

溶融金属の電磁微粒化法における粒径制御とエネルギー効率

蜷川伸吾*・佐々健介*²・小塚敏之*³・浅井滋生*⁴

Controllability of Particle Size and Efficiency of Electromagnetic Energy on Electromagnetic Atomization Process of Molten Metal

Shingo NINAGAWA, Kensuke SASSA, Toshiyuki KOZUKA and Shigeo ASAI

Synopsis :

The electromagnetic atomization process in which molten metal was atomized by imposing electric and magnetic fields was studied. In order to improve the controllability of this process, splashing phenomena of molten metal were visualized by use of a high speed camera and a VTR. The observed phenomena were carefully examined and main obstacles disturbing the continuous operation of the process and the sharp particle distribution were removed. A mathematical model was proposed for the better understanding of the process. On the basis of the visualization of splashing phenomena and the calculated results of the mathematical model, it was found that the particle size could be mainly controlled by the distance between a nozzle and an electrode, the delay time of electric current and the mass flow rate of molten metal. The impulse defined as the products of electromagnetic body force and the period of applying electric current, and the momentum of a splashed particle defined as the products of the mass and the velocity of a particle were calculated from the observed data. From the linear relation between the impulse and the momentum, the efficiency in which electromagnetic energy was transformed into the kinetic energy of a particle was evaluated.

Key words : powder metallurgy; electromagnetic metallurgy; atomization; electromagnetic atomization; electromagnetic processing of materials; spray casting; flame coating.

1. 緒 言

現在、金属粉末には、粉末冶金用材料から超微粒子の様な機能性材料に至るまで幅広い用途が期待されている。金属粉末を製造する方法には、機械的、化学的あるいは物理化学的なのがみられるが、中でも溶融金属から直接金属粉末を作る各種噴霧法が主流となっている。しかし、通常、噴霧化にあたっては、流体(ガス・液体)や固体が有する運動エネルギーが用いられるため、常に偶発的因子が絡むことは避けられず、得られる金属粉末の粒度分布は自ずと広くなりがちである。また、その際、雰囲気も限定されるため適用金属種の範囲も狭められることになる。

一方近年、直接成形プロセスとして、スプレイ・キャスティングや半融凝固した粒滴を双ロール法を用いて圧

延するプロセスが試行されている¹⁾。そこでは、機械的回転部を有しない、小型の粒滴化装置の開発が望まれている。

以上の観点をふまえて、先の研究では²⁾、運動エネルギーに代わり電磁エネルギーを利用する新しい溶融金属の微粒化法を考案し、本プロセスの主要操作因子が溶融金属と電極との接触状態にあることを明らかにした。しかしながら微粒化状況は極めて不安定であり、その詳細に関しては不明のまま残されていた。本報告では、微粒化状況を高速カメラ、VTRにより撮影し、観察結果から装置上の問題点を見出す一方、数学的モデルを展開して微粒化現象の把握に努めた。その結果、粒径を非常に狭い範囲に集中させることが可能であることを示し、電磁エネルギーが運動エネルギーに変換される効率に言及する。

昭和63年11月本会講演大会にて発表 平成元年9月19日受付 (Received Sep. 19, 1989)

* 名古屋大学大学院 (現:(株)神戸製鋼所) (Graduate School, Nagoya University, Now Kobe Steel, Ltd.)

*² 名古屋大学工学部 (Faculty of Engineering, Nagoya University, Furo-cho Chikusa-ku Nagoya 464-01)

*³ 熊本大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Kumamoto University)

*⁴ 名古屋大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Nagoya University)

2. 実験装置および方法

前報²⁾で新しく提案した電磁微粒化装置を用いる。本プロセスの基本原理は、フレミングの左手の法則でありこれを Fig. 1 に示す。ノズルから水平方向に流出する熔融金属が、ノズルに対抗して設置された電極に接触すると、電極側を負極、ノズル側を正極として電氣的閉回路が形成され、熔融金属中に直流電流が流れるよう装置を構成する。この際、流出した熔融金属中を流れる直流電流(密度 J)に直交する方向に磁場(B)を印加しておく、熔融金属に電磁気力($F=J \times B$)が紙面垂直方向に誘発され、ノズル-電極間に位置する熔融金属が飛散される。飛散により通電はいったん遮断されるが、引き続き流出する熔融金属が電極に接触し、再び通電が行われ、電磁気力により熔融金属が飛散される。飛散に伴う電流の遮断、通電の繰返しによって、連続的に溶

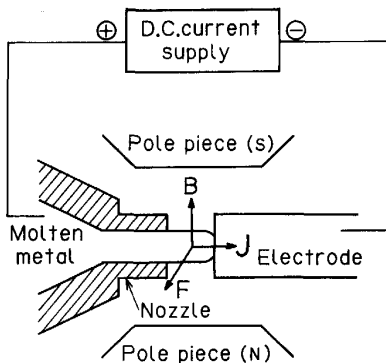


Fig. 1. Principle of electromagnetic atomization.

