

環帯式ノズルによる溶鋼の噴霧

関野 昌蔵*・山宮 昌夫*²・西田 卓彦*²

Atomization of Molten Steel by Annular Concentric Nozzles

Shozo SEKINO, Masao YAMAMIYA, and Tokuhiro NISHIDA

Synopsis:

An experimental annular concentric nozzle was made to study its features for gas atomization of molten steel and factors governing particle sizes. From experimental results the following conclusions were obtained. The nozzle must be adjusted so as not to focus the gas stream at the steel stream to avoid blowing up of molten steel and it was less effective for atomization than the individual jet nozzles(IJN) used by Lubanska. It showed narrower distribution of mean particle sizes, than IJN.

The following expression was obtained for the mean particle diameter χ_m ,

$$\chi_m = 2.9D \left(\frac{M}{A} \cdot \frac{1}{\sqrt{W}} \right)^{2/3}$$

D : nozzle diameter

M : molten steel flow rate

A : gas flow rate

W : Weber number

It can express the experimental values fairly well under the present conditions.

1. 結 言

溶鋼のガス噴霧は鉄粉の製造はもとより、SINGER らによつて研究されている粉末凝固による薄板製造法¹⁾、Ospray 法といわれる鑄型中に溶鋼粉末を吹きこんで直後に鍛造する方法²⁾、あるいは粒滴脱硫処理など多方面に応用しうる技術である。

溶鋼をガス噴霧してえられる鉄粉は真球に近いものであるが、そのさいの基本的問題は目的とする粒径と粒度分布をいかに効率よく製造しうるかということであり、このため種々のノズルが考案されているが、大別すると環帯式とランス式に分けられる。

環帯式ノズルでは環状スリットから高圧ガスを吹きださせて逆円錐形状のガス膜を形成させ、その焦点付近の乱流領域に溶鋼を流下させて噴霧を行わせる³⁾。一方ランス式ノズルでは数本のランスを熔融金属流に対して円錐形に配置しそれぞれのノズルからのガス流を1点に集中させ、そのさいできる乱流領域で噴霧を行わせる。

噴霧粒径、およびその分布を左右する因子にはノズル形状以外にも、溶鋼の物性、流出量、噴霧ガスの物性、

流量、速さなどがある。本論文では溶鋼流出量、噴霧ガス量、噴霧ガス圧力を変えて、比較的噴霧粒径の大きい範囲での環帯式ノズルの噴霧効率について検討した。

2. 実験装置および実験方法

実験に用いた噴霧ノズルおよび実験装置の概要をFig. 1, 2に示す。用いたノズルは環帯径 30 mm, 噴出角 25° および 30° のものである。両ノズルとも環帯幅調整リング、焦点位置調整リングを設け広範囲に噴霧条件を変えられるようにした。すなわち環帯幅調整リングでノズルのスリット幅を調整することにより、一定の噴霧圧力下でも自由に噴霧ガス流量を変えうるようにし、また焦点位置調整リングを上下することで突きだし長さを調整し、これによつて焦点位置を変えうるようにした。

実験にはまず電解鉄を誘導炉で溶解し、0.1%の炭素を含む温度 1610°C の溶鋼とし、るつぼ底に設けた内径 5~8 mm のアルミナ製ノズルから流下させ、そこに圧力 2~20 kg/cm² の窒素ガスを吹きつけて噴霧し水中に捕集した。このようにしてえられた鉄粉は脱水乾燥後篩分けて粒度分布を測定した。なお噴霧ガスの流量測定は

昭和 55 年 4 月 2 日受付 (Received Apr. 2, 1980)

* 新日本製鉄(株)基礎研究所 工博 (Fundamental Research Laboratories, Nippon Steel Corp., 1618 Ida Nakahara-ku Kawasaki 211)

*² 新日本製鉄(株)基礎研究所 (Fundamental Research Laboratories, Nippon Steel Corp.)

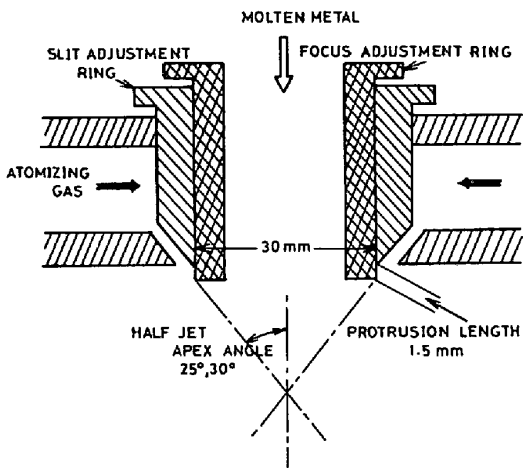


Fig. 1. Atomizing nozzle.

