

溶融金属中に吹込まれた気泡の挙動

井口 学*・森田 善一郎*²

Behavior of Bubbles Injected into Molten Metal Baths
Manabu Iguchi, Zen-ichiro Morita

Synopsis : Bubble formation at a nozzle immersed in a water bath was observed with a high-speed video camera and that in a molten iron bath at 1250 °C was done using a high-voltage X-ray fluoroscope.

An empirical correlation of the frequency of bubble formation was derived from these results as a function of gas flow rate, inner diameter of nozzle, densities of gas and liquid, and surface tension of liquid for the intermediate and high gas flow rate regimes. Published data on the frequency of bubble formation were approximated by this correlation within a scatter of $\pm 25\%$.

The characteristics of bubbles rising in a molten copper bath at 1250 °C and a molten iron bath at 1250 °C or 1600 °C were measured using a new electro-resistivity probe system. Measured values of gas holdup, bubble frequency, and mean bubble rising velocity were satisfactorily approximated by empirical correlations previously derived from cold model experiments using aqueous and mercury systems.

Key words : injection; bubbling; jetting; molten metal; electro-resistivity probe; gas holdup; bubble frequency; bubble diameter

1. 緒言

種々のガス吹込み操作が材料精錬プロセスにおいて広く行われており、インジェクション冶金と総称されている¹⁾。この場合の精錬反応特性や最近注目を集めているスクラップの溶解促進等に関しては、吹込まれたガスが気泡となって反応容器内を上昇するときの形状・寸法、上昇速度、浴内での分散状況などのいわゆる気泡特性の把握が重要な課題となる。従来、気泡特性に関しては、水、水銀、ウッドメタルなどのコールドモデルを対象とした実験が高速ビデオカメラや電気探針を用いて活発に行われており、ガスホールドアップ、気泡頻度、平均気泡上昇速度、平均弦長さなどの実験式が提案されている^{2)~4)}。しかし浴の温度が1000°Cを越える溶銅や溶鉄など実操業で重要となる溶融金属浴内の気泡特性については、わずかにノズルあるいはオリフィスで生成される気泡の頻度が音響学的手法を用いて求められているにすぎず^{9)~11)}、長時間に亘って安定な測定が可能な電気探針は存在しないために、上昇時の気泡特性に関する信頼性の高い測定例はなく、コールドモデルで導かれた実験式の適用性の検証も十分なされていない¹²⁾。

著者らは最近1250°Cの溶銅、溶鉄浴内ならば2時間以上、さらに1600°Cの溶鉄浴内でも約20分にわたって精度よく気泡特性を測定できる電気探針システムを開発して気泡特性

の測定を行うとともに、高感度のX線透視装置による鉄浴内の上昇気泡の直接観察も行い、多くの知見を得つつある^{13)~15)}。ここでは主にその成果に基づいて、高温溶融金属内のノズルやオリフィスで生成される気泡の頻度と、それらが浴内を上昇していくときの動的挙動について述べる。なお単一気泡の挙動は例えばCliftらの著書⁶⁾に詳しいので、参照されたい。

2. バブリングとジェットング

浴内に吹込まれたガスは、Fig.1に示すようにノズルあるいはオリフィス（以下ノズルで代表する）の出口で気泡

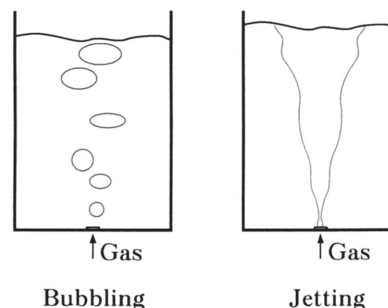


Fig.1 Bubbling and jetting phenomena in a bath with bottom gas injection.

* 大阪大学 (Osaka University, 1-1 Yamadaoka suite 565), 工博

*² 大阪大学名誉教授 (Professor Emeritus, The University of Osaka), 工博

となって上昇する場合と、ガスの柱となって浴内を上昇する場合の二つのパターンを示すことが知られており、佐野らは前者をバブリング、後者をジェティングと名付けている¹⁾。従来、これら二つのタイプの遷移はノズル出口の線速度がみかけの音速を越えるときに起こるとされている。

