

.....
 論 文

UDC 669.225-404 : 669.791-404 : 66.069.85

熔融金属中の単一ノズルからの気泡生成について*

佐野正道**・森 一美**

Bubble Formation from Single Nozzles in Liquid Metals

Masamichi SANO and Kazumi MORI

Synopsis:

Studies have been made on the formation of bubbles in mercury and in liquid silver by using the single nozzle facing upward. Nozzles used in the experiments are of the sizes 0.22~0.82 cm in O. D. and 0.10~0.30 cm in I. D. The gas chamber volume V_C and the gas flow rate V_g are varied from 0.15 to 200cc and from 0.0167 to 70cc/sec, respectively. The size of bubbles is determined from the frequency of bubble formation and the gas flow rate.

A table is presented to show the effects of V_C and V_g on the size of bubbles. The size of bubbles found experimentally is compared with that calculated from theoretical or experimental equations obtained for wetted nozzles. The experimental values of bubble size do not agree with the values calculated using the inner diameter of the nozzle. On the other hand, when the non-wettability of the nozzles in liquid metals is taken into account and the outer diameters are adopted as the nozzle diameters in the equations, a close agreement between the experimental and the calculated results is obtained. Thus, it is shown that the quantitative estimation of the size of bubbles from a single nozzle in liquid metals is possible.

(Received July 4, 1973)

1. 緒 言

製鋼において、溶鋼中にガス吹込みを行なう反応操作が最近多くの注目を集めている。たとえば、不活性ガス吹込みによる溶鋼の脱ガス、アルゴン-酸素混合ガス吹込みによるステンレン鋼の脱炭、あるいは炉底冷却用ガス使用の底吹転炉製鋼などがあり、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、将来の技術的発展につらなるような現象の理論的説明はあまり進んでおらず、そのため気泡-溶鋼間反応に関する基礎研究がきわめて重要な問題になってきた。

従来、この方面の基礎研究は溶鉄については皆無であり、僅かに熔融アルミニウムへのアルゴン吹込みによる脱水素反応⁴⁾、熔融銀による酸素気泡の吸収反応⁵⁾、溶銅へのCO吹込みによる脱炭反応⁶⁾などが挙げられるのみで、平界面によるガス-メタル間反応と比較して、気泡-メタル間反応の反応機構の解明は非常に遅れているのが現状である。その大きな理由の一つとして、気泡-メタル間の界面積、すなわちノズルあるいはポーラスプラグより生成する気泡の大きさを正確に求めることが困難であ

つたことが考えられる。

熔融金属中で、ノズルあるいはオリフィスからの気泡の発生頻度(大きさ)を測定した研究は若干あるが^{7)~9)}、気泡の大きさと吹込み条件(ガス流量など)、液の物性ととの相関を求めようとする研究はほとんど行なわれていない。

常温の水溶液、有機液体などについては、ノズル、オリフィス、多孔板および多孔質物質から生成する気泡の大きさに関して多くの研究があり、気泡の大きさを推算しうる理論式あるいは実験式が得られている。しかし、それらの式の熔融金属系への適用性についてはまったく検討されていない。

以上の観点より、本研究では熔融金属としては水銀、熔融銀を用い、単一ノズルより生成する気泡の大きさを実測する。この実験結果を、常温で水溶液などについて得られた理論式、実験式と比較検討して、気泡の大きさ

* 昭和47年10月、昭和48年4月本会講演大会にて発表

昭和48年7月4日受付

** 名古屋大学工学部 工博

Table 1. Size of bubbles formed from wetted nozzles in water and organic liquids.

Gas flow rate chamber volume	(I) Low gas flow rate	(I)-(II) Transitional gas flow rate	(II) Intermediate gas flow rate	(III) High gas flow rate
(A) Small gas chamber volume	$N_c < 1, f < 100$ bubbles/min Maier ¹⁸⁾ $d_b = (6d d_{ni} \Delta \rho g)^{1/3} \equiv d_{bw}$ (2) Siemes ¹¹⁾ $d_b = 1.68 (d d_{ni} \Delta \rho g)^{1/3}$ (3)		Davidson, Schüler ¹⁷⁾ $d_b = 1.381 (V_g^{2/3} / g^{1/3})$ (6) applied to $V_g > 1.5$ cc/sec, $r_{ni} = 0.0334$ cm, $d = 72.7$ dyne/cm $V_g > 0.5$ cc/sec, $r_{ni} = 0.0334$ cm, $d = 27.1$ dyne/cm Davidson, Amick ¹⁷⁾ $d_b = 0.54 (V_g d_{ni}^{0.83})^{0.83}$ (7) obtained for $0.28 < V_g d_{ni}^{0.83} < 14.1$	Leibson ²⁰⁾ , $Re > 10^4$ $d_{bvs} = 0.71 Re^{-0.05}$ (10) Tadaki ¹¹⁾ , $N_w > 16$ $d_{bav}^3 (\Delta \rho g / d d_{ni}) = 1.730 N_w^{13}$ (11)
	$N_c < 1$ Mersman ¹⁸⁾ $d_b = [3d d_{ni} \Delta \rho g + \{9d^2 d_{ni}^2 / \Delta \rho^2 g^2 + K (V_g^2 d_{ni} / g)^{1/2}\}]^{1/3}$ (8) Tadaki ¹¹⁾ $d_b = (d d_{ni} \Delta \rho g)^{1/3} (6 + 2.5 N_w)^{1/3}$, $N_w < 16$ (9) Kumar, Kuloor ¹⁹⁾			
(B) Inter- mediate gas chamber volume	$1 < N_c < 9, N_w < 2.4 (N_c - 1)$ Tadaki ¹¹⁾ $d_b = (6d d_{ni} \Delta \rho g)^{1/3} N_c^{1/3}$ (4)		The same equations as in the range (II)-(A).	
	Eq. (18) may be applied to this range by substituting d_{ni} for d_{no} and N_c for N_c'			
(C) Large gas chamber volume	$N_c > 9, N_w < 16$ Tadaki ¹¹⁾ $d_{bav} = 3.8 (d d_{ni} \Delta \rho g)^{1/3}$ (5)		The same equations as in the range (II)-(A).	
	Eq. (19) may be applied to this range by substituting d_{ni} for d_{no} .			

に対する種々の因子の影響を定量的に表わし、気泡-溶融金属間反応の速度論的研究の基礎資料とする。

2. 液体に濡れているノズルからの生成気泡の大きさについて

2.1 気泡の大きさに及ぼす蓄気室容積とガス流量の影響

単一ノズル(またはオリフィス)から生成する気泡の大きさに影響を及ぼす因子として、ノズル(またはオリフィス)の径 d_n 、形状、材質、蓄気室容積 V_c^* 、表面張力 σ 、液体の密度 ρ_l 、粘度 μ_l 、接触角 θ 、ガス流量 V_g などがある。気泡生成の機構はこれらの因子の組合わせによつて複雑に変化する。

ここでは、複雑な気泡生成機構を理解するため、水溶液などを用いて常温で得られた理論式、実験式を、 V_c と V_g に基づいて分類してみる。

只木ら¹⁰⁾¹¹⁾によると、気泡の大きさに対する V_c と V_g の影響は、それらの大きさによつて、つぎのように3領域におのおの大別される。

V_c に関しては、

(A) V_c がある臨界値以下では気泡の大きさは V_c に無関係で、

(B) それ以上の V_c では、気泡の大きさは V_c とと

もに大きくなるが、

(C) V_c がある大きさ以上になると、気泡の大きさはまた V_c に無関係になる。

V_g に関しては、

(I) V_g が小さいところでは均一な気泡が生じ、また気泡の大きさに対する V_g の影響はみられず、

(II) V_g がある程度大きくなると、気泡は V_g とともに大きくなり、

(III) さらに V_g が増加すると、気泡は均一でなく、粒径分布を持つようになり、しかも平均径は小さくなる。

以上のような蓄気室容積、ガス流量に基づいた分類に従い、従来液体に濡れている単一ノズルより生成する気泡の大きさについて常温において得られている理論式、実験式をまとめ、Table 1を作成した。この表でガス流量による(I)~(III)の分類については、実際にはガス流量のほかノズル径、表面張力、密度が関係するが、ここでは定性的な表現として“low”-“high”の“gas flow rate”で分類し、式の具体的な適用範囲については気泡の発生頻度、あるいは $N_w (= We \cdot Fr^{-0.5})$, Re などによることにした。またノズルとオリフィスとでは、同じ径であっても、生成する気泡の大きさが異なる場合があるが*、オリフィスについて得られた式でもノズルに適用できる場合には Table 1 に含めた。なお、Table 1 に示した式は、粘度が小さく、したがって気泡生成に対する粘度の影響が無視できる場合にのみ適用できる**。以下、Ta-