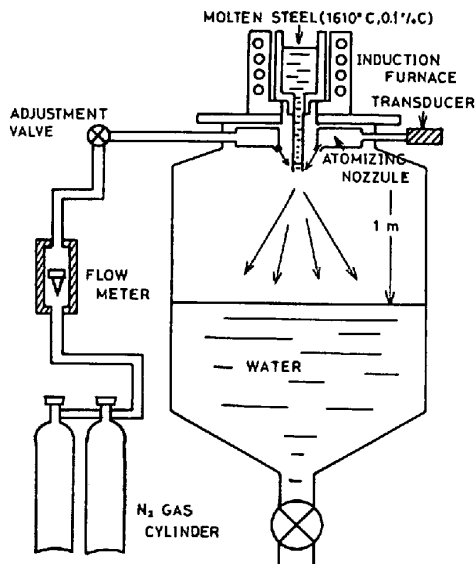


Fig. 2. Apparatus for atomization.

フロート式流量計で、噴霧圧力の測定はストレインゲージを用いた圧力変換器で行った。

3. 実験結果

3.1 噴霧ノズル特性

Fig. 3 には環帯中心線上の最大ガス流速の噴霧条件による変化をピトー管で測定した結果を示した。突きだし長さ零の場合には最大流速は幾何学的焦点位置でえられ、その値も突きだし長さが零でない場合と比較してかなり大きかった。しかしこの条件下では溶鋼は吹きあげられ噴霧が不可能であつた。そこで焦点位置調整リングを突きださせて噴霧ガス流の焦点を幾何学的位置よりも下方で合わせて噴霧を試みたところ、突きだし長さ 1.5 mm 以上で安定した噴霧がえられることがわかつた。図

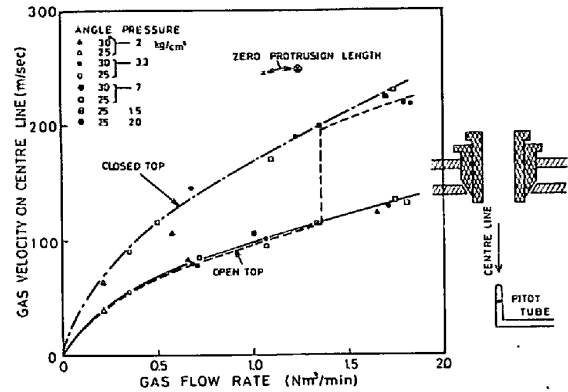


Fig. 3. Relation between gas flow rates and max gas velocities.

中実線で示した結果は噴出角 25° のノズルを用い、突きだし長さ 1.5 mm としたときの結果で、流速は突きだし長さ零の場合の半分以下になる。この場合はノズル中心線上の流速測定位置ではまだガスの主流が焦点を結んでいないといえる。破線の結果は噴出角 30° の場合であるが、噴霧ガス量の多いところで流速が不連続的に増加しているのは噴霧ガスの一部が焦点位置調整リングの端部をかすめて幾何学的焦点位置付近でぶつかり中心線上でのガス流量と流速が増大したためであり、やはり溶鋼の吹きあげが生じた。図中鎖線の結果は溶鋼が供給されるノズル上部空間をゴム栓で閉じて大気の吸いこみを断つた場合の結果であり、吸いこみ空気を加速する必要のないことから同一噴霧条件でもはるかに高流速がえられる。しかし上部から大気の流れがないので一段と吹きあげが起りやすくなる。

Fig. 4 には突きだし長さ 1.5 mm のときの噴霧ガス流速分布の測定例を示した。実線は 40 m/s, 90 m/s の等速線を示し、破線はノズルから一定距離はなれた位置での最大流速点を結んだものである。これからわかるように流れはむしろ円筒形で最も激しい噴霧が起る点でガスの主流はぶつかりあつていない。

3.2 噴霧過程

Photo. 1 は高速度カメラで噴霧現象を撮影したフィルムの一部を拡大して示したもので、溶鋼流は噴霧ノズル中心線上で乱れてちぎれが起り、さらに周辺の最大流速流によつて激しく噴霧されることがわかる。したがつて最終的に噴霧を支配しているのはこの最大流速流であるといえる。

