

論 文

UDC 669.14-404 : 669.046.517 : 661.939.3 : 546.6-31

溶鉄中の浸漬ノズルからの気泡生成について*

佐野 正道**・森 一美**・佐藤 哲郎***

Bubble Formation at Single Nozzles Immersed in Molten Iron

Masamichi SANO, Kazumi MORI, and Tetsuro SATO

Synopsis:

A study has been made of the formation of bubbles from single nozzles in liquid iron. The size of bubbles is determined by a pressure pulse technique. Nozzles used in the experiments are of the sizes 0.32~0.67 cm in O. D. and 0.12~0.33 cm in I. D. The gas flow rate and the oxygen concentration in liquid iron are varied from 0.1 to 36 cc/sec at 1 600°C and 0.0040~0.046%, respectively. The experiments are carried out under conditions where the gas chamber volume has no influence on bubble formation. At lower gas flow rates, the bubble diameter (d_B) is determined by the nozzle outer diameter (d_{no}), liquid density (ρ_l) and surface tension (σ). At higher gas flow rates, the bubble diameter depends on the gas-flow rate (V_g) and nozzle outer diameter, being independent of the physical properties of the liquid. It is shown that the following equation is applicable for describing the size of bubbles in liquid iron in the whole range of explored gas flow rates.

$$d_B = \left[\left(\frac{6\sigma d_{no}}{\rho_l g} \right)^2 + \{0.54 (V_g d_{no}^{0.5})^{0.289}\}^6 \right]^{1/6}$$

1. 緒 言

最近, AOD 法, Q-BOP 法など気体吹込みによる精錬法が注目され, 実際の方面からの研究がかなり行なわれるようになってきた^{1)~3)}. しかし, これらのプロセスの基本をなす気泡-溶鋼間反応に関する基礎的研究はきわめて貧弱であり, その反応機構の解明はほとんどなされていない. その大きな理由として実験が困難であること, 生成する気泡の大きさが不明であることなどがあげられる.

溶鉄中で生成する気泡の大きさについては従来^{2, 3}の研究が行なわれているが^{4)~6)}, 気泡の大きさに対する種々の因子の影響を定量的に表わすまでには至っていない.

著者らは, さきに⁷⁾⁸⁾水銀, 溶融銀中のノズルからの気泡生成について研究を行ない, とくに液体の物性値(表面張力, 密度), ガス流量, ノズル径, 蓄気室容積などの影響を検討し, 気泡の大きさを定量的に推算しうる式を得た.

本研究では, 溶鉄中のアルミナノズルから生成する気

泡の大きさを測定し, ガス流量, ノズル径, 溶鉄の酸素濃度の影響を明らかにし, 水銀, 溶融銀に適用できた式の溶鉄への適用性を検討した. なお, 実験は, 蓄気室容積が臨界値以下で, 気泡生成に影響をおよぼさない条件下で行なった.

2. 気泡の大きさの相関式のガス流量による分類

気泡生成機構はガス流量の大きさによつて変化するため, 前報⁷⁾のガス流量による分類にしたがい, 水銀, 溶融銀に適用した式を以下に示す. なお, 以下の式は, 蓄気室容積が気泡生成に影響をおよぼさない場合の式である.

低ガス流量域(領域(1))では, 気泡は静力学的条件下で生成し⁹⁾¹⁰⁾, 生成する気泡の大きさはガス流量には依存しない. 気泡の大きさは, 液の物性(表面張力, 密度)とノズル径によつてきまり, 次式で与えられる.

$$d_B = (6\sigma d_n / \rho_l g)^{1/3} \dots\dots\dots (1)$$

ここで, d_B は気泡径, σ は表面張力, d_n はノズル径, ρ_l は液体の密度, g は重力加速度である. 前報⁷⁾の水

* 昭和51年4月本会講演大会にて発表 昭和51年12月20日受付 (Received Dec. 20, 1976)

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

*** 名古屋大学大学院 (現 (株)神戸製鋼所) (Graduate School, Nagoya University)

銀，熔融銀の場合，ノズルの濡れ性を考慮してノズル径として外径をとり，実測値が(1)式による計算値に一致することを示した。

中間ガス流量域(領域(II))においては，生成する気泡の大きさはガス流量とノズル径のみによつてきまり，液の物性には依存しない。前報⁷⁾⁸⁾では，この領域において水-空気系で得られた実験式¹¹⁾

$$d_B = 0.54(V_g d_n^{0.5})^{0.289} \dots \dots \dots (2)$$

が，ノズル径として外径をとることにより，ノズルが濡れにくい熔融金属系に適用できることを示した。なお， V_g はガス流量である。

(I)，(II) およびそれらの間の遷移流量域(I-II)を含む広いガス流量域(I)-(II)における気泡生成に対しては，次式¹²⁾

$$d_B = \left\{ \frac{3\sigma d_n}{\rho_l g} + \left(\frac{9\sigma^2 d_n^2}{\rho_l^2 g^2} + K \frac{V_g^2 d_n}{g} \right)^{1/2} \right\}^{1/3} \dots (3)$$

