

ガス底吹きを伴う厚いスラグ層内における メタル滴のホールドアップ

高島 真*・井口 学*²

Metal Droplet Holdup in the Thick Slag Layer Subjected to Bottom Gas Injection

Shin TAKASHIMA and Manabu IGUCHI

Synopsis : Model experiments were carried out to investigate the bubble and liquid flow characteristics in a bottom blowing bath covered with a thick slag layer typical of in-bath smelting reduction processes. An aqueous $ZnCl_2$ solution and silicone oil were used as the models for molten metal and molten slag, respectively. The density ratio of the solution to the silicone oil was 1.7, being close to a steel/slag density ratio of 2.0 to 2.2 in practice. The diameter of a vessel containing the two liquids was changed over a wide range. The holdup of the solution carried up by bubbles into the upper silicone oil layer was measured with a suction tube. The volume of the solution, V_m , was dependent mainly on the density difference. Empirical correlations of V_m and the penetration height of the solution were derived.

Key words : steelmaking; inbath smelting reduction; metal holdup; suction tube; electroresistivity probe; metal plume.

1. 緒言

現在溶融還元炉や脱りんプロセスなどにおいて、厚いスラグ層の共存下でガス吹込みによる攪拌が行われており、溶融メタル層およびスラグ層の攪拌挙動と各層におけるメタル滴とスラグ滴の分散挙動の解明が重要な課題となっている¹⁻³⁾。しかしながら、実機を用いてこのような現象の解明に対応するには困難が伴うため、一般には水をメタルに、シリコンオイルをはじめとする各種オイルをスラグに見立てた水モデル実験が広く行われている^{4,5)}。周知のようにスラグ層が薄い場合については、攪拌挙動をはじめとして豊富な情報が蓄積されているが^{6,7)}、このような厚いスラグ層が存在する場合については、水モデル実験においてさえ、スラグ層内におけるメタルのホールドアップならびにメタル層内におけるスラグのホールドアップ分布に関して正確な予測式は無いのが現状である。

著者らは以前に⁸⁾、下層に水、上層にシリコンオイルを浮かべたモデルを対象として、電気探針によるスラグ層内に分散したメタル滴の挙動の測定を行ったが、この場合スラグとメタルの密度比は約0.93であり、実機の密度比が0.4~0.5であることを考慮に入れると相似条件は十分とは言えない。

本研究では、Lin and Guthrie^{9,10)}と同様に、メタル層として塩化亜鉛水溶液、スラグ層としてシリコンオイルを用いてメタルとスラグの密度比を実機に近い値に設定し、ガス底吹き円筒浴内のスラグ層内におけるメタル滴ホールドアップを調べた。

2. 実験方法

Fig. 1 に実験装置の概要を示す。透明アクリル製円筒容器内にメタルのモデルとして塩化亜鉛水溶液を満ちし、その上にスラグのモデルとして、シリコンオイルを満ちした。浴の底部中央に設置した内径 2 mm、外形 4 mm、容器内への突出高さ 4.5 mm の単孔ノズルから、ガスを所定の流量で吹込み浴内を攪拌した。容器径、各液体の物性値、各層の厚さ、および吹込みガス流量は Table 1, 2 に示す通りである。

前述のようにメタル相当層に塩化亜鉛水溶液を用い、メタル相当層とスラグ相当層の密度比を実機に近い値に設定し、水を用いた場合との比較検討を行った。また内径の異なる3種類の容器を用いて同様な実験を行い、容器径 D の

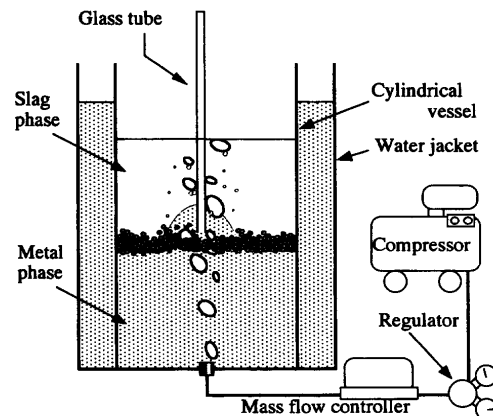


Fig. 1. Experimental apparatus.

平成11年8月9日受付 平成11年10月12日受理 (Received on Aug. 9, 1999; Accepted on Oct. 12, 1999)

* 北海道大学大学院生 (Graduate Student, Hokkaido University)

*² 北海道大学大学院工学研究科 (Graduate School of Engineering, Hokkaido University, North 13 West 8, Kita-ku Sapporo 060-8628)

Table 1. Physical properties of liquids at 293 K.

Liquid	Density (kg/m ³)	Kinematic viscosity (m ² /s)	Viscosity (mPa·s)
Silicone oil A	818	1.0×10 ⁻⁶	0.82
Silicone oil B	915	5.0×10 ⁻⁶	4.6
Silicone oil C	943	10.0×10 ⁻⁶	9.4
Aqueous ZnCl ₂ solution	1670	5.0×10 ⁻⁶	8.4
Water	997	0.857×10 ⁻⁶	0.854

Table 2. Experimental conditions.

	Vessel diameter (×10 ⁻² m)	Thickness of metal layer (×10 ⁻² m)	Thickness of slag layer (×10 ⁻² m)	Gas flow rate (×10 ⁻⁶ m ³ s ⁻¹)
Vessel A	20	6, 9, 12.5, 16	6, 9, 12.5, 16	41.4, 50, 60, 80
Vessel B	12.25	12.5	12.5	10, 20, 25, 30, 35, 41.4
Vessel C	7.5	12.5	12.5	10, 15, 20

影響を検討した。

本研究では電気伝導度の小さい塩化亜鉛水溶液を用いているため、電気探針での塩化亜鉛水溶液滴ホールドアップの測定は困難である。そこで、ガラス管による吸上げ方式を採用した。ここで塩化亜鉛水溶液滴ホールドアップとは単位体積中に占める塩化亜鉛水溶液の体積割合のことである。吸上げ方式の測定精度については、水-シリコンオイル系¹¹⁾に対して、電気探針との比較実験を行い、両者の差が±7%以内であることから、その妥当性を確認している。

