

論 文

UDC 669-154 : 532.529 : 532.694

溶融金属中の気泡群のガスホールドアップ および平均上昇速度*

佐 野 正 道**・森 一 美**

Gas Holdup and Average Rising Velocity of Bubble Swarms in Liquid Metal

Masamichi SANO and Kazumi MORI

Synopsis:

The gas holdup and average rising velocity of bubble swarms in a mercury bath have been studied by using an electroresistivity probe method. The column diameter was 7 cm and the bath depth was 40~70 cm. Nitrogen was blown through a nozzle (O.D.×I.D.=0.7×0.2, 0.4×0.24 cm) into the bath. The gas-flow rate was 160~1 330 (cc/sec, 1 atm). It is found that the gas holdup is 0.073~0.28 and the average bubble rising velocity is 50~100 (cm/sec). The gas holdup of the present nitrogen-mercury system is nearly equal to that of the air-water system. Equations are obtained to describe the effects of physical properties of gas and liquid on the gas holdup. The equations are used to explain the close agreement of the gas holdup between the two systems. The effects of column and nozzle diameters on the gas holdup are also examined. From theoretical analyses of the data, the gas holdup and average bubble rising velocity are estimated for the nitrogen-molten iron system.

1. 緒 言

最近、底吹き転炉、AOD 法などガス吹込みを行う精錬プロセスが種々開発されている。しかし、これらのプロセスで起こっている現象については、基礎的研究が不十分であるため、理論的解明があまり進展していないのが現状である。

当研究室では、この方面の一連の基礎的研究を行っており、これまでに気泡吹込みによる溶融銀の酸素吸収、脱酸速度¹⁾²⁾、溶融金属中の単一ノズルから生成する気泡の大きさ^{3)~5)}について報告した。

ここでは、その一環として、溶融金属中の気泡群の挙動を取上げる。実際のプロセスでは、吹込んだガスは上昇中に分裂して気泡群として挙動するが、その挙動を把握するためにはガスホールドアップを知る必要がある。

しかし、溶融金属についてはガスホールドアップの測定は従来まったく行われていない。ガスホールドアップは浴内に存在するガスの体積割合で、これによつて吹込みガスの浴内での分散状態の良否、平均気泡上昇速度、気

泡の平均浴内滞留時間を知ることができる。すなわち、ガスホールドアップは吹込みガスの利用効率、炉内状況を明らかにする上で非常に重要な因子であることがわかる。

本実験では、水銀中へ単一ノズルより窒素を高流量で吹込み、電気探針法により気泡頻度、局所ガスホールドアップを測定し、溶融金属中の吹込み気泡の分散挙動を明らかにする。さらに、容器断面平均のガスホールドアップ、平均気泡上昇速度を求め、従来の空気-水系で得られている実験結果と比較検討し、ガスホールドアップ、平均気泡上昇速度に対する容器径、ノズル径、液体の物性値などの影響を考察するとともに実際への適用性を検討する。

2. 実 験

使用した装置の概略を Fig. 1 に示した。水銀容器はステンレス製で、内径 7 cm、高さ 60, 100 cm である。容器底部にはステンレス製の上向きノズルを設置した。ノズルの外径×内径は 0.7×0.2, 0.4×0.24 cm である。

* 昭和 52 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 52 年 10 月 24 日受付 (Received Oct. 24, 1977)

** 名古屋大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Nagoya University, Furo-cho Chikusa-ku Nagoya 464)

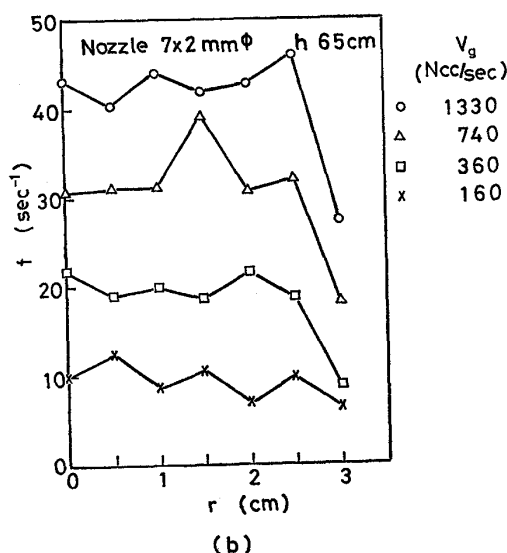
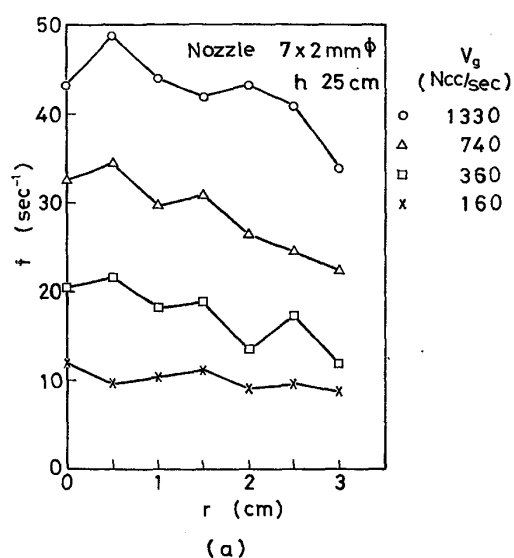


Fig. 4. Radial distribution of bubble frequency.