* 蓄気室 (Gas chamber) とはノズル (またはオリフィス) に付着している気泡に連なる気体室で、その容積は、ニードルバルブ、毛細管などのように配管の途中における圧力損失の大きい箇所から下流のノズル先端までの管内の内容積として定義される。なお、ノズルの場合、ガス流量が小さいときに蓄気室として気泡の大きさに影響をもった気体室も、ガス流量が大きくなると、ノズルそのものにおける圧力損失が十分大きくなるため、実際には気泡の大きさには影響を及ぼさなくなる。

* この原因は、ノズルとオリフィスとでは、ガスがそれらを通過する際に生じる圧力損失が異なることにある¹²⁾。気泡の大きさが異なる場合のオリフィスに関する理論式、実験式は付録で述べる。

** 溶融金属の場合も、粘度が小さく、生成する気泡の大きさに対する粘度の影響は無視できる。

ble 1 の各式について説明する。

2.2 気泡の大きさがガス流量によつて変化しない領域 (領域 (I))

このガス流量域では、只木ら¹¹⁾は気泡の大きさに對する蓄気室の影響を次式で与えられる無次元数 N_c に基づいて検討している。

$$N_c = \frac{4V_c \Delta \rho g}{\pi d_{ni}^2 (P_0 + P_{hs})} \dots \dots \dots (1)$$

N_c の大きさによつて、 $N_c < 1$ では (A)、 $1 < N_c < 9$ では (B)、 $N_c > 9$ では (C) になる。蓄気室容積に関する無次元数 N_c は気泡生成に伴う蓄気室内の圧力変化を考察して導かれたものである。(1)式の導出については、ノズルが濡れにくい溶融金属系の N_c について考察のところで詳細に述べるので、ここでは省略する。

なお、(I)のガス流量域では、ノズルおよびオリフィスは、径が同じであれば、同じ大きさの気泡を生成する。範囲(I)-(A)

この範囲では、気泡は静力学的条件下で生成する。MAIER¹³⁾は気泡が球形であることおよび液がノズルを完全に濡らすことを仮定し、気泡がノズルを離脱する際の浮力 ($= V_B \Delta \rho g$) と表面張力による力 ($= \pi d_{ni} \sigma$) との釣り合いより(2)式 (Table 1*) を導いている、SIEMES¹⁴⁾は、気泡がノズルに付着している際の気泡の形状および気泡内の圧力変化を考察して(3)式を得ている。

BENZING ら¹⁵⁾によると、この範囲の気泡発生頻度は 100 bubbles/min 以下である。この範囲においては、GUYER ら¹⁶⁾と只木ら¹¹⁾が液体の種類を種々変えて実験を行なっている。GUYER らの結果は SIEMES の式に、只木らの結果は MAIER の式によく一致している。

範囲(I)-(B)

この範囲では、ノズル径、液の物性および操作条件が同じであつても、 V_c によつて気泡の大きさが変化する。

只木ら¹¹⁾は、ノズルに付着している気泡内に流入するガス量は最大泡圧 $P_m (= P_0 + P_{hs} + 4\sigma/d_{ni})$ における蓄気室内のガス量と静圧 $P_s (= P_0 + P_{hs})$ における蓄気室内のガス量の差に等しいと仮定した**。これより離脱時における気泡内の圧力は P_s に等しいものとすれば、気泡体積 V_B は $4V_c \sigma/d_{ni} (P_0 + P_{hs})$ となる。これから気泡径を(1)式の N_c を用いて表わせば、(4)式になる。

この範囲における実験的研究は範囲(I)-(A)に比較して少ない。只木ら¹¹⁾の結果によると、 $1 < N_c < 9$ で気泡径の実測値は(4)式に一致する。なお、 $N_c = 9$ では気泡径は(2)式による計算値の 2.08 倍、気泡体積は 9 倍

になる。

範囲(I)-(C)

$N_c > 9$ では、気泡の大きさは V_c に無関係で、只木ら¹¹⁾は平均気泡径 d_{Bav} が(5)式で表わされることを実験的に示している。

2.3 気泡の大きさがガス流量とともに増加し、かつ液の物性には無関係である中間ガス流量域 (領域(II))

ガス流量が増加するにつれて、気泡体積 V_B は徐々に増加し始め、ノズル径、液の物性、蓄気室容積 ($N_c > 1$ の場合) などのほかガス流量にも依存するようになる。

ガス流量がさらに増加すると、 V_B は液の物性、蓄気室容積には無関係になり、ガス流量とノズル径のみによつて決まるようになる。このようなガス流量域をここでは領域(II)とする。

領域(II)で、蓄気室容積 V_c が小さい場合(範囲(II)-(A))においては、ノズルとオリフィスは、径が同じであれば同じ大きさの気泡を生成する。しかし、 V_c が大きい範囲(II)-(B)、(II)-(C)では、気泡生成機構はノズルとオリフィスでは異なるようになる。すなわち、ノズルから生成する気泡は、 V_c が大きい場合でも V_c の影響を受けないのに対し、オリフィスから生成する気泡は、 V_c の影響を受け、ノズルの場合より大きい気泡を生成する。このような場合のオリフィスについての詳細は付録で述べる。

なお、(I)と(II)の間の遷移ガス流量域 (領域(I)・(II)) については次節(2.4)で述べる。

範囲(II)-(A)

この範囲では、ガスはつねに一定流量でノズル先端に付着している気泡内に供給される。DAVIDSON と SCHÜLLER¹²⁾は、この性質を考慮し、気泡が膨脹する際に気泡が随伴する液体の質量も含めた仮想質量に関する運動方程式を解いて、(6)式を得ている。(6)式によると、気泡の大きさはノズル径には無関係であるが、これはガスが点源より供給されるものと仮定したことによる。

DAVIDSON と AMICK¹⁷⁾は、水-空気系で 0.035~1.56 cm のオリフィスについて、蓄気室が非常に小さい条件下で実験を行ない、気泡の大きさがオリフィス径によつて若干影響されることを見出し、実験式として(7)式を得ている。

範囲(II)-(B), (C)

領域(II)では、気泡の大きさに影響をおよぼす気体室の大きさが領域(I)とは異なってくる。すなわち、領域(II)ではノズルそのものにおける圧力損失が大きくなり、そのため範囲(I)-(B)、(C)で気泡の大きさに影

* (2)~(11) 式は Table. 1 に示してある。

** このように仮定した根拠については、4.3.1 で説明する。

響を及ぼした気体室も、領域(II)では実際には気泡の大きさに影響を及ぼさず、蓄気室として働かなくなる。したがって、範囲(II)-(B), (C)に対しても範囲(II)-(A)の各式が適用できる。

2.4 (I), (II) およびそれらの間の遷移領域 (I)・(II) を含むガス流量域 (領域 (I)-(II))

範囲(I)-(II)-(A)

MERSMAN¹⁸⁾は範囲(I)-(A)と(II)-(A)を接続する式として(8)式を得ている。定数Kは、表面張力の影響が無視できる範囲(II)-(A)の実験結果により決定されるもので、10~26の値が得られている。只木ら¹¹⁾は、この範囲における気泡の生成について次元解析を行ない、実験式として(9)式を得ている。

KUMAR と KULOOR¹⁹⁾は、DAVIDSON と SCHÜLER¹²⁾の気泡生成モデルをさらに改良し、低ガス流量に対しても適用できる式を導いているが、かなり複雑であり、ここでは省略する。

範囲(I)-(I)-(B)および(I)-(I)-(C)

これらの範囲では、生成する気泡はガス流量が小さい(領域(I))ときに蓄気室の影響を受けるのに対し、流量が増加し、領域(II)に近くなるにしたがって、蓄気室の影響を受けなくなるので、気泡生成機構は非常に複雑である。このような場合について気泡径を簡単に推算できる理論式、実験式は出されていない。

本報であとで導く(18), (19)式がおおの範囲(I)-(I)-(B), (I)-(I)-(C)に適用できるものと考えられる。なお、(18), (19)式はノズルが濡れにくい場合について得られた式で、ノズルが濡れる場合に適用するためには d_{no} を d_{ni} , N_e' ((16)式)を N_e におきかえなければならない*。

2.5 ガス流量が大きく、流量の増加とともに平均気泡径が減少する領域 (領域(III))

この領域では、気泡はノズル先端で生成するのではなく、ガスが液中に柱となつて上昇し、その柱が先端で液の乱れによつてちぎれて気泡となる¹¹⁾。したがって生成する気泡は蓄気室容積によつて影響されない。また、オリフィスより生成する気泡の大きさもノズルの場合と同じであると考えられる。

