

# コンファインド型ガスアトマイズノズルにおける 溶湯管周辺の圧力分布

福田 匡\*・中西 睦夫\*<sup>2</sup>・久保 敏彦\*

Pressure Distribution around the Melt Delivery Tube for a Confined-type Gas Atomization Nozzle  
Tadashi FUKUDA, Mutsuo NAKANISHI and Toshihiko KUBO

**Synopsis :** Gas flow characteristics in the gas atomization have been studied to design atomization nozzles for fine powder production preventing blockage. A conical jet flow is formed for the confined-type atomization nozzle that has a melt delivery tube protruding into center portion and discharges discrete gas jets toward the geometrical focus. Converging around the geometrical focus, the gas jet flows vertically downward with making vortices and reverse gas flow beneath the melt orifice. The stability of atomization is determined by the pressure at the melt orifice and vortices' size, which vary with protrusion length of melt delivery tube. Molten metal fed out of the melt delivery tube spreads into the conical gas flow region, and is pulverized near the geometrical focus. When the protrusion of the melt delivery tube is insufficient, horizontal flow of molten metal along the end of melt delivery tube is formed, resulting in the blockage of the nozzle. In case the atomization nozzle has larger apex angle, upward gas flow along the outer surface of the tube is observed in spite of suction pressure at melt orifice, leading to an unstable gas flow due to the adhesion and growth of molten metal droplets. The suction pressure at melt orifice can be explained in terms of Bernoulli's equation.

**Key words :** powder metallurgy ; superalloy ; atomization ; gas jet ; blockage ; confined-type nozzle ; vortices flow ; suction pressure.

## 1. 緒言

粉末冶金法は鉄系の焼結機械部品の製造を中心に、高速度鋼や高Ni合金鋼の素形材製造ならびに射出成形法による小型で複雑形状を呈する部品製造にも適用が広がっている。そのなかで、多種類の合金成分を含む高合金材料では原料粉末の製造にアトマイズ法が適用される場合が多く、とくに酸化による特性劣化を避けるべき成分系の場合には不活性ガスを噴霧媒体に用いるガスアトマイズ法が適用されることが多い。

ガスアトマイズ粉末製造では目標粒度の粉末を安定して生成することができるアトマイズノズルが重要で、その安定運転には、噴射ガスから派生した逆流ガスが溶湯流から分裂した溶滴を吹き上げ、アトマイズノズルに沈着、成長させることによるノズル閉塞(BlockageもしくはFreeze-offと呼ばれる現象<sup>1)</sup>)を発生しないことが第一に求められる。しかしながら一般に微粉末を生成するために大流量、高流速のガスを溶湯流に吹き付けると上記のノズル閉塞が発生しやすい。したがってガス流動の点からは、溶湯流を吹き上げるガス逆流が許容範囲内であること、ならびに溶湯が

安定してガス流れ場に供給されるよう溶湯管出口部に周囲に比べて低圧となる領域を生成することが求められる。

アトマイズ操作の安定性について関野ら<sup>2)</sup>は環帯からガス噴射する方式のフリーフォール(Free-fall)型アトマイズノズルを用いて溶鋼の安定噴霧条件を検討し、焦点調整リングを用いて環状スリットから噴射されるガスジェットの方法を変化させて噴射ガスの主流が焦点を結ばないような円筒形の速度分布とした場合には溶鋼の吹き上げがないとしている。しかし溶鋼吹き上げの限界条件ならびにその理由は明らかにされていない。またAndersonら<sup>3)</sup>は溶湯管とガス噴射器が一体配置されて溶湯流の自由流下域がないコンファインド(Confined)型アトマイズノズルについて、溶湯管出口が負圧であれば安定したアトマイズ状態となること、ならびに溶湯管出口に生成するガスの渦流れとこれに起因する溶湯管端部に沿った溶湯流の水平運動が存在することを浅底水槽の模擬実験および溶湯アトマイズの写真を検討した結果として述べている。溶湯管出口のガス渦流れの生成についてはUnal<sup>4)</sup>も報告している。しかしながら、これらのガス流れの研究では溶湯管出口部に生成する溶湯を吹き上げようとするガス渦流れとノズル閉塞との関連について

平成8年1月10日受付 平成8年4月12日受理 (Received on Jan. 10, 1996; Accepted on Apr. 12, 1996)

\* 住友金属工業(株)未来技術研究所 (Advanced Technology Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 1-8 Fuso-cho Amagasaki 660)

\* 2 住友金属工業(株)未来技術研究所(現:(株)住友金属エレクトロデバイス) (Advanced Technology Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., now Sumitomo Metal Electronics Devices Inc.)