Fig. 2 に吹込みガス流量が比較的小さいときに現れるシリコンオイル/塩化亜鉛水溶液界面の様子を模式的に表した。シリコンオイル/塩化亜鉛水溶液界面を横切ってガスが上昇することにより、下層の塩化亜鉛水溶液は上層のシリコンオイル側へと盛り上がる様子が観察された。本論文ではこの盛り上り部分を盛り塩化亜鉛水溶液と呼ぶ。盛り塩化亜鉛水溶液とシリコンオイル界面は定常な形を保っているわけではなく常に揺らいでいる。この状況でシリコンオイル層内の所定位置にガラス管を設置し中の流体をあらかじめ設定した一定速度で吸上げ、しばらく静置する。ガラス管内径は 4mm, 吸上げ量は約 8ml とした。静置後のガラス管内には、塩化亜鉛水溶液、シリコンオイル、ガスの3層が存在する。そこで、各長さを A, B, C とすると、ガスのホールドアップ α と盛り塩化亜鉛水溶液のホールドアップ ε は次式で求められる。

$$\alpha = \frac{C}{A+B+C} \dots\dots\dots (1)$$

$$\varepsilon = \frac{A}{A+B+C} \dots\dots\dots (2)$$

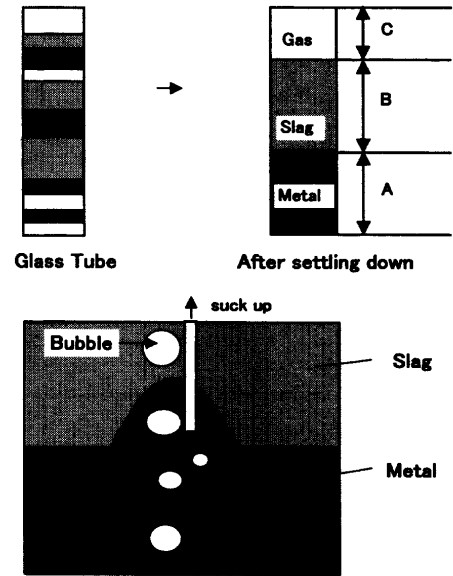


Fig. 2. Metal behavior caused by bubbles through a silicone oil/ZnCl₂ solution interface; (1) Lower gas flow rate.

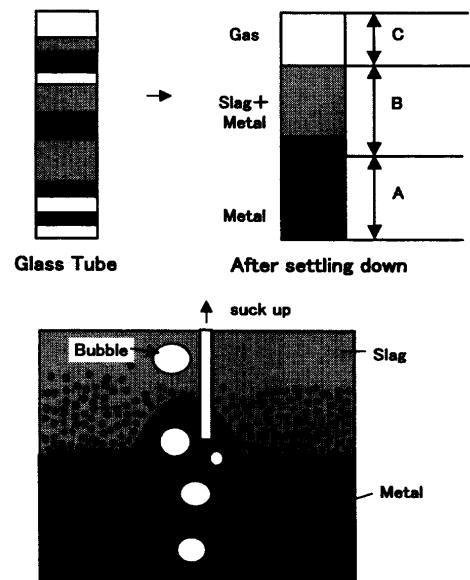


Fig. 3. Metal behavior caused by bubbles through a silicone oil/ZnCl₂ solution interface; (2) Higher gas flow rate.

ところがガス流量が大きくなると、Fig. 3 に示すように、界面付近のシリコンオイル層内に非常に多くの塩化亜鉛水溶液滴が蓄積しているのが観察された。本研究では、この塩化亜鉛水溶液滴を蓄積塩化亜鉛水溶液と呼び、盛り塩化亜鉛水溶液と区別する。この状況にてガラス管での吸上げを行うと、ガラス管内には盛り塩化亜鉛水溶液と、蓄積塩化亜鉛水溶液が混在した状態となる。すなわち容器中央で塩化亜鉛水溶液が盛り上がっている部分には、下層の塩化亜鉛水溶液層から気泡と共に上昇してきた塩化亜鉛水溶液とシリコンオイル/塩化亜鉛水溶液界面をとおしてシリコンオイル層から巻込まれた塩化亜鉛水溶液滴が混在している。盛り塩化亜鉛水溶液と蓄積塩化亜鉛水溶液を合

わせた全塩化亜鉛水溶液滴のホールドアップを ϵ' とすると、 ϵ' は式 (3) で表すことができる。

$$\epsilon' = \frac{A + \eta(r)B}{A + B + C} \dots\dots\dots (3)$$

ここで $\eta(r)$ は盛上り部における蓄積塩化亜鉛水溶液の分布関数である。

実際には、蓄積塩化亜鉛水溶液と盛上り塩化亜鉛水溶液はガラス管内では区別が不可能なためこの ϵ' の測定が行われる。本論文では η に対して次の二つの関数形を仮定する。

$$\eta(r) = \beta \frac{r}{r_B} \dots\dots\dots (4)$$

$$\eta(r) = 0.30 \dots\dots\dots (5)$$

ここで r_B は気泡上昇域のシリコンオイル/塩化亜鉛水溶液界面における半径方向の広がりを表す。式 (4) は盛上り部内に存在する蓄積塩化亜鉛水溶液滴のホールドアップが容器の中心から外側に向って直線的に増加し、やがて盛上り部外側の蓄積塩化亜鉛水溶液のホールドアップ β に一致することを表す。また式 (5) は、盛上り部内の蓄積塩化亜鉛水溶液のホールドアップが半径 r に依存せず一定であることを表す。

盛上り塩化亜鉛水溶液のホールドアップ ϵ を α 、 ϵ' および式 (4) の $\eta(r)$ を用いて表すと、式 (6) となる。

$$\epsilon = \frac{A}{A + B + C} = \frac{\epsilon' - (1 - \alpha) \frac{\beta r}{r_B}}{1 - \frac{\beta r}{r_B}} \dots\dots\dots (6)$$

一方、 $\eta(r)$ に式 (5) を用いると次式が得られる。

$$\epsilon = \frac{\epsilon' - (1 - \alpha)\eta}{1 - \eta} = \frac{1}{0.7} \{\epsilon' - 0.3(1 - \alpha)\} \dots\dots\dots (7)$$

蓄積塩化亜鉛水溶液のないときの盛上り塩化亜鉛水溶液のホールドアップ ϵ は式 (2) で、蓄積塩化亜鉛水溶液のあるときは $r_B = 4.0 \text{ cm}$ として式 (6) で求める方法と、式 (7) で求める方法の2種類の方法で求めた。なお r_B の値は高速ビデオカメラによる観察結果から求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 シリコンオイル層内における塩化亜鉛水溶液のホールドアップ分布