Fig. 5 はノズル先端より 50 mm の位置で、そこを流れる噴霧ガス流の最高速度と噴霧ガス量の関係を示したもので、噴霧ガス量の増加にともなつて流速も増大している。又圧力を増せば速くはなるが 15 kg/cm² 以上の高圧にしてもさほど速くはならない。特に流量が 1.2 N

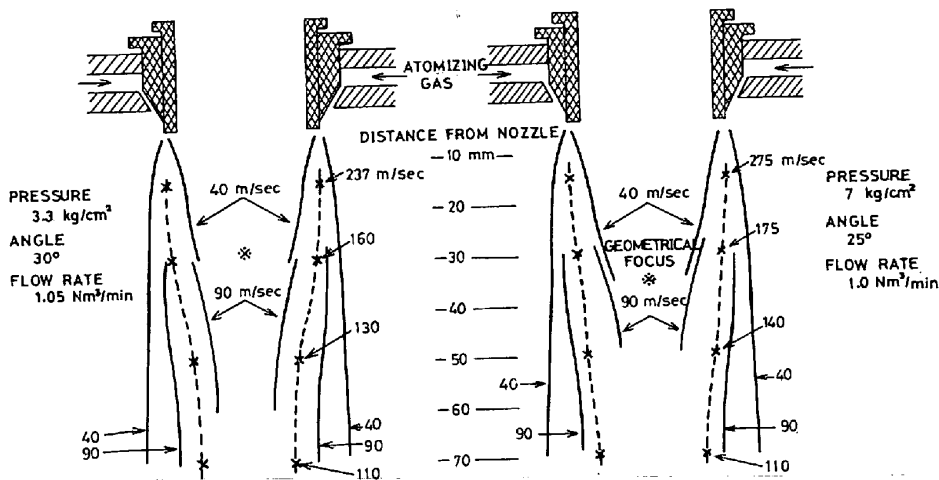


Fig. 4. Distribution of gas velocities below the nozzle head.



Photo. 1. Process of gas atomization taken by high speed photograph.

m³/min 以下では流速は 7 kg/cm² の場合と全く変わらない。これは低流量時にはスリット幅が狭く、流れの抵抗、すなわちエネルギー損失が大きいことによる。

3-3 生成鉄粉の平均粒径、粒度分布

Fig. 6 は生成鉄粉の幾何平均粒径と噴霧ガス量の関係を示したもので、パラメータは噴霧圧力、溶鋼ノズル径である。どの噴霧条件でも噴霧ガス量の増加とともに細粒化の傾向があり、溶鋼ノズル径を大きくすると粗粒になる。また噴霧圧力の増加とともに平均粒径は小さくなるが 7 kg/cm² 以上の高圧力にしても細粒化の効果は小さい。

溶鋼を噴霧した場合に平均粒径とともに重要な性質に粒度分布の広がりがある。一般的には粒度分布は狭い方

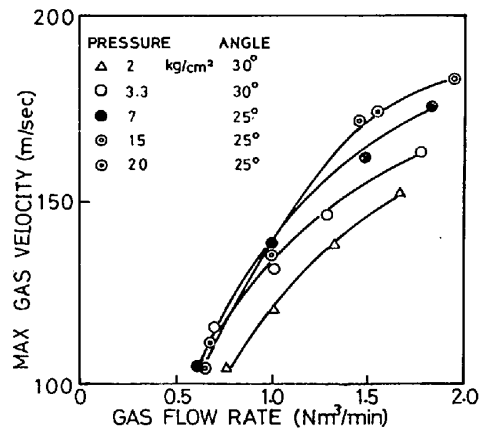


Fig. 5. Relation between gas flow rates and max gas velocities at the point 50 mm below the nozzle head.

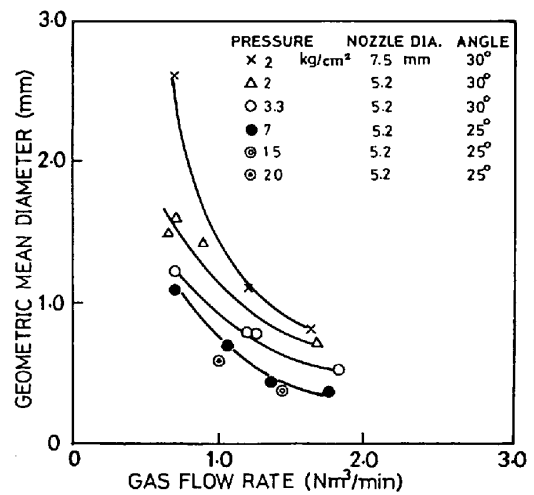


Fig. 6. Change of geometric mean diameters with gas flow rates.