は議論されていない。その他、Veistinenら<sup>9)</sup>によるコンファインド型アトマイズノズルの溶湯管先端形状と発生する負圧との関連性に関する検討あるいはノズル閉塞の実例<sup>10)</sup>が発表されているが、これらの従来知見のみではアトマイズノズルから噴射されるガス流れについて溶湯の安定アトマイズに必要な特性が明らかにされていない。

そこで本研究では、ガスアトマイズノズルにおける噴射ガスの流動特性を明らかにして、アトマイズノズルの安定運転に必要なガス流れの特性を検討した。

## 2. 実験方法

### 2.1 ガスアトマイズノズル

実験に供した代表的なアトマイズノズルの断面図をFig. 1に、各アトマイズノズルの主要寸法をTable 1に示す。Fig. 1に示すとおり供試アトマイズノズルでは原料の溶湯をガス流れ場に供給する溶湯管(Melt delivery tube)が噴射ガスの流れ場に直接開口しており、溶湯は溶湯管出口から自由落下しないままガス流れによって粉碎されることが観察されるので、コンファインド型の一類に類別できる。本アトマイズノズルでは高圧のガスが複数の独立した円孔ノズルを

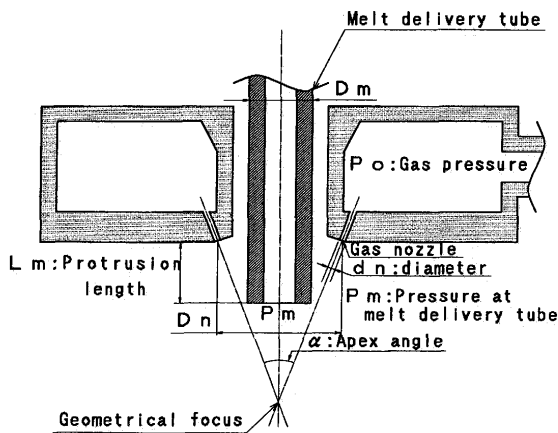


Fig. 1. Schematic of atomization nozzle used in this study.

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

No.	type	$\alpha$	Dn(mm)	Dc(mm)	dn(mm)	N
①-1	B	20°	22	16	1.0	20
①-2	B	40°	22	16	1.0	20
①-3	B	50°	22	16	1.0	20
①-4	B	65°	22	16	1.0	20
①-5	B	90°	22	16	1.0	20
①-6	B	100°	22	16	1.0	20
①-7	B	120°	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

通して斜め下向きに一定の角度で、幾何焦点(Geometrical focus)に向かって噴射されるとともに、噴射ガスの流れ場に溶湯管端部を突き出すことにより、後述のように溶湯管出口部に低圧領域を生成して、溶湯の円滑な流下を促す作用を有している。

### 2.2 ガス噴射実験の方法

実験装置の概略構成をFig. 2に示す。高圧のアルゴンガスをガスボンベの集合装置から配管、減圧弁を介してアトマイズノズルに供給した。アトマイズノズルから噴出させるガス圧力はアトマイズノズル上流に設けた弁によって調整し、この圧力調整弁の下流に設けた圧力計によって測定した。

アトマイズノズルから噴射するガスと同種のガスで内部がほぼ置換されたタンク内にアトマイズノズルを固定し、微動装置を用いて圧力測定プローブを測定範囲内の任意の点に移動してアトマイズノズルから噴射されるガス流れ場の状態を測定した。タンク底部は導管を通じて大気開放されており、ガス噴射実験においてタンク内圧は大気圧と等しい。