本報告ではバブリング領域を対象とするが、この領域はガス流量に関してさらに低ガス領域、中間ガス領域、高ガス領域に分類される¹⁾。低ガス領域で生成した気泡の体積はガス流量 Q_g によらず一定であり、生成頻度 f_B は Q_g に比例する。中間ガス領域では Q_g の増加と共に気泡の生成頻度 f_B も増加するが、気泡体積も増加する。高ガス領域になると液体の激しい乱流運動のために上昇中に気泡の分裂が起こり、多数の小さな気泡が発生する。その結果、浴内の気泡の平均直径は Q_g の増加につれて逆に減少する。

低ガス領域では、ノズル出口で生成した気泡は分裂・合体することなく、静水圧の減少による体積の膨張を伴いつつ上昇する。この場合の気泡特性は気泡生成頻度が分かれば予測できるので、本報告ではFig. 2に示すような中間ガス領域と高ガス領域の気泡特性を対象とする。図中のDは浴径、Hwは浴深、dniは単孔ノズルの内径であり、Zは浴の底の中央に設置したノズルからの距離である。

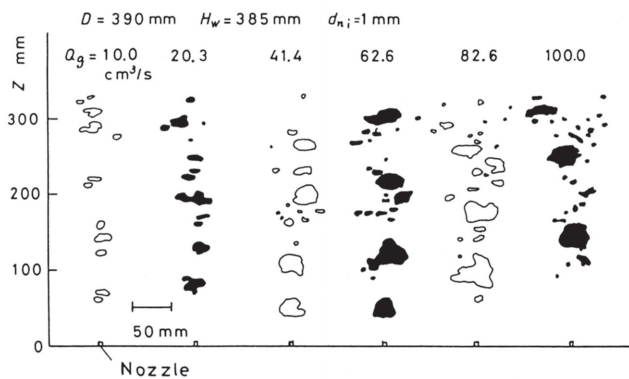


Fig.2 Profiles of bubbles taken with a high-speed video camera in a water bath.

3. ノズルにおける気泡生成頻度

容器内の気泡特性は当然のことながら気泡生成頻度 f_B と深く関係しており、まずこの点を明らかにしておく必要がある。工業上は f_B よりも平均気泡径 \bar{d}_B の情報のほうが有用であり、 \bar{d}_B に対する多くの実験式が提案されている。なお気泡を球形であると仮定すれば \bar{d}_B と f_B の間には次の関係が成立する。

$$\bar{d}_B = [6Q_g / (\pi f_B)]^{1/3} \quad (1)$$

水-空気系についてはDavidson-Amickの式がよく知られている。

$$\bar{d}_B = 0.54 [Q_g (dni)^{1/2}]^{0.289} \quad (2)$$

ここでdniはノズル内径である。ただしFig. 3に示すように、式(1)では水浴中へAr, 空気, ヘリウムを吹込んだときの気泡生成頻度を十分に説明できない。

熔融金属中の気泡生成頻度についてはIronsらの1250°C

の溶鉄浴⁹⁾、佐野らの1000°Cの溶融銀¹⁰⁾および1600°Cの溶鉄浴¹¹⁾の実験がみられる。この場合、ノズルと熔融金属との濡れ性が悪いので気泡生成頻度はノズルの内径ではなく、外径に依存すると考えられている。例えば、佐野らは中間ガス領域の平均気泡径に対して式(2)の内径dniを外径dnoで置き換えた次式を提案した。

$$\bar{d}_B = 0.54 [Q_g (dno)^{1/2}]^{0.289} \quad (3)$$

著者らがFig. 4のX線透視装置を用いて求めた1250°Cの溶鉄浴内の気泡生成頻度を式(3)と比較してFig. 5に示したが、測定値との一致はよくない。

ノズルと液体の濡れ性が悪いとき、ガス流量 Q_g が非常に小さければ、気泡はノズル出口でゆっくり膨張することになり、ノズル出口の端面上での気液界面はノズル外径の位置まで広がって、気泡の大きさはノズル外径に支配されると考えられる。しかし応答性の面からいえば、ガス流量が大きくなると、ノズル外径の半径位置まで短時間の内に気液界面が広がったのち気泡が離脱すると考えるよりはむしろ、ノズル内径の位置で離脱が起こると考えるほうが自然である。そこでノズル内径dniとガス流量 Q_g の関数として溶鉄浴内の気泡生成頻度の測定値を整理すると次式が得られた。