(10), (11)式はオリフィスについて実験的に得られたもので¹¹⁾²⁰⁾、生成する気泡には粒径分布があるので、平均気泡径で表わされている。(III)のガス流量域では平均気泡径はガス流量とともに減少する。

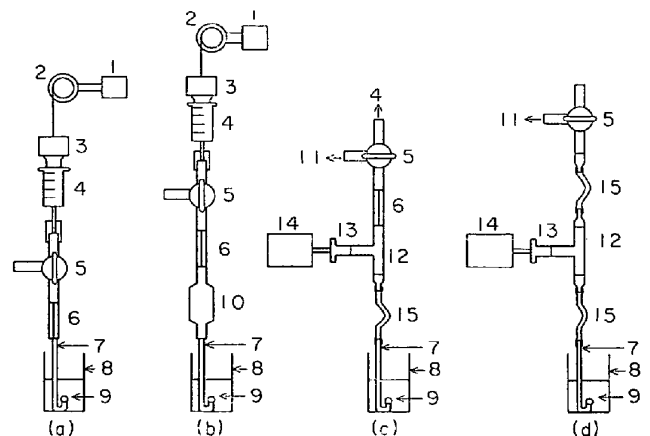
3. 実 験

前章のガス流量 V_g , 蓄気室容積 V_c の分類を適用すると本実験条件の範囲は(I), (II)のガス流量域および(I)と(II)の間の遷移ガス流量域(I)・(II)で、(A), (B)の蓄気室容積に相当する領域である。これらの領域内の V_g と V_c のおのおのの組合わせについて、溶融金属中で単一ノズルより生成する気泡の大きさについて実験的に検討する。

気泡の大きさは、送気系よりノズルに至るまでの実験装置の組立て方、とくに配管によつても影響されるため、配管について多少詳しく説明する。

3.1 配 管

ガス流量が小さい領域(I)で、0.2cc/sec 以下の場合 Fig. 1(a), 1(b) に示す配管により、注射器4より毛細管6を通してガスを供給した。この場合、ガスをつねに一定流量で供給するため、周波数変換装置1に連結した同期モータ2により錘3を一定速度で落下させることにより、注射器のシリンダーの送り速度を一定に保つようにした。範囲(I)-(A)では、蓄気室容積をできるだけ小さくする必要があるため、Fig. 1(a) に示すように毛細管とノズル7を直結して、実験を行なつた。Fig. 1(b)は範囲(I)-(B)の実験に用いたもので、毛細管とノズルの間に蓄気室10をおいた。なお、この Fig. 1(b)に示す装置で配管の途中に毛細管を入れたのは、蓄気室を毛細管の下流側に限定するためで、そのために必要な毛細管長さは実験的に定めた。



- 1. Frequency converter
- 2. Synchronous motor
- 3. Weight
- 4. Syringe
- 5. Three-way cock
- 11. Capillary flow meter
- 13. Pressure transducer (Earphone)
- 14. Synchroscope or Recorder
- 15. Rubber tube ($d_1=2mm$)
- 6. Capillary tube
- 7. Nozzle
- 8. Vessel
- 9. Mercury
- 10. Gas chamber
- 12. Three-way tube ($d_1=2mm$)

Fig. 1. Experimental apparatus.

* この理由については考察で述べる。

領域(I)で 0.2cc/sec 以上, および(I)と(II)の間の遷移ガス流量域(I)・(II)の場合, Fig. 1(c)に示す配管により送気系より毛細管を通してノズルにガスを供給した. 毛細管を配管の途中に入れたのは前とまったく同じ理由による.

(II)のガス流量域では, Fig. 1(d)に示す配管により, ガスを送気系より直接ノズルに供給した. このガス流量域では, 気泡の大きさは蓄気室容積に無関係なので, 毛細管を配管の途中に入れなかつた.

3.2 ノズル

気泡吹込み用ノズルは石英ガラス製を用いた. ノズルの形状はJ字型とし, ノズル先端はつねに垂直上方を向くようにした. ノズルの形状, 寸法をFig. 2に示した.

3.3 気泡の大きさの測定

本実験では, 生成する気泡の大きさはガス流量 V_g と気泡発生頻度 f の関係より求めた. すなわち, 生成気泡の容積 V_B は,

$$V_B = V_g / f$$

気泡発生頻度の測定は, ガス流量が小さく, 目測可能な場合には目測によつた. 発生頻度が 1 bubble/sec 以上の場合には, 気泡生成に伴う配管内の圧力変化により測定した. 圧力変化は, ラジオ用のクリスタル型のイヤホーンの圧電効果を利用し, 記録計に記録するか, あるいはシンクロスコープのブラウン管上に波形として現わし写真撮影した(Fig. 1(c), (d)-13, 14). イヤホーンは気泡離脱時における急激な圧力変化によく応答するので, 気泡の生成, 離脱を知ることができる. 本実験条件下では 1mV 以上の起電力があり, 増幅する必要はまったくなかつた.

3.4 実験条件

熔融金属としては水銀および熔融銀を用いたが, 比較のため水, エチルアルコールについても実験を行なつた.

水銀, 水, アルコールの場合, 使用した容器は内径50mmのガラス製で, 実験は室温で行なつた. 熔融銀の場合, 内径40mmのアルミナるつぼを使用し, カンタル線抵抗炉により加熱し, 実験は 1000°C で行なつた. 液表面からノズル先端までのノズル浸漬深さは40~50mmで*, ノズル径は, Fig. 2に示すように, 内径 d_{ni} は 0.10~0.30cm, 外径 d_{no} は 0.22~0.82cm の範囲で種々変化させた. 蓄気室容積は 0.15~200cm³ とし, ガス流量は 0.0167~70cc/sec とした. ただし, 熔融銀の実験については, ガス流量は実験温度である 1000°C に換算したものである.

4. 実験結果および考察

気泡生成について第2章において行なつた分類の順序に従つて, 本実験の結果および考察を述べる.

4.1 範囲 (I)-(A)

この範囲では, ガス流量は 0.0167cc/sec, 気泡発生頻度は 1 bubble/sec 以下であり, また蓄気室容積としてはノズル管内容積のみで, 無次元数 N_c' ((16)式, $\sin\theta = 1$) で表わした値で 1 以下とした. なお, 気泡発生頻度の測定は目測により行なつた.

最初にノズル径の影響を検討するため, 水銀についてノズル内径 d_{ni} はほぼ一定で, 外径 d_{no} のみを変化させた場合について実験した. その結果をFig. 3に示す. 横軸には気泡径 d_B の実測値を, 縦軸には気泡径の計算値をとつた. ここで, ノズル径として内径 d_{ni} を採用して(2)式で求めた値を計算値とした場合のプロットを黒丸にとり, また外径 d_{no} を採用して(2')式で計算した場合

$$d_B = (6\sigma d_{no} / \Delta\rho g)^{1/3} (\equiv d_{BM}) \dots\dots\dots (2')$$

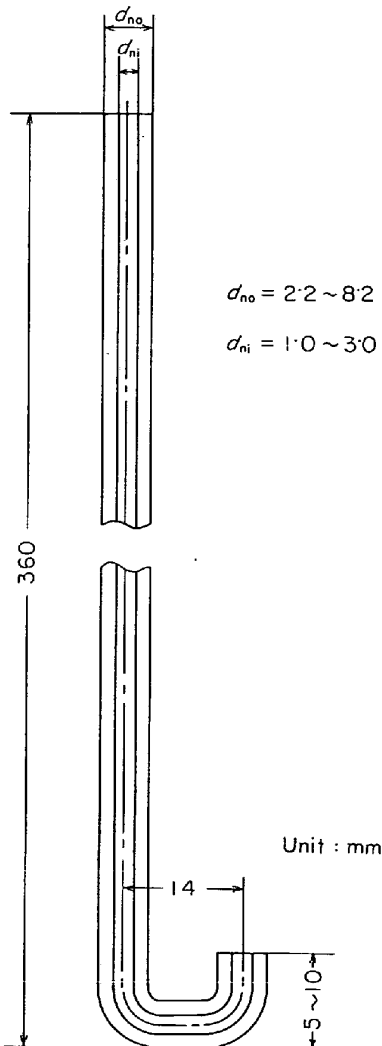


Fig. 2. Shape and size of nozzle.

* 生成する気泡の大きさに対する浸漬深さの影響は無視できる.

