

減圧した円筒容器内における 気泡の挙動に関する水モデル実験

井口 学*・千原 知幸*²・倉永 知明*³・上田 洋*²・小谷 茂*⁴・森田 善一郎*⁵

Water Model Experiment on the Bubble Behavior in a Cylindrical Vessel under Reduced Pressures
Manabu IGUCHI, Tomoyuki CHIHARA, Tomoaki KURANAGA, Hiroshi UEDA, Shigeru KODANI and Zen-ichiro MORITA

Synopsis : As a fundamental study on the RH and DH degassing processes, air was injected into a cylindrical water bath under a reduced surface pressure through a centered single-hole bottom nozzle. The shape of bubbles during expansion near the nozzle and the subsequent dispersion of the bubbles in the course of rising in the bath were observed using a high-speed video camera. The bubble characteristics such as gas holdup, bubble frequency, mean bubble rising velocity, mean bubble diameter were measured with a two-needle electro-resistivity probe.

The frequency of bubbles generated at the nozzle exit under reduced pressure almost agreed with that formed under the atmospheric pressure and the same mass flow rate. Accordingly the effect of reduced pressure on the frequency of bubble formation is negligible. Bubbles generated under reduced pressures expanded near the nozzle up to the volume associated with the hydrostatic pressure. The bubble characteristics in the region away from the nozzle were satisfactorily approximated by those observed for gas injection under the atmospheric surface pressure and the same volumetric gas flow rate.

The total interfacial area between bubbles and liquid under reduced pressures was also determined as one of influential parameters for the metallurgical reactions occurring in a bath with gas injection. It was dependent on the square root of the gas flow rate after expansion, and an empirical equation of it was proposed.

Key words : steelmaking ; RH degassing process ; gas injection ; reduced pressure ; water model experiment ; electro-resistivity probe ; gas holdup ; bubble rising velocity.

1. 緒言

近年、高品質で清浄な鋼の需要の増加に伴い、RH、DH等の減圧を利用した通気攪拌精錬プロセスが広く用いられており、脱炭や脱窒等が行われている¹⁾²⁾。このようなプロセスの基礎的研究として、モデル実験による浴内の液体の流動特性^{3)~6)}、気液間の反応容量係数^{7)~11)}、均一混合時間¹¹⁾などに関する活発な研究がなされており、実操業に参考となる多くの貴重な知見が得られている。しかしながら、上記諸特性と深い関係を有する気泡の分散状態を特徴付ける減圧下のガスホールドアップ、気泡頻度、平均気泡上昇速度、平均気泡径などの気泡特性に関する知見は乏しい¹²⁾。

本研究では、底吹き円筒容器内の水-空気系コールドモデルに着目し、減圧下での気泡特性を電気探針法と高速度ビデオカメラを用いて明らかにすることを目的とした。また気液間の冶金反応を論じる上で基本的かつ重要な量である気液界面積の評価法も示した。

2. 実験装置と実験条件

実験装置の概要をFig. 1に示す。容器は内径 D が20cmの亚克力製円筒容器で、高さ H は40cmである。浴深 H_L を25cmとし、浴底部の中央に設けた内径 $d_{n1}=0.2$ cmの単孔ノズルから質量流量計で流量制御した空気を吹き込んだ。容器の上部には外気圧と遮断するために蓋を設け、真空ポンプにより容器内を減圧した。また容器内の浴表面より上の空間の圧力 P_g はU字管マンノメーターを用いて測定し、一定に保った。座標の原点はノズル出口の中心にとり、軸方向座標を z で、半径方向座標を r で表した。なお、旋回があると現象が複雑になるので¹²⁾、今回は旋回のない上記25cmの浴深に着目した。

圧力 P_g は、浴内で蒸気キャビテーションが起こらず、安定な実験の行える範囲に設定した。すなわち、気泡生成頻度の測定は $P_g \geq 5.9$ kPaの範囲で、電気探針による気泡特性の測定は0.14atm(14kPa)で行った。実操業では1 Torr

平成5年12月27日受付 平成6年7月8日受理 (Received on Dec. 27, 1993; Accepted on July 8, 1994)

* 大阪大学工学部 (Faculty of Engineering, Osaka University, 2-1 Yamadaoka Suita 565)

* 2 大阪大学大学院生 (Graduate Student, Osaka University)

* 3 大阪大学学生 (現: 東京大学大学院生) (Student, Osaka University, now Graduate Student, The University of Tokyo)

* 4 大阪大学学生 (現: 日新製鋼(株)) (Student, Osaka University, now Nisshin Steel Co., Ltd.)