$$f_B = 3.3 [Q_g^{2/5} / dni]^{0.5} \quad (4)$$

次元解析に基づき、従来の熔融金属系だけでなく水系も含めた気泡生成頻度の測定値に対して次の実験式を提案した。

$$f_B = 1.06 (\rho_L g^3 / \sigma)^{1/4} (\rho_g / \rho_L)^{1/4} [(Q_g^2 / g) / dni]^n \quad (5)$$

$$n = 0.06 Z_{50} / b\alpha_{,50} + 0.3$$

$$(Z_{50} / b\alpha_{,50} \geq 10/3)$$

$$= 0.5 (Z_{50} / b\alpha_{,50} < 10/3) \quad (6)$$

ここで ρ_L は液体の密度、 σ は表面張力、 ρ_g はガスの密度、 g は重力加速度である。また Z_{50} と $b\alpha_{,50}$ については後掲の式(11)、(14)を参照されたい。

Fig. 3, 5の実験結果をまとめてFig. 6に再プロットし、式(5)と比較した。測定値は式(5)と±25%の偏差で一致している。

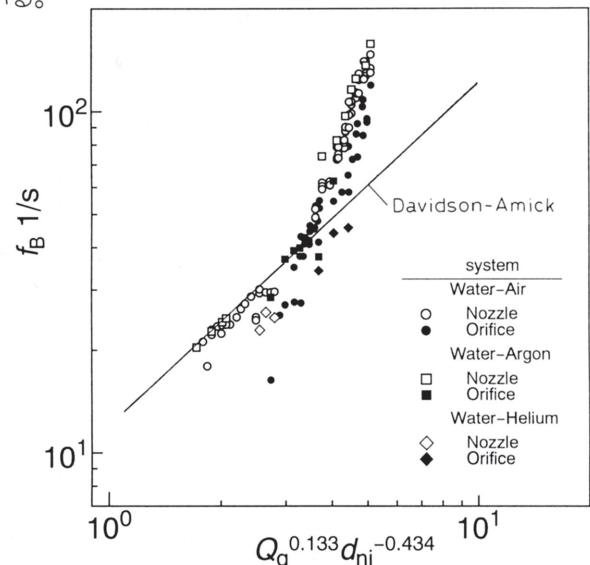


Fig.3 Comparison of measured values of bubble frequency at nozzles and orifices in a water bath with a correlation by Davidson-Amick.

なお、グリセリン水溶液を用いて液体の動粘度を大きく変えても浴内の流れが乱流であるかぎり、気泡生成頻度に関与する動粘度の影響はみられなかった¹⁷⁾。

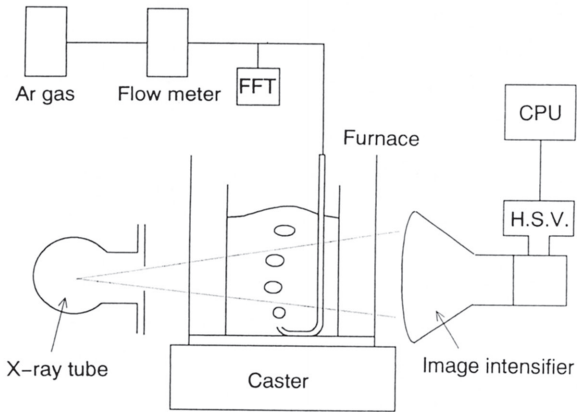


Fig.4 Experimental apparatus for observing bubbles in a molten iron bath.

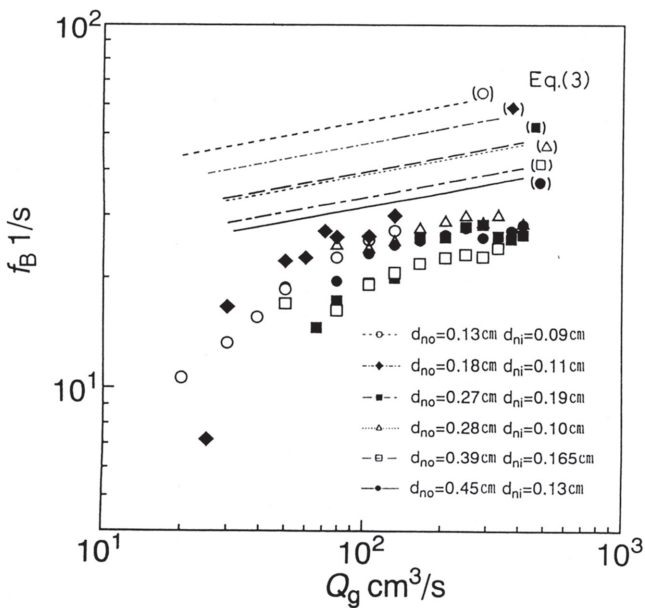


Fig.5 Comparison of Eq. (3) with measured values of bubble frequency at nozzles in a molten iron bath.