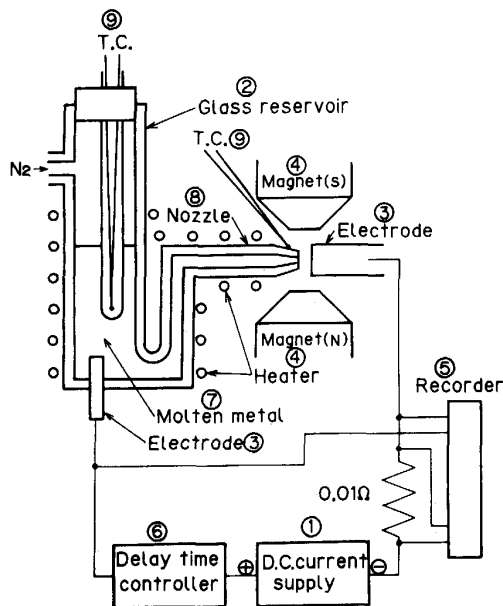


Fig. 2. Experimental apparatus.

融金属の微粒化が行われる。

本研究で用いた実験装置の模式図を Fig. 2 に示す。実験装置は①定電流・定電圧直流電源、②熔融金属供給系、③電極(タングステン)、④永久磁石、⑤電流・電圧記録計、⑥遅延時間制御器、⑦湯溜部、⑧ノズル(パイレックスガラス製)、⑨熱電対から構成される。パイレックスガラス容器内にすず 300 g を装入し加熱溶解する。熱電対により温度を測定し、熔融金属を 300°C に保持する。電源の電流・電圧を調整した後、N₂ ガスにより熔融金属を流出させた。一方ノズル-電極間位置には、永久磁石により鉛直上向きの磁場を印加した。ノズル-電極間距離は、マニピュレーターによって、0.01 mm の精度で調整した。

実験は大気中で行ったためノズルや電極には金属酸化物の付着がみられた。この酸化物は熔融金属とノズルとのぬれを促すため、熔融金属がノズルと電極側面に沿って流出し、その結果、飛散状況は不安定なものとなることがわかった。これを回避するため、一連の実験ごとにノズルを酸で洗浄するとともに、電極をサンドペーパーで磨いた。この処置により、微粒化は極めて安定に行い得るようになった。

さらに、微粒化状況を肉眼で観察するとともに高速度カメラと VTR を用いて撮影した。また、電圧と電流を測定し、ノズル位置から飛散された金属粒子の落下地点までの鉛直距離と水平距離を測定した。また、得られた粒子の平均質量と粒径は、化学天秤とふるい分け法により求めた。

3. 実験結果および考察

ノズルから流出した熔融金属が電極と接触した瞬間から実際に電流を印加するまでの時間を制御するため、遅延時間制御器(DTC)を導入した²⁾。ここでは、遅延時間を $t_d=20$ ms に設定して実験を行った。Photo. 1 に示す6枚の写真は高速度カメラで撮影した連続写真であり、それぞれの時間間隔は約 4 ms である。ノズルと電極の間で白く光って見える部分が熔融金属である。時間の経過に伴いノズル-電極間距離が減少し((a)→(b)→(c)→(d)→(e)→(f))飛散時(f)に最も短くなっており、熔融金属が幾つにも分断されて飛散されている状況がみられる((f))。本装置では、電極を支持するアームにも電磁気力が作用し、その結果、ノズル-電極間距離の変動を生じたものと考えられた。そこで、電極の固定をより強固にしたところ、振動はおさまり、微粒化は非常に安定したものとなった。Photo. 2 には、高速度カメラで撮影した液滴生成過程を示す。ノズルから流出した溶