* 5 大阪大学工学部 (現: 住友金属工業(株)) (Faculty of Engineering, Osaka University, now Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

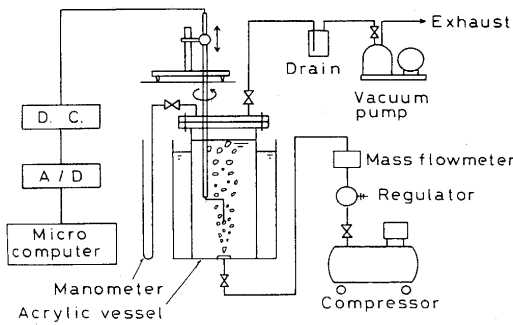


Fig. 1. Experimental apparatus.

(0.13kPa)程度になっているので、この圧力では実作業のモデルとしてはもちろん十分ではないが¹¹⁾、定量的にはともかく、定性的には減圧の効果を捉えることができると考えている。気泡特性の測定に際しては、減圧時の吹き込みガス流量 Q_g を41.4, 20.0, 10.0Ncm³/sとした。これらをTable 1に示すようにrun 1, 4, 7としている。

減圧した場合の気泡特性と比較するために常圧の1.00atm (101kPa)での実験を行った。吹き込みガス流量としては、Table 1に示すようにrun 1と4に対しては2通りの、run 7に対しては1通りの吹き込み方法を選択した。まず常圧下の第一の実験条件として、減圧した場合のノズルを通過する質量流量と等しい41.4Ncm³/sを吹き込んだ場合(run 2)を選んだ。また容器内の圧力 P_s が0.14atm (14kPa)のとき、ノズルから41.4Ncm³/sの流量で吹き込まれた空気が、各軸位置における静水圧に対応する体積まで膨張しながら上昇すると仮定すれば、ノズル出口での体積流量は252cm³/s、 $z=12.5$ cmでは272cm³/s、 $z=25$ cmの浴表面では296cm³/sとなり、体積流量は軸方向に増加する。そこで、常圧下で吹き込むガス流量が、減圧下の上記仮想的な体積流量に各軸位置で一致するように流量を調整した。これが第二の実験条件(run 3)である。run 4に対する第一と第二の実験条件がそれぞれrun 5と6で、run 7に対する第二の実験条件がrun 8で表されている。

なおノズル内の流速と音速との比として定義されるマッハ数 M が1を越えるとバブリングからジェットイングへと流動状態が変化するので¹³⁾、本実験は $M < 0.4$ の範囲で行っている。

高速度ビデオカメラを用いて浴内の気泡の形状と分散状況を毎秒250コマで撮影した。また気泡特性については、2

Table 1. Experimental conditions.

run	Q_g (Ncm ³ /s)	P_s (atm)	P_s (kPa)
1	41.4	0.14	14
2	41.4	1.00	101
3	258~296	1.00	101
4	20.0	0.14	14
5	20.0	1.00	101
6	125~143	1.00	101
7	10.0	0.14	14
8	62.4~71.4	1.00	101

針の電気探針法によりガスホールドアップ α 、気泡頻度 f_B 、平均気泡上昇速度 \bar{u}_B 、平均気泡貫通距離 \bar{L}_B を、中心軸上ならびに半径方向について測定した。2針の電気探針システムからの出力信号を各測定点につき約2分間にわたって、サンプリング周波数5kHzでA/D変換し、パーソナルコンピュータを用いて処理した。

3. 実験結果と考察

3・1 高速度ビデオカメラによる観察

高速度ビデオカメラを用いて撮影したノズル出口での気泡生成と上昇時の気泡の分散状況をFig. 2に模式的に示す。現在のところ理由は明らかでないが、減圧した場合の気泡はノズル出口で半径方向に膨張しやすく、上昇するにつれて形を崩していき、分裂する¹¹⁾。それに対して常圧下で流量296Ncm³/sを吹き込んだ場合、生成した気泡は縦長に変形し、ノズル近傍でも分裂しながら上昇する。常圧下の流量41.4Ncm³/sの場合の気泡は減圧した場合に比べて明らかに小さく、上昇にとまなう変形や分裂は顕著でない。ビデオ画像から判断するかぎり、減圧した浴内での気泡の膨張はノズル近傍($z < 10$ cm)でほぼ完了しているとみなしてよい。なおFig. 2中の浴表面近傍で減圧下の気泡は一つの大きな気泡のようにみえるが、実際は多くの気泡が重なり合っている。

