

Atomization of Molten Iron by Annular Concentric Water Jet



新田 稔
Minoru Nitta
ハitek 研究所 新素
材研究センター 主任
研究員(掛長)



小倉 邦明
Kuniaki Ogura
ハitek 研究所 新素
材研究センター 主任
研究員(課長)



斉藤 滋之
Shigeyuki Saito
千葉製鉄所 鉄粉部 鉄
粉溶材技術室



杉原 裕
Hiroshi Sugihara
千葉製鉄所 管理部 鉄
粉管理室

1 緒 言

粉末冶金用の金属粉末は、主として還元法と水噴霧法によって製造されている。なかでも鉄系粉末は自動車、家電機器、事務機などの焼結部品用材料として、国内で年間10万トンの需要がある。還元法は金型で成形する際の圧粉体強度が強い多孔質不規則形状の鉄粉の製造に採用され、水噴霧法は圧粉体密度が高い緻密質不規則形状の鉄粉および合金鋼粉の製造に適用されている。

鉄系焼結部品の8割の用途を占める自動車用焼結部品は、高靱性化、高強度化および高寸法精度化を指向して発展しており、水噴霧鉄粉および合金鋼粉がその原料粉末の主流になりつつある。水噴霧法で鉄粉および合金鋼粉を製造するにあたって、その噴霧粉末の粒度分布を的確に制御するためには水ジェットの挙動を正確に把握する必要がある。

一般に、熔融金属の水噴霧は相対速度が圧倒的に大きい水ジェット中への分散現象として取り扱われ、水ジェットの噴射する運動エ

要旨

環帯状水ジェットが衝突点に集中・合流して形成する円柱状水流の衝突点を含む水平面または軸に沿った各位置について、水流速度を測定して衝突点の水流の挙動を調べ、水流の速度分布が噴霧した鉄粉の粒度分布におよぼす影響を検討した。環帯幅および水ジェット噴出角を拡大して水ジェット噴出口から衝突点までの距離を短くすると、衝突点の水ジェットの速度と円柱状水流の径が増加し、衝突点から下方へ流下する円柱状水流の速度減衰が大きくなる。水ジェットが衝突点に持ち込む運動エネルギーは鉄粉の平均粒径から求めた溶鉄粒の表面エネルギーとよく対応し、鉄粉の対数幾何標準偏差は水ジェットが衝突点で形成する円柱状水流の水平面の速度分布で整理できる。

Synopsis:

By using an annular concentric water jet, the authors have studied the effect of the distribution of water flow velocity on the particle size distribution of water-atomized iron powder. The velocity of impinging water jet, which is converged into a cylindrical flow at the point of impingement, was measured along the axis of water jet or in the horizontal plane containing the impinging point. When the distance from the end of the nozzle to the point of impingement was reduced by increasing the width of the annular nozzle slit and the angle of the water jet, the velocity of the water jet and the diameter of the cylindrical water flow were increased, resulting in a rapid decrease in the velocity of the water flow along the axis of the water jet below the impinging point. The kinetic energy of the water jet at the point of impingement was closely correlated with the surface energy of the molten iron droplets as determined for the iron powder of a medium average diameter. It was possible to establish a correlation between the geometric standard deviation of the iron powder and the distribution of velocity of the cylindrical water flow in the horizontal plane containing the impinging point.

ネルギーと熔融金属の粒子の表面エネルギーとの釣り合いにもとづく次元解析や統計的な回帰分析で水噴霧条件と金属粉末の粒度分布(平均粒径、対数幾何標準偏差)との関係¹⁾が示されている。

これまでの水噴霧金属粉の平均粒径については、次元解析にもとづいて導出したものとして、ガス噴霧に関するLubanskaの式²⁾を水噴霧に適用した中村らの式³⁾と、岸高の式⁴⁾がある。回帰分析で導出したものとしてGrandzolらの式⁵⁾、善永らの式⁶⁾および林らの式⁷⁾がある。また、水噴霧金属粉の対数幾何標準偏差(粒度分析の広がり)については、Lubanskaがガス噴霧で提案した平均粒径との相関式²⁾がある。しかし、これらの関係式はいずれも噴射する水ジェットの水圧、水量、水ジェット噴出角、水ジェット長を因子