溶湯管出口の圧力を測定するには、熱間でのアトマイズ粉末生成に用いる溶湯管と外径が同一のステンレス管を圧力測定プローブIとして微動装置に固定し、Fig. 1に示すようにガス噴射器の中央に挿入して、プローブIの先端位置とガスアトマイズノズルのガス噴射孔との垂直方向距離である突き出し長 $L_m$ が所定の値になるよう調整した。さらにまた溶湯管を所定位置に固定したまま、その内側に細い直管の圧力プローブIIを溶湯管貫通孔との気密を保ちつつ溶湯管の中心軸上を移動して各点の圧力を測定した。圧力プローブI, IIは片端を圧力導管によって差圧計の測定孔に接続して大気との圧力差を記録した。

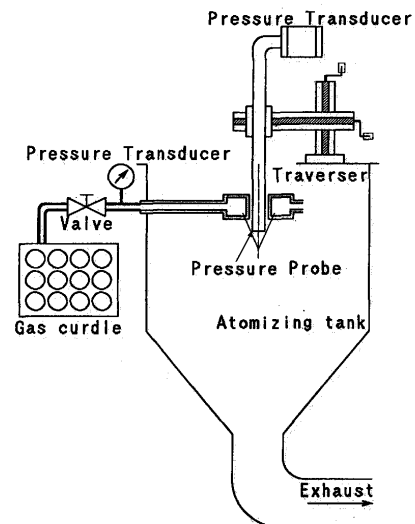


Fig. 2. Schematic of pressure probe experiment for gas atomization.

### 2・3 溶湯アトマイズ実験の方法

Fig. 2 に示すガス噴射実験装置の上部に溶湯供給装置を気密に接続して粉末製造実験を行った。インコネル625に相当する化学成分を有する合金塊を高周波溶解し、約1500°Cに調節してFig. 1 に示すアトマイズノズルの溶湯管に溶湯を供給した。溶湯管出口から流出する溶湯に約4 MPaのアルゴンガスを吹き付け、溶湯がアトマイズされる状況をアトマイズノズル側方に設けた観察窓からビデオ撮影・録画した。

## 3. 実験結果

ガスのみを噴射してシュリーレン写真の撮影ならびに溶湯管出口近傍の圧力測定を行うとともに、溶湯のアトマイズ状況をビデオ録画し観察した。これらの結果からアトマイズの安定性に関して検討すべき事項を把握した。

### 3・1 溶湯管出口部のガス流れ

Table 1-③のアトマイズノズルから噴射されるガス流れを側方からシュリーレン法で撮影したものをFig. 3 に示す。各ガスジェットはコア状態を保って斜め下向きに流れ、溶湯管の端部が流路の延長線上に存在するため、これを回避するように流動方向を多少変えて溶湯管の端部を通過したあと、滑らかに方向を変えてほぼ垂直下方へ流れる。なお、集合したガスジェットには繰返し衝撃波が認められた。このように溶湯管出口部には噴射ガスジェット群で囲まれた逆円錐状の領域が生成した。

アトマイズ操作が安定して行われるためには、溶湯管出口部で上記の逆円錐状にガスが噴射される領域において、上向きの逆流ガスが微弱で溶湯を吹き上げないこと、および溶湯管出口端の圧力が周囲に比べて低く溶湯管内を溶湯が安定して流下することが必要である。

溶湯管出口部の圧力とアトマイズノズルの運転の安定度との関係を検討するため、溶湯管端部とガスジェットで囲まれた領域内のガス流れについて調べた。中心に貫通孔を有する外径11.5mmの円柱状の溶湯管が所定の突き出し長となるように、Table 1-③に諸元を示したアトマイズノズルの中心に固定し、元圧1.1MPaのアルゴンガスを噴射した。外径2 mm、内径1.6mmの圧力プローブIIを前記の貫通孔

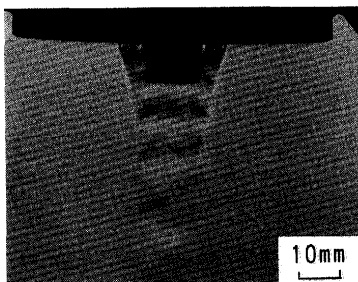


Fig. 3. Schlieren photograph of gas only flow for an atomization nozzle type B.

