

コンファインド型ガスアトマイズノズルにおける ガス流速分布の特性

福田 匡*

Gas Velocity Distribution for a Confined-type Gas Atomization Nozzle

Tadashi FUKUDA

Synopsis : Gas flow characteristics for a confined-type gas atomization nozzle have been studied to design properly the fine powder atomization nozzle through increasing the gas jet speed in the pulverizing region. Before flowing downward vertically, discrete gas jets spouted from the atomization nozzle converge around the geometrical focus, where the vertical gas velocity in the center portion reaches a saturation. The gas velocity distributions on the horizontal plane are influenced by apex angle and protrusion length. When the apex angle is less than 50° , the effect of protrusion length on the velocity distribution is relatively small. Whereas, in case of larger apex angle than 65° , the protrusion gives interference of suppressing the gas flow under the condition that sufficient suction pressure is formed at the melt orifice. The gas velocity distribution around the geometrical focus is not affected by changing the impinging gas pressure at the same mass flow rate. In order to increase the gas velocity in the pulverizing region, adjacent arrangement of gas jets to the melt delivery tube tip is important because of much reduced energy loss.

Key words : powder metallurgy ; superalloy ; atomization ; gas jet ; confined-type nozzle ; super sonic flow.

1. 緒言

粉末冶金法は鉄系材料の焼結機械部品を中心に数多くの工業製品の製造に適用されており、高速度鋼や高Ni合金鋼の素形材製造ならびに小型複雑形状部品の製造にも適用が広がっている。これらの原料粉末の多くはアトマイズ法によって製造され、酸化による特性劣化を避けるために不活性ガスアトマイズ法が適用されることが多い。さらに最近では成形性の向上あるいは急冷凝固による偏析軽減などの観点から微粉末の需要が旺盛であり、粉化効率の向上が求められている。

ところでガスジェットを吹き付けることによって流体を微粒化する方法については工業炉やエンジンなどでの燃料噴霧装置あるいは農業散布用のノズルに関して、噴霧条件と生成粒子の特性との関係について多数の検討がなされている¹⁻³⁾。しかしながらこれらの場合の噴霧装置は、高温かつ凝固を伴う熔融金属(溶湯)を扱うアトマイズノズルとはその構造が大きく異なるとともに、溶湯と燃料油、薬液類とは表面張力、粘度等の流動特性に関わる物性値が大きく異なるため、金属粉末製造用のガスアトマイズノズルの設計に上述の知見を直接使うことはできない。また溶湯のガスアトマイズについて噴霧条件と生成粉末との粒度の関

係が求められている⁴⁾が、アトマイズノズルの形式、ガス噴射条件とも微細な金属粉末を生成するために近年適用されている方法とは大きく隔たっていることに加えて、溶湯に噴射されるガス流れには一律な速度減衰が仮定されているのみで、微粉生成のための噴射ガスの適正条件については検討されていない。したがってこれらの従来知見のみでは、微粉末の収率向上を求められているガスアトマイズノズルの適正な設計ができない。

ガスアトマイズ法での粉化効率の向上には、溶湯の吹き上げを起すことなく、高流速のガスを溶湯流に衝突させることにより微粉末を生成できることが求められる。著者⁵⁾はガスアトマイズノズルの安定運転には溶湯管出口圧力が緊密に関連していることを明らかにし、溶湯管出口圧力に及ぼす諸因子の影響度を検討した。溶湯流の変形・分裂・微細化は、流量と流速によって決定される噴霧媒体の運動エネルギーに強く関連するため、溶湯流に作用するガス流れの特性を、溶湯を流さない状態で測定したガス流速によって推定することが可能と考えられる。本研究では微粉末を高効率で生成できるよう、溶湯流に噴射されるガスジェットの高速化を目的として、アトマイズノズルにおける基本的なガス流れ挙動を明らかにすることを目的とした。