が適用できる。ここで，(3)式の K は定数で，実験的に決定される。前報⁷⁾の水銀の場合，実測値は $K=10$ とし，ノズル径として外径をとつた場合の計算値に一致した。

3. 実 験

3.1 実験装置

実験装置を Fig. 1 に示した。加熱には高周波誘導炉(200 kC, 15 kW)を用い，浴の攪拌はモリブデンシールド(直径 5.5 cm, 厚さ 0.05 cm, 高さ 10 cm のモリブデン管)により抑えた。使用したるつぼはマグネシアるつぼ(内径 3.8 cm, 外径 5.0 cm, 高さ 10 cm)である。るつぼの上のマグネシア管(高さ 13 cm)は，スプ

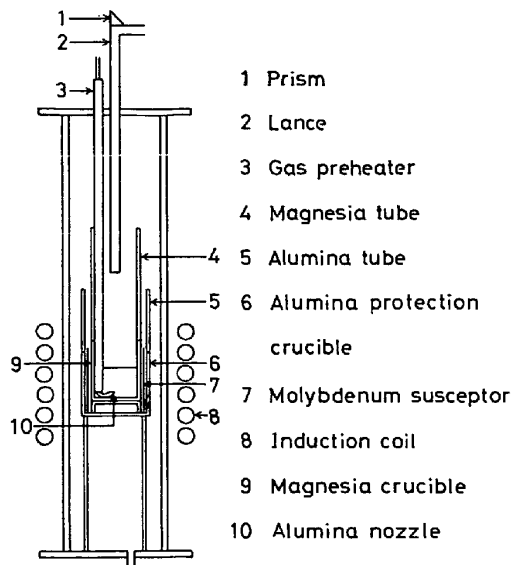


Fig. 1. Experimental apparatus.

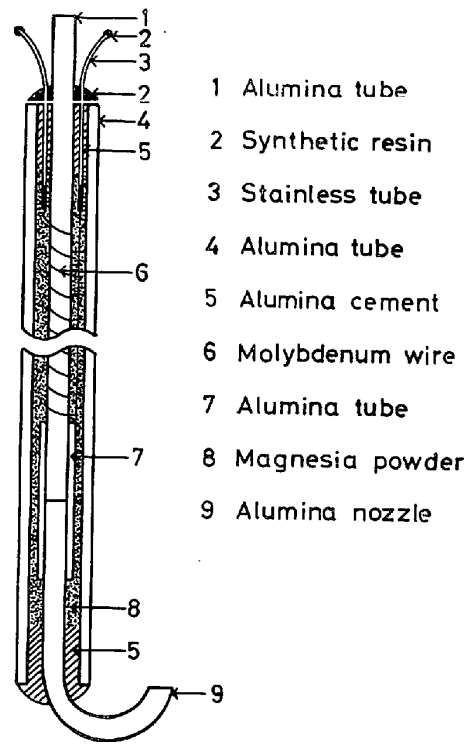


Fig. 2. Construction of gas inlet tube and nozzle.

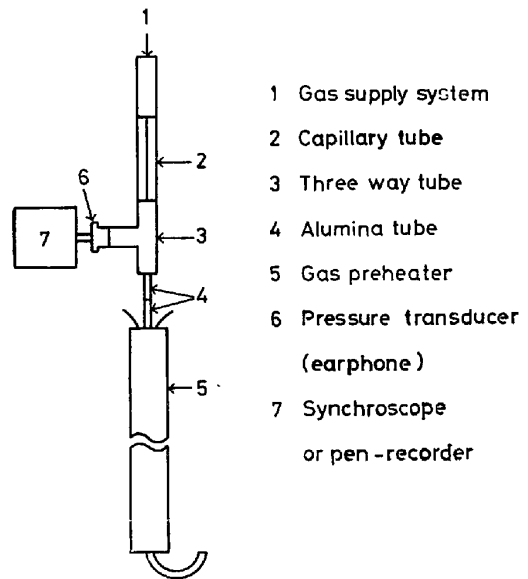


Fig. 3. Gas supply train.

ラッシュが反応管に付着するのを防ぐために置いた。浴温度は光高温計により測定した。

Fig. 2 にはガス導入部とノズルを示した。吹込みガス導入用の内管1は外径 0.3 cm, 内径 0.1 cm, 長さ 40 cm のアルミナ管である。その外側にはモリブデン線6を巻き，抵抗加熱により吹込みガスを予熱する。なお，モリブデン線はステンレス管3に接続し，直接空気に触れないようにした。アルミナノズル9の先端は上向き

で、外径は 0.32~0.67 cm, 内径は 0.12~0.33 cm の範囲で変化させた。外管 4 は外径 1.0 cm, 内径 0.6 cm のアルミナ管である。内管と外管の間にはマグネシア微粉末、上、下端はアルミナセメントを充填し、1000°C で焼結した。

