

誌 上 討 論

論文 | 溶鉄浴内の気泡特性のX線透視観察

井口 学・高梨智裕・小川雄司・

徳光直樹・森田善一郎

鉄と鋼 Vol. 80(1994) No. 7 pp. 515~520

質問 | 名古屋大学工学部 佐野正道

液体中の気泡生成は、多くの研究者により実験的、理論的に詳細に研究され、膨大な数の論文があり、また優れた解説にもまとめられています^{1)~2)9)}。勿論、生成気泡の回りの流れなどは非常に複雑であり、まだ検討すべき点が残されていますが、基本的な気泡生成機構は解明されたと言って過言ではないと考えられます。

ところで、本論文は、これまでの研究成果とは種々の点で異なっています。以下に、従来の考え方を解説するとともに、問題点を指摘します。

1. 気泡生成に対する蓄気室の影響

Fig. 1 qには、ガス吹込みによく使われるオリフィスを示します。気泡生成時の圧力変動 ΔP_b に比較して、ガスがオリフィスを通るときの圧力損失 ΔP_n が小さいかあるいは同程度であれば、蓄気室は気泡生成に影響を及ぼします。すなわち、オリフィス出口で生成気泡が半球状(気泡半径 $r_b = d_{ni}/2$, d_{ni} :オリフィス径)になったとき、気泡内したがって蓄気室内の圧力が最も高くなり、その後気泡が成長するとともに気泡内の圧力が減少し、相対的に蓄気室内の圧力が高くなるため、蓄気室に蓄えられたガスが気泡内に急激に流入し、大きな気泡が生成します。Fig. 1 q(a)に示したオリフィスの場合、 ΔP_n が非常に小さいため、ガス流量に無関係に、気泡生成は蓄気室の影響を常に受けます。なお、この場合蓄気室容積 V_c が非常に大きければ、気泡生成時に蓄気室内の圧力は一定に保たれるため、定圧条件(constant pressure condition)下の気泡生成となります。

一方、Fig. 1 q(c)に示すように、 l' の部分に毛細管を使

って $\Delta P_b \ll \Delta P_n$ とし、さらに l' の部分の体積を生成気泡の体積より十分小さくすれば、ガスは気泡生成時に常に一定の流量で気泡内に流入します。この場合は定ガス流量条件(constant flow condition)下の気泡生成と呼ばれ、蓄気室の影響を受けません。

Fig. 1 q(b)に示すオリフィスの場合、気泡生成時における蓄気室から気泡へのガスの流入速度は、オリフィス板の厚さ l によっても変化するため、生成気泡の大きさは l に依存することになります。さらに、蓄気室容積が十分大きくなければ、蓄気室内の圧力が気泡生成時に変化するため、気泡生成機構はさらに複雑になります。

内径が一定でかつ長いノズルからのガス吹込みの場合、Fig. 1 q(b)のオリフィスで l を非常に大きくした場合に対応します。この場合、ガスがノズルを通るときの圧力損失 ΔP_n はガス流量とともに大きくなり、しかもノズル内容積が小さければ、定ガス流量条件下の気泡生成となります。しかし、ガス流量が小さい場合には、 ΔP_n は ΔP_b に比較して十分小さくなく、定ガス流量の条件は満足されません。我々は、溶鉄中の気泡生成について、内径1mmの部分 l が40cm、先端内径に等しい0.12, 0.18cmの部分 l' が約5cmのノズルを用いて実験を行いました³⁾⁹⁾。その結果、ガス流量が $10\text{cm}^3/\text{s}$ 以上では定ガス流量の条件が満足されるが、それ以下の流量では気泡生成は蓄気室の影響を受けることがわかりました。

著者らは、論文のFig. 2に示されているように、先端を絞ったノズルを用いています。この場合、気泡生成時の最大圧力が高くなりますので、蓄気室に蓄えられるガス量が多くなります。したがって、先端を絞ったノズルは、内径一定のノズルと比較すると、大きな気泡を生成しやすい構造であると言えます。しかも著者らの場合絞った部分の長さが高々数cmと推定されますので、 ΔP_n は小さくなく、気泡生成が蓄気室の影響を受けていないという保証は全くありません。さらに、溶鉄の場合には表面張力が大きいことおよび蓄気室内に温度分布があり、気泡への流入時にガスが膨張しますので、蓄気室の影響はとくに大きくなります。

