

論 文

© 1983 ISIJ

液体中への粉体吹き込みにおけるバブリング-
ジェッティング現象小沢 泰久*・鈴木 克紀*²・森 一美*³

Bubbling-jetting Phenomena in Powder Injection into Liquid

Yasuhisa OZAWA, Katsunori SUZUKI, and Kazumi MORI

Synopsis :

To know the effect of injecting powder with gas on the bubbling-jetting transition, an experimental study has been made on powder injection into a liquid. The gas-powder mixture was injected into a water bath through a nozzle of 0.2cm in I. D. and 2cm in O. D. installed at the vessel bottom. The powders used were glass beads of 105~149 μ , 177~210 μ , and 350~420 μ . The mixture jet behavior was photographed by a high speed cinecamera. The injecting pressure at the entrance to the nozzle was measured.

It was found that injecting powder with gas produced a drastic effect on the bubbling-jetting transition. The critical gas flow velocity for the initiation of jetting, which in the case of gas injection was just equal to the sonic velocity, decreased in gas-powder injection with increasing powder to gas mass ratio. This decrease in the critical gas flow velocity was found to become more extensive for powders of smaller size. These findings could be ascribed to the fact that the velocity of sound of gas-solid mixtures decreases with increasing the mass ratio and this decrease in the sonic velocity becomes more extensive for powders of smaller size.

1. 結 言

最近、製鋼において粉体吹き込み精錬法が注目を集めているが、粉体吹き込みにおける浸漬ジェットの動力学的挙動については不明のまま残されている。

当研究室では先に^{1)~3)}、液体金属、水溶液中の単孔オリフィスからのガス吹き込み実験を行い、オリフィス出口のガス線流速が音速領域にはいるとバブリングからジェッティングへの遷移が起こり始め、流速が増加するほどジェッティングの比率が増加することを明らかにした。また、羽口の溶損、羽口づまりなどの実際の問題に音速条件が大きく関係していることを推定した。

粉体吹き込みの場合もガス吹き込みと同様にバブリング-ジェッティング遷移が起こり、音速条件がジェッティング生成と密接な関係があることが予想される。この問題は実際の粉体吹き込みにおいて重要な意味をもつと考えられるが、従来解明はまったく行われていない。そこで、本研究ではモデル実験としてガラス粉末の水浴中吹き込み実験を行い、バブリング-ジェッティング遷移挙動を観察した。また、固気混相流中の音速の特性を考

慮し、音速条件とジェッティング生成の関係について検討した。これにより液体中粉体吹き込みの固気混相ジェットの挙動について新しい知見を確立することができたので報告する。

2. 実 験

2.1 実験装置

実験装置の概略を Fig. 1 に示した。水槽は内寸 40×50×100cm の鉄製で、観察、採光用のアクリル製窓を取り付けてある。水槽底部には中心にノズルを固定した厚さ 3cm、幅 20×20cm のステンレス製板を設置した。吹き込み用ノズルは黄銅製で外径 2cm、長さ 7cm である。ノズル出口の内径は 0.2cm で、出口から 1.4cm までは内径 0.2cm である。これ以上の上流側では内径 0.35cm とした。なおノズルはその上端面が底板上面より 0.6cm 突き出る位置までねじ込んだ[†]。

水槽背面には黒色アクリル板を用い、水槽両側面より照明を行い、ジェットが鮮明に撮影できるようにした。

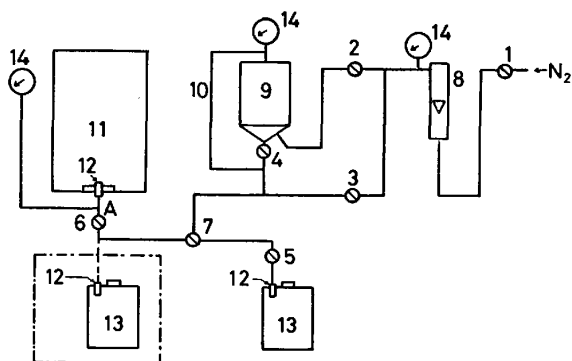
[†] ノズル出口周囲にたい積した吹き込まれた粉体が、ノズル出口近傍のジェットの挙動の観察を妨害しないようにノズル上端面を底板上面より突き出させた。

