

プラズマ回転電極法による Ti-6Al-4V 合金粉末の製造

論文

磯西 和夫*・小林 昌彦*²・時実 正治*³

Production of Ti-6Al-4V Alloy Powders by Plasma Rotating Electrode Process

Kazuo ISONISHI, Masahiko KOBAYASHI and Masaharu TOKIZANE

Synopsis :

The experimental study of the production of Ti-6Al-4V powders by the rotating electrode process (PREP) was carried out in order to determine the optimum operating conditions to obtain the powders consisting of uniform particle size. The average particle size of the powders decreases by increasing the diameter of rotating electrodes (anodes made of Ti-6Al-4V), and their rotating speed. Under the condition of the anode diameter of 30 mm and the rotating velocity of 200 s^{-1} , an average diameter of the powder particles of $270 \mu\text{m}$ with a minimum standard deviation of $10 \mu\text{m}$ was attained by controlling plasma gas flow, plasma current and melting rate of the anode to be $1.7 \times 10^{-5} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$, 200 A and $1.5 \sim 3.0 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, respectively. In order to keep such a small standard deviation of the particle size of the powder, it was also important to maintain a homogeneous melting condition on the anode surface.

Key words : powder metallurgy ; powder production ; plasma rotating electrode process ; Ti-6Al-4V alloy ; optimum operating condition ; uniform particle size ; small standard deviation.

1. 緒 言

Ti 合金は比強度が高く、耐腐食性に優れる等のすぐれた性質から近年航空宇宙産業をはじめとする、あらゆる産業分野において、新しい構造材料として重視されてきた。しかしながらこれらの合金は一般に難加工性であるために、従来の溶解法による加工プロセス (Ingot Metallurgy: I/M 法) による製造が困難である。そのために、これらの合金部材の製造には、粉末冶金法 (Powder Metallurgy: P/M 法) による Near net shape あるいは Net shape に加工成形する製造プロセスが注目されている^{1)~3)}。P/M 法による構造部材の製造においては、原料粉末の品質が製品の機械的諸性質を左右することが知られているが、Ti 合金については焼結体強度に対して、粉末に混入する不純物粒子が大きな影響を与えることから現在、主に回転電極法 (Rotating Electrode Process ; REP 法) によって製造した粉末が用いられている^{1)~6)}。REP 法においても非消耗固定電極として用いる W の混入が避けられず、その改善のためにプラズマ回転電極法

(Plasma Rotating Electrode Process ; PREP 法) が、開発された^{6)~10)}。被溶解材を回転させ、その遠心力で粉末を製造するという広い意味での REP 法については、熱源をレーザーとした研究¹¹⁾、W 電極によるアークを用いた場合における種々の REP パラメーターの平均粉末粒径に及ぼす影響についての検討¹²⁾、REP 法による粉末生成機構¹³⁾、粉末の冷却速度について¹⁴⁾、雰囲気 (Ar と He) の影響についての研究¹⁵⁾、および電子ビームを熱源とした研究¹⁶⁾ が行われているがプラズマアークを熱源とした PREP 法による Ti 合金粉末製造に関する基礎的研究はほとんど行われていない。本研究においては、PREP 法による Ti-6Al-4V 合金粉末の製造を試み、回転電極の試料径、回転速度、およびプラズマ諸条件が生成粉末の平均粒径に及ぼす影響について、特にこれまでほとんど報告されていない標準偏差を小さくする (粉末粒径を揃える) 観点から検討を行った。

2. 実験方法

本研究に用いた材料は、典型的な $\alpha + \beta$ 型合金 Ti-

昭和 62 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 63 年 12 月 21 日受付 (Received Dec. 21, 1988)

* 立命館大学理工学部 (現: 日鉄溶接工業(株)) 工博 (Faculty of Science and Engineering, Ritsumeikan University, Now Nippon Steel Welding Products and Engineering Co., Ltd.)

*² 立命館大学大学院 (Graduate School, Ritsumeikan University)

*³ 立命館大学理工学部 工博 (Faculty of Science and Engineering, Ritsumeikan University, 56-1 Tojiinkitachi Kita-ku Kyoto 603)

Table 1. Chemical composition of Ti-6Al-4V specimens.

Element	C	N	O	H	Fe	Al	V	Ti
mass%	0.005	0.007	0.149	0.0041	0.19	6.44	4.06	Bal.

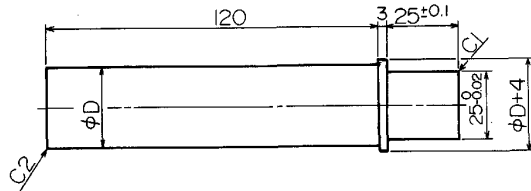


Fig. 1. Shape and dimension of the specimen used for PREP. Length units in mm.

