

溶鉄浴内の気泡特性のX線透視観察

井口 学*・高梨 智裕*²・小川 雄司*³・徳光 直樹*³・森田 善一郎*

X-ray Fluoroscopic Observations of Bubble Characteristics in a Molten Iron Bath

Manabu IGUCHI, Norihiro TAKANASHI, Yuji OGAWA, Naoki TOKUMITSU and Zen-ichiro MORITA

Synopsis : The formation of bubbles at the nozzle exit and the subsequent rising behavior of the bubbles in a molten iron bath at 1250°C were observed using a high voltage X-ray fluoroscope and a high-speed video camera. The frequency of bubble formation at the nozzle exit, the mean bubble diameter, and the mean bubble rising velocity were obtained for a wide range of the injected argon gas flow rate. Empirical correlations of these quantities were proposed and compared with previously published data and empirical correlations.

It has been commonly believed that the frequency of bubble formation at the nozzle exit depends solely on the gas flow rate and the outer diameter of the nozzle when the gas flow rate is relatively high and the wettability between the nozzle material and the molten metal is bad. The present experimental results revealed that the frequency of bubble formation had a close relationship not with the outer diameter but with the inner diameter of the nozzle. Also, the bubble frequency depended on the gas flow rate and the physical properties of gas and molten metal. The critical gas flow rate for the initiation of smaller bubbles due to disintegration of larger bubbles was found to be approximately 60cm³/s under the present experimental conditions. The bubble behavior near the bath surface also was made clear.

Key words : steelmaking ; gas injection ; X-ray fluoroscope ; bubble frequency ; bubble rising velocity ; spitting.

1. 緒言

既存の通気攪拌製錬プロセスの改良はもとより、新しい通気攪拌プロセスの開発を行うに際しては、気泡の発生と上昇時の分散挙動の正確な把握が望まれる。従来、水、水銀、ウッドメタルなどの低融点の液体を用いたコールドモデル実験では、測定が比較的容易なことから上記気泡特性に関する研究が活発に行われており、種々の実験式が導かれている^{1)~3)}。

なお、実操業条件下での気泡特性の測定は現在のところ不可能であり、ホットモデル実験として、わずかに音響学的方法による溶鉄中のノズルあるいはランスで生成される気泡の大きさに関する佐野ら⁴⁾⁵⁾、Ironsら⁶⁾の研究、電気探針法による溶鉄中を上昇する気泡の特性に関する川上ら⁷⁾、著者ら⁸⁾⁹⁾の研究がみられる程度である。

しかしながら、通気管内の圧力変動に着目して決定した気泡頻度とノズル出口でのガス流量から気泡径を求める上記音響学的方法^{4)~6)}や2針の電気探針法^{7)~9)}では、上昇中の気泡の形状を知ることができず、また約1mmよりも小さな気泡は検知できない。そこで今回はX線透過装置を用い、1250°Cの溶鉄中の気泡の挙動を直接観察することによって、気

泡の形状・寸法、気泡発生頻度 (f_B)、平均気泡径 (d_B)、平均気泡上昇速度 (\bar{u}_B) と吹き込みアルゴンガス流量 (Q_g) との関係調べ、以前のモデル実験から得られた気泡特性に関する測定値ならびに実験式との比較検討を行った。

2. 実験装置および測定方法

2.1 実験装置

実験装置の概要をFig. 1に示す。当初、円形断面(5.5cm ϕ , 6.5cm ϕ)の黒鉛るつぼに浴深が9.0cmになるように、銑鉄(Fe-4% C)を1250°Cで溶解し、石英製L型ランスを用いて、るつぼ底部近傍からロタメータで流量調整したアルゴンガスを吹き込んだ。その様子を、X線(管電圧300kV、管電流12mA)を炉の側面から照射することにより容器内を透視し、高速度ビデオカメラ(H.S.V.)を用いて毎秒200コマのスピードで撮影した。しかし、円形断面のるつぼではX線が十分に透過せず、容器の壁近くを上昇してくる気泡しか観察できなかった。そこで円形断面の黒鉛るつぼを奥行を小さくした長方形断面のものとの交換し、浴深が約7.5cmになるように銑鉄を1250°Cで溶解し、アルゴンガスを吹き込んで、透視観察を行った。浴内の温度分布はほぼ一様であ