が好ましい。狭ければ数種のサイズの粉末を混合することで所望の粒度分布をうることも可能となる。ガス噴霧

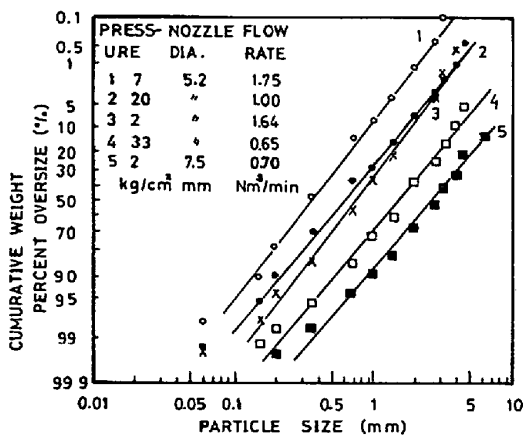


Fig. 7. Distribution of particle sizes represented on log-cumulative graph.

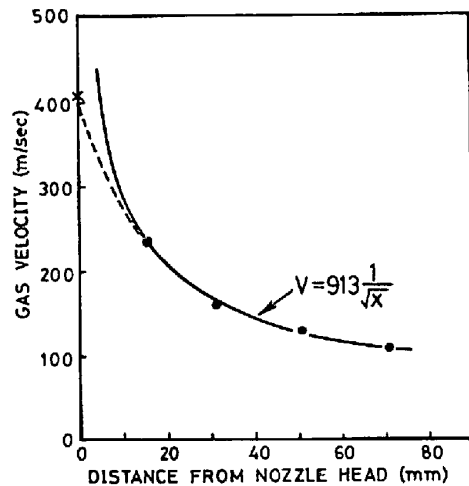


Fig. 8. Change of gas velocities with distances from nozzle head.

法でつくられた鉄粉の粒度分布は対数正規分布をとるといわれており、広がりゆめやすとして幾何標準偏差が用いられている。Fig. 7 はえられた鉄粉のうち代表的なものの対数確率線図である。いずれもほぼ直線にのっており、本実験で製造された鉄粉もまた対数正規分布をなしていることがわかる。幾何標準偏差は図上で累積百分率 50% に相当する粒径と、84.1% に相当する粒径の比から求められるが結果は 2.1~2.8 であつた。

4. 考 察

4.1 噴出ガスの挙動

ここでは噴霧に大きな影響をもつガス流速について検討する。

圧力 p_0 から p_1 へガスを噴出させる場合、理想気体であればその噴出ガス速度は V ,

$$V = V_{\max} \left\{ 1 - \left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right\}^{1/2} \dots\dots\dots (1)$$

$$V_{\max} = \sqrt{\frac{2}{\gamma-1}} C_0$$

C_0 : ガス中での音速

γ : c_p/c_v (定圧比熱と定容比熱の比)

で与えられる⁴⁾。 V_{\max} は無限大の圧力からガスを吹きださせたときの流速でガス流速はこの値を越すことはできず、空気では 760 m/s である。(1)式からわかることは圧力を 10 倍あげてもガス速度は 2 倍にもならないことである。ガス流量はノズル断面積と流速の積でえられる。

ノズルから吹きだされたガス流は三次元的に広がっていき、中心線上の速度は距離 x の $-\frac{1}{2}$ 乗に比例して減少していくことが知られている⁵⁾。 Fig. 8 には距離 x とガス流速の関係を示したが点は実測値を、実線はこれら

の測定点を最もよく表しうるような $-\frac{1}{2}$ 乗則を示している。この法則は x の零近傍では成り立たなくなる。図中 y 軸上に x 印で示した点はガス圧から求めたガスの噴出速度の計算値である。後述の解析結果から噴霧にはガス流量とともにガス流速も影響しているので、噴霧はガス流速が大きく低下しない範囲、すなわちノズル出口より 20 mm 以内で行わなければ効果的でないことがわかる。また本実験に用いたノズルは焦点位置調整リングによつてガス流は著しく乱されており、エネルギー損失も大きく、改善の要がある。