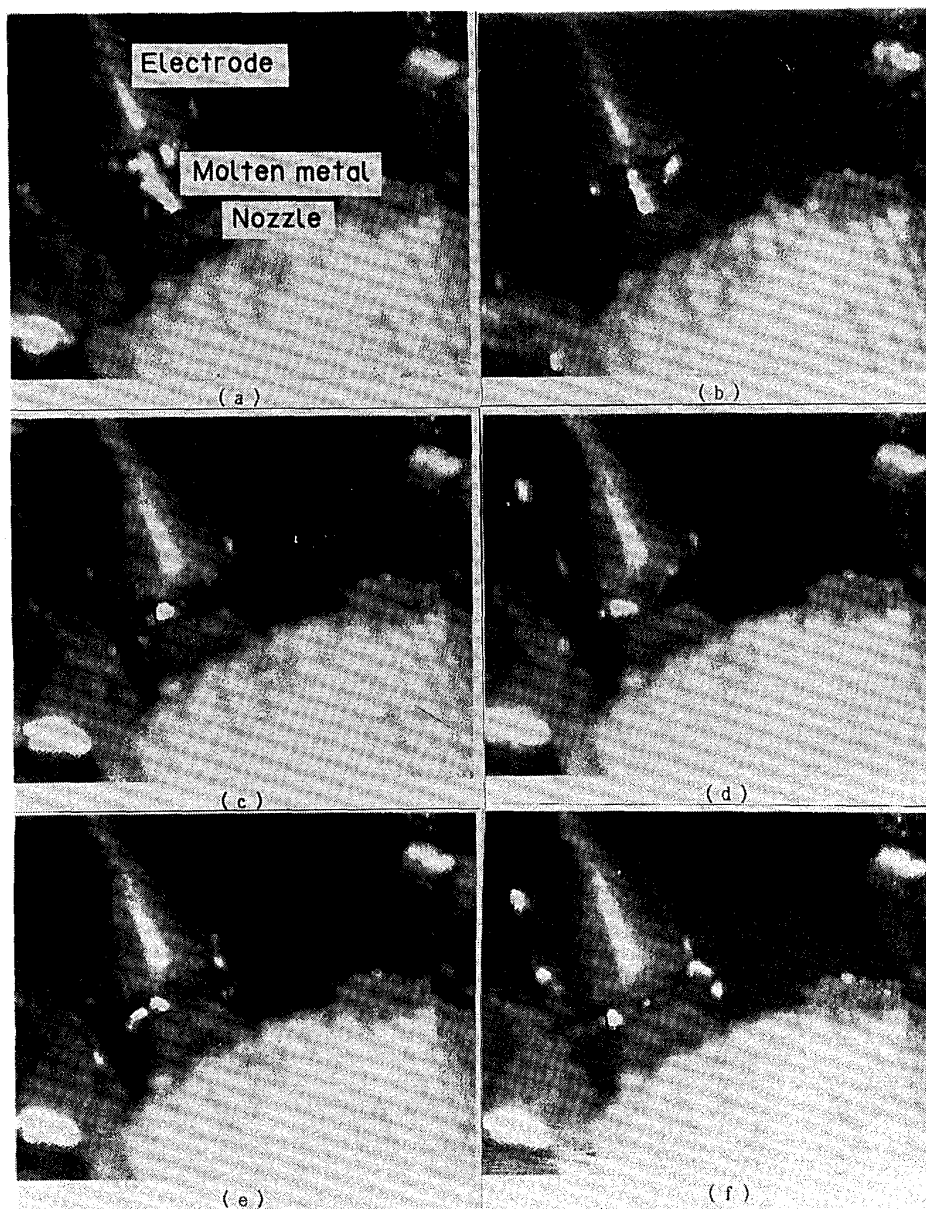


Photo. 1. Vibrating behavior of an electrode.

融金属は成長して ((a)~(b)), 電極に接し ((c)), 電氣的閉回路が形成されるが, DTC により通電は行われなため, 溶融金属は成長し続ける ((c)~(d)). そして, 所定の時間経過したのち通電が行われ, 溶融金属は飛散される ((f)).

次に, 数学的モデルの展開について述べる. VTR による観察結果から, ノズル電極間の溶融金属の形状を Fig. 3 のように近似する. 溶融金属が電極と接した瞬間における形状を円柱と半球の接合体で近似し, その体積を V_0 とする. その後, 体積は増大し飛散時には V_1 となる. その形状はノズル-電極間の中央に中心をもち, ノズル外径までを半径とする球 (半径 $R = ((l/2)^2 +$

$(d_e/2)^2)^{1/2}$) が Fig. 3(b) に示すように, ノズルと電極によって切断された形状であると近似する. ノズル内径 d_n , 外径 d_e , ノズル電極間距離 l とすると V_0 と V_1 は次のように表すことができる.