著者らは、論文のFig. 8において、著者らの実験結果と溶融金属系で定ガス流量の条件下で得られた(4)式と比較し、一致しないと述べています。しかし、著者らが測定した気泡生成頻度が(4)式の計算値より小さいことは、蓄気室の影響を受けていることを反映しており、気泡生成条件の異

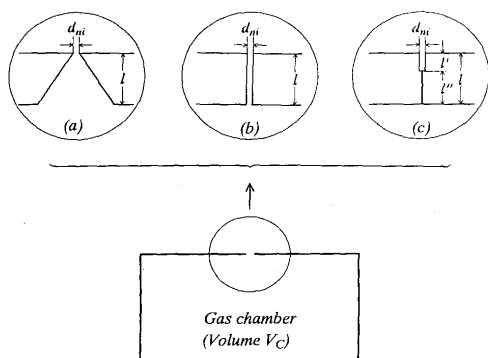


Fig. 1q. Bubble formation from orifice.

なる両者の比較は意味がありません。

2. 気泡生成に及ぼすノズルの濡れ性の影響 (ノズル内、外径の影響)

我々は、水銀、溶融銀、溶鉄中の気泡生成について、ノズル内、外径を系統的に変化させて実験を行い、定ガス流量条件下では、生成気泡の大きさはノズル外径にのみ依存すること、したがってノズルに付着している気泡の底面はノズル外径まで広がることを明らかにしました³⁹⁾⁴⁰⁾⁵⁰⁾。さらに、我々は、バブリング領域のオリフィスからのガス吹込みについて、著者らよりも高いガス流量でも生成気泡の底面は常に大きく広がることを実際に観察しました⁶⁰⁾。

これに対して、著者らは、気泡生成頻度とノズル内径との相関性がみられることから、ガス流量が高い場合には生成気泡の底面がノズル外径まで広がる時間的余裕がなく、気泡生成頻度はノズル内径で決まるとしています。しかし、上述したように、我々の観察によると、生成気泡の底面が広がる速度は非常にはやく、時間的余裕がないということは考えられません。

気泡生成頻度とノズル内径との相関性は、気泡生成に対する蓄気室の影響を考慮すれば、明確に説明できます。蓄気室の影響がある場合、ノズルから生成気泡へのガスの流入速度はノズル内径によって変化するため、生成気泡の大きさはノズル内径に依存することになります。しかし、この場合でも生成気泡の底面はノズル外径まで広がります。したがって、著者らの実験の場合、生成気泡の大きさはノズル内、外径の両方の影響を受けます。著者らの論文のFig. 8において、ノズル内径の減少とともに気泡生成頻度が必ずしも増加しないのは、以上のこととノズル構造の微妙な違いが原因となっていると推定されます。

著者らが主張されるように、もし生成気泡の大きさがノズル内径のみに支配されるならば、液体に濡れにくいポーラスプラグからも非常に小さい気泡が生成することになります。しかし、実際にはそうではなく、液体に濡れにくいポーラスプラグからは小気泡は生成しえず、大きな気泡が生成することは周知の事実です。

3. 気泡生成に対する液体、ガスの物性値の影響

著者らは、溶鉄-Ar系と水-空気系の実験結果が $(\sigma/\rho_1 g^3)$ (σ : 液体の表面張力, ρ_1 : 液体密度, g : 重力加速度)の相異を考慮することにより統一的に説明でき、比較的高いガス流量においても表面張力などの液体の物性値が気泡生成に影響を及ぼすとしています。

一方、従来の研究をまとめたKumarら¹⁹⁾、柘植²⁰⁾の解説によると、定ガス流量、定圧条件下のいずれにおいてもガス流量が高くなると気泡の大きさに対する表面張力、液体