平成5年12月16日受付 平成6年4月8日受理 (Received on Dec. 16, 1993; Accepted on Apr. 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 (Graduate Student, Osaka University)

* 3 新日本製鉄(株)製鋼プロセス技術研究所 (Steelmaking Process, Process Technology Laboratories, Nippon Steel Corp.)

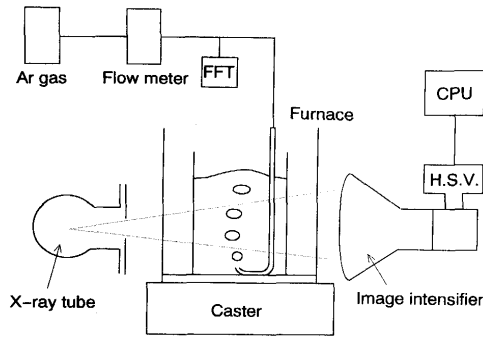


Fig. 1. Experimental apparatus.

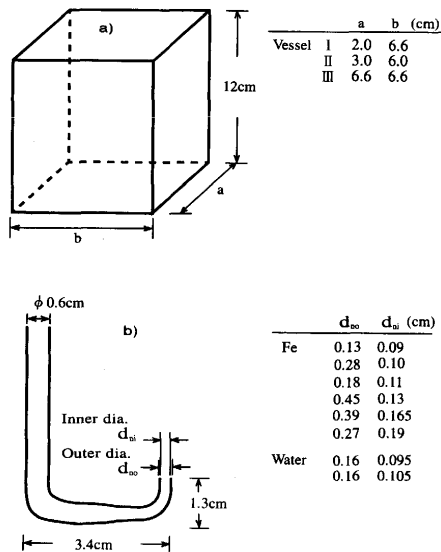


Fig. 2. The dimensions of baths and nozzles.

り、ランス出口のノズルでのガスの温度は浴内の温度に等しくなっていることを熱電対を用いて確認した。ガス流量 Q_g は温度 1250°C でノズル先端における値が $20 \sim 413 \text{ cm}^3/\text{s}$ になるように調整した。なお、ノズル先端の圧力は浴表面から先端までの距離をビデオ画像から読みとり、計算で求めた。また蓄気室容積の影響が無関係な高いガス流量域で実験を行ったため、特に蓄気室は取り付けなかった。

Fig. 2 (a), (b) に直方体容器とランスの概要を示す。容器は高さが 12 cm で幅と奥行が $6.6 \text{ cm} \times 2.0 \text{ cm}$, $6.0 \text{ cm} \times 3.0 \text{ cm}$, $6.6 \text{ cm} \times 6.6 \text{ cm}$ の 3 種類 (順に I, II, III と称する) である。容器の大きさが気泡発生頻度 f_B , 平均気泡上昇速度 \bar{u}_B などに及ぼす影響を調べるために水モデル実験を行ったが、その場合の容器は透明なアクリル樹脂で作製した。また III の容器は水モデル実験の場合にだけ用いた。ランスについては Fig. 2 (b) に示すように、内径 $0.09 \text{ cm} \sim 0.19 \text{ cm}$, 外径 $0.13 \text{ cm} \sim 0.45 \text{ cm}$ のものを使用した。なお石英製のランスは溶銑には濡れないが、水には濡れる。

2.2 測定方法

2.2.1 気泡発生頻度

気泡発生頻度 f_B は、ランスから生成する気泡の数をビデオ

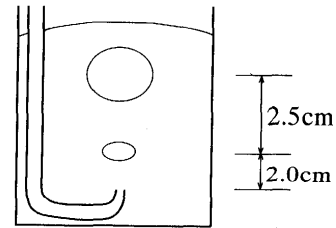


Fig. 3. Measurement method of mean bubble rising velocity.