4.1 粒度の定量化

噴霧でえられる粒度を噴霧の各種パラメータで数式化しようという試みは種々行われている。本研究でも適切な実験式を求めてみた。用いた物性値を Table 1 に示す。

噴霧過程を物理的に考えてみるとガスのもつている運動エネルギーが噴霧によつて生ずる粒滴の表面エネルギーに比例していると考えるのが合理的であろう。

ガスのもつている運動エネルギー E_g は単位時間当たり

$$E_g = \frac{1}{2} AV^2 \dots\dots\dots (2)$$

- { A : ガスの単位時間当たりの流量
- { V : ガス速度

であり、一方粒径が χ_m のときの粒滴の表面エネルギー E_s は、

Table 1. Physical properties used in the calculation.

Specific gravity of molten steel (ρ)	7.2 g/cm ³
Surface tension of molten steel (γ)	1 500 dyn/cm
Specific gravity of N ₂ gas	1.25 × 10 ⁻³ g/cm ³

$$E_s = \pi \chi_m^2 \gamma N \dots\dots\dots (3)$$

$\left\{ \begin{array}{l} \gamma : \text{表面張力} \\ N : \text{単位時間に流下する溶鋼から噴霧によつて} \\ \quad \text{生ずる粒滴の数} \end{array} \right.$

となる。今単位時間に流下する溶鋼流量を M とすれば、

$$M = \frac{4}{3} \pi \rho_s \left(\frac{\chi_m}{2} \right)^3 N \dots\dots\dots (4)$$

ρ_s : 溶鋼の比重

であるから、これから N を求めて (3) 式に代入すると、

$$E_s = \frac{6 \gamma M}{\rho_s \chi_m} \dots\dots\dots (5)$$

となる。ここで E_s の E_g と考えると、この場合の比例係数はエネルギーの伝達率に相当しよう。すなわち

$$\frac{6 \gamma M}{\rho_s \chi_m} = K_1 \frac{AV^2}{2} \dots\dots\dots (6)$$

となるが K_1 は単なる常数ではなくノズル径 D , χ_m などの関数と考えられる。(6)式を変形すると、

$$\frac{\chi_m}{D} = K_2 \frac{M}{A W} \dots\dots\dots (7)$$

となる。ただし

$$W \equiv \rho_s \frac{V^2 D}{\gamma} \text{ (ウェーバー数)}$$

今

$$\frac{\chi_m}{D} = K_3 \left(\frac{M}{A} \right)^\alpha W^\beta \dots\dots\dots (8)$$

と置いて最小 2 乗法によつて K_3, α, β を求めると、

$$\frac{\chi_m}{D} = 2.3 \left(\frac{M}{A} \right)^{0.80} W^{-0.34} \dots\dots\dots (9)$$

がえられる。これを整数のべきで近以してあらためて係数を求めると、

$$\frac{\chi_m}{D} = 2.9 \left(\frac{M}{A} \cdot \frac{1}{\sqrt{W}} \right)^{2/3} \dots\dots\dots (10)$$

がえられる。Fig. 9 には実験値と計算値の関係を示したのがかなりよい一致を示すことがわかる。

(10)式と(6)式を比較すると(6)式の比例係数 K_1 は、

$$K_1 = K_4 \left(\frac{A}{M} \right) \left/ \left(\frac{D}{\chi_m} \right)^2 \right. \dots\dots\dots (11)$$

であることがわかる。

ここでえた結果は P. KARINTHI によつて次元解析でえた結果、

$$\frac{\chi_m}{D} = f \left(\frac{M}{A} \cdot \frac{1}{\sqrt{W}} \right) \dots\dots\dots (12)$$

と同じである⁶⁾。ただし KARINTHI は関数形 f を具体的な形では示していない。

今比例係数として

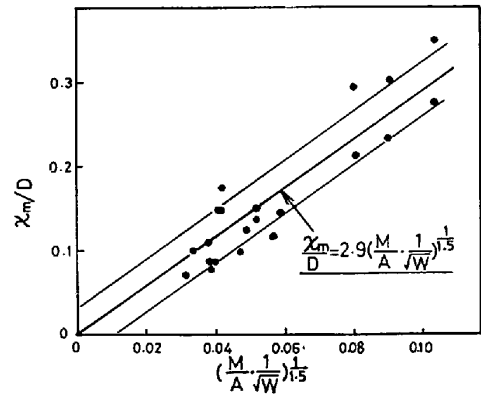


Fig. 9. Relation between observed diameters and calculated ones.