密度の影響は小さくなります。なお、これらの影響は、ノズル径が小さいほど、より低い流量でほぼ無視できるようになります。

以上の著者らと従来の研究の相異はつぎのように説明することができます。著者らが比較的高ガス流量においても表面張力、液体密度の影響を考慮せざるを得なかったのは、溶鉄-Ar系の場合にも生成気泡の大きさがノズル内径にのみ依存するとしたことと、1. で述べたように溶鉄-Ar系の方が水-空気系に比較して同一のノズルを用いても蓄気室の影響をより強く受け、大きな気泡が生成することによります。すなわち、論文の(6)式における $(\sigma/\rho_1 g^3)$ は溶鉄-Ar系の方が水-空気系よりも大きいため、両系の気泡生成頻度の相異をみかけ上説明できますが、これは実際の物理現象に基づくものではありません。

気泡生成に及ぼすガスの物性値の影響については、柘植²⁰⁾が、定圧条件あるいは蓄気室内の圧力変動がある条件下では、ガス密度および比熱比が生成気泡の大きさに影響を及ぼすことを見いだしています。この結果は著者らと一致しております。このことから著者らの実験では蓄気室が気泡生成に影響していると推定できます。

4. 気泡生成頻度の測定

ノズル (またはオリフィス) からのガス吸込みにおいては、比較的低ガス流量では均一の大きさの気泡が規則的に生成しますが、流量の増加とともに大小の気泡が対となって生成し始め、さらに流量が増加すると生成気泡の大きさにかなりの分布がみられるようになります。

著者らは、高流量においても気泡生成に影響を及ぼす根拠として、水-空気系($\sigma=71.7\text{mN/m}$)よりシリコンオイル-空気系($\sigma=18.7\text{mN/m}$)の方が気泡生成頻度が大きいことをあげています⁷⁰⁾。しかし、表面張力が小さい後者の系で生成気泡の大きさの分布が顕著になると考えられるガス流量が $100\text{cm}^3/\text{s}$ 以上の結果を除くと、対数グラフ上のプロットではありますが、両系の気泡生成頻度の差はガス流量の増加とともに小さくなっており、この傾向は従来の結果と一致しています。すなわち、著者らが従来の研究とは異なる結論を導き出したのは、小気泡が生成するなど気泡生成が不規則になる高ガス流量の結果を重視したことも一つの原因として考えられます。なお、大きな気泡も小さな気泡もすべて1個の気泡として数えて求めた気泡生成頻度は、吹込んだガスの大部分が大きな気泡を生成するのに使われるため、いかなる意味を持つか疑問です。

5. まとめ

以上に述べたように、著者らの論文の内容は、従来の研究成果と多くの点で一致していません。この主な原因

は、著者らが実験において蓄気室が気泡生成に影響を及ぼしやすい先端を絞ったノズルを用い、しかも蓄気室の影響を全く無視したことにあります。

したがって、気泡生成に対する蓄気室の影響を考慮した実験結果の再検討が必要であると考えます。

文 献

1 q) R.Kumar and N.R.Kuloor: Advances in Chemical Engineer-

ing, Vol.8, (1970), p.255 [Academic Press]

2 q) 柘植秀樹: 化学工学の進歩16'気泡・液滴・分散工学' (化学工学協会編), p.17 [横書店]

3 q) 佐野正道, 森 一美, 佐藤哲郎: 鉄と鋼, 63 (1977), p.2308

4 q) 佐野正道, 森 一美: 鉄と鋼, 60 (1974), p.348

5 q) M.Sano and K.Mori: Trans. Iron Steel Inst. Jpn., 20 (1980), p.675

6 q) 小沢泰久, 森 一美, 佐野正道: 鉄と鋼, 67 (1981), p.2655

7 q) 井口 学, 森田善一郎, 千原知幸, 高梨智裕, 川端弘俊: 材料とプロセス, 7 (1994), p.1098

回答 | 大阪大学工学部 井口 学・森田善一郎 大阪大学大学院 高梨智裕 新日本製鉄(株) 小川雄司・徳光直樹

1. 気泡生成に対する蓄気室の影響

KumarとKuloor^{1a)}の解説で述べられていますように、定ガス流量の条件は2通りの方法で実現可能です。一つは質問者がFig. 1 q (b), (c)に示されている l と l' が長いパイプを用いて、この区間における摩擦損失 ΔP_n を気泡の生成に伴う圧力損失 ΔP_b よりも非常に大きくする方法です。他の一つは蓄気室から管路出口までの距離が十分でなく、摩擦損失が稼げないときに、管路途中にオリフィスを設置したりガラスパウダーなどを詰めて圧力損失を大きくし、摩擦損失とのトータルの損失を ΔP_b よりも非常に大きくする方法です。