画像から読み取ることによって求めた。また佐野ら、Irons らと同様に、ノズルからの気泡離脱に伴う配管内の圧力変動を周波数分析する方法 (FFT) も採用した。ただし FFT は高速フーリエ変換 (Fast Fourier Transformation) の略号である。これら二つの測定方法による f_B の差は本実験条件下ではほとんどみられなかったため、以下に示す f_B の値はビデオ画像から直接読み取ったものである。

2.2.2 平均気泡径

ガス流量 Q_g をランス先端のノズルで発生する気泡頻度 f_B で除すと気泡体積が得られる。これより、気泡を球形と仮定することにより平均気泡径 (d_B) を求めた。

$$d_B = [6Q_g / (\pi f_B)]^{1/3} \dots\dots\dots (1)$$

2.2.3 平均気泡上昇速度

Fig. 3 に示すように、ノズル出口から 2 cm 離れたところから、さらに 2.5 cm の距離を気泡の重心が通過する時間を測定し、 2.5 cm を通過時間で除して平均気泡上昇速度 (\bar{u}_B) を求めた。ここでノズルからの距離 2 cm は気泡がノズルから離れて、浮力によって上昇しはじめる軸位置であり、そこから 2.5 cm の区間は、気泡が浴表面の影響を受けない最大の区間として選んだ。なお、ガス流量が高くなると気泡が大きくなるので、その場合は気泡の上端と下端がその区間を通過する時間を測定し、 \bar{u}_B を決定した。 \bar{u}_B の測定誤差は $\pm 15\%$ である。

3. 実験結果および考察

3.1 水モデル実験

水モデル実験で得られた気泡発生頻度と平均気泡上昇速度の測定値をそれぞれ Fig. 4, 5 に示す。黒プロットは内径 0.095 cm のノズルを用いた場合で、白プロットは内径 0.105 cm のノズルを用いた場合である。Fig. 4 において黒、白どちらのプロットをみても容器の奥行による f_B の差はほとんどみられない。また \bar{u}_B は、流量が低い場合はどの容器についてもほぼ同じ値をとるが、流量が高くなるにつれて、容器の奥行が小さくなるほど値が大きくなるのが Fig. 5 から明らかである。これは容器が小さくなるにつれ、気泡の上昇する場所が固定されるようになり、その結果気泡が上昇しやすくなるためであろう。

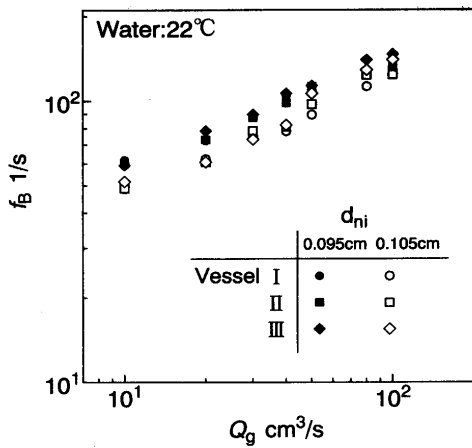


Fig. 4. Relation between bubble frequency f_B and gas flow rate Q_g for water-air model.

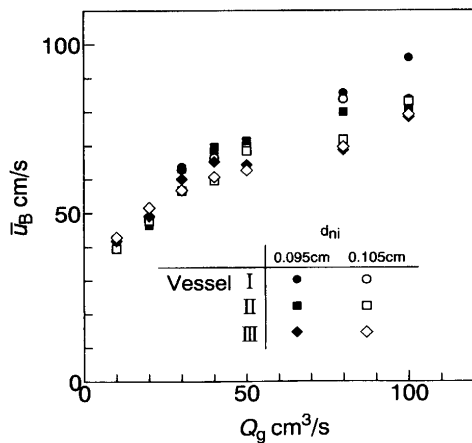


Fig. 5. Relation between mean bubble rising velocity \bar{u}_B and gas flow rate Q_g for water-air model.