$$V_0 = \pi d_n^2 (6l - d_n) / 4 \dots\dots\dots (1)$$

$$V_1 = \pi (d_e^2 l / 4 + l^3 / 6) \dots\dots\dots (2)$$

一方, 電流印加遅延時間を t_d とし, 溶融金属の質量流出速度 q , 試料の密度を ρ とすると (3) 式が成り立つ.

$$q \times t_d = \rho V_1 - \rho V_0 \dots\dots\dots (3)$$

(3) 式はノズル径等の装置サイズに対して, 操作条件である流出速度, 電流印加遅延時間の関係を与えるものである. さらに得られた粒子の質量を m とすると (4) 式

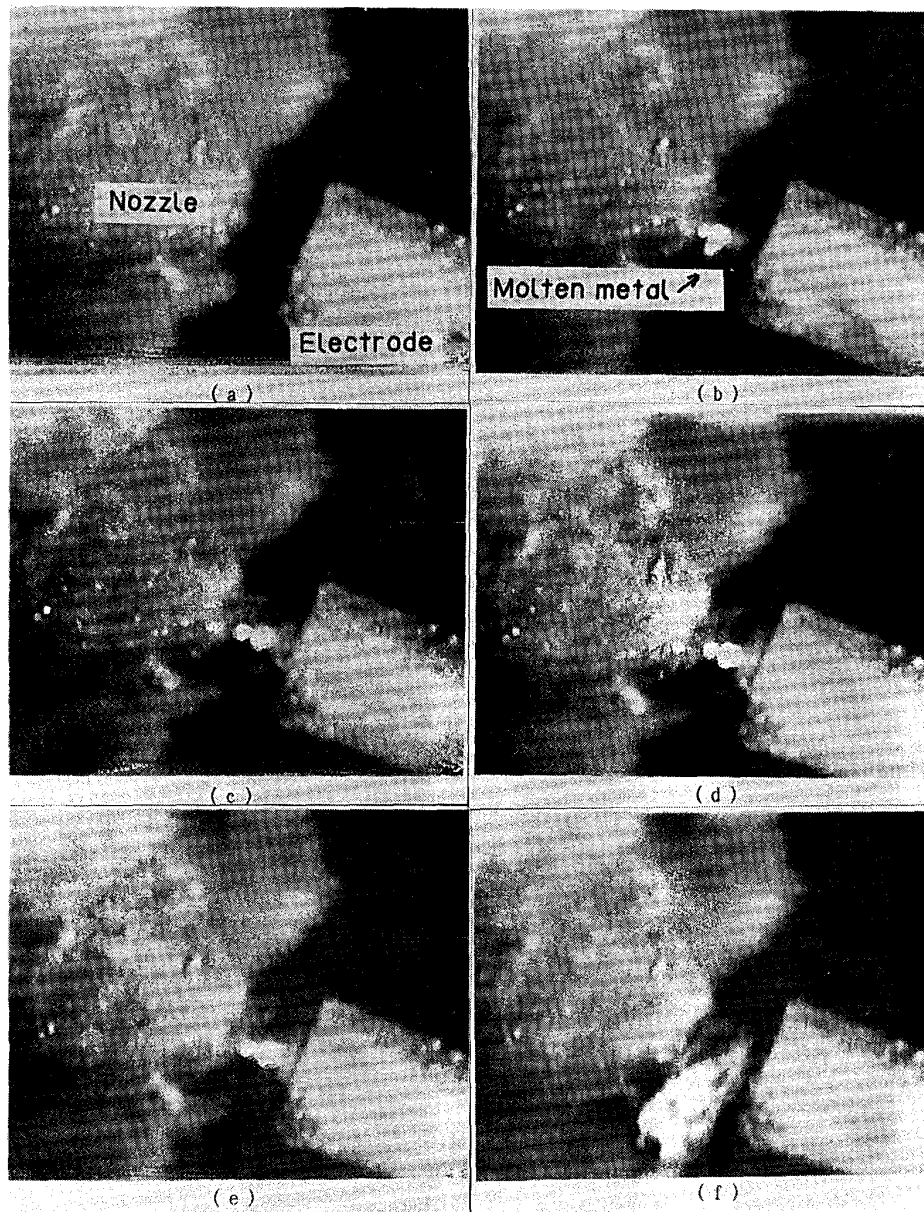


Photo. 2. Splashing behavior of molten metal.