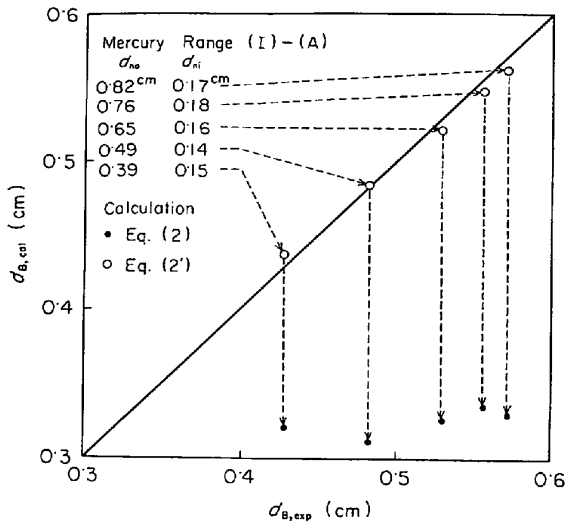


Fig. 3. Effect of nozzle diameter on the size of bubbles.

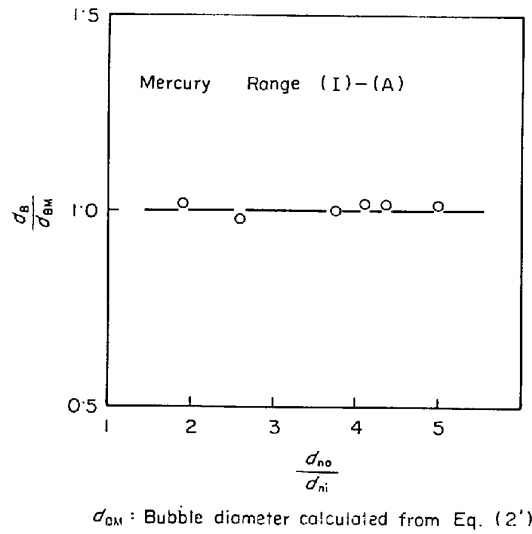


Fig. 5. Effect of thickness of nozzle wall on the size of bubbles.

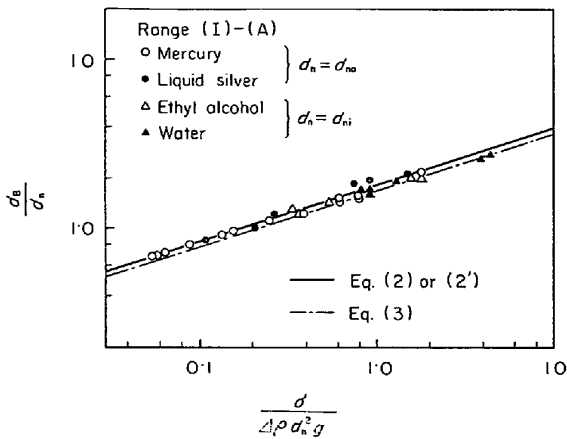


Fig. 4. Relation between d_B/d_n and $\sigma/\Delta\rho d_n^2g$.

合のプロットを白丸で示した。Fig. 3から明らかなように、実験値は(2)式による計算値とは一致しない。一方、実験値は、ノズル径として外径をとった(2')式による計算値によく一致している。これは、ノズルが水銀に濡れにくい場合、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。

液体がノズルを濡らす水、エタノールの場合と濡らさない水銀、溶融銀の場合の実験結果を、比較のため、Fig. 4に示した。ノズル径として、前者では内径を、後者では外径をとった。このようにノズル径をとると、ノズルが濡れる場合と濡れない場合の d_B/d_n と $\sigma/\Delta\rho d_n^2g$ の関係は一致することがわかる。本実験結果は MAIER の式((2), (2')式)にほぼ一致するが、 $\sigma/\Delta\rho d_n^2g$ が大きくなるにつれて SIEMES の式((3)式)に近づく傾向がある。

Fig. 5には、ノズル先端の管の肉厚の影響を検討するため水銀について行なった実験の結果を示した。縦軸は

気泡径の実測値 (d_B) と(2')式による計算値 (d_{BM}) の比、横軸はノズル外径 d_{no} と内径 d_{ni} の比である。Fig. 5より、本実験条件の範囲では、 d_{no}/d_{ni} が5程度まで管の肉厚の影響はなく、実験値はノズル径として外径をとった計算値によく一致することがわかる。

4.2 範囲 (I)-(B)

この範囲では、Fig. 1 (b)に示したように蓄気室10を用い、この容積を変えて実験を行なった。ガス流量は 0.0167cc/sec 、気泡発生頻度は 1 bubble/sec 以下で、蓄気室容積は $0.15\sim 200\text{cm}^3$ とした。

只木ら¹¹⁾は蓄気室の影響を表わすのに蓄気室容積に関する無次元数 N_e ((1)式)を導入しているが、これはノズルが液体に濡れる場合であり、この式をそのままノズルが濡れにくい溶融金属系に適用することはできない。ここで、まず無次元数 N_e を修正する。

4.2.1 気泡の大きさと最大泡圧

只木らの理論によると、範囲 (I)-(B) では最大泡圧 P_m において蓄えられた蓄気室内のガスは、気泡が膨張するに従って気泡内の圧力が下がるため、離脱前に急激に気泡内に流入する。この気泡へのガスの流入は、蓄気室内の圧力がある値 P_f になるまで続き、ついでノズルに付着している気泡は1個の気泡として離脱する*。以上より、気泡の大きさは最大泡圧と密接な関係があることがわかる。

つぎにノズルが濡れにくい場合の最大泡圧 P_m について検討する。LEVIN²¹⁾は、最大泡圧法による溶融金属の

* ノズルから気泡が離脱するためある時間を必要とするので、生成する気泡は(2)式(または(2')式)で与えられる浮力と表面張力による力との釣り合いから求められる気泡の大きさよりも大きくなり得る。

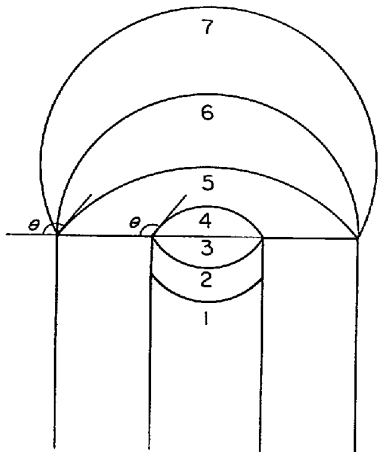


Fig. 6. Formation of gas bubble at the tip of a thick-walled nozzle with sharp edges.

表面張力の測定に関連して、ノズル先端が肉厚の場合ノズルに付着している気泡の形状は Fig. 6 のように変化している。すなわち、ノズルが液体に濡れにくい場合、気泡が 4 の位置で接触角が θ になった後、さらにガスが流入すると、気泡底面はノズル先端上をノズル外周まで広がり 5 のようになる。

表面張力に基づく圧力 P_c は 3 の位置では 0 であり、4 の位置では $P_{c4} = 4\sigma \sin \theta / d_{ni}$ と増加し、5 の位置では $P_{c5} = 4\sigma \sin \theta / d_{no}$ となつて減少する。 $90^\circ < \theta < 180^\circ$ の場合、6 の位置では $P_{c6} = 4\sigma / d_{no}$ となり、また増加する。7 の位置になると、気泡径が増加するため、 P_c は減少する。以上より、 $90^\circ < \theta < 180^\circ$ では、 P_c は二つの極大値 (P_{c4} , P_{c6}) を持つことがわかる。

$P_{c4} \geq P_{c6}$ となる条件は

$$d_{ni} / d_{no} \leq \sin \theta \quad (12)$$

で、このとき P_m は

$$P_m = P_0 + P_{hs} + 4\sigma \sin \theta / d_{ni} \quad (13)$$

である。逆に、 $P_{c4} < P_{c6}$ のときは

$$P_m = P_0 + P_{hs} + 4\sigma / d_{no} \quad (14)$$

となる。

ここで範囲 (I)-(B) で生成する気泡の大きさを理論的に求めるため、つぎのことを仮定する¹¹⁾*。(1)最大泡圧時においてノズルに付着している気泡の体積は離脱時の体積にくらべて無視できる。(2)最大泡圧に達した後の気泡の膨張は急激に起こるので、その間における送気系から蓄気室へのガス流入量は無視できる。(3)蓄気室と気泡の圧力が等しく、ともに静圧 $P_s (= P_0 + P_{hs})$ になったとき、1 個の気泡として離脱する。

以上の仮定より、範囲 (I)-(B) における気泡の大き

さは次式で与えられる*。

$$V_B = \{V_c P_m - V_c (P_0 + P_{hs})\} / (P_0 + P_{hs}) \quad (15)$$

4.2.2 無次元数 N_c の修正

蓄気室容積に関する無次元数 N_c は (15) 式で与えられる V_B と (2') 式で与えられる気泡径 d_{BM} より計算される気泡体積 V_{BM} との比として定義される。したがって、最大泡圧 P_m が (13) 式で与えられる場合、

$$N_c' = \frac{V_B}{V_{BM}} = \frac{4V_c \Delta \rho g \sin \theta}{\pi d_{ni} d_{no} (P_0 + P_{hs})} \quad (16)$$