通する場合で探針先端に気泡が存在する時間は異なる。また、本実験におけるように高ガス流量の場合、気泡の大きさに分布が生じる。このため、Fig. 3 に示したように、種々の波形幅の気泡が検出される。局所ガスホールドアップを求めるためには、各気泡が探針先端を占めている時間、したがって各気泡の波形幅を測定しなければならない。オシログラフにはペンの移動の遅れがあり、記録は完全な矩形波を示していない。このことを考慮し、ペンが基準レベルから上方に移動した瞬間に気泡が探針先端に接触し、上のレベルあるいは途中から下方に移動した瞬間に離脱したものとして波形幅を求めた。

3. 実験結果

3.1 気泡頻度

Fig. 4 (a), (b) には、気泡頻度 f の半径方向の分布

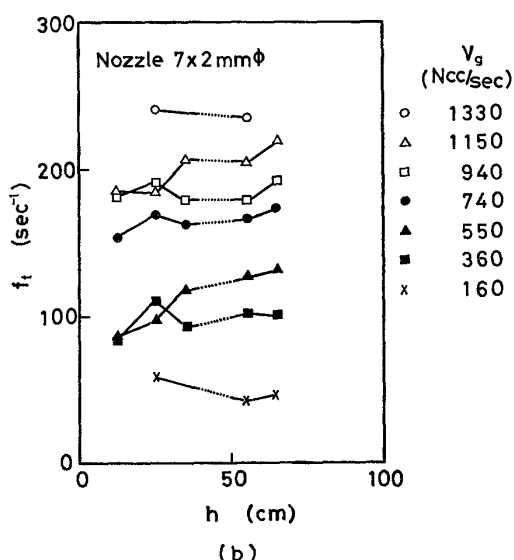
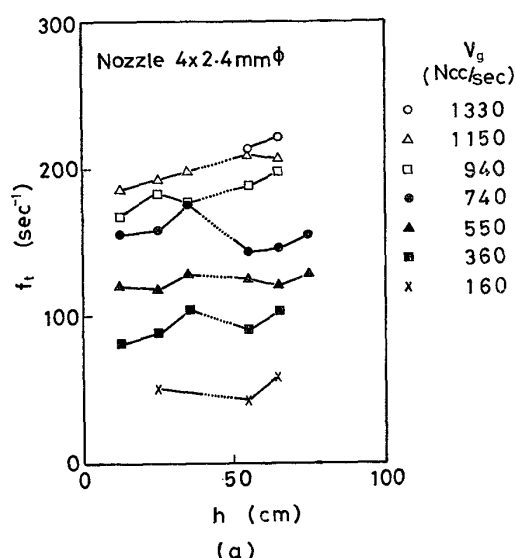


Fig. 5. Relation between total bubble frequency and distance from nozzle.

の代表例を示した。これより、 f はガス流量とともに増加していることがわかる。容器壁近傍の気泡頻度は、容器中心付近と比較すると、若干小さくなる傾向がある。

Fig. 5 (a), (b) には、半径方向の各位置 ($r=0.5, 1.0, \dots, 3.0$ cm) の 6 ケ所) で測定した気泡頻度の総和 f_t を求め、ノズルからの距離 h に対して示した。ここで、気泡は容器の半径方向に均一に分散していないため、 f_t は次式により容器断面平均の気泡頻度 f_{av} を求め*、それを 6 倍して求めた。

$$f_{av} = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R f(r) 2\pi r dr$$

* f_{av} は、各測定点をはさんで 1 cm 幅の円環を考え、その円環の面積 A_i を気泡頻度 f_i にかけて、その総和を求め、全円環の面積で割ることによって得られる。

