

© 1987 ISIJ

液体中2孔オリフィスからの吹込みガスジェットの相互作用

論文

小沢泰久*・松井良行*²・森 一美*・佐野正道*

Interaction between Gas Jets from Two Orifices in Liquid

Yasuhisa OZAWA, Yoshiyuki MATSUI, Kazumi MORI and Masamichi SANO

Synopsis:

A study has been made of the interaction between gas jets from two orifices in liquid by using a high speed cinecamera. Nitrogen was injected into a mercury bath through two orifices of 0.1 cm in diameter (d_o) located at the transparent vessel bottom. The distance between the two orifices (L) was varied from 0.2 to 2.0 cm. Additionally, experiments were done of helium injection into the water bath through two orifices ($d_o=0.2$ cm, $L=0.6\sim 4.0$ cm).

The bubbling behavior at two orifices has been classified into three patterns. "Coalescing": two adjacent bubbles growing at the orifice exits coalesce into one. "Contacting": the adjacent bubbles contact without coalescing. "No contacting": the adjacent bubbles do not contact. "Coalescing" occurred more frequently with decreasing L , while "no contacting" time fraction increased with increasing L . The time fraction for "contacting" increased to a maximum and then decreased, as L increased. The jetting behavior at two orifices was found to be strongly influenced by L . In certain ranges of L , jetting at two orifices occurred more frequently than in the case of a single orifice. A theoretical model is given to explain the interaction between gas jets from two orifices in liquid.

Key words: steelmaking; gas injection; jetting; bubbling; interactions between gas jets.

1. 緒 言

吹込精錬の基礎研究として、近年、液体中単孔オリフィスからのガス吹込みについて多くの研究が行われ、ガスジェットの挙動がかなり解明されてきた^{1)~9)}。しかし、多孔からの吹込みガスジェットの相互作用挙動に関しては、基礎的にも実際的にも興味深い問題であるにもかかわらず、基礎研究は従来全く行われていない。

著者らは従来、 N_2 -水銀^{3)~5)}、 N_2 -水⁶⁾⁹⁾、He-水⁹⁾系を用い単孔オリフィスからの液体中ガス吹込みを行い、バブリング-ジェッティング現象^{3)~6)9)}、気泡の合体連結現象⁹⁾などを明らかにしてきた。本研究ではこれらの結果をふまえ、気液の密度比がかなり近い N_2 -水銀系およびHe-水系を用いた2孔オリフィスからのガス吹込み実験を行った。

N_2 -水銀系実験では、水銀容器の透明な底板の2孔オリフィスから水銀浴中に N_2 ガスを吹き込み、ガスジェットの相互作用挙動を底板を通して高速度カメラにより直接観察した。He-水系実験では、2孔オリフィスからHeガスを水浴中へ吹き込み、側面からの高速度撮

影を行い、オリフィス出口上方における吹き込みガスジェットの相互作用挙動を観察し、水銀浴における底面からの観察結果と比較した。

2. 実 験

2.1 N_2 -水銀系実験

実験装置をFig. 1(a)に示した。水銀容器はステンレス製で内径10 cm、高さ40 cmである。装置底部には

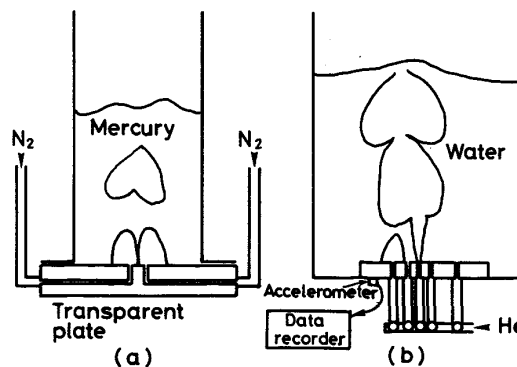


Fig. 1. Schematic drawing of experimental apparatus.

昭和59年10月本会議講演大会にて発表 昭和62年1月14日受付 (Received Jan. 14, 1987)

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

*² 名古屋大学大学院 (現: (株)神戸製鋼所) (Graduate School, Nagoya University, Now Kobe Steel, Ltd.)

中心部分に吹込み用の2孔オリフィスを有する透明アクリル板を用いた。オリフィス径は0.1 cmで、2孔オリフィスの中心間距離 L は0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 cmの5とおりとした。

容器に深さ20 cmまで水銀を入れ、高速度カメラを装置底部から50 cm下方に設置した。2孔オリフィスから N_2 ガスを吹き込み、装置底部の透明板を通して高速度撮影した。フィルム送り速度は1500 frames/sで撮影時間は約3 sであつた。ガス流量は1孔当たり55~690 $cm^3/s^{\dagger}$ の範囲で変化させた。なお、この流量範囲はみかけのマッハ数⁴⁾に換算すると、0.2~2.5となる。

2.2 He-水系実験

実験装置をFig. 1(b)に示した。水槽は40×50×100 cmの鉄製で、観察、採光用のアクリル製窓を取り付けた。水槽底部に固定した厚さ3 cmのアクリル板には一列に所定の間隔に5つオリフィスを設けた。オリフィス直径は従来の研究⁶⁾⁹⁾で重点的に調べた0.2 cmとした。この5つのオリフィスからガスを吹き込む2孔を選択することにより、2孔オリフィスの間隔を0.6~4 cmの間で変化させた。また、底部アクリル板には圧電型加速度計を設置した。