3・2 溶鉄—アルゴン系ホットモデル実験

3・2・1 X線透視装置による気泡の観察

溶鉄-Ar系の場合について、容器内の様子をFig. 6, 7に示す。Fig. 6はガス流量が $25\text{cm}^3/\text{s}$ のときであるが、このようにガス流量が低い場合は気泡がほぼ等しい時間間隔で発生し、上昇していくことが観察された。しかしガス流量が高くなると、Fig. 7に示すように一つ気泡が生成されると、次の気泡（ときにはその次の気泡も）は前の気泡の後流に吸い込まれるように生成され、塊となって上昇していく。ただし合体はしていない。この現象は水モデルで観察されているダブレットによく似ている⁹⁾。また大きな気泡の分裂による小さな気泡の発生は、容器I, IIの場合、ガス流量が約 $60\text{cm}^3/\text{s}$ ではじめてみられ、小さな気泡の直径はガス流量の増加とともに小さくなり、数は多くなった。

3・2・2 ノズル出口における気泡発生頻度

気泡発生頻度 f_B の測定値をFig. 8に示す。 f_B の値は Q_g の増加とともに増加するが、 $Q_g > 100\text{cm}^3/\text{s}$ では増加率は減少する。

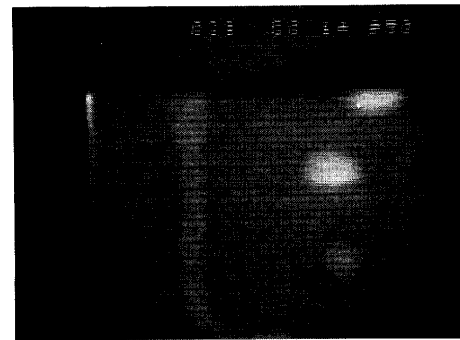


Fig. 6. X-ray fluoroscopic image of bubbles. ($Q_g = 25\text{cm}^3/\text{s}$, $d_{ni} = 0.11\text{cm}$, $d_{no} = 0.18\text{cm}$)

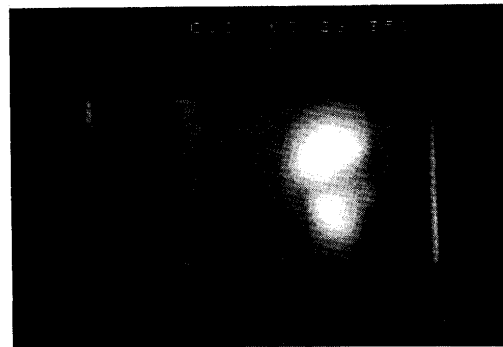


Fig. 7. X-ray fluoroscopic image of bubbles. ($Q_g = 79\text{cm}^3/\text{s}$, $d_{ni} = 0.11\text{cm}$, $d_{no} = 0.18\text{cm}$)

溶鉄は石英に濡れないので、Davidson-Amickの式においてノズル内径 d_{ni} を外径 d_{no} に変えた佐野らの式⁴⁾

$$d_B = 0.54[Q_g d_{no}^{1/2}]^{0.289} \dots\dots\dots (2)$$

を用いる。気泡発生頻度 f_B は式(1)を変形して

$$f_B = Q_g / V_B = 6Q_g / (\pi d_B^3) \dots\dots\dots (3)$$

となることから、この式に式(2)を代入すれば次式が得られる。

$$f_B = 12.1 Q_g^{0.133} d_{no}^{-0.434} \dots\dots\dots (4)$$

Fig. 8において、各々のノズル外径に対応する式(4)の値は線の種類を変えて示してある。式(4)の値は測定値よりも1.5~2倍程度大きく、本測定値を近似できない。