* 平成4年6月24日原稿受付

とするもので、水ジェットが溶融金属流を噴霧する衝突点の水流の状態を考慮していないので、水噴霧条件や装置仕様が異なると適用できない場合がある。

従来から、水ジェットによる溶融金属流の噴霧は、その衝突点で溶融金属流が実際に受ける水ジェットの運動エネルギーの大きさと分布に依存すると考えられているが、衝突点の水流の挙動に着目した報告はない。

そこで本報告は、環帯式水ノズルを用い、水量一定のもとで水圧、環帯幅（環帯径）および水ジェット噴出角を変数として環帯状水ジェットを噴射し、水ジェットが衝突点に集中し合流する部分の水流速を測定するとともに溶鉄流量を変えて噴霧して、鉄粉の粒度分布におよぼす水ジェットの衝突点の速度分布の影響について検討した。

2 実験方法

2.1 溶鋼の水噴霧

溶鉄の水噴霧実験の概要図を Fig. 1 に示す。高周波誘導電気炉を用い、大気中で低炭素リムド鋼を溶解した。タンディッシュの底部に取り付けた内径が 6~8 mm の耐火物製の溶湯ノズルで水ジェットの衝突点直上近傍から一定温度の溶鋼を自然流下させ、一点に集中、合流する環帯状水ジェットで噴霧した。環帯状水ジェットの水量は $3.8 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$ で一定とし、水圧を 6~15 MPa、環帯幅を 0.2~0.4 mm（環帯径を 20~40 mm）、水ジェット噴出角を 0.17~0.52 rad の範囲でそれぞれ変えた。噴霧した鉄粉を回収し、窒素雰囲気中で乾燥し、篩分けして粒度分析を測定した。

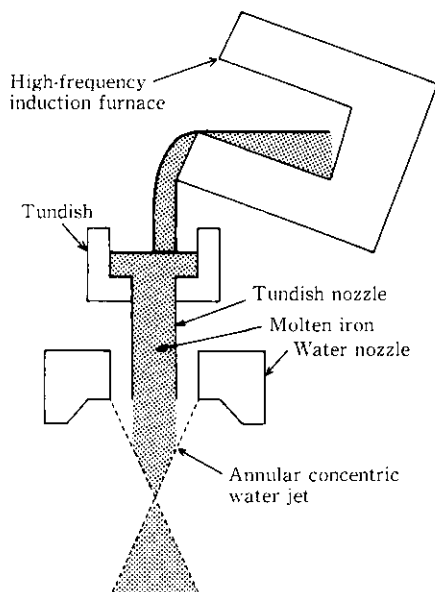


Fig. 1 Schematic of water atomization process

2.2 水ジェットの速度の測定

環帯状水ジェットの衝突点の速度測定の概要図を Fig. 2 に示す。環帯状水ジェットが衝突点で形成する円柱状水流の中に、内径が 4 mm の L 字形の鋼管の一端を鉛直に差し込み、衝突点を含む水平面または鉛直方向の軸に沿った各位置に鋼管を移動させ、流下する水ジェットを受け、その水圧を鋼管の他端に取り付けたストレンゲ

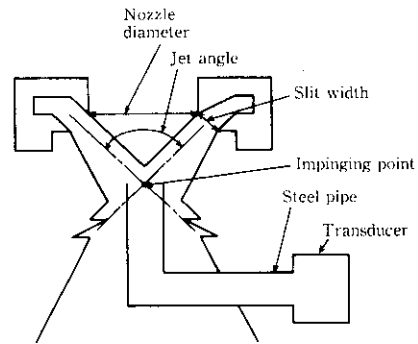


Fig. 2 Schematic of the setting for measurement of velocity of water jet

ージ内蔵の圧力変換器で測定して速度に換算した。この L 字形の圧力測定管は噴射した水ジェットで満たされ、曲がりの無い測定管と同じ圧力値が得られる。

3 結果

3.1 環帯状水ジェットの衝突点の挙動

環帯状水ジェットによる溶鉄流の噴霧を考えるためには、衝突点の水ジェットの挙動を知る必要がある。環帯状水ジェットは、環状のスリットから高圧水を噴出させて逆円錐状の水膜を形成させ、その幾何頂点の衝突点に集中・合流させて円柱状水流にして下方へ流下させるものである。