(14) 式で与えられる場合、

$$N_c'' = \frac{V_B}{V_{BM}} = \frac{4V_c \Delta \rho g}{\pi d_{no}^2 (P_0 + P_{hs})} \quad (17)$$

となる。

(16) 式より、

$$\frac{d_B}{d_{BM}} = \frac{d_B}{(6\sigma d_{no} / \Delta \rho g)^{1/3}} = N_c'^{1/3} \quad (4')$$

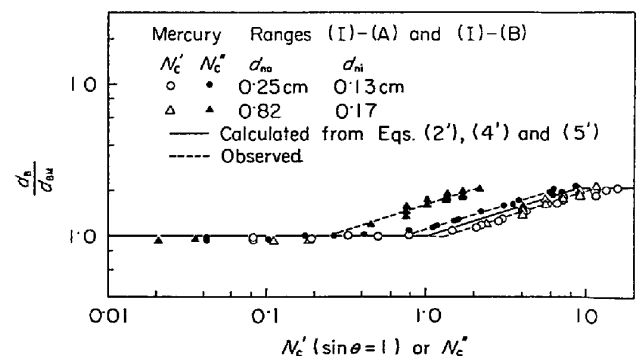
また、(17) 式より、

$$\frac{d_B}{d_{BM}} = \frac{d_B}{(6\sigma d_{no} / \Delta \rho g)^{1/3}} = N_c''^{1/3} \quad (4'')$$

を得る。

4.2.3 理論値と実験値の比較

Fig. 7 には水銀についてノズル径を変化させたときの気泡の大きさに対する蓄気室の影響を示した。縦軸には実測した気泡径 d_B と (2') 式で与えられる気泡径 d_{BM} の比をとり、横軸には N_c' , N_c'' をとつた。Fig. 6 に示されている接触角 θ は通常の接触角とは異なり、未知数であるため、 N_c' の計算においては $\sin \theta = 1$ と仮定した。実線は計算値で、 $N_c' < 1$, $N_c'' < 1$ の範囲については (2') 式により、 $1 < N_c' < 9$, $1 < N_c'' < 9$ の範囲については (4'), (4'') 式により計算した。 $N_c' > 9$, N_c''



d_{BM} : Bubbe diameter calculated from Eq. (2')

Fig. 7. Relation between d_B/d_{BM} and $N_c' (\sin \theta = 1)$ or N_c'' .

* 範囲 (I)-(A) では、 V_c が小さいので (15) 式の V_B から与えられる気泡に働く浮力 ($= V_B \Delta \rho g$) は下向きに働く表面張力による力 ($= \pi d_{no} \sigma$) より小さいため、気泡は離脱できず、さらにガスが流入し、(2') 式で与えられる気泡の大きさ ($= V_{BM}$) になって離脱する。

* 仮定 (1)~(3) の妥当性は、文献¹¹⁾ の理論と実験の比較で示されている。

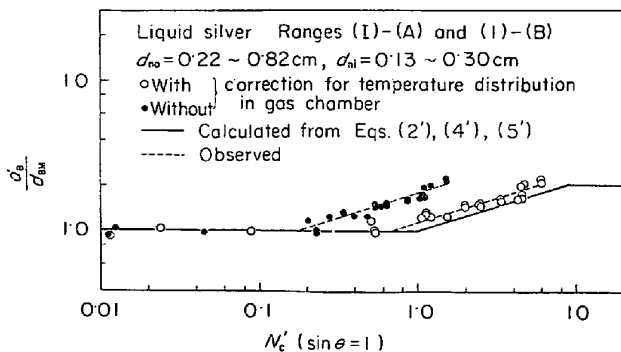
>9 の範囲については、(5)式においてノズル内径を外径に変えた(5')式

$$d_{Bav} = 3.8(\sigma d_{no} / \Delta \rho g)^{1/3} \dots \dots \dots (5')$$

により計算した。

d_B/d_{BM} と N_c' , N_c'' の関係は、(4'), (4'')式からわかるように、ノズルには無関係でなければならない。Fig. 7から明らかなように、 d_B/d_{BM} と N_c'' の関係(●, ▲印)はノズル径に依存している。これは、最大泡圧 P_m を示す位置が Fig. 6 の6の位置であると仮定して N_c'' を導いているが、その仮定が成り立っていないことを示すものである。一方、 d_B/d_{BM} と N_c' の関係(○印, △印)はノズル径には依存していない。したがって、本実験条件では N_c' を導く場合に Fig. 6 の4の位置で最大泡圧 P_m を示すと仮定したことが実際に成り立っていることがわかる。なお、実験値は計算値より若干右側にずれているが、これは $\sin \theta = 1$ を仮定したためと考えられる。

Fig. 8には、溶融銀についての実験結果を示した。Fig. 7で示したように水銀については N_c' をとることによって、結果をよく整理できたので、今の溶融銀の場合は横軸には $N_c' (\sin \theta = 1)$ のみをとった。実線は Fig. 7と同じ計算値である。Fig. 8のプロットはノズル径が外径 $d_{no} = 0.22 \sim 0.82$ cm, 内径 $d_{ni} = 0.13 \sim 0.30$ cm についての実験で、図からわかるように d_B/d_{BM} と N_c' の関係はノズル径には依存していない。これから、溶融銀の場合も Fig. 6 の4の位置で最大泡圧を示すものといえる。しかし、 N_c' を計算するとき、蓄気室容積として単なる配管の内容積をとった場合(●印)、実験値は計算値と非常に異なる。これは蓄気室内が非等温であることを考慮しなかつたためである。すなわち、温度の低い加熱炉外の蓄気室より炉内の蓄気室(ノズル)にガスが供給される場合、温度上昇による体積膨張を伴う。したがって、高温系においては、(15)式はつぎのように変形する必要がある。



d_{BM} : Bubble diameter calculated from Eq. (2')
Fig. 8. Relation between d_B/d_{BM} and $N_c' (\sin \theta = 1)$.

$$V_B = T_B \int_0^{V_c} \frac{dV_c(T)}{T} \cdot \{P_m - (P_0 + P_{hs})\} / (P_0 + P_{hs}) \dots \dots \dots (15')$$

ここで T , T_B はおのおの蓄気室、気泡の温度である。したがって、 N_c' は次式になる。

$$N_c' = \frac{4T_B [\int_0^{V_c} (1/T) dV_c(T)] \Delta \rho g \sin \theta}{\pi d_{ni} d_{no} (P_0 + P_{hs})} \dots \dots \dots (16')$$

炉内のノズルの温度分布は、炉の温度分布に等しいものとし、 $T_B = 1273^\circ K$ として(16')式により温度補正した N_c' と d_B/d_{BM} の関係を Fig. 8 に○印で示した。この場合、実験値は計算値にかなり近くなっている。しかし、実験値のプロットに用いる N_c' を計算するとき、 $\sin \theta = 1$ を仮定しているため、実験値は計算値の右側にずれるはずであるが、溶融銀の場合温度補正後も実験値は計算値の左側にずれている。この原因としては温度補正の誤差が一応考えられるが、詳細は不明である。

4.3 領域 (II)

(I)のガス流量域では、Fig. 1(d)に示す配管により実験を行なつた。この場合の配管の内容積は、(I)のガス流量域にあてはめると(C)の領域に相当し、蓄気室として気泡の大きさに影響する範囲であるが、いまの(II)のガス流量域では前述したようにノズル部分における圧力損失が大きいので、配管の内容積は蓄気室として働いていない。すなわち、(I)のガス流量域では、ノズルより生成する気泡の大きさは、(I)のガス流量域で定義された蓄気室容積には無関係である。

(II)のガス流量域における実験条件としては、ガス流量が 5~30cc/sec で、気泡発生頻度は 15~35bubbles/sec であつた。

Photo. 1に、領域(II)におけるノズル内の圧力変化の1例を示した。気泡生成の1周期は極大圧力を示す間隔に対応している。この場合の気泡発生頻度は 17.1bubbles/sec である。