Fig. 2には高速度ビデオカメラで撮影した画像から求めたノズル出口での気泡生成頻度も示している。減圧した浴内の気泡生成頻度はノズル通過質量流量を等しくした常圧下の41.4Ncm³/sの場合の値によく似ている。常圧下で296Ncm³/sの空気を吹き込んだ場合の気泡生成頻度は減圧下の約2.8倍であった。

そこで気泡生成頻度に及ぼす減圧の効果をみるために、 $H_L=25$ cmの浴深に対して5段階の減圧条件下で高速度ビデオカメラによる観察を行った。その結果をFig. 3に示す。減圧下の気泡生成頻度は常圧下の値に±10%の偏差で一致しており、減圧の効果はほとんど無いといえる。

著者らは前に、水だけでなく溶鉄などの高温溶融金属中

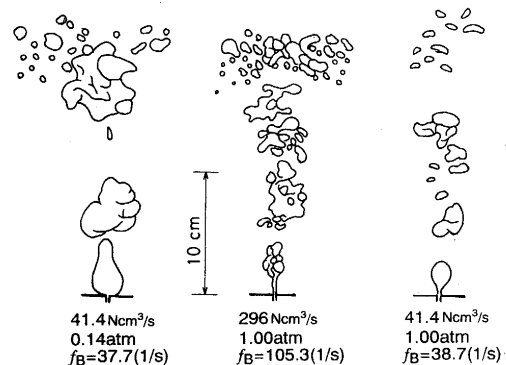


Fig. 2. Schematic of the dispersion of bubbles in the bath.

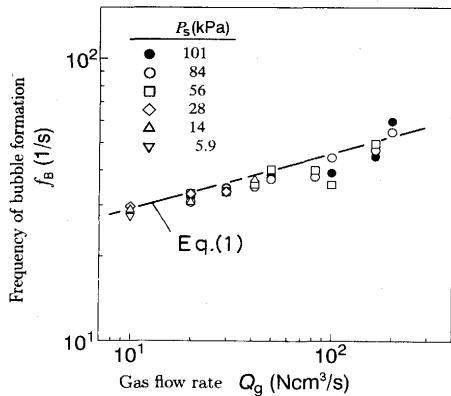


Fig. 3. Frequency of bubble formation as a function of reduced pressure and gas flow rate.

のノズルからの気泡生成頻度 f_B に対しても適用できる式として、次の実験式を提案した¹⁴⁾。

$$f_B = 1.06 \left(\frac{\rho_L g^3}{\sigma} \right)^{1/4} \left(\frac{\rho_g}{\rho_L} \right)^{1/5} \left[\frac{(Q_g^2/g)^{1/5}}{d_{n1}} \right]^{1/2} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 ρ_L と ρ_g は液体とガスの密度、 g は重力加速度、 σ は表面張力、 d_{n1} はノズル内径である。Fig. 3において測定値と式(1)との一致は比較的良好である。また式(1)で $\rho_g Q_g$ は $\rho_g Q_g$ という積の形で表される。これは質量流量にほかならない。この事実は、気泡の生成はノズルの出口ごく近傍の流体力学的不安定によって起こることを示唆している。

浴表面近傍の様子についても高速度ビデオカメラで観察したが、減圧した41.4Ncm³/sの場合の浴表面の振動は常圧下で296Ncm³/sの空気を吹き込んだ場合よりも激しかった。これは減圧下の方が少ない頻度で大きな気泡が生成されるため、液体が上下方向に大きな振幅と低い周波数で揺さられるからである。減圧によってスプラッシュが顕著に増加する事実⁴⁾はこのような浴振動と深い関係がある。

3・2 気泡特性の中心軸上分布

まずrun 1~3の結果について述べる。

3・2・1 ガスホールドアップ

単位体積中に気泡が占める割合を表すガスホールドアップ α の中心軸上分布をFig. 4に示す。白丸が減圧した場合(run 1)、黒丸と黒三角がそれぞれ常圧下で41.4Ncm³/s(run 2)と258~296Ncm³/sの空気を吹き込んだ場合(run 3)の測定値を表す。

減圧した浴内のノズル出口近傍における α_{cl} は、常圧下のrun 3の場合よりもやや小さいが、ノズルから離れるにしたがって、run 3の値に近づいていく。

3・2・2 気泡頻度

気泡頻度の中心軸上分布を α_{cl} と同じくFig. 4に示す。高速度ビデオカメラを用いて求めた減圧時の気泡頻度は、既に述べたようにノズル近傍では、常圧下で流量41.4Ncm³/sの空気を吹き込んだ場合(run 2)に近い値をとるが、気泡の分裂により一度増加したのち、気泡の半径方向への分散に伴って減少しはじめ、浴の上部ではrun 3の値に近づいていく。