2. 実験方法

溶湯噴霧に用いるアトマイズノズルから高压の不活性ガスを噴射してガス流れ場の特性を調べた。

2.1 ガスアトマイズノズル

本実験に供したアトマイズノズルtypeBの構造をFig. 1に、各部寸法をTable 1に示す。アトマイズノズルtypeCはtypeBに比べて溶湯管とガス噴射器の間隙を狭くしガス噴射孔を溶湯管に近付けて幾何焦点との距離を減じた。またNはガス噴射孔の数である。供試アトマイズノズルのガス噴射器から斜め下向きに一定の角度で噴射されたガスジェットは幾何焦点に向かって流れ、溶湯管出口部に逆円錐状のガス流れ場が形成される。また溶湯がほとんど自由流下することなく粉化されることが観察されているためコンファインド型の一類に類別できる⁵⁾。

2.2 ガス供給系の構成

実験装置の概略構成をFig. 2に示す。高压ガスの集合容器から配管、減圧弁を介してアトマイズノズルに不活性ガスを供給した。噴射ガスの圧力をアトマイズノズル入口直近

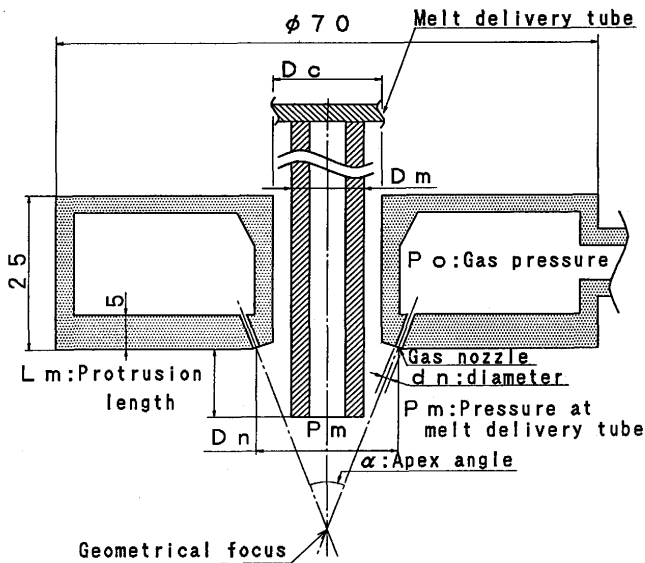


Fig. 1. Configuration of the atomization nozzle used in this study.

Table 1. Dimensions of atomization nozzle used in this study.

No.	type	α	Dn(mm)	Dc(mm)	dn(mm)	N
①-1	B	40°	22	16	1.0	20
①-2	B	50°	22	16	1.0	20
①-3	B	65°	22	16	1.0	20
①-4	B	90°	22	16	1.0	20
②-1	B	20°	21	16	0.7	18
②-2	B	20°	21	16	1.0	18
②-3	B	20°	21	16	1.2	18
③	B	30°	22	16	1.2	20
④	C	30°	13	12	1.2	20

N: number of gas nozzles

の配管に取り付けた歪ゲージ式圧力計によって測定し、上流に設けた弁によって調整した。

実験では噴射孔内でチョークした状態であったためガス質量流量はアトマイズノズルに設置された噴射孔の断面積の合計と供給ガス圧力から(1)式に従って算出するとともに、上記の高压ガス集合容器の容量と一定圧力でガスを噴射した実験における当該容器内のガス圧力の減少量から(2)式でガス質量流量を計算して両者がほぼ一致することを確かめた。

$$Mg = \frac{P_0 A^*}{(RT_0)^{0.5}} \left\{ \kappa \cdot \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa + 1}{2}} \right\} \dots \dots \dots (1)$$

- A* : 噴射孔の最小断面積の合計 m²
- Mg : ガスの質量流量 kg/s
- P₀ : 噴射ガス圧力 Pa
- R : ガス定数 J/(kg·K)
- T₀ : 噴射前のガス温度 K
- κ : 比熱比

$$Mg = (P_1 - P_2) \cdot V / (R \cdot T_0) / t \dots \dots \dots (2)$$

- P₁ : 噴射前のガス圧力 Pa
- P₂ : 噴射後のガス圧力 Pa
- V : 集合容器と配管の合計容積 m³
- t : 噴射時間 s

2.3 ガス流速の測定方法

供試アトマイズノズルが生成する噴流の主流は垂直下向きである⁵⁾ので、Fig. 3に示すピトー管を測定孔が垂直上向きになるように微動装置に固定し、幾何焦点を中心として左右方向あるいは垂直方向に移動して所定位置において、

