



気液二相系におけるオリフィスへの環状気泡の付着と損失係数

前田 大介*・井口 学*²

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

Daisuke MAEDA and Manabu IGUCHI

1. 緒言

著者らは前に¹⁾、浸漬ノズル内のスライディングゲートに付着する気泡が溶鋼流動に及ぼす影響を明らかにするために、円筒オリフィスを用いた水モデル実験を行った。円筒オリフィスに着目したのは、その形状が軸対象であり、定量的な解析がしやすいためである。気泡が濡れ性の悪いオリフィスに付着すると、水の通過する流路が狭められることにより、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ことが分かった。この事実は、オリフィスの損失係数は気泡付着によって大きな影響を受けることを示唆している。そこで、円管内に入れた水の落下する様子を観察して損失係数を求めることにした。ただし、濡れ性の悪いオリフィス全体を気泡が覆っているわけではなく、オリフィスの上面は水と接触しており、この部分が流速ひいては損失係数に影響を及ぼしている可能性がある。この点を考慮して、まず濡れ性の良いオリフィスと悪いオリフィスの両方に気泡が付着していない条件下で損失係数を求め、つづいて気泡付着による損失係数の変化を調べた。

2. 実験装置と方法

オリフィスの損失係数の評価に際しては、水がオリフィスを通過して落下していく際の、液面の降下速度に着目した。降下速度が大きければオリフィスの損失係数は小さく、降下速度が小さければ損失係数は大きいということになる。なお、降下速度は時間とともに小さくなり、したがって加速度が生じるが、前報²⁾の結果を参考にすれば、本実験条件下では気泡の付着しないオリフィスについては加速度の影響をほとんど無視してもよいといえる。また、気泡が付着すると、あたかもオリフィス径が小さくなったかのように水の降下速度は遅くなり、加速度の影響が小さくなる方へ向かう。そこで、以下の解析においては、加

速度がオリフィスの損失係数へ及ぼす影響は無視できるものとした。

気泡が付着しない場合の損失係数は、Fig. 1の実験装置を用いて測定を行った。オリフィス下部を水中に浸漬させ、水をオリフィスの上面から60cmのところまで満たした。その後、下部から水を排出し、液面の降下を高速度ビデオカメラで撮影して液面の降下速度を求めた。オリフィスには接触角が67°の濡れ性の良いものと、144°の濡れ性が悪いものの両方を用いている。気泡が付着する場合の測定はFig. 2に示す状況で行った。気泡付着は管路出口で水流量を調節しながらオリフィスの下端に空気を供給し、所定の長さ(H_B)の気泡を強制的に付着させた。

3. 実験結果と考察

3.1 水面降下速度に及ぼす濡れ性の影響

Fig. 3に、オリフィスに気泡が付着することなく、管内を水が充満している場合の水面降下速度の推移を示す。横軸には水面の高さ位置 H_1 をとった。オリフィスの濡れ性が良い場合と悪い場合で、降下速度に違いが見られない。したがって管内を水が充満して流れる場合には、濡れ性はオリフィス抵抗の大きさに影響しないと言うことができる。つまり、オリフィスに気泡が付着しない限り、濡れ性は損失係数の大きさに関係しない。同じ結果がオリフィスを設置していない真っ直ぐな円管内の管摩擦係数の測定結果にもみられる³⁾。また、Fig. 2において $H_2=0$ とした場合、すなわち水がオリフィスから自由落下する場合の水面降下速度の推移をFig. 4に示す。キャプション中で H_3 は負の値となっているが、Fig. 2の装置において、下側の円管をはずして水を落下させているので、便宜的にこのような表記法を採用して、下側の円管の無い状態を表すこととした。オリフィスの濡れ性の影響はみられない。そこで、気泡付着時の損失係数の測定には濡れ性の良いオリフィスを用いた。

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)

*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)

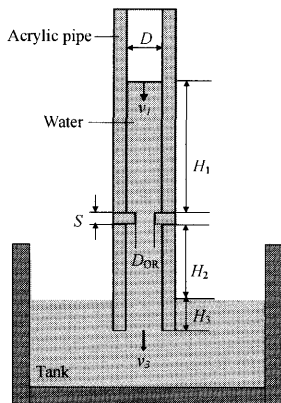


Fig. 1. Experimental apparatus for no bubble attachment.

