

論 文

薄い液体金属浴における浸漬ガスジェットを観察

小 沢 泰 久*・森 一 美*²

Observation of Gas Jets Injected into a Thin Sheet of Liquid Metal

Yasuhisa OZAWA and Kazumi MORI

Synopsis :

A study has been made of the behavior of gas jet injected into a thin sheet of mercury (i.e., a "two-dimensional" environment). The vessel was made of acrylate resins. The sheet of mercury was 0.5 cm in thickness. Nitrogen gas (580~3 200 cm³/s) was injected into the mercury bath through an orifice of 0.2 cm in diameter. The gas jet behavior was observed by using a high speed camera.

It is observed that, when jetting occurs, many tiny droplets are formed in the gas jet at the orifice exit. The present result for bubbling-jetting transition agrees well with the previous data obtained by three-dimensional bath. It is shown that the jetting behavior is determined exclusively by the gas-flow velocity. The injected gas does not form a continuous gas channel even in the sonic velocity region. The injected jet breaks up at some distance from the orifice exit, leaving a gas jet residual. The minimum length of the gas jet residual is fixed for each gas-flow velocity. Thus, it has been found that the gas phase forms a small continuous jet extending from the orifice exit to the top of the jet residual.

1. 緒 言

AOD や Q-BOP のようなガス吹き込み精錬では吹き込みガスの線速度は非常に速く、音速領域に達している。このような音速領域において液体中へ吹き込んだガスジェットの挙動に関しては、従来基礎研究はほとんど行われておらず未解明のまま残されている。

著者らは前報¹⁾において、透明底板をもつ3次元水銀浴を用い底吹きガスジェットの挙動を観察し、オリフィス出口のガス線流速が音速領域に達すると、生成気泡底面径とオリフィス径が一致する現象、すなわちジェットティングが生ずることを明らかにした。しかし、この研究ではジェットティングの挙動の詳細を解明するまでには至らなかった。本研究では新しく薄い水銀浴を用い、底部オリフィスからガス吹き込みを行い、側面からの高速度カメラ撮影によりジェットの挙動を2次元的に観察した[†]。

2. 実 験

2.1 実験装置

Fig. 1 は用いた実験装置である。水銀浴容器は透明ア

クリル製で上下2つの部分からなり、下部は2次元容器部で内寸 30×80×0.5 cm であり、その上部に内寸 30×20×3 cm の空間を作り、断面積を6倍に増加させてスプラッシュが装置外部へ出ることを防止した。容器底部中心には直径 0.2 cm のオリフィスを設けた。水銀浴槽の後背部に外側から赤色の紙を張り付けガスジェットがより明確に観察できるようにした。送気系は前報¹⁾とほぼ同じであり、出口側ガス流量を測定した。

本2次元装置は浴の厚さが 0.5 cm と薄いが、オリフィス出口近くではジェットティング時のジェットの直径は浴の厚さより小さいと推定されるため、浴厚さの薄いことはオリフィス近傍のジェットティングの挙動に対してはあまり影響をおよぼさないと考えられる。一方、2次元浴においては、ジェットと浴の境界面が明確になり、ジェットの内部の観察がしやすく、本研究の目的に適している。

照明には水銀浴前面に斜に光があたるように設置した2燈の 500 W ランプを用いた。この照明により水銀浴は黒く、ジェットと浴の境界面は白、さらにジェット内部は赤く見えガスジェットが明確に観察された。

2.2 実験方法

水銀を2次元容器部に 20 cm の深さになるまで入れ、窒素ガスを吹き込み、容器正面より高速度カメラによる

† 本研究で用いた実験容器は厳密な意味での2次元ではないが前報¹⁾の3次元の容器を用いた実験との対比の便宜上、2次元浴あるいは2次元容器などの用語を用いた。

昭和 54 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 55 年 11 月 6 日受付 (Received Nov. 6, 1980)

* 名古屋大学大学院 (Graduate School, Nagoya University)

*² 名古屋大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Nagoya University, Furo-cho Chikusa-ku Nagoya 464)

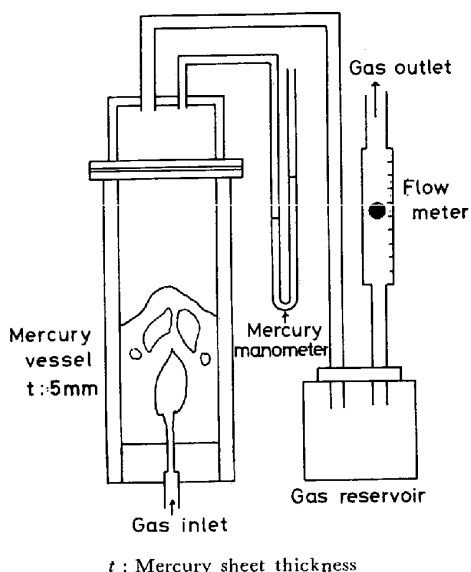


Fig. 1. Schematic drawing of experimental apparatus.