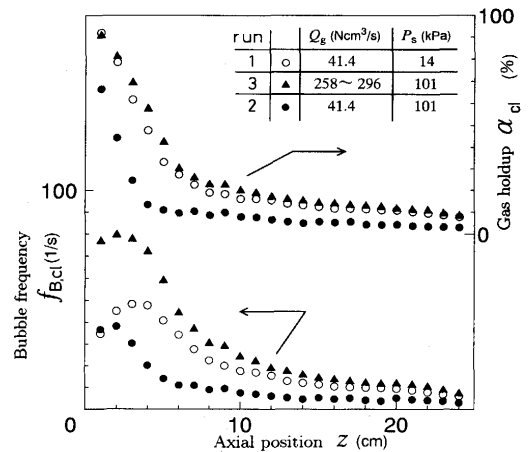


Fig. 4. Axial distributions of gas holdup and bubble frequency on the centerline of the bath for runs 1 through 3.

3・2・3 平均気泡上昇速度

平均気泡上昇速度の中心軸上値 $\bar{u}_{B,cl}$ の分布をFig. 5に示す。本電気探針システムでは、気泡の上半分に着目して $\bar{u}_{B,cl}$ を求めるようになっているが、常圧下の吹き込みの場合はノズルを離脱して上昇中の静水圧変化に伴う気泡の膨張はほとんど無視でき、測定された $\bar{u}_{B,cl}$ は字義どおり上昇速度そのものを表す。減圧下の吹き込みの場合にも、ノズルから離れたところでは気泡の膨張が上昇速度の測定値に及ぼす影響は問題にならないが、ノズル近傍の上昇速度には気泡表面の膨張速度の寄与も含まれている可能性がある。

$\bar{u}_{B,cl}$ はノズルからの軸方向距離が約4 cmを過ぎると常圧下のrun 3の場合と似た値をとるようになる。ガスホールドアップの測定結果と合わせて考えれば、 $z < 10$ cmの領域で気泡は静水圧から計算される体積までほぼ膨張しているとみなしてよい。このことは高速度ビデオカメラによる観察結果とも一致している。

3・2・4 平均気泡貫通距離

平均気泡貫通距離の中心軸上値 $\bar{L}_{B,cl}$ の分布を $\bar{u}_{B,cl}$ と同じく

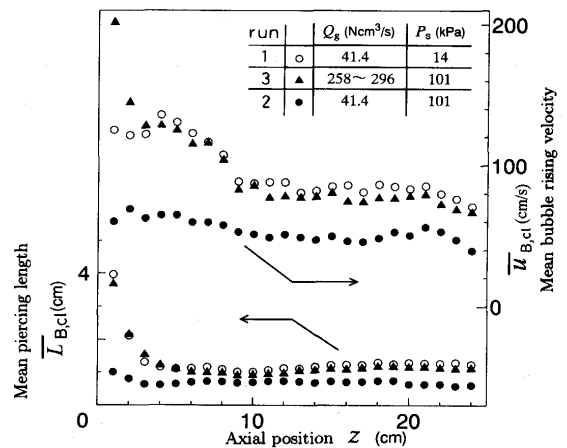


Fig. 5. Axial distributions of mean bubble rising velocity and mean piercing length on the centerline of the bath for runs 1 through 3.

Fig. 5に示す。ノズルごく近傍では気泡の膨張の影響により、 $\bar{L}_{B,cl}$ は大きな値をとるが、気泡が上昇しながら分裂するにつれて小さくなっていく。浴上部における $\bar{L}_{B,cl}$ は常圧下のrun 3の場合よりもやや大きい。

3・3 気泡特性の半径方向分布

気泡特性の半径方向分布の測定はノズル出口から5, 10, 15, 18, 20cmの軸位置で行った。一例として $z=15\text{cm}$ での測定値をFig. 6, 7に示す。

常圧下のガスホールドアップ α と気泡頻度 f_B の半径方向分布は次式で表される正規分布に従うことが知られている¹⁵⁾¹⁶⁾。

$$\alpha = \alpha_{cl} \exp[-\ln 2 \cdot r^2 / b_\alpha^2] \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$f_B = f_{B,cl} \exp[-\ln 2 \cdot r^2 / b_f^2] \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 α_{cl} と $f_{B,cl}$ は中心軸上値、 b_α と b_f は半値半幅である。

減圧下の α と f_B の半径方向分布も図中に実線で示した正規分布に従うことが分った。

run 1の α と f_B はともに中心軸近傍($r=0$)ではrun 3の測定値よりも小さいが、 r が大きくなるにつれてrun 3の場合よりもやや大きくなる。すなわち高速度ビデオカメラで観察されたように、減圧下の吹き込みのほうが、半径方向へ