実験には蒸留水を使用し、水深を50 cmとした。Heガスを底部の2孔オリフィスから水中へ吹き込み、ガスジェットの挙動を高速度カメラにより観察した。フィルム送り速度は1000 frames/sとした。ガス流量は1孔当たり960~5800 cm^3/s の範囲で変化させた。なお、この流量範囲はみかけのマッハ数に換算すると、0.3~1.8となる。撮影と同時に、気泡発生にともなう底部アクリル板の振動の測定を加速度計により行つた。

3. 実験結果および考察

3.1 2孔オリフィスからのガスジェットの相互作用挙動

Photo. 1に2孔オリフィスから形成されるガスジェットの挙動の概念図および撮影例を N_2 -水銀系、He-水系の場合を対応させ、4種類に分類して示した。図の(a)~(d)のおおの左側の写真は N_2 -水銀系のガスジェットの浴槽底部からの撮影例である。右側の写真はHe-水系の浴槽正面からのものである。(a)は2孔オリフィスからの2つの気泡が合体し1つの気泡になる状態を示している。(b)は2つの気泡が接触している状態、(c)は2つの気泡が全く接触していない状態を示している。また、(d)ではジェットING³⁾⁴⁾が起こっている。ここで、バブリングの(a), (b), (c)

[†] オリフィス出口位置の静水圧の条件下のガス流量

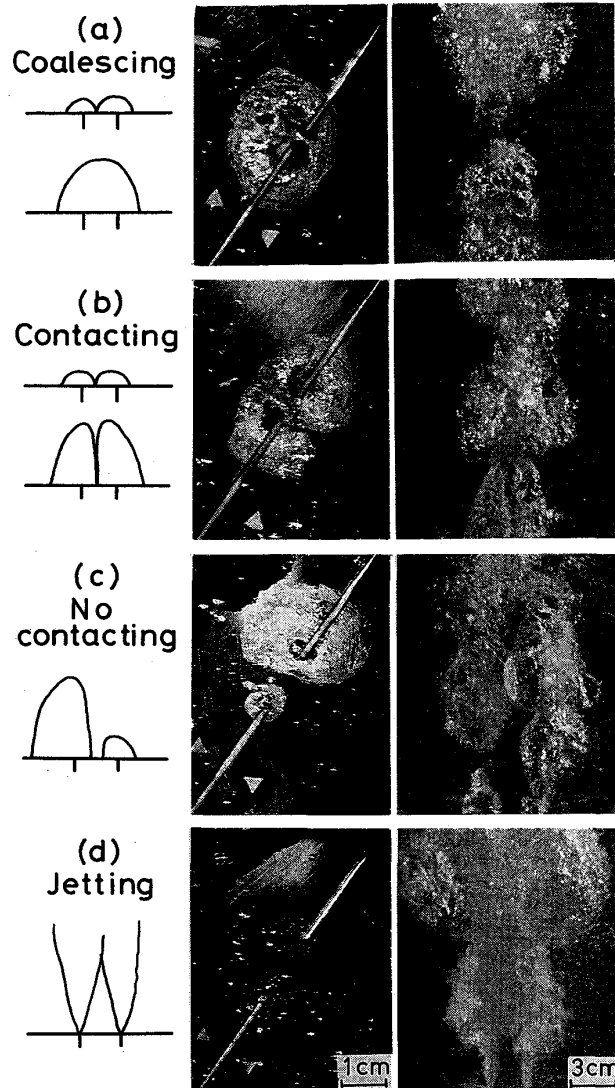


Photo. 1. Jetting and various types of bubbling.

N_2 -Hg			He - H_2O		
(a)	N_2 -Hg	$M'=1.0$ $L=0.5$ cm	He - H_2O	$M'=0.5$ $L=0.8$ cm	
(b)	N_2 -Hg	$M'=1.2$ $L=1.0$ cm	He - H_2O	$M'=0.5$ $L=2.4$ cm	
(c)	N_2 -Hg	$M'=1.4$ $L=1.5$ cm	He - H_2O	$M'=0.5$ $L=4.0$ cm	
(d)	N_2 -Hg	$M'=2.0$ $L=2.0$ cm	He - H_2O	$M'=1.8$ $L=2.4$ cm	

をそれぞれ“Coalescing” (合体), “Contacting” (接触), “No contacting” (接触なし) と呼ぶことにする。

Photo. 1(d)では両方のオリフィスにおいてジェットINGが起こっているが、一方がジェットING、他方がバブリングとなつている場合も観察された。そこで、本研究では、一方のオリフィスからのガスジェットの挙動に注目し、バブリングとジェットINGとを区別してそれぞれの時間割合を求めた。また、バブリングについては、注目しているオリフィスで生成している気泡と他方のオリフィスで生成している気泡との相互作用挙動を“Coalescing”, “Contacting”, “No contacting”に分類し、さらに注目しているオリフィスからの気泡と他のオリ