著者らはFig. 1 a(a)に示しましたように、左側のパイプをできるだけ長くして摩擦損失を大きくするとともに、そのパイプの出口に直径の小さなパイプを付けて流れの加速による圧力降下を生じさせ、トータルの圧力損失を大きくしています。溶鉄の実験では、工作の都合上パイプの先端を絞ったノズル[Fig. 1 a(b)]を用いましたが、このノズルはFig. 1 a(a)の場合とは断面の急縮小による損失分が異なるだけであり、圧力損失はあまり変わりません^{2a)}。

Fig. 1 a(a), (b)に示したノズルは、質問者がFig. 1 q(a)に示されたような蓄気室にオリフィスが直接取り付けられた構造のものは、非常に長いパイプの中に流れが存在し、大きな摩擦損失が生じているという点で基本的に異なります。

著者らの用いた先端を絞ったノズルからガスを吹込んだときに、実際に定ガス流量の条件が満たされているのかといった点につきましては、ノズルを通過中の流量を直接測

定する事は非常に難しい問題ですので、従来定ガス流量の条件下で得られている水-空気系に対するDavidson-Amickの式^{3a)}と比較することによって確認しました。

溶鉄の実験と同じ形状、寸法のノズルと配管系ならびに容器を用いて、水-空気系の実験を行い、Fig. 2 aに質問者と同じ形状のノズル [Fig. 1 a(c), 内径と長さ: 0.13cm×65cm, 0.20cm×65cm, 0.38cm×70cm]を用いて求めた結果も合せて示しました。2種類のノズルに対する実験結果はDavidson-Amickの実験式の成立する範囲すなわち図の左半分のガス流量の小さいところでは互によく一致しており、Davidson-Amickの式との一致も良好で定ガス流量の条件が満足されています。一般にガス流量が大きくなりますと蓄気室の影響は小さくなりますから、図の左半分で定ガス流量の条件が満足されているのであれば、当然のことながら図の右半分の高流量側においても、その条件が満足されていると考えられます。

以上のような実験結果から、溶鉄の実験も定ガス流量の条件下で行われた可能性が高いと考え、質問者の実験式(4)との比較を行いました。

論文中のFig. 8において、式(4)と測定値との相違を蓄気室の影響に帰着させることも一つの解釈の仕方です。ただ

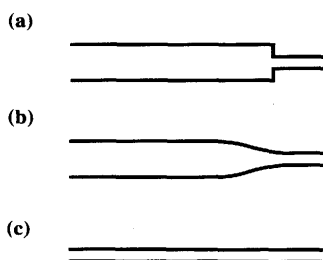


Fig. 1a. Schematic of nozzles.

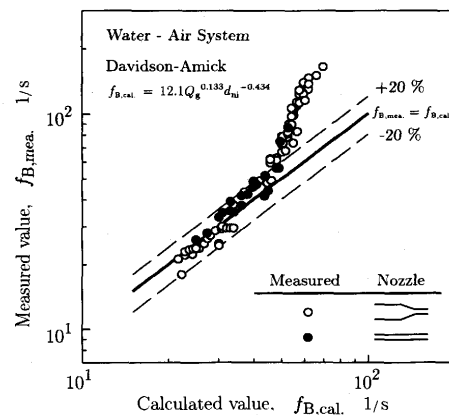


Fig. 2a. Comparison of measured values of the frequency of bubble formation with the empirical correlation by Davidson and Amick for water-air system.