昭和 57 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 57 年 4 月 23 日受付 (Received Apr. 23, 1982)

* 名古屋大学工学部 (Faculty of Engineering, Nagoya University)

*² 名古屋大学大学院(現: 日本鋼管(株)) (Graduate School, Nagoya University, Now Nippon Kokan K.K.)

*³ 名古屋大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Nagoya University, Furo-cho Chikusa-ku Nagoya 464)



1, 2, 3 Needle valve 4, 5, 6 Ball valve 7 Three way valve
8 Float meter 9 Powder dispenser 10 Bypass tube 11 Water bath
12 Nozzle 13 Powder trap 14 Pressure gauge

Fig. 1. Schematic diagram for powder injection system.

ノズル入口側には吹き込み圧 $P_N^{\dagger 2}$ の測定のために三方ジョイントを接続し、圧力計まで 1/4 inch (0.635 cm) 銅管で配管した。その途中にフィルターを用い、粉体が圧力計に入るのを防いだ。

粉体供給器はステンレス製で、円錐状底面に直径 0.2 cm の 4 つの孔をあけて粉体流動化の機構をもたせた。粉体搬送用の窒素ガスはバルブ 2 を通り、4 つの孔から粉体供給器内へ入り、粉体を流動化させた。流動化した粉体は供給器底部のオリフィスからバルブ 4 を通り流出し、その後、バイパス 10 を通過してきた窒素ガスと合流して、水槽または粉体捕集器へ吹き込まれた。粉体供給量は供給器底部のオリフィス径とバイパス管直径を、Table 1 に示したように組み合わせることにより変化させた。粉体捕集器 13 は容量 10 l のポリエチレン製の容器で、粉体供給量検定のために用いたものである。

2.2 吹き込み用粉体

吹き込み用粉体には、粒子径が 105~149, 177~210 および 350~420 μ の 3 種類の球形ガラスビーズを用いた。ガラスビーズの材質はソーダ石灰ガラス、密度は 2.5 g/cm³ である。

2.3 実験方法

粉体を深さ 50 cm の蒸留水の浴中へ吹き込み、水槽正面より 80 cm の距離に設置した高速度カメラで混相ジェットを正面から撮影した。撮影速度は約 1500 frames/s、撮影時間は 3~4 s であった。また、圧力計 14 によりノズル入口における吹き込み圧 P_N を測定した。なお粉体供給量は Table 1 に示したそれぞれの様式についてのガス流量と粉体供給量の関係を示す検量線より求めた。

^{†2} P_N の測定位置、すなわち Fig. 1 の A 点においてはガスは流れているため、 P_N の測定値は厳密な意味での吹き込み圧ではない。しかし、ここでの管内断面積はノズル出口の約 6 倍になっているため、 P_N は十分に吹き込み圧に近いと考えて、ここでは P_N を吹き込み圧とする。

Table 1. Powder feeding systems.

Type	Orifice diameter	Bypass tube diameter
(a)	0.2 cm	3/8 inch (0.953 cm)
(b)	0.2	1/4 (0.635)
(c)	0.3	3/8 (0.953)
(d)	0.3	1/4 (0.635)
(e)	0.2	1/8 (0.318)
(f)	0.3	3/16 (0.476)
(g)	0.2	—

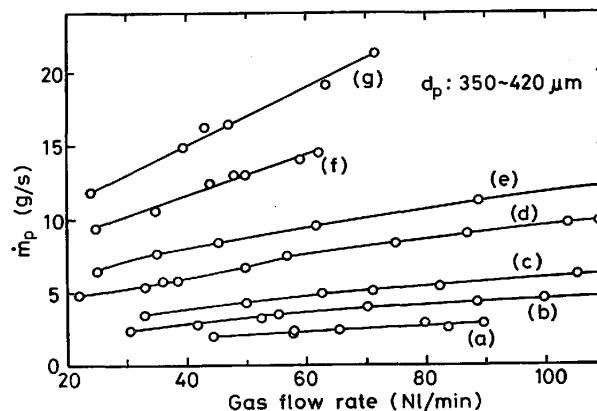


Fig. 2. Relation between powder flow rate and gas flow rate. Powder feeding systems (a)~(g) (Table 1).