が得られる.

$$m = q \times t_d + \rho V_0 \quad \dots\dots\dots(4)$$

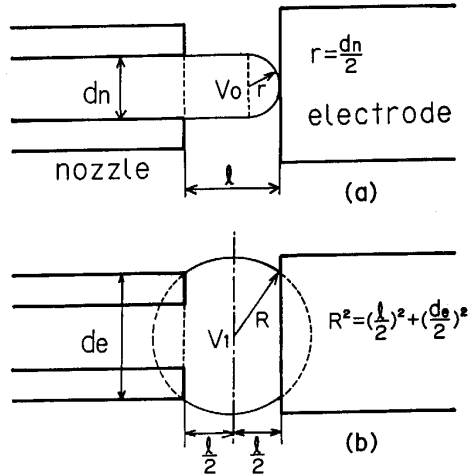
(4)式が粒径制御の基本式である.

実験条件を Table 1 に示す. Fig. 4 は, 熔融金属の流出速度 q を一定とし, 遅延時間 t_d と一個粒子の平均質量 m の関係をプロットしたものである. 図中の破線は(4)式による理論線である. $t_d < 3.5$ ms, $m < 7 \times 10^{-3}$ g 付近までは直線と良く一致しているが, それ以上では理論線からのずれが大きくなっている. これは t_d が長くなるとノズル電極間の熔融金属が供給過剰となり, ノズルや電極の側面にあふれ, その結果, 熔融金属が単一ではなく分裂して飛散したためと考えられる.

Fig. 5 は, 熔融金属の流出速度 q と粒子質量の関係を t_d を変えて求めたものである. おおのこの破線は, (4)式による理論線である. Fig. 4 同様, 粒子質量 7×10^{-3} g 付近までは直線とよく一致するが, q が大きくなると先に述べた理由により, 理論線からのずれが大きくなる.

以上により, 本プロセスの粒径制御の一般式は(4)式で表され, 粒径は, ノズル内径および外径, ノズル-電極間距離, 遅延時間, 熔融金属の流出速度によって決定できることがわかった.

(4)式を満たす実験条件下で得られた粒径分布の累積体積率を Fig. 6 に示す. 図中に示した各印は, ノズル-



(a) At the moment which molten metal contacts with an electrode
(b) At the moment which electric current is imposed on molten metal

Fig. 3. Schematic view of molten metal between a nozzle and an electrode.

Table 1. Experimental conditions.

Sample		Sn
Density	ρ	$6.92 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ (at 573 K)
Magnetic flux density	B	$0.7 \sim 1.3 \text{ T}$
Current	I	$4 \sim 30 \text{ A}$
Voltage	V	$2 \sim 8.5 \text{ V}$
Temperature	T	573 K
Nozzle diameter	d_n	$0.5 \times 10^{-3} \text{ m}$
Gap between nozzle and electrode	l	$(0.4 \sim 1.0) \times 10^{-3} \text{ m}$
Delay time	t_d	$1.7 \sim 10.7 \text{ ms}$
Mass flow rate of metal	q	$0.4 \sim 2.5 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$

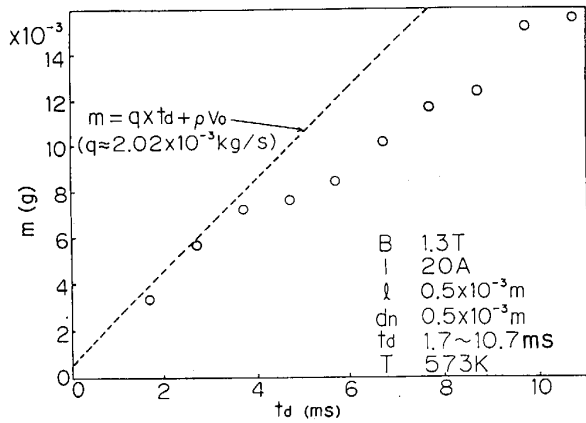


Fig. 4. Relation between delay time and mean mass of a particle.

電極間距離 l の違いを表している。本プロセスによって、粒径は非常に狭い範囲に集中可能であることがわかる。

つぎに、運動量と力積の関係を示す。飛散時に電磁エネルギーがすべて粒子の運動エネルギーに変換されるものとすれば、ノズル-電極間の溶融金属に誘発される電磁気力に通電時間を掛けて求まる力積と、飛散時の粒子

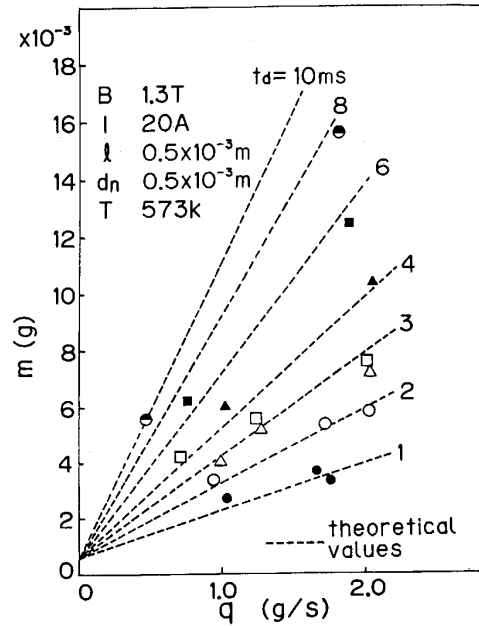


Fig. 5. Relation between mass flow rate of molten metal and mean mass of a particle.

