

© 1989 ISIJ

 論文
 論文

電磁気力による熔融金属の微粒化

 佐々健介*・安形直人*²・小塚敏之*³・浅井滋生*⁴

Atomization of Molten Metal by Use of Electromagnetic Force

Kensuke SASSA, Naohito AGATA, Toshiyuki KOZUKA and Shigeo ASAI

Synopsis:

A new atomization process is proposed in which molten metal is atomized by electromagnetic energy instead of kinetic one produced by fluid impingement or disk rotation in the conventional atomization processes. This electromagnetic atomization process was tested to clarify characteristics of atomizing molten metal. It was found that a crucial operation process factor is a contacting condition of molten metal with an electrode. In order to control the condition, a delay time controller unit was developed and incorporated in the electromagnetic atomization process. It is noticed that this controller works well to produce the better uniform size particles than those of conventional atomization processes.

A linear relation between the impulse which is defined as the product of the imposed electromagnetic force and the period of current passing, and the momentum which is defined as the product of the mass and the velocity of splashed particle, is found by use of experimental data and this fact is explained from a theoretical view point.

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

1. 緒 言

現在、金属粉末は機械的、化学的、あるいは物理化学的方法によって造られているが、中でも、熔融金属から直接、金属粉末を得る各種噴霧法が主流をなしている。熔融金属の噴霧化においては、流体あるいは固体の運動エネルギーを利用してメタルと流体（ガス、液体）間、メタルと固体（ディスク）間の衝突を介した飛散が図られている。そのため、噴霧化には常に偶発的で不確定な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には必然的に広がりが生じがちである。また、制御可能な操作変数も少なく、そのため粒度分布の広がり平均粒子径を的確に制御することは困難であると考えられる。そのほか、上記噴霧法においては雰囲気限定されるものもあり、その適用が困難な場合も生ずる。

一方、近年、直接成型プロセスとして、スプレー・キャストや半凝固した粒滴を双ロール法を用いて圧延する方法¹⁾が試行されている。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。

以上の観点を踏まえて、本研究では、運動エネルギーに代わり電磁エネルギーを利用する熔融金属の微粒化法を考案し、その試行実験を行う。そして、粒滴化状況の観察結果に基づいて、考案したプロセスによる微粒化の可否と主要操作因子を明らかにする。

2. 従来の方法と電磁微粒化法の原理

2.1 従来の方法

現在工業的に用いられている細粒化法は、グレイニング (Graining)、ショットイング (Shotting)、噴霧法 (Atomization) の3種類に分類される²⁾。なかでも、噴霧法は溶解可能な金属を効率的に細粒化するものであり、大きく次の三つの方法に分類できる³⁾。

①水噴霧法あるいはガス噴霧法

②遠心噴霧法

③真空噴霧法

①水噴霧法は熔融金属に高圧ジェット水を吹き付け、流体の運動エネルギーにより噴霧させる方法である。本法で製造される粉末の平均粒度は、現状の生産規模設備

昭和 63 年 3 月本会講演大会にて発表 昭和 63 年 8 月 25 日受付 (Received Aug. 25, 1988)

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

*² 名古屋大学工学部 (現: 日本電装(株)) (Faculty of Engineering, Nagoya University, Now Nippondenso Co., Ltd.)

*³ 名古屋大学工学部 (現: 熊本大学) 工博 (Faculty of Engineering, Nagoya University, Now Kumamoto University)

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

ではほぼ 50~70 μm であり、粉末の形状は不規則なものになりがちである。一方、ガス噴霧法は高压の窒素ガス、アルゴンガスあるいは空気を溶融金属流に吹き付けるものである。この方法で得られる粉末の平均粒径は水噴霧法のものと同様であるが、形状は球形になりやすい。

②遠心噴霧法には高速度で回転する円板状に溶湯を流下させ、遠心力により噴霧化を図るもの⁴⁾とその改良法であるプラズマ回転電極法⁵⁾がある。後者は、高速回転する消耗電極をプラズマによって溶解し、遠心力によって噴霧化するものである。この方法では溶融金属がほぼノズルと接触しないため、その汚染を避けることができる。この方法で製造される粉末の平均粒径は 150~200 μm 程度で、形状は球状のものが多く。