はじめに、環帯状水ジェットが衝突点に集中・合流する速度を求めた。環帯状水ジェットの噴出口から衝突点までの距離 (x) と環帯幅 (h) との比 x/h と、各衝突点における水流速度 (U_x) と噴出口の水流速度 (U_0) との比 U_x/U_0 の関係を Fig. 3 に示す。環帯状水ジェットの衝突点の水流速度は $U_x/U_0 \propto (x/h)^{-1/4}$ であり、環帯状水ジェットは噴出されて衝突するまでの飛行中の速度減衰が小さい。環帯状水ジェットは衝突点までは内側が空洞の下すぼまりの形状であり、衝突点に向かってその軸方向と円周方向にともに集中、合流していった表面積を減少し、水量密度を増していく。このため、環帯状水ジェットは、外気との混ざり合いで水滴となって飛散する表面の崩壊が水ジェットの厚さ方向に及びにくいと考えられる。

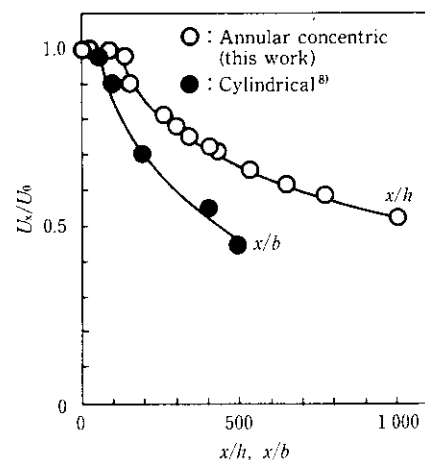


Fig. 3 Water jet velocity measured at the impinging points of distance varied from the nozzle end

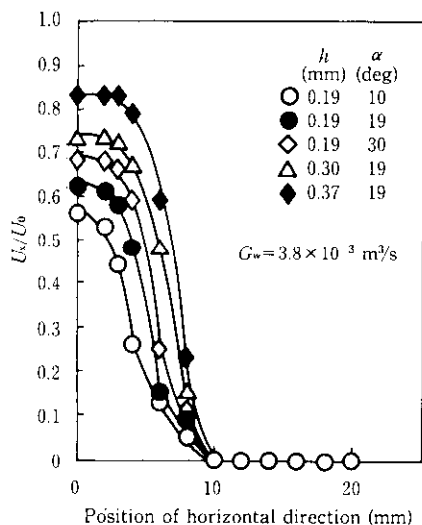


Fig. 4 Distribution of velocity of impinging water jet along the horizontal plane containing the impinging point

つぎに、環状水ジェットは衝突点に集中、合流して円柱状水流を形成するので、衝突点を含む水平面の各位置の速度分布を求めた。水量を一定とし、噴射水圧 (P_0)、環帯幅 (h)、水ジェット噴出角 (α) をそれぞれ変えて噴射した環状水ジェットについて、集中・合流して円柱状水流となる衝突点を含む水平面の各位置の水流速度比 U_x/U_0 の分布を Fig. 4 に示す。環帯幅および水ジェット噴出角の拡大にともない衝突点の水ジェットの速度が増加し、衝突点で円柱状水流になる径が大きくなる。これは、環帯幅および水ジェット噴出角の拡大によって噴出口から衝突点までの距離が短くなって、水ジェットの飛行中の崩壊と速度減衰が減少し、衝突する水量が増加するためである。

これに対し、小林⁹⁾が丸穴ノズルから噴射した円柱状水ジェットについて測定した、中心軸上の噴出口からの距離 (x) と穴径 (b) との比 x/b と、水流速度比 U_x/U_0 の関係を Fig. 3 に●印で示す。一般に、円柱状水ジェットは、崩壊が水ジェットの中心部におよぶまでは、中心軸上の各位置の水流速度は $U_x/U_0 \propto (x/b)^{-1/2}$ の関係にしたがう2次噴流型減衰⁹⁾を示す。この円柱状水ジェットの噴射条件は、ノズル出口径 $b=1.11 \text{ mm}$ 、平行長さ L と b の比 $L/b=4$ 、近寄りテーパ角 0.23 rad 、噴射水圧 $P=50 \text{ MPa}$ である。