$$K_1 = K_5 \left(\frac{\chi_m}{D} \right) \dots\dots\dots (13)$$

とおくと、

$$\frac{\chi_m}{D} = K_6 \left(\frac{M}{A} \cdot \frac{1}{W} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (14)$$

がえられる。本実験では $M/A \gg 1$ であり M/A の代りに $\left(\frac{M}{A} + 1 \right)$ と置きかえても変りないことから、

$$\frac{\chi_m}{D} = K_7 \left(\left(\frac{M}{A} + 1 \right) \cdot \frac{1}{W} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (15)$$

がえられる。これがガス噴霧の場合に粒径をきめる有名な LUBANSKA の式である⁷⁾。すなわち LUBANSKA の式では比例係数を(11)式の代わりに(13)式としているわけで、本実験結果は LUBANSKA の式よりも(10)式でより適切に表しうる。

4.3 粒度分布

粒度分布の広がりを制御することは粒径制御とともに重要であるが噴霧機構は複雑であり理論的に分布をきめることはむずかしい。LUBANSKA はガス噴霧法で製造された各種粒末の粒度分布が対数正規分布になること、粒径との関係は

$$\sigma_g = (\chi_m/13)^{1/3} \dots\dots\dots (16)$$

$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_g : \text{幾何標準偏差} (\mu) \\ \chi_m : \text{幾何平均粒径} (\mu) \end{array} \right.$

で与えられることを示した⁷⁾。本実験で製造された鉄粉も Fig. 7 に示すように対数正規分布を示しているが、一方幾何標準偏差は Fig. 10 に示すように粒径にかかわらずほぼ一定値を示した。この1つの原因としては LUBANSKA はランス式ノズルを、本実験は環帯式ノズルを用いており、後者の方がガスのエネルギー分布がより一様であることにもとづくものと考えられる。

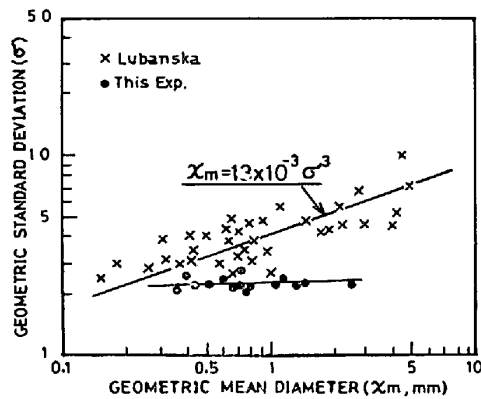


Fig. 10. Variation of standard deviation with particle diameters.

5. 結 論

環帯式噴霧ノズルを試作して溶鋼を噴霧し、その噴霧特性を調べるとともに粒度制御について検討して以下の結果をえた。

(1) 本実験に用いたノズルで溶鋼を安定に噴霧するためには焦点位置調整リングをノズル先端から 1.5 mm 以上突きださせ、高速噴霧ガスが焦点を結ばないようにする必要がある。

(2) 溶鋼流は環帯中心線上で粗くひきちぎられ、その後周囲を流れる高速ガス流によりさらに微粉化される。

(3) 粒は噴霧ガス量、ガス圧とともに細粒化し、溶鋼流径が増すとともに粗粒になる。微粉をうるためにはガス圧をあげるよりもガス流量を増す方が望ましい。

(4) 噴霧を表す式として

$$\frac{\lambda_m}{D} = 2.9 \left(\frac{M}{A} \cdot \frac{1}{\sqrt{W}} \right)^{2/3}$$

がえられた。

文 献

- 1) A. R. E. SINGER: Powder Met., 19 (1976), p. 4
- 2) Metal Powder Rep., 30 (1975), 10, p. 338
- 3) 田村 皖司, 武田 徹: 粉体および粉末冶金協会誌 9 (1962), p. 102
- 4) 今井 功: 流体力学(岩波講座, 現代物理学), (1955), p. 27 [岩波書店]
- 5) 日野 幹雄: 流体力学, (1974), p. 185 [朝倉書店]
- 6) P. KARINTHI: Int. Powder Met. Conf. (USA), (1977), p. 115
- 7) H. LUBANSKA: J. Metals, 22 (1970), p. 45