Fig. 4 に吸上げ式により測定したシリコンオイル層内における全塩化亜鉛水溶液のホールドアップ ϵ' の半径方向分布の一例を示す。各プロットはシリコンオイル/塩化亜鉛水溶液界面からの高さ z が $2.3 \times 10^{-2} \text{ m}$ 、 $3.3 \times 10^{-2} \text{ m}$ 、 $4.8 \times 10^{-2} \text{ m}$ の水平面内における測定結果である。なお、シリコンオイル/塩化亜鉛水溶液界面とはガス吹込み中の定常状態でのシリコンオイル/塩化亜鉛水溶液界面であり、

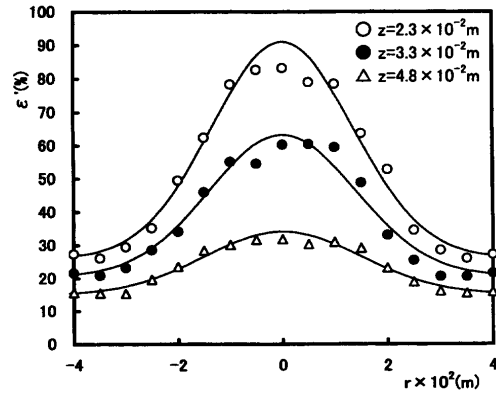


Fig. 4. Radial distributions of total ZnCl_2 solution holdup in the silicone oil layer. ($D = 12.25 \times 10^{-2} \text{ m}$, $Q = 25 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, $H_m = H_s = 12.5 \times 10^{-2} \text{ m}$)

ガス吹込み前の静止状態でのシリコンオイル/塩化亜鉛水溶液界面でないことに留意されたい。ガス吹込みによりシリコンオイル内に発生した盛上り塩化亜鉛水溶液および蓄積塩化亜鉛水溶液の体積分だけ、ガス吹込み中のシリコンオイル/塩化亜鉛水溶液界面位置はガス吹込み前に比べ若干下方へ移動する。ここではガス吹込み中の定常状態でのシリコンオイル/塩化亜鉛水溶液界面を単にシリコンオイル/塩化亜鉛水溶液界面と表記する。各測定位置においてシリコンオイル層内における塩化亜鉛水溶液のホールドアップ ϵ' は半径方向に対し正規分布となっており、また界面から遠ざかるにつれて ϵ' は急激に低下していることが分かる。 ϵ' は盛上り部の外側では一定値に収束しているが、この領域では蓄積塩化亜鉛水溶液のみのホールドアップが測定されている。すなわちこの ϵ' の収束値が式 (4) および式 (6) 中の β の値である。

気泡上昇域外の塩化亜鉛水溶液滴蓄積層の蓄積塩化亜鉛水溶液ホールドアップ β は、Fig. 5 に示すように層上端部での約10%からシリコンオイル/塩化亜鉛水溶液界面に近づくにつれ直線的に増加していき、30%を超えたあたりから増加の傾きが急になり、シリコンオイル/塩化亜鉛水溶液界面付近では約50%、シリコンオイル/塩化亜鉛水溶液界面を超えると急激に100%に漸近した。一方蓄積塩化亜鉛水溶液の無い場合、気泡上昇域外の塩化亜鉛水溶液のホールドアップはシリコンオイル/塩化亜鉛水溶液界面からの高さが1 cm以下の領域においても10%以下であった。

全体としての塩化亜鉛水溶液およびシリコンオイルの体積割合は上記のような結果となり、気泡上昇域を中心とする同心円状の盛上り塩化亜鉛水溶液分布が確認された。気泡上昇域外 (約 $r = r_B > 4 \times 10^{-2} \text{ m}$) では、前述のように ϵ' の値はほぼ一定値に収束しており、この値が式 (4) および式 (6) の β の値である。この領域において、盛上り塩化亜鉛水溶液は存在せず、蓄積塩化亜鉛水溶液のみが存在していると考えられ、したがってこの領域を塩化亜鉛水溶液滴蓄積層と呼ぶ。

Fig. 6 は Fig. 4 の縦軸を界面からの高さ z に変換したグ

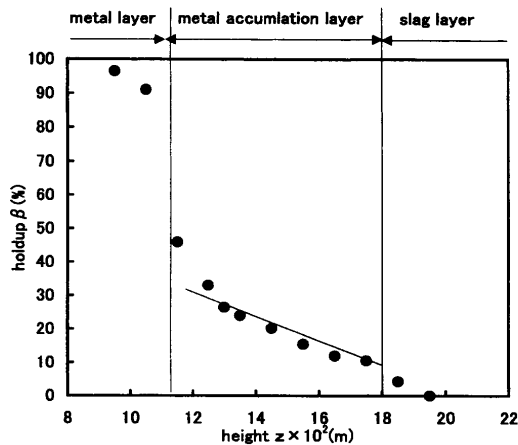


Fig. 5. Accumulated $ZnCl_2$ solution holdup in the silicone oil layer. ($D=12.25 \times 10^{-2}$ m, $Q=25 \times 10^{-6}$ m³/s, $H_m=H_s=12.5 \times 10^{-2}$ m)

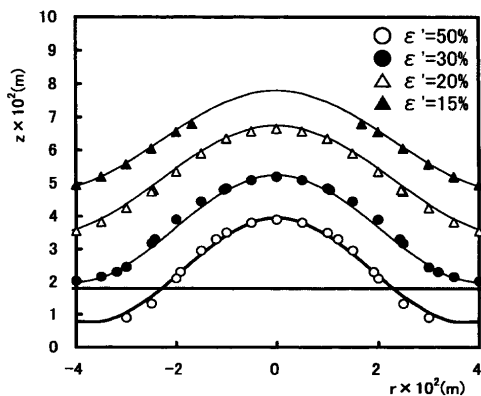


Fig. 6. Contour lines for total $ZnCl_2$ solution holdup in the silicone oil layer. ($D=12.25 \times 10^{-2}$ m, $Q=25 \times 10^{-6}$ m³/s, $H_m=H_s=12.5 \times 10^{-2}$ m)