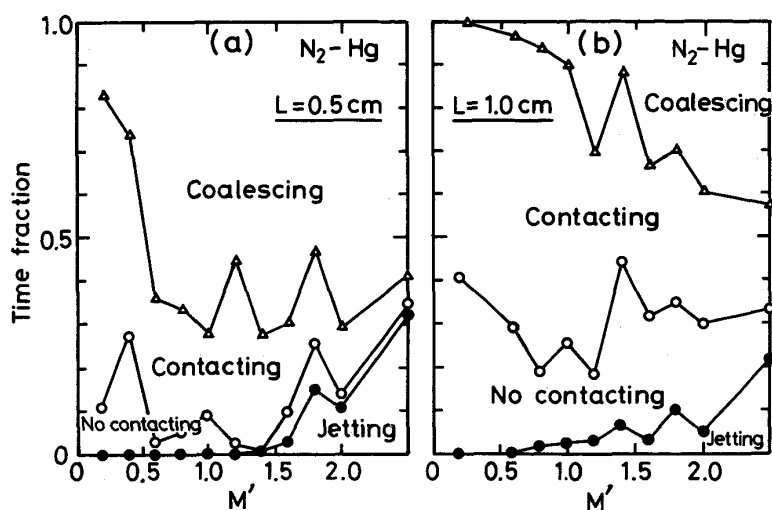


Fig. 2. Time fraction for jetting and three types of bubbling plotted against nominal mach number.

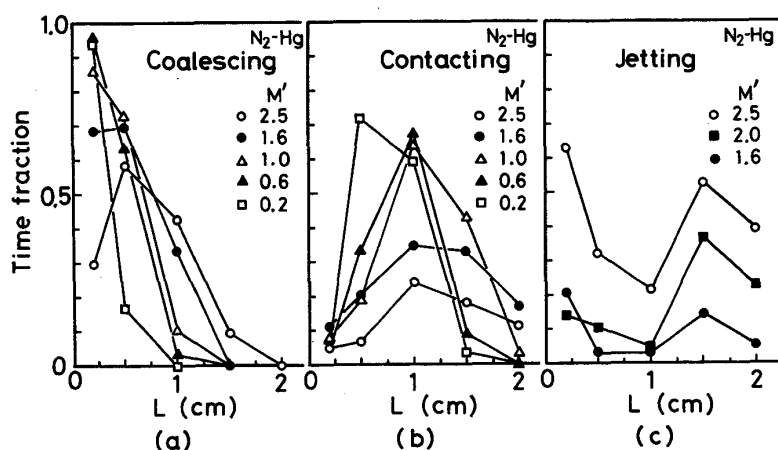


Fig. 3. Time fraction for "Coalescing", "Contacting" and "Jetting" plotted against distance between two orifices.

フィスからの気泡の生成開始時期の同時性について検討を加えた。

3.2 N₂-水銀系

3.2.1 バブリングとジェッティング

バブリングの3つのパターン ("Coalescing", "Contacting", "No contacting") それぞれの時間割合およびジェッティングの時間割合をみかけのマッハ数に対して Fig. 2 にプロットした。Fig. 2(a) はオリフィス間隔 0.5 cm, (b) はオリフィス間隔 1.0 cm についての結果を示している。図中●印がジェッティングの時間割合, ●印と○印の間が "No contacting", ○印と△印の間が "Contacting" の時間割合, また, 残りが "Coalescing" の時間割合を表している。

Fig. 2 より, オリフィス間隔が広い(b)においては, その間隔の狭い(a)に比べ, 全体的に "Coalescing" の時間割合が小さく, "No contacting" の時間割合が大きいことがわかる。また, 図には "Contacting" の時間割合は M' が大きいほど減少する傾向が示されている。

Fig. 3 に "Coalescing", "Contacting" およびジェッティ

ングの時間割合をオリフィス間隔に対してプロットした。図において, "Coalescing" の時間割合はジェッティングの時間割合の大きくなる $M'=1.6, 2.5$ の場合以外にはオリフィス間隔が広いほど減少している。"Contacting" の時間割合はある L の値において極大となっている。また, ジェッティングは L に対して様な変化を示さず, $L=0.2, 1.5$ cm においてその時間割合がかなり大きくなっている。

3.2.2 バブリングの特性

バブリングの特性をより明確にするために, バブリングの時間割合を1とした場合の "Coalescing" と "No contacting" の時間割合を M' と L を変数とするグラフ上に等高線としてのおおの Fig. 4, 5 に示した。縦軸の $M'=1.1$ は亜音速-音速領域の境界を示しており, これ以上の M' ではオリフィス出口におけるガス線流速が実際に音速に達する⁴⁾。

Fig. 4 において "Coalescing" の時間割合はオリフィス間隔が広くなるほど減少している。また, ガス線流速が増加するほど "Coalescing" の時間割合が大きくなる

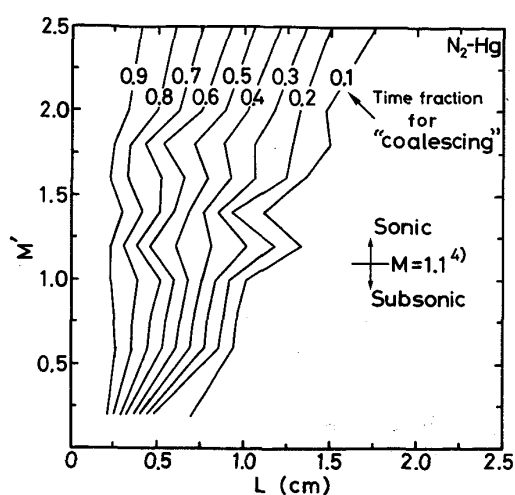


Fig. 4. The ratio of "Coalescing" to bubbling time represented in M' - L diagram.