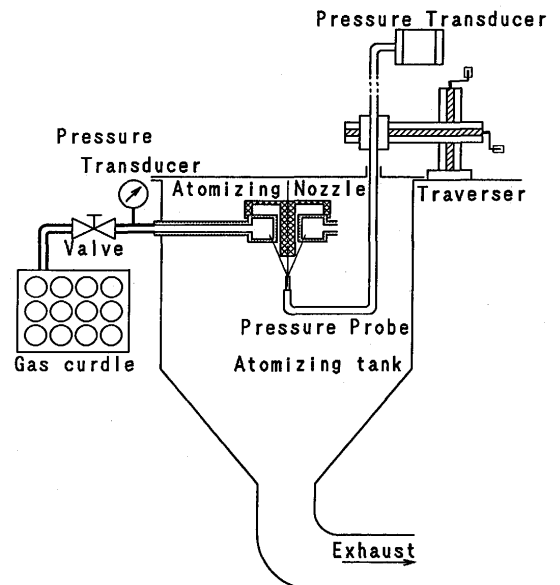


Fig. 2. Schematic diagram of pitot tube measurement.

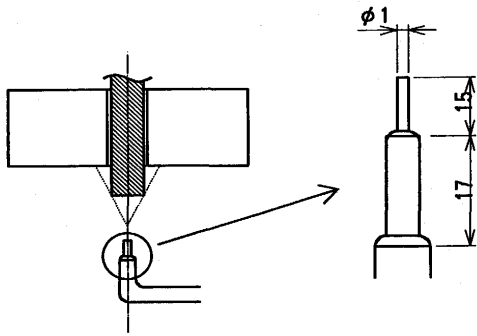


Fig. 3. The pitot tube used in this study.

ガス流れの全圧を測定した。Fig. 2 に示すように上端の閉じた溶湯管が所定位置に配置された供試アトマイズノズルを、出口が大気開放され内部がほぼアルゴンガスで置換された内径600mmのタンク内に固定し、所定圧力のアルゴンガスを供給して流速測定を行った。対象とする流れは断熱的であるととしてガス流速を(3)式を用いて計算した。

なお、よどみ点状態でガス温度は約20°Cであり音速は約320m/sであった。

$$\bar{V}_g = M_1 (\kappa RT_0)^{0.5} \left[1 + \frac{\kappa - 1}{2} \cdot M_1^2 \right]^{-0.5} \dots\dots\dots (3)$$

M_1 : マッハ数

ここでガス流れが亜音速の場合は(4)式でマッハ数 M_1 を求め、超音速流れの場合は(5)式に示すRayleighのピトー管公式⁶⁾によって M_1 を求めた。なお全圧測定と同条件でガス噴射し、円錐形の先端部を有するプローブで静圧 P_s を測定したところ大気圧との差はたかだか10kPaであり、 P_s を大気圧として算出したガス流速 V_g の誤差は大きくとも4%であった。

$$M_1 = \left[\left\{ \left(\frac{P_t}{P_s} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} - 1 \right\} \cdot \frac{2}{\kappa - 1} \right]^{0.5} \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{P_t}{P_s} = \left\{ \frac{(\kappa + 1) M_1^2}{2} \right\}^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \cdot \left\{ \frac{\kappa + 1}{2\kappa M_1^2 - (\kappa - 1)} \right\}^{\frac{1}{\kappa - 1}} \dots\dots (5)$$

P_t : 全圧 Pa (但し超音速域ではピトー管で測定する離脱衝撃波後の値)

P_s : 静圧 Pa

R : ガス定数 J/(kg・K)

T_0 : 温度 K (よどみ点状態での全温)