ラフで、シリコンオイル層内における等塩化亜鉛水溶液ホールドアップ分布を示している。

3・2 盛り塩化亜鉛水溶液のホールドアップ

盛り塩化亜鉛水溶液周りの蓄積塩化亜鉛水溶液の分布について、Fig. 7 および Fig. 8 に示す2種の異なる分布を仮定した。

Fig. 7 において、蓄積塩化亜鉛水溶液はシリコンオイル/塩化亜鉛水溶液界面に平行に分布しており上方へ行くほどその蓄積量は減少する。したがって、盛り塩化亜鉛水溶液へと巻込まれる蓄積塩化亜鉛水溶液のホールドアップ β は上方へいくほど、また浴中心部へいくほど小さくなることが考えられ、この場合には前述のように、 $\eta(r)$ に式 (4) を仮定し式 (6) を用いて盛り塩化亜鉛水溶液のホールドアップ ϵ を算出した。

Fig. 8 において、蓄積塩化亜鉛水溶液の等ホールドアップ曲線は盛り部の輪郭にほぼ平行になっており、盛り部の輪郭近傍における蓄積塩化亜鉛水溶液のホールドアップ β はほぼ一様である。よって、盛り塩化亜鉛水溶液へと巻込まれる蓄積塩化亜鉛水溶液のホールドアップ β は盛り部内では一定であるとみなしてもよく、この場合、式

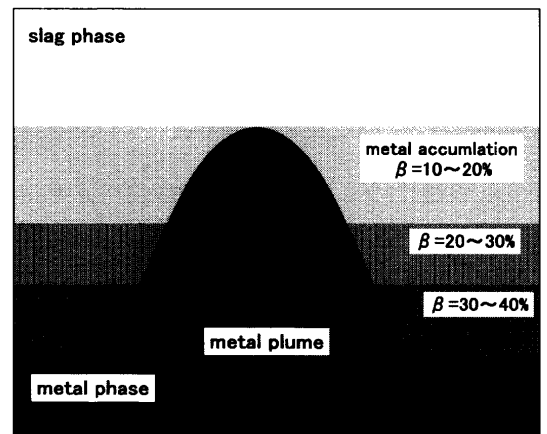


Fig. 7. Schematic of assumption (1) for $ZnCl_2$ solution plume and $ZnCl_2$ solution accumulation.

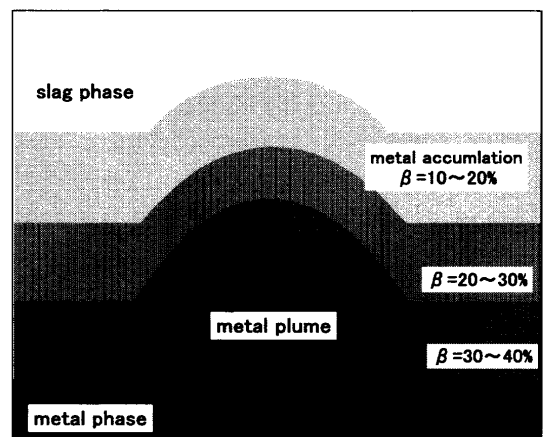


Fig. 8. Schematic of assumption (2) for $ZnCl_2$ solution plume and $ZnCl_2$ solution accumulation.

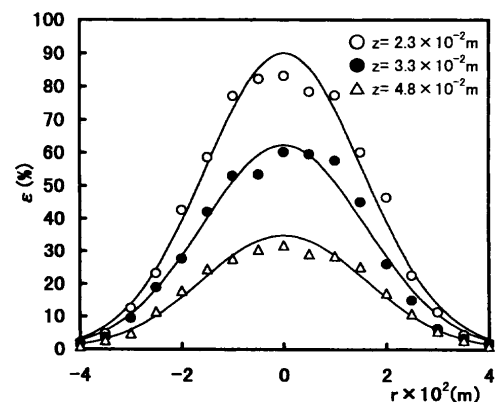


Fig. 9. Radial distributions of $ZnCl_2$ solution holdup in the silicone Oil layer (1). ($D=12.25 \times 10^{-2}$ m, $Q=25 \times 10^{-6}$ m³/s, $H_m=H_s=12.5 \times 10^{-2}$ m)

(7) を用いて盛り塩化亜鉛水溶液のホールドアップを算出した。

Fig. 9 に Fig. 4 の ϵ' から式 (6) を用いて計算した盛り塩化亜鉛水溶液のみのホールドアップ ϵ 、Fig. 10 に同様に式 (7) により算出した ϵ を示す。両図において ϵ は ϵ' と同様半径方向に対しほぼ正規分布となっていることが分かる。

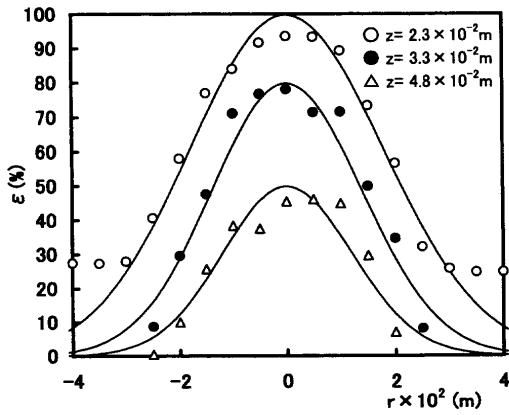


Fig. 10. Radial distributions of ZnCl₂ solution holdup in the silicone oil layer (2). ($D=12.25 \times 10^{-2}$ m, $Q=25 \times 10^{-6}$ m³/s, $H_m=H_s=12.5 \times 10^{-2}$ m)

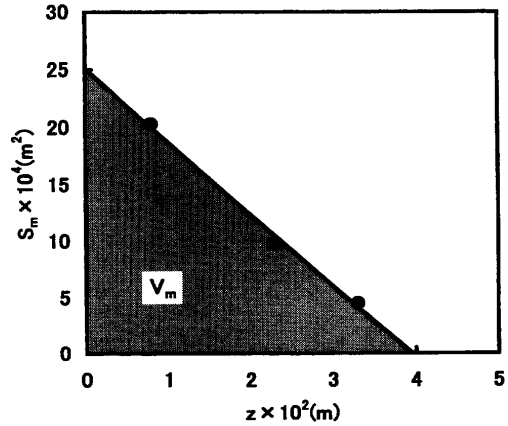


Fig. 13. Calculation method of ZnCl₂ solution volume V_m lifted up into the silicone oil layer. ($D=12.25 \times 10^{-2}$ m, $Q=25 \times 10^{-6}$ m³/s, $H_m=H_s=12.5 \times 10^{-2}$ m)