Fig. 9に、水銀についてノズル径を変化させた場合の気泡径 d_B とガス流量 V_g の関係を示した。図より、気泡径はノズル内径には無関係であり、ノズル外径とともに大きくなるのがわかる。Fig. 9には、DAVIDSON, SCHÜLER の式 ((6)式)、および DAVIDSON, AMICK の実験式でノズル径は外径をとつた次式

$$d_B = 0.54 (V_g d_{no}^{0.5})^{0.289} \dots \dots \dots (7')$$

による計算値も同時に示した。Fig. 9より、溶融金属と水溶液、有機液体とでは物性値が非常に異なるにもかかわらず、ノズル径に対する外径と内径のとり方の違い*

* これは (I) のガス流量域におけると同様、液体に対するノズルの濡れ性の違いによるものである。

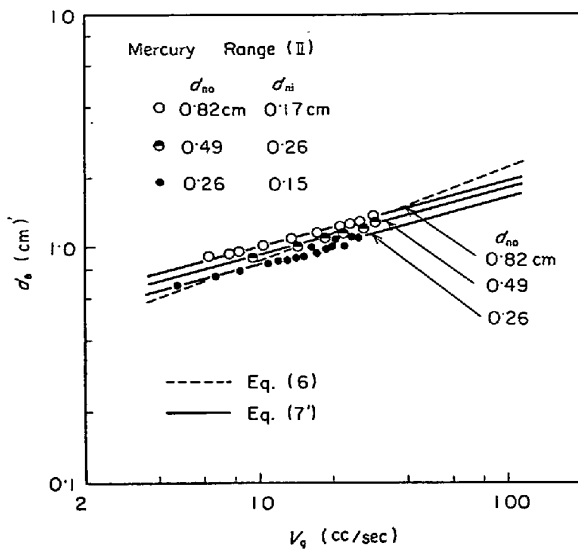


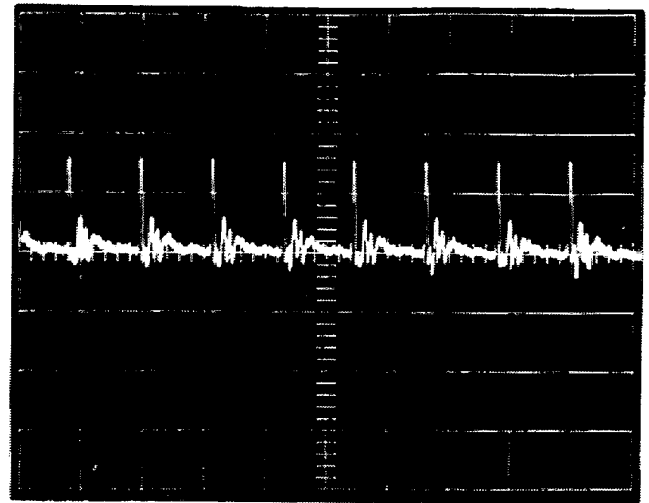
Fig. 9. Effect of gas flow rate on the size of bubbles for various nozzle diameters.

を除けば、同じ DAVIDSON, AMICK の式により気泡径を推算できることがわかる。

4.4 範囲 (I)-(II)-(A)

ここでは、(I)および(II)のガス流量域とその間の遷移ガス流量域(領域(I)・(II))を含む領域(I)-(II)を考える。

(I)および(I)・(II)の領域では、生成する気泡の大きさは蓄気室容積の影響を受けるため、Fig. 1(c)に示すように配管の途中に毛細管を入れ、蓄気室容積を無次元数 N_c' ($\sin \theta = 1$) で 1 以下にして実験を行なった。ガ



50m sec/div, 0.2 V/div
Mercury, $d_{no}=0.82\text{cm}$, $d_{ni}=0.17\text{cm}$,
 $V_g=7.1\text{ cc/sec}$, $f=17.1\text{ bubbles/sec}$, $d_B=0.926\text{cm}$

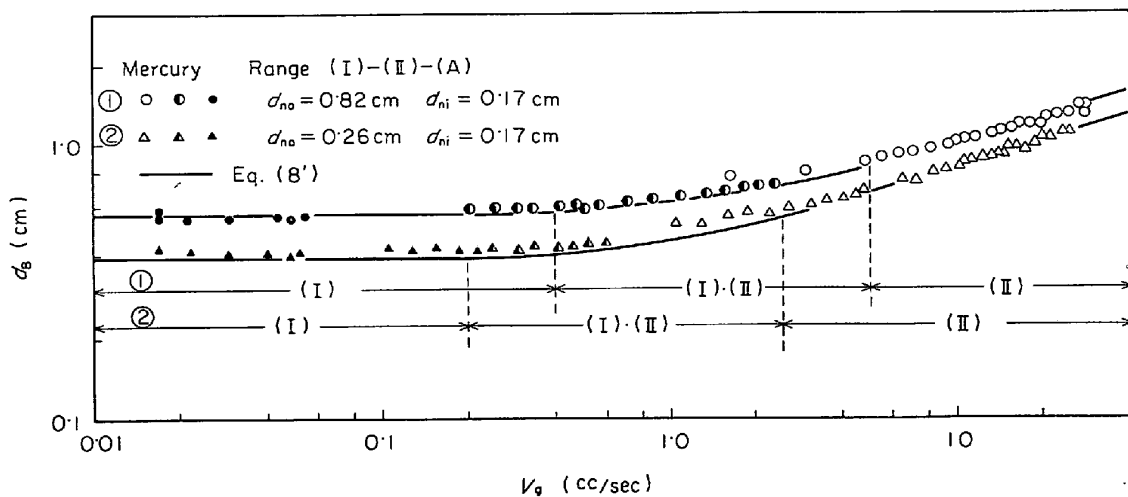
Photo. 1. Variation of pressure in gas train during bubble formation.

ス流量は 0.0167cc/sec から 30cc/sec まで変化させた。

Fig. 10 には、水銀についてノズル径を変えた①, ②の場合の気泡径とガス流量の関係を示した。また図にはノズル径として外径をとつた場合の MERSMAN の式

$$d_B = \left\{ \frac{3\sigma d_{no}}{\Delta\rho g} + \left(\frac{9\sigma^2 d_{no}^2}{\Delta\rho^2 g^2} + K \frac{V_g^2 d_{no}}{g} \right)^{1/2} \right\}^{1/3} \dots (8')$$

による計算値を実線で示した。(8')式における定数 K は(II)のガス流量域で計算値が(7')式に大略一致するように $K=10$ とした。Fig. 10 より、範囲 (I)-(II)-(A)において、実験値は(8')式による計算値にほぼ一



	$N_c'(\sin\theta=1)$	$N_c'(\sin\theta=1)$	Piping	Apparatus
○	large	△	Gas supply system → nozzle	Fig. 1 (d)
●	0.195	▲	Gas supply system → capillary → nozzle	Fig. 1 (c)
•	0.195	▲	Syringe → capillary → nozzle	Fig. 1 (c)

Fig. 10. Effect of gas flow rate on the size of bubbles.

致することがわかる。なお、送気系からノズルにガスを直接供給する配管 (Fig. 1 (d)) では、 $V_g < 3 \text{ cc/sec}$ になると、実験値 (○, △印) は (8') 式による計算値より大きくなっている。また、この配管の場合 $V_g < 1 \text{ cc/sec}$ では、気泡生成による配管内の圧力変動により、毛细管流量計のマノメータが変動して、流量を測定できなかった。これらのことより、低流量になるに従って、Fig. 1 (d) に示す配管では送気系の内容積が蓄気室として働き始めることがわかる。

Fig. 10 において、実測値および (8') 式による計算値から判断すると、気泡径がガス流量の影響を受けず、ほぼ一定とみなせる範囲は、①の $d_{no} = 0.82 \text{ cm}$ では大略 $V_g < 0.4 \text{ cc/sec}$ で、②の $d_{no} = 0.26 \text{ cm}$ では大略 $V_g < 0.2 \text{ cc/sec}$ である。なお、気泡発生頻度は $d_{no} = 0.82 \text{ cm}$, $V_g = 0.4 \text{ cc/sec}$ の場合は 4.4 bubbles/sec , $d_{no} = 0.26 \text{ cm}$, $V_g = 0.2 \text{ cc/sec}$ の場合は 6.8 bubbles/sec であつた。以上より、本実験の場合、気泡径は、ノズル径によつて多少異なるが、約 4 bubbles/sec 以下ではガス流量によつて変化せず、一定とみなすことができる。

4.5 範囲 (I)-(II)-(B)

この範囲では、溶融銀について実験を行なつた。範囲 (I)-(I)-(A) と同様、この範囲でも (I) および (I) · (I) のガス流量域では Fig. 1 (c) に示す配管を用いた。蓄気室容積は水銀の場合とほぼ同じであるが、温度補正後の N_c' は 2.34 となつた。(I) のガス流量域では、Fig. 1 (d) に示す配管を用いた。ガス流量は溶融銀