Fig. 3 には送気系よりノズルに至るまでの配管および圧力パルス測定部を示した。毛細管 2 は、その上流側の配管の内容積が蓄気室として働くのを防ぐために入れた。毛細管より下流のガス導入管およびノズル (内径 0.12 cm) の内容積は 0.56 cm³ である。気泡生成に伴う圧力パルスは、圧力変換器 (ラジオ用イヤホン) 6 を用い、シンクロスコープ、記録計により測定した。

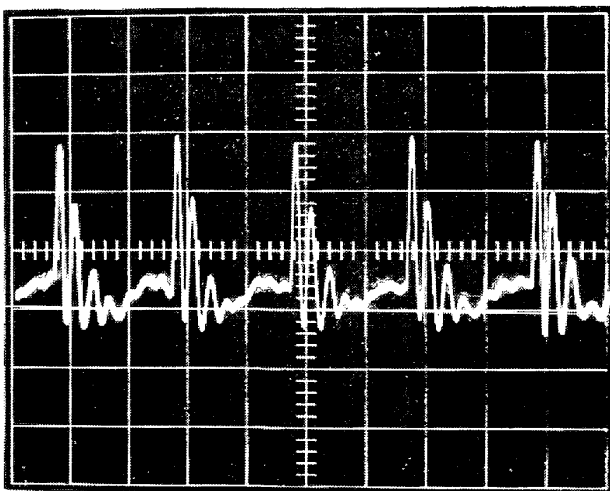
3.2 実験方法および条件

電解鉄 400 g をアルゴン雰囲気下で溶解する。溶解後、浴内酸素濃度を調節する。酸素濃度が 0.015% 以下で実験を行なう場合、水素吹付けによつて脱酸し、さらに適当量の黒鉛を添加し、C-O 反応により脱酸した。酸素濃度が 0.015~0.030% の場合、水素吹付けによる脱酸のみで調節した。酸素濃度がさらに高い実験では、このような脱酸を行なっていない。その後、吹込み用ノズルを浸漬し、浴温度を 1600°C に調節した。

実験条件としては、実験温度 1600°C に換算したアルゴン流量は 0.1~36 cc/sec, 浴内の酸素濃度は 0.0040~0.046% の範囲で変化させた。吹込み深さは 4.9 cm である。

3.3 気泡の大きさの測定

Photo. 1 は、中間ガス流量域における気泡生成によつて生じる圧力パルスをシンクロスコープにより測定し



20 msec/div, 10 mV/div
 $d_{no}=0.57\text{cm}, d_{ni}=0.18\text{cm}, [\%O]=0.027$
 $V_g=23.6\text{cc/sec at } 1600^\circ\text{C}$
 $f=24.6\text{ bubble/sec}, d_B=1.22\text{cm}$

Photo. 1. Variation of pressure in gas supply train during bubble formation.

たものである。写真よりわかるように、本実験の流量範囲では気泡生成は非常に規則的で、最大ピーク間の間隔を測定することにより気泡発生頻度を求めることができる*。

生成する気泡の体積 V_B は気泡発生頻度 f とガス流量 V_g の関係より求めた。

$$V_B = V_g / f \dots\dots\dots (4)$$

以下の実験結果では、この気泡体積より球相当直径 d_B を算出して示してある。

4. 実験結果および考察

4.1 実験に関する予備的検討

本実験のように生成する気泡の大きさを測定する場合、吹込みガスはノズル先端において実験温度に達し、十分膨張していることが必要である。予熱しないガスを溶鉄に吹込んだ場合、流量が高くなると、溶鉄の温度は低下し、一定に保つことができなくなる。そのため、本実験では、Fig. 2 に示したように、抵抗加熱により吹込みガスを予熱した。Fig. 4 には、気泡生成時間に対する予熱用電力の影響を示した。電力が 20W 以上では気泡生成時間は一定で、かつ溶鉄の温度も変化しないことがわかった。これより、この予熱電力以上で吹込みガスはガス導入部で十分に予熱され、ノズル先端でのガス温度は浴温度に等しくなっていることが推定できる。以下の実験では予熱用電力は 40W とした。

低ガス流量域においては、蓄気室が生成する気泡の大きさに大きな影響をおよぼすことが知られている¹⁰⁾。前

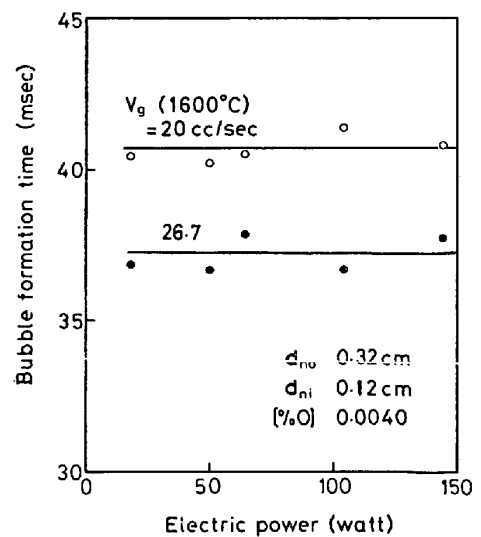


Fig. 4. Effect of preheating on bubble formation time.

