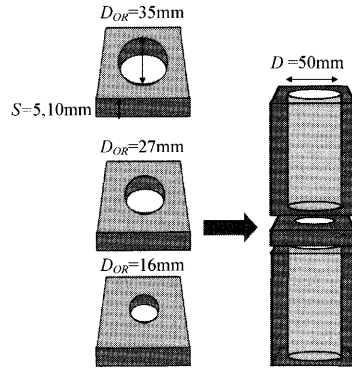


Fig. 2. Schematic view of orifice.

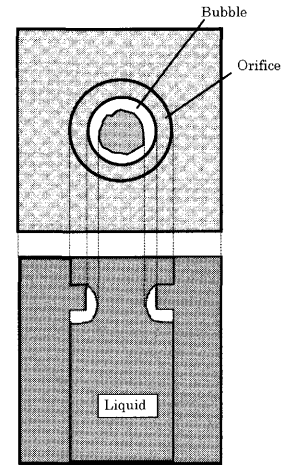


Fig. 3. Schematic view of annular bubble attachment ( $D_{OR}=35$  mm,  $S=10$  mm,  $Q_L=40$  L/min).

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 オリフィスへの気泡付着挙動

濡れ性の悪いオリフィスを用い、オリフィス径 $D_{OR}$ 、オリフィス厚さ $S$ 、水流量 $Q_L$ を変化させて実験を行ったところ、特定の条件下でオリフィスへの気泡付着が観察された。Fig. 3はオリフィス径 $D_{OR}=35$  mm、厚さ $S=10$  mm、水流量 $Q_L=40$  L/minにおける、気泡付着の様子を示す模式図である。オリフィスの開口部に付着した気泡は成長して下面を覆い、環状型の気泡となった。本実験条件の範囲では、濡れ性の良いオリフィスを用いた場合に気泡の付着挙動が起こらないようにした。緒言でも述べたように、気泡付着は流路の凹凸によって形成される流れの剥離領域に気泡が入り込むことで起こる。しかし、流れが剥離しているというだけでは、気泡を安定に留めることができず、濡れ性の良い場合には付着が観察されなかったと考えられる。

Fig. 4は、濡れ性が悪いオリフィスへの気泡付着の領域図を示している。オリフィス径27, 35 mmの場合、水流量を変化させても全ての条件において気泡が付着した。それに対し、16 mmの場合には、水流量が小さいと気泡付着が観察されるが、水流量が大きくなると気泡は付着しなくなる。これは径が小さくなるほど、水の流速が大きくなりオリフィスの開口部に形成される剥離領域が小さくなるためだと考えられる。また、オリフィスの厚さ $S$ を10 mmから5 mmに変化させても気泡付着の領域に変化は見られなかった。

#### 3.2 気泡付着による液流速変化

環状型の気泡が付着すると水の流路が狭められるため、管内の流動状態は付着しない場合とは異なることが予想される。Fig. 5はオリフィス径が $D_{OR}=35$  mm、水流量が $Q_L=40$  L/minについて、気泡が付着する場合（濡れ性が悪い場合）としない場合（濡れ性が良い場合）のオリフィス下流における水の速度ベクトルを示している。気泡が付着すると、中心軸近傍の速度が非常に大きくなっている。オリフィスの下流8 cmの軸位置における速度分布をFig. 6に示

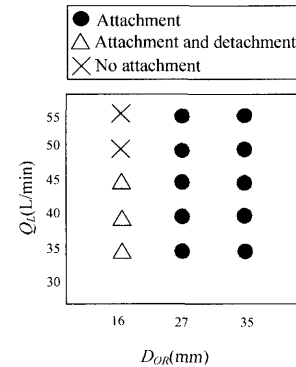


Fig. 4. Bubble attachment map (poorly wetted orifice).

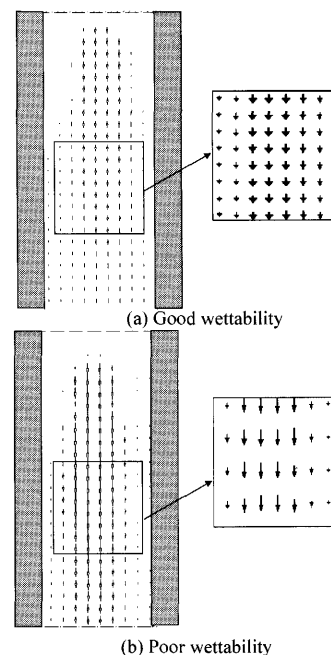


Fig. 5. Downstream velocity vectors below orifice ( $D_{OR}=35$  mm,  $S=10$  mm,  $Q_L=40$  L/min,  $Q_g=10$  cm<sup>3</sup>/s).

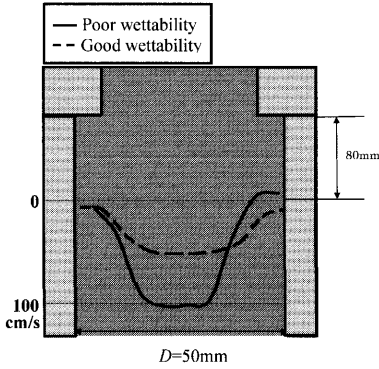


Fig. 6. Downstream velocity distributions below orifice ( $D_{OR}=50\text{mm}$ ,  $S=10\text{mm}$ ,  $Q_L=40\text{L/min}$ ).