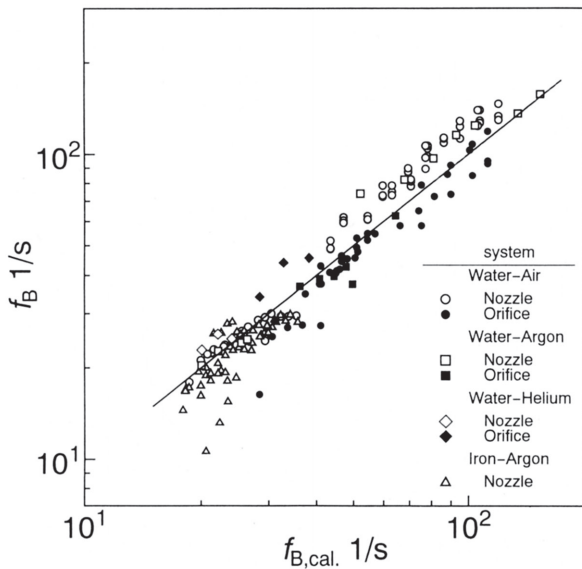


Fig.6 Comparison of Eq. (5) with measured values of bubble frequency at nozzles and orifices in water and molten iron baths.

4. 浴内を上昇する気泡の特性

ノズルで生成した気泡の上昇中の挙動を記述する基本的な特性量としてガスホールドアップ (ポイド率) α , 気泡頻度 f_B , 平均気泡上昇速度 \bar{U}_B , 平均弦長さ \bar{L}_B などが挙げられる。ガスホールドアップとは単位体積中に気泡の占める割合であるが、電気探針を用いると、Fig. 7 に示すように、全測定時間に対して電極針の先端を気泡が通過する時間 $\sum_{i=1}^N t_{vi}$ の割合として求められる。気泡頻度は 1 秒間に電極針の先端を通過する気泡の個数である。気泡の平均上昇速度 \bar{U}_B は 2 本の電極針の先端間を通過する時間 t_{gi} でその区間の距離 L_p を除した値を平均することによって得られる $[\bar{U}_B = \sum_{i=1}^N (L_p / t_{gi}) / N]$ 。気泡が球形であると仮定するならば、気泡の平均弦長さ \bar{L}_B $[= \sum_{i=1}^N (L_p t_{vi} / t_{gi}) / N]$ を $3/2$ 倍すれば平均気泡径 \bar{d}_B になる¹²⁾。

溶融金属用の電極針と電気探針システムの概要を Fig. 8, 9 に示す。本システムにおいては、電極針と別に用意した対極を溶融金属中に浸漬し、電極針の先端の電極が気泡に包まれると探針回路の電流が流れず、気泡が通過して再び液体に包まれるときには流れる現象を利用して気泡の存在を検知する。

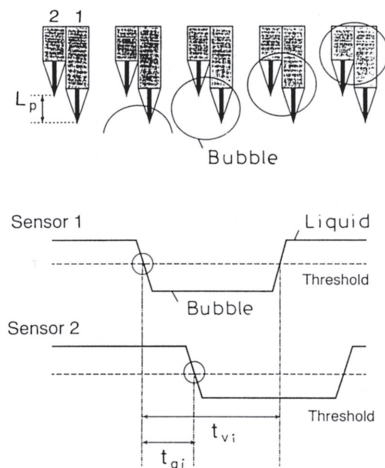


Fig.7 Schematic representation of the output signals of an electro-resistivity probe.