6Al-4V である。この化学組成を Table 1 に、PREP 陽極試料形状を Fig. 1 に示す。本研究では $D = 30, 40, 50$ mm の試料を用いた。本研究で用いた PREP 装置は、いわゆる Short bar 方式⁶⁾ であり、試料は毎分 20 000 回転まで回転可能である。プラズマトーチのノズル径は、3~7 mm が選択可能である。プラズマ作動ガス流量は、 $8.3 \times 10^{-6} \sim 5.5 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($0.5 \sim 3.0 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$)、プラズマ電流は 100~300 A を使用した。また本実験装置は試料端面とトーチ先端(陰極)間のプラズマアーク電圧を常に一定に保つようにプラズマトーチを自動的に移動することができるため、溶解状況を一定に保つことが可能である。実験は、試料取付け後容器内部を真空排気し、不活性ガス (Ar, He) で 2 回置換を行った後、試料回転速度を所定の値に設定 (回転速度の誤差: $\pm 6.28 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$, $\pm 1 \text{ s}^{-1}$) しプラズマを発生させた。プラズマ作動ガス流量、プラズマ電流、電圧を所定の値に設定し、試料端面が一様な溶解状態となった後に生成された粉末の回収をおこない、同時に溶解時間の計測も行った。これはプラズマアークを発生させた直後の溶解の初期には、プラズマアークからの熱量が試料に集中的に加わり、試料端面の中心部のみが瞬間的に溶解し、また試料端面全体が溶解するまでは、粉末粒子が試料外周より内側の位置から飛び出すため、定常的な PREP の運転時とまったく異なった粒度分布の粉末粒子が生成するためである。詳細は後で述べるが、得られた粉末は、3 種類の径を有する粉末粒子に大別される。これを、ふるい分けによって完全に分離した後、粒径の測定を行った。本研究では、実体あるいは光学顕微鏡写真を用いて粒度測定し (サンプル数は約 400)、以下に示す平均径は特にことわらない限り個数基準の個数平均径である。

3. 実験結果及び考察

3.1 粉末生成機構

遠心噴霧法による粒子生成機構は、消耗電極の溶解速度と試料回転速度の増加に伴って、I) Direct Drop Formation (DDF), II) Ligament Disintegration (LD), III) Film Disintegration (FD) の 3 種の機構へ順次移行する¹³⁾¹⁷⁾ と報告されている。Photo. 1 に高速度カメラを用いた本研究に使用した PREP 装置における代表的な溶解状況の連続写真を示す (毎秒 4 000 フレーム)。同写真より、プラズマアークにより溶解している試料端面外縁部の突起から粉末粒子が直接生成されており、さらに、この写真ではあまり明瞭ではないが、1 個の粉末粒子 (一次粒子) が生成されると、その粒子の直後に、小粒径の粒子 (二次粒子) が必ず 1 個生成されることが認められた。従って Photo. 1 の実験条件下における粉末粒子生成機構は上記 I) の DDF であるといえる。Fig. 2 に、本研究で得られた粉末の粒度分布の一例を示す。直径 30 mm の試料を $1257 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ (200 s^{-1}) の角速度で実験を行ったものである。一次粒子、二次粒子の平均径はそれぞれ $271 \mu\text{m}$, $101 \mu\text{m}$ である。また、一次粒子、二次粒子の体積平均径 (それぞれ $272 \mu\text{m}$, $102 \mu\text{m}$) と質量 (それぞれ 19.484 g と 1.026 g) から、一次粒子と、二次粒子の個数比 (二次粒子/一次粒子) を求めたところ、1.003 という値を得た。この比の値は、以下に示す実験においても約 1 であり、従って本実験における粉末生成機構は Photo. 1 の場合と同様の DDF と言える。Fig. 2 において、一次粒子より粒径の大きな粉末粒子が認められるが、これは液体の粉末粒子が試料端面から飛び出る際に、たまたま 2 個の粒子が凝集したものであり、本実験の粒度分布は三つのピークを有する

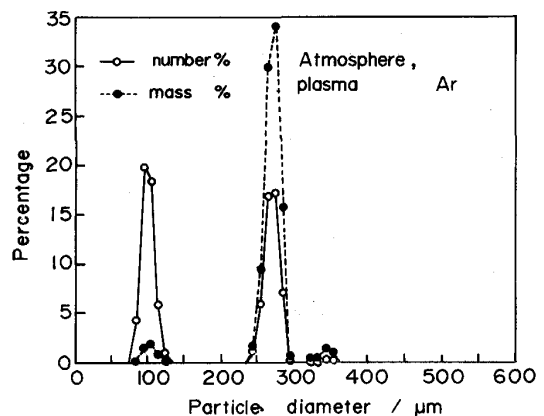


Fig. 2. Typical particle size distribution of PREP powder.