内を移動させることにより、プローブIIの先端と溶湯管端部との垂直方向距離Z1を変化させて、各点の圧力の大気圧に対する差Pzを測定した結果をFig. 4 に示す。

通常の溶湯アトマイズを行う状態での溶湯管位置(Lm=15mm)では、Pzは溶湯管出口から下流に進むにしたがって増大し、溶湯管出口端(Z1=0)での-12kPaから幾何焦点(Lm+Z1=41mm)の約15mm上方の点(Z1=11mm)で極大値+12kPaの正圧を示したあと減少して再び負圧値を示した。いっぽう吹き上げ現象が発生する場合の溶湯管突き出し長(Lm=10mm)では、溶湯管出口端でほぼ大気圧に等しく、幾何焦点の約23mm上方の点(Z1=8mm)で極大値+12kPaの正圧を示し、さらにZ1が増すとPzは減少した。すなわち前記の通常アトマイズの状態に比べて圧力の極大値はほぼ等しいものの、溶湯管出口端面から幾何焦点近傍までの間で正圧を示す領域が広い。なお前記二者の中間的な突き出し長(L=12mm)の場合は、正圧を示す領域の広さは前記二者のほぼ中間値を示した。また正圧の極大値を示す位置より下方でPzとZ1の関係はLmによらずほぼ同一の曲線で表わすことができた。

これらのことから、幾何焦点の近傍から上方に向かう逆流を含む渦流れが生成しており、通常のアトマイズ条件では渦流れ域は小さく溶湯管出口では負圧であるのに対して、吹き上げ状態の場合は渦流れ域が大きく形成されるため溶湯管出口圧力が高くなると解釈できる。後述する溶湯アトマイズで観察される溶湯流下の不安定は、この幾何焦点近傍から上方に向かうガス渦流れに起因するものと考えられる。同様の逆流ガス流れ現象について、Andersonら<sup>3)</sup>は噴射ガスジェットと溶湯管壁との位置関係によって変化することを示し、ウェイク流れと相似する現象としている。またUnal<sup>4)</sup>は鉛直方向に噴出する環状ジェットが内側に曲がってよどみ点を生成し、溶湯管出口端部とて囲まれた内部領域

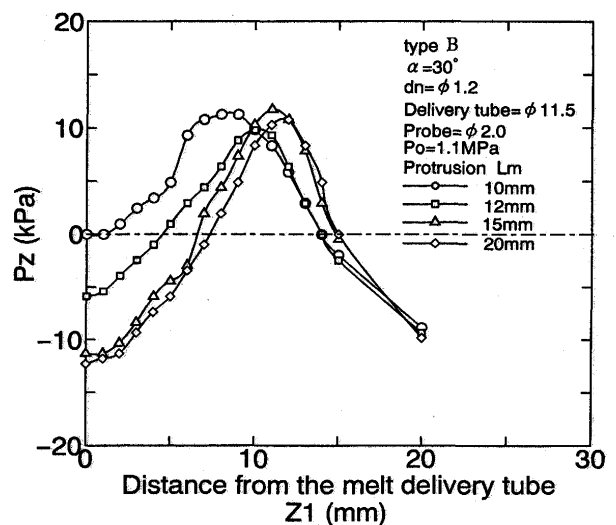


Fig. 4. Pressure distribution in gas jet cone region (pressure probe II measurement).

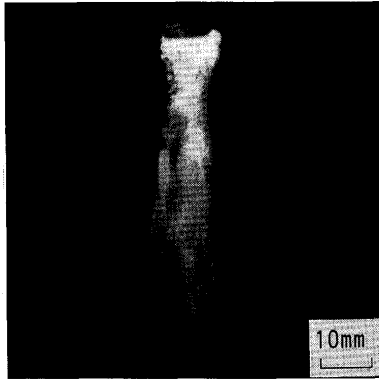


Fig. 5. Photograph of molten metal atomization taken using high-speed VTR of 0.1ms duration.