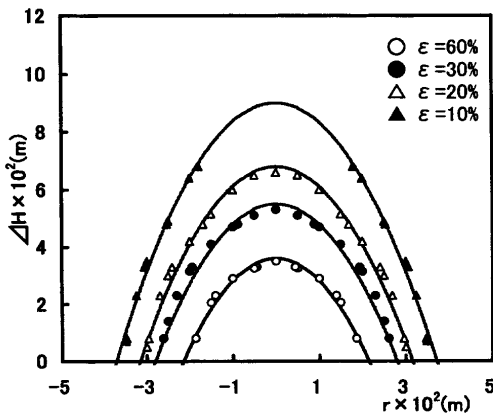


Fig. 11. Contour lines for ZnCl₂ solution holdup in the silicone oil layer (1). ($D=12.25 \times 10^{-2}$ m, $Q=25 \times 10^{-6}$ m³/s, $H_m=H_s=12.5 \times 10^{-2}$ m)

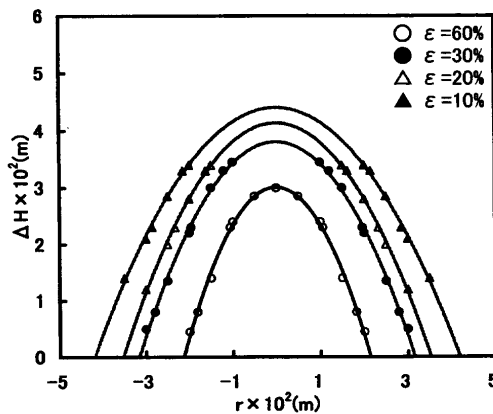


Fig. 12. Contour lines for ZnCl₂ solution holdup in the silicone oil layer (2). ($D=12.25 \times 10^{-2}$ m, $Q=25 \times 10^{-6}$ m³/s, $H_m=H_s=12.5 \times 10^{-2}$ m)

Fig.11 に式 (6) を用いた場合, Fig.12 に式 (7) を用いた場合の盛り塩化亜鉛水溶液の等ホールドアップ分布を示す。双方とも下層の塩化亜鉛水溶液は気泡の上昇に伴い上層のスラグ層内へと放物線状に盛上っていることが分かる。この盛り部から気泡が上方へ脱出する際に、気泡の後流への巻き込みにより、塩化亜鉛水溶液は気泡後部で帯状となりさらに上部へと持ち上げられる。その後帯状の塩化

亜鉛水溶液は細かい滴にちぎれ蓄積塩化亜鉛水溶液滴が形成される様子が観察された。

3・3 浴中心部での塩化亜鉛水溶液盛り高さおよび体積

Fig.11 および Fig.12 の各等ホールドアップ曲線は式 (8) に示す2次式で近似できることが分かった。

$$f(\epsilon, r) = A(\epsilon)r^2 + \Delta H(\epsilon) \dots \dots \dots (8)$$

ここでは測定誤差の大きくなる ϵ が 10% 以下の領域は考慮に入れないものとする。したがって $\epsilon=10\%$ のときの $f(\epsilon, r)$ を盛り塩化亜鉛水溶液の形状とし、そのときの浴中心における $\Delta H(\epsilon)$ を盛り高さの測定値 $\Delta H_{cl,mea}$ とする。

盛り塩化亜鉛水溶液体積 V_m は盛り塩化亜鉛水溶液のホールドアップ $\epsilon(r, z)$ を用いると式 (9) により計算できる。

$$V_m = \frac{1}{100} \int_0^{H_s} \int_0^{D/2} 2\pi r \epsilon(r, z) dr dz \dots \dots \dots (9)$$

ここで各高さに占める盛り塩化亜鉛水溶液の総面積を S_m とすると、 S_m は式 (10) のように表される。

$$S_m = \frac{1}{100} \int_0^{D/2} 2\pi r \epsilon(r, z) dr \dots \dots \dots (10)$$

$$\epsilon(r, z) = \epsilon_{cl}(z) \exp(-0.6931r^2/b_\epsilon^2) \dots \dots \dots (11)$$

ここで $\epsilon_{cl}(z)$ は容器中心軸上の値、 b_ϵ は ϵ の半値幅である。

Fig.13 に式 (10) より算出した S_m と高さ z の関係を示す。 S_m は高さ z が上昇するにつれ直線的に減少していることが分かる。図中3直線で囲まれた三角形の面積が式 (9) に示す盛り塩化亜鉛水溶液体積であり、これより得られた値を盛り塩化亜鉛水溶液体積の測定値 $V_{m,mea}$ とする。

3・4 盛り高さの考察

気泡の影響がないものとするれば、浴中心部を上昇する塩化亜鉛水溶液に関して式 (12) に示す運動エネルギーと位置エネルギーの関係が考えられる。

$$\frac{1}{2} \rho_m \bar{v}_{m,cl}^2 = (\rho_m - \rho_s) g \Delta H_{cl} \dots \dots \dots (12)$$

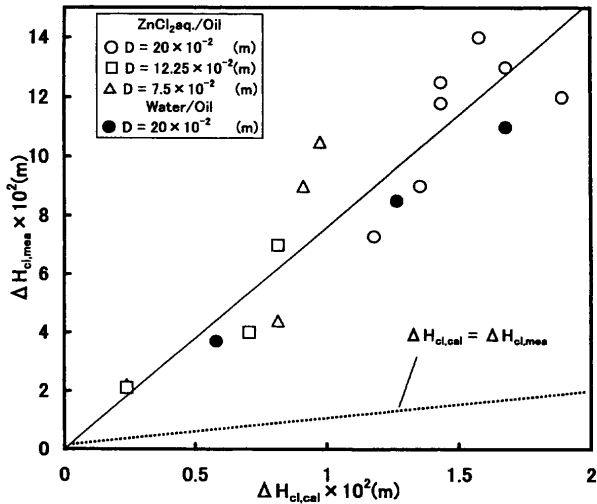


Fig. 14. Relation between measured and calculated values of ΔH_{cl} (1).