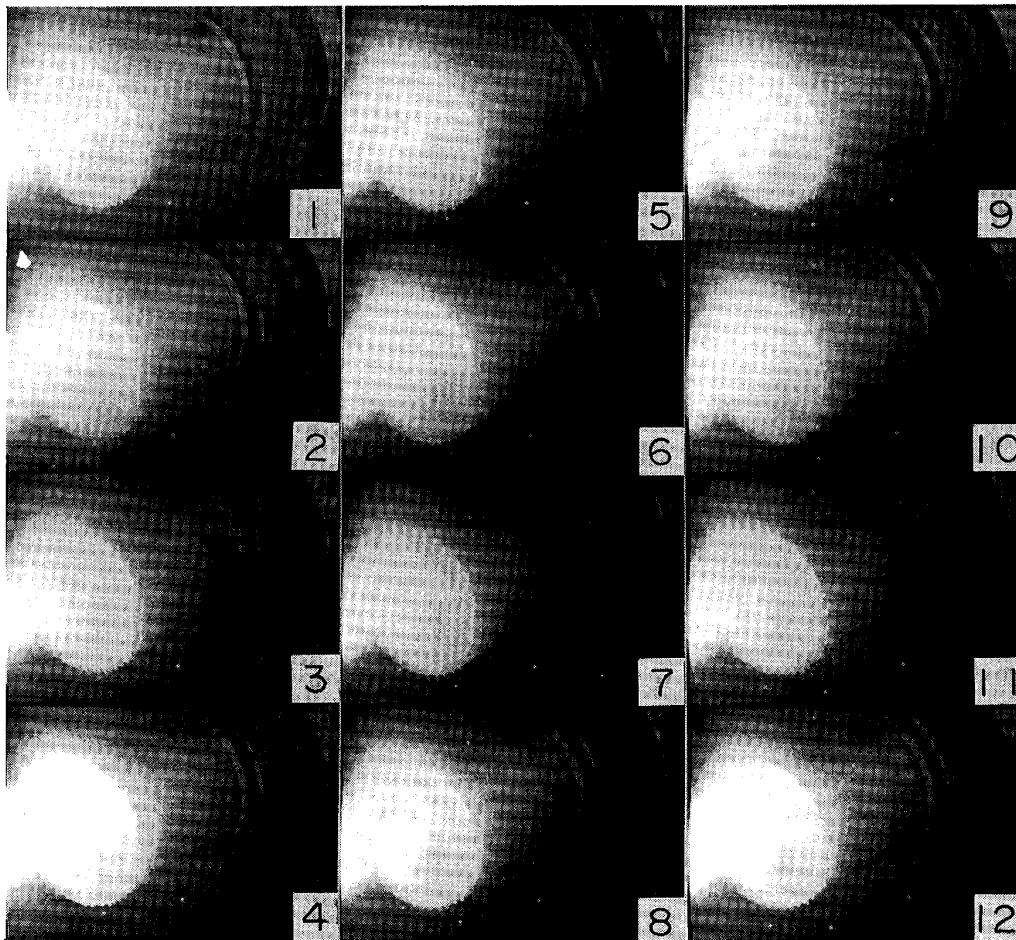


Photo. 1. A series of the photographs taken with a high speed camera during PREP ($4\,000\text{ flames}\cdot\text{s}^{-1}$).

ものの、基本的には粉末生成機構(DDF)から二つのピークを示す Bimodel¹²⁾ であるといえる。

DDF 機構による粉末粒子の形成は、熔融金属の受ける遠心力とそれに反する表面張力との釣り合いにより決定され、得られる粉末の一次粒子の平均粒径を d とすれば、理論的に次式のように表される¹⁹⁾。

$$d = K \left(\frac{\gamma}{D \cdot \rho} \right)^{1/2} \cdot \omega^{-1} \dots\dots\dots (1)$$

上式において、 K は比例定数、 γ は液体金属の表面張力、 D は PREP 試料の直径、 ρ は液体金属の密度、 ω は試料角速度である。(1)式を以下の検討における基礎式とした。CHAMPAGNE ら¹²⁾ はアーク放電を熱源とした REP 法を用いて得られる DDF 機構での一次粒子の平均径と REP パラメーターの関係を次の実験式によって示した。

$$d = 4.63 \times 10^6 \frac{1}{\omega^{0.98}} \cdot \frac{1}{D^{0.64}} \cdot \left(\frac{\gamma}{\rho} \right)^{0.43} \cdot Q^{0.12} \dots\dots (2)$$

上式において γ は $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$ 、 ρ は $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ で表し Q は溶解速度 ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) である。

3・2 試料回転速度および試料径の効果

まず直径 30 mm の試料を用いて回転速度 628~1 571 $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ ($100\sim 250\text{ s}^{-1}$) で粉末を製造した。プラズマの条件は、トーチノズル径 3 mm、作動ガス流量 $1.7 \times 10^{-5}\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ($11\cdot\text{min}^{-1}$)、プラズマアーク電流 150 A、プラズマアーク電圧 35 V である。電圧を 35 V とした場合にプラズマアークは、Photo. 1 に示したように試料端面の約 1/2 を加熱することになる。これらの条件下での試料の溶解速度は、 $1.2\sim 1.6 \times 10^{-7}\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ($0.63\sim 0.69\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$) であった。Fig. 3 の (1)~(4) にそれぞれの実験によって得られた一次粒子の、また (5) に市販品 (-35 メッシュによりふるい分けした粉末粒子全体) の個数基準粒度分布、Photo. 2 にそれぞれの回転速度で製造した粉末粒子の走査電子顕微鏡写真を示す。それぞれの写真中の小粒径の粒子が二次粒子である。Fig. 2, 3 より本実験で得られた粉末粒子はそれぞれ正規分布であることは明らかであり、また 628 $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ の PREP 粉末を除いて、粒度分布は極めて狭い範囲に