V_g : ガス流速 m/s

κ : 比熱比

3. 実験結果

3.1 アトマイズノズルからの距離とガス流速の関係

溶湯流の噴霧は幾何焦点近傍で起こることが観察されている⁶⁾が、アトマイズノズル下方の垂直方向におけるガス流

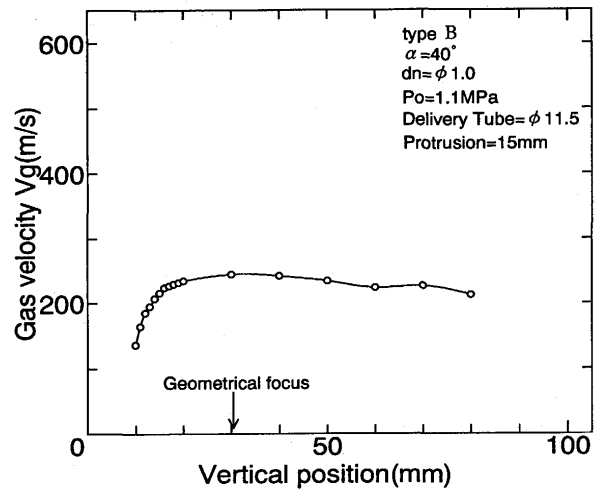


Fig. 4. Gas velocity distribution as measured along the vertical center line of the atomization nozzle (type B $\alpha = 40^\circ$).

速の変化を明らかにして流速分布を測定すべき垂直方向の位置を検討した。Table 1 の①-1に諸元を示すアトマイズノズルを用いて圧力1.1MPaのアルゴンガスを噴射し、アトマイズノズルの中心軸上を垂直方向にピトー管プローブを動かして、垂直方向の位置と流速との関係を求めた。このとき、溶湯管出口圧力の大気圧に対する差 P_m が約-10kPaとなるようガス噴射孔と溶湯管端面との垂直距離(溶湯管の突き出し長) L_m を15mmとした。

Fig. 4に測定結果を示すとおり、幾何焦点の近傍で上下方向ではガス流速の変化が少なく、多数のガスジェットが集合した流れではアトマイズノズル下方に速度がほとんど減衰しない領域のあることが判明した。同様の測定結果が超音波アトマイズノズルからヘリウムガスを噴射して流速測定したLiuらの実験結果⁷⁾にも報告されている。また児島らによる2個の不足膨張噴流の干渉流れに関する研究⁸⁾により、衝突角度が小さい場合(45°)に合成された噴流には時間的変動の少ない噴流境界層が比較的下流側まで強く形成され振動や拡散の挙動は単一噴流と類似していることが明らかにされており、本研究における複数のガスジェットが集合した流れにおいても類似した挙動を示す噴流が生成していると考えられる。

以上のことから、アトマイズノズルから噴出した多数のガスジェットは集合して幾何焦点の多少上流で到達した最大値を保って下方へ流れることが分かったため、アトマイズ粉末の粒度に強く影響すると考えられるガス流速分布は幾何焦点を通る水平面内での測定値を代表値とした。

3.2 溶湯管突き出し長の影響

3.2.1 噴射角度が比較的小さい場合

供試アトマイズノズルでは溶湯管の端部をガス流れに突き出すことで溶湯管出口部に負圧領域を生成する。ガスジェットの流動が溶湯管によって影響を受けていることは明

らからであり、幾何焦点まわりのガス流速分布と溶湯管位置との関係を求め、効率的な噴霧が行われる条件を明らかにすることを試みた。まず、噴射角度が比較的小さい $\alpha = 40^\circ$ のアトマイズノズルを用いて1.1MPaでArガスを噴射し、溶湯の吹き上げを発生させない限界である $P_m = -3 \text{ kPa}$ となる $L_m = 11 \text{ mm}$ の場合、ならびに P_m が L_m に対してほぼ飽和する $L_m = 15 \text{ mm}$ の場合($P_m = -10 \text{ kPa}$)について、幾何焦点を通る任意の水平な直線に沿って鉛直下向きのガス流速を測定した。Fig. 5に測定結果を示すとおり幾何焦点まわりのガス流速分布は、 L_m によってほとんど影響を受けず同様な流速分布を示した。

上記と同様に噴射角度 α が 20° 、 50° のアトマイズノズルについても、流速分布に与える L_m 値の影響がほとんど認められない実験結果が得られた。

3.2.2 噴射角度が比較的大きい場合

噴射角度が増すほど、噴射孔から幾何焦点までの距離が減じるためガスジェットの流速減衰が少なく、より高流速のガス流れを溶湯に衝突させ微粉末を生成できる可能性がある。

噴射角度が比較的大きい $\alpha = 65^\circ$ のアトマイズノズルを用いて、1.1MPaでArガスを噴射し P_m が約 -13 kPa を示す $L_m = 10 \text{ mm}$ の場合について、幾何焦点を通る任意の水平な直線上の各点におけるガス流速を測定した。Fig. 6に示すとおり幾何焦点まわりのガス流速は、前記した噴射角度が比較的小さい場合に比べて、とくに中央部で著しく低流速となった。