* 写真では1周期に最大ピークの外にいくつかの小さいピークがみられるが、これは、気泡生成によつて生じた圧力パルスが減衰振動により小さくなることを示している。

報⁷⁾において、ノズルが液体に濡れにくく、かつ蓄気室内に温度分布が存在する場合について、只木らの導いた蓄気室容積に関する無次元数 N'_c を修正して、無次元数 N'_c を得た。蓄気室が気泡生成に影響をおよぼさない条件下で実験を行なうためには、 N'_c を1以下にしなければならない。本実験の場合、ノズル内の温度分布を測定できなかつたため、 N'_c を計算できない。しかし、Fig. 3 に示した配管系が $N'_c < 1$ の条件を満たしているかどうかは、全蓄気室が室温に等しいとして N'_c を計算することによりわかる。このようにして計算した N'_c は最大でも 0.78 で、温度分布を考慮すると N'_c はかなり小さくなるため、本実験の場合 $N'_c < 1$ の条件が満足されていることがわかる。

本研究では、モリブデンシールドにより浴の攪拌を抑えた状態で大部分の実験を行なつたが、浴が誘導攪拌された状態でも一部行なつた。Fig. 6 に示した低流量域における実験の中で3と6は、浴が誘導攪拌された状態での実験であるが、浴の攪拌を抑えた他の実験との差異はみられず、気泡生成に対する攪拌の影響は無視できる。また、中間ガス流量域においても、Fig. 7 に示すように、気泡生成に対する攪拌の影響はみられなかつた。

4.2 低ガス流量域 (領域 I) における気泡生成

この範囲における実験は、気泡発生頻度が 2.5bubble/sec 以下の条件で行なつた。ガス流量は、ノズル径、酸素濃度によつて異なるが、1.3cc/sec (1600°C) 以下である。

Fig. 5 には、ノズル径、酸素濃度を変化させた場合の気泡径とガス流量の関係を示した。図中の実線はノズル径として外径をとつた場合、点線は内径をとつた場合の(1)式による計算値である。計算において、溶鉄の密度には平均的な値として 7g/cm³ を採用した¹³⁾。表面張

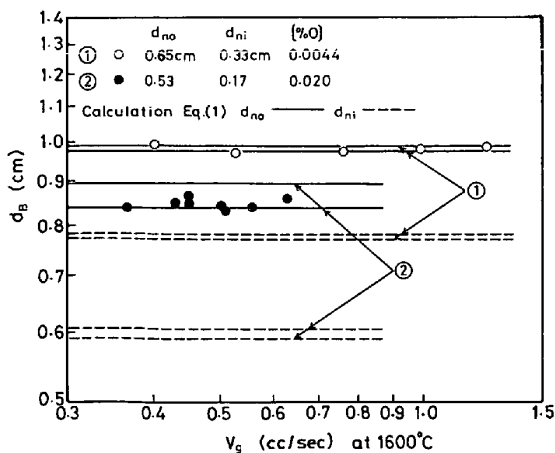
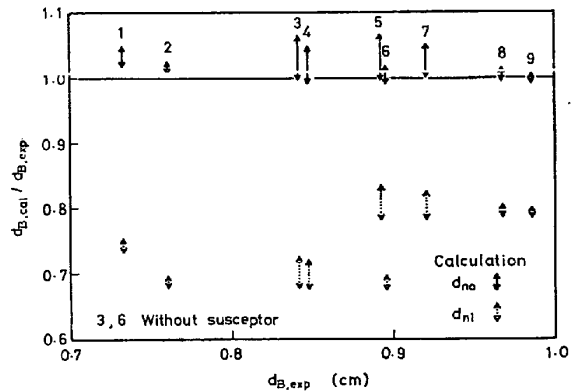


Fig. 5. Size of bubble formed at low gas flow rate (region I).



	d_{no}	d_{ni}	[%O]		d_{no}	d_{ni}	[%O]
1	0.32 cm	0.12 cm	0.011	6	0.53 cm	0.17 cm	0.010
2	0.33	0.12	0.0060	7	0.67	0.32	0.017
3	0.57	0.18	0.027	8	0.65	0.33	0.0063
4	0.53	0.17	0.020	9	0.65	0.33	0.0044
5	0.67	0.32	0.025				

Fig. 6. Comparison of experimental data with theoretical values in region I.