本測定値はノズル外径よりはむしろ内径のほうでよく整理できる。そこでガス流量が比較的高い領域に着目し、次のようなノズル内径を用いた式

$$f_B = 3.3(Q_g^{2/5} / d_{ni})^{1/2} \dots\dots\dots (5)$$

を提案した。この式は、次元解析から Q_g を用いて長さの次元を有する量を求めると $(Q_g^2/g)^{1/5}$ が得られるので、これをノズル内径 d_{ni} で除して無次元化し、 f_B がこの量に依存すると仮定して求めた。測定値を式(5)と比較してFig. 9に示す。多少ばらつきがみられるが、測定値は式(5)により $\pm 20\%$

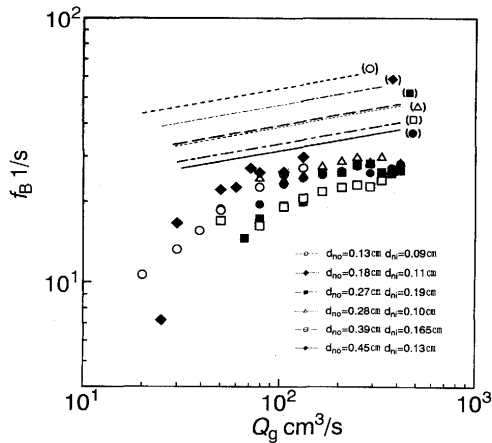


Fig. 8. Comparison of measured values of bubble frequency with empirical correlation by Sano et al.

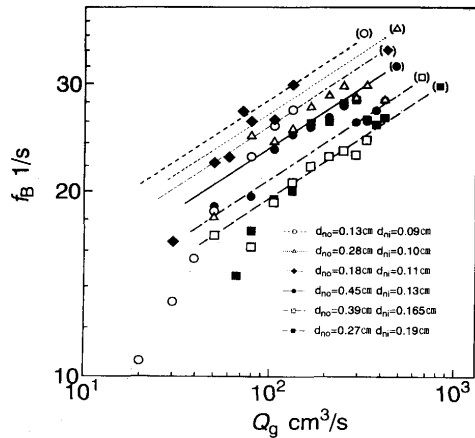


Fig. 9. Comparison of measured values of bubble frequency with the present empirical correlation.

の偏差で近似できる。式(5)の適用範囲の上限は、確認しているわけではないが、ノズル出口での線速度が見かけの音速を越えてジェッティングが現れるまでのガス流量であると考えられる。

なお、ガス流量が低い場合は、気泡はノズル外径の半径位置まで広がるのに十分な時間的余裕があり、その結果として気泡頻度は従来いわれているようにノズル外径によって支配される。しかしガス流量が高くなってくると、そのような時間的余裕はなくなり、詳細は今のところ不明であるがノズル内径に起因する何らかの流体力学的不安定により気泡が生成するものと本実験結果から解釈せざるを得ない。

式(5)を他の液体にも適用できるようにするために、両辺を無次元化した次の式を仮定した。

$$[\sigma/(\rho_L g^3)]^{1/4} f_B = a(\rho_g/\rho_L)^b \times [Q_g^2/g]^{1/5} / d_{ni}^{1/2} \dots\dots (6)$$

ここで σ : 表面張力, ρ_L : 液体の密度, g : 重力加速度, ρ_g :

気体の密度である。係数 a と指数 b を今回のFe-Ar系の測定値と従来の水-空気系のDavidson-Amickの式¹⁾にできるだけ合うように決定すると、式(6)は

$$f_B = 92.8(\rho_L/\sigma)^{1/4} (\rho_g/\rho_L)^{1/5} \times (Q_g^{2/5}/d_{ni})^{1/2} \dots\dots (7)$$