撮影を行った。体積ガス流量は $580 \sim 3300 \text{ cm}^3/\text{s}^{1/2}$ の範囲で変化させた。フィルム送り速度は約 1200 frames/s であり、撮影時間は約 4 s であつた。

高速度撮影ではフィルムの解像力が低くガスジェットの細部が不鮮明であつたため、35ミリフィルムを用いた写真撮影もあわせて行った。

3. 実験結果および考察

3.1 ジェットと液滴発生

浸漬ガスジェットを35ミリカメラで撮影した例をPhoto. 1に示した。 M' は前報と同様にガス流量をオリ

^{†1} ガス流量はすべてオリフィス出口位置における静水圧、室温の条件で表した。

フィス断面積と音速で割つたみかけのマッハ数である。写真で最下端がオリフィス出口位置である。Photo. 1(a)においては、容器底部のオリフィス出口面におけるガスジェットの幅がオリフィス径より大きくなつており、これは前報¹⁾におけるバブリングに対応する。一方、Photo. 1(b)ではオリフィス出口位置が水銀でおおわれており、これはジェットが起つているためと推定される。

ジェット状態を示すPhoto. 1(b)においてオリフィス出口からの細い白い筋が多数示されているが、これはオリフィス出口付近で発生した多数の微小液滴が高速で移動している状態を示している。バブリングを示すPhoto. 1(a)においては、このような白い筋は示されておらず(b)とは明らかに異なつている。これから、バブリングにおいてはオリフィス出口付近に液滴発生はないと考えることができる。

Photo. 2は亜音速、音速それぞれの領域のガスジェットの形状がかなり類似している場合の例を示している。写真より、(b)の音速領域では液滴発生が明確に観察されるが、(a)の亜音速領域では液滴発生が観察されない。以上のことからオリフィス出口の液滴発生はジェットにおける特有な現象であることがわかる。

Photo. 3は音速領域におけるジェットの瞬間の撮影例である。この場合の液滴発生はPhoto. 1, 2とは異なる様相を示している。Photo. 1, 2ではオリフィス出口付近でガスジェットが周囲の液をかきとるようにして液滴が生成しているのに対し、Photo. 3ではオリフィスにおいて発生し成長し始めたガスジェットがそ



$V_g = 830 \text{ cm}^3/\text{s}$ $M' = 0.76$



$V_g = 2020 \text{ cm}^3/\text{s}$ $M' = 1.84$

Photo. 1. Photographs of jet injected into two-dimensional mercury bath (I). $\times 0.4$

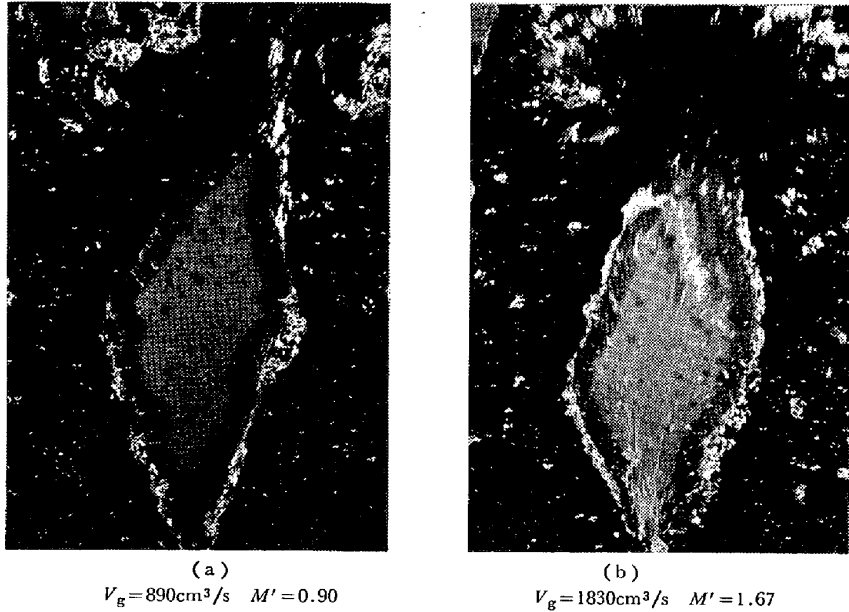


Photo. 2. Photographs of gas jet injected into two-dimensional mercury bath (II). $\times 0.28$