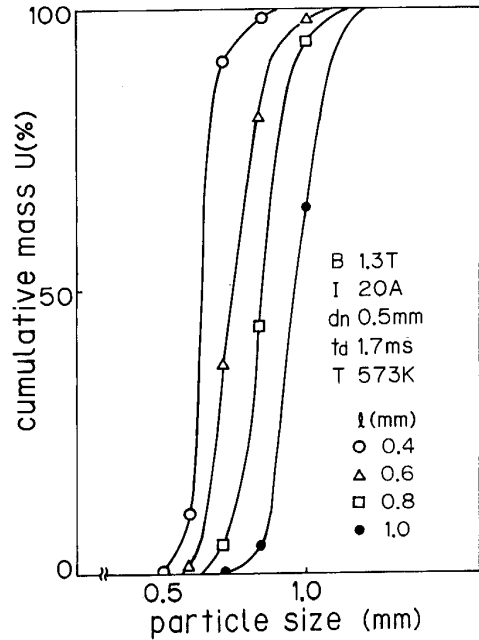


Fig. 6. Relation between cumulative mass and particle size.

の運動量 (速度×質量) との関係は次式で表される。

$$BI l t_s = m u_0 \dots\dots\dots (5)$$

u_0 は、金属粒子の水平方向の飛散の初速度であり、粒子の水平飛行距離 x および垂直方向落下距離 h を表す (6), (7) 式を使って両式から t を消去して得られる (8) 式を用い、 x と h を実測して求める。

$$x = u_0 t \dots\dots\dots (6)$$

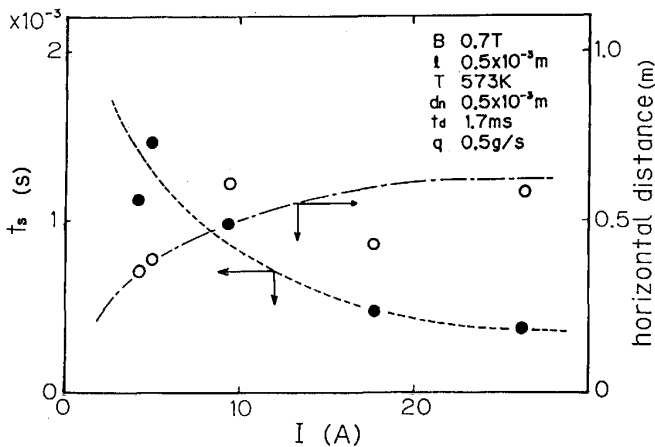


Fig. 7. Relations between the period during applying electric current and between the horizontal distance of a splashed particle and electric current.

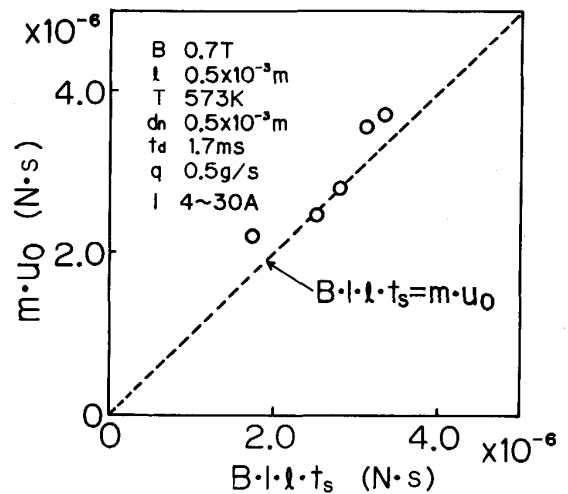


Fig. 9. Relation between momentum and impulse.