となった。さらに式(1)と(7)からノズル出口での平均気泡径 d_B を求めると、

$$d_B = 0.274(\sigma/\rho_L)^{1/12} (\rho_L/\rho_g)^{1/15} \times Q_g^{4/15} d_{ni}^{1/6} \dots\dots (8)$$

が得られる。以下に、式(7)、(8)と他の熔融金属浴中における f_B と d_B の測定値との比較を行う。

3.3 各種熔融金属中における気泡頻度と気泡径に関する従来の測定値と本実験式との比較

Fig.10にFe-Ar系, Cu-Ar系, ウッドメタル-N₂系, 水銀-空気系の測定値と実験式との比較を示す。ウッドメタル-N₂系のオリフィスに対する測定値はXieら¹⁰⁾のものであるが、残りはすべて以前に著者らの研究室で電気探針法を用いて得られた測定値である。また破線は佐野らの式(4)、実線は式(7)である。なおオリフィスでは外径が定義できないため、佐野らの式は記入していない。Cu-Ar系のランスの場合に少し差がみられるが、他のどの場合に対しても本実験式のほうが佐野らの式よりも測定値との一致はよい。

Fig.11にIronsら⁹⁾が円筒容器内の溶鉄中にノズルからArを吹き込んだときの気泡径に関するデータとの比較を示す。破線と実線は先ほどと同様で、一点鎖線は次のIronsらの実験式である。

$$d_B = [3\sigma d_{no} N_c'^m / (\rho g) + (9\sigma^2 d_{no}^2 N_c'^m / (\rho^2 g^2) + K Q_g^2 d_{no} / g)^{1/2}]^{1/3} \dots\dots (9)$$

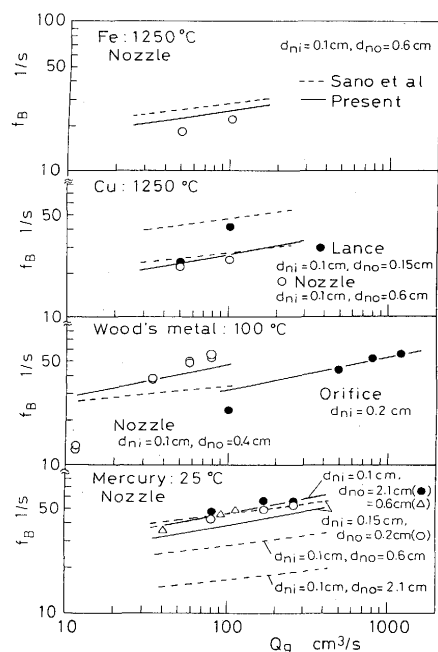


Fig. 10. Comparison of measured with estimated values of bubble frequency in some kinds of molten metals.

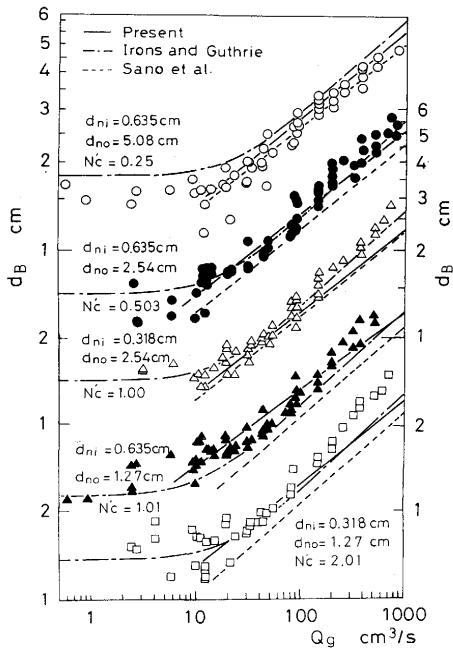


Fig. 11. Comparison of measured with estimated values of bubble diameter in molten iron.