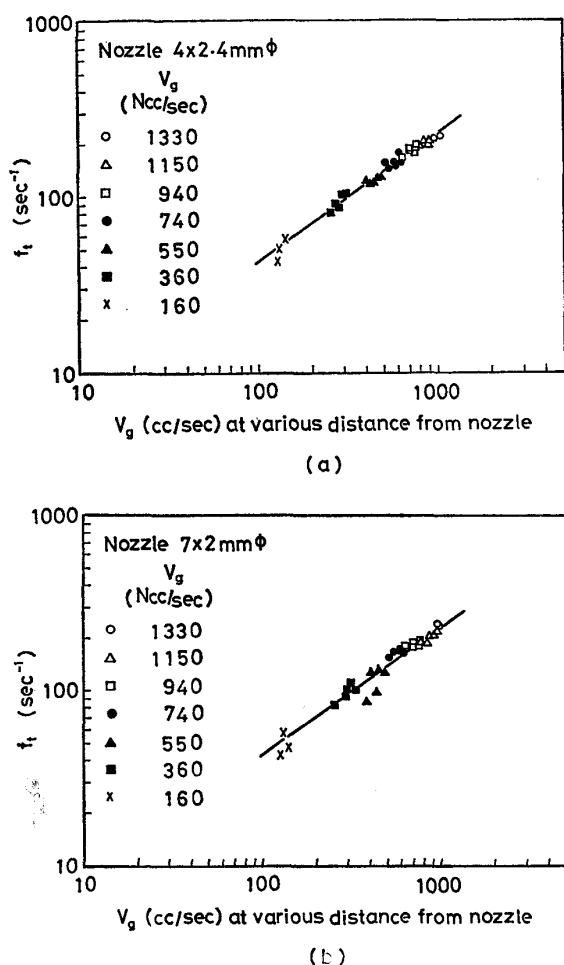


Fig. 6. Relation between total bubble frequency and gas flow rate.

$$\frac{\sum_{i=1}^6 A_i f_i}{\sum_{i=1}^6 A_i}$$

$$f_t = 6 f_{av} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $A_1, A_2, \dots, A_6$ および $f_1, f_2, \dots, f_6$ は $r = 0.5, 1.0, \dots, 3.0$ cm に対する円環の面積および気泡頻度である。実験からわかるように、 f_i は探針に衝突した気泡の頻度であるため、これから求められる f_t は測定位置における単位時間あたりの上昇気泡の総数を表わすものではなく、あくまでもみかけ上の頻度である。4.1 で述べるように、ここで f_t を求めたのは浴内における気泡の分散状態を明らかにするためである。

Fig. 5 (a), (b)よりわかるように、浴深さの異なる $h = 12 \sim 35$ cm および $55 \sim 75$ cm* (Table 1) のそれぞれの範囲で f_t は h とともに若干増加する傾向がある。これは、 h とともに静圧が減少し、ガスの体積流量が増加することによって考えられる。しかし、全体としては

* ここでは、 $h_0 = 60, 70$ cm を浴深さについての一つのグループとみなす。

f_t の変化はあまり大きくない。これは、 h についての上記の2つの範囲で静圧によるガスの体積流量の変化の範囲がほぼ等しかつたことによる。

Fig. 6 (a), (b)には、上記の結果を気泡頻度の総和 f_t と真のガス流量の関係としてまとめて示した。このガス流量は、後述するガスホールドアップを用いて、ガスを吹込んだときの浴深さ、気液混相の密度を求め、各距離 h における静圧を計算して、補正したものである。Fig. 6 から f_t とガス流量の関係は1つの直線で表わされることがわかる。すなわち、本研究で測定したノズル先端からの距離 h が 12 cm 以上のところでは、 f_t はガス流量のみに依存し、 h とは直接的な依存関係はない。

3.2 ガスホールドアップ

前項で述べたことから、吹込み気泡の分散状態したがってガスホールドアップは、本実験範囲では h とは直接の関係がないと考えられたため、ここでは $h = 65$ cm についてのみガスホールドアップを求めた。Fig. 7 (a), (b)には、 $h = 65$ cm における局所ガスホールドアップを半径方向の距離 r に対して示した。図からわかるように、局所ガスホールドアップはガス流量とともに大きくなる。同じガス流量については、局所ガスホールドアップは全体としてみると容器中心では大きく、容器壁に近づくにつれて減少するが、その他 $r = 2 \sim 2.5$ cm において極大を示す傾向がみられる。これは気泡の浮上に伴う浴内の複雑な動きを反映したものであるが、ここでは次式で表わされる容器断面平均のガスホールドアップ H をとる。

$$H = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R H(r) 2\pi r dr$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^6 A_i H_i}{\sum_{i=1}^6 A_i} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $H_1, H_2, \dots, H_6$ は $r = 0.5, 1.0, \dots, 3.0$ cm における局所ガスホールドアップである。

Fig. 8 には、断面平均のガスホールドアップ H を単位容器断面積あたりのガス流量 ($\text{cm}^3/\text{sec} \cdot \text{cm}^2$) すなわち空塔速度 V_s (cm/sec) に対して示した。図より、 H はノズル径に依存していないことがわかる。 H は空塔速度とともに増加するが、その増加率は次第に減少している。本実験の空塔速度では H は $0.073 \sim 0.28$ であつた。