2.4 検量線

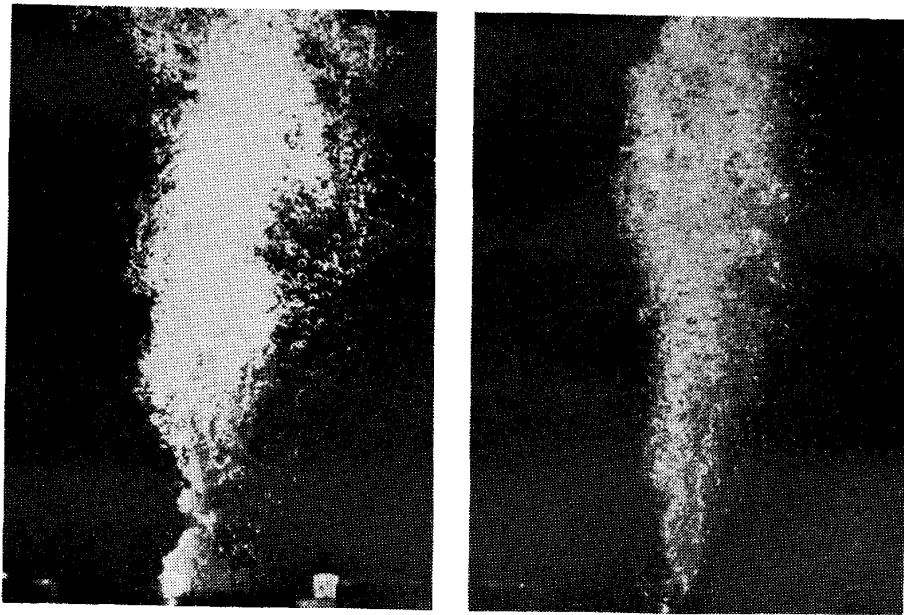
水槽底部に設置してあるノズルをはずして Fig. 1 中の一点鎖線で示したように粉体捕集器へ取り付け、3 方バルブ 7 を操作して粉体を一定時間、粉体捕集器へ吹き込んだ。この捕集した粉体重量を秤量することにより粉体供給速度 \dot{m}_p を求めた。この操作を Table 1 の様式 (a), (b)~(g) ごとにガス流量を変えて行つた。以上のようにして得た粒子径 350~420 μ の場合の検量線を Fig. 2 に示した。なお、検量線より読みとつた粉体供給速度の相対誤差は $\pm 5\%$ 以内であつた。また、Fig. 1 の 7 の圧力は検量線作成時と実際の実験とでは水圧の分だけ異なるが、これは無視した。

3. 実験結果

3.1 バブリングとジェット

Photo. 1 にマイクロフラッシュで撮影したガス吹き込み、および粉体吹き込みにおける浸漬ジェットの瞬間写真を示した。ここで、 M' はノズル出口におけるガス線流速についてのみかけのマッハ数^{†3}、 $\mu (= \dot{m}_p / \dot{m}_g, \dot{m}_p$: 粉体質量供給速度、 \dot{m}_g : ガス質量供給速度) は固気比である。ガス吹き込みの (a) では、ノズル出口においてジェットはノズル内径より大きく広がっていることがわ

^{†3} $M' = V_g / A_0 a = u_0 / a$ (V_g : 体積ガス流量、 u_0 : ノズル出口におけるみかけのガス線流速、 A_0 : ノズル出口断面積、 a : ガス中の音速) ここでは固気混相流中の固体粒子の体積分率を無視した。