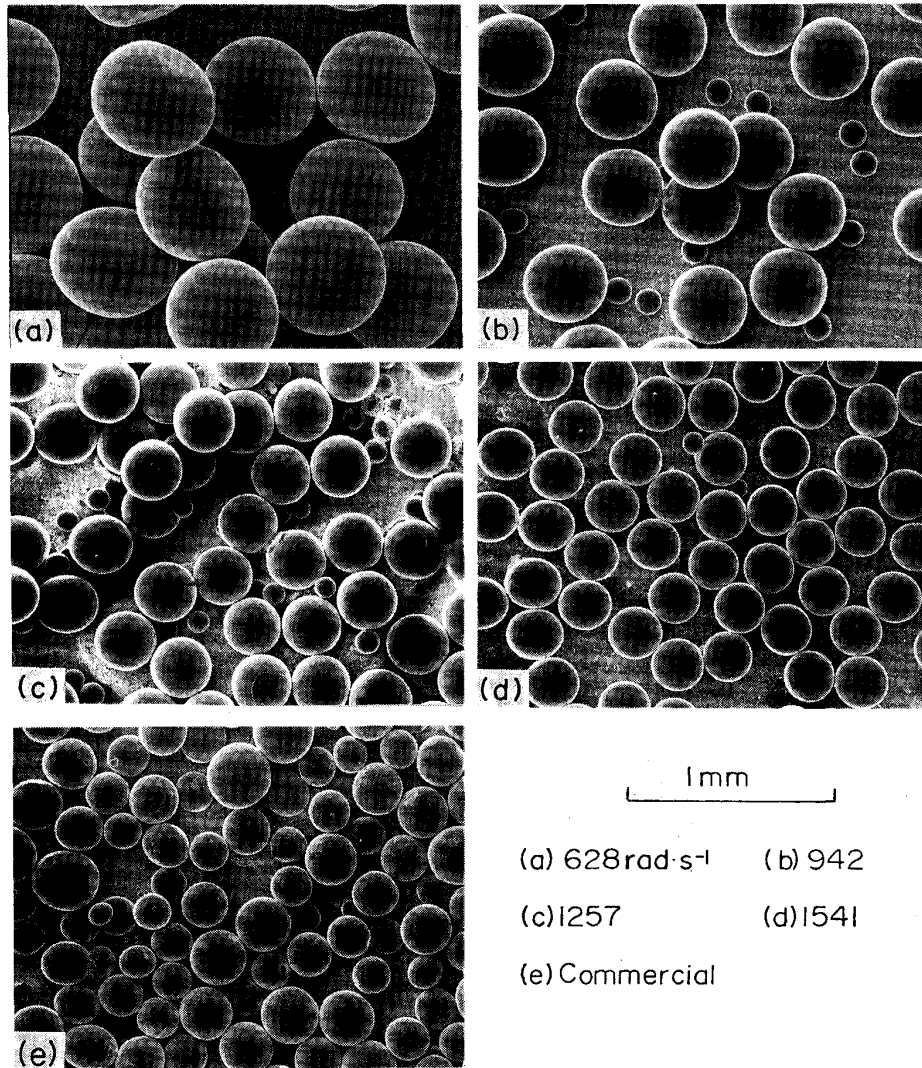


Photo. 2. SEM view of the powders prepared with varying angular velocity.

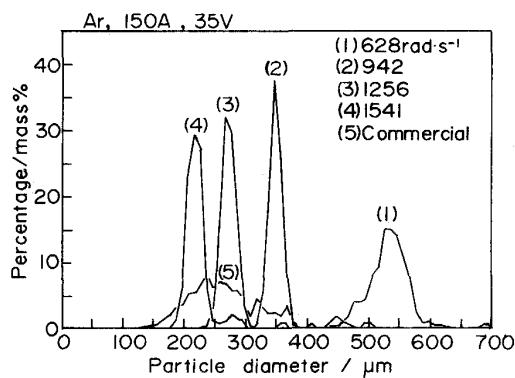


Fig. 3. Particle size distribution of the main particles prepared with varying angular velocity.

存在しているのが認められる。一次粒子の標準偏差は周速 628, 942, 1257, 1571 rad·s⁻¹ においてそれぞれ 31.0, 16.4, 12.8, 14.8 μm である。また Photo. 2 よ

り 628 rad·s⁻¹ の回転速度で製造した粉末 (a) は、そのすべてが大きく変形しているのに対し、より高速回転で製造した粉末粒子 (b)~(d) にはこのような変形は認められない。したがって Fig. 3 において周速 628 rad·s⁻¹ の場合の粒度分布が広がったのは上述のような粉末の変形によるものと考えられる。

次に試料径 40, 50 mm の場合について検討した。この場合試料径の増加に対応して、30 mm 径の場合と同様の溶解状況を実現するためには溶解速度の増大を図る必要がある。(2)式では一次粒子の平均径 d は $Q^{0.12}/D^{0.64}$ に依存するとしているが、(1)の理論式よりこれは $1/D^{0.52} \cdot (Q/D)^{0.12}$ と考えた方が良いと考えられる。従って Q/D の値が試料径 D によらず一定、言い替えると D の増加に対応し、 Q を増加させることにより試料端面の溶解状況を一定にすれば、理論式(1)式を用いて、得られる一次粒子の平均径を推定すること