力の値は測定者によりかなりの差異があるので、ここでは最大および最小の測定値を与えている HALDENら¹⁴⁾と ESCHEら¹⁵⁾の値を代表として採用した。図に示した流量範囲では気泡径はガス流量に無関係に一定で、実測値はノズル径として外径をとつた計算値によく一致する。

Fig. 6 には低流量域で得られた実測値と計算値の比較をまとめて示した。横軸には気泡径の実測値、縦軸には計算値と実測値の比をとつた。縦の実線はノズル外径、点線はノズル内径を用いて計算した場合の比で、その上端は HALDENら、下端は ESCHEらの表面張力の測定値を用いた場合に対応している。図より、ノズル径として外径をとれば、実測値と計算値は一致することがわかる。

前報⁷⁾では、水銀、溶融銀中の濡れにくいノズルから生成する気泡の大きさはノズル外径をとつた(1)式による計算値に一致することを示した。Fig. 5, 6 で実測値がノズル外径をとつた計算値に一致するのは、水銀、溶融銀の場合と同様、溶鉄の場合も本実験の酸素濃度範囲ではノズルが濡れにくく、ノズルに付着している気泡底面がノズル先端の外周まで広がっていることを示している。

しかし、この気泡底面の広がりには限界があるはずであり、ノズル外径がさらに大きくなるとその外周まで広がらなくなることが考えられる。平面上に気泡が付着する最大の気泡体積、最大の気泡底面の広がりには BASHFORTH と ADAMS¹⁶⁾, WARK¹⁷⁾, FRITZ¹⁸⁾によつて行なわれた理論的解析により知ることができる。それによると、無次元化された気泡底面の最大半径 r_{max}/a (a : Laplace 定数 $=\sqrt{2\sigma/\rho ig}$) は、液体と平面との接触角 θ が小さくなるほど、小さくなる。

溶鉄中の酸素濃度が増加するにつれて、溶鉄とアルミナとの接触角は減少することが知られている¹⁹⁾。Fig. 6 に示した実験の最大の酸素濃度 [%O] は 0.027 である。萩野ら¹⁹⁾によると、その場合の接触角は 94° である。この接触角に対して理論的に求められた r_{max}/a は 0.72 である。溶鉄 ([%O]=0.027) の表面張力を 1180dyn/cm¹⁵⁾ とすると、 r_{max} は 0.42cm となる。

以上の解析は、低ガス流量域における静力学的条件下でのノズルからの気泡生成に適用できる。すなわち、[%O]=0.027 の場合、ノズル外径が 0.84cm 以下ではノズル先端に付着している気泡底面はノズル外周まで広がり得る。したがって、Fig.6 に示したノズル径、酸素濃度範囲では、気泡底面はノズル外周まで広がっていることがこの理論的解析からも証明される。

4.3 中間ガス流量域 (領域 II) における気泡生成

この流量域については、ガス流量を 15~36cc/sec (1600°C) の範囲で変化させた。このときの気泡発生頻度は 18~31 bubble/sec であつた。なお、この流量域ではノズル部分をガスが通過する際の圧力損失は十分大きく、送気系が蓄気室として働かなくなるため、Fig. 3 に示した配管の途中の毛細管を除いた。

Fig. 7 には、気泡径の実測値とノズル径として外径をとつた場合の(2)式による計算値の比較を示した。両者はよく一致しており、水-空気系について得られた(2)式が、水銀、熔融銀⁷⁾と同様、溶鉄にも適用できることがわかる。この結果は、領域(II)において生成する気泡の大きさはガス流量、ノズル径のみに依存し、液体の表面張力、密度に無関係であり、ノズルに付着している気泡底面はノズル外周まで広がっていることを示している。

4.4 領域(I)と(II)の間の遷移域(I-II)を含むガス流量域(I)-(II)における気泡生成

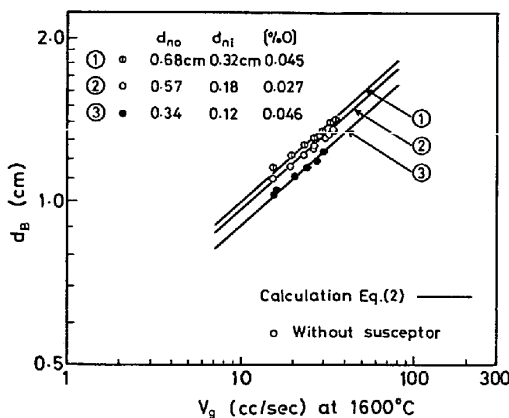


Fig. 7. Size of bubble formed at intermediate gas flow rate (region(II)).

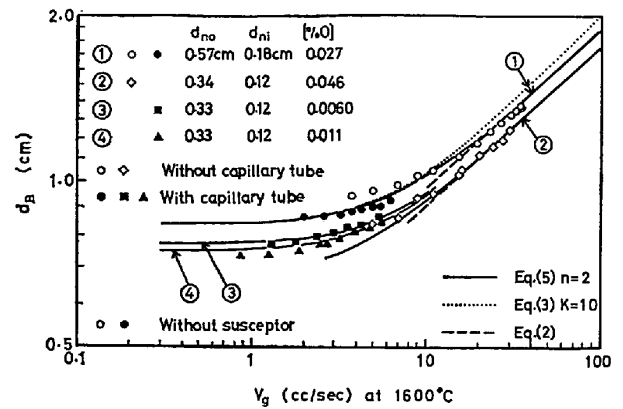


Fig. 8. Size of bubble formed at low, transitional and intermediate gas flow rates (region (I)-(II)).