(a) $M'=0.93$ $\mu=0$
 (b) $M'=0.96$ $\mu=7.4$
 M' : nominal Mach number
 μ : solid to gas mass ratio

Photo. 1. Photographs showing the effect of injecting powder with gas on bubbling-jetting phenomena. ($\times 0.6 \times 4/5$)

かる。一方粉体吹き込み(b)の場合ではノズル出口のジェット径がノズル内径に等しくなっている。本研究の粉体吹き込みにおいてもガス吹き込みの場合と同様に前者をバブリング、後者をジェッティングと定義する。

また、Photo. 1 (b) の粉体吹き込みにおけるジェットは (a) のガス吹き込みの場合に比べてより細く、直進的になっている。さらにほかの吹き込み条件の撮影結果とも比較することにより、浸漬ジェットは粉体吹き込み量が増加するほどより細く、しかも横方向へのゆれが小さくなって直進性が増加することが明らかになった。これは粉体吹き込みにおいて重要な現象で、いずれ詳細に検討する予定であるが、本研究ではもつばらノズル出口付近の固気混相ジェットの観察および考察を行った。

高速度撮影の結果、つぎのような固気混相ジェットのバブリング-ジェッティング現象が明らかになった。

固気混相ジェットにおいては、数個~数十個の気泡が続いて発生するバブリングと連続的ジェットとして液中へ侵入するジェッティングが交互に生ずるが、この場合バブリング、ジェッティングのそれぞれの継続時間は不規則に変化する。しかし、全体としては M' が低いところではバブリングの継続時間は長く、高い M' において短くなる傾向があり、逆にジェッティングの継続時間は高い M' において長くなる。したがって、ジェッティングの占める時間割合は高い M' において大きくなる。この傾向をより明確にするために撮影の全時間のなかでジェッティングの占める時間割合と M' の関係を求めた。Fig. 3 に粒子径 $d_p=350\sim 420\mu$ の場合の結果を示した。高速度カメラによる撮影と同時に測定した吹き込

み圧 P_N (ゲージ圧) と M' の関係も Fig. 3 に示した図の (a)~(f) は Table 1, Fig. 2 の配管系 (a)~(f) に対応している。

Fig. 3 のジェッティング割合と M' の関係から、(a)~(f) のいずれにおいてもジェッティング割合が M' が増加するほど急激に増加する領域とジェッティング割合がほぼ一定になっている領域があることがわかる。この2つの領域の境界を図中に矢印で示した^{†5}。これ以下においてジェッティングは0にはなっていないが、4.2節で述べるように、ガス吹き込みの場合の音速領域におけるジェッティング^{†1)~†3)}、あるいは上述の M' の高い領域のジェッティングとは本質的に異なり、 M' の低い領域のジェッティングは見かけ上のものである^{†4}。これから図中の矢印で示した M' のところをバブリング-ジェッティング遷移の臨界流速^{†5}と決定することができる。これ以下の M' の領域をバブリング領域、これ以上をジェッティング領域と呼ぶことにする。

Fig. 4 にバブリング領域を示す白丸とジェッティング領域を示す黒丸により、バブリング-ジェッティング遷移の臨界の M' を表し、これを固気比 μ に対して示した。ガス吹き込みでは、この臨界の M' は1.1で、これはちょうど亜音速-音速の境界の M' に一致している^{†3)}。しかし、Fig. 4 から粉体吹き込みにおいては、バブリング-ジェッティング遷移の臨界の M' は固気比により変化し、固気比が増加するほど減少することがわかる。