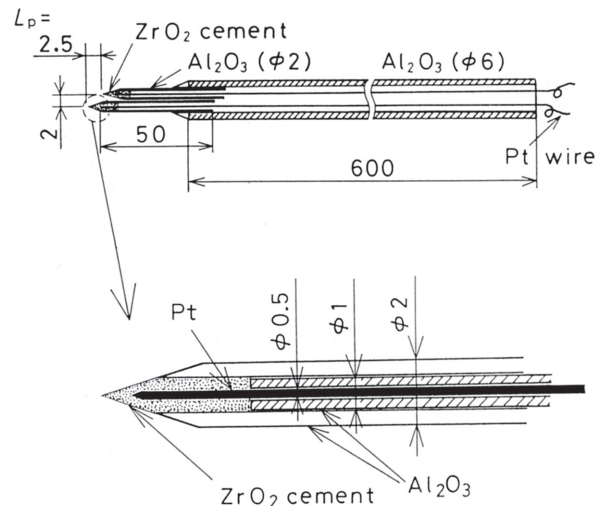


Fig.8 Electrode needle applicable to a molten iron bath at 1600 °C.

まず、電気探針を用いて求めた水-空気系モデルのガスホールドアップ α と気泡頻度 f_B の測定結果の1例をFig.10に示す。 α と f_B はノズルから離れるにつれてともに正規分布に従う。また α の中心軸上値 α_{C1} と半値半幅 b_α に着目すれば、浴内の気泡分散領域はFig.11のように四つの領域に分類できる。ノズルのごく近傍ではノズルから吹込まれたガスの慣性力が主な役割を演じており、ノズルから離れるにつれてガスの運動量は液体と交換され、やがて気泡の浮力が支配的な領域となる。そこで、ノズルから順次、運動量支配

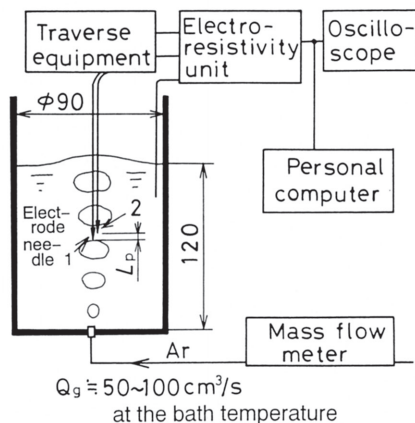


Fig.9 Electro-resistivity probe system for measuring bubble characteristics in a molten iron bath.

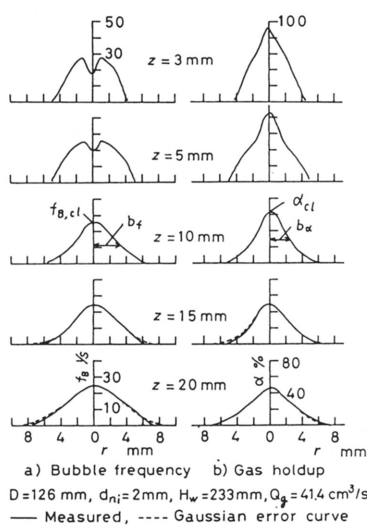


Fig.10 Radial profiles of bubble frequency and gas holdup in a water bath.

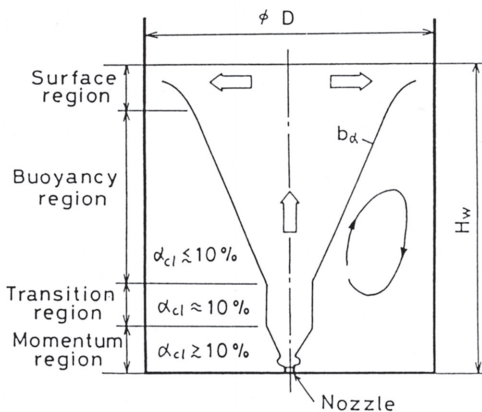


Fig.11 Classification of the flow field in a vertical bubbling jet.

領域、遷移領域、浮力領域、表面領域と名付けた。表面領域の気泡特性は浴表面の波動の影響を受ける。

気泡分散領域の半径方向への広がり運動量支配領域で急に大きくなるが、遷移領域でほぼ一定値をとり、浮力領域でやや増加したのち、表面領域では半径方向流れが存在するために再び急激に大きくなる。

著者らは水-空気系、水銀-空気系モデルの実験結果に基づき、運動量支配領域と浮力領域の気泡特性に対して以下の実験式を提案した。

4・1 ガスホールドアップ(α)

$$\alpha = \alpha_{C1} \exp(-1 \ln 2 \cdot r^2 / b_\alpha^2) \quad (7)$$

ここで r は半径方向座標であり、 α_{C1} と b_α は次式で与えられる。

4・1・1 運動量支配領域 ($100\% \geq \alpha_{C1} \geq 10\%$)