同様に噴射角度 $\alpha = 90^\circ$ のアトマイズノズルについても、 P_m が溶湯の吹き上げを発生させない約 -15 kPa を示す $L_m = 7 \text{ mm}$ の場合について幾何焦点まわりのガス流速を測定したところ、前記の $\alpha = 65^\circ$ の場合と同様に著しく低流速となることが分かった。

以上に検討したtypeBのアトマイズノズルにおいて、溶湯管出口圧力が十分な負圧を示し、かつ幾何焦点まわりに高流速のガス流れを生成する噴射角度の上限界は $\alpha \approx 50^\circ$ であることが分かった。

3.3 噴射圧力の影響

児島ら⁹⁾は直円管から噴出する高速気流について出口近傍の噴流挙動の研究から、ガス流れは急膨張のため出口直前から加速しマッハ1~2の超音速噴流が生成すること、その流れは一種の不足膨張噴流であり擬似衝撃波が発生することを明らかにしている。本研究で用いた供試ノズルから噴出するガス噴流についても擬似衝撃波が観察されており超音速噴流が生成していると考えられ、高圧噴射による流速変化を調査した。

噴射角度 α を 20° とし、ガス質量流量が同一となるように噴射孔径の異なるアトマイズノズルを用いて噴射圧力と幾

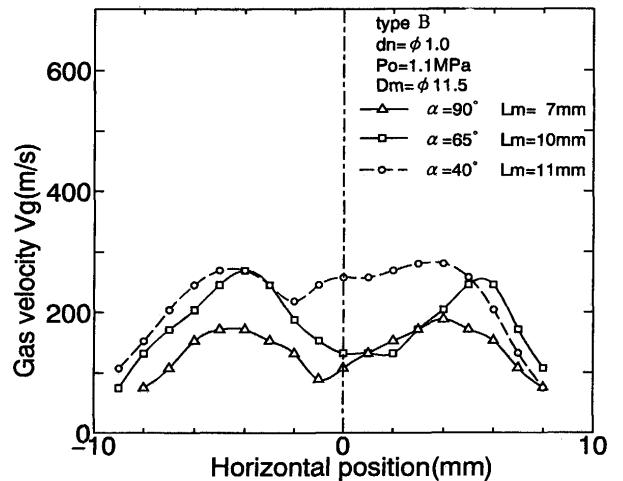


Fig. 6. Effect of apex angle on gas velocity distribution as measured along a horizontal line.

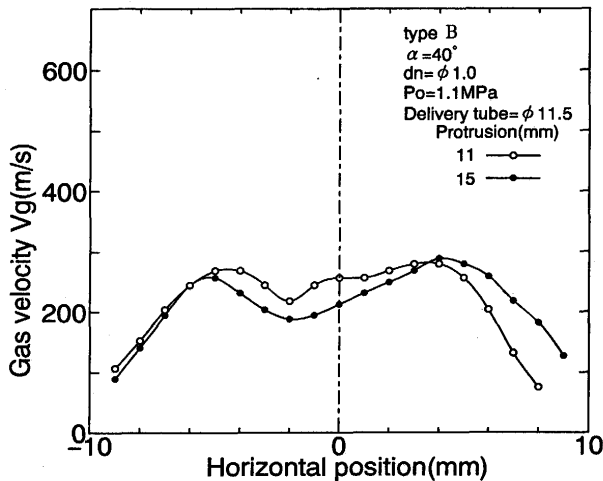


Fig. 5. Gas velocity distribution as measured along a horizontal line through the geometrical focus (typeB $\alpha = 40^\circ$).