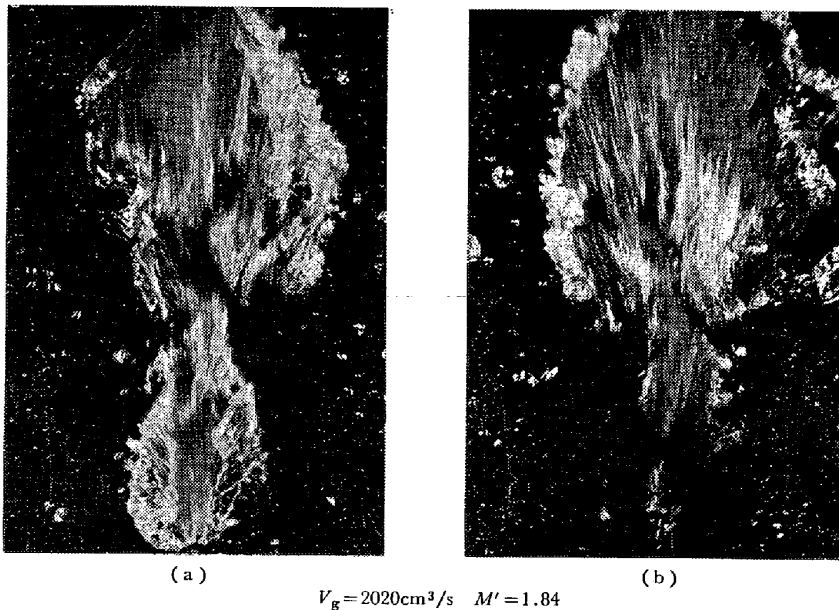


Photo. 3. Photographs of gas jet injected into two-dimensional mercury bath (III). $\times 0.4$

の前に離脱し上昇を始めた気泡と合体するとき、両者の気泡の間の液が吹き飛ばされることにより液滴が発生している^{†3}。このような気泡の合体にもなる液滴発生は亜音速領域においても起こることが高速度撮影の結果明らかになった。しかし、亜音速領域においては気泡合体の起こる頻度は低く、発生する液滴量が音速領域に比べかなり少なかった。このような亜音速領域における液滴発生を除いては液滴発生は主として音速領域において起こる現象であり、発生原因は音速領域におけるガスジェットの特異性によると考えられるが、詳細は後述する。

^{†3} 上記の大気泡と下部小気泡の合体部付近から上部に示されている多数の白い筋からわかる。

3.2 バブリングとジェッティング

前報¹⁾の3次元モデル実験では容器底部の観察から、測定中において気泡あるいはガスジェットの底面径がオリフィス径と等しくなる時間の全測定時間に対する割合をジェッティングの占める時間割合であると定義した。本2次元モデルではオリフィス径 0.2 cm に対し、水銀浴厚さは 0.5 cm であり正面からの観察ではオリフィス出口におけるガスジェットが水銀でかくれ、底面径を求めることができない。そこで、正面から観察できるガスジェットの最下端部が、オリフィス出口位置より離れて上にある状態をジェッティングであるとし、オリフィス出口位置からガスジェットが観察できる場合をバブリン

グとした。この分類では、浴の厚さが 0.5 cm であるため、底面径が 0.5 cm 以下のガスジェットをジェットイングであると区別することになる。しかし、前報¹⁾で、オリフィス径 0.2 cm における底面径の分布関数では気泡の底面径が 0.5 cm 以下であるようなバブリングの占める時間の割合は各ガス流量において非常に小さかった。したがって、本研究におけるバブリングとジェットイングの定義は前報の定義にはほぼ一致するものであると考えられる。

以上の定義にしたがってオリフィス出口位置においてジェットの存在が観察できない場合の時間割合を求め、ジェットイングの時間割合とした。Fig. 2 にバブリング、ジェットイングそれぞれの占める時間割合とみかけのマッハ数 M' との関係を示した。図中黒丸は本研究における結果で、白丸は前報¹⁾の 3 次元浴における結果である。また点線は断熱膨張にもとづいた計算で得られた音速に相当するところで、ガス吹き込みでは実際にはここで音速になると考えることができる¹⁾。

Fig. 2 において、ガス線流速が低いところではバブリングのみであり、ある臨界線流速からジェットイングが生じ始めている。このジェットイングの生じ始める臨界ガス線流速が図でわかるように 2 次元浴、3 次元浴で一致している。この一致からみて、2 次元浴においてもバブリングからジェットイングへの遷移が前報¹⁾の 3 次元浴のときと同じ音速領域において生ずることがわかる。これから、逆に 2 次元浴において観察できるジェットイングの挙動と同じような現象が 3 次元浴においても生ずると推定できる。

3.3 中間領域 (セミジェットイング)