ここでは、液体の物性値(表面張力、密度)とガス流量のいずれも気泡生成に影響をおよぼす遷移域(I-II)を含めて検討するため、ガス流量は 0.8~30cc/sec (1600°C) と広範囲に変化させて実験を行なつた。

Fig. 8 には、ノズル径、酸素濃度を変化させた場合の気泡径とガス流量の関係を示した。○、◇は、配管の途中に毛細管を入れなかつた場合、●、■、▲は毛細管を入れた場合の実験結果である。これらの中でとくに①の実験については、ノズル径として外径(=0.57cm)をとつた(3)式による計算値(点線)と実測値の比較を示した。なお、計算において、表面張力は ESCHE らの値を用いた*。

本実験と同じ流量範囲で行なつた水銀の実験においては、(3)式による計算値と実測値は一致した⁷⁾。しかし、図からわかるように、溶鉄の場合には流量が増加すると($V_g > 15/sec$ (1600°C)), (3)式による計算値は実測値より大きくなる。これは、液体の物性値が気泡の大きさに影響しないような高い流量域で、(3)式が溶鉄についての実測値をよく表わす(2)式に一致していないことによる。

以上のことを考慮して、(I)のガス流量域に対しては(1)式、(II)のガス流量域に対しては(2)式に一致するように、2つの流量域の式を接続した次式を作成した。

$$d_B = \left[\left(\frac{6\sigma d_n}{\rho l g} \right)^n + \{0.54(V_g d_n^{0.5})^{0.289}\}^{3n} \right]^{1/3n} \dots (5)$$

ここで、 n は、領域(I)と(II)の間の遷移域で(5)式が実測値に一致するように実験的に決める定数である。(5)式において n が小さいほど、(I)の流量域から(II)の流量域にゆるやかに遷移する。

* ESCHEらの値を用いたのは、Fig. 6 に示したように、低ガス流量域における実測値が ESCHE らの表面張力を用いた計算値と比較的よく一致することによる。

Fig. 8 には、 $n=2$ とし、ノズル径として外径をとつた (5) 式による計算値を実線で示した。図には (2) 式による計算値も同時に示した。図からわかるように、高いガス流量においては (5) 式は (2) 式に完全に一致し、かつ実測値 (○, ◇) にもよく一致している。流量が減少すると、液体の物性値 (表面張力, 密度) が気泡生成に影響し始めるが、そのような流量においても実測値 (○, ◇) は (5) 式による計算値によく一致している。さらに流量が低くなると、実測値 (○, ◇) は (5) 式による計算値より大きい方にずれるが、これは、配管の途中に毛細管を入れなかつたため、送気系が蓄気室として働いていることによる。一方、配管の途中に毛細管を入れ、送気系が気泡生成に対して影響をおよぼさないようにした場合の実測値 (●, ■, ▲) は (5) 式による計算値にほぼ一致している。

以上より、溶鉄中で生成する気泡の大きさは、低ガス流量域、中間ガス流量域、およびそれらの間の遷移流量域も含めて (5) 式により説明できることがわかる。

本報で作成した (5) 式の他の溶融金属への適用性を検討するため、Fig. 9 に前報⁷⁾の水銀についての実験結果とノズル径として外径をとつた (5) 式による計算値の比較を示した。図からわかるように、実測値は (5) 式にほぼ一致しており、(5) 式は水銀に対しても適用できることがわかる。図には (3) 式による計算値も同時に示したが、実験を行つた流量範囲では、溶鉄の場合とは異なり、(3) 式は実測値および (5) 式による計算値にほぼ一致している。しかし、流量がさらに高くなると、溶鉄の場合と同様に (3) 式は (5) 式より大きい値を与えるようになる。著者らは、水銀中で生成する気泡の大きさが少くとも 1000cc/sec 程度の高い流量まで (2) 式に一致することを見出している^{8)*}。以上より、

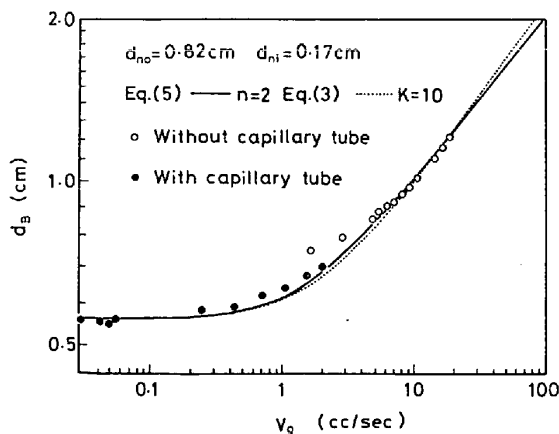


Fig. 9. Size of bubble formed in mercury.