4. 考 察

4.1 吹込み気泡の分散挙動

ノズルから生成した大きな気泡は不安定なため、浴中を上昇する過程で小気泡に分裂する。この最初の気泡の

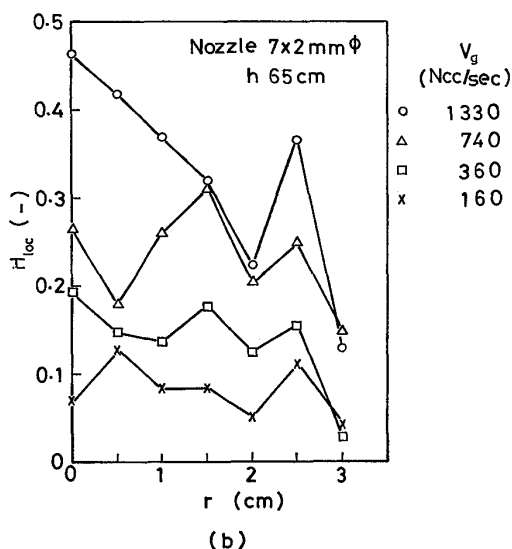
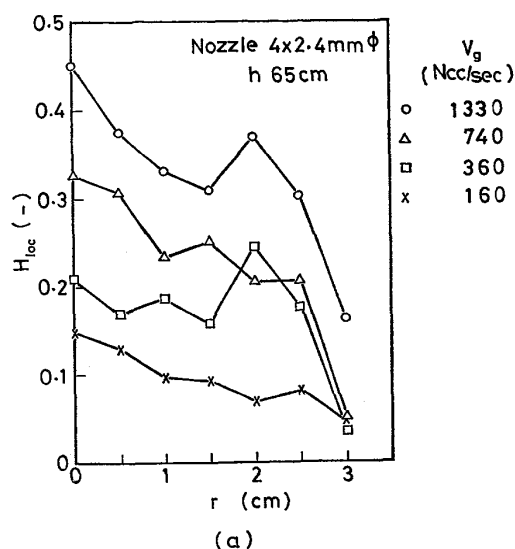
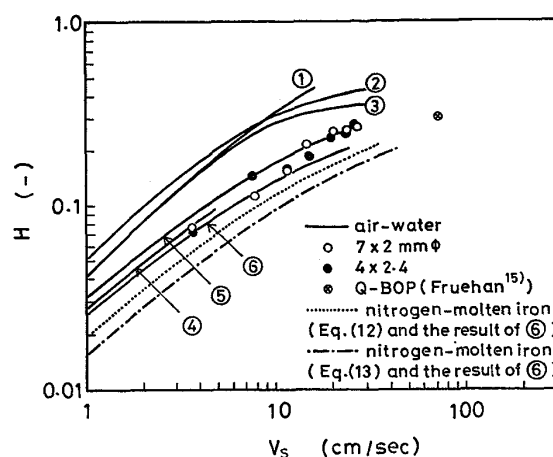


Fig. 7. Radial distribution of local gas holdup at $h=65$ cm.

大きさは熔融金属で高ガス流量の場合、液体の物性値には依存せず、ガス流量とノズル外径によつてきまる⁴⁾。本実験の流量範囲では、この場合の生成する気泡の平均径はほぼ2~4cmであつた。このような生成気泡が上昇中に分裂し、浴中に分散する過程は、気泡頻度とノズルからの距離との関係から明らかにされる。3.1の結果で示したように、 h が12cm以上で気泡頻度が h に直接的には依存していないことより、浴内のこの位置でノズルから生成した大きな気泡の分裂はかなり進んでおり、それ以上では気泡群が定期的に上昇していると推定される。なお、 $h \geq 12$ cmにおいても、分裂していないか、あるいは合体したと思われる大きな気泡が若干観察された。空気-水系においてもノズルから生成した大きな気泡は約10cm上昇して分裂するが⁶⁾、それ以上の位置に



Gas distributor	d_T (cm)	Reference
① Porous plate	14	9
② Perforated plate 4~8mm ϕ ×13	4.21	10
③ Perforated plate 1.1mm ϕ ×127	15	11
④ Perforated plate 3mm ϕ ×19	47.5	11
⑤ Single nozzle 2.2~7.8mm ϕ	7.7	8
⑥ Single nozzle 4~40mm ϕ	15.2~60.0	8

Fig. 8. Relation between gas holdup and superficial gas velocity.

においても大きな気泡が多少混在していることが観察されている⁷⁾。このような大きな気泡の体積が吹込んだガスの全体積に対して占める割合は必ずしも無視できないと考えられるが、本研究の主題にはずれるのでここでは省略する。

Fig. 6 (a)と(b)中の実線は全く同一の直線である。これは、気泡頻度の総和したがって吹込み気泡の分散状態はノズル径には無関係で、ガス流量のみによつて表わされることを示している。これから、ノズルより生成した大気泡の分裂によつて生ずる小気泡の大きさはノズル径には依存せず、したがってノズル出口でガスの持つ運動エネルギーは気泡の分裂、分散過程に大きな影響をおよぼさないことがわかる。これは、ノズル出口近傍での気体と液体との相互作用により、ガスの持つ運動エネルギーはすみやかに消費されることによると考えられる。なお、空気-水系では本実験よりさらに大幅にノズル径を変化させて実験を行つているが、吹込み気泡の分散挙動に対する影響は認められていない⁸⁾。