(1) $100\% \geq \alpha_{C1} \geq 50\%$

$$\alpha_{C1} = 50 (0.9Z/Z_{50})^{-2n} / [1 + 10.5(0.9Z/Z_{50})^{-2n}]^{1/2} \quad (8)$$

(2) $50\% \geq \alpha_{C1} \geq 10\%$

$$\alpha_{C1} = 50 (Z/Z_{50})^{-2n} \quad (9)$$

$$b_\alpha = b_{\alpha,50} (Z/Z_{50})^n \quad (10)$$

$$Z_{50} = a d n^2 F r m^b \quad (11)$$

$$F r m = \rho_g Q g^2 / (\rho_L g d n^5) \quad (12)$$

$$n = 0.027 Z_{50} / b_{\alpha,50} + 0.38 \quad (13)$$

$$b_{\alpha,50} = C (Q g^2 / g)^{1/5} \quad (14)$$

$$a = 0.77 (\rho_L / \rho_g)^{0.28} \quad (15)$$

$$b = 0.89 (\rho_L / \rho_g)^{-0.16} \quad (16)$$

$$C = 0.26 (\rho_L / \rho_g)^{0.07} \quad (17)$$

ここで Z はノズル出口からの中心軸方向座標、 Z_{50} は $\alpha_{C1} = 50\%$ となる軸位置、 $F r m$ は修正フルード数、 $b_{\alpha,50}$ は $Z = Z_{50}$ における b_α の値である。

4・1・2 浮力領域 ($10\% \geq \alpha_{C1}$)

$$\alpha_{C1} = 23 \exp[-1.5Z/Z_5] \quad (18)$$

$$b_\alpha = 0.47 b_{\alpha,5} \exp(0.75Z/Z_5) \quad (19)$$

$$Z_5 = 17 (Q g^2 / g)^{1/5} \quad (20)$$

$$b_{\alpha,5} = 1.6 (Q g^2 / g)^{1/5} \quad (21)$$

ここで Z_5 は $\alpha_{C1} = 5\%$ となる軸位置、 $b_{\alpha,5}$ は $Z = Z_5$ における b_α の値である。なお、式(9)と(18)の交点をもって運動量支配領域と浮力領域との境界とする。

4・2 気泡頻度(f_B)

$$f_B = f_{B, C1} \exp(-1 \ln 2 \cdot r^2 / b_f^2) \quad (22)$$

$$b_f = b_\alpha \quad (23)$$

$$f_{B, C1} = f_{B, C1,50} = d W e^{0.32} (g^2 Q g)^{1/5} / Z_{50} \quad (24)$$

$$Z \leq Z_{50} (f_{B, C1,50} / 50)^{-1/2n}$$

$$f_{B, C1} = \alpha_{C1} \quad (25)$$

$$Z > Z_{50} (f_{B, C1,50} / 50)^{-1/2n}$$

$$d = 7.0 (\rho_L / \rho_g)^{-0.22} \quad (26)$$

$$W e = \rho_g Q g^2 / (\sigma d n^3) \quad (27)$$

ここで $f_{B, C1,50}$ は $Z = Z_{50}$ における $f_{B, C1}$ の値、 $W e$ はウエーバー数である。

4・3 平均気泡上昇速度(\bar{U}_B)

4・3・1 運動量支配領域

$$\bar{U}_B = 0.44 (Q g g^2)^{1/5} / C^2 \quad (28)$$

$$\bar{U}_B = 1.7(Q_g g^2)^{1/5} \quad (29)$$

5. 溶融金属内の気泡特性の測定値と実験式との比較

Fig.12-15に著者らが開発した電気探針システムを用いて求めた1250℃と1600℃の溶鉄浴中における気泡特性の浴中心軸上の測定結果を示す。Arは予熱して浴温と同じ温度になってから吹込んでおり、ガスと浴の温度差に基づく熱膨張はない。本実験式はコールドモデルの実験結果に基づいて導かれているにもかかわらず、測定値と実験式との一致はいずれの図においても良好である。