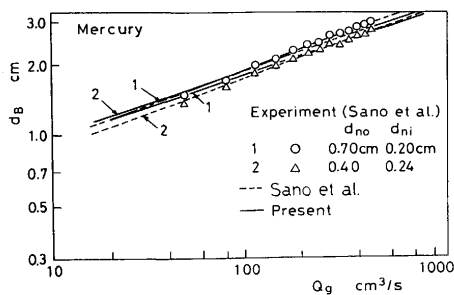


Fig. 12. Comparison of measured with estimated values of bubble diameter in mercury.

ここで N_c' は蓄気室容積を表す無次元数, $K=10$, $m=0.816$ である。ガス流量が約 $10\text{cm}^3/\text{s}$ よりも大きいところでは、3種類の実験式のうち本実験式(8)が測定値と最もよく一致しているようにみうけられる。

Fig.12ではSanoら¹¹⁾が水銀浴で測定した気泡径と実験式との比較をしているが、これに関しても式(8)と測定値との間にはよい一致がみられる。

従来、ノズルと液体が濡れないとき、ガス流量が比較的高い領域の気泡頻度 f_B はガス流量とノズル外径にのみ依存するといわれていたが⁹⁾¹¹⁾、以上の結果から、約 $20\text{cm}^3/\text{s}$ より高いガス流量域では、気泡発生頻度はノズル内径の他に液体と気体の物性値を用いた式(7)でより精度よく整理できることが分かった。

3・4 溶鉄—アルゴン系気泡噴流における平均気泡上昇速度

Fig.13に平均気泡上昇速度の実験結果を示す。破線は、著者らが以前提案した次の実験式³⁾である。

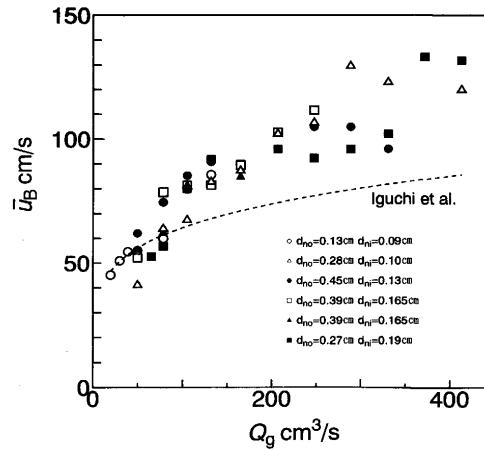


Fig. 13. Comparison of measured with estimated values of mean bubble rising velocity in molten iron.

$$\bar{u}_B = 0.44 (Q_g g^2)^{1/5} / c^2 \dots\dots\dots (10)$$

$$c = 0.26 (\rho_L / \rho_g)^{0.07} \dots\dots\dots (11)$$

ガス流量が低い場合には、本測定値と式(10)とはよい一致を示しているが、ガス流量が高くなると測定値のほうが大きくなる。これは前述の水モデル実験の結果から判断して、容器が小さいことに起因していると考えられる。

3・5 浴表面近傍における気泡の挙動

最後に、浴表面近傍の気泡の状態についてFig.14, 15に示



Fig. 14. X-ray fluoroscopic image of bubbles near the bath surface. ($Q_g=79\text{cm}^3/\text{s}$, $d_{ni}=0.11\text{cm}$, $d_{no}=0.18\text{cm}$)

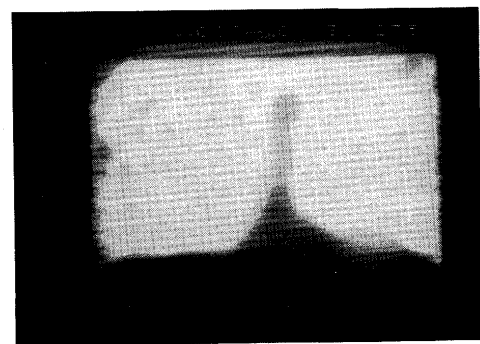


Fig. 15. X-ray fluoroscopic image of the bath surface. ($Q_g=105\text{cm}^3/\text{s}$, $d_{ni}=0.11\text{cm}$, $d_{no}=0.18\text{cm}$)