4.2 ガスホールドアップおよび平均気泡上昇速度

4.2.1 窒素-水銀系と空気-水系の比較

ガスホールドアップは、空塔速度の他にガス吹込み方法、気液の物性、容器径などの種々の因子によつて影響される。Fig. 8には、空気-水系で得られた代表的な実験結果(①~⑥)を示したが、実験条件によつてガスホールドアップは非常に異なつていくことがわかる。したがって、本実験結果と空気-水系の結果を比較する場合、実験条件を十分に考慮する必要がある。

本実験結果は、Fig. 8 の単一ノズルを用いた空気-水系の実験結果⑤、⑥に近い値を示している。この⑤、⑥の結果においては容器径の影響が明確にでているが、この点については後で述べる。また、ガスホールドアップに対するノズル径の影響は、本実験と同様⑤、⑥においても認められていない⁸⁾。

Fig. 8 より、窒素-水銀系と空気-水系では物性値が非常に異なるにもかかわらず、吹込み気泡は同じような挙動をすることがわかるが、この理由については4.2.3で述べる。

4.2.2 ガスホールドアップ、空塔速度、平均気泡上昇速度の関係

一般に、ガスホールドアップ H 、空塔速度 V_s 、平均気泡上昇速度 $v_{B,av}$ の間にはつぎの関係がある。

$$H = \frac{V_s}{v_{B,av}} \dots \dots \dots (3)$$

(3)式より、ある空塔速度において、平均気泡上昇速度が大きいほど、ガスホールドアップは小さくなることがわかる。

ここで、空塔速度が小さく、したがってガスホールドアップが小さい場合を考える。この場合、分散気泡相互間の干渉はほとんどなく、各気泡は次式で与えられる単一気泡の上昇速度 v_B で上昇する。

$$v_B = \sqrt{0.5d_B g} \quad Re_B > 10 \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 d_B は気泡径、 g は重力加速度、 Re_B は気泡レイノルズ数 ($= \rho_e d_B v_B / \mu_l$; ρ_l : 液密度、 μ_l : 液粘度) である。

(3)、(4)式から

$$H = \frac{V_s}{v_B} = \frac{V_s}{\sqrt{0.5d_B g}} \dots \dots \dots (5)$$

この式からわかるように、ガスホールドアップ H は分散気泡が大きくなるほど小さくなる。

いま、水の場合のガスホールドアップ、空塔速度、気泡上昇速度、気泡径を H_{H_2O} 、 V_{s,H_2O} 、 v_{B,H_2O} 、 d_{B,H_2O} とし、ある液体の場合のそれらを H_{liq} 、 $V_{s,liq}$ 、 $v_{B,liq}$ 、 $d_{B,liq}$ とすると、(5)式より次式が得られる。

$$\frac{H_{H_2O}}{V_{s,H_2O}} = \frac{H_{liq}}{V_{s,liq} \left(\frac{v_{B,H_2O}}{v_{B,liq}} \right)} = \frac{H_{liq}}{V_{s,liq} \left(\frac{d_{B,H_2O}}{d_{B,liq}} \right)^{1/2}} \dots \dots \dots (6)$$

上式より、 $V_{s,H_2O} = V_{s,liq} (d_{B,H_2O} / d_{B,liq})^{1/2}$ に対して $H_{H_2O} = H_{liq}$ になることがわかる。このことは、ガスホールドアップ H_{liq} を修正空塔速度 $V_{s,liq} (d_{B,H_2O} / d_{B,liq})^{1/2}$ に対してプロットすることにより*あらゆる液

体のガスホールドアップは H_{H_2O} と V_s の関係を表わす1つの線でまとめられることを意味する。したがって、 H_{liq} の実測値がない場合、 $(d_{B,H_2O} / d_{B,liq})$ がわかれば、これまでに多くの測定値がある H_{H_2O} の値を用いて、 H_{liq} を推定できる。

なお、空塔速度が大きく、したがってガスホールドアップが大きくなると、分散気泡相互間の干渉および局所的な液の対流が激しくなり、各気泡の上昇速度は単一気泡の上昇速度より大きくなる。このような場合に対する(6)式の適用性については次項で述べる。

4.2.3 ガスホールドアップに対する気液の物性値の影響

高ガス流量域においてノズルより生成する大気泡の大きさは気液の物性値に依存しないが⁴⁾、その大気泡が分裂することによって生ずる小気泡の大きさは気液の物性値に依存する¹²⁾¹³⁾。したがって、(5)式よりガスホールドアップは気液の物性値によって変化することが推定される。このことは、前項で述べた修正空塔速度が物性値に依存することを意味するわけで以下検討する。

CALDERBANK¹²⁾によると、気泡攪拌槽における分散気泡の体面積平均径 $d_{B,VS}$ は、

$$d_{B,VS} = 4.15 \left[\frac{\sigma^{0.6}}{(P/v)^{0.4} \rho_l^{0.2}} \right] H^{0.5} + 0.09 \dots \dots (7)$$