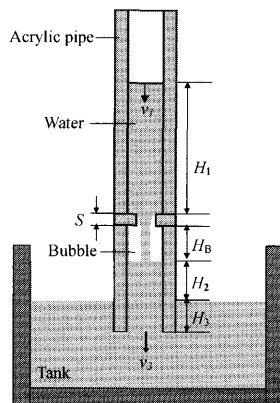


Fig. 2. Experimental apparatus for bubble attachment.

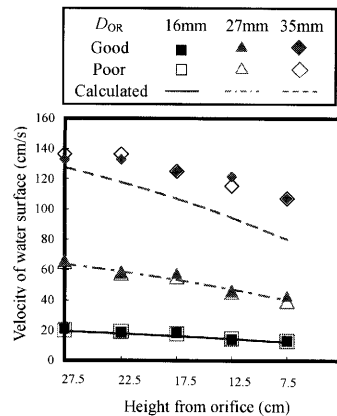


Fig. 3. Velocity of water surface above orifice without bubble ($S=10$ mm, $H_2=10$ mm, $H_3=20$ mm).

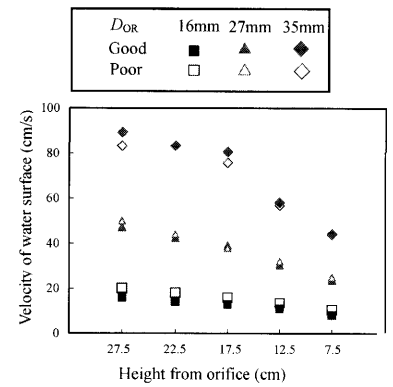


Fig. 4. Velocity of water surface above orifice with bubble ($S=10$ mm, $H_2=0$ mm, $H_3<0$ mm).

なお、Fig. 3に示した3種類の線は気泡が付着していない濡れ性のよいオリフィスの損失係数に、Iversen⁴⁾の提案した実験式の値を代入して求めた降下速度の計算値を表しているが、本測定値は計算値におおむね一致しており、本測定法が妥当であることがわかる。この計算法について以下に述べる。

3.2 気泡付着によるオリフィスの損失係数の変化

Fig. 2に示した実験装置において、気泡付着長さ H_B を0, 2, 4, 6, 8, 10, 16 cmと変化させ、水面の降下速度を求めた。さらにこの降下速度からオリフィスの抵抗係数を計算した。 $H_B=0$ cmは気泡を付着させなかった場合、 $H_B=16$ cmは気泡の下端が貯水槽の水面に一致する場合である。損失係数の計算には上側の管路内の水面と管の出口の2点間にてたベルヌーイの式(1)を用いた。

$$P_0 + \frac{1}{2} \rho_L v_1^2 + \rho_L g(H_1 + S + H_B + H_2 + H_3) = P_0 + \rho_L g H_3 + \frac{1}{2} \rho_L v_3^2 + \Delta P_{Loss} \quad (1)$$

ここで P_0 は大気圧、 ρ_L は水の密度、 v_1, v_3 はそれぞれ水面の降下速度と管出口における水の断面平均速度、 ΔP_{Loss} はこの管内の全圧力損失を示す。今回は全圧力損失にオリフィスによる損失と管摩擦損失を考慮した。

$$\Delta P_{Loss} = \lambda_1 \frac{H_1}{D} \frac{1}{2} \rho_L v_1^2 + \lambda_3 \frac{H_2 + H_3}{D} \frac{1}{2} \rho_L v_3^2 + \zeta_{OR} \frac{1}{2} \rho_L v_1^2 \quad (2)$$

ここで λ_1 と λ_3 は管摩擦係数、 ζ_{OR} はオリフィスの損失係数である。

$$v_1 = v_3 \quad (3)$$

$$\lambda_1 = \lambda_3 \quad (4)$$

である。式(2)~(4)を式(1)に代入して整理すると

$$g(H_1 + S + H_B + H_2) = \lambda_1 \frac{H_1 + H_2 + H_3}{D} \frac{1}{2} v_1^2 + \zeta_{OR} \frac{1}{2} v_1^2 \quad (5)$$