が可能である。そのため試料径 40, 50 mm の場合には、プラズマ電流をそれぞれ 250, 300 A とした。本研究では同一の材料 (Ti-6Al-4V) を用いていることにより、(1) 式の $K(\gamma/\rho)^{1/2}$ は定数とみなされ、粉末の平均粒径 d は D と ω の関数と考えられる。この定数を本実験で得られた D (mm), d (μm), ω ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$) の値を基に計算した結果、 5.85×10^4 が得られた。したがってこの値を用いて実験を実施できなかった、より高回転速度において得られる粉末一次粒子径を推定して実験結果と共に Fig. 4 に示した。本研究の実験結果を (2) 式の実験式に代入したところ、 5.93×10^6 という定数項を得た。計算において純 Ti の γ と ρ の値を便宜上用いた。本研究の値は CHAMPAGNE らの値と比較して約 30% ほど

大きい値を示しているが、これは用いた熱源の相違および、純 Ti の γ と ρ の値を Ti-6Al-4V の値の代わりに用いたためであると考えられる。この図から試料直径を大にし、高速で回転することにより粉末の一次粒子径は細くなるが、それには装置の運転、構造上の問題とも関連し、おのずと限度があり、Ti 合金では平均粒径 100 μm 程度が下限であると考えられる。

3.3 プラズマアーク発生条件の粒度分布への影響

次にプラズマアーク発生条件が粒度分布 (以下、特にことわらないかぎり一次粒子に関するものである) に及ぼす影響について検討した。用いた試料は以下すべて直径 30 mm であり回転速度は $1257 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ (200 s^{-1}) である。以下の検討で問題となるのは実験の再現性であるが、試料回転速度の誤差 ($\pm 1 \text{ s}^{-1}$) による一次粒子の平均径への影響は $\pm 1 \mu\text{m}$ であった。また、 200 s^{-1} の速度の 3 回の実験において得られた一次粒子の平均径は 270, 271, 272 μm であり、上記の実験誤差範囲内にあり、再現性は良好であると考えられる。

3.3.1 プラズマトーチノズル径の影響

プラズマトーチのノズル径を 3, 5 及び 7 mm に変化させ、他の条件を一定 (プラズマアーク電流 150 A, プラズマアーク電圧 35 V, 作動ガス (Ar) 流量 $1.7 \times 10^{-5} \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ($1 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$) として粉末を製造した。結果を Fig. 5 に示す。作動ガス流量を一定としてノズル径を増大させた場合、得られるプラズマアークの直径が増加する。すなわちノズル径の増大により、プラズマアークの単位長さ当たりの電気抵抗が減少する。さらに粉末製造中のプラズマアークの電流、電圧を一定に保つため、その抵抗 ($E = IR$ より 0.23Ω) も一定であることが必要となり、その結果プラズマアークは長くなる。したがって同図 (a) に見られるように直径 5 mm のノズルの場

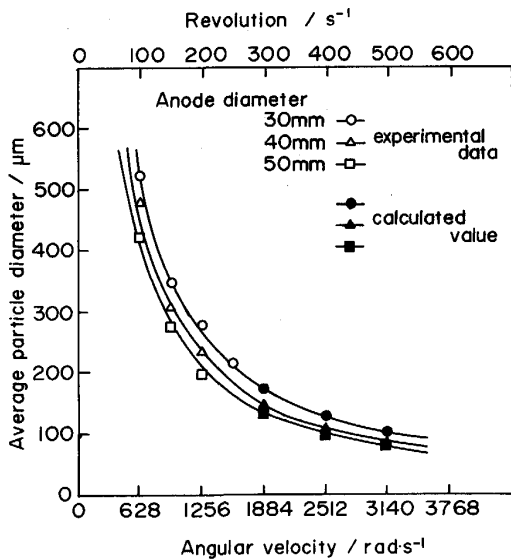


Fig. 4. Relationship between angular velocity of the anodes of varying diameter and average particle diameter of the main particles.

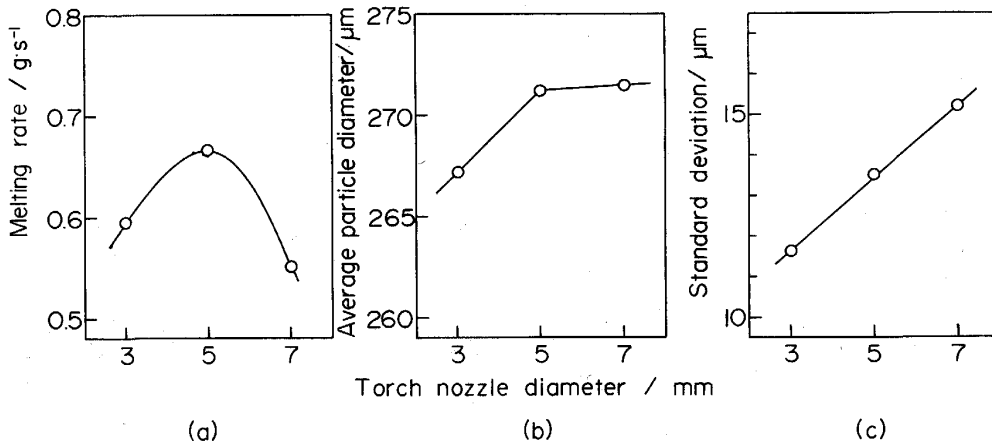


Fig. 5. Effect of plasma torch nozzle diameter on (a) melting rate, (b) average particle diameter and (c) standard deviation.