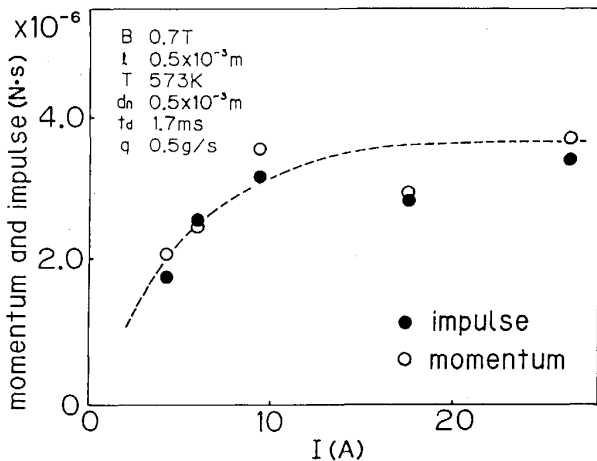


Fig. 8. Relations between momentum and impulse of a particle and electric current.

$$h = gt^2/2 \dots\dots\dots(7)$$

$$u_0 = x(g/2h)^{1/2} \dots\dots\dots(8)$$

電流 I に対する通電時間 t_s 、飛散距離 x の測定結果を Fig. 7 に示す。電流を増加させると飛散距離 x は増加するが、電流が 10 A を超えると、飛散距離は頭打ちとなり、増加せずほぼ一定値となる。これに対して通電時間は、双曲線的に減少している。これらの測定値を基に運動量、力積を(5)式より求め、電流に対する運動量、力積の関係を図示したのが Fig. 8 である。電流が 10 A を超えるあたりから運動量、力積とも頭打ちとなり、およそ 2.6×10^{-6} (N·s) で一定値となる。このように本プロセスでは、熔融金属に与え得る力積には臨界値が存在し、その結果電流を増加させた場合には、飛散距離に漸近値が現れることが判明した。これは、電磁気力の増加により熔融金属の加速度が大きくなり、通電可能な時

間(熔融金属がノズル-電極間に滞留している時間)が短くなるためである。さらに上述の測定結果を基に力積と運動量の関係を Fig. 9 に示す。図中の破線は(5)式に示した理論線である。本法における微粒化のプロセスをミクロにみると、電磁エネルギーが消費されるのは、1)界面生成エネルギー、2)付着液体を引き離すのに要するエネルギー、3)運動エネルギー、4)熱発生等が考えられる。ここで、実験結果に基づいて推算可能な1)界面エネルギーと電極エネルギーの比を、熔融金属の表面張力 γ を用い次式により推算すると次のようになる。

$$\frac{\pi(d_n^2 + d_e^2)\gamma/4}{(Bll_s)^2/2m} = 0.065 \dots\dots\dots(9)$$

なお、2)と4)については、その推算が困難であるが各測定点は理論線に近いものとなっていることから、熔融金属に与えられた電磁エネルギーは、ほとんど飛散粒子の運動エネルギーに変換されているものと考えられる。さらに Fig. 9 の図上で、 $Bll_s \leq mu_0$ となっているのは、飛散距離の測定や、電流値に実験上の誤差が含まれていたためと考えられる。

先報では²⁾、(5)式の力積と運動量の関係を説明するために比例定数 α を導入し、その値を $\alpha=0.1$ としていた。このように先報の実験では α が小さな値をとった理由は、微粒化が極めて不安定で、ノズル-電極間に蓄積された熔融金属が、一回ごとに複数個に分裂して飛散したためと考えられる。しかし、今回の実験では、先に述べた改善により微粒化が安定に行えるようになり、その結果 $\alpha=1$ なる結果が得られたものと考えられる。

4. 従来法との比較および本電磁微粒化法の特徴

本プロセスにおける粒径制御の主要操作因子は、ノズ

ル径, ノズル-電極間距離, 電流印加遅延時間, 溶融金属の流出速度である. このうちノズル径, ノズル-電極間距離が最も支配的な因子である. 従って粒径をより微細化するにはノズル径, ノズル-電極間距離を小さくする必要がある. しかしながら, ノズル径を小さく取りすぎるとノズル材とのぬれ性が問題となる. 溶融金属を効率よくノズルから流出させるためには, ノズル材と溶融金属のぬれ性に着目して, ノズル材質の選択が肝要となる. また, ノズル径, ノズル-電極間距離の縮小化にともなって, 電磁気力に対して表面張力の寄与が増大するため, 電磁エネルギーの運動エネルギーへの変換効率の低下が予想される.