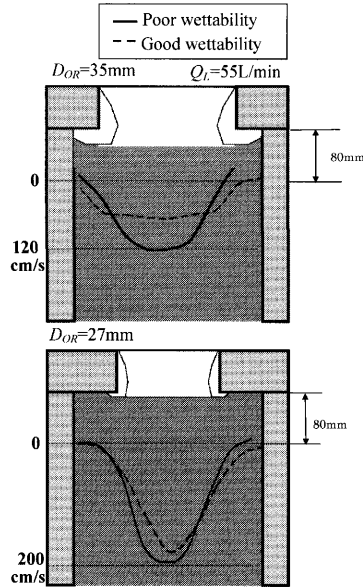


Fig. 7. Downstream velocity distributions below orifice ( $S=10\text{mm}$ ,  $Q_L=55\text{L/min}$ ).

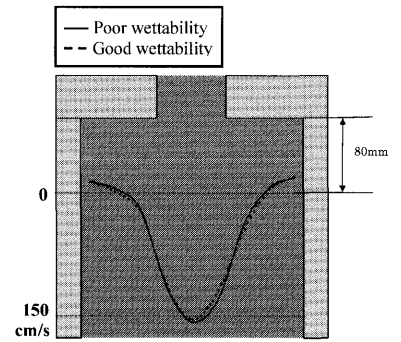


Fig. 8. Downstream velocity distributions below orifice ( $D_{OR}=16\text{mm}$ ,  $S=10\text{mm}$ ,  $Q_L=40\text{L/min}$ ).

す。気泡の付着があるときの速度分布は、付着がないときの分布とは顕著に異なり、中心軸上の速度は約2倍になっている。これはオリフィスに付着した気泡によってオリフィス開口部における水の流路が狭められたためである。なお、濡れ性を悪くするために撥水剤を塗布すると、オリフィスが半透明になることに加えて、環状気泡の付着によってレーザーシートが揺らぎPIVによる測定は困難となるため、オリフィス近傍の流速測定はできなかった。

Fig. 7には、オリフィス径 $D_{OR}=27, 35\text{mm}$ における水流量 $Q_L=55\text{L/min}$ の場合の速度分布を示す。測定位置はオリフィスの下流8cmのところである。いずれの場合も、Fig. 6と同様に気泡が付着すると管中心近傍の速度が大きくなっていることがわかる。しかし、 $D_{OR}=27\text{mm}$ の場合における気泡付着による速度変化は $D_{OR}=35\text{mm}$ の場合のそれよりも小さい。オリフィスの場合、径が小さいほど剥離領域も小さいため、付着気泡量が減少し、それに伴って流動に及ぼす影響も小さくなったと考えられる。

Fig. 8に示す $D_{OR}=16\text{mm}$ ,  $Q_L=40\text{L/min}$ の場合には気泡が付着と離脱を繰り返したが、その量がわずかであるため、濡れ性の良い場合と悪い場合の速度分布は互いに一致し、濡れ性の影響は見られない。なお、測定位置はFig. 6, 7と同じである。オリフィスを設置していない真っ直ぐな円管内の乱流管摩擦係数の測定結果においても、気泡が付着しないかぎり濡れ性の影響はみられないことが報告されている<sup>9)</sup>。

### 3.3 本実験結果の実機スライディングゲートへの適用

浸漬ノズル内のスライディングゲートへArガスが付着する可能性は前報<sup>6)</sup>で示しているが、気泡が定常的に付着している場合はともかく、大きな気泡が成長・離脱を繰り返す

返す場合の溶鋼流速は、その大きさも方向も大きく変動する可能性があり、連続鋳造鋳型内の偏流ひいてはモールドパウダー巻き込みの大きな要因になっている可能性がある。また、Fig. 6~8で明らかのように、オリフィスの下方8cmのところでも逆流がみられる点にも留意すべきであろう。

## 4. 結言

- (1) 気泡が濡れ性の悪いオリフィスに付着すると、液体の通過する流路が狭められる。このため、管中心軸上近傍の速度は気泡の付着量が多くなるにつれて増加する。
- (2) オリフィスへ気泡が付着しない場合には、濡れ性は流速分布に影響を及ぼさない。

## 記号

$D$	: 円管の直径
$D_{OR}$	: オリフィスの内径
$Q_L, Q_g$	: 水流量と空気流量
$S$	: オリフィスの厚さ
$\beta(=D_{OR}/D)$	: 絞り比

## 文献

- 1) N.Eustathopoulos, M.G.Nicholas and B.Drevet: *Wettability at High Temperatures*, Pergamon Press, Amsterdam, (1999).
- 2) A.M.Barajas and R.L.Panton: *Int. J. Multiph. Flow*, **19** (1993), 337.
- 3) Y.Terauchi, M.Iguchi, H.Kosaka, S.Yokoya and S.Hara: *Tetsu-to-Hagané*, **85** (1999), No. 2, 641.
- 4) M.Iguchi and Y.Terauchi: *Int. J. Multiph. Flow*, **27** (2001), 2189.
- 5) K.Ishiguro and M.Iguchi: *ISIJ Int.*, **43** (2003), No. 5, 663.
- 6) D.Maeda and M.Iguchi: *ISIJ Int.*, **44** (2004), No. 11, 1957.
- 7) J.Yoshida, T.Ohmi and M.Iguchi: *ISIJ Int.*, **45** (2005), No. 8, 1160.
- 8) M.Iguchi and N.Kasai: *Metall. Mater. Trans. B*, **31B** (200), 453.
- 9) K.Watanabe: Proc. JSMF Annual Meeting 2005, Tokyo, August 1-3, (2005), 73.