③真空噴霧法としては、水素ガスを吸蔵させた溶融金属を真空中へ噴出させ、吸蔵された水素が真空中へ放出される際の運動エネルギーにより噴霧化する方法がある⁶⁾。この場合、粉末の平均粒径は約 40~60 μm となっている。

以上、①と②の各種噴霧法は、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る。また、③においても内部エネルギーとして蓄積されたガスの放出に伴う運動エネルギーによっている。そのため上述した各種噴霧法とも、噴霧化に当たっては偶発的で不確定な因子が生ずることは避けられない。その結果、製造された粒子はおのずと広い粒度分布を持ち、粒度分布と粒形を的確に制御することは困難である。また、①および③においては、噴霧化媒体として気体や液体が用いられるため化学的な不適合が生じ、場合によっては適用できる金属種も限定されることになる。②においては、回転円板に熱応力に伴う歪みが生じると、それに大きな遠心力が作用して回転円板の破損に繋がるため回転速度は制約されることになる。プラズ

マ回転法においては、粒径をより小さくするためには消耗電極の回転数を上げる必要があるが、電極の軸対称性を保つことが難しいことから回転数の増大は困難となっている。このように、従来法の種々の問題点は噴霧化に運動エネルギーを使用する点に起因するものが多く、以上述べた問題点の解決策が模索されている。

2.2 電磁微粒化法の原理

本報で提案する電磁微粒化法は、上述した従来法の問題点を克服するため噴霧化に作用する運動エネルギーに代わり電磁エネルギーを利用する溶融金属の粒滴化法であり、その基本原理はフレミングの左手の法則である。

Fig. 1 に本プロセスの基本原理を示す。ノズルから水平方向に流出する溶融金属がノズルと対向して設けられた電極に接触した際に、電気的な閉回路が形成されて溶融金属中に直流電流が流れるように装置を構成する。ノズルから流出する溶融金属中を流れる電流(J)の方向と直交する磁場(B)をノズルと電極間に印加しておく。溶融金属が電極に接触すると電流が流れ、フレミングの左手の法則によって、溶融金属内に電磁体積力(F)が紙面に垂直方向に誘発され、ノズルと電極間に位置する溶融金属が飛散される。飛散の結果、電流は遮断されるが、引き続いて流出する溶融金属が電極に接触して再び通電され、電磁体積力により溶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、連続的に溶融金属の粒滴化がなされることになる。

溶融金属に働く界面張力による保持力が張力に勝り、ノズル-電極間に溶融金属がいったん保持され、それが電磁気力によって飛散されるためには次の条件が満足されねばならない。

$$VJB > \pi d \gamma \geq mg \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\pi d \gamma$ はノズル-電極間の溶融金属を円柱形状に近似した場合に溶融金属に働く表面張力である。

3. 実験装置および方法

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溶融金属供給系、③電極、④永久磁石、⑤電流・電圧記録計と後で詳細を述べる⑥遅延時間設定装置から構成されている。

パイレックスガラス製の容器内にスズ 300 g を装入し、加熱溶解する。⑦湯溜部および⑧ノズル先端部に設定した⑨熱電対(K)により温度を測定し、所定の温度に保持した。湯溜部に黒鉛製の正極を浸漬し、負極をノズルに相対向する位置に設定した。さらに、電源の電流と電圧を調整した後、 N_2 ガスにより湯溜部から溶融金属を流出させた。この溶融金属の流出速度はガス流量を

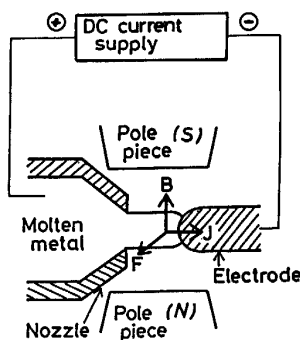


Fig. 1. Schematic view of electromagnetic atomization.