一方, 現在工業的に用いられる噴霧法には, 水噴霧³⁾ およびガス噴霧法⁴⁾, 遠心噴霧法⁵⁾, 真空噴霧法⁶⁾ 等があるが, これらの各種噴霧法の平均粒径は, いずれも数十 μm のオーダーである. しかしながら, これらの噴霧法は, 溶湯と噴霧媒体 (ガス, 液体, 固体) の衝突時に生ずる運動エネルギーの飛散を利用するものであり, 製造された粒子は広い粒度分布をもっている. 一方, ここに採用した操作条件下で, 本法によって得られた粒径は他の噴霧法による粒径の数十倍となっている. なお粒度分布は本電磁微粒化法の方が極めて狭いといえよう. 従って, 現時点の電磁微粒化法は, 数百 μm の比較的大きな均一粒子の製造に適しているとみなせる. なお, ノズル径の減少とノズル-電極間距離の減少により, さらに粒径を減少せしめることが可能なことは上述したとおりである. また, 他の噴霧法では媒体との衝突を通して噴霧させるため, 媒体との汚染が避けられず, 媒体や雰囲気を限定されることもある. 本電磁微粒化法では, 噴霧化に電磁エネルギーを用いるため, 雰囲気を自由に選択できるという特徴を有する. さらに, 粒滴の飛散方向を印加磁場の方向によって容易に変更できることも本プロセスの特徴である. そのため, スプレーガンとしての使用も考えられよう.

5. 結 言

先に提案した電磁微粒化法のプロセス特性を詳細に調べるとともに, 本プロセスの制御性の改善を図った. 次に, 本研究で得られた主要結果を以下に示す.

1) 粒子の粒径は, 溶融金属と電極との接触状態に依存し, 粒径はノズル径, ノズル-電極間距離, 電流印加遅延時間, 溶融金属の流出速度により制御可能である.

2) 粒径分布を極めて狭い範囲に集中させることが可能である.

3) 溶融金属の力積には上限が見られ, その結果, 粒子の飛散距離には漸近値が存在する.

4) 溶融金属が単体となって微粒化される時, 与えられた電磁エネルギーのほぼ 100% が, 粒子の運動エネルギーに変換される.

最後に, 本研究費の一部は日本鉄鋼協会特定基礎研究会よりご援助いただいたことを記し謝意を表します. また, 撮影に際しご協力いただいた中部ビデオプロダクツ (株) 井戸敬司氏に深く感謝致します.

記 号

- B : 磁束密度 [T]
 D_p : 粒子径 [m]
 d_n : ノズル内径 [m]
 d_e : ノズル外径 [m]
 F : 電磁体積力 [N/m^3]
 g : 重力加速度 [m/s^2]
 h : 垂直方向落下距離 [m]
 I : 電流 [A]
 J : 電流密度 [A/m^2]
 l : ノズル-電極間距離 [m]
 m : 粒子一個の平均質量 [kg]
 q : 溶融金属の質量流出速度 [kg/s]
 r : 溶滴形状の記述に用いられる長さ ($r = d_e/2$) [m]
 R : 溶滴形状の記述に用いられる長さ ($R = ((l/2)^2 + (d_e/2)^2)^{1/2}$) [m]
 T : 溶融金属の温度 [K]
 t : 飛散粒子の滞空時間 [s]
 t_d : 電流印加遅延時間 [s]
 t_s : 通電時間 [s]
 U : 粒子の累積頻度 [—]
 u_0 : 粒子の水平方向の初速度 [m/s]
 V : 電圧 [V]
 V_0 : 電極との接触時の溶融金属の体積 [m^3]
 V_1 : 飛散時の溶融金属の体積 [m^3]
 γ : 溶融金属の表面張力 [N/m]
 ρ : 溶融金属の密度 [kg/m^3]

文 献

- 1) D. MATHOR, D. WEI and D. APELIAN: Proc. of 4th Int. Conf. on "Modeling of Casting and Welding Process", Palmcoast, FL, USA (1988) Apr., p. 275
- 2) 佐々健介, 安形直人, 小塚敏之, 浅井滋生: 鉄と鋼, 75 (1989), p. 1294
- 3) Metal Handbook Ninth Edition, Vol. 7, "Powder Metallurgy" (1984), p. 27 [American Society for Metals]
- 4) 榛葉久吉, 三谷裕康: 標準金属学講座 6 "粉末冶金学" (1962), p. 11 [コロナ社]
- 5) 高田利夫, 田村皖司, 土方俊三: 粉末冶金技術講座 3 (金属粉の生成) (粉末冶金技術協会編) (1964), p. 52 [日刊工業新聞社]
- 6) W. FIETSH: P/M-82 in Europe International Powder Metallurgy Conference, Florence, Italy (1985) June, p. 739