Fig. 2 に示したバブリングとジェットイングの分類は底面におけるガスジェットの広がり注目したものである。本実験ではさらに、オリフィス出口で広がりをも

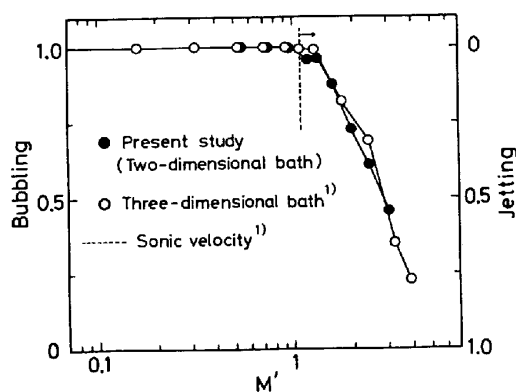


Fig. 2. Comparison of bubbling-jetting time fractions between two-dimensional and three-dimensional models.

つ点ではバブリングであるが、液滴発生および 3.5 で述べるガスジェットの連続性の点では、ジェットイングに近い挙動も観察された。この挙動はバブリングとジェットイングの中間領域で起こると考えられるため、セミジェットイング (semi-jetting) と呼ぶことにする。測定時間に占めるこのようなセミジェットイングの起こる時間の割合とみかけのマッハ数 M' との関係を Fig. 3 に示した。点線以上の M' は実際の音速領域に当る。

Fig. 3 でわかるように、セミジェットイングは主として音速領域において起こる現象である。しかし、セミジェットイングはジェットイングに比べより低いガス流量域において生じ始め、流速が増加するにつれてその割合が増加してジェットイングが始まる流速付近において、極大を示し、その後ジェットイングが急増するとともに減少している。このようなセミジェットイングのガス線流速に対する依存性からみて、セミジェットイングはジェットイングの先駆現象であるといえる。なお、Fig. 3 の音速領域でセミジェットイングの時間割合に極小が生ずる理由は明確ではない。

3.4 バブリングの特性

セミジェットイングを除いたバブリングについて高速撮影したフィルムを詳細に解析した結果、気泡の生成挙動は Fig. 4 に示したように 3 種類に分類できること

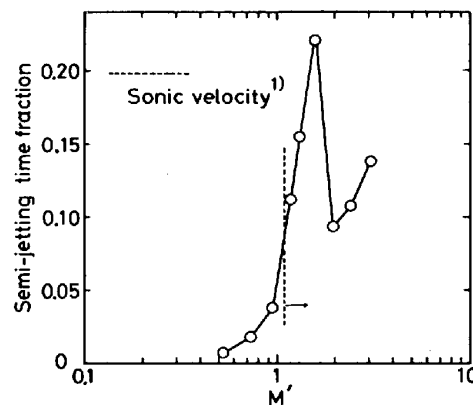


Fig. 3. Time fraction for semi-jetting plotted against nominal Mach number at the orifice exit.

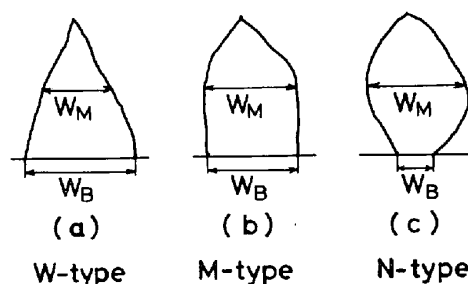


Fig. 4. Classification of bubbling.

がわかつた。図は気泡の底面幅が極大になつた時点での気泡形状を表している。(a)が底面幅が大きい気泡,(c)が小さい気泡である。この区別は、気泡底面幅 W_B と気泡中央部の幅 W_M とを比較して行つた。

$W_B > W_M$ のとき (a), $W_M \geq W_B > 1/2W_M$ のとき (b) および $W_B \leq 1/2W_M$ のとき (c) に分類した。(a)をWタイプ (wide), (b)をMタイプ (middle), (c)をNタイプ (narrow) と呼ぶことにする。

W, M, N それぞれのタイプのバブリングがセミジェットングを除いたバブリングの生成時間に占める時間割合を Fig. 5 に示した。黒丸がW, 白丸がNタイプのバブリングの占める時間割合を表し、1からW, Nタイプの占める合計の時間割合を引いた残りがMタイプのバブリングの占める時間割合である。図より明らかなように、全体の傾向としては M' の増加とともにNタイプのバブリングが増加し、Wタイプのバブリングは減少する。ただし、ジェットングの生じ始める臨界点近傍では、Wタイプのバブリングが増加し、したがつてMタイプのバブリングが減少している。

以上のようにガス線流速の増加とともに全般的にみられるWタイプの減少は、ガス線流速が増加するほどオリフィス出口付近の液体の流動速度が増加することによると考えられる。一方、臨界点近傍の特異な現象はセミジェットングの生成にともない何らかの働きで、液の流動が減ることによるとも考えられるが、詳細は明らかでない。