で表わされる。ここで、 P/v は液単位体積あたりの攪拌機の消費動力 ($g \cdot cm^2 / sec^3 \cdot cm^3$) である。(7)式から明らかに、液体の密度 ρ_l が大きく、表面張力 σ が小さいほど、気泡は小さくなる。液体中へのガス吹込みにおける液単位体積あたりの消費動力は、

$$P/v = \rho_l V_s g \dots \dots \dots (8)$$

で与えられる。(7)、(8)式より

$$d_{B,SV} - 0.09 \propto \frac{\sigma^{0.6}}{V_s^{0.4} \rho_l^{0.6}} H^{0.5} \dots \dots \dots (9)$$

となる。

一方、LEVICH¹³⁾によると、液体中で分裂する気泡の大きさは、

$$d_B \propto \frac{\sigma}{\frac{1}{2} \rho_l v_B^2} \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{1/3} \dots \dots \dots (10)$$

で表わされる。ここで、分散気泡の大きさも(10)式で表わされるものと仮定し、気泡上昇速度 v_B として(4)式を用いると、

$$d_B \propto \frac{\sigma^{1/2}}{\rho_l^{1/3} \rho_g^{1/6}} \dots \dots \dots (11)$$

を得る。この場合にも、 σ が小さく、 ρ_l が大きいほど気泡は小さくなる。

* ここで、 d_{B,H_2O} は空気-水系において $H_{H_2O} = H_{liq}$ の場合の気泡径である。

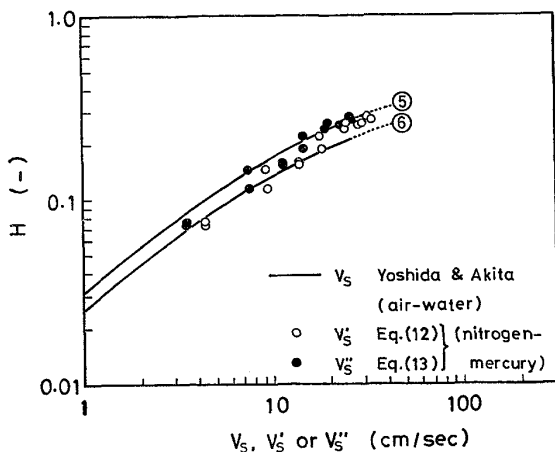


Fig. 9. Relation between gas holdup and modified superficial gas velocity.

(9)式の左辺の 0.09 を無視すると、(6)式中の修正空塔速度は次式で表わされる。

$$V'_s = V_s \left(\frac{d_{B,H_2O}}{d_{B,liq}} \right)^{1/2} = V_s \left(\frac{\sigma_{H_2O}}{\sigma_{liq}} \right)^{1/4} \left(\frac{\rho_{liq}}{\rho_{H_2O}} \right)^{1/4} \quad \dots\dots\dots (12)$$

一方、(11)式を用いると、修正空塔速度は

$$V''_s = V_s \left(\frac{d_{B,H_2O}}{d_{B,liq}} \right)^{1/2} = V_s \left(\frac{\sigma_{H_2O}}{\sigma_{liq}} \right)^{1/4} \left(\frac{\rho_{liq}}{\rho_{H_2O}} \right)^{1/6} \left(\frac{\rho_{g,liq}}{\rho_{g,H_2O}} \right)^{1/12} \quad \dots\dots\dots (13)$$

となる。

(12), (13) 式に物性値を代入すると、 V'_s, V''_s は窒素-水銀系について

$$V'_s = 1.20 V_s \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$V''_s = 0.97 V_s \quad \dots\dots\dots (15)$$

となる*。水と比較して水銀の密度、表面張力は非常に大きい、(12), (13)式からわかるようにこれら2つの物性値の影響が相殺されるため、(14), (15)式の右辺の係数は1に近くなっている。このように、修正空塔速度が空塔速度に近いことは、Fig. 8の水、水銀のガスホールドアップがほぼ等しくなることを説明するものである。

(14), (15)式の修正空塔速度 V'_s, V''_s を用いて、4.2.2 で述べた方法により本実験結果を整理し、空気-水系の実験結果⑤、⑥とともに Fig. 9 に示した。このうち、データがそろっている空塔速度が大きいところをみると、本研究の結果は、容器径が本実験とほぼ同じである⑥に一致している、このことは(12), (13)式の修正空

塔速度を通してガスホールドアップと物性値の関係を表わす理論が妥当なことを示している。また、空気-水系の実験結果⑤との一致より本実験の水銀の場合も容器径の影響を受けていることが推定される**。空塔速度の小さいところ ($V_s < \sim 15$ cm/sec) では、本実験結果にはばらつきがあり、容器径の影響は必ずしも明らかでない。この原因については判然としないが、一つには本実験の測定法に起因していると考えられる。これを改善するためには、さらに細かい気泡を検出すること、および測定時間を本実験より長くすることなどが必要である。なお、Fig. 9においてガスホールドアップと修正空塔速度の関係は(12), (13)式のいずれを用いてもあまり変わらず、いずれの式がより妥当であるかを定めることはできない。