なお、環状水ジェットで噴霧した鉄粉の粒度分布に及ぼす水流速度の影響を検討するために、環状水ジェットが衝突点で形成する円柱状水流について、その衝突点を含む水平面で測定した速度分布を次のように定義して表すこととする。すなわち、溶鉄流の噴霧が衝突点部分およびその近傍で行われると仮定し、水ジェットの速度分布の強さを表す指標として水ジェットが衝突点に集中、合流する速度に注目し、これを衝突点の水流速度 U_x と定義する。また、水ジェットの速度分布の広がりを表す指標として衝突点の水流速度 (U_x) が $1/2$ になる円柱状水流の径に注目して、これを衝突点の円柱状水流の半径 R_w と定義する。

3.2 鉄粉の粒度分布

環状水ジェットで噴霧した鉄粉の粒度分布の代表例を Fig. 5 に示す。いずれの鉄粉も対数正規分布を持っている。したがって、平均粒径としてメジアン径 d_{50} (累積 50 wt% 相当径) を、粒度分布の広がりとして対数幾何標準偏差 σ_g (累積 84.1 wt% 相当径/累積 50 wt% 相当径) を用いて鉄粉の粒度分布を表わすことができる。

鉄粉の粒度分布は、水量、溶鉄流量、環帯幅および水ジェット噴

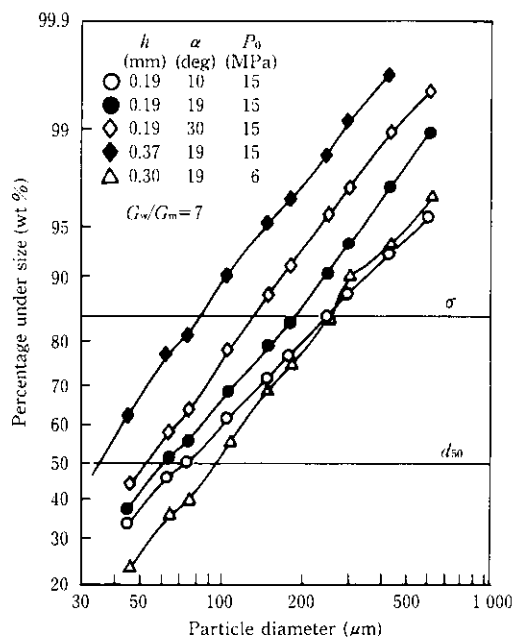


Fig. 5 Particle size distribution plotted on a log-cumulative graph

出角が一定のとき、噴射水圧によって変わる。また、水量、溶鉄流量および噴射水圧が一定でも、環帯幅と水ジェット噴出角がそれぞれ変わるとまったく粒度分布が異なった鉄粉になる。

3.3 衝突点の水の速度分布と鉄粉の粒度分布の関係

3.3.1 鉄粉の平均粒径

溶鉄と水の物性および水量を一定とし、溶鉄流量、噴射水圧、環帯幅および水ジェット噴出角をそれぞれ変えて環状水ジェットを噴射し、噴霧した鉄粉の平均粒径を Lubanska の平均粒径式²⁾で整理して Fig. 6 に示す。環帯幅と水ジェット噴出角が一定の場合、噴霧した鉄粉の平均粒径は Lubanska の平均粒径式²⁾で整理できる。

これに対し、環帯幅と水ジェット噴出角とが異なる条件で噴射した環状水ジェットで噴霧した場合は、Fig. 5 の粒度分布の例に示すように、平均粒径がまったく異なった鉄粉になり、Lubanska の平均粒径式²⁾を適用できない。これは、Fig. 4 の水ジェット噴出口から衝突点までの距離と環帯幅との比 x/h と衝突点の水流の速度比 U_x/U_0 の関係に示すように、噴射水圧と水量が一定であっても、環