なお、本2次元モデルにおけるバブリングは浴が薄いことの影響をかなり受けていると考えられる。したがつて以上の結果を直接3次元に適用することはできない。

3.5 ガスジェットの連続性

3.5.1 ガスジェットの切断

液中浸漬ガスジェットについては、一般にガス流量の高いところではジェットはガス連続相、すなわち気柱になると考えられている。たとえば、TURKDOGAN²⁾ は高

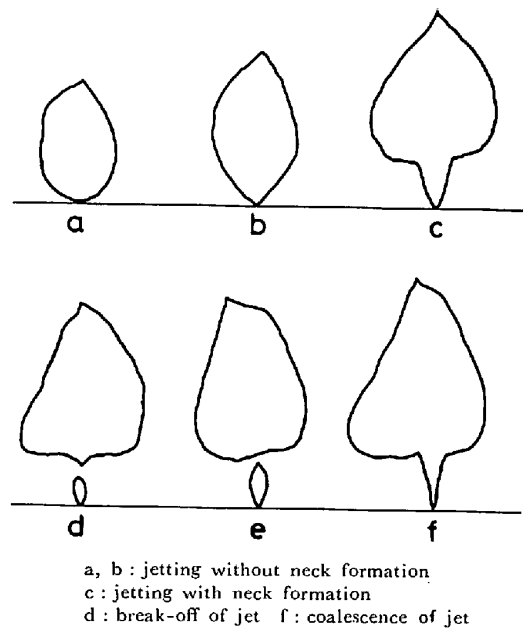


Fig. 6. Change of jet form with time in jetting flow regime.

ガス流量域における浸漬ガスジェットにおいて、出口にガス連続相、それに続いて液連続相ができると考えた。しかし、従来ガス連続相の詳細な構造については明らかにされていなかった。

Fig. 6 に本研究で見いだしたジェットングにおけるジェットの形状の時間変化を模式的に示した。aはジェットング生成の最初の段階である。cにおいては首ができる。この首ができる現象をネックング (necking) と呼ぶことにする。dにおいてはガスジェットの一部分が残留して首が切れている。この残つたガスジェットを残留ガスジェットと呼ぶことにする。この残留ガスジェットは成長し、fのような合体をおこす。この合体泡が再びdのように切れ、さらに合体するという切断、合体のくり返しが数度におよぶ場合もあつた。ガスジェットは最終的には残留ガスジェットを残し、気泡として離脱していく。この直前のガスジェットの全長は3~20cmの範囲にあり、ガス流量の変化の影響をほとんど受けなかつた。

以上述べたように、ガスジェットには一時的に切れ合体する場合と完全に切れ気泡が離脱してしまう場合の2通りの切断がある。前者を不完全切断、後者を完全切断と呼ぶことにする。

Fig. 7 に不完全切断、完全切断それぞれの起こる頻度とみかけのマッハ数 M' との関係を示した。ガス線流速が増加するとともに完全切断の起こる頻度は徐々に増加し、不完全切断は音速を超えると増加が急激になる。なお、セミジェットングにおいてもジェットングと類

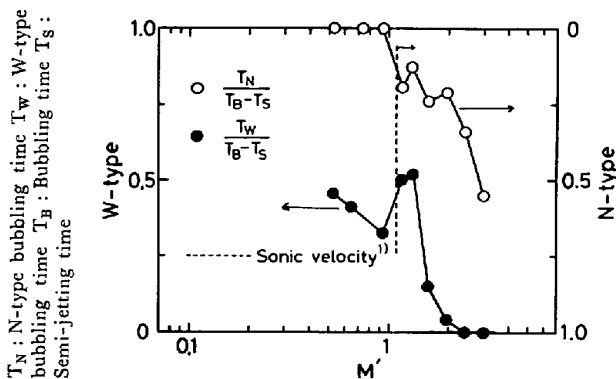


Fig. 5. Time fractions of two types of bubbling plotted against nominal Mach number.

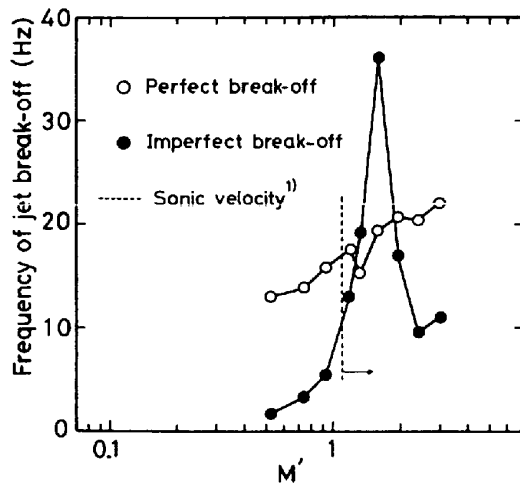


Fig. 7. Frequency of jet break-off plotted against nominal Mach number.