(6), (12), (13)式は空塔速度が比較的小さい場合に対して導かれたものであるが、Fig. 9より、本実験のように空塔速度が大きく、分散気泡相互間の干渉および局所的な液の対流が激しい場合にも適用できることがわかる。

4.2.4 窒素-溶鉄系のガスホールドアップ

Fig. 8 に示した空気-水系の実験のうち、比較的大きい容器径で単一ノズルを用いた実験結果⑥と(12), (13)式より窒素-溶鉄系 ($\rho_l = 7$ g/cm³, $\sigma = 1500$ dyn/cm, $\rho_g = 0.00027$ g/cm³ (1600°C, 静圧1.5 atm)) のガスホールドアップを推定し、Fig. 8 に示した。溶鉄の場合、水、水銀と比較して、表面張力が非常に大きく、分散気泡もかなり大きくなるため、ガスホールドアップは逆に小さくなることがわかる。

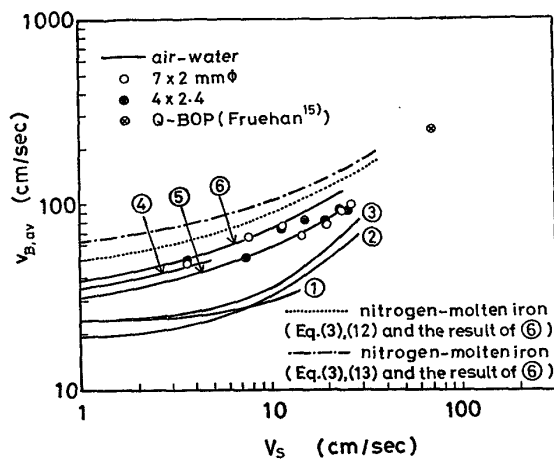
4.2.5 平均気泡上昇速度

ガスホールドアップ H と空塔速度 V_s の関係がわかれば、(3)式より気泡群の平均上昇速度 $v_{B,av}$ が求められる。Fig. 10 は、Fig. 8 に示した空気-水系、窒素-水銀系の実験結果から求めた気泡群の平均上昇速度である。本実験の空塔速度 (3.6~27 cm/sec) に対する水銀中の平均気泡上昇速度は 50~100 cm/sec であった。ただし、これらの値には容器径からの若干の影響が含まれている。

窒素-溶鉄系については、Fig. 8 に示したガスホールドアップの推定値より $v_{B,av}$ を求め、Fig. 10 に示した。窒素気泡群の平均上昇速度は、上記の空塔速度の範囲においては 60~160 cm/sec であり、かなり大きいことが推定された。

* 本実験の場合、ガスホールドアップの測定位置での静圧は 1.15~1.33 atm で、ここではその平均値 1.24 atm をとり、 ρ_{N_2} を計算した。また、水の場合、静水圧を 1.5 mH₂O とし、その平均をとって静圧を 1.08 atm とし、 ρ_{air} を計算した。

** 空気-水系の場合、ガスホールドアップは、容器径が 10 cm 以下では容器壁の影響を受けて大きくなる傾向があるが、10 cm 以上では影響を受けず一定になる⁽¹⁴⁾。



①～⑥：referred to Fig. 8.

Fig. 10. Relation between average bubble rising velocity and superficial gas velocity.

4.3 実際のプロセスへの適用

以上の研究から、溶融金属中の気泡の分散は本質的には水の場合と同じ挙動をすることが明らかになった。このことは、実際の冶金プロセスにおけるガスホールドアップや平均気泡上昇速度も基本的には水の場合の結果をもとにして考えることができることを示している。

従来、空気-水系で行われた多数の研究のうち、吉田、秋田⁸⁾の実験はもつとも広範囲な条件で行っており、とくに容器径が15 cm以上ではガスホールドアップは容器径に依存しないこと、また4～40 mmの範囲でノズル径がガスホールドアップに影響をおよぼさないなどの結果は実際の参考になる。また、多数ノズルについて実験した吉留¹¹⁾の研究と上記吉田らの研究から、ノズル1本あたりの容器断面積が、容器径が10 cm以上の断面積に相当する場合、ガスホールドアップに対するノズル本数の影響は大きくないと推定されるが、これも実際に適用できよう。

Fig. 8の破線で示したのは、窒素-溶鉄系について、吉田、秋田⁸⁾の実験したガスホールドアップが容器径に依存しない場合の結果⑥から推定したガスホールドアップと空塔速度の関係であつたが、製鋼プロセスを対象とした一つの推算データといえる。