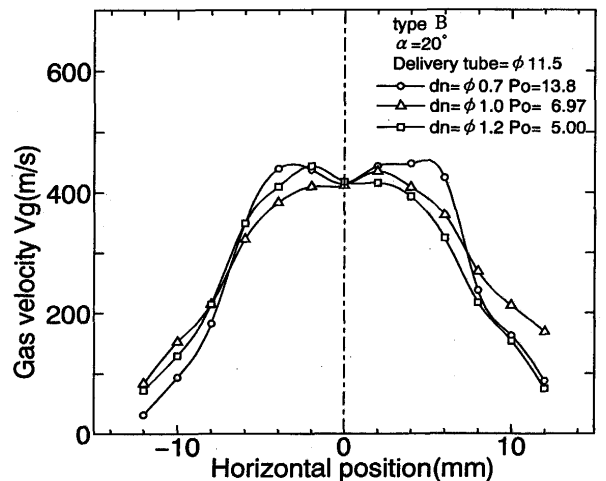


Fig. 7. Effect of spouting gas pressure on gas velocity distribution as measured along a horizontal line at same gas mass flow rate.

何焦点まわりの流速分布との関係を求めた結果をFig. 7に示す。ガス質量流量がほぼ同一の場合には噴射圧力を増大させても幾何焦点まわりの流速値ならびに流速分布にほとんど変化は認められなかった。児島ら¹⁰⁾は直円管からの不足膨張噴流について、マッハ数が増すと擬似衝撃波の長さが増すことを示しており、小径孔からの高圧噴射と大径孔からの低圧噴射の両者で流速減衰の少ないコア一部の長さが同様になり、合流した噴流の流速がほぼ同じになったと考えられる。

4. 考察

噴射角度の上限界が約50°であることは実験結果から明らかであるが、その要因を明らかにすることは高流速ガス流れの生成手法検討に有効と考えられる。

また粉末製造の経済性を考えればより少量のガスで微粉末を生成することが望まれている。3・3節に記した実験結果から噴射ガスの高圧化は効果が認められず、ガスジェットの流速は噴射孔からの距離に従って減衰することが避けられないため、高流速のガスジェットを生成する手法として噴射孔の溶湯管への近接化を検討した。

4・1 噴射角度が大きい場合の幾何焦点まわりの流速

Fig. 6に示したとおり噴射角度 $\alpha = 65^\circ$ のアトマイズノズルでは、溶湯管端部に十分な負圧を生成するべく $L_m = 10\text{mm}$ とした場合、幾何焦点を中心とする水平面内の垂直方向ガス流速は著しく低下するとともに双峰状となった。そこで L_m の影響を調べるため、 L_m を減じ溶湯管のガス流れへの干渉が少なくなる $L_m = 6\text{mm}$ の場合(このとき $P_m = -0.5\text{kPa}$)について幾何焦点まわりのガス流速を測定した結果をFig. 8に示す。 L_m を減じると高流速化するとともに流速分

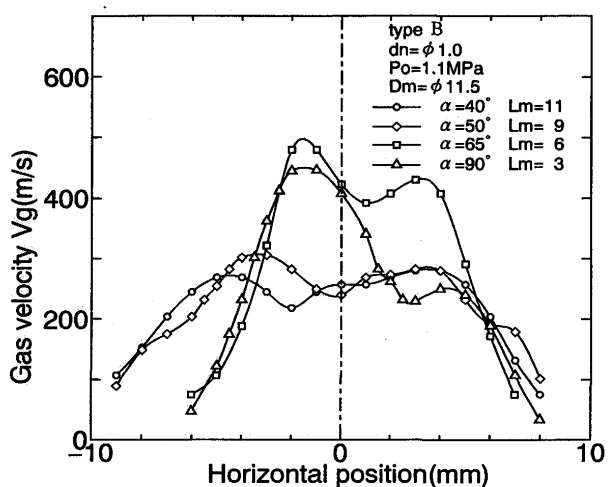


Fig. 8. Comparison of gas velocity distribution along a horizontal line with different apex angle values in case of retracted melt delivery tube tip position.