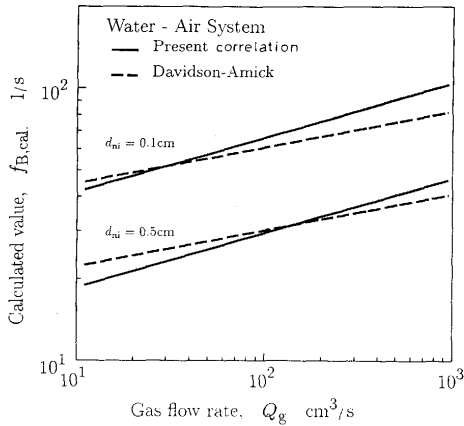


Fig. 3a. Comparison of the present empirical correlation of the frequency of bubble formation with that proposed by Davidson and Amick for water-air system.

し、もし両者の相違が蓄気室の影響のみによって生じたのであれば、前述のようにガス流量の増加とともに蓄気室の影響は小さくなりますから、本測定値は式(4)に漸近するはずですが、そのような傾向はみられません。したがって、著者らは両者の相違を蓄気室の影響ではなく、ノズル径と物性値の影響とみなして実験式を導出し、本実験式でも従来の溶融金属に対する実験結果を比較的よく近似できることを示しました。ただし著者らの実験式の適用範囲につきましては、今後実験を重ねることによって明らかにしていく必要があります。

なお、溶鉄の実験においてガスの温度はノズルの絞り部のかなり上流において浴温度に等しくなることを実測して確認しており、熱膨張の影響はありません。

また参考までに、水-空気系の場合、Davidson-Amickの式に著者らの式がどの程度合致するのかをFig. 3 aに示します。図に示した範囲では最大±20%の相違がみられます。

2. 気泡生成に及ぼすノズルの濡れ性の影響 (ノズル内外径の影響)

論文中で“時間的余裕がない”という表現をとりましたが、著者らの実験条件下でノズル出口における気泡の半径方向への挙動を細かく観察していないこと、ならびに質問者の実験結果を考慮して、この表現は撤回します。ただし外径位置近傍まで広がることをもって、ただちに気泡の生成がノズル外径で規定されると結論づけることはできないように思います。

ノズルと液体とが濡れない場合、非常に低いガス流量のときには、ノズルから吹出すガスの慣性力は無視でき、静的な力の釣り合いによって気泡の生成は規定されますので、従来いわれているように気泡生成頻度をノズル外径で整理してよいと考えます。ガス流量が高くなってくると、ノズルから吹出すガスの慣性力の影響が強くなります。したが

って、慣性力が時間的に変動しているのか一定であるのかはさておき、慣性力はノズル内径で規定されますから、気泡の生成はノズルの外径支配から内径支配へと徐々に変わっていくと考えるのが自然です。

著者らの論文中のFig. 9において、測定値のばらつきは一見大きいようにみえますが、1例としてFig. 4 a, 5 aに示しましたように、 f_B の測定値はノズル内径 d_{ni} に対しては系統的に変化しています。しかしノズル外径 d_{no} に対してはほとんど依存性を示していません。この傾向は他のガス流量に関してもみられました。

また著者らは前に、電気探針を用いて得られた水銀浴中の気泡特性に関する従来の実験結果を整理したときに^{4a)}、ここで用いたノズルとは形状が異なりますが(著者らはFig. 1 a(a)のノズルを用いました)、ガス流量の比較的大きい領域では、ガスホールドアップが50%となる中心軸上での気泡頻度、すなわちノズルを離れて上昇し始めた気泡の頻度が内径で整理できることを明らかにしました(文献^{4a)}のFig.10)。これらの事実は、気泡生成頻度がガス流量の増加とともにノズル内径に依存するようになることを意味しています。

それではこのような気泡のノズル内径依存性が蓄気室の影響であるのかといった点に関しましては、ご質問の1. についてお答えしましたような理由、すなわちガス流量の

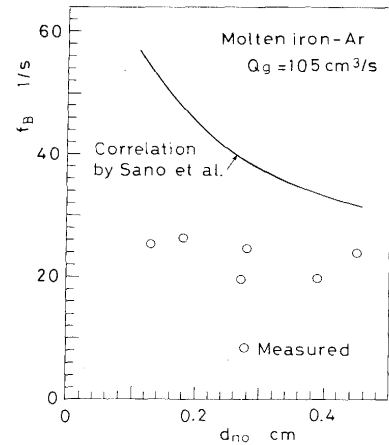


Fig. 4a. Relation between the frequency of bubble formation and outer diameter of nozzle for molten iron-Ar system.