†4 Photo. 2 に参考までに、この見かけのジェッティングの例を示した。

†5 2つの領域の境界すなわち臨界流速に Fig. 3 中の矢印で示すように範囲があるのは測定上の限界による。

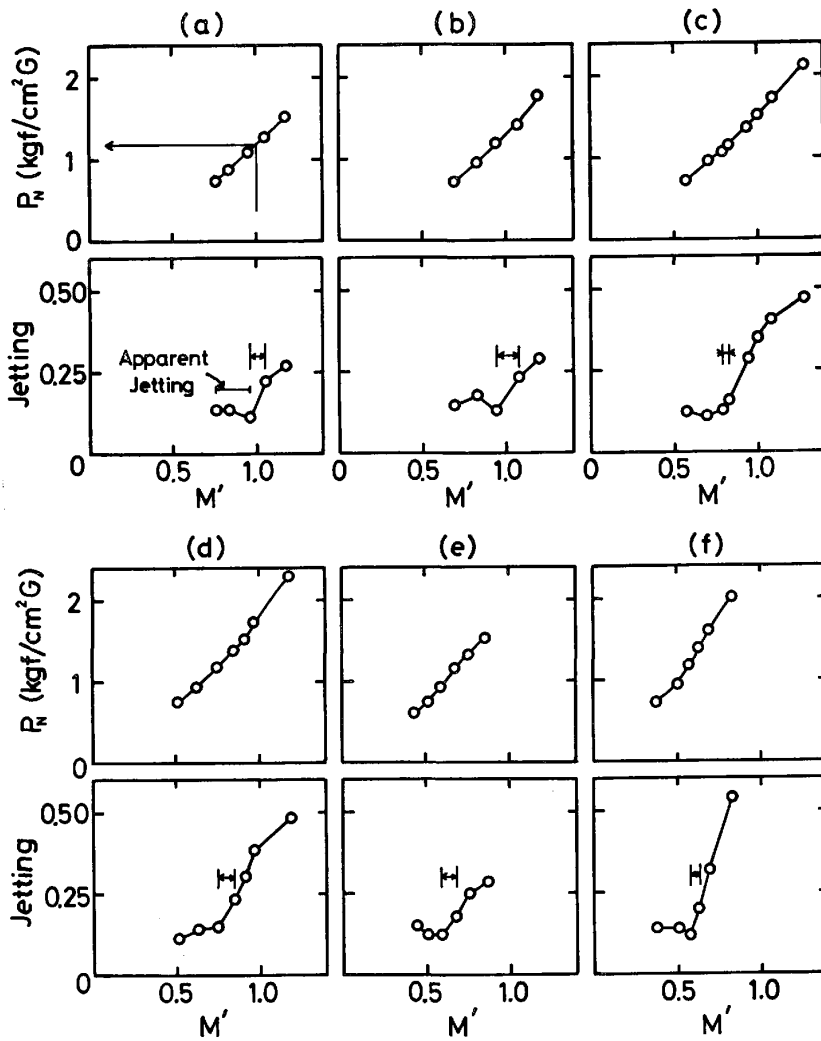
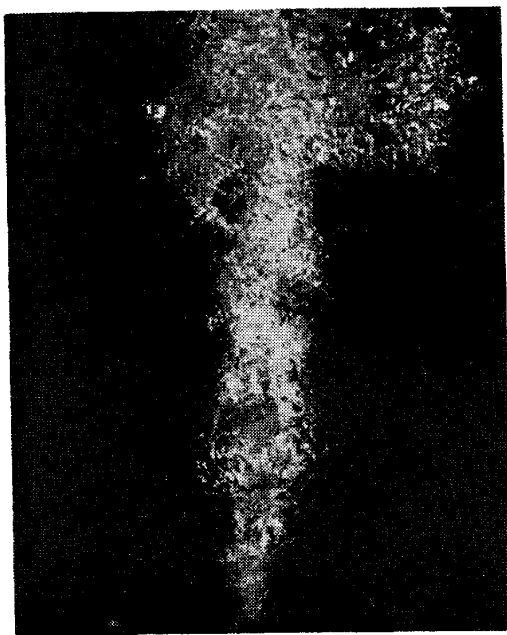


Fig. 3. Jetting time fraction and injecting gas pressure plotted against nominal Mach number. Particle size: $350\sim 420\mu$. Powder feeding systems (a)~(f) (Table 1, Fig. 2).