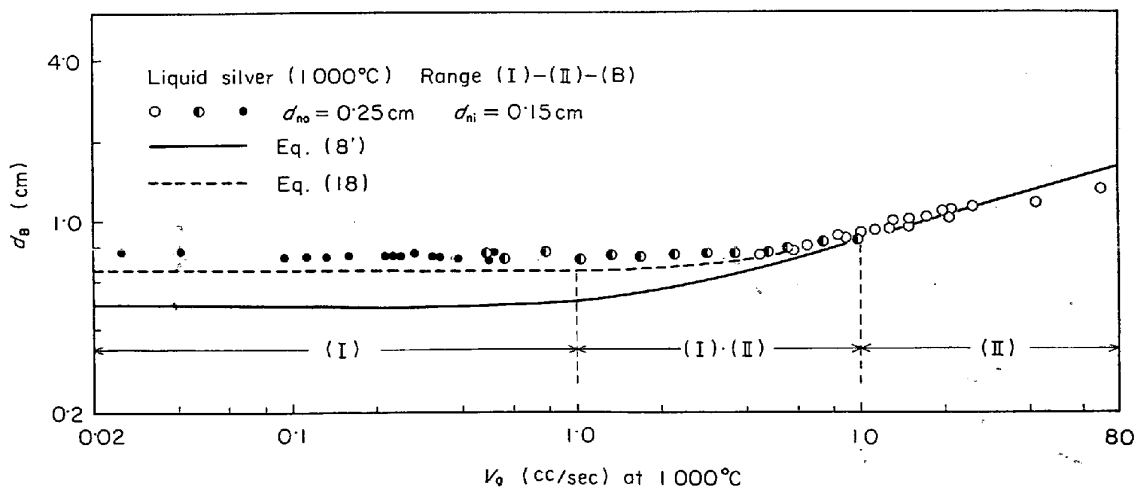
の温度である 1000°C に換算して、 $0.025 \sim 70 \text{ cc/sec}$ であつた。

溶融銀について得られた気泡径とガス流量の関係は Fig. 11 に示した。図より、 $V_g > 10 \text{ cc/sec}$ では、水銀の場合と同様、実験値は (8') 式による計算値にほぼ一致することがわかる。しかし、実験値は、 $V_g < 10 \text{ cc/sec}$ では (8') 式による計算値より大きくなり、さらに $V_g < 1 \text{ cc/sec}$ ではガス流量に無関係にほぼ一定になつている。なお、 $V_g = 1 \text{ cc/sec}$ で、気泡発生頻度は 4.5 bubble/sec であつた。

$V_g < 10 \text{ cc/sec}$ では、実験値が蓄気室の影響を無視した (8') 式による計算値に一致しないことより、蓄気室の影響を考慮する必要のあることがわかる。(8') 式は $V_g = 0$ のときには (2') 式に一致する。(2') 式の代りに蓄気室が気泡の大きさに影響を及ぼす範囲 (I)-(B) で得られた (4') 式を用いると、(8') 式はつぎのように変形される。

$$d_B = \left\{ \frac{3\sigma d_{no}}{\Delta\rho g} N_c' + \left(\frac{9\sigma^2 d_{no}^2}{\Delta\rho^2 g^2} N_c'^2 + K \frac{V_g^2 d_{no}}{g} \right)^{1/2} \right\}^{1/3} \dots\dots\dots (18)$$

$N_c' = 2.34 (\sin \theta = 1)$ を (18) 式 ($K = 10$) に代入して計算した気泡径 d_B を Fig. 11 に点線で示した。(18) 式による計算値は (8') 式による計算値より実験値に近くなつてはいるが、やはり実験値より若干小さい。これと同じ傾向は、範囲 (I)-(B) の実験結果 (Fig. 8) でも認められた。



	$N_c'(\sin\theta=1)$	Piping	Apparatus
○	large	Gas supply system → nozzle	Fig. 1 (d)
●	2.34	Gas supply system → capillary → nozzle	Fig. 1 (c)
•	2.34	Syringe → capillary → nozzle	Fig. 1 (c)

Fig. 11. Effect of gas flow rate on the size of bubbles.

4.6 その他

4.6.1 その他の範囲

範囲 (I)-(C), (I)-(I)-(C) では, 蓄気室容積 ($N_0' > 9$) が大きいので, 1 個の気泡となりうる蓄気ガス容積 V_B ((15)式) は大きい, 気泡内へのガスの流入に時間がかかるため, 気泡は実際には V_B の容積の 1 個の気泡ではなく, 数個の気泡に分かれて生ずる¹¹⁾. この場合, 前の気泡が離脱してから, つぎの気泡が生成するまでの蓄気室内圧力の上昇時間にくらべて, この数個の気泡の生成, 離脱時間が非常に短いので, すなわち前者と後者の時間があまりにも違いすぎるため, 本実験では気泡の発生頻度の測定は不可能であった.

範囲 (I)-(C) については, いままで述べてきたことから推定して, ノズルに対する液の濡れ性を考慮して, (5)式におけるノズル内径を外径に変えた前出の (5')式が熔融金属の場合の気泡径の推算に適用できるものとする. 範囲 (I)-(I)-(C) については, 範囲 (I)-(I)-(B) と同様にして, $V_g = 0$ で範囲 (I)-(C) の (5')式に一致するように, MERSMAN の式 ((8)式) を変形すると, (19)式のように, これより気泡径を求めることができる.

$$d_B = \left\{ \frac{3 \cdot 8^3}{2} \cdot \frac{\sigma d_{no}}{4 \rho g} + \left(\left(\frac{3 \cdot 8^3}{2} \right)^2 \cdot \frac{\sigma^2 d_{no}^2}{4 \rho^2 g^2} + K \frac{V_g^2 d_{no}}{g} \right)^{1/2} \right\}^{1/3} \dots \dots \dots (19)$$

つぎに, (III) のガス流量域では, ガスの流れの乱れによる圧力変動が生じ, さらにガスはノズルより液中に気柱となつて入るので, ノズル内の圧力変化の測定からは, 気泡発生頻度を測定できない. したがって, 熔融金属の場合, この領域における気泡径の実測は困難で, 常温で得られた LEIBSON ら²⁰⁾, 只木ら¹¹⁾ の実験式を適用せざるをえない. それらの式におけるノズル径は, これまでの考察から推論すれば, 外径をとらなければならないが, 正確にはノズルから噴出する気柱の状態, 気柱から気泡としてちぎれる際の分裂機構を明らかにする必要がある.

4.6.2 気泡の形状について

一般に自由上昇時における気泡の形状は気泡径が 2 ~ 3 mm 以下では球状, 2 ~ 3 mm から 10 mm の範囲では楕円体状, 10 mm 以上ではキノコ状になることが知られている.

本実験における生成気泡の直径は 4 mm から 14 mm であるため, ノズルに付着しているときから気泡の形状は球形とは異なることが予想される. しかし, 本実験では球形を仮定して球相当直径を求めた結果, 各蓄気室容

積, ガス流量の範囲で, 気泡の大きさに関係なく, 気泡径はガス流量などの各パラメータに相関づけられた. したがって, 生成する気泡の大きさに関しては気泡の形状を考慮しなくてもよいことがわかった.

5. 結 論

熔融金属中で単一ノズルより生成する気泡の大きさを定量的に推算しうる式を得るため, 水銀, 熔融銀についてノズル径, 蓄気室容積, ガス流量を変化させ, 気泡発生頻度とガス流量より気泡の大きさを求めた. 気泡生成機構は蓄気室容積とガス流量によつて複雑に変化する. 本研究ではそれらの大きさによつておのおの 3 領域に分類し, 常温で水溶液など, ノズルを濡らす液体について得られている理論式, 実験式による計算値と本実験の結果を比較, 検討した. その結果, ノズルが濡れる水溶液などではノズル径として内径をとつておののに対し, ノズルが濡れにくい熔融金属では外径をとり, 若干の修正を加えることによつて, 水溶液などで得られている式が熔融金属にも適用できることが明らかになった. なお, 蓄気室容積, ガス流量の領域によつては気泡の大きさを測定できなかつたが, そのような範囲についてもノズル径のとり方を変えることによつて, 水溶液などで得られた式が適用できるものと推論された.

本研究費の一部は日本鉄鋼協会昭和 47 年度石原・浅田研究助成金の交付を受けたもので, 記して感謝の意を表します. また本研究を遂行するにあたり, 実験に協力された当研究室の星野秀夫氏に厚く御礼を申し上げる.

付 録

(1) オリフィスの場合の気泡生成

第 2 章で, 範囲 (I)-(B), (I)-(I)-(C) については, ノズルとオリフィスとは気泡生成機構が異なることを指摘した. オリフィスについては本文では記述を省略したので, ここで簡単に述べる.

範囲 (I)-(B)

ノズルの場合, (II) のガス流量域では蓄気室の影響を受けず, 気泡内につねに一定流量でガスが供給されるのに対し, オリフィスの場合, 蓄気室の影響を受け, 気泡内へのガス流入速度は気泡の膨張とともに変化する. 蓄気室が十分大きくない (B) の領域では, 気泡の膨張とともに蓄気室内の圧力も変化する. 気泡生成機構は非常に複雑である. この場合の気泡生成モデルはいくつかあるが²²⁾²³⁾, 気泡の大きさを簡単には計算できないので, ここでは省略する.