* 前述のように、高い流量域では (2) 式は (5) 式に一致する。

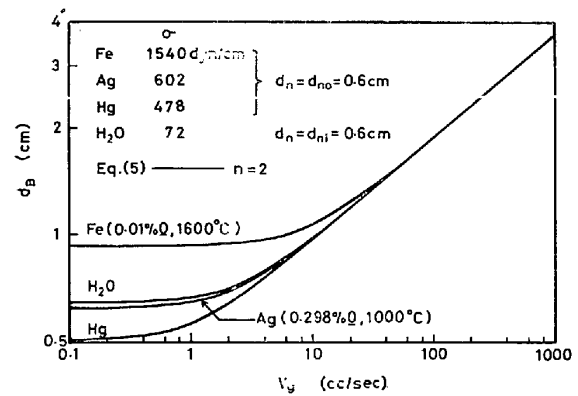


Fig. 10. Comparison of size of bubble formed in various liquids.

(3) 式は ガス流量の限定された 範囲にのみ適用でき、(5) 式の方が広い流量範囲に適用できることがわかる。

4.5 水および溶融金属中で生成する気泡の大きさの比較

前報の水銀、溶融銀⁷⁾⁸⁾、および本報の溶鉄の実験結果をまとめるため、各溶融金属に対して (5) 式により計算した気泡径とガス流量の関係を Fig. 10 に示した。図には、比較のため、水に対する計算結果も示した。計算においてノズル径は 0.6cm としたが、これは、溶融金属の場合には外径、水の場合には内径をとる。水銀の場合、この程度の外径のノズルについて、図の全流量範囲に対して (5) 式が適用できることを実験的に示した。溶融銀の場合、ノズル外径が 0.25cm で、 $10 < V_g < 70$ cc/sec (1000°C) の流量範囲で実測値は (2) 式に一致することを確かめてあるが、これは (5) 式がこの流量範囲で適用できることを示している。また、溶鉄の場合、この程度のノズル外径で、 $0.1 < V_g < 36$ cc/sec (1600°C) の流量範囲で (5) 式の適用性が確かめられている。このように、溶融銀、溶鉄については、実際に (5) 式の適用性を検討した流量範囲は限定されているが、水銀についての実験結果より (5) 式がさらに広い流量範囲においても適用できることが推定され、Fig. 10 に示す計算を行なつた**。

Fig. 10 から明らかなように、低ガス流量域 (領域 (I)) において生成する気泡の大きさは溶鉄の場合が最も大きく、水、溶融銀、水銀の順に小さくなる。流量が増加し、遷移域 (I・II) に入ると、流量の増加とともに液体の物性値 (表面張力 σ , 密度 ρ_l) の影響が小さくなるため、生成する気泡の大きさの液体による差は小さくなる。さらに高い流量 (領域 (II)) になると、液体の物性値は気泡生成に対して影響をおよぼさなくなり、各液

** 前報⁷⁾の実験結果より、(5) 式が、 $d_{no}=0.6$ cm において溶融銀の場合にも適用できることが推定できる。

体とも同じ大きさの気泡を生成するようになる。また、これらの (I), (I-II), (II) の分類に対応する実際のガス流量は液体の物性値によつて変化する。すなわち、 (σ/ρ_l) が大きいほど、生成気泡の大きさはより高い流量まで σ , ρ_l の影響を受け、(I) から (II) に遷移するガス流量は高流量側に移行する。

4.6 溶鉄中へのガス吹込みに関する研究の展望

前報⁷⁾⁸⁾ および本報で示したように、ノズルから生成する気泡の大きさは多くの因子によつて影響される。しかし、溶鉄中の気泡生成に関する実験は大きな困難を伴うので、広範囲の条件下で実験を行なうことができない。したがつて、溶鉄中の気泡生成についてはできる範囲内で実験を行なうと同時に他の熔融金属を用いたモデル実験からの推定を行なうことが必要となつてくる。前項で、溶鉄中のノズルから生成する気泡の大きさは、水銀、熔融銀の場合と同じ式で表わされることを示した。このことは、水銀を用いて行なわれるガス吹込みのモデル実験の結果がかなりの程度溶鉄にも適用できることを示している。

ガス流量が実際操作におけるように高くなると、ノズルから生成する大気泡の他に、その気泡が上昇中に分裂して小気泡になることが重要になつてくる。溶鉄中で分裂した小気泡の大きさを測定するのは非常に難しく、水銀によるモデル実験から気泡分裂に影響する因子が明らかになれば、それが溶鉄にも適用できることが期待され、現在著者らはこの方面の研究を行なつている。

ノズルが濡れにくい熔融金属の場合、ノズルが濡れる水溶液などの場合とは異なり、気泡径の相関式の中のノズル径は外径をとらなければならない。これより、炉底に穿つたオリフィスからガス吹込みを行なう場合ノズルの外径に対応するものがないため、炉底に付着して生成しつつある気泡底面はその孔径よりずつと広がるのが考えられる。このような気泡底面の広がり、生成気泡の大きさ、炉底におけるオリフィスの配置、炉底耐火物の浸食を考える上で非常に重要である。この問題についても、水銀を用いたモデル実験により解明できるものと考えられ、現在研究を進めている。