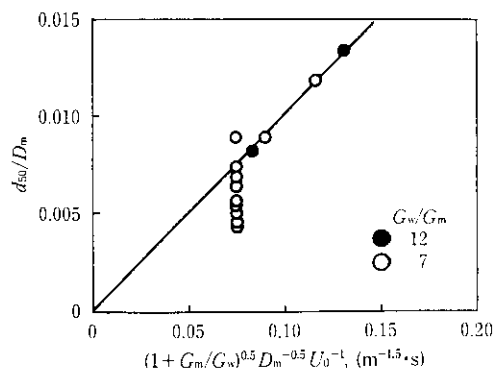


Fig. 6 Relationship between medium average diameter of iron powders, d_{50}/D_m , and atomizing factors estimated using Lubanska's formula, $(1 + G_m/G_w)^{0.5} D_m^{-0.5} U_0^{-1}$

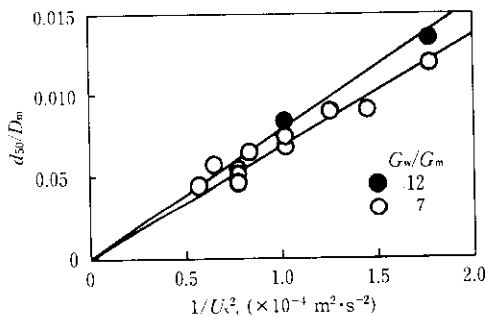


Fig. 7 Medium average diameter of iron powders, d_{50}/D_m , vs the reciprocal of U_x^2 (U_x : Velocity at the impinging point of water jet)

帯幅と水ジェット噴出角をそれぞれ変えると、噴出した環帯状水ジェットの衝突点の水流速度が変化するためである。

実際には、噴霧で生じる溶鉄粒子の粒径は円環状水ジェットが衝突点で溶鉄流に与える運動エネルギーの大きさによって決まると考えると、水量が一定のとき、環帯幅と水ジェット噴出角をそれぞれ変えた場合についても、Fig. 7 に示すように、おのおの水と溶鉄の流量比 (G_w/G_m) に対して衝突点の水流速度 (U_x) の2乗で鉄粉の平均粒径を整理できる。

3.3.2 鉄粉の対数幾何標準偏差

環帯状水ジェットで噴霧した鉄粉の平均粒径と対数幾何標準偏差の関係を Fig. 8 に示す。Lubanska は、対数正規分布をもつ各種の噴霧粉末は対数幾何標準偏差と平均粒径の間に、 $\sigma_g \propto d_{50}^{1/3}$ の関係²⁾があることを示した。

しかし、この関係では説明がつかない偏りの大きい点がある。この偏りの大きい点は、Fig. 4 に示す環帯状水ジェットが集中・合流

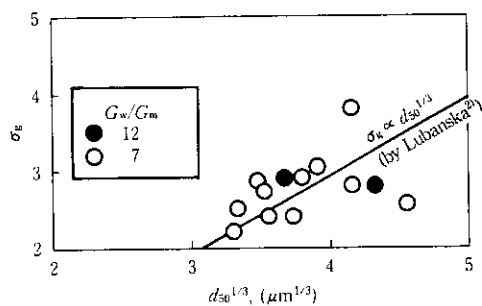


Fig. 8 Variation of geometric standard deviation σ_g with the cube root of medium average diameter of iron powders, $d_{50}^{1/3}$

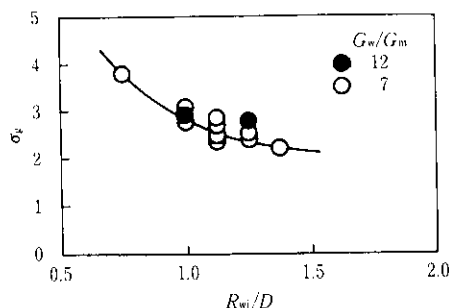


Fig. 9 Correlation between geometric standard deviation σ_g and R_{wj}/D at the impinging point of water jet

する衝突点を含む水平面の各位置の水流速度の影響を強く受け、衝突点で円柱状になる水流の半値径と対応していて、半値径が小さいほど偏りが大きい。そこで、鉄粉の対数幾何標準偏差を環帯状水ジェットの衝突点の半値径 (R_{wj}) と溶湯ノズル径 (D_m) との比 R_{wj}/D_m で整理して Fig. 9 に示す。溶鉄径に対し衝突点で集中・合流して円柱状になる水流の半値径が大きいほど、鉄粉の対数幾何標準偏差は小さくなる。これは、衝突点を中心として同心円状に形成される円柱状水流の水平面上の各位置の水流の速度変化が緩慢で、衝突点の水流速度の平坦部が広いほど均一な水流で溶鉄流を噴霧するためである。