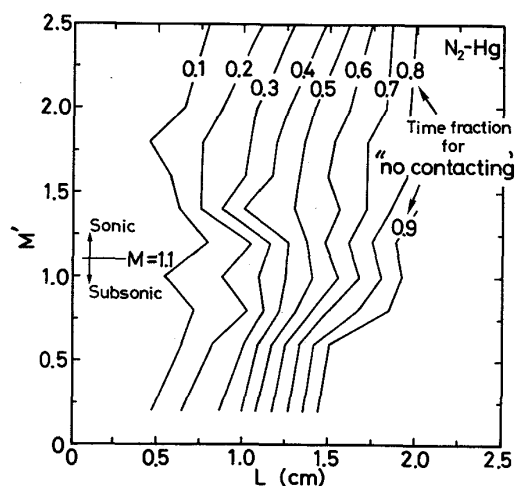


Fig. 5. The ratio of "No contacting" to bubbling time represented in M' - L diagram.

傾向が表れている。Fig. 5 から、オリフィス間隔が広がるほど2孔オリフィスからの2つの気泡の接触は起こりにくくなり、"No contacting"の時間割合が増加することがわかる。また、この時間割合はガス線流速が増加するほど減少する傾向のあることが示されている。

3・2・3 気泡の生成開始時期の同時性

2孔から2つの気泡が同時に生成を開始した場合は、生成開始時期が異なる場合に比べて2つの気泡は接触しやすく、また、合体を起こしやすいと考えられる。そこで、この同時性を定量化するため一方のオリフィスに注目し、そのオリフィスから生成する気泡のうち、他方のオリフィスからの気泡生成と同時に生成を開始する気泡の生成時間を合計し、その時間のバブリング全体の時間に占める割合を求めた。このように求めた時間割合と

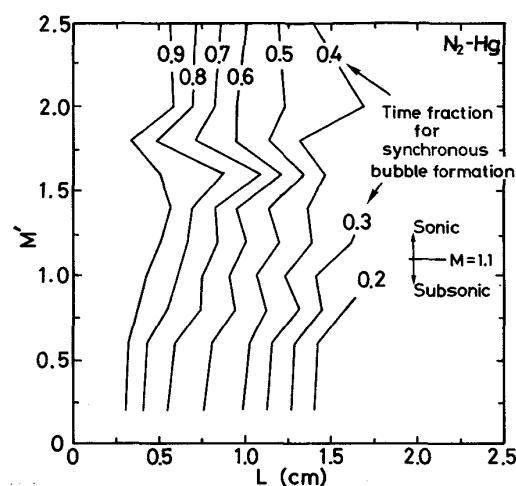


Fig. 6. The ratio of time of synchronous bubble formation to bubbling time represented in M' - L diagram.

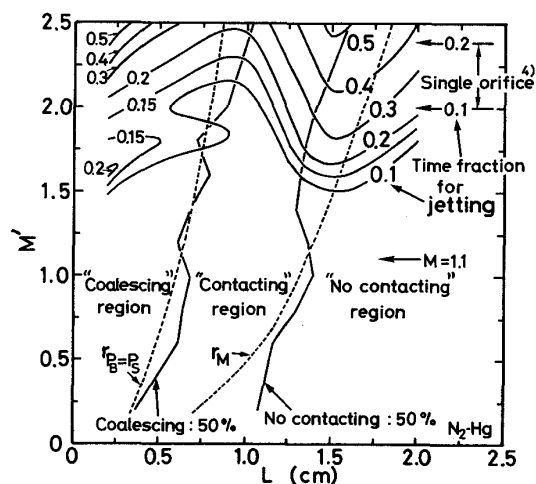


Fig. 7. Time fraction for jetting represented in M' - L diagram.

M' - L の関係を Fig. 6 に示した。図から、2つのオリフィスからの気泡の生成開始時期の同時性はオリフィス間隔が広がるほど低下することがわかる。

Fig. 6 と Fig. 4, 5 の比較から、2孔オリフィスからの2つの気泡の合体挙動と気泡の生成時期の同時性は相互に関連のあることがわかる。すなわち、気泡が同時に発生しやすいオリフィス間隔の狭い場合においては"Coalescing"の時間割合が大きくなっている (Fig. 4, 6)。また、気泡の同時生成が起こりにくいオリフィス間隔の広い場合では"No contacting"の時間割合が大きい。(Fig. 5, 6)。これは、"Coalescing"が起こる場合には、気泡の離脱時期が2つのオリフィスで一致し、合体気泡の離脱に続く次の気泡の生成は同時に起こりやすくなることによる。"No contacting"の場合には気泡