上述のことはポーラスプラグからの気泡生成にも言える。すなわち、ポーラスプラグが溶鉄に濡れにくい場合、気泡はポーラスプラグの小さい各孔から生成するのではなく、各孔から生成する気泡は離脱前に合体し、多くの孔から1つの大きな気泡を生成するものと考えられる。したがつて、ポーラスプラグからの気泡生成についても、ポーラスプラグが濡れにくい熔融金属を用いて実験を行なう必要がある。

5. 結 論

溶鉄中のアルミナノズルより生成する気泡の大きさを圧力パルス法により測定し、水溶液などノズルを濡らす液体について得られている理論式、実験式と比較検討した。その結果、水銀、熔融銀の場合と同様、溶鉄の場合もノズル径として外径をとつた計算値は実測値に一致することがわかつた。気泡の大きさは、ガス流量の低いところでは、流量には依存せず、溶鉄の密度、酸素濃度によつて変化する表面張力、およびノズル外径によつて決まり、ガス流量が高くなると流量、ノズル外径のみによつて決まるようになる。さらに、広いガス流量域についてこれらの関係を表わす式 ((5)式) を新たに作成し、溶鉄、水銀について計算値と実測値がよく一致することを示した。この式により、物性値が非常に異なる水、熔融金属などの液体中でノズルから生成する気泡の大きさを計算することができる。

記 号

a	: 毛管定数 ($=\sqrt{2\sigma/\rho_l g}$)	(cm)
d_B	: 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)
f	: 気泡発生頻度	(bubble/sec)
g	: 重力加速度	(cm/sec ²)
K	: (3) 式における定数	(-)
N_C	: 蓄気室容積に関する無次元パラメータ ($=4V_C\rho_l g/\{\pi d_{ni}^2(P_0+P_{hs})\}$) ¹⁰⁾	(-)
N'_C	: 蓄気室容積に関する修正無次元パラメータ ($=4T_B[\int_0^{V_C}(1/T)dV_C(T)]\rho_l g \sin\theta/\{\pi d_{ni}d_{no}(P_0+P_{hs})\}$) ¹¹⁾	(-)
P_{hs}	: ノズル先端における静水圧	(dyn/cm ²)
P_0	: 大気圧	(dyn/cm ²)
r_{max}	: 平板に付着しうる気泡底面の最大半径	(cm)
T	: 温度	(°K)
T_B	: 気泡温度	(°K)
V_B	: 気泡体積	(cm ³)
V_C	: 蓄気室容積	(cm ³)
V_g	: ガス流量	(cm ³ /sec)
ρ_l	: 液体密度	(g/cm ³)
θ	: 接触角	(degree)
σ	: 表面張力	(dyn/cm)

文 献

- 1) R. J. FRUEHAN: Met. Trans., **6B** (1975), p. 573
- 2) R. J. FRUEHAN: Ironmaking and Steelmaking, **17** (1976), p. 33
- 3) R. J. FRUEHAN: ibid, **17** (1976), p. 153
- 4) 小林三郎, 大森康男, 三本木貢治: 鉄と鋼, **56** (1970), p. 998

- 5) P. PATEL and G. PAL: *Stahl u. Eisen*, 92 (1972), p. 751
- 6) V. I. BERDNIKOV, A. M. LEVIN and K. M. SHAKIROV: *Steel in the USSR*, (1974), Oct., p. 804
- 7) 佐野正道, 森 一美: *鉄と鋼*, 60 (1974), p.348
- 8) M. SANO, Y. FUJITA, and K. MORI: *Met. Trans.*, **7B** (1976), p. 300
- 9) C. G. MAIER: *U. S. Bur. Mines Bull.*, (1927), p. 260
- 10) 只木楨力, 前田四郎: *化学工学*, 27 (1963), p. 147
- 11) L. DAVIDSON and E. H. AMICK, Jr.: *AI Ch E Journal*, 2 (1956), p. 337
- 12) A. MERSMANN: *V. D. I. Forschungsheft*, 491, **28B** (1962), p. 1
- 13) 日本鉄鋼協会: *溶鉄・溶滓の物性値便覧*, (1972), p. 6
- 14) F. A. HALDEN and W. D. KINGERY: *J. Phys. Chem.*, 59 (1955), p. 557
- 15) W. Vor dem ESCHE and O. PETER: *Arch. Eisenhüttenw.*, 27 (1956), p. 355
- 16) F. BASHFORTH and J. C. ADAMS: *An Attempt to Test the Theories of Capillary Action* (1883) [Cambridge Univ. Press]
- 17) I. W. WARK: *J. Phys. Chem.*, 37 (1932), p. 623
- 18) W. FRITZ: *Phys. Z.* 36 (1935), p. 379
- 19) 荻野和己, 野城 清, 越田幸男: *鉄と鋼*, 59 (1973), p. 1380