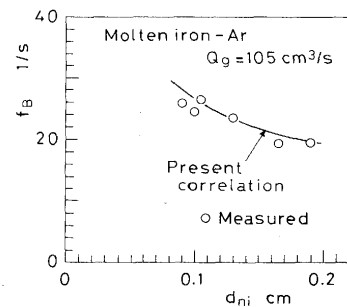


Fig. 5a. Relation between the frequency of bubble formation and inner diameter of nozzle for molten iron-Ar system.

増加につれてFig. 8の f_B の測定値が式(4)に漸近しないことから、その可能性は小さいのではないかと考えています。

なお、濡れ性の悪いポラスプラグからの気泡の生成に関しましては、多くの孔から出るガスの流量は一般に非常に小さく、慣性力が無視できることにより各気泡は周囲へ広がり、合体して大きな気泡になると考えられます。また各々の孔の出口は同じ方向を向いているわけではありませんから、ガス流量を増して各孔から出る流量を大きくした場合にも、生成気泡の合体が起こり大きな気泡ができると考えられます。したがって、ポラスプラグの結果と比較することにより、著者らの実験式の妥当性を論ずることはできません。

気泡の生成頻度がガス流量の増加とともにノズル外径からノズル内径に依存するようになる過程は徐々に進行すると思われれます。質問者の実験条件下では、ガス流量が小さいので濡れ性の影響が強くなって、外径で整理できたものと思われれます。気泡生成頻度とノズル内径あるいは外径との関係については、ご指摘のように、もっと系統的な実験が必要です。これに関しましては今後の課題とさせていただきます。

3. 気泡生成に対する液体、ガスの物性値の影響

式(4)では液体や気体の物性値の影響はまったく考慮されていませんが、著者らの実験式においては物性値として表面張力、液体と気体の密度をとりあげています。動粘度につきましては、気泡の生成領域近傍の流れ場が乱流であれば気泡生成に及ぼす動粘度の影響は無視できることを前に示していますので^{5a)}、ここでは考慮していません。以下、順をおってご説明します。

3.1 表面張力の影響

KumarとKuloorの解説^{1a)}のFig. 5に定ガス流量の条件下で得られた気泡の体積 V_B と表面張力 σ の関係が示されていますが、 V_B は明らかに σ に依存しています。気泡体積 V_B と気泡生成頻度 f_B の間には $f_B = Q_g/V_B$ の関係がありますので、 f_B

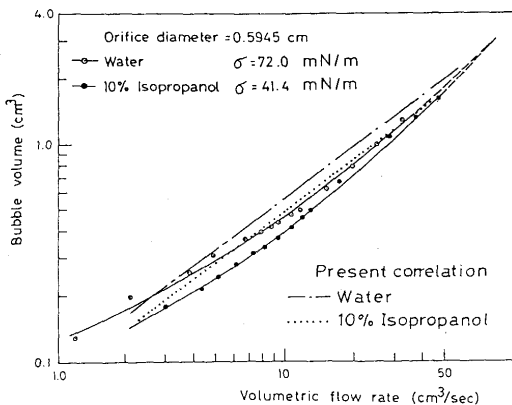


Fig. 6a. Effect of surface tension on bubble volume under constant flow conditions.