FRUEHAN¹⁵⁾は、吉田、秋田の実験結果⁸⁾を外挿し、30 t Q-BOPで空塔速度70 cm/secにおけるガスホールドアップおよび平均気泡上昇速度は各々0.33, 250 cm/secであると推定している。これらの値は、Fig. 8, 10に示したが、上記の溶鉄についての推算結果からみれば、ほぼ妥当な値であるといえる。

5. 結 論

水銀中の単一ノズルより窒素を高流量(160～1330 Ncc/sec)で吹込み、電気探針法により気泡頻度、ガスホールドアップを測定し、つぎの結論を得た。

(1) 浴内における気泡の分散状態は、ノズルからの距離 h が12 cm以上で、ガス流量のみに依存し、 h とは直接的な依存関係はない。

(2) 気泡頻度、ガスホールドアップは容器の半径方向に分布があり、中心付近では大きく、壁付近では小さい。

(3) 気泡頻度、ガスホールドアップはノズル径には無関係である。したがって、浴内の気泡の分散状態は吹込み時にガスのもつ運動量には無関係である。

(4) 窒素-水銀系と空気-水系のガスホールドアップ、平均気泡上昇速度は同一の実験条件下ではほぼ一致する。

(5) ガスホールドアップに対する気液の物性値の影響を定量的に記述する式を導き、前項の一致を説明した。

(6) 窒素-溶鉄系についてガスホールドアップ、平均気泡上昇速度を推定した。

記 号

A_i : (1)式における円環の面積	(cm ²)
d_B : 気泡径	(cm)
$d_{B,vs}$: 体積平均気泡径	(cm)
d_n : ノズル径	(cm)
d_{ni} : ノズル内径	(cm)
d_{no} : ノズル外径	(cm)
d_T : 容器直径	(cm)
F_r' : 修正フルード数 ($=\rho_g u_0^2 / g(\rho_l - \rho_g)d_{ni}$)	(—)
f : 気泡頻度	(1/sec)
f_{av} : 容器断面平均の気泡頻度	(1/sec)
f_t : 気泡頻度の総和 ($=6f_{av}$)	(1/sec)
g : 重力加速度	(cm/sec ²)
H : 容器断面平均のガスホールドアップ	(—)
H_{loc} : 局所ガスホールドアップ	(—)
h : ノズル先端からの垂直方向の距離	(cm)
h_0 : 水銀浴深さ	(cm)
P/v : 液単位体積あたりの攪拌機またはガス吹込みにおける消費動力	(g·cm ² /sec ³ ·cm ³)
R : 容器半径	(cm)
Re_B : 気泡レイノルズ数 ($=\rho_l d_B v_B / \mu_l$)	(—)
r : 容器半径方向距離	(cm)
t : 時間	(sec)
u_0 : ノズル出口でのガス線速度	(cm/sec)
v_B : 単一気泡の上昇速度	(cm/sec)
$v_{B,av}$: 平均気泡上昇速度	(cm/sec)
V_g : ガス流量	(cm ³ /sec)
V_s : 空塔速度	(cm/sec)
V_s', V_s'' : (12), (13)式で定義される修正空塔速度	

ρ_g : ガス密度	(cm/sec)
ρ_l : 液密度	(g/cm ³)
μ_l : 液粘度	(g/cm ³)
σ : 表面張力	(g/cm·sec)
	(dyn/cm)

文 献

- 1) 森 一美, 佐野正道, 菱田 護, 鈴木 鼎: 鉄と鋼, 55 (1969), p. 1142
- 2) 森 一美, 佐野正道, 星野秀夫: 鉄と鋼, 61 (1975), p. 182
- 3) 佐野正道, 森 一美: 鉄と鋼, 60(1974), p. 348
- 4) M. SANO, K. MORI, and Y. FUJITA: Met. Trans., 7B (1976), p. 300
- 5) M. SANO, K. MORI, and T. SATO: 鉄と鋼, 63 (1977), p. 2338
- 6) I. LEIBSON, E. G. HOLCOMB, A. G. CACOSO, and J. J. JACMIC: AIChE Journal, 2(1956), p. 296
- 7) G. D. TOWELL, C. D. STRAND, and G. H. ACKERMAN: AIChE Journal Symposium Series, No. 10 (1965), p. 97
- 8) F. YOSHIDA and K. AKITA: AIChE Journal, 11 (1965), p. 9
- 9) A. S. AFSCHAR, M. DIBOUN, and K. SCHUGERL: Chem. Eng. Sci., 23 (1968), p. 253
- 10) 只木楨力, 前田四郎: 化学工学, 28 (1964), p. 270
- 11) 吉留 浩: 化学工学, 27 (1963), p. 27
- 12) P. H. CALDERBANK: Trans. Inst. Chem. Engrs., 36 (1958), p. 443
- 13) V. G. LEVICH: Physicochemical Hydrodynamics, (1962), [Prentice-Hall]
- 14) G. A. HUGHMARK: I & EC Process Design and Development, 6 (1967), p. 218
- 15) R. J. FRUEHAN: Ironmaking and Steelmaking, 3 (1976), p. 33