$M'=0.66$ $\mu=2.2$

Photo. 2. Photograph showing apparent jetting in powder injection. ($\times 6 \times 4/5$)

3.2 吹き込み圧

吹き込み圧 P_N は Fig. 3 の上部の図より明らかなように、(a)~(f) いずれにおいても M' が増加するほど直線的に増加している。この Fig. 3 上図よりバブリング-ジェットング遷移の臨界の M' に対応する P_N の値を求めると、(a) の場合は $P_N=1.2$ kgf/cm²G (ゲージ圧) で、(b)~(f) においてもその P_N の値に近いことがわかる。この傾向をより明確にするために、Fig. 5 に Fig. 3 (a), (b), (c)…… のおのおのの下図の矢印で示した臨界の M' の中間の値に対応する吹き込み圧 P_N を固気比 μ に対して示した。図より臨界の M' に対応する P_N の値は、固気比に依存せず 1.2 kgf/cm²G に近いことがわかる。また、本実験装置を用いたガス吹き込みにおいては、 $M'=1.1$, $P_N=1.2$ kgf/cm²G がバブリング-ジェットング遷移の臨界条件であり、粉体吹き込みの場合の P_N の臨界値 1.2 kgf/cm²G に一致している。

気液二相流の場合、その混相流の流速がノズル出口で

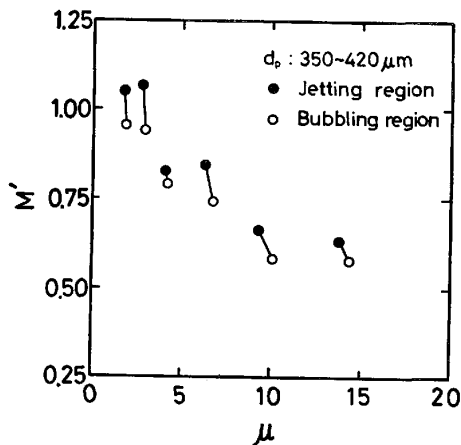


Fig. 4. Plot of nominal Mach number against solid to gas mass ratio showing bubbling-jetting transition.

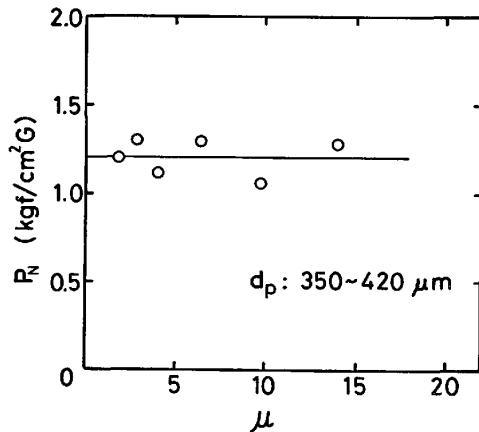


Fig. 5. Relation between critical injecting pressure for bubbling-jetting transition and solid to gas mass ratio.

音速に達するような高い吹き込み圧においては、ノズル出口のガス圧力と吹き込みガス圧力の比は気液の混合比にほとんど影響されず一定の値であり、また、その圧力比は音速領域^{†6}のガスみの吹き込みにおける圧力比にかなり近い値であることが見いだされている⁴⁾。このことを考慮すれば、Fig. 5の結果からバブリング-ジェットニング遷移は、粉体吹き込みにおいてもガス吹き込みの場合のように、ノズル出口で混相流が音速領域に達する場合に起こると推定することができる。

3.1節で述べたようにジェットニングへの遷移が始まる臨界の M' は固気比 μ が増加するほど低くなっている(Fig. 4)。これは、上述の検討により、粉体吹き込みにおいてはノズル出口での混相流の音速は粉体を混入することにより変化し、固気比が増加するほど低下することによると推定することができる。