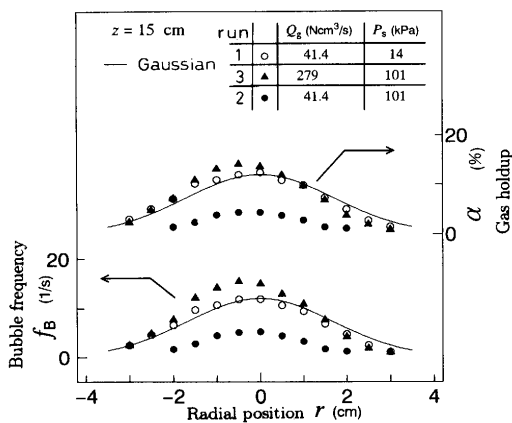


Fig. 6. Radial distributions of gas holdup and bubble frequency at $z=15\text{cm}$ for runs 1 through 3.

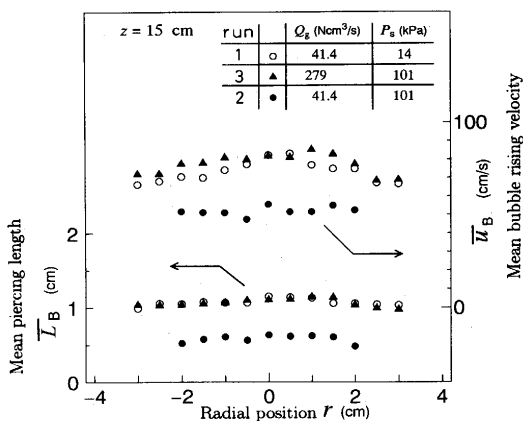


Fig. 7. Radial distributions of mean bubble rising velocity and mean piercing length at $z=15\text{cm}$ for runs 1 through 3.

の気泡の広がりがやや大きい。

平均気泡上昇速度 \bar{u}_B と平均気泡貫通距離 \bar{L}_B が半径 r に依存せずほぼ一定となっているのは、気泡が直上に上昇せず半径方向に揺れながら上昇するためであると考えられる。

3・4 減圧下でガス流量を変化させた場合の気泡特性

減圧下で吹き込みガス流量を20.0, 10.0Ncm³/sと変化したときの中心軸上と $z=15\text{cm}$ の軸位置における半径方向の測定値を常圧下の吹き込みにおける測定値と比較してFig. 8~15に示す。Fig. 8, 9, 12, 13から明らかなように、仮想的な体積流量が一致する条件では、減圧下のガス流量が小さいほど、ガスホールドアップなどの気泡特性の測定値はノズルにより近い軸位置から常圧下の測定値に一致するようになる。またFig. 10, 11, 14, 15をみると、Fig. 6, 7に示した気泡特性について述べた傾向がそのまま現れている。

以上のことから、本実験の減圧条件下での気泡はノズル近傍の $z < 10\text{cm}$ の軸位置で静水圧から計算される体積まで膨張し、その後の気泡特性は各軸位置において体積流量が等しい常圧下のガス吹き込みで得られた気泡特性にほぼ一致

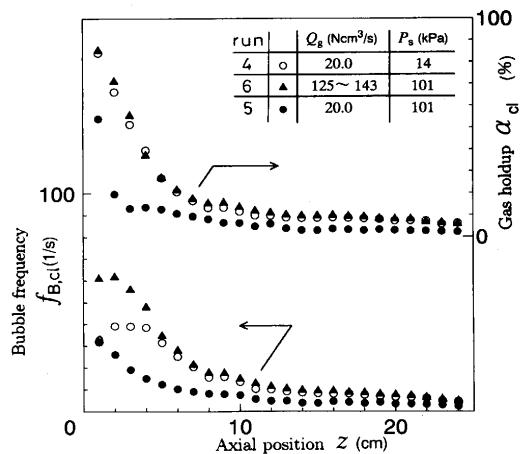


Fig. 8. Axial distributions of gas holdup and bubble frequency on the centerline of the bath for runs 4 through 6.