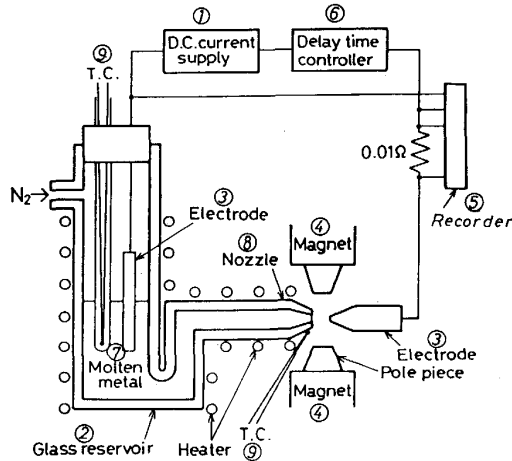


Fig. 2. Schematic view of experimental apparatus.

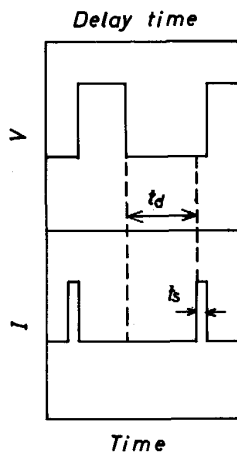


Fig. 3. Schematic patterns of voltage and current indicating the function of the delay time controller.

調整することにより制御した。一方、ノズルと電極間のギャップ位置が永久磁石の磁極間の最大磁束密度の部分となるよう磁石を設定したが、その際、鉛直上向きの磁場を印加するように下側にN極、上側にS極を配した。ノズルと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。予備実験の結果、電極と熔融金属の接触状態が常に同一とはならず、微視的に見ると電極と熔融金属間の電流方向が定まらないため飛散状況の不安定性を招き、粒子径分布の広がりにつながるが判明したので、接触状態を改良する目的で⑥遅延時間設定装置を考案し設定した。これは、熔融金属と電極との接触によって電気的閉回路が形成されても直ちに通電させず、対向電極と熔融金属とのより完全な密着を図るため、一定の時間経過を待って通電を開始させるものである。遅延時間設定装置の機能を模式的に Fig. 3 に示す。まず、電流 I が最初のピークで流れ熔融金属が飛散する

Table 1. Experimental conditions.

Current I	5~40 A
Voltage V_e	2~8.5 V
Magnetic field B	1.3 T
Nozzle diameter d_n	0.5 mm
Distance between nozzle and electrode l	0.5 mm
Temperature T	523~573 K
Delay time t_d	0~100 ms
Molten metal flow rate q	$(0.07\sim 1.42)\times 10^{-6}\text{m}^3/\text{s}$

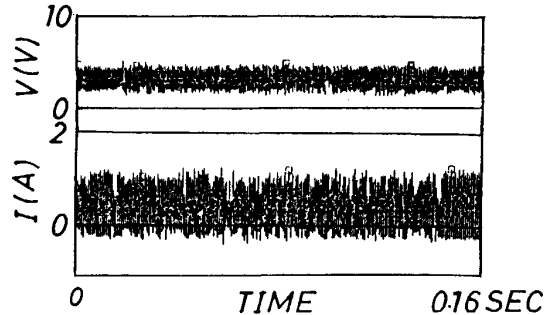


Fig. 4. Observed variations of voltage and current under the condition of zero delay time.

と、直ちに溶湯の供給が開始される。その間、電圧が上昇した状態を保つが、溶湯が電極に接触すると電圧は降下する。その後、設定した遅延時間 t_d の間、溶湯が供給され続け電極と十分接触を果たした後、 t_s 時間通電され飛散される。電流波形のピークからピークまでの時間が飛散の時間間隔を示している。

通電により溶湯の温度上昇が考えられるが、湯溜部やノズル先端に設置した熱電対で読み取れるほどの温度変化は見られなかった。

以上のようにして熔融金属の微粒化実験を行い、粒滴化の様子を観察するとともに写真撮影を行った。また、ノズルから飛散された金属粒子の落下地点までの鉛直落下距離と水平飛行距離を測定した。

なお、本実験条件を Table 1 に示す。

4. 実験結果および考察

4.1 遅延時間設定装置と飛散距離

Fig. 4 は遅延時間設定装置を用いない場合の電流と電圧の挙動を示す。これより電流と電圧の変化は激しく、飛散が間断なく継続していることがわかる。記録計のブラウン管上で電流と電圧の変化を拡大してみると飛散の時間の間隔は約 0.7 ms であった。