の離脱時期が一致し難く、次の気泡の生成も同時に起こり難いことになる。

3.2.4 ジェットティングの特性

Fig. 3(c) からジェットティングには M' のほか、 L が関係してくることがわかる。この関係をより明確にするために、Fig. 7 においてジェットティングの時間割合を M' と L を変数とするグラフ上に等高線として示した。図の右側上方には単孔オリフィスにおいて得られたジェットティングの時間割合と M' の関係⁴⁾ を矢印で示した。Fig. 7 には、Fig. 4 で “Coalescing” の時間割合が 50% 以上となる領域を “Coalescing” 領域として示し、また、Fig. 5 で “No contacting” の時間割合が 50% 以上となる領域を “No contacting” 領域として示し、さらにこれら2つの間の “Contacting” の多い領域を “Contacting” 領域として示した。なお、図中の2本の点線は3.3節で述べるモデル計算による “Coalescing” と “Contacting” 領域の境界および “Contacting” と “No contacting” 領域の境界である。

Fig. 7 において、“Coalescing” 領域ではジェットティングは L が小さいほど起こりやすくなっている。また、ジェットティングは “Contacting” 領域では L が大きいほど、“No contacting” 領域では L が小さいほど起こりやすくなる傾向が表れている。また、単孔の場合に比べて2孔オリフィスの場合はジェットティングは L が 0.5 cm 以下のオリフィス間隔の狭い領域および L が 1.5 cm 程度の領域においてかなり起こりやすくなっている。

“Coalescing” 領域で L が小さいほどジェットティングが起こりやすくなるのは、オリフィス出口近傍の2つの超音速流れ¹²⁾ の間の相互作用が L が小さくなるほど強力になり、ガスジェットが安定化するためであると考えられる。また、 $L=1.5$ cm 程度においてジェットティングの時間割合が大きくなるのは、オリフィス出口近傍よりさらに上方における2つのガスジェットの間の相互作用によると考えられるが、この点については3.4節において、He-水系の実験結果と比較し検討を行う。

3.3 気泡の合体・接触の条件についてのモデル計算

気泡内のガス静圧は気泡界面に均一に働くが、吹込みガスの運動量による力は吹込み方向に働く。また、気液界面に液側から働く静水圧は気泡上部において気泡下部より低くなる。さらに、2孔オリフィスからの気泡生成について検討すると、2つの気泡が同時に成長を開始する場合、気泡が相互に押し合う状態となり、2つの気泡の間にはさまれた液体の圧力は高まる。以上のような気泡に働く力の不均一性から、気泡内圧が低い場合には、

気泡は Photo. 1(b), (c) に示されているように、隣接する気泡を避けるように膨張することになり、“Coalescing” が起こり難くなる。一方、気泡内圧が十分に高ければ、気泡は均一に膨張し、他方のオリフィスにおいて成長中の気泡と合体しやすくなる。

以上のように気泡内圧は気泡の合体・接触と密接な関係があるといえる。そこで、気泡内圧を以下のように計算した。球形気泡の半径が時間的に変化する場合、気泡の表面の圧力を P_R 、気泡から十分に離れた位置での液体の圧力を P_∞ とすれば、一般に次式が得られる¹⁰⁾。

$$(P_R - P_\infty)/\rho_l = \dot{m}/R - m^2/2R^4 \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $m = R^2\dot{R}$, $\dot{m} = dm/dt$, $\dot{R} = dR/dt$, ρ_l : 液体の密度。

P_R が気泡内圧 P_B に、 P_∞ が静水圧 P_s に等しいと考えれば、次の気泡界面の運動方程式が得られる。

$$(P_B - P_s)/P_s = (\rho_l/P_s) \cdot \left(R \cdot \left(\frac{d^2R}{dt^2} \right) + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 \right) \dots\dots\dots (2)$$

ガスはオリフィスを通り気泡内へ流れ込むが、そのオリフィス (直径 d_o) 内の流れにおいて、ガス圧力 P_o のオリフィス出口からさらに上流の圧力 P_u の位置 (距離 L_u) までの摩擦係数の平均値を $\bar{\lambda}$ とし、ガスが等温的に流れると見なすと、次式が得られる¹¹⁾。

$$\bar{\lambda}(L_u/d_o) = \{1 - (P_o/P_u)^2\} / \kappa M_u^2 + 2\ln(P_o/P_u) \dots\dots\dots (3)$$

また、

$$\kappa M_u^2 = q_u^2 / (P_u/\rho_u) \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 κ は比熱比、 M_u , q_u , ρ_u はそれぞれ圧力が P_u の位置における真のマッハ数、ガス線流速、ガス密度である。(3), (4)式から、オリフィス出口における真のガス線流速 q_o は、

$$q_o^2 = \frac{1 - (P_o/P_u)^2}{\bar{\lambda} \cdot (L_u/d_o) - 2\ln(P_o/P_u)} \cdot \frac{P_u}{\rho_u} \dots\dots\dots (5)$$

オリフィス出口位置の静水圧における体積ガス流量を Q 、オリフィスの断面積を A_o 、等温モデルから $P_u/\rho_u = P_s/\rho_s$ (ρ_s : 静水圧下のガス密度) とすると、

$$Q = \frac{A_o P_u}{P_s} \cdot \sqrt{\left\{ \frac{P_s}{\rho_s} \cdot \frac{1 - (P_o/P_u)^2}{\bar{\lambda} (L_u/d_o) - 2\ln(P_o/P_u)} \right\}} \dots\dots (6)$$