布は単峰状に近くなった。また中心軸での流速は $\alpha = 50^\circ$ の場合よりも増加した。さらに $\alpha = 90^\circ$ の場合も L_m を減じると噴射ガスは $\alpha = 65^\circ$ の場合と同様に高流速化し単峰状となった。

すなわち、噴射角度が大きい場合にも噴射されたガスジェットは幾何焦点近傍で集束して垂直方向に高流速を有するガス流れを生成するが、噴射角度が低い場合より溶湯管の影響を強く受け溶湯管の突き出しに伴って急速に減速することが分かった。

噴射角 α が $50^\circ \sim 65^\circ$ より大きい場合には溶湯管に沿って上方へのガス吹き上げが観察⁵⁾されており、噴射ガス流れの分離が生じていると考えられる。高角度噴射におけるガス流速減衰は、溶湯管端での噴射ガス流れの分離が一因と考えられる。

4・2 噴射孔を近接させた場合のガス流動特性

ガス噴射孔を溶湯管端部により近接させた場合におけるアトマイズノズルから噴射されるガスの流動特性を検討するため、溶湯管径ならびに噴射角度が同一で、ガス噴射孔を配置した円の径 D_n を減少させたtypeCのアトマイズノズル(Table 1の④)を用いてガス流速を測定した。

4・2・1 アトマイズノズルからの垂直距離とガス流速

上記の供試アトマイズノズルに1.1MPaのアルゴンガスを供給して噴射し、3・1節と同様にして垂直方向の位置と流速との関係を調べた。このとき P_m が約 -20kPa となるよう $L_m = 3\text{mm}$ の位置に溶湯管を固定した。測定結果から、幾何焦点の近傍において上下方向でガス流速の変化は比較的小さく、3・1節に記したtypeBのアトマイズノズルでのガス集合流れと同様の特性を示した。本ノズルの場合も垂直下向きガス流速の水平方向分布は幾何焦点を通る水平面内で測定することで代表性があると見なした。

4・2・2 溶湯管突き出し長の影響

上記4・2・1項と同一条件でガス噴射し、溶湯管と同一寸法の圧力プローブIを微動装置に固定して L_m に対する P_m の変化を測定した。ここで P_m が正から負に変化し、 L_m 値の増加に対してほぼ直線的に減少する領域における P_m の増分 ΔP_m と L_m の増分 Δz の比を圧力勾配 $\Delta P_m / \Delta z$ とする。Fig. 9に測定結果を示すとおり噴射孔の溶湯管への近接により $\Delta P_m / \Delta z$ が著しく増大するため、溶湯管のアトマイズにおいては溶湯管を所定の位置に厳密に設定することが求められる。

つぎに、溶湯管のガス流れへの干渉が少ない $L_m = 0\text{mm}$ の場合(このとき $P_m = \text{約} -5\text{kPa}$)、ならびに P_m が L_m に対して飽和し約 -20kPa を示す $L_m = 3\text{mm}$ の場合について幾何焦点を通る任意の水平な直線に沿ってガス流速を測定した。結果をFig. 10に示すとおり幾何焦点まわりのガス流速分布は、溶湯管の突き出し長にほとんど影響されず同様な流速分布を示した。

上記の実験結果のとおり、噴射孔を溶湯管に近接させる

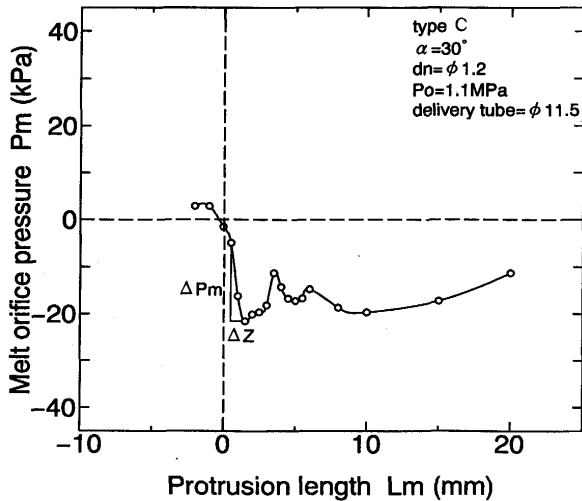


Fig. 9. Melt orifice pressure for typeC atomization nozzle($\alpha=30^\circ$).