範囲 (I)-(C)

蓄気室が非常に大きくなると、気泡生成に伴う蓄気室内の圧力変化はほとんど無視できるようになる。この場合、蓄気室内の圧力は一定に保たれるが、気泡内の圧力は気泡の膨張とともに変化するため、気泡内へのガスの流入速度は変化する。一定圧力での気泡生成モデルはいくつかあり¹²⁾²⁴⁾、実験結果をかなりよく説明している。

LEIBSON ら²⁰⁾は、蓄気室容積が非常に大きい条件下で、水-空気系を用い、オリフィス径 0.04~0.3 cm についてつぎの実験式を得ている。

$$d_B = 0.29 d_{ni}^{1/2} Re^{1/3} \quad 300 < Re < 2100 \quad \dots\dots (A1)$$

範囲 (I)-(II)-(B) および (I)-(II)-(C)

(C)の領域に対応する蓄気室容積でも、気泡内へのガス流入速度より蓄気室内へのガス供給速度の方が遅いときには、蓄気室内の圧力は一定に保たれなくなる。したがって、範囲(I)-(II)-(B)および(I)-(II)-(C)に対しては、気泡内へのガス流入速度と蓄気室内の圧力が同時に変化するとした気泡生成モデルを適用しなければならない²²⁾²³⁾。

つぎに示す只木ら¹¹⁾の式は、種々の水溶液、有機液体について行なつた実験の結果より得られたものである。

$$1 < N_c < 9, N_w < 2.4(N_c - 1) \\ d_B = (6\sigma d_{ni} / \Delta\rho g)^{1/3} N_c^{1/3} \dots\dots\dots (A-2)$$

$$1 < N_c < 9, 2.4 < N_w < 16 \\ d_B = (\sigma d_{ni} / \Delta\rho g)^{1/3} (6 + 2.5N_w)^{1/3} \dots\dots\dots (A3)$$

$$N_c > 9, N_w < 16 \quad d_B = 3.8(\sigma d_{ni} / \Delta\rho g)^{1/3} \dots\dots (A4)$$

(2) 溶鉄を用いた PATEL, PAL⁹⁾の実験について

PATEL, PAL は、溶鉄について内径 1.2 mm のオリフィス (石英製) から気泡を生成させる実験を行ない、ガス流量が 40 l/hr から 113 l/hr の範囲で、気泡径は約 22 mm 一定であることを報告している。実験装置から判断すると、蓄気室容積が非常に大きい条件下で実験を行なつているので、PATEL らの実験は範囲(I)-(II)-(C)に入ると考えられる。この場合、気泡径を規定するオリフィス径について以下のような問題がある。すなわち、液体に濡れにくいノズルの場合は、ノズルに付着している気泡の底面はノズル外周まで広がることからノズル外径をとることができたが、PATEL らのように溶融金属に濡れにくいオリフィスを用いた場合は、ノズルの外径に相当するものがないため、オリフィス径のとり方が不明であり、したがって気泡径を前述の相関式と比較検討することは不可能である。

記号

- d_B : 気泡径 (cm)
- d_{Bav} : 気泡の幾何平均径¹⁾ (cm)

- d_{BM} : (2)または(2')式で与えられる気泡径 (cm)
- d_{BVS} : 気泡の体面積平均径²⁰⁾ (cm)
- d_n : ノズルまたはオリフィス径 (cm)
- d_{ni} : ノズル内径またはオリフィス径 (cm)
- d_{no} : ノズル外径 (cm)
- f : 気泡発生頻度 (bubble/sec)
- Fr : フルード数 ($=u^2/d_n g$) (-)
- g : 重力加速度 (cm/sec²)
- K : (8)または(8')式における定数 (-)
- N_c : (1)式で定義される無次元パラメータ (-)
- N_c' : (16)式で定義される修正無次元パラメータ (-)
- N_c'' : (17)式で定義される修正無次元パラメータ (-)
- N_w : 無次元パラメータ ($=We \cdot Fr^{-0.5}$) (-)
- P : 気泡内の圧力 (dyne/cm²)
- P_c : 毛管圧 (capillary pressure) (dyne/cm²)
- P_f : 蓄気室中のガスが気泡へ瞬間的に流入した後の蓄気室と気泡の間の平衡圧力 (dyne/cm²)
- P_{hs} : ノズル先端における静水圧 (dyne/cm²)
- P_m : 最大泡圧 (dyne/cm²)
- P_0 : 大気圧 (dyne/cm²)
- P_s : 静圧 ($=P_0 + P_{hs}$) (dyne/cm²)
- r_{ni} : ノズル内半径またはオリフィス半径 (cm)
- Re : レイノルズ数 ($=4w/\pi d_n \mu_g$) (-)
- T : 温度 (°K)
- T_B : 気泡温度 (°K)
- u : ノズルまたはオリフィスを通るガス流速 (cm/sec)
- V_B : 気泡体積 (cm³)
- V_c : 蓄気室容積 (cm³)
- V_g : ガス流量 (cm³/sec)
- V_{BM} : (2)または(2')式で与えられる気泡体積 (cm³)
- w : ガス質量速度 (g/sec)
- We : ウェーバー数 ($=d_n u^2 \rho_l / \sigma$) (-)
- $\Delta\rho$: 液体と気体の密度差 (g/cm³)
- ρ_l : 液体密度 (g/cm³)
- μ_g : 気体粘度 (g/cm·sec)
- μ_l : 液体粘度 (g/cm·sec)
- θ : Fig. 6 における接触角 (degree)
- σ : 表面張力 (dyne/cm)

文 献

- 1) D. PAPAMANTELOS, K. W. LANGE, K. OKOHIRA, and H. SCHENK: Met. Trans., 2(1971), p.3135
- 2) 小山伸二, 川口二三一, 岡村正義, 森谷清: 鉄と鋼, 58(1972), S 134

- 3) 中村泰, 大野剛正, 桑原正年, 鈴木嵩: 鉄と鋼, 58(1972), A21
- 4) R. D. PEHLKE and A. I. BEMENT: Trans. Met. Soc. AIME, 224(1962), p. 1237
- 5) W. G. DAVENPORT, A. V. BRADSHAW, and F. D. RICHARDSON: J. Iron Steel Inst., (1967), Oct., p. 1034
- 6) C. R. NANDA and G. H. GEIGER: Met. Trans., 2(1971), p. 1101
- 7) 小林三郎, 大森康男, 三本木貢治: 鉄と鋼, 56(1970), p. 998
- 8) G. M. GLINKOV and E. K. SHEVTSOV: Steel in the USSR, (1971), May, p. 359
- 9) P. PATEL and G. PAL: Stahl u. Eisen, 92(1972), p. 751
- 10) 只木楨力: 化学工学, 24(1960), p. 603
- 11) 只木楨力, 前田四郎: 化学工学, 27(1963), p. 147
- 12) J. F. DAVIDSON and B.O.G. SCHÜLFR: Trans. Inst. Chem. Engrs, 38(1960), p. 335
- 13) C. G. MAIER: U. S. Bur. Mines Bull., (1927), p. 260
- 14) W. SIEMES: Chem. Ing. Tech., 26(1956), p. 479, p. 614; Chem. Eng. Sci., 5(1956), p. 127
- 15) R. J. BENZING and J. E. MYERS: Ind. Eng. Chem., 47(1955), p. 2087
- 16) A. GUYER and E. PETERHANS: Helv. Chim. Acta, 26(1943), p. 1099
- 17) L. DAVIDSON and E. H. AMICK, Jr.: A.I. Ch. E. Journal, 2(1956), p. 337
- 18) A. MERSMAN: V.D.I. Forschungsheft, 491(1962), p. 1
- 19) R. KUMAR and N. R. KULLOOR: Chem. Tech. 19(1967), p. 78
- 20) I. LEIBSON, E. G. HOLCOMB, A. G. CACOSO, and J. J. JACMIC: A.I. Ch. E. Journal, 2(1956), p. 296
- 21) A. M. LEVIN: Nauchn. Tr. Dnepropetr. Met. Inst., 28(1952), p. 105
- 22) A. K. KHURANA and R. KUMAR: Chem. Eng. Sci., 24(1969), p. 1711
- 23) 柘植秀樹, 日比野真一: 化学工学協会第38年会, (1973), 第2分冊, p. 1
- 24) A. SATYANARAYAN, R. KUMAR, and N. R. KULLOOR: Chem. Eng. Sci., 24(1969), p. 749