に循環渦流れが生成することを報告しており、供試ノズルにおいても溶湯管出口部に逆流を含む渦流れが生成していると考えられる。

### 3・2 溶湯のアトマイズ状況

Table 1-③のアトマイズノズルを用いた溶湯噴霧の状況を撮影したビデオ画像の例をFig. 5に示す。溶湯は溶湯管の出口からおおむね溶湯管外径と幾何焦点を結ぶ逆円錐状の領域に広がって赤色を呈し、幾何焦点付近から下方では暗赤色となることが観察された。ビデオ画面を一コマずつ送って溶湯の動きを観察した結果から、溶湯管出口に流下した溶湯は溶湯管出口の水平端面上を溶湯管外縁に向かって移動し、上記の逆円錐状領域に広がった後、幾何焦点付近で微細に分裂して、ほぼ垂直下向きに流れることが分かった。

溶湯管出口部において周囲圧力とほぼ同じ値あるいは正圧を示し吹き上げが発生する位置に溶湯管を配した場合には、溶湯流が溶湯管端部へ比較的多く流れ、噴射ガスにより冷却された溶湯がまず溶湯管外周部に付着して凝固し、さらに新たな溶滴が付着、凝固を繰り返して溶湯管の中心部へ向かって凝固した合金材料が成長し、やがてノズル閉塞に至ることが観察された。

以上のことから、溶湯管出口の圧力は、溶滴の吹き上げならびに溶湯管外周部への溶湯付着を促す幾何焦点近傍からのガス逆流と強い関連性を有しており、アトマイズ操作の安定性と緊密に関連していると考えられる。加えて溶湯管出口圧力は溶湯管内の溶湯流下の安定性に影響を及ぼす。したがって溶湯管出口部の圧力特性を明確にして溶湯の安定アトマイズ条件を検討することとした。

### 3・3 溶湯管の位置と発生負圧との関係

溶湯管出口の圧力にはアトマイズノズルの諸元ならびにガス噴射条件のさまざまな因子が影響を及ぼすと考えられるが、溶湯管が噴射ガス流路に存在することによる噴射ガス流れへの影響度が溶湯管出口部の圧力を決定していると考えられる。したがって溶湯管の突き出し長を変化させる

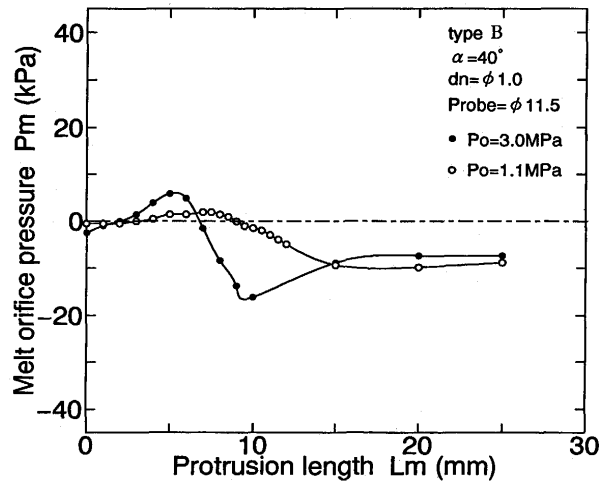


Fig. 6. Effect of melt delivery tube protrusion on the melt orifice pressure.

とともに、噴射角度の異なるアトマイズノズルを用いて溶湯管出口部の圧力を測定することにより、溶湯管近傍のガス流れの特性を求めた。

Table 1の①-2に諸元を示すアトマイズノズルを用い、外径11.5mmの圧力プローブIの突き出し長Lmを変化させ、噴射圧力1.1MPa、3.0MPaにおいて、溶湯管出口部の圧力の大気圧に対する差Pmを求めた結果をFig. 6に示す。PmはプローブIの突き出し長Lmが小さい状態では正の値であるが、Lmを増すに従って正から負に転じる。この間、Lmの増加とPmの減少がほぼ比例する、すなわち圧力勾配が一定となる領域がある。更にLmを増すとPmが多少回復して一定値となる。このようなPmの変化挙動は噴射圧力によらず同様であるが、Fig. 6に示すように噴射圧力が高いほど、正圧および負圧の極大値ならびに圧力勾配は大きい。またPmが正から負に転じるLm値は噴射圧力が高いほど減少した。