も σ に依存することになります。彼らのFig. 5をここでは改めてFig. 6aとして示しました。図中には、著者らの実験式から計算した線も描き、比較しています。水の場合に比べてイソプロパノールを含有した水の気泡体積は $(41.4/72)^{1/4}$ 倍、すなわち0.87倍になることが予想されますが、KumarとKuloorが実線で測定値を結んだ範囲では、約0.86倍となり、著者らの予測した値とほぼ同じ比率になっています。

同じ図のガス流量 Q_g の大きいところで、KumarとKuloor^{1a)}はデータを示さずに想像線を引き、 σ の影響はなくなるとしています。しかし原著論文^{6a)}をみますとデータが示されており、表面張力の影響は明らかに存在します。

著者らは密度 $\rho_L = 0.847\text{g/cm}^3$ 、 $\nu_L = 0.020\text{cm}^2/\text{s}$ 、 $\sigma = 18.7\text{mN/m}$ のシリコンオイル中に空気を吹込み、気泡生成頻度 f_B を高速度ビデオカメラを用いて測定しました。ただしノズルは溶鉄の実験の場合と同じですが、容器は一辺が20cmの正方形断面を有しており、浴深は20cmとしています。水との間にはFig. 7aに示すように明らかな差がみられました。図中の $Q_g = 100\text{cm}^3/\text{s}$ あたりで f_B の測定値はやや特異な変化を示します。これは前掲のFig. 2aに示しましたように、どのノズルを用いても現れます。詳細はまだよくわかりませんが、これには管内における層流から乱流への遷移や前の気泡の後流の影響が関与しているようです。このガス流量よりも低ガス流量側では Q_g の増加とともに表面張力の影響はご指摘のとおり、小さくなっているものの無視できません。

なお、質問者のノズルと同じ形状 [Fig. 1a(c)] で、Fig. 7aのノズルの内径0.19cmにほぼ等しい0.20cmの内径と65cmの長さを有するノズルを用いて得られた結果をFig. 8aに示します。表面張力の影響はFig. 7aの場合よりも小さくなりますが、明らかに現れています。

以上の結果を含めて判断しますと、気泡の生成はノズルの周りの流れや^{7a)}、ノズル出口でのガスの速度分布にも影響されるようであり、それらとの相互作用で表面張力への依

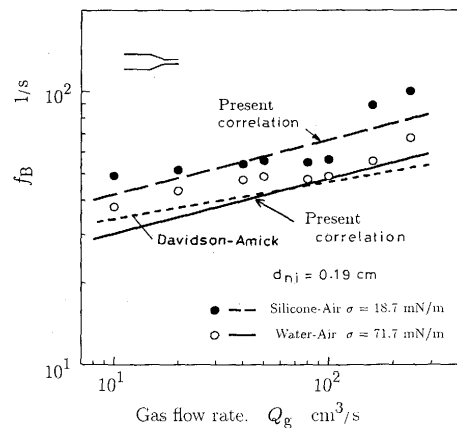


Fig. 7a. Effect of surface tension on the frequency of bubble formation for a nozzle shown in Fig. 1a(b).

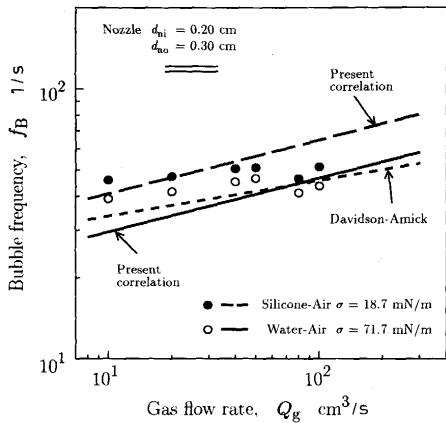


Fig. 8a. Effect of surface tension on the frequency of bubble formation for a nozzle shown in Fig. 1a(c).

存性もかなり複雑です。著者が対象とした実験範囲での気泡生成頻度 f_B は $\sigma^{-1/4}$ に比例すると仮定して実験式を導きましたが、この関係が厳密に成立するわけではもちろんありません。ご質問の 4. とも関連しますが、気泡生成頻度の表面張力依存性については、蓄気室だけでなく、上記要因も含めて今後さらに詳細な検討が必要です。

3・2 液体の密度の影響

本実験式において、 f_B は ρ_L の $1/20$ 乗に比例しますので、液体の密度の気泡生成頻度への影響は非常に小さいといえます。これは、従来の知見^{1a)}に合致しています。