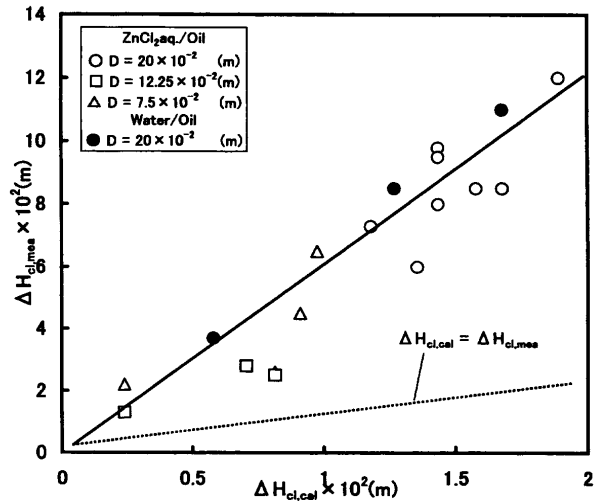


Fig. 15. Relation between measured and calculated values of ΔH_{cl} (2).

ここで ΔH_{cl} は浴中心部での塩化亜鉛水溶液上昇高さ、 $\bar{u}_{m,cl}$ はシリコンオイル/塩化亜鉛水溶液界面における塩化亜鉛水溶液の上昇速度である。

これより浴中心部の盛り高さ ΔH_{cl} は次式により表すことができる。

$$\Delta H_{cl} = \frac{\rho_m \bar{u}_{m,cl}^2}{2g(\rho_m - \rho_s)} \dots\dots\dots(13)$$

式 (13) より算出した値を塩化亜鉛水溶液の盛り高さの計算値 $\Delta H_{cl,cal}$ とする。

Fig.14 に式 (6) を用いた場合の、Fig.15 に式 (7) を用いた場合の塩化亜鉛水溶液盛り高さ ΔH_{cl} の計算値 $\Delta H_{cl,cal}$ と測定値 $\Delta H_{cl,mea}$ を比較した結果を示す。図中には水/シリコンオイル系の実験値ものせている。前述のように物性値等は Table 1 に示すとおりである。図中点線は測定値と計算値が一致するラインであるが、測定値は計算値に比べかなり大きな値となった。このことはスラグ相当層内でメタル相当液にかかる力として重量加速度以外に上昇するガスの浮力が大きく影響しているためと考えられる。メタル相当層に水を用いた場合の結果、ならびに内径の異なる容器を用いた場合の結果とも各々の図中の実線にて近似でき、メタル相当液盛り高さ ΔH_{cl} はメタル相当液動粘度、容器内径に影響されないことが分かる。

一方、Fig.15 に比べ Fig.14 の $\Delta H_{cl,mea}$ はやや大きめの値を示している。これは式 (6) において、浴中心付近では蓄積塩化亜鉛水溶液はほとんど存在しないと仮定しているが、実験においては浴中心付近にも蓄積塩化亜鉛水溶液は存在しており、その分盛り塩化亜鉛水溶液をより多く見積もったためであると考えられる。Fig.15 において、実験結果を近似した実線は点線の6倍の値となり、蓄積塩化亜鉛水溶液の有無に関わらず式 (14) に示すメタル相当液の盛り高さ ΔH_{cl} に関する実験式が得られた。

$$\Delta H_{cl} = \frac{6\rho_m \bar{u}_{m,cl}^2}{2g(\rho_m - \rho_s)} \dots\dots\dots(14)$$

3・5 盛り塩化亜鉛水溶液体積

気泡の影響がないとすれば盛り塩化亜鉛水溶液の体積 V_m は、式 (15) に示すように盛り高さ ΔH を半径方向に積分することにより得られる。

$$V_m = \int_0^R 2\pi r \Delta H dr \dots\dots\dots(15)$$

ここで R は容器半径である。なお盛り高さ ΔH は半径方向距離 r によって異なる。 ΔH の導出を以下に示す。

式 (12) より次式が得られる。

$$\Delta H = \frac{\rho_m \bar{u}_m^2}{2g(\rho_m - \rho_s)} \dots\dots\dots(16)$$

メタル相当液の上昇速度 \bar{u}_m に関して、以前の実験結果^{12,13)} より式 (17) で示す関係が知られている。

$$\bar{u}_m = \bar{u}_{m,cl} \exp\left(\frac{-0.6931r^2}{b_u^2}\right) \dots\dots\dots(17)$$

式 (17) 中の b_u はメタル相当液の上昇速度 \bar{u}_m の半値幅である。底吹きガスの場合その半値幅 b_u は式 (18) で与えられる。

$$b_u = 0.14H_m \dots\dots\dots(18)$$

以前の実験結果より、スラグ相当層内へと上昇するメタル相当液はほぼ半径 $2b_u$ の位置まで存在することが確認されている。式 (16) と式 (17) より盛り塩化亜鉛水溶液体積の式 (15) は式 (19) で表すことができる。式 (19) より計算した値を塩化亜鉛水溶液盛り体積の計算値 $V_{m,cal}$ とする。

$$V_{m,cal} = 0.022 \frac{\rho_m H_m^2 \bar{u}_{m,cl}^2}{g(\rho_m - \rho_s)} \dots\dots\dots(19)$$

Fig.16 に式 (6) を用いた場合の、Fig.17 に式 (7) を用い

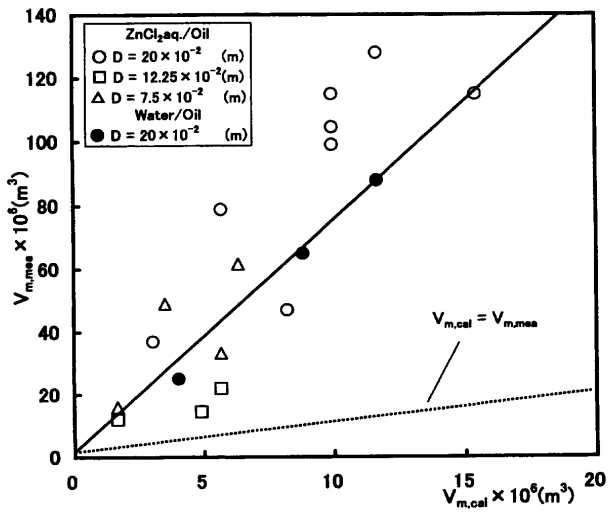


Fig. 16. Relation between measured and calculated values of V_m (1).