### 3・4 噴射角度と発生負圧との関係

噴射角度 $\alpha$ が大きいほど噴射孔と溶湯流との距離が小さいため、高流速のガスを溶湯に吹き付けて微細に粉砕できると考えられるが、いっぽう噴射ガスジェットの衝突による溶湯吹き上げの発生を考慮する必要がある。

Table 1-①に示す $\alpha$ が $20^\circ \sim 120^\circ$ までのアトマイズノズルを用い、外径11.5mmの圧力プローブIの突き出し長Lmを変化させてFig. 6に示した場合と同様にPmの変化を噴射圧力1.1MPa、3.0MPaにて測定した。 $\alpha$ が $20^\circ \sim 120^\circ$ のすべてのアトマイズノズルについてPmが負となるLmが存在した。またLmの増加とPmの減少がほぼ比例する領域も存在し圧力勾配 $\Delta Pm/\Delta Z$ と噴射角度 $\alpha/2$ の正弦との関係を求めた結果をFig. 7に示す。ここで $\sin(\alpha/2)$ との関係をみたのは、4章に後述するようにガスジェットに対する溶湯管の干渉度合と $\sin(\alpha/2)$ が比例すると見なすことができるためである。 $\Delta Pm/\Delta Z$ は噴射角度が増して $\sin(\alpha/2)$ が増すほど大きくなるが $\alpha$ が $50^\circ \sim 65^\circ$ より大きいと飽和する傾向が認められた。

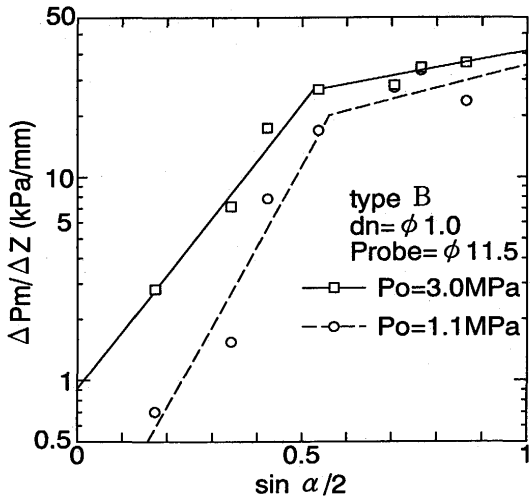


Fig. 7. Pressure gradient  $\Delta P_m/\Delta Z$  versus atomization nozzle apex angle.

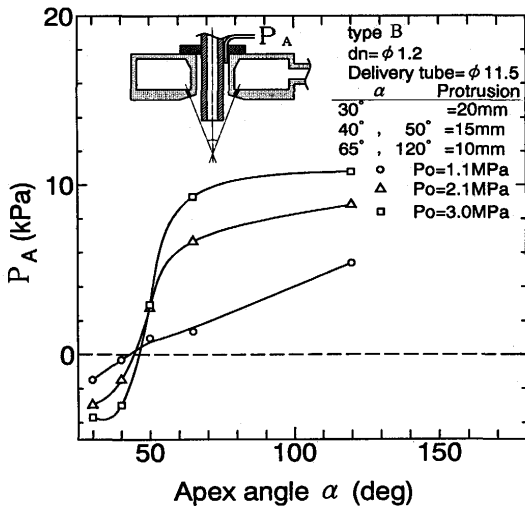


Fig. 8. Effect of apex angle and gas pressure on the annular space pressure of the atomization nozzle.

また、 $\alpha$ が $100^\circ$ と $120^\circ$ の場合には、圧力プローブ I の周囲からガスが上方に吹き上がる現象が観察された。

そこで溶湯管周囲のガス流れ特性を調べるため、供試ノズルの上部を円板を用いて気密に保ち、圧力が $1.1 \sim 3.0$  MPaのアルゴンガスを噴射して、溶湯管とガス噴射治具との環状間隙の圧力の大気圧に対する差 $P_A$ を測定した結果をFig. 8に示す。 $\alpha$ が約 $50^\circ$ より大きい場合、 $P_A$ は噴射圧力によらず正の値を示しており、噴射ガスは斜め下向きに流れて溶湯管出口部に負圧域を生成すると同時に、一部は溶湯管に沿って上方に吹き上げ $P_A$ が正になることが分かった。これらのことから噴射角度が約 $50^\circ$ より大きいと噴射ガスの一部が溶湯管端部から外表面を上方に吹き上がり、噴射ガスの一部は溶湯アトマイズに有効に使われない傾向のあることが分かった。