似のガスジェットの切断挙動が観察されたが、Fig. 7 と Fig. 3 とを比較すると、セミジェットングの時間割合が最大になる M' と不完全切断の起こる頻度が最大になる M' とが一致している。このことから、セミジェットングは主として不完全切断により生ずる現象であることがわかる。

ガス線流速の増加による完全切断の頻度の増加は1つにはオリフィス出口で多量に発生する微小液滴がガス流れを妨げるようになるため、また1つにはガスジェットの運動量増加により浴流動が強くなり、ガスジェットが引きちぎられることによると考えられる。

前報¹⁾において、ジェットングでは吹き込まれたガスが連続した気柱として液中へはいるとしたが、以上の観察から、瞬間的にみれば、上述のようなガスジェットの切断が前報¹⁾の3次元水銀浴においても起こっていたと推定される。しかし、3次元浴におけるガスジェットの切断現象の詳細についてはなお今後の検討が必要である。

3.5.2 ネッキングと残留ガスジェット

Fig. 6 において a から b の間は首が生じないためノンネッキング (Non-necking), c から f までは首が切れている間もあるが首が生成している状態と考え、ネッキングの生成区間とし、ノンネッキング、ネッキングそれぞれの生成時間を高速度撮影のフィルム解析により求めた。Fig. 8 はその結果である。図中○がジェットングの生成時間に占めるノンネッキング、ネッキングの時間割合、●がセミジェットングの生成時間にそれぞれの占める時間割合、△が測定時間全体において占める割合を表している。

Fig. 8 より明らかなようにジェットングの約 50%

がネッキング現象をともなっている。一方、ガス線流速の増加とともにジェットングの時間割合が増加するため、ネッキングの全体に占める時間割合はガス線流速の増加とともに増加する。セミジェットングについては、ジェットングが生じ始める臨界ガス線流速以下ではつねにネッキングをともなうが、臨界ガス線流速以上ではマッハ数の増加とともに、ネッキングの時間割合は急速に減少している。このようにジェットングとセミジェットングでは異なっていることから、ジェットングとセミジェットングは類似の現象ではあるが、同一現象ではないことがわかる。

Fig. 6 の c, f で示した首は生成時から徐々に長くな

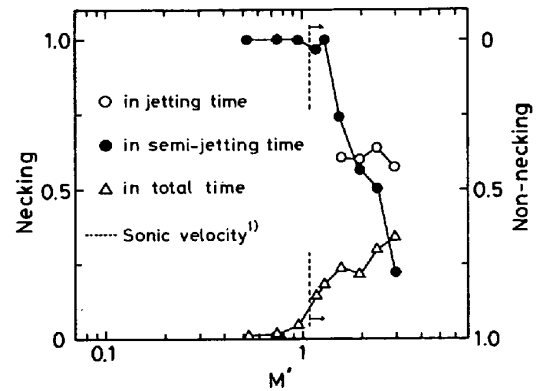


Fig. 8. Time fractions for necking and non-necking plotted against nominal Mach number.

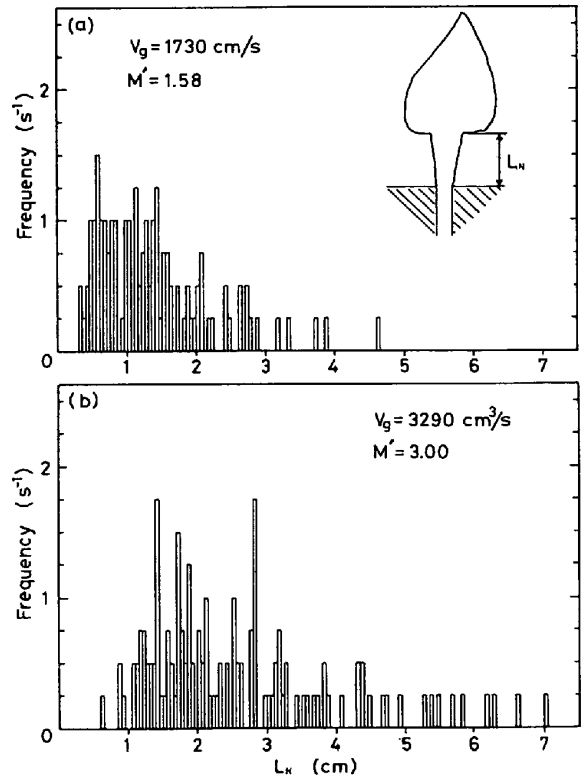


Fig. 9. Histogram of neck length.