4 考 察

4.1 環帯状水ジェットの衝突後の速度減衰と半値径の関係

環帯状水ジェットは衝突点で集中、合流して円柱状水流になって垂直方向の下方へ流下する。衝突点から垂直方向の下方へ流下する軸線上の各位置 (r) における水流の速度の代表例を Fig. 10 に示す。環帯幅および水ジェット噴出角の拡大にともなって衝突点から下方へ流下する円柱状水流の速度減衰が増加する。この現象は、Fig. 4 に示す環帯状水ジェットの衝突点を含む水平面上の水流の速度分布と対比すると、環帯幅および水ジェット噴出角の拡大によって衝突点へ集中・合流する水ジェットの速度が増加し、衝突点で形成する円柱状水流の半値径が大きくなることと対応している。したがって、環帯状水ジェットが衝突点で集中、合流して円柱状水流になって流下する状態は、連続の法則から (1) および (2) 式で表すことができる。

$$G_w = G_{wr} - g_{wr} \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$R_{wr}^2 = \frac{4G_w}{U_r} - g_{wr} \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、

$$G_w = 2\pi D_w h U_0$$

$$G_{wr} = (R_{wr}/2)^2 U_r$$

G_w : 噴射水量

G_{wr} : 衝突点から下流位置 r の水流量

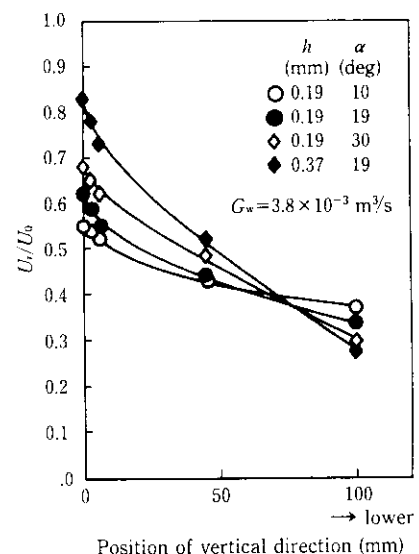


Fig. 10 Distribution of velocity of water jet along the axis of water jet containing the impinging point

- g_{wr} : 衝突点での飛散水量
 R_{wr} : 衝突点から下流位置 r の水流径
 h : 環帯幅
 D_w : 環帯径
 U_r : 衝突点から下流位置 r の水流速度
 U_0 : 噴出口の水流速度

すなわち、環帯状水ジェットの環帯幅および水ジェット噴出角の拡大にともなう、噴出口から衝突点までの水ジェットの飛行距離が短縮し、水ジェットは衝突し合う水量が増加するとともに衝突による速度減衰が増大する。このため、衝突点から下方へ流下する円柱状水流の速度が遅くなってその径が増大する。こうして衝突点の円柱状水流の半値径が大きくなる。

4.2 環帯状水ジェットによる溶鉄の粉碎仕事

溶鉄流は、環帯状水ジェットの衝突点で高速の水ジェットに接触して引き込まれ運動エネルギーを受けて分裂し、分散していく。このとき、分裂で生ずる溶鉄粒子の表面エネルギーは、水ジェットが衝突点に持ち込む運動エネルギーに比例すると考え(3)式が導かれる。ここでは、溶鉄流は水ジェットとの衝突点で瞬時に分裂するものとして水ジェットの粘性抵抗で発生する熱エネルギーを無視する。溶鉄の熱エネルギーは単純に水ジェットへ拡散し、水蒸気の発生が溶鉄流を乱さないものとする。また、溶鉄流が持ち込む運動エネルギーは小さいので無視する。

$$E_s = K[E_w - E_{(w+m)}] \quad \dots\dots\dots (3)$$

- ここで、
 E_s : 溶鉄粒子の表面エネルギー
 E_w : 分裂過程に持ち込む運動エネルギー
 $E_{(w+m)}$: 分裂過程から持ち出される運動エネルギー
 K : 定数(噴霧方式で決まるエネルギー伝達係数)
- この(3)式は具体的に(4)式のように表すことができる。