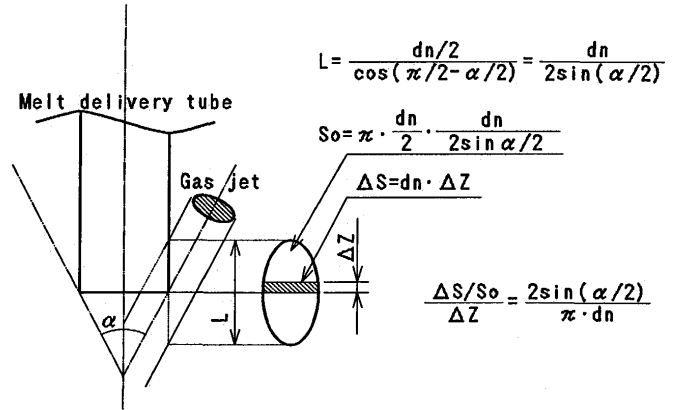


Fig. 9. Geometrical illustration of the melt delivery tube and gas jets.

#### 4. 考察

溶湯管出口圧力はアトマイズ操作の安定性に強い影響を与えることは上述のとおりであり、溶湯管出口部の圧力が決定される機構について考察する。

溶湯管出口に負圧が生成されるのは、溶湯管の端部が噴射ガス流れに干渉するような位置関係にある場合であり、溶湯管端部近傍を流れるガス流れが溶湯管端部を回避して流れるので、溶湯管の影響を受けない場所を流れるガス流れに比べて流速が増加して溶湯管出口部の圧力が低下するためと考えられる。溶湯管の突き出しによる流速の増加と圧力低下との関係を検討するため、噴射ガスジェットが溶湯管によって受ける干渉割合を求める。

Fig. 3に示したガス流れの形態から、Fig. 9に示すように噴射ガスジェットは直径 $dn$ の噴射口から外径 $dn$ を保ったまま溶湯管近傍まで流れると近似する。このガスジェットの溶湯管軸方向すなわち鉛直方向の断面は短径 $dn/2$ 、長径 $dn/2/\sin(\alpha/2)$ の楕円と近似して面積 $S_o$ は(1)式で示される。この楕円上への溶湯管の投影面積が溶湯管の突き出し長の増分 $\Delta Z$ によって変化する値 $\Delta S$ は、楕円の中心に溶湯管端部が一致する位置を中心とする区間と、Fig. 6に示したように $P_m$ が $L_m$ に対してほぼ直線的に変化する区間が対応するものと見なして、横を楕円の短径 $dn/2$ 、縦を $\Delta Z$ とする矩形として(2)式で示される。(1)、(2)式から溶湯管による干渉面積の突き出し長に対する勾配は(3)式で表わされる。

$$S_o = \pi (dn/2) \cdot \{ (dn/2) / \sin(\alpha/2) \}$$

$$= \pi (dn/2)^2 / \sin(\alpha/2) \dots\dots\dots (1)$$

$$\Delta S = dn \cdot \Delta Z \dots\dots\dots (2)$$

$$(\Delta S/S_o) / \Delta Z = 2 \cdot \sin(\alpha/2) / (\pi \cdot dn) \dots\dots\dots (3)$$

溶湯管を回避するように噴射ガスが流れて加速されると仮定すれば、上記の干渉面積の増加に応じて噴射ガスの流速が増し、溶湯管端部の圧力が低下することとなる。(3)式によれば干渉面積割合の勾配 $(\Delta S/S_o) / \Delta Z$ は噴射孔径と噴