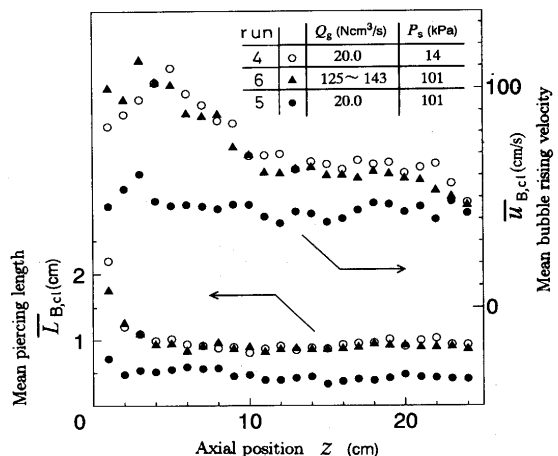


Fig. 9. Axial distributions of mean bubble rising velocity and mean piercing length on the centerline of the bath for runs 4 through 6.

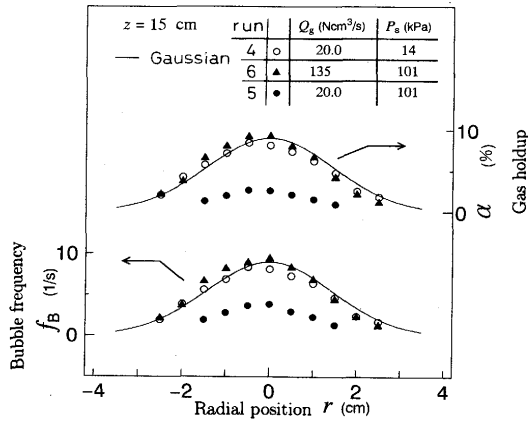


Fig. 10. Radial distributions of gas holdup and bubble frequency at $z=15\text{cm}$ for runs 4 through 6.

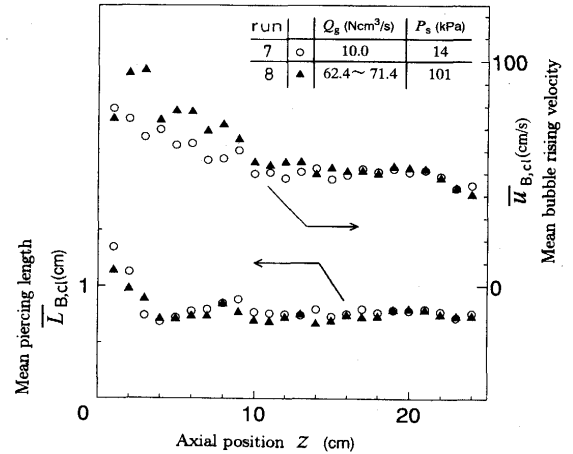


Fig. 13. Axial distributions of mean bubble rising velocity and mean piercing length on the centerline of the bath for runs 7 and 8.

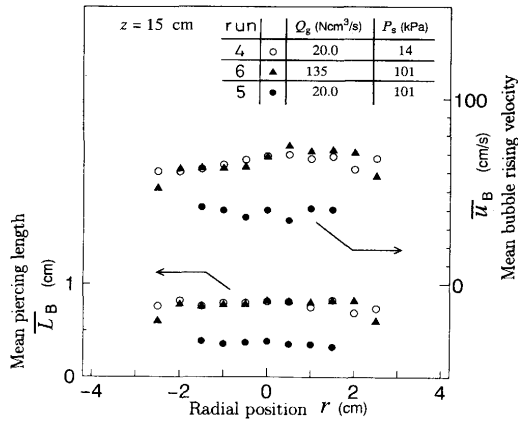


Fig. 11. Radial distributions of mean bubble rising velocity and mean piercing length at $z=15\text{cm}$ for runs 4 through 6.

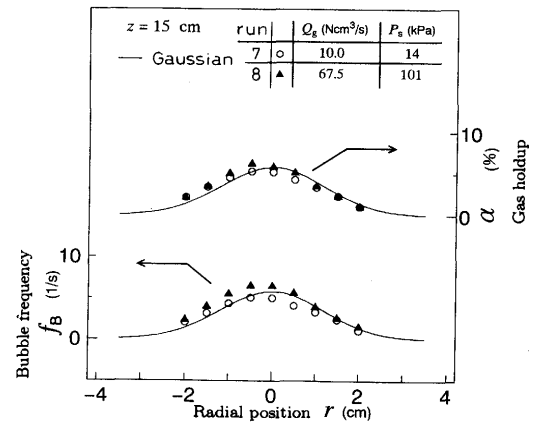


Fig. 14. Radial distributions of gas holdup and bubble frequency at $z=15\text{cm}$ for runs 7 and 8.