オリフィス出口の圧力 P_o と出口位置の静水圧 P_s との関係は亜音速領域 ($M' < \sqrt{(x+1)/2}$) においては⁴⁾、

$$P_o = P_s \dots\dots\dots (7)$$

であるが、音速領域 ($M' > \sqrt{(x+1)/2}$) においては⁴⁾、

$$P_o/P_s = \sqrt{2/(x+1)} \cdot M' \dots\dots\dots (8)$$

また、 M' は次式で表すことができる。

¹²⁾ 文献6) の Fig. 8 のスケッチ参照

$$M' = Q/aA_o \dots\dots\dots (9)$$

ここで, a は室温における吹込みガス中の音速である. 生成気泡の上昇の運動方程式は次式で示される⁴⁾.

$$\rho_l V_B g + M_g = \frac{d}{dt} \left(\frac{11}{16} \rho_l V_B \frac{ds}{dt} \right) \dots\dots\dots (10)$$

ここで, s は気泡上昇距離, V_B は気泡体積, g は重力加速度を表している. M_g はガス運動量による力で次式で与えられる⁴⁾.

亜音速領域 ($M' < \sqrt{(\kappa+1)/2}$)

$$M_g = \frac{\kappa}{\kappa-1} (\sqrt{1+2(\kappa-1)M'^2} - 1) A_o P_s \dots\dots\dots (11)$$

音速領域 ($M' > \sqrt{(\kappa+1)/2}$)

$$M_g = (\sqrt{2(\kappa+1)} M' - 1) A_o P_s \dots\dots\dots (12)$$

また, 気泡が Fig. 8 右上に示すような形状であると仮定すると気泡体積 V_B は次式で表される.

$$V_B = \pi(2R^3 + 3R^2s - s^3)/3 \dots\dots\dots (13)$$

オリフィス出口位置の静水圧について補正した気泡体積を V_s とすれば,

$$P_B V_B = P_s V_s \dots\dots\dots (14)$$

$$Q = dV_s/dt \dots\dots\dots (15)$$

(14) 式の両辺を時間 t で微分すると,

$$\frac{P_B}{P_s} \frac{dV_B}{dt} + \frac{d(P_B/P_s)}{dt} \cdot V_B = Q \dots\dots\dots (16)$$

r を気泡底面半径とすれば,

$$r = \sqrt{R^2 - s^2} \dots\dots\dots (17)$$

初期条件として, $t=0$ において $R=d_o/2$, $dR/dt=0$, $P_B=P_s$, $Q=Q_i$ (Q_i : 設定した吹込み流量) を用い, (2), (6) ~ (13), (16), (17) 式を連立させ, Runge-Kutta-Fehlberg 4 次法により数値計算し, P_B , Q , r の経時変化を求めた. なお, 簡単化のため, P_u はオリフィス出口位置から十分に離れた位置における圧力であり, 初期条件により決まる値のまま一定であると仮定した.

Fig. 8 に気泡内圧 P_B , ガス流量 Q および気泡底面半径 r の経時変化の計算例を示した^{†3)}. 図において, P_B は生成開始直後に瞬間的に上昇し, ガス流量 Q は急激に減少している. P_B は極大値に達した後, 気泡の膨張にともない低下し, 静水圧より低くなり, 極小値に達した後, 再び上昇, 下降を繰り返す, 減衰振動している.

本節 3.3 のはじめにおいて気泡内圧が高い場合には “Coalescing” が起こりやすいと考えたが, その気泡内圧の高い状態は Fig. 8 では気泡生成開始時から A 点ま

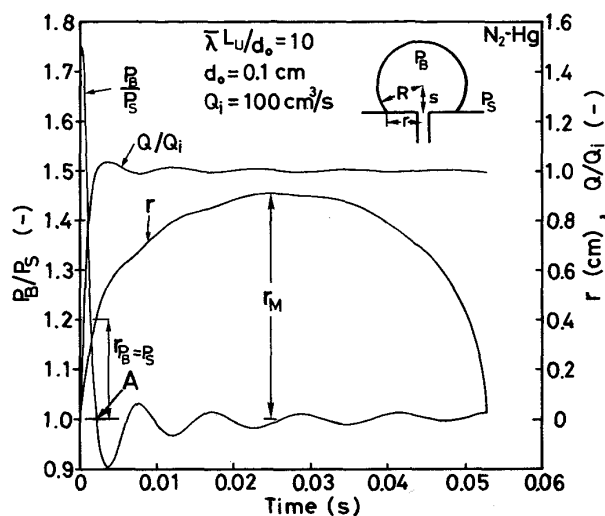


Fig. 8. Predicted pressure, bubble base radius and gas flow rate fluctuations.

での範囲において見られる. そこで, A 点における気泡底面半径を $r_{P_B=P_s}$ とすれば, $L < r_{P_B=P_s}$ の領域においては, 2 孔オリフィスからの気泡の生成開始時期が一致しなくとも, 気泡内圧が高い状態で他方のオリフィス出口位置まで気泡底面外周が達することができ, 合体が起こりやすいといえる. また, 合体が起こると 2 つのオリフィスにおける気泡の離脱時期が一致し, 続く気泡生成は同時に起こりやすくなる. したがって $L < r_{P_B=P_s}$ の領域においては “Coalescing” が起こりやすく, また, 気泡の生成開始の同時性が高いと考えられる.