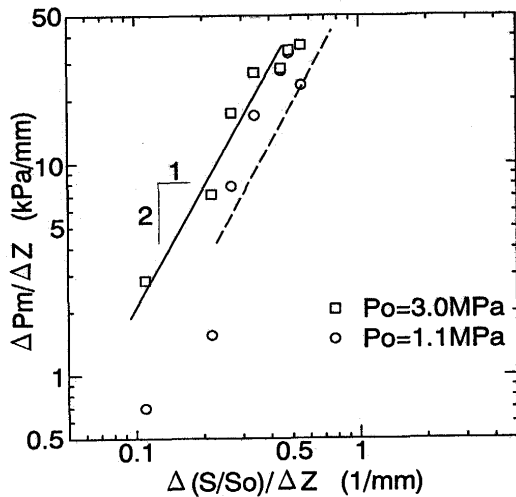


Fig. 10.  $(\Delta S/S_0)/\Delta Z$  versus  $\Delta P_m/\Delta Z$  for various apex angle atomization nozzle.

射角度によって決定される。ここでは噴射孔径 $d_n$ は同一として噴射角度を変えたアトマイズノズルの流動特性を検討した。

Fig.10に溶湯管の突き出し長に対する干渉面積割合の変化率 $(\Delta S/S_0)/\Delta Z$ と溶湯管出口圧力の溶湯管の突き出し長に対する変化率(圧力勾配) $\Delta P_m/\Delta Z$ との関係を示す。この結果から噴射圧力が3.0MPaの場合、 $\Delta P_m/\Delta Z$ は $(\Delta S/S_0)/\Delta Z$ のほぼ2乗に比例して変化しており、ガス流速が $(\Delta S/S_0)$ に比例して増加すると仮定すれば圧力が流速の平方に比例して変化するベルヌイの定理に従う現象と見なすことが出来る。また、噴射圧力が1.1MPaの場合の測定結果はバラツキが多いものの、おおむね前記と同様に $\Delta P_m/\Delta Z$ が $(\Delta S/S_0)/\Delta Z$ の2乗に比例すると見なせる。このことから溶湯管出口には、溶湯管の影響がない場合にガスジェットが集合することによって正圧域が生成するが、溶湯管を突き出すにしたがってガス流れの加速に基づく圧力降下の作用により負圧域が形成されていくと考えられる。

このほか溶湯管の外径の差あるいは溶湯管とアトマイズノズルとの気密化によっても圧力勾配は変化しない実験結果が得られているので、溶湯管出口部での負圧生成は溶湯管端部の局所的な流れで決まると考えられる。

## 5. 結言

溶湯のガスアトマイズにおける吹き上げ現象の定量的把握ならびに高流速のガス噴流が集合したガス流れの特性について検討し、ノズル設計に必要な基本的なガス流れの挙動を検討した。主な結果は次のとおりである。

(1) 独立した円孔から噴射したガスジェットを逆円錐状に形成し溶湯管を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収束して垂直下向きに流れ、一部は幾何焦点近傍から上向きに逆流する渦流れを形成する。溶湯管から流出した溶湯は、一部が溶湯管の端面上を水平方向に移動して逆円錐状領域に広がった後、幾何焦点近傍で粉化される。

(2) 溶湯管の突き出し長によって管端の圧力ならびに逆流ガス流れの大きさが変化し、溶湯アトマイズの安定度と溶湯管内の溶湯流下に影響を与える。

(3) 溶湯管出口での負圧生成は溶湯管を回避するガス流れの加速で説明され、ガス噴射条件ならびにガス噴射孔と溶湯管の位置関係等で決定される溶湯管端近傍の局所的なガス流れの条件で規定され、溶湯管の径あるいはアトマイズノズル上部の流通状態には影響されない。

## 文 献

- 1) Metals Handbook 9th.Ed.Vol.7, ed.by E.Klar, ASM, (1984), 29.
- 2) 関野昌蔵, 山宮昌夫, 西田卓彦: 鉄と鋼, 67 (1981), 541.
- 3) I.Anderson, H.Morton and R.S.Figliola: Physical Chemistry of Powder Metals Production and Processing, ed.by W.Murray Small, TMS, (1989), 229.
- 4) A.Unal: Physical Chemistry of Powder Metals Production and Processing, ed.by W.Murray Small, TMS, (1989), 201.
- 5) M.K.Veistinen, E.J.Lavernia, M.Abinante and N.J.Grant: Materials Letters, 5 (1987), 373.