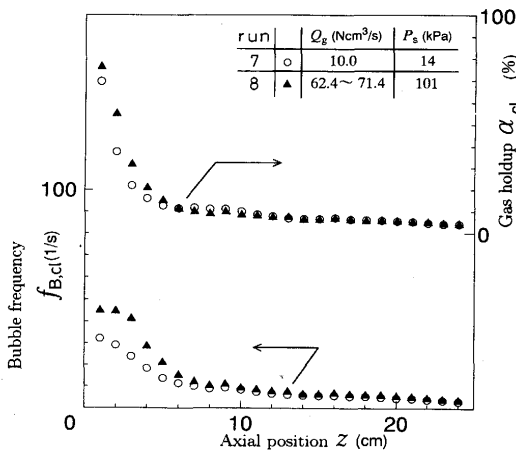


Fig. 12. Axial distributions of gas holdup and bubble frequency on the centerline of the bath for runs 7 and 8.

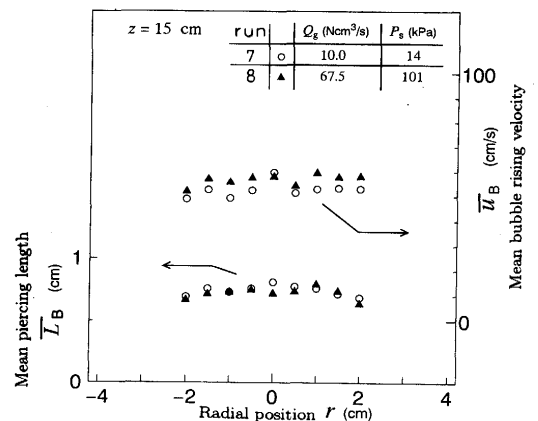


Fig. 15. Radial distributions of mean bubble rising velocity and mean piercing length at $z=15\text{cm}$ for runs 7 and 8.

することが判明した。ただし、 $P_s=14\text{kPa}$ の減圧下でも吹き込みガス流量が本実験範囲の値よりもさらに大きくなれば、ここで得られた結論が成立しなくなることが予想される。

3.5 気液界面積の評価

高温での冶金反応のように、主に物質移動が反応律速と

なる場合には、気液間の反応界面積が重要なパラメーターとなる。平均気泡直径 \bar{d}_B が任意の水平断面内で半径方向に一定であると仮定すれば、その断面を単位時間に通過する気泡の個数は $6Q_g/(\pi\bar{d}_B^3)$ となる。これに一個当りの表面積 $(\pi\bar{d}_B^2)$ と、その断面から ΔH_L の微小区間を気泡が通過するに要する時間 $\Delta T(=\Delta H_L/\bar{U}_B)$ を掛合わせると、その区間に存

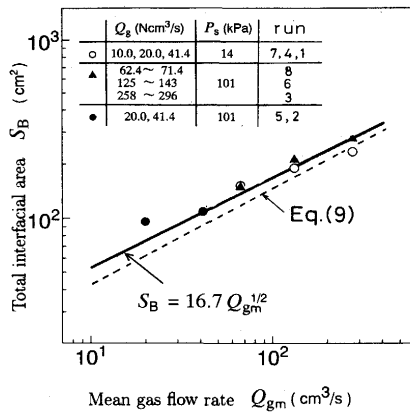


Fig. 16. Total interfacial area between bubbles and liquid as a function of gas flow rate.

在する気泡の表面積が求まる。この微小区間の表面積をノズル出口から浴表面までに渡って加えると浴内に存在する全気泡の表面積 S_B が得られる。ここでは平均気泡径と平均気泡貫通距離に関する川上らの関係式¹⁵⁾

$$\bar{d}_B = 1.5 \bar{L}_B \quad (4)$$

を用いるとともに、 $\Delta H_L = 10\text{mm}$ とした。なお予備実験で ΔH_L を10mm以下にすれば十分な精度の得られることを確認している。

全表面積 S_B の測定値をFig. 16に示す。測定値とは \bar{d}_B と \bar{u}_B にそれらの測定値を代入して求めた S_B の値である。常圧下と減圧下の全表面積はともにガスの浴内における平均体積流量 Q_{gm} の1/2乗に比例することが本実験結果から分ったので、図中に実線で示した次の実験式を作成した。

$$S_B = 16.7 Q_{gm}^{1/2} = 0.668 Q_{gm}^{1/2} H_L \quad (5)$$

式(5)は測定値を±20%の偏差で近似できる。ただし、この面積には、2針の電気探針では上昇速度を精度よく検知できない直径約3mm以下の気泡の寄与は考慮していない。しかしながら、高速度ビデオカメラで撮影した画像から判断して、小さな気泡の寄与は上記ばらつきの中に含まれると思われる。