Fig. 8 に示すように気泡底面半径 r の極大値を r_M とすると, オリフィス間隔 L が r_M 以下の場合には 2 つのオリフィスからの気泡の生成が独立に起こった場合であつても “Contacting” が起こりやすい. しかし L が r_M 以上の場合には “Contacting” が起こり難くなる. したがって $r_{P_B=P_s} < L < r_M$ は “Coalescing” は起こり難いが, “Contacting” は起こりやすい領域であるといえる.

以上の検討から, $L < r_{P_B=P_s}$, $r_{P_B=P_s} < L < r_M$, $r_M < L$ の各領域は, 実験結果から求めた “Coalescing”, “Contacting”, “No contacting” の各領域に対応することがわかる. そこで, “Coalescing”, と “Contacting” 領域の境界に対応する $L=r_{P_B=P_s}$ および “Contacting” と “No contacting” 領域の境界に対応する $L=r_M$ の計算結果を Fig. 7 に 2 つの点線で示した. 図において, 計算結果は実験結果とかなり一致している. この一致から, 本節において推定した気泡の合体・接触についての機構が実際にもかなり当てはまることがわかった.

^{†3} Fig. 8 は $\bar{\lambda} L_u/d_o=10$ とした計算例であるが, $\bar{\lambda} L_u/d_o$ が変化すれば, P_B , Q , r の経時変化はまた異なった計算結果になる. ただし, 後述する “Coalescing” と “Contacting” 領域の境界および “Contacting” と “No contacting” 領域の境界についての計算結果は $\bar{\lambda} L_u/d_o$ の値にはほとんど依存しない.

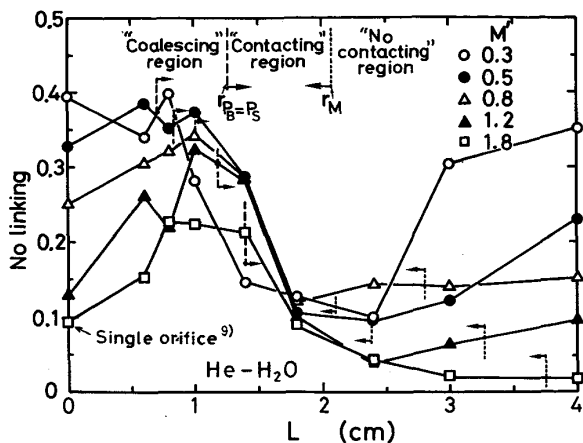


Fig. 9. Time fraction for "No linking" plotted against distance between two orifices.

3.4 He-水系

N_2 -水銀系では装置底部からガスジェットの相互作用挙動を観察したが、その上方の浴内部のジェットの挙動は不明である。そこで、水銀浴内部のガスジェットの挙動を推定するため He-水系実験を行い、ガスジェットを側面から観察し、オリフィス出口近傍の気泡の合体・接触挙動とより上部のガスジェットの挙動の関係を調べた。

Fig. 9 に He-水系において求めた "No linking" の時間割合とオリフィス間隔 L の関係を示した。ここで、"No linking" の時間割合は一方のオリフィスに注目し、その出口で気泡が離脱した時点からつぎの気泡が上昇しつつある離脱気泡に合体連結されるまでの時間を "No linking" の時間として求めた^{†4}。図中の破線と点線は 3.3 節の計算を He-水系について行つた結果で、おのの "Coalescing" と "Contacting" の領域の境界および "Contacting" と "No contacting" の領域の境界を示す。図には単孔オリフィス ($L=0$) から水浴中へ He ガスを吹き込んだ場合の結果⁹⁾ もプロットした。

Fig. 9 において、 $L=0 \sim r_{PB}=P_s$ の "Coalescing" 領域では、"No linking" の時間割合はオリフィス間隔が狭くなるほど小さくなり、単孔の結果に近づく傾向がある。これは、オリフィス間隔が狭くなるほど、2つのオリフィスからの気泡は合体しやすく、その場合、2孔からのガスジェットが1つのガスジェットとして挙動し、気泡先端部におけるガスジェットの動圧が増加し、気泡が連結しやすいことによる。

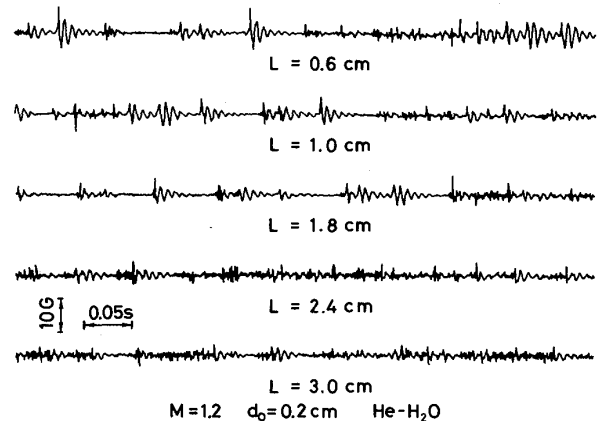


Fig. 10. Bubble knocking measured by accelerometer.