合には直径 30 mm の試料端面全体を均一に加熱する太さにプラズマアークが拡がるので、加熱効率が最も良好であり、溶解速度が最大になる。これに対して、直径 3 mm の細いノズルの場合はプラズマアークが細くなることにより試料端面の中心部に熱が集中し、外周部が十分に加熱されないために、また 7 mm のノズルでは、試料端面以上の太さにプラズマアークが拡がりすぎて、全熱量が有効に試料端面に加わらないために、それぞれ溶解速度が低下したものと考えられる。しかしながら、(b)、(c) よりノズル径の小さいものほど微細で、粒度の揃った粉末粒子が得られることがわかる。これは後に詳細に述べるようにプラズマアークの形状の変化により溶解する試料端面形状が変化（プラズマアークが集中するほど端面中心部は周囲に比較し大きく凹状となる）するためと考えられる。

以上の検討結果に基づき、試料の加熱の効率の最も良い 5 mm 径のノズルを以下の実験では用いることにした。

3.3.2 プラズマガス流量の影響

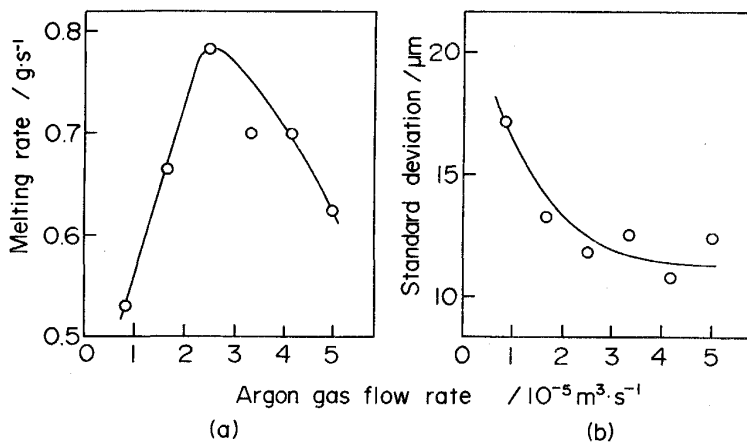


Fig. 6. Effect of plasma gas flow rate on (a) melting rate and (b) standard deviation.

次に作動ガス流量のみを変化させ、他の条件は一定として PREP を実施した。その結果を Fig. 6 に示す。溶解速度の変化を示した同図 (a) より約 $2.5 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 付近に最大溶解速度を示す作動ガス流量が存在する。しかし、同図 (b) では前項のノズル径の場合とは異なり、流量 $1.7 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($11 \cdot \text{min}^{-1}$) 以上においては、標準偏差はおよそ同程度であるが、それ以下の流量で急激に増加している。作動ガス流量を増加させることにより、プラズマアークは絞られる(細くなる)。この細くなった 150 A で発生させたプラズマアークの電圧 (35 V) を一定に保つためには、必然的にプラズマアークを短くせねばならず、その結果試料端面の中心部分に熱量が集中することになる。すなわち前項の直径 3 mm のノズルを用いた場合と同様の効果が、 $1.7 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 以上の流量について現れたと考えられる。また平均粒径と作動ガス流量とは明確な相関関係は、認められなかった。以下の実験ではガス流量は、 $1.7 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($1.01 \cdot \text{min}^{-1}$) とする。

3.3.3 プラズマアーク電流の影響

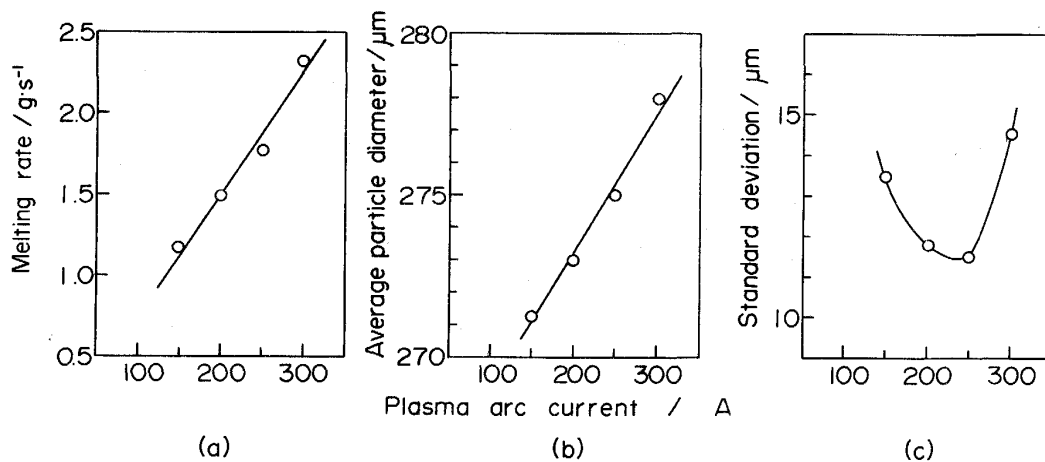


Fig. 7. Effect of plasma arc current on (a) melting rate, (b) average particle diameter and (c) standard deviation.