$$\pi \sigma_m d_{50}^2 \Psi_m N_m = K \left\{ \frac{G_w U_x^2}{2} - \frac{(G_w + G_m) \cdot U_r^2}{2} \right\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、

$$N_m = \frac{6G_m}{\pi \rho_m d_{50}^3}$$

- σ_m : 溶鉄の表面張力
 Ψ_m : 溶鉄粒子の形状係数(1と仮定)
 N_m : 溶鉄粒子数
 ρ_m : 溶鉄の比重量
 U_x : 衝突点の水ジェット速度
 U_r : 衝突点下流の溶鉄分裂終了位置での水流速度

ここでは、環帯状水ジェットの衝突部分での溶鉄流の分裂過程のエネルギー伝達の機構や分裂終了時点が明らかになっていないので、溶鉄流の分裂終了時の水ジェットの速度損失を無視し、溶鉄粒子の表面エネルギーは単純に水ジェットの運動エネルギーに比例するものとする、(4)式は(5)式で表される。

$$\frac{6G_m \sigma_m}{\rho_m d_{50}^3} = K \times \frac{(G_w - G_m) U_x^2}{2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

そこで、環帯状水ジェットが衝突点で溶鉄流を加速する運動エネルギーと鉄粉を球と仮定してその平均粒径から求めた溶鉄粒子の表面エネルギーの関係を Fig. 11 に示す。ここにおける溶鉄の物性として表面張力 $\sigma_m = 1.853 \text{ N/m}$ 、比重量 $\rho_m = 7210 \text{ kg/m}^3$ を用いた。環帯状水ジェットの衝突点で生ずる溶鉄粒子の表面エネルギーは水ジェットが溶鉄流を引き込んで加速する運動エネルギーとよい対応を示し、このエネルギー伝達係数は $K = 0.4 \times 10^{-3}$ である。なお、この関係により対応があるということは、溶鉄流量に対し環帯状水

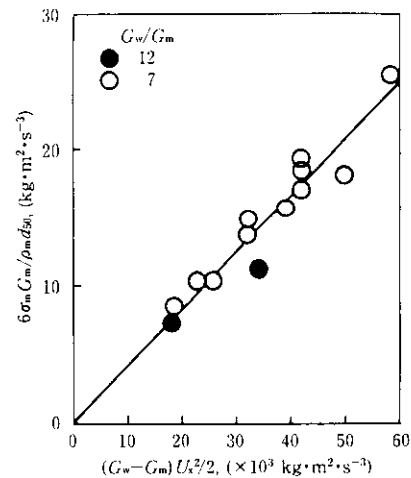


Fig. 11 Correlation between the surface energy of molten iron droplet as medium average diameter of iron powder, $6\sigma_m G_m / \rho_m d_{50}$, and the kinetic energy of water jet at the impinging point, $(G_w - G_m) U_x^2 / 2$

ジェットの流量が十分であり、水ジェットが衝突点で溶鉄流を引き込むと瞬時に溶鉄粒子へ分散する噴霧と溶鉄粒子の凝固とが起きていることを示唆している。

4.3 鉄粉の粒度分布の広がり

環帯状水ジェットは衝突点で円柱状水流を形成し、Fig. 4 に示すように衝突点を中心として同心円状に外側向の水流ほど水流速度が低くなる対称性のよい分布をもっている。この衝突点を中心とした対称性のよい水流速度をもつ環帯状水ジェットで溶鉄流を噴霧すると、鉄粉の平均粒径は Fig. 7 に示すように溶鉄流を加速する水ジェットの衝突点の水流速度によって決まり、その鉄粉の対数幾何標準偏差は Fig. 9 に示すように衝突点の円柱状水流の半値径に依存して決まっている。そこで、Lubanska が提案した平均粒度と対数幾何標準偏差の関係式²⁾を衝突点の円柱状水流の半値径の-1乗で補正する(6)式で鉄粉の対数幾何標準偏差を整理し、Fig. 12 に示す。

$$\sigma_g \propto d_{50}^{1/3} R_{wJ}^{-1} \quad \dots\dots\dots (6)$$

このように、環帯状水ジェットで噴霧した鉄粉の対数幾何標準偏差は(6)式で対応よく求めることができる。

なお、(6)式は(5)式を用いて(7)式のように表わされ、その意味は次のように考えられる。すなわち、環帯状水ジェットの

$$\sigma_g \propto \left\{ \frac{G_m \sigma_m}{(G_w - G_m) \rho_m U_x^2} \right\}^{1/3} \times R_{wJ}^{-1} \quad \dots\dots\dots (7)$$