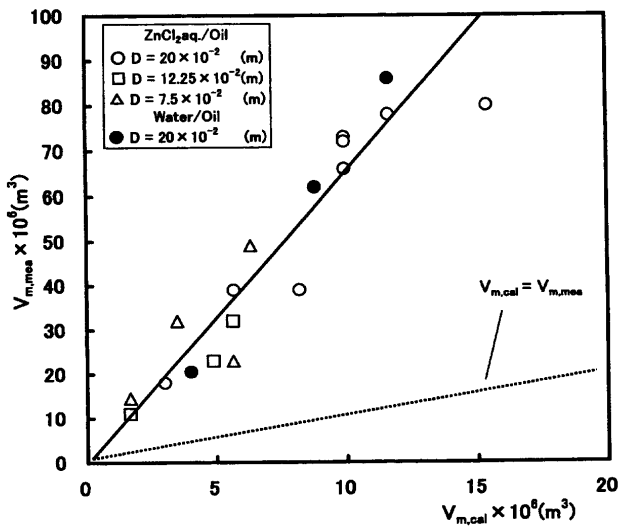


Fig. 17. Relation between measured and calculated values of V_m (2).

た場合の盛り塩化亜鉛水溶液体積 V_m の計算値 $V_{m,cal}$ と測定値 $V_{m,mea}$ を比較した結果を示す。図中点線が、測定値と計算値の一致する値である。測定値を近似した実線は点線よりかなり大きめの値を示しているが、メタル相当層に水を用いてスラグ相当層のシリコンオイルの粘度を10倍まで変化させた場合の結果ならびに、容器内径を変化させた場合の結果ともほぼ同一直線にて近似でき、盛り高さと同様、盛り体積についてもメタル相当液の動粘度および容器内径にほとんど影響されないことが確認された。ただし、測定値のばらつきは比較的大きいので、これらのパラメーターの影響の詳細については今後の課題としたい。これらの結果より、式(20)に示す盛り体積 V_m に関する予測式が得られた。

$$V_{m,cal} = 0.156 \frac{\rho_m H_m^2 \bar{v}_{m,cl}^2}{g(\rho_m - \rho_s)} \dots\dots\dots (20)$$

以上の結果より、気泡の上昇に伴いスラグ相当層内へと盛

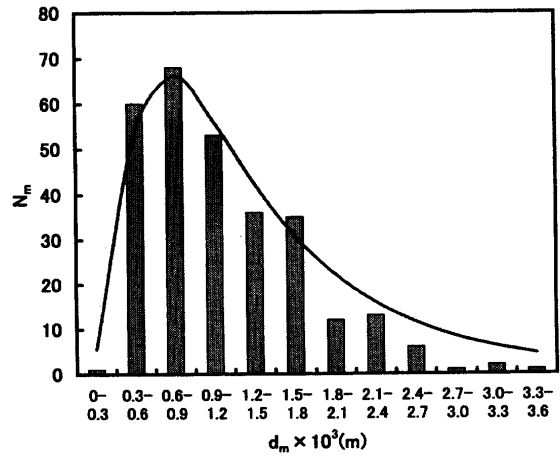


Fig. 18. Histogram of diameters of ZnCl₂ solution droplets. ($D=7.5 \times 10^{-2} m$, $Q=20 \times 10^{-6} m^3/s$, $H_m=H_s=12.5 \times 10^{-2} m$)

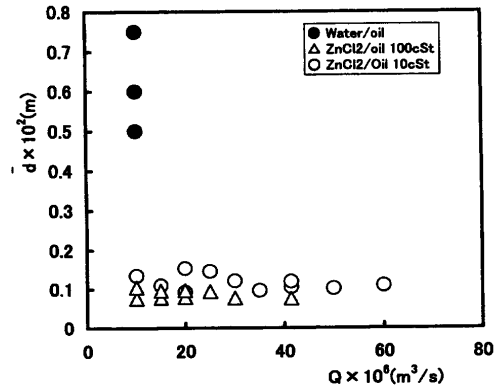


Fig. 19. Relation between mean diameter of ZnCl₂ solution droplets and gas flow rate (1).

上るメタル相当層の盛り体積およびその高さはスラグ相当層およびメタル相当層の動粘度、容器径に影響されないことが確認された。

3.6 蓄積塩化亜鉛水溶液滴

シリコンオイル層内に蓄積している蓄積塩化亜鉛水溶液滴に関して、その直径の測定を行った。塩化亜鉛水溶液滴をガラス管で吸上げ、その様子をビデオカメラにより撮影し、管内を上昇する滴の直径を測定した。ガラス管内径4mm、吸上げ体積は80mlとした。Fig.18に測定結果を頻度分布で示す。縦軸が滴の個数、横軸が滴の直径である。蓄積塩化亜鉛水溶液滴の頻度分布はほぼ対数正規分布で近似でき、その平均値(個数平均値)は約1mm~1.5mmであった。

Fig.19に蓄積塩化亜鉛水溶液滴の平均径 d と吹込みガス流量 Q との関係を示す。これよりメタル相当層に塩化亜鉛水溶液を用いた場合はメタル相当層に水を用いたときに比べ、生成する滴は非常に小さいことが分かる。

浅井¹⁵⁾の提案した非粘性理論に基づくスラグ滴発生機構によると、初めて生成するシリコンオイル滴の直径 d_{pc} は、式(21)によって表すことができる。シリコンオイル

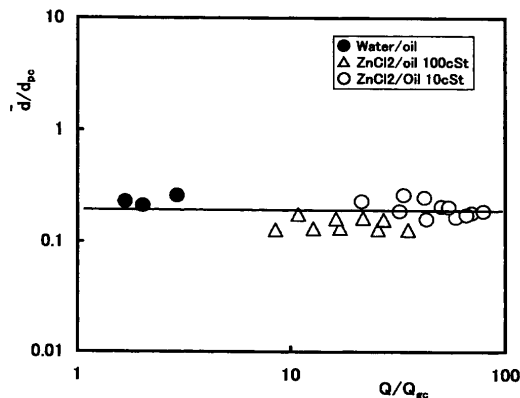


Fig. 20. Relation between mean diameter of ZnCl₂ solution droplets and gas flow rate (2).