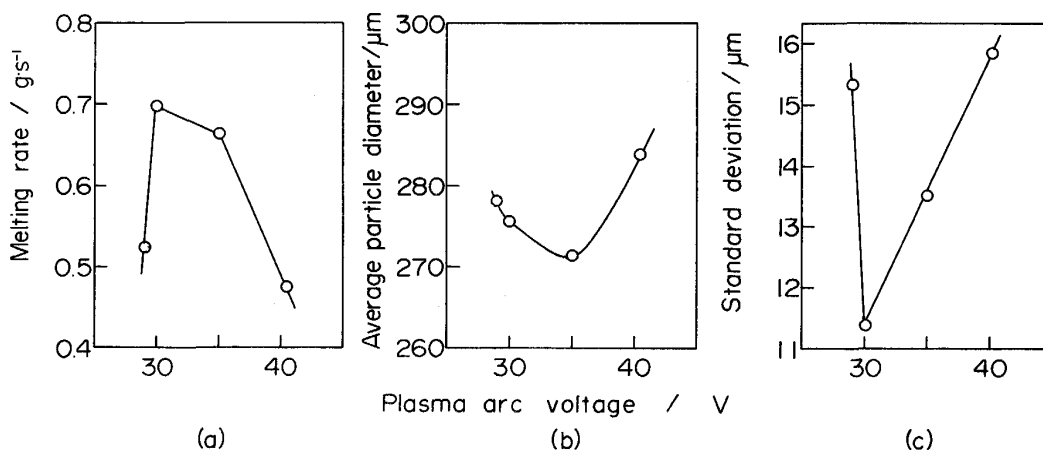


Fig. 8. Effect of plasma arc voltage on (a) melting rate, (b) average particle diameter and (c) standard deviation.

次にプラズマアーク電流を 100~300 A に変化させて粉末の製造を行った。Fig. 7 (a) に溶解速度, (b) に一次粒子の平均粒径, (c) に標準偏差とプラズマアーク電流の関係を示す。(a) より本研究においてはプラズマアーク電圧は固定 (35 V) しているため, 試料溶解速度は電流値に依存しさらに両者は, ほぼ比例関係にある。また 100 A では試料を溶解することは不可能であった。同図 (b) より, プラズマアーク電流の増加にともない, 得られる粉末の平均径は一様に増大するのが認められる。すなわち (a), (b) 図より溶解速度の増加にともない平均径は増大する。これは 3・1 節に示した CHAMPAGNE の実験式 (2) 式と同様の関係に従っているものと考えられる。

3・3・4 プラズマアーク電圧の効果

以上の検討においては, プラズマアーク電圧を 35 V と一定にして実験を行った。従ってプラズマアーク電圧に比例するプラズマアークの長さはその他の PREP 条件 (トーチノズル径, 作動ガス流量, プラズマアーク電流) により変動するが, そのために試料端面のごく中心部のみが溶解して端面が大きく凹となったり反対に試料外周部のみが優先的に溶解して端面が凸となるような現象は起こらず, 粉末製造後の試料端面の形状に基本的な相違は観察されなかった。すなわち 3・3・3 項までの実験において, 実験後の試料端面の形状は一様に溶解されるため 1~7 mm 凹となっている。実際に PREP による粉末製造上問題となるのは, いかに安定した装置の運転が可能であるか, 言い替えると本研究で検討を行った PREP パラメーターをいかに一定値に保ち得るか, ということである。そこで粉末製造中に試料とプラズマトーチ間の距離が変動した場合の影響について検討するためにプラズマアーク電流を 150 A とし, 極間距離に

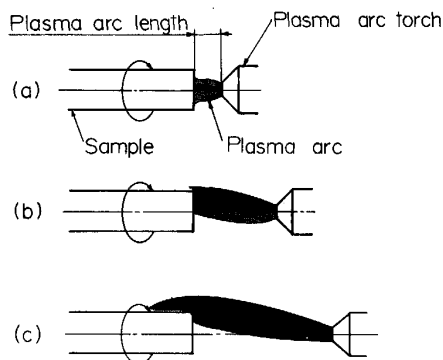


Fig. 9. Illustration of plasma flame for varying plasma arc length.