衝突点では、溶鉄流量が少なく水量が多いほど水流速度の均一性の

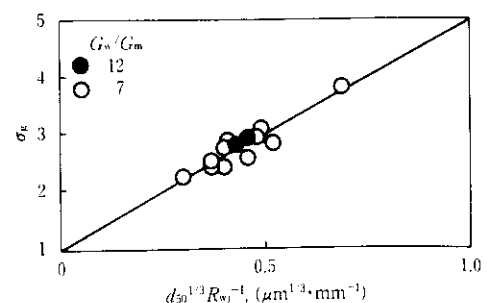


Fig. 12 Correlation between geometric standard deviation of iron powder, σ_g , and $d_{50}^{1/3} R_{wJ}^{-1}$

よい水流で溶鉄流を加速でき、また、水流速度が速いほど均一性のよい衝突点近傍の水流で溶鉄流を加速できるため、噴霧した鉄粉の対数幾何標準偏差が小さくなる。

5 結 言

水量一定で噴射した環带状水ジェットが衝突点に集中・合流して形成する円柱状水流の衝突点を含む水平面または軸に沿って水流速度を測定して衝突点の水流の挙動を調べ、溶鉄流を噴霧した鉄粉の粒度分布におよぼす水流の速度分布の影響について検討して以下のことが明らかになった。

- (1) 環带状水ジェットの衝突点の水流速度 (U_x) と噴出速度 (U_0) との比 U_x/U_0 は、噴出口から衝突点までの距離 (x) と

環帯幅 (h) との比 x/h の $1/4$ 乗で減衰する。

- (2) 環带状水ジェットの衝突点の水流速度および衝突点で円柱状になる水流の径は環帯幅および水ジェット噴出角の拡大にともなって増加し、衝突点から下方へ流下する円柱状水流の速度減衰が大きくなる。
- (3) 噴霧した鉄粉の平均粒径から求めた溶鉄粒子の表面エネルギーは、環带状水ジェットが衝突点に持ち込む運動エネルギーとよい対応がある。
- (4) 噴霧した鉄粉の対数幾何標準偏差は、環带状水ジェットが衝突点で形成する円柱状水流の水平面の速度分布で整理でき、衝突点の水流速度が $1/2$ になる円柱状水流の径の -1 乗とよい対応がある。

参 考 文 献

- 1) A. Lawley: *Int. J. Powder Metal. and Powder Tech.*, **13** (1977) 3, 169
- 2) H. Lubanska: *Journal of Metals*, **22** (1970) 2, 45
- 3) 中村 泰, 西田卓彦, 溝口庄三, 山宮昌夫: 「アトマイズ法における粉末粒径制御」, 粉体粉末冶金協会昭和49年度春季大会講演概要集, 講演 No. 1-1, (1974)
- 4) 岸高 寿: 「アトマイズ鉄粉の製造とその理論」, 粉体粉末冶金協会学術合同講演会概要集, (1972)
- 5) R. J. Grandzol, and J. A. Tallmadge: *Int. J. Powder Metal. and Powder Tech.*, **2** (1975) 1, 103
- 6) 善永 悠, 中西達夫, 久保敏彦, 福田 匡, 浜崎 敦: 住友金属, **1** (1988) 1, 61
- 7) 林 清英, 鈴木喜代志, 久田建男: 電気製鋼, **58** (1988) 4, 243
- 8) 小林陵二, 新井隆景, 山田泰司: 日本機学会論文集(B編), **53**(1987) 489, 1539
- 9) N. Rajarantnam(野村安正, 訳): 「噴流」, (1983), 268, [森北出版]