全表面積 S_B は平均生成気泡径 $\bar{d}_B = [6Q_g / (\pi f_B)]^{1/3}$ と平均気泡上昇速度 \bar{u}_B を用いて次式で近似できる。

$$S_B = 6 H_L Q_g / (\bar{d}_B \bar{u}_B) \quad (6)$$

本実験条件下では、流れ場は気泡の浮力が支配的であるから文献¹⁶⁾に示した

$$\bar{u}_B = 1.7 (Q_g g^2)^{1/5} \quad (7)$$

と式(1)を用いることにより次式が得られる。

$$S_B = 0.147 \left(\frac{\rho_L g^3}{\sigma} \right)^{1/12} \left(\frac{\rho_g}{\rho_L} \right)^{1/15} d_{ni}^{-1/6} Q_g^{8/15} H_L \quad (8)$$

ここで $Q_g \doteq Q_{gm}$ とおけるので、上式(8)にこの関係式と水-空気系の物性値を代入すれば、

$$S_B = 12 Q_{gm}^{8/15} \quad (9)$$

となる。式(9)の Q_{gm} の指数はほぼ1/2となり、Fig. 16に示

すように式(9)は式(5)と-20%程度の偏差で一致する。式(8)の溶鉄等への適用性については今後の課題としたい。

4. 結言

(1)減圧した浴内のノズル出口における気泡生成頻度 f_B を高速度ビデオカメラを用いて求めた。 f_B は常圧下でノズルを通過する質量流量が等しい場合の気泡生成頻度とほぼ等しくなった。したがって、気泡生成頻度に及ぼす減圧の影響は無視できる。ただし気泡の形状は異なり、減圧した場合の方が大きく、表面は滑らかである。

(2)減圧した場合にノズルで生成した気泡は、ノズル近傍の軸位置で静水圧から計算される体積まで膨張する。この軸位置よりも上でのガスホールドアップ、気泡頻度などの気泡特性は、各軸位置の体積流量が減圧下の体積流量に等しい条件でガスを吹き込んだ場合の気泡特性にほぼ一致した。一致の程度は減圧下のガス流量が小さいほど良好であった。

(3)気液間の反応特性に大きな影響を及ぼす気液界面積の評価法を示した。その結果、常圧下ならびに減圧下の浴内に存在する気液界面積は次式で表されるように、ともに浴内におけるガスの平均体積流量 Q_{gm} の1/2乗に比例することが分った。

$$S_B = 0.668 Q_{gm}^{1/2} H_L \quad (5)$$

文 献

- 1) 金属製錬プロセスにおける高温界面移動現象(鉄鋼基礎共同研究会 界面移動現象部会編), (1991), p.101 [日本鉄鋼協会]
- 2) 沖森麻佑巳: 鉄と鋼, 79 (1993), p.1
- 3) 加藤嘉英, 中戸 参, 藤井徹也, 大宮 茂, 高取誠二: 鉄と鋼, 77 (1992), p.1664
- 4) 会田公治, 原 義明, 桜谷敏和: 材料とプロセス, 5 (1992), p.260
- 5) T. Fujii, Y. Kato and T. Sakuraya: Scaninject VI, Part 1 (1992), p.317
- 6) K. Uemura, S. Koyama, K. Nishiguchi and J. Katta: Steelmaking Conf. Proc., (1992), p.819
- 7) W. Loscher and W. Fix: Steelmaking Conf. Proc., (1991), p.699
- 8) 原島和海, 井本建夫, 矢野正孝: 材料とプロセス, 6 (1993), p.172
- 9) 興梶昌平: 材料とプロセス, 6 (1993), p.175
- 10) 宮本健一郎, 北村信也, 辻野良二: 材料とプロセス, 6 (1993), p.1035
- 11) 伊藤公久, 坂口清信: 製鋼第19委員会鋼中非金属介在物小委員会流動グループ研究会提出資料, 流動5-4 (平成5年11月); 材料とプロセス, 6 (1993), p.1044
- 12) 井口 学, 細原聖司, 古賀敏之, 山口竜介, 森田善一郎: 鉄と鋼, 78 (1992), p.1778
- 13) 森 一美, 佐野正道: 鉄と鋼, 67 (1981), p.672
- 14) 井口 学, 高梨智裕, 小川雄司, 徳光直樹, 森田善一郎: 鉄と鋼, 80 (1994), p.515
- 15) 川上正博, 堂脇正市, 広江俊勝, 伊藤公允: 鉄と鋼, 78 (1992), p.745
- 16) 井口 学, 出本庸司, 菅原直也, 森田善一郎: 鉄と鋼, 78 (1992), p.407