り、切断直前において急に長く伸びて切れる。この場合の首が急にのびる直前の首長さ L_N を測定した。Fig. 9 に首の長さのヒストグラムを示した。(a) と (b) の比較からガス線流速が増加すると全体に首の長くなること がわかる。

3.5.1 で述べた残留ガスジェットの長さをガスジェットの切断直後について測定した。その結果を Fig. 10 に示した。Fig. 10(a), (b) はそれぞれ Fig. 9 の (a), (b) と同じ実験における結果である。図から、残留ガスジェットの長さも首の長さと同じようにガス線流速が増加すると全体に長くなっていることがわかる。

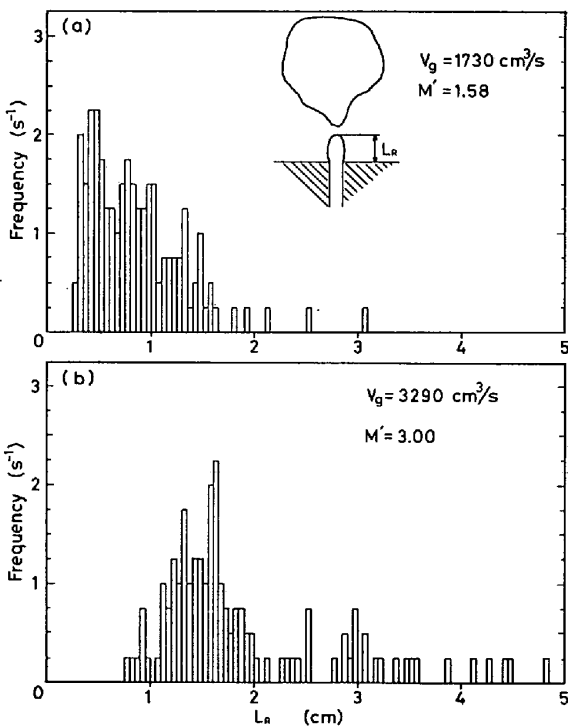


Fig. 10. Histogram of residual jet length.

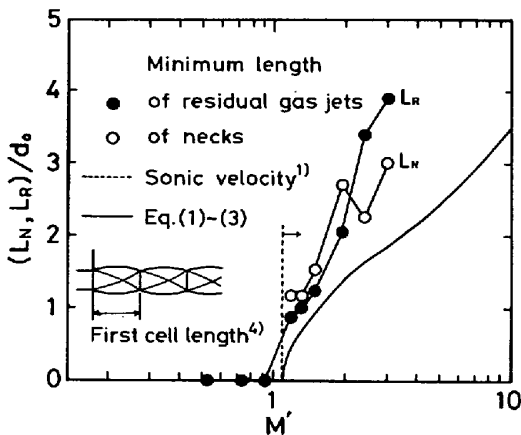


Fig. 11. Length of residual jet or neck plotted against nominal Mach number.

Fig. 9, 10 における、首の長さ、および残留ガスジェットの長さについて、与えられたガス流量における最小値に注目してみる。Fig. 11 にこの残留ガスジェットの長さおよび首の長さの最小値とみかけのマッハ数 M' の関係を示した。図より明らかに音速領域においては、残留ガスジェット、首それぞれの長さの最小値はガス線流速の増加とともに大きくなる。一方、亜音速領域においては、残留ガスジェットの最小値が 0 となっており、これは残留するガスジェットがないような切断が起こっていることを示す。

3.5.3 残留ガスジェットの構造

以上より、音速領域においては、オリフィス出口から残留ガスジェット先端までの領域が、完全ガス連続相になつていることがわかる。この完全ガス連続相の生成原因は、気相中にガスを噴出させた場合のガスジェットの構造と関連させて考えることができる。気相中へ吹き込まれ、出口流速が音速であるガスジェットは超音速流れであり、膨張波、圧縮波が交互に発生し、そろばん玉状のセル領域が繋がった構造をなし、この場合第 1 番目のセルは外部の流れの影響をほとんど受けない独立した領域であることが明らかにされている³⁾⁻⁵⁾。この第 1 セル領域は液中ガスジェットにおいても存在することが考えられ、また、 M' の増加によりジェットの強度が増加すれば第 2, 第 3 のセル領域が保たれる可能性もある。また、セル領域は外部の流れの影響をほとんど受けない領域であるから、セル長さが残留ガスジェットの長さおよび首の長さとなんらかの関係があることが考えられる。