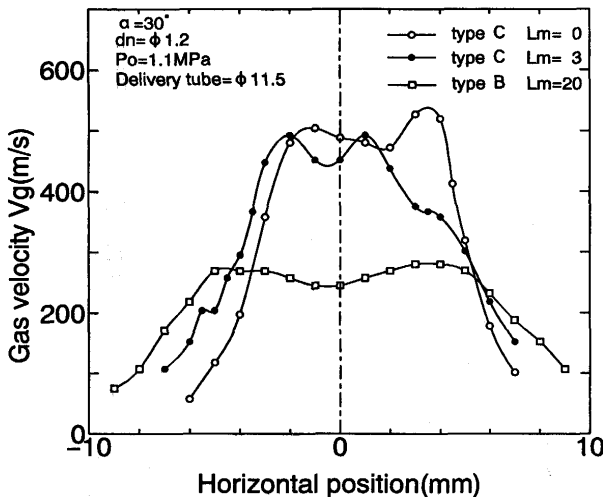


Fig. 10. Comparison of gas velocity distribution along a horizontal line with different atomization nozzle configuration.

ことにより幾何焦点まわりのガスを高流速化できることが明らかである。これは単孔ノズルから噴出するガスジェットの流動特性を検討した児島らの研究結果^{9,10)}に照らして考察すれば、Fig.10に示す流速分布はアトマイズノズルから噴射されるガスジェットがコア状態を保って集束しているのに対し、typeB($\alpha=40^\circ$)のアトマイズノズルの流速分布は噴射ガスがすでに周囲気体を取り込んで低流速化したも

のが集束した結果と見なすことができる。本実験に用いたtypeC($\alpha=30^\circ$)のアトマイズノズルでは噴射孔と幾何焦点間の距離 L_g が25.1mmに対して、typeB($\alpha=40^\circ$)では $L_g=42.5$ mmである。高流速ガス流れを生成するには噴射孔と溶湯管の近接化が有効なことが分かった。

5. 結言

ガスアトマイズ法による微粉生成の効率化を目指して高流速の噴射ガスが集めたガス流れの特性について検討し、アトマイズノズル設計に必要な基本的なガス流れの挙動を調べた。得られた主な結果は次のとおりである。

(1) 独立した多数の円孔からガスジェットが逆円錐状に噴射され、溶湯管がガス流れに突き出した供試アトマイズノズルでは、噴射ガスジェットは幾何焦点近傍で集束して垂直下向きに流れ、幾何焦点から下方約50mm以上の区間で著しい流速減衰は認められなかった。

(2) 噴射角度 α が 50° より小さいアトマイズノズルでは溶湯管の突き出し長増加による幾何焦点まわりの噴射ガス流速の減少はほとんど認められなかった。これに対して α が 65° より大きい場合は溶湯管の突き出し長を増すと噴射ガス流速は著しく減少し、溶湯管出口に適正な負圧を生成させて吹き上げを発生しない突き出し長においては低流速となった。

(3) 噴射するガス質量流量が同一の場合、噴射ガス圧力を高くしても幾何焦点まわりの流速は増加しなかった。

(4) アトマイズノズルの噴射孔を溶湯管に近付けることにより幾何焦点まわりのガス流速は大きく増加したが、溶湯管突き出し長に対する溶湯管出口圧力の変化が大きくなるため、適切な負圧を生成する溶湯管位置の範囲は限定される。

文 献

- 1) 永井伸樹：燃料協会誌, 70 (1991), 288.
- 2) 永井伸樹：液体の微粒化に関する講演会講演論文集, (1993), 19.
- 3) 倉林俊雄：日本機械学会誌, 89 (1986), 603.
- 4) H.Lubanska: J.Met., 22 (1970), 45.
- 5) 福田 匡, 中西睦夫, 久保敏彦：鉄と鋼, 82 (1996), 665.
- 6) 生井武文, 松尾一泰：圧縮性流体の力学, 理工学社, 東京, (1977), 165.
- 7) J.Liu, L.Arnberg, N.Backstrom, H.Klang and S.Savage: Materials Science and Engineering, 98 (1988), 43.
- 8) 児島忠倫, 松岡祥浩：日本機械学会論文集, 55 (1989), 188.
- 9) 児島忠倫, 松岡祥浩：日本機械学会論文集, 52 (1986), 2021.
- 10) 児島忠倫, 松岡祥浩：日本機械学会論文集, 53 (1987), 3146.