温度差が存在し、気泡の熱膨張を考慮しなければならない場合の気泡特性の詳細についてはマッシュルームの生成なども考慮して別に議論する必要がある。

1250℃の溶銅浴についても測定値と本実験式との間にはよい一致がみられた。

本実験式を実操業下の気泡特性の予測に用いる際には、気泡の上昇に伴う静水圧の減少による膨張を考慮する必要がある。

なお平均気泡径の実験式を導いていないが、これは以下の理由による。高ガス流領域では、ノズル出口で生成した各々の気泡の一部が上昇中に液体の激しい乱流運動によって分裂し、多くの小さな気泡が発生する。したがって気泡径の頻度分布をとるとノズルで生成した気泡径に近いところと1mm程度のところに二つのピークが現れる¹⁰⁾。小さな気泡は液体の上昇運動の駆動力である浮力への寄与は小さいが、気液間反応に関与する気液界面積への寄与は無視できない。浴内を上昇中の気泡の平均気泡径の定義とその決定法については今後議論が必要である。

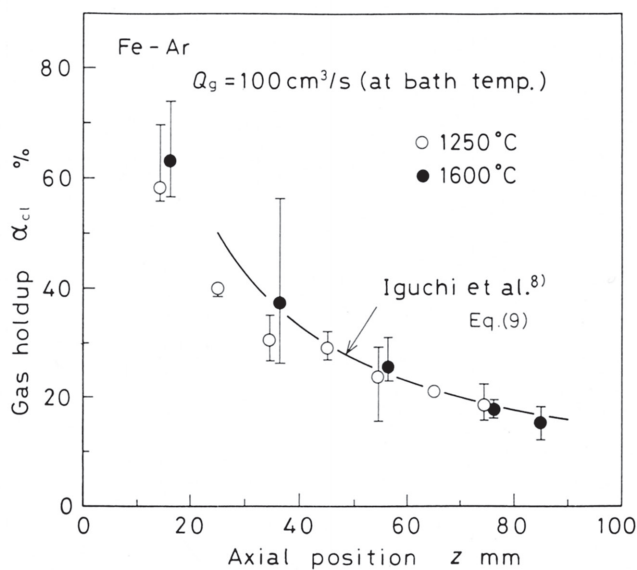


Fig.12 Distributions of gas holdup on the centerline of the bath.

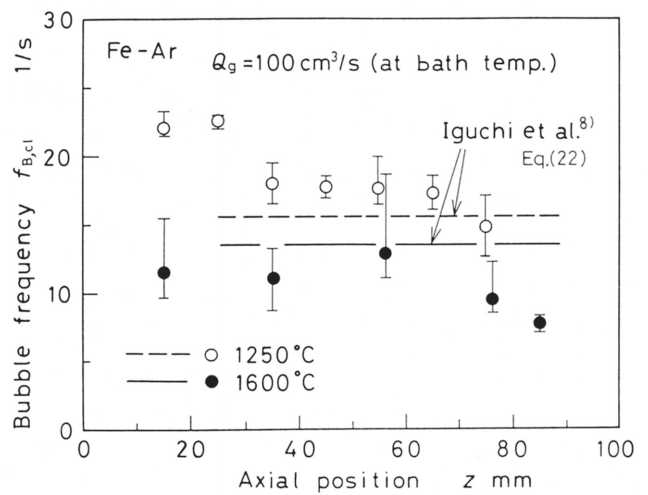


Fig.13 Distributions of bubble frequency on the centerline of the bath.

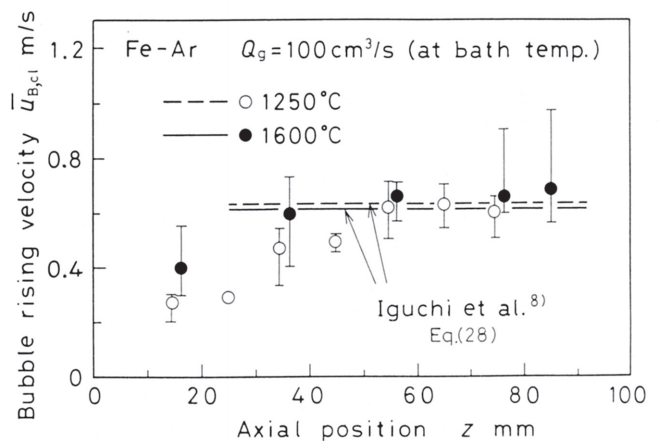


Fig.14 Distributions of mean bubble rising velocity on the centerline of the bath.