が得られる。式(5)において、気泡付着長さ H_B と高さ H_2 は厳密には時間的に変化するが、本実験での H_1 の変化の範囲は20 cmであり、この場合の気泡の圧力は初期値に比べて、たかだか2%程度変化するだけであることから、 H_B と H_2 は変化しないものとして議論を進める。したがって、 H_1 と v_1 の測定値を代入することによって ζ_{OR} を求めることができる。

式(5)の気泡長さ H_B を0とおけば気泡が付着していないときの関係式が得られる。オリフィスの損失係数 ζ_{OR} に下記の Iversen⁴⁾ の実験式から求めた値を代入すると前掲の Fig. 3中に3種類の線で示した降下速度が求められる。

$$\zeta_{OR} = \frac{1}{K_{OR}^2} \left(\frac{D}{D_{OR}} \right)^4 \quad (6)$$

$$K_{OR} = 0.731 \quad (\beta = 0.7, 10000 \leq Re) \quad (7)$$

$$Re = v_1 D / \nu_L \quad (8)$$

$$K_{OR} = 0.651 \quad (\beta = 0.54, 10000 \leq Re) \quad (9)$$

$$K_{OR} = 0.617 \sim 0.622 \quad (\beta = 0.32, Re = 3600 \sim 7300) \quad (10)$$

ここで Re はレイノルズ数、 K_{OR} は流量係数、 D は管内径、 D_{OR} はオリフィス径である。なお、 $\beta = 0.32$ の場合は、 Re の値に応じて対応する K_{OR} の値を採用した。管摩擦係数にはブラジウスの式($\lambda_1 = 0.3164 Re^{-1/4}$)を用いた。

付着気泡の長さ H_B と水面の降下速度 v_1 の測定値を式(5)に代入して求めたオリフィスの損失係数 ζ_{OR} を ζ_{ORB} で表し、Fig. 5に示す。横軸には気泡付着長さ H_B を管内径 D で除した値をとった。各々の線は気泡が付着しない場合 ($H_B/D=0$) に成立する Iversen の実験式から求めた値を表している。 $H_B/D=0$ における本測定値は各々の線で示した値

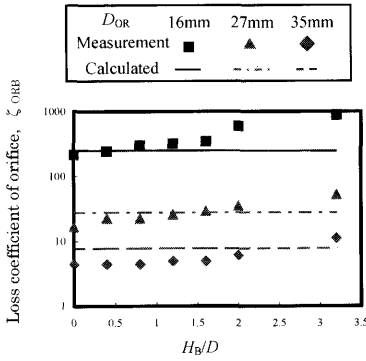


Fig. 5. Loss coefficient of orifice with bubble attachment.

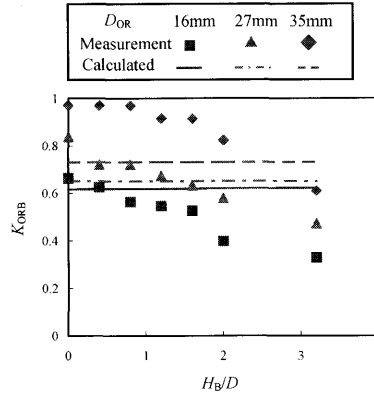


Fig. 6. Discharge coefficient of orifice with bubble attachment.

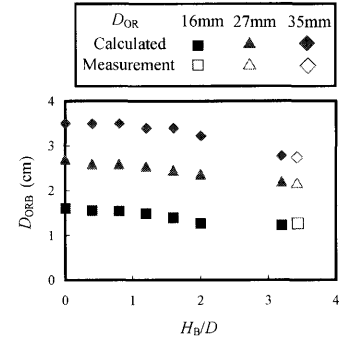


Fig. 7. Equivalent diameter of orifice.