^{†6} 出口ガス線流速が音速の場合。

3.3 粉体粒子径の影響

混相ジェットの挙動に対する粉体粒子径の影響を明らかにするため、粒子径 177~210 μ および 105~149 μ のガラスビーズを水浴中へ吹き込み、吹き込み圧 P_N の測定、高速度カメラによるジェットの撮影を行った。吹き込み圧 P_N については、Fig. 3 上図に示した粒子径 350~420 μ の粉体の吹き込みにおける P_N と M' の関係と類似の関係が得られた。しかし、高速度撮影においては、粉体微粒子が水浴中に懸濁してジェットが観察しにくくなり、粒子径 350~420 μ の粉体吹き込みの場合のような明確な遷移現象を見いだすことはできなかった。

前節で述べたように粒子径 350~420 μ の吹き込みにおいては、 $P_N=1.2$ kgf/cm²G がバブリング-ジェットニング遷移の臨界条件であった。この条件は、前節で述べた検討から、同じ装置を用いた吹き込み実験においては粉体粒子径を変えても変化しないと考えられる。そこで、 $P_N=1.2$ kgf/cm²G に対応する臨界の M' を粒子径 177~210 μ および 105~149 μ の場合について求め、この M' がバブリング-ジェットニング遷移の臨界条件であると推定した。

Fig. 6 に以上のようにして得た臨界の M' と固気比 μ の関係を 350~420 μ 、177~210 μ 及び 105~149 μ について示した。図より明らかなように、臨界の M' は粒子径が小さい程低下している。これは固気混相流中の音速は粒子径が小さい程低下するためであると考えられる。

4. 考 察

4.1 固気混相流中の音速の特性

WEBER⁵⁾、RUMPF と GREGOR⁶⁾ は固気混相流中の音速の計算をエネルギー方程式 (WEBER) あるいは運動方程式 (RUMPF, GREGOR) のいずれかと連続方程式にも

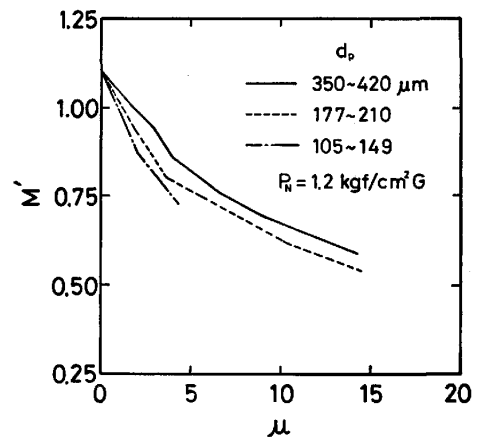


Fig. 6. Change of critical nominal Mach number for bubbling-jetting transition with solid to gas mass ratio. Obtained from pressure measurements.

とづいて行っている。その計算においては、固気混相流中の音速は固気比が大きくなるほど低下し、また、その音速の低下は粒子径が小さいほどより大きくなっている。この固気混相中の音速と固気比、粒子径の関係は、Fig. 4, Fig. 6 に示したバブリング-ジェット遷移についての臨界の M' と固気比、および粒子径の関係に傾向として一致している。

以上の固気混相流中の音速の特性と前節における検討から、粉体吹き込みでは粉体を混入することにより音速が低下するため、見かけの音速すなわちガスみの吹き込みの場合の音速 ($M'=1.1$) より低いガス線流速においてジェットングがおこることがわかった。また、音速は粉体粒子が小さいほど低下し、それだけジェットングが得られやすいことも明らかにされた。

4.2 見かけのジェットング

ジェットング生成時間をジェットング発生回数で割って求めたジェットングの平均継続時間をみかけのマッハ数に対して示したのが Fig. 7 である。図より、矢印で示したバブリング-ジェットング遷移の臨界の M' 以下の領域においては、ジェットングの平均継続時間は短く、またその M' に対する依存性はそれ以上の領域における依存性とは異なっていることがわかる。これから臨界の M' 以下の領域でおこるジェットング類似の現象は、それ以上の領域のジェットングとは本質的に異なり、見かけのジェットングであることが推定される。