一方、Fig. 5 は遅延時間設定装置を用いて遅延時間を 20 ms に設定した場合の電流と電圧の変化を示したものである。図より明らかに飛散は約 27 ms の間隔で規則的に行われていることがわかる。なお、図中に見られる □印は遅延時間計測のために記録計のブラウン管上に入

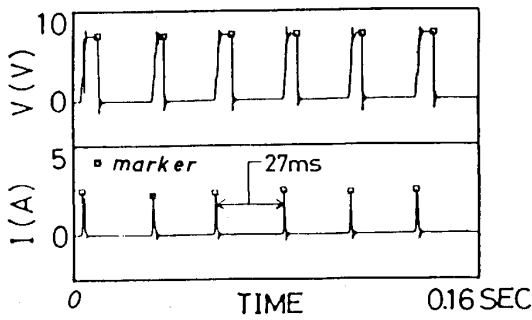


Fig. 5. Observed profiles of voltage and current under the condition of 20 ms delay time.

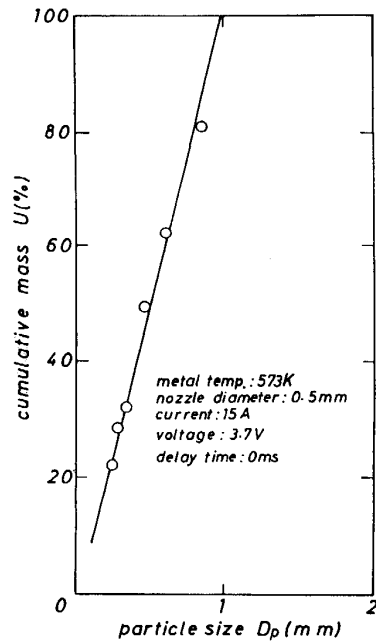


Fig. 6. Relationship between cumulative mass and particle size.

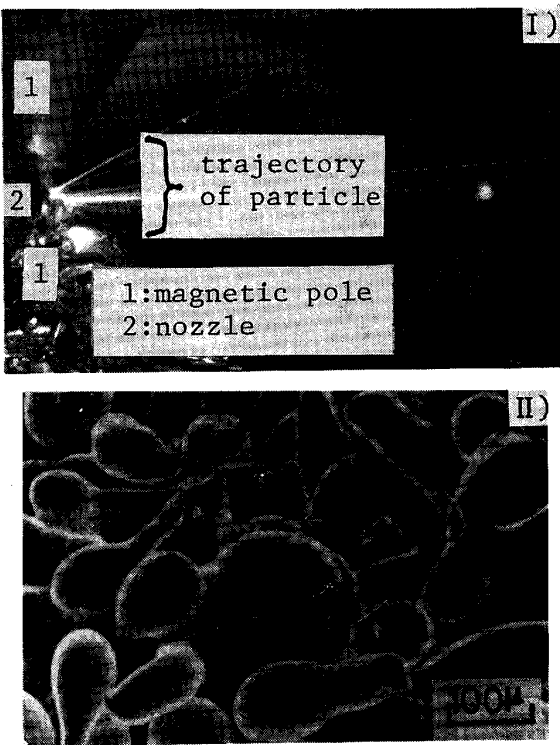


Photo. 1. I) Trajectory of particles in the electromagnetic atomization process under the condition of zero delay time (shutter speed : 1/30 s) and II) SEM view of particles.

れたマーカーである。Photo. 1 は遅延時間を設定しない場合の溶融金属の飛散状況を示したものである。I) の細く光沢を持って見える筋は飛散粒子の軌跡である。II) はその時に得られた粒子の SEM 写真である。Fig. 6 に得られた粒子の粒径分布を示す。遅延時間設定装置を用いない場合には、溶融金属と電極との接触状態のばらつきから粒径分布が見られる。

Photo. 2 は遅延時間を 20 ms に設定した場合の飛散状況を示したもので、I) の白く見える線分が飛散粒子一個ずつの軌跡であり、光跡がほぼ同じ長さであることから飛散が等時間間隔で行われていることがわかる。な