す。ガス流量が低い場合、表面に現れた気泡は、すぐには破裂せずに比較的長い時間表面近傍に滞在しており、そのため後から上昇してきた気泡は表面付近で半径方向に流されたり、前の気泡を突き抜けたりする現象がみられた(Fig. 14参照)。またガス流量が高くなると、Fig.15の $Q_g=105\text{cm}^3/\text{s}$ の場合のようなスピittingが観察された。しかし、この現象が起こるメカニズムの詳細については今のところ不明である。

4. 結言

(1) 溶鉄中のランスの先端に設けたノズルでの気泡発生頻度は、ノズル内径の他に気体と液体の物性値に依存し、次の式で整理できた。

$$f_B = 92.8(\rho_L/\sigma)^{1/4}(\rho_g/\rho_L)^{1/5} \times (Q_g^{2/5}/d_{ni})^{1/2} \dots\dots\dots (7)$$

ここで ρ_L ：液体の密度、 Q_g ：ガス流量、 ρ_g ：気体の密度、 d_{ni} ：ノズル内径、 σ ：表面張力である。ただし、この式の適用範囲はガス流量が約 $20\text{cm}^3/\text{s}$ よりも高い領域であり、ガス流量がこれよりも低い領域では従来通りノズル内径ではなく、外径で整理できる。

(2) X線透視観察から、大きな気泡の分裂による小さな気泡の生成は、流量が約 $60\text{cm}^3/\text{s}$ ではじめてみられた。

(3) 流量が約 $80\text{cm}^3/\text{s}$ 以上の場合、一つ気泡が発生すると、次の気泡は前の気泡に吸い込まれるように生成し、塊とな

って上昇することが確認された。これは水モデル実験で観察されているダブルレットに似ている。ただし二つの気泡の合体はない。

(4) 平均気泡上昇速度は低いガス流量域 $Q_g=20\sim 80\text{cm}^3/\text{s}$ では前に提案した実験式(10)によって近似できる。

(5) 表面に到達した気泡は、強い表面張力のためにすぐには破裂せず、比較的長い時間表面に存在しており、そのため後から上昇してきた気泡は表面付近で半径方向に流されたり、前の気泡を突き抜けたりする現象がみられた。

文 献

- 1) L. Davidson and E. H. Amick, Jr.: AICHE Journal, 2 (1956), p.337
- 2) 井口 学, 川端弘俊, 岩崎敏勝, 野沢健太郎, 森田善一郎: 鉄と鋼, 76 (1990), p.407
- 3) 井口 学, 出本庸司, 菅原直也, 森田善一郎: 鉄と鋼, 78 (1992), p.407
- 4) 佐野正道, 森 一美: 鉄と鋼, 60 (1974), p.348
- 5) 佐野正道, 森 一美, 佐藤哲郎: 鉄と鋼, 63 (1977), p.2308
- 6) G. A. Irons and R. I. L. Guthrie: Metall. Trans. B, 9 (1978), p.101
- 7) 川上正博, 細野 聡, 高橋一寿, 伊藤公允: 鉄と鋼, 78 (1992), p.267
- 8) 井口 学, 川端弘俊, 森田善一郎, 中島敬治: 材料とプロセス, 5 (1992), p.1306
- 9) 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
- 10) Y. K. Xie, S. Orsten and F. Oeters: Proc. IISC, Vol. 1 (1990) p.421
- 11) M. Sano, Y. Fujita and K. Mori: Metall. Trans. B, 7 (1976), p.300