音速領域においては、液側でノズル出口直上にガス線流速が超音速になる領域が生成する。その領域内へはその上部で発生するガス圧力の変動[†]が侵入できない。そのために混相流は安定に液体中へ吹き込まれ、これがジェットングになる。それに対し、見かけ上のジェッテ

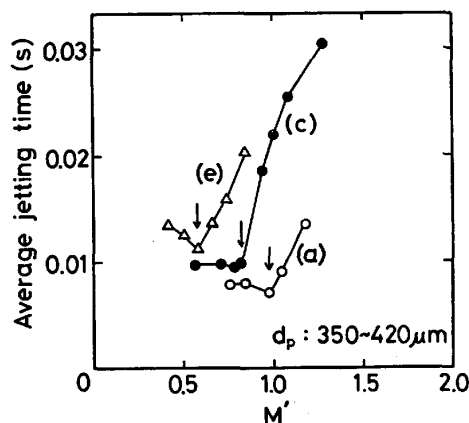


Fig. 7. Average jetting time plotted against nominal Mach number. Powder feeding systems (a), (c), (e) (Table 1, Fig. 2).

ングは大気泡の発生後のその気泡上昇にともなう出口付近の圧力低下によりガスが大気泡の方向へ吸い出されるようになるために発生するものと考えられる。この見かけ上のジェットは上部の乱れの影響を受けて短時間で切断され、つぎの気泡生成へと移る。

4.3 実際との関連

ノズル閉塞がおこらない条件はガス吹き込みの場合にはノズル出口のガス線流速が音速に達することであつた²⁾。粉体吹き込みにおいては丸川、広木、城田、植木、久保、東海林⁷⁾は固気比が増加するほどより低いガス線流速でノズル閉塞がおこらないことを示している。これは本研究の結果からいえば、固気比が増加するほど、固気混相流中の音速が低下し、ノズル出口において混相流がより低い線流速で音速領域に達するためにノズル閉塞がおこらないと理解される。

5. 結 言

ガラス粉末の水浴中への吹き込み実験を行い、以下の結果を得た。

(1) 粉体吹き込みではバブリング-ジェットング遷移現象が起こり始まる臨界のガス流速が見かけ上の音速 ($M'=1.1$) より低く、固気比が増加するほどその臨界ガス流速は低下する。

(2) バブリング-ジェットング遷移の臨界条件におけるノズル吹き込み圧 P_N はガス吹き込み、および粉体吹き込みの両者で等しく $1.2 \text{ kgf/cm}^2\text{G}$ (ゲージ圧) である。この事実にもとづき、バブリング-ジェットング遷移は粒子径が小さいほど低い M' においておこり始まることが明らかにされた。

(3) 固気混相流中の音速の特性について検討し、粉体吹き込みでは粉体を混入することにより音速が低下するため (1), (2) で示した現象が生じたと推定した。

文 献

- 1) 小沢泰久, 森 一美, 佐野正道: 鉄と鋼, 67 (1981), p. 2655
- 2) 小沢泰久, 森 一美: 鉄と鋼, 68(1982) p. 90
- 3) 小沢泰久, 森 一美: 鉄と鋼, 68 (1982) p. 98
- 4) 赤川浩爾: 気液二相流(1974), p.174 [コロナ社]
- 5) M. WEBER: Powder Europa, Proceedings of the technical sessions, Vol. II, International Powder Institute, London, England, Jan. (1980), p. 1
- 6) H. RUMPF and G. GREGOR: Chemie-Ing.-Techn., 45 (1973), p. 924
- 7) 丸川雄浄, 広木伸好, 城田良康, 植木満弘, 久保敏彦, 東海林泰夫: 鉄と鋼, 66 (1980), S889

[†] 気泡の離脱, 分裂, また浴の流動の変化などにより発生するガス圧力の変動。