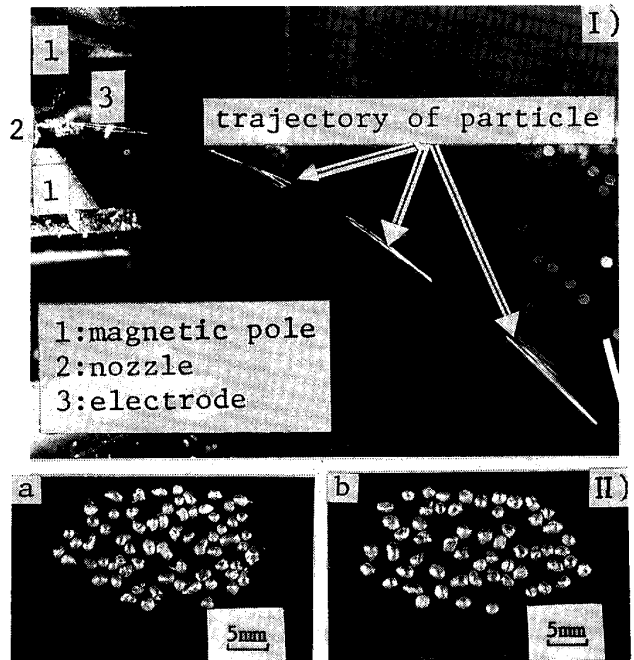


Photo. 2. I) Trajectory of particles in the electromagnetic atomization process under the condition of 20 ms delay time (shutter speed : 1/30 s) and II) micrograph of particles.

お、撮影に当たっては、飛散粒子からレンズを守るためレンズ前面に板ガラスを設置した。白く見える光跡が複数個重なって見られるのはそのためである。II) に得ら

れた粒子の写真を示した。右側 (a) は金属流出速度 $q = 1.67 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$, 左側 (b) は $q = 3.43 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ の場合である。遅延時間設定装置の導入により、粒径はほぼ均一なものを得られた。すなわち、JIS 規格の篩目の一間隔に相当する $D_p = 1.45 \sim 1.19 \text{ mm}$ (右側) $D_p = 1.19 \sim 1.00 \text{ mm}$ (左側) の範囲に入るものであった。また、流出速度の増大に伴って粒径は増大した。

4.2 理論的考察

熔融金属部分に誘発される単位体積当たりの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の運動量との関係を求める。

運動量と力積の関係は (1)式で表される。

$$mv_0 = VJBt_s \dots\dots\dots (1)$$

(1)式を変形すると (2)式となる。

$$\rho v_0 = JBt_s \dots\dots\dots (2)$$

(1), (2)式に表れる水平方向の飛散の初速度 v_0 は、金属粒子の垂直方向落下距離 h および水平飛行距離 x を表す (3), (4)式から t を消去して得られる (5)式を用いて、 h と x の測定値から求める。

$$h = (1/2)gt^2 \dots\dots\dots (3)$$

$$x = v_0t \dots\dots\dots (4)$$

$$v_0 = x\sqrt{g/2h} \dots\dots\dots (5)$$

また、 J の値は Fig. 5 に示した電流値 I をノズル断面積 S で割って求めた。さらに、 t_s についても同図より求めた。

測定値を (2)式の関係に基づいてプロットすると Fig. 7 に示すように、かなり良い直線関係が得られた。この直線を (6)式のように表示する。

$$\alpha\rho v_0 = JBt_s - \beta \dots\dots\dots (6)$$

Fig. 7 に示した実測値を用いて最小自乗法により (6)

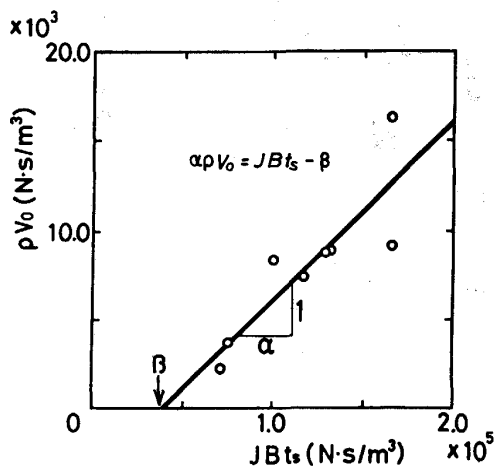


Fig. 7. Relationship between momentum and impulse.