にほぼ一致している。横軸の値が大きくなるほど、すなわちオリフィスへの気泡の付着量が多くなるほど ζ_{ORB} は大きくなる傾向が見られる。したがって、気泡の付着量と共に損失は増える。

式(6)を K_{OR} について整理した後で、 K_{OR} を改めて K_{ORB} で表すとともに、 ζ_{OR} を ζ_{ORB} で置き換えると

$$K_{ORB} = \left\{ \frac{1}{\zeta_{ORB}} \left(\frac{D}{D_{OR}} \right)^4 \right\}^{1/2} \dots\dots\dots(11)$$

となる。気泡付着時の K_{ORB} の値を無次元気泡長さ H_B/D に対して Fig. 6 に示す。図中に Calculated と表示されている計算値は、もともと $H_B=0$ mm の場合にのみ適用できる点に留意されたい。 K_{ORB} に対する実験式の導出はさらに多くのデータを蓄積してからにしたい。

3.3 気泡付着時のオリフィスの等価直径

上記実験結果によれば、気泡が付着することによって、あたかもオリフィス径 D_{OR} が小さくなったかのような様相を呈することになる。そこで、 K_{OR} はそのままにしておいて、式(6)を変形して、 D_{OR} を D_{ORB} 、 ζ_{OR} を ζ_{ORB} と置けば

$$D_{ORB} = D \left(\frac{1}{K_{OR}^2 \zeta_{ORB}} \right)^{1/4} \dots\dots\dots(12)$$

となる。この式に ζ_{ORB} の測定値を代入すれば、気泡付着の影響を含んだオリフィスの等価直径が求まることになる。等価直径 D_{ORB} の値を Fig. 7 に示す。気泡が付着しないオリフィスのもともとの径は 16, 27, 35 mm であるが、気泡の付着量が多くなるとともにオリフィスの等価直径は小さくなっている。すなわち、気泡が付着すると流路が狭められて流速が大きくなるが、このことは、気泡が付着すると管中心軸上の速度が大きくなった前報の実験結果¹⁾を定性的によく説明している。なお、水をオリフィスから自由落下させてオリフィス開口部における流路を実際に測定した結果を白抜きのプロットで示しているが、損失係数 ζ_{ORB} から計算した等価直径にほぼ等しいことが分かる。

3.4 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^{1,5)}で示唆しているが、気泡が定期的に着している場合はともかく、成長・離脱を繰り返す場合の溶鋼流量は大きく変動する可能性がある。ただし、この変動量を定量的に評価するには、スライディングゲートへの気泡付着量と損失係数の評価が必要となる。

4. 結言

- (1) 濡れ性の悪いオリフィスへ気泡が付着しない場合の損失係数は濡れ性の良いオリフィスの損失係数に等しい。
- (2) オリフィスに気泡が付着すると流動損失が増える。オリフィスの損失係数は付着しない場合よりも大きくなるが、気泡の付着量とともに単調に増加した。

記号

D	: 円管の直径
D_{OR}	: オリフィスの内径
D_{ORB}	: 気泡の付着したオリフィスの等価直径
g	: 重力加速度
H_1, H_2, H_3	: Fig. 2 に示す長さ
H_B	: 気泡の付着長さ
K_{OR}, K_{ORB}	: オリフィスに気泡が付着したときとしないときの流量係数
Q_L, Q_g	: 水流量と空気流量
P_0	: 大気圧
S	: オリフィスの厚さ
$\beta (=D_{OR}/D)$: 絞り比
ΔP_{LOSS}	: 全圧力損失
λ	: 管摩擦係数
ν_L, ρ_L	: 水の動粘度と密度
ζ_{OR}, ζ_{ORB}	: オリフィスに気泡が付着したときとしないときの損失係数

文献

- 1) D.Maeda and M.Iguchi: *Tetsu-to-Hagané*, **92** (2006), No. 9, 572.
- 2) M.Ohmi and M.Iguchi: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, **48**-426 (1982), and *Bull. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, **25**-208 (1982), 1537.
- 3) K.Watanabe: Proc. JSMF Annual Meeting 2005, Tokyo, August 1-3, (2005), 73.
- 4) H.W.Iversen: *Trans. ASME*, **78** (1956), 359.
- 5) D.Maeda and M.Iguchi: *ISIJ Int.*, **44** (2004), No. 11, 1957.