比例するプラズマアーク電圧を 28.5~41 V に変化させて, 実験を行った。Fig. 8 にその結果を示す。同図はプラズマ電圧と (a) 溶解速度, (b) 一次粒子の平均径, (c) 標準偏差との関係を示す。また, Fig. 9 にプラズマトーチ, 試料端面間の距離とそのときのプラズマアークの形状を模式的に図示する。プラズマアーク電圧の増加に伴い, プラズマアークが長くなるが, この時プラズマアークは周囲の雰囲気と比較して, 極めて高温であるために, (b), (c) のように中心軸より上部に浮き上がった形となるものと考えられる。プラズマアーク電圧の増加はプラズマアークの有するエネルギーの増加に対応するが, Fig. 8 (a) 図より 30~35 V とした場合に Fig. 9 (b) 図のようなプラズマフレームとなり試料端面を中心から縁までをほぼ均一に加熱するために溶解速度が最大となる。また 41 V とした場合には Fig. 9 (c) 図のように試料端面外周部のみにプラズマアークの一部が当たるためプラズマの熱量を試料端面に有効に伝えることができず, 電圧の増加にもかかわらずむしろ低溶解速度となる。なおプラズマ電圧が 28.5, 30, 35 と増加

するのに伴い、試料端面の凹みはそれぞれ 10, 5, 2 mm となり 41 V の場合は逆に 1.5 mm 凸となった。この凹み量の変化は、Fig. 9 のプラズマアーク、試料間距離に対応している。また Fig. 8 (b) より、Fig. 9 (b) 図のようにプラズマアークが効率よく試料端面を加熱し、端面形状がわずかに凹となった場合 (35 V) に最も微細な粉末粒子が生成されることがわかる。しかし、Fig. 9 (c) より標準偏差は、幾分プラズマアークが集中した 30 V の場合が最小であった。またプラズマアーク電圧を 28.5 V とし、Fig. 11 (a) 図のような溶解状況としたときには、再び標準偏差が増大した。以上より PREP による粉末製造時においてプラズマアーク電圧の変動が生じると、前項までに検討した以上の粒径のばらつきが生ずることとなる。よって粉末製造時のプラズマアーク電圧一定値の保持はきわめて重要であることが、明らかとなった。

4. 結 言

PREP 法により Ti-6Al-4V 合金粉末の製造を試み、得られる粉末粒子の粒度分布に及ぼす PREP 条件の影響について検討し以下のことが明らかとなった。

(1) 本実験における粉末生成機構は、DDF であり製造される粉末の平均粒径は試料直径、試料回転速度を変数として (1) 式を用いて検討したところ、係数 $K (\gamma/\rho)$ は、 5.85×10^4 が得られた。

(2) プラズマアーク電流と得られる粉末粒子の平均径は比例関係にあるが、他の PREP 条件 (プラズマアーク電圧、プラズマトーチのノズル径) を変更することにより平均径は大きく変動する。これは試料端面の溶解状況が変化するためと考えられる。特に、プラズマ電圧の

変化は、これらの変動に大きな影響を及ぼすので粒径の揃った粉末を製造するためにはプラズマアーク電圧を一定に保持することが極めて重要であることが明らかになった。

文 献

- 1) 菅野幹宏, 鈴木 寿: 金属, **52** (1982) 3, p. 50
- 2) F. H. FROES, D. EYLON, G. E. EICHELMAN and H. M. BURTE: J. Met., **32** (1980) 2, p. 47
- 3) F. H. FROES and J. R. PICKENS: J. Met., **36** (1984) 1, p. 14
- 4) 萩原益夫, 海江田義也, 河部義邦: 日本金属学会誌, **48** (1984), p. 1092
- 5) R. F. VOUCHN, P. A. BLENKINSOP and P. H. MORTON: NATOAGARD Conference Proceeding No. 200 (1976), p. 11
- 6) P. R. ROBERTS and P. LOEWENSTEIN: Powder Metallurgy of Titanium Alloys, ed. by F. H. FROES and J. E. SMUGERESKY (1980), p. 21 [The Metallurgical Society of AIME]
- 7) E. J. KOSINSKI: Progress in Powder Metallurgy, **38** (1982), p. 491
- 8) A. LAWLEY: J. Met., **33** (1981) 1, p. 13
- 9) N. J. GRANT: J. Met., **35** (1983) 1, p. 20
- 10) S. J. SAVAGE and F. H. FROES: J. Met., **36** (1984) 4, p. 20
- 11) T. C. PENG, S. M. L. SASTRY and J. E. O'NEAL: Metall. Trans. A, **16** (1985), p. 1897
- 12) B. CHAMPAGNE and R. ANGERS: International J. Powder Metallurgy, **16** (1980), p. 359
- 13) B. CHAMPAGNE and R. ANGERS: Powder Metallurgy International, **16** (1984), p. 125
- 14) M. ZDUJIC, M. SOKIC, V. PETROVIC and D. USKOKOVIC: Powder Metallurgy International, **18** (1986), p. 275
- 15) M. ZDUJIC, V. PETROVIC and D. USKOKOVIC: Proceeding of the 1986 International Powder Metallurgy Conference (1986), p. 61
- 16) J. WILLBRAND, W. JABLONSKI and H. GREWE: 同上, p. 71
- 17) J. O. HINZE and H. MILBORN: J. Apply. Mech., **17** (1950), p. 145
- 18) H. JONES: J. Mater. Sci., **19** (1984), p. 1043
- 19) A. MURASZEW: Engineering, **165-166** (1948), p. 316