空気中空気ジェットの第 1 セル領域の形状は Fig. 11 の中に示したが、その長さ w_1 は LOVE, GRIGSBY, LEE, WOODLING⁴⁾ により以下のように与えられている。

$$P_0/P_S \geq 2 \quad w_1/d_0 = 1.55\sqrt{(P_0/P_S) - 1} \dots (1)$$

$$P_0/P_S \leq 2 \quad w_1/d_0 = 1.52(P_0/P_S)^{0.437} - 0.5 \dots (2)$$

ここで P_0/P_S はオリフィス出口圧と静圧の比であるが、これは前報¹⁾より (3) 式で与えられる。

$$P_0/P_S = M' \sqrt{2/(\kappa + 1)} \dots (3)$$

κ は比熱比で、窒素では 1.4 である。

(1)~(3) 式から第 1 セルの長さを計算し Fig. 11 に実線で示した。残留ガスジェットの長さおよび首の長さの最小値の実測結果と第 1 セル長さの計算値とはマッハ数の増加について似た傾向を示している。しかし、残留ガスジェットの最小長さが第 1 セルの長さより長く、またマッハ数の増加とともに、その差が大きくなっている。これは M' が増加するほど P_0/P_S の値が大きくなり、安定に保たれるセル領域の数が増加することによると考

えられる。以上より、浸漬ガスジェットはオリフィス出口で音速になり、その後超音速のガスジェットになることを推定した。

3.6 ガスジェットのセル領域内の挙動

ガスジェットのセル領域の中は超音速域であり、ガス線速度が圧力波の進行速度より速い。したがってガスジェットの振動、分裂などによるガス流れの乱れがセル領域へ侵入することはできない。したがってこの領域へ流れ込もうとする液体はセル-液境界の強力な剪断力により、液滴としてジェット内へ吹き上げられる。また、セル領域へは液が入らないことから、音速領域のガス吹き込みでは液はオリフィス内へ戻ることがなくなる。これは音速領域において羽口閉塞が起こらないという丸川、柿崎、戸崎、広木⁹⁾の結果の裏づけをするものと考えられ、実操業においても羽口出口において超音速領域ができていと推定できる。

以上に示したようなセル領域の特性から、ガスジェット内で発生する圧力変動はセル領域で阻止されオリフィス内へは伝播しなくなる。したがって、音速領域においては、オリフィス出口圧が変動しないため、オリフィス出口圧の測定によつては音速領域のガスジェットの挙動を解明することはできないと考えられる。HOEFELE, BRIMACOMBE⁷⁾は水銀浴中水平ノズルからのガス吹き込み実験を行い、音速領域では羽口内圧の変動がなくなることを見いだしている。この結果は上述のセル領域の特性と一致している。ただし、この結果からジェットニングへの遷移が完了したとする HOEFELE らの考えは本研究の結果と一致しない。

4. 結 言

厚さ 0.5 cm の 2 次元水銀浴を用いた底部オリフィスからの窒素ガス吹き込み実験を行い以下の結果を得た。

(1) 2 次元水銀浴におけるガスジェットは、ガス流量が低いとバブリングであり、音速領域にはいるとジェットニングへの遷移が始まる。その臨界条件および遷移状態は 3 次元浴の場合と一致する。

(2) 音速領域のジェットニングにおいて、オリフィス出口付近で多量の微小液滴が発生する。

(3) 高ガス流量域におけるガスジェットは連続的な気柱と考えられてきたが、この気柱は瞬間的にはかなりの頻度で切断することがわかった。

(4) 音速領域において、ガスジェットは必ずその 1 部をオリフィス出口に残す。この残留ガスジェットの長さはガス線流速の増加とともに増す。

(5) 各吹き込み条件における最小残留ガスジェットの長さは亜音速領域においては 0 であるが、音速領域ではガス線流速の増加とともに長くなり、オリフィス直上に完全ガス連続相が生成する。

(6) 本研究で観察されたオリフィス出口付近を除くガスジェット全体の構造の考え方を 3 次元浴におけるガスジェットに適用するためには今後の詳細な検討が必要である。

本研究は、当研究室の佐野正道助教授の協力によるところが大きく、また、結果の検討については名古屋大学航空学教室保原充教授より有益なるご助言をいただいた。記して両先生に感謝いたします。また、本研究は一部、日本鉄鋼協会石原・浅田研究助成金により行われたものであり、感謝の意を表します。

文 献

- 1) 小沢泰久, 森 一美, 佐野正道: 鉄と鋼, 67 (1981) 16, p. 2655
- 2) E. T. TURKDOGAN: Trans. Inst. Min. Met., Sect C 83 (1974), C 67
- 3) P. STOW: Aeronautical Quarterly, 25 (1974), p. 232
- 4) E. S. LOVE, C. E. GRIGSBY, L. P. LEE, and M. J. WOODLING: NASA TR R-6 (1959)
- 5) 保原 充: 日本航空宇宙学会誌, 23 (1975), p. 645
- 6) 丸川雄浄, 姉崎正浩, 戸崎泰之, 広木伸好: 鉄と鋼, 65 (1970), 4, S 154
- 7) E. O. HOEFELE and J. K. BRIMACOMBE: Met. Trans., 10B (1979), p. 631