図中、 $L=r_{PB}=P_s \sim r_M$ の "Contacting" 領域では、"No linking" の時間割合はオリフィス間隔が広いほど著しく減少している。これは、 N_2 -水銀系実験について Fig. 6 に関連して述べたように、この領域においては気泡が交互に発生し、全体として気泡間隔が狭くなり、その結果、気泡の合体連結が起こりやすくなるためである。

前述したように N_2 -水銀系の実験より "Contacting" 領域においてジェッティングの時間割合がオリフィス間隔の広がるほど増加し、単孔に比べてかなりジェッティングが起こりやすくなる (Fig. 7)。この現象は "Contacting" 領域では気泡の合体連結が起こりやすくなるという本節の観察結果と関係づけて次のように説明される。すなわち、前報⁶⁾ において述べたようにジェッティングは一般に浴内の不規則な流れによつておこる液の動圧の変動により不安定になるが、2孔オリフィスの場合、"Contacting" 領域においてはオリフィス出口上方での気泡の合体連結が起こり、そのため浴内の液の動圧の変動が小さくなりジェッティングが安定になりやすい。

Fig. 10 に He-水系実験において得られた加速度計による浴槽底板の振動の測定例を示した。図において、オリフィス間隔の狭い $L=0.6, 1.0$ cm の場合には頻度は小さいが大きな衝撃が観察されている。しかし、オリフィス間隔が広くなると、小さな衝撃が多数観察されるようになる。これは、Fig. 9 と比較すると、Fig. 10 の $L=0.6, 1.0$ cm の結果は "Coalescing" 領域にあり、 $L=1.8, 2.4, 3.0$ cm の結果は "Contacting" 領域にあることによる。すなわち、"Coalescing" 領域においては合体により大気泡が生成し、衝撃強度も大きくなるが、"Contacting" 領域においては、気泡が交互に生成し、上部離脱気泡と連続的に合体連結されるため、オリフィ

^{†4} 一方のオリフィスで成長中の気泡は上部の離脱気泡と合体連結され、他方のオリフィスからの気泡はその離脱気泡と合体していないという状態がかなり観察されたため、一方のオリフィスに注目して "No linking" の時間割合を求めた。

ス出口の気泡が十分成長する前にその上部気泡に吸収され、大気泡の生成は抑制される。このため、小さな衝撃が多数観察されることになる。

4. 結 言

N_2 -水銀系および He-水系において 2 孔オリフィスからのガス吹込み実験を行い、以下の結果を得た。

(1) 2 孔オリフィスからの 2 つの成長中の気泡の相互作用挙動はつぎのように分類できた。“Coalescing”：2 つの気泡が合体し 1 つになる。“Contacting”：2 つの気泡が接触はするが合体しない。“No contacting”：接触もしない。

(2) オリフィス間隔が狭い場合、“Coalescing”が起こりやすく、オリフィス間隔が広がるほど、“No contacting”が起こりやすくなる。“Contacting”は他の 2 つの挙動の中間的な現象であり、その時間割合はあるオリフィス間隔において極大となる。これら各現象の起こりやすい条件をみかけのマッハ数とオリフィス間隔の関係図で“Coalescing”、“No contacting”および“Contacting”領域の 3 つの領域に分けて示した。

(3) “Coalescing”領域では 2 つのオリフィスからの気泡は同時に発生し、“No contacting”領域では気泡は交互に発生する傾向がある。その中間の“Contacting”領域ではオリフィス間隔が広がるほど気泡の交互発生の起こる頻度が高くなる。

(4) “Contacting”領域と“No contacting”領域の境界付近の吹込み条件の場合には離脱気泡と生成中の気泡との合体連結が起こりやすく、また、ジェッティング

の時間割合が大きい。

(5) 浴槽底部に設置した加速度計を用いた測定において、“Coalescing”領域では大きな衝撃が観察され、“Contacting”領域では小さな衝撃が観察された。

(6) 気泡内の圧力変化の計算から“Coalescing”と“Contacting”領域の境界および“Contacting”と“No contacting”領域の境界の吹込み条件を理論的に求めた。この計算結果は実験結果とかなりよく一致した。

本研究の一部は、第 23 回東レ研究助成金および昭和 60 年度文部省科学研究費補助金奨励研究 (A) によつたことを付記して謝意を表します。

なお、本研究における実験結果の整理の計算に名古屋大学大型計算機センターを利用した。

文 献

- 1) A. E. WRAITH and M. E. CHALKLEY: *Advances in Extractive Metallurgy*, ed. by M. J. JONES (1977), p. 27 [IMM London]
- 2) E. O. HOEFLE and J. K. BRIMACOMBE: *Metall. Trans. B*, **10** (1979), p. 631
- 3) K. MORI, Y. OZAWA and M. SANO: *Metall. Trans. B*, **10** (1979), p. 679
- 4) 小沢泰久, 森 一美, 佐野正道: 鉄と鋼, **67** (1981), p. 2655
- 5) 小沢泰久, 森 一美: 鉄と鋼, **68** (1982), p. 90
- 6) 小沢泰久, 森 一美: 鉄と鋼, **68** (1982), p. 98
- 7) M. J. McNALLAN and T. B. KING: *Metall. Trans. B*, **13** (1982), p. 165
- 8) L. FARIAS and D. G. C. ROBERTSON: *Injection Phenomena in Extraction and Refining*, compiled by A. E. WRAITH (1982), E1~25
- 9) 小沢泰久, 森 一美: 鉄と鋼, **72** (1986), p. 426
- 10) 今井 功: 流体力学 (前編) (1975), p. 97 [裳華房]
- 11) 原田幸夫: 流体力学・水力学演習 (1977), p. 360 [横書店]