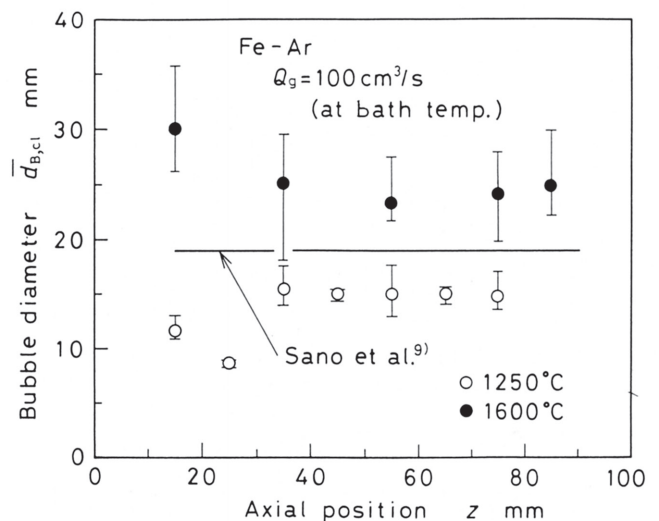


Fig.15 Distributions of mean bubble diameter on the centerline of the bath.

6. 結言

(1)ノズルと溶融金属の濡れ性が悪いとき、中間ガス領域と高ガス領域における気泡生成頻度はガス流量とノズル外径に依存するといわれていたが、ノズル外径ではなく内径に依存することを示した。また気泡生成頻度はこれらのパラメーターに加えて溶融金属の密度と表面張力、吹込みガ

スの密度にも依存することを明らかにし、実験式(5)を導出した。

(2)ノズルで生成した気泡が高温熔融金属浴内を上昇していくときの動的挙動を記述するガスホールドアップ、気泡頻度、平均気泡上昇速度、平均弦長さなどを新たに開発した電気探針システムを用いて測定し、前にコールドモデルの実験結果に基づいて導いた実験式がこの場合にも適用できることを実証した。これらの実験式による計算結果に、静水圧変化による気泡の膨張量の補正を施せば、実操業下の気泡の上昇特性を予測可能であると考えられる。

文 献

- 1) 森 一美, 佐野正道: 鉄と鋼, 67 (1981), p.672.
- 2) 川上正博, 富本 登, 伊藤公允: 鉄と鋼, 68 (1982), p.774.
- 3) T.H.Tacke, H.G.Schubert, D.J.Weber and K. Schwerdtfeger: Metall. Trans. B, 16 (1985), p.263.
- 4) A.H.Castillejos and J.K.Brimacombe: Metall. Trans. B, 18 (1987), p.659.
- 5) S.Taniguchi, A.Kikuchi, H.Matsuzaki and N.Bessho: Trans. ISIJ, 28 (1988), p.262.
- 6) Y.K.Xie, S.Orsten and F.Oeters: 6th IISC, 1 (1990), p.421.
- 7) 井口 学, 川端弘俊, 野沢健太郎, 岩崎敏勝, 森田善一郎: 鉄と鋼, 76 (1990), p.840.
- 8) 井口 学, 出本庸司, 菅原直也, 森田善一郎: 鉄と鋼, 78 (1992), p.407.
- 9) 佐野正道, 森 一美: 鉄と鋼, 60 (1974), p.348.
- 10) 佐野正道, 森 一美, 佐藤哲郎: 鉄と鋼, 63 (1977), p.2308.
- 11) G.A.Irons and R.I.L.Guthrie: Metall. Trans. B, 9 (1978), p.101.
- 12) 川上正博, 細野 聡, 高橋一寿, 伊藤公允: 鉄と鋼, 78 (1992), p.267.
- 13) 井口 学, 川端弘俊, 森田善一郎, 伊藤陽一, 中島敬治: 材料とプロセス, 6 (1993), p.1048.
- 14) 井口 学, 川端弘俊, 森田善一郎, 伊藤陽一, 小谷 茂, 中島敬治: 材料とプロセス, 6 (1993), p.1306.
- 15) 井口 学, 森田善一郎, 高梨智裕, 小川雄司, 徳光直樹: 材料とプロセス, 6 (1993), p.1047.
- 16) R.Clift, J.R.Grace and M.E.Weber: Bubbles, Drops, and Particles. (1978), Academic Press.
- 17) 井口 学, 川尻 明, 富田祐志, 森田善一郎: 鉄と鋼, 78 (1992), p.1456.
- 18) Y.Fukunaka, M.-F.Jiang, T.Yamamoto, Z.Asaki and Y.Kondo: Metall. Trans. B, 20 (1989), p.5.