3・3 気体の密度の影響

文献^{1a)}では、気泡生成頻度に及ぼす気体の物性値の影響については無視できるのではないかと述べられています。

著者は水中へ内径0.10cmのノズルから空気とヘリウムを吹込み、気泡生成頻度 f_B を測定しました。その結果、例えば $Q_g = 40 \text{ cm}^3/\text{s}$ のとき、空気の場合の f_B の値は約65 (1/s)、ヘリウムの場合は約46 (1/s) となり、両者の比は約1.4となりました。これは著者らの実験式(7)から計算される $(\rho_{\text{air}}/$

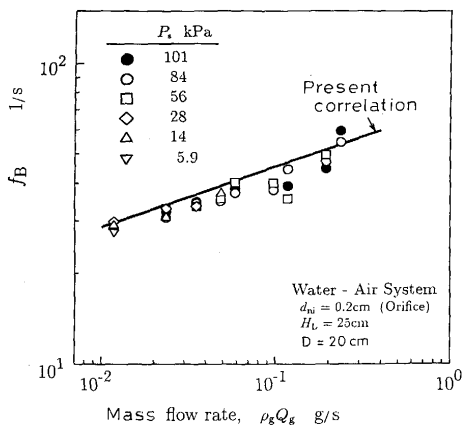


Fig. 9a. Relation between the frequency of bubble formation and mass flow rate under reduced pressures.

$\rho_{\text{He}})^{1/5} = 1.46$ とよく一致しています。

なお、式(7)を変形しますと

$$f_B = 92.8 \rho_L^{1/20} \sigma^{-1/4} (\rho_g Q_g)^{1/5} d_{ni}^{-1/2} \dots \dots \dots (1a)$$

となり、気泡生成頻度 f_B は質量流量 $\rho_g Q_g$ に依存することになります。この妥当性は減圧下の浴底に設置した Fig. 1 a(a) のタイプのオリフィスからの吹込み実験によって確認しています^{8a)}。その結果を Fig. 9 a に再録しましたが、減圧下の f_B は式(1 a)で精度よく近似できますので、 f_B が ρ_g にも依存することは明らかです。なお Fig. 9 a において、 D は浴の直径、 H_L は浴深、 P_s は浴表面の圧力を表します。

4. 気泡生成頻度の測定

短い時間間隔で生成する気泡は必然的に前の気泡の後流の影響を受け、前のものが横方向に広がれば、あとのものは縦長になり、しかも重なり合うようになりますから、各々の気泡の体積を正しく求めることは難しくなります。横に広がった気泡のほうが大きいような印象を受けますが、詳細についてはいまのところよく分っていません。この点を検討しないと、ご質問に対して明確にお答えすることはできません。これにつきましても今後の課題とさせていただきます。

5. まとめ

以上お示しましたように、著者らは決して物理現象の反映しないような形で次元解析を行い、実験式を導入したわけではありません。ただし本実験式の適用範囲については十分検討できていません。

気泡の生成についてはまだよく分らない点が残されています。ご指摘の事項を改めて検討し、気泡生成機構の解明に微力を尽くしたいと考えています。貴重なご意見有難うございました。

文 献

- 1 a) R.Kumar and N.R.Kuloor : Advances in Chemical Engineering, Vol. 8, (1970), p.255 [Academic Press]
- 2 a) 管路・ダクトの流体抵抗 (日本機械学会編), (1979), [日本機械学会]
- 3 a) L.Davidson and E.H. Amick Jr. : AIChE J., 2 (1956), p.337
- 4 a) 井口 学, 出本庸司, 菅原直也, 森田善一郎 : 鉄と鋼, (1992), p.407
- 5 a) 井口 学, 川尻 明, 富田祐志, 森田善一郎 : 鉄と鋼, 78 (1992), p.1456
- 6 a) S.Ramakrishnan, R.Kumar and N.R.Kuloor : Chem. Eng. Sci., 24 (1969), p.731
- 7 a) 井口 学, 森田善一郎, 千原知幸, 高梨智裕, 小川雄司, 徳光直樹 : 材料とプロセス, 7 (1994), p.268
- 8 a) 井口 学, 千原知幸, 倉永知明, 上田 洋, 森田善一郎 : 鉄と鋼, 80 (1994), p.742