滴の生成とほとんど同時に塩化亜鉛水溶液滴も生成する。また塩化亜鉛水溶液滴とシリコンオイル滴の大きさは比較的よく似ているので、いくぶん大胆ではあるが、塩化亜鉛水溶液滴の直径も式 (21) で記述できると仮定する。そこでメタル相当液の滴直径 \bar{d} と d_{pc} との比較を行うこととし、式 (22) に示すスラグ滴発生時の臨界ガス流量 Q_{gc} を用いて¹⁴⁾ Q を無次元化した。その結果を Fig.20 に示す。

$$d_{pc} = 2[3\sigma_{ms}/g(\rho_m - \rho_s)]^{0.5} \dots (21)$$

$$Q_{gc} = V^{4.52} (v_s/v_m)^{0.308} (H_s/D)^{-0.498} g^{-1.76} H_m^{-0.240} \dots (22)$$

$$V = (\sigma_{ms}g/\rho_s)^{0.25} \dots (23)$$

Fig.20 より生成するメタル相当層の滴は吹込みガス流量に相関が無くほぼ一定値となり、次式で表される。

$$\begin{aligned} \bar{d} &= 0.2d_{pc} \\ &= 0.69 \sqrt{\frac{\sigma_{ms}}{g(\rho_m - \rho_s)}} \dots (24) \end{aligned}$$

4. 結言

厚いシリコンオイル層を用いた円筒容器内ガス底吹き攪拌において、下層の塩化亜鉛水溶液はガス上昇に伴い上層のシリコンオイル層内へと持ち上げられる。浴中心付近のガス上昇域では、シリコンオイル/塩化亜鉛水溶液界面が放物線状にシリコンオイル層内へと盛上った。この塩化亜鉛水溶液を盛上り塩化亜鉛水溶液と表した。その周りには気泡がシリコンオイル/塩化亜鉛水溶液界面を通過する際に滴状となりシリコンオイル層内へ取込まれた塩化亜鉛水溶液滴が蓄積していた。この塩化亜鉛水溶液滴を蓄積塩化亜鉛水溶液と呼ぶ。本研究において、シリコンオイル層内における塩化亜鉛水溶液の挙動に関して以下の結論が得られた。

- (1) シリコンオイル層内の全塩化亜鉛水溶液滴ホールドアップ e' は、半径方向に対し正規分布となっている。
- (2) シリコンオイル層内への塩化亜鉛水溶液の盛上り形状は放物線状となっており、浴中心における盛上り高さ

ΔH_{cl} は次式で記述できた。

$$\Delta H_{cl} = \frac{6\rho_m \bar{u}_{m,cl}^2}{2g(\rho_m - \rho_s)} \dots (14)$$

(3) シリコンオイル層内への塩化亜鉛水溶液の盛り上がり体積は次式で記述できた。

$$V_{m,cal} = 0.156 \frac{\rho_m H_m^2 \bar{u}_{m,cl}^2}{g(\rho_m - \rho_s)} \dots (20)$$

(4) 蓄積塩化亜鉛水溶液滴の平均直径 \bar{d} は次式で記述できる。

$$\bar{d} = 0.69 \sqrt{\frac{\sigma_{ms}}{g(\rho_m - \rho_s)}} \dots (24)$$

以上の結論は、メタル相当層およびスラグ相当層の動粘度、容器内径にほとんど影響されることなく成立することが確認された。

記号

- D : 容器径 (m)
- g : 重力加速度 (m/s²)
- r : 半径方向距離 (m)
- H_m : メタル層厚さ (m)
- H_s : スラグ層厚さ (m)
- \bar{u}_m : メタルの平均上昇速度 (m/s)
- z : スラグ/メタル界面からの高さ (m)
- α : ガスホールドアップ (%)
- β : 蓄積メタルのホールドアップ (%)
- ΔH : メタル上昇高さ (m)
- e' : 全メタルホールドアップ (%)
- ϵ : 盛上りメタルホールドアップ (%)
- ρ_m : メタル密度 (kg/m³)
- ρ_s : スラグ密度 (kg/m³)
- σ_{ms} : スラグ/メタル界面張力 (kg/s²)

なお、メタル相当層、スラグ相当層の液体に対しても上と同じ表記を用いる。

文献

- 1) A.Zaidi and H.Y.Sohn: *ISIJ Int.*, **35** (1995), 234.
- 2) P.K.Iwamasa and R.J.Fruehan: *ISIJ Int.*, **36** (1996), 1319.
- 3) M.Matsuo, H.Katayama, T.Ibaraki, M.Yamauchi, M.Kanemoto and T.Ogawa: *Tetsu-to-Hagané*, **82** (1996), 725.
- 4) S.Hartland: *Trans. Inst. Chem. Eng.*, **45** (1967), T97.
- 5) M.Iguchi, K.Nozaawa and Z.Morita: *ISIJ Int.*, **31** (1991), 952.
- 6) O.J.Ilegbusi, M.Iguchi, K.Nakajima, M.Sano and M.Sakamoto: *Metall. Trans. B*, **29B** (1998), 211.
- 7) M.Iguchi, T.Nakatani and H.Ueda: *Metall. Trans. B*, **28B** (1997), 87.
- 8) M.Iguchi, K.Sasaki, K.Nakamura and K.Takahashi: *CAMP-ISIJ*, **10** (1997), 915.
- 9) Z.-H.Lin and R.I.L.Guthrie: *Metall. Trans. B*, **25B** (1994), 855.
- 10) Z.-H.Lin: Ph.D.Dissertation, McGill University, Montreal, (1997).
- 11) H.Masuda: Lecture Series on Multiphase Flow, No. 5, Jpn. Soc. Multiphase Flow, Osaka, (1990), 19.
- 12) M.A.S.C.Castero-Branco and K.Schwerdtfeger: *Metall. Trans. B*, **25B** (1994), 359.
- 13) M.Iguchi, H.Ueda and T.Uemura: *Int. J. Multiphase Flow*, **21** (1995), 861.
- 14) M.Iguchi, Y.Kuroda, R.Okada and Z.Morita: *Tetsu-to-Hagané*, **79** (1993), 569.
- 15) 浅井滋生: 第100・101回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, 東京, (1984), 67.