式の α と β の値を求めると $\alpha = 0.1 (-)$, $\beta = 0.38 \times 10^5 [\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^3]$ が得られた。

α は一回の飛散で作られる金属粒子の数によって決まる補正係数である。熔融金属が単一粒子として飛散されている場合には、 $\alpha = 1$ となる。本研究結果では $\alpha = 0.1$ となったが、これは熔融金属と電極との接触状態の不安定性に起因して、同時に数個の粒子が飛散され、その内の微粒子は空気中で燃焼消失するなどして、粒子の回収が完全でないためと考えられるが、なお、この詳細については現在、実験によって調査検討中である。

一方、 β は熔融金属と電極間の付着力に基づく力積であり、電磁気力が β の値より大きくならないと飛散できなかったことを示している。

5. 電磁微粒化法の特徴

電磁微粒化法は、金属に限らず広く電気伝導性物質に適用できるものであり、得られる粒子の粒度分布と粒径の制御も従来法に比較してよりの確に成しうるものと考えられる。また、電磁エネルギーは局所集中が可能で、かつ機械的駆動部を必要としないため小型で簡素なものとなる。さらに、噴霧化媒体を用いないため粒滴化時の雰囲気を自由に選択できるという特徴を有する。そのほかに、印加する電流および磁場をそれぞれ直流、交流と変化させ組み合わせることによって金属粒子の飛散方向および粒滴化挙動を変化させることも可能と考えられる。また、磁場の方向を時間的に変化させることによって粒子の飛散方向を連続的に変化させることが可能でありスプレーキャストの粒滴化装置や、溶射におけるスプレーガンとしての応用も期待できよう。

6. 結 言

本研究の結果を以下に示す。

- ① 電磁気力を利用した熔融金属の微粒化法を考案し、その試行実験を行った。そして電磁気力に基づく熔融金属の微粒化が可能であることを確認した。
- ② 熔融金属と電極との接触状態が本プロセスの主要因子であることを明らかにし、この接触状態を制御するため遅延時間設定装置を考案した。
- ③ 遅延時間設定装置により粒径分布の制御が可能であることを示した。
- ④ 電磁気力と通電時間の積である力積と飛散粒子の運動量との間に直線関係が存在することを理論的に予測し実験により確認した。

最後に、本研究経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。

記号

B : 磁束密度 [T]
 D_p : 粒子径 [mm]
 d : ノズル-電極間の溶融金属の直径 [m]
 d_n : ノズルの直径 [mm]
 g : 重力加速度 [m/s^2]
 h : 垂直方向落下距離 [m]
 I : 印加電圧 [A]
 J : 電流密度 [A/m^2]
 l : ノズル-電極間距離 [mm]
 m : 粒子の質量 [kg]
 q : 溶融金属の流量 [m^3/s]
 T : 溶融金属の温度 [K]
 t : 粒子の滞空時間 [s]
 t_d : 遅延時間 [ms]
 t_s : 通電時間 [s]
 U : 累積頻度 [%]
 V_0 : 粒子の水平方向の初速度 [m/s]
 V : ノズル-電極間に存在する溶融金属の体積 [m^3]

V_e : 印加電圧 [V]
 x : 飛散粒子の水平飛行距離 [m]
 α : (6)式に表れる補正係数 [-]
 β : 溶融金属-電極間の付着力に起因する単位体積当たりの力積 [$N \cdot s/m^3$]
 ρ : 溶融金属の密度 [kg/m^3]

文献

- 1) S. ANNAVARAPU, D. APELIAN and A. LAWLEY: Proc. of 4 th Sympo., "Modeling of Casting and Welding Process", Palmcoast, FL, USA, (1988) Apr. 印刷中
- 2) 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]
- 3) 河合伸泰, 佐藤義智, 関 義和: 資源処理技術, 33 (1986), p. 39
- 4) 粉末冶金技術協会, 粉末冶金技術講座 3 (金属粉の生成) (1964), p. 52 [日刊工業新聞社]
- 5) A. LAWLEY: J. Met., 33 (1981) 1, p. 13
- 6) W. FIETSH: P/M-82 in Europe International Powder Metallurgy conference, Florence, Italy (1985) June, p. 739