

© 1985 ISIJ

# Ni 基超合金粉末の組織微細化に及ぼす 噴霧条件の影響

論文

加藤 哲男\*・草加 勝司\*・洞田 亮\*<sup>2</sup>・市川 二郎\*<sup>2</sup>

## Effect of Atomization Conditions on Microstructure of Ni-base Superalloy Powder

Tetsuo KATO, Katsushi KUSAKA, Akira HORATA and Jiro ICHIKAWA

### Synopsis :

Many kinds of superalloys are widely being employed as materials for aircrafts, but the segregation is generally apt to occur in cast alloys because of bearing many alloying elements. Accordingly, the powder metallurgy technique has lately been available for the practical production of turbine disc etc. In order to sufficiently apply the improved properties of material, it is necessary to make microstructure of powder as fine as possible.

The authors developed liquefied helium cooling centrifugal atomization technique and made a trial on a fine crystallization of particles by rapid solidification of melt in the process of the atomization. An investigation was made about the various atomization factors which widely control the secondary dendrite arm spacing,  $S_{II}$ , as a measure of microstructure.

The following results were obtained.

(1) The most frequent diameter of powder,  $d$  ( $\mu\text{m}$ ), is given as the following equation ;

$$d = 4.0 \times 10^5 \times R^{-0.84}$$

where  $R$  represents the revolution speed of the disc (rpm).

(2) The following means are effective to make the microstructure finer.

- a) The particle size is smaller.
- b) The thermal conductivity of the cooling medium gas is higher.
- c) The gas pressure of the cooling medium is higher.
- d) The gas temperature of the cooling medium is lower.
- e) The introducing rate of the cooling medium is higher.
- f) The diameter of the atomizing disc is greater and its revolution speed is higher.

## 1. 緒 言

航空機のエンジン部品材料は、要求する特性の高度化に伴って、より高温強度が高く、かつ耐食・耐酸化性の優れた材料が開発の対象になつてきている。その結果として、主成分以外の合金元素の種類や量が増大する傾向が避けられず、 casting 時の偏析や熱間加工性の低下が問題となつている。近年、これらの高合金化に伴う問題点を解決するものとして粉末冶金技術が注目されており<sup>1)</sup>、まず Pratt and Whitney Aircraft 社でガスタービン用の IN 100 粉末焼結ディスクの製造が進められ、その実用化に成功している<sup>2)</sup>。また MERL 76 などの急冷凝固粉末を使用した粉末焼結ディスクの開発も活発になり、ディスク以外のブレードや燃焼器への適用試験も進められている<sup>3)</sup>。

粉末冶金法によれば材料の均質性が向上するほか、一部の材料では超塑性現象が見出され、この超塑性加工技術を適用<sup>4)</sup>することにより、歩留りの向上や加工費の低減も試みられている。これら材料の均質性と超塑性加工の両面を考慮に入れると、粉末組織はできるだけ微細であることが適当と推定される。超合金粉末の製造法としては種々ある<sup>5)</sup>が、粉末組織を微細化し偏析を少なくするには溶湯の急冷凝固<sup>6)</sup>が可能となる遠心噴霧法が適当と考えられる。ガス噴霧や真空噴霧法とは原理的に異なり、この遠心噴霧法は噴霧条件と冷却速度を独立に制御<sup>5)</sup>できる特徴をもっている。

このような情勢から、急冷凝固粉末の製造法として先に LHC (Liquefied Helium Cooling) 遠心噴霧法を開発<sup>7)</sup>し、噴霧条件と粉末性状との関係について検討した。その内、超合金の粉末冶金に特に重要な要素となる

昭和 58 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 59 年 8 月 3 日受付 (Received Aug. 3, 1984)

\* 大同特殊鋼(株)中央研究所 工博 (Central Research Laboratory, Daido Steel Co., Ltd.)

\*<sup>2</sup> 大同特殊鋼(株)中央研究所 (Central Research Laboratory, Daido Steel Co., Ltd., 2-30 Daido-cho Minami-ku Nagoya 457)

Table 1. Chemical compositions of melting material and atomized powder (wt%).

	Co	Cr	Mo	Al	Ti	Nb	Hf	Zr	C	B	Si	Mn	P	S	O	N	Ni
Melting material	18.44	12.43	3.17	4.88	4.42	1.39	0.39	0.05	0.02	0.021	<0.02	<0.02	0.004	0.001	0.0007	0.0012	Bal.
Powder	18.19	12.33	3.16	4.69	4.48	1.42	0.38	0.06	0.03	0.023	<0.02	<0.02	0.003	0.002	0.0062	0.0013	Bal.

Table 2. Physical properties of MERL 76.

Density	7.90 g/cm <sup>3</sup>
Specific heat	0.145 cal/g·°C (1093°C)
$\gamma'$ -solvus	1191°C
Solidus	1263–1288°C
Liquidus	1332–1342°C

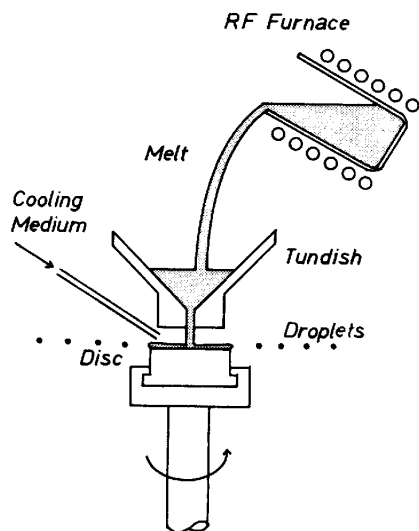


Fig. 1. Principle of liquefied helium cooling centrifugal atomization equipment.

組織微細化条件を中心に、粉末性状全般について研究したので、その結果について報告する。

## 2. 供試材および実験方法

### 2.1 供試材

噴霧用母合金として  $\gamma/\gamma'$  析出強化型 Ni 基超合金<sup>9)</sup> (MERL 76) を使用した。この母材は真空誘導炉で約 35 kg 溶解、鑄造したのち直径 78 mm の円柱状に皮削りし、それを長さ 130 mm に切断したもの約 5 kg を用いた。本母材および遠心噴霧した粉末の化学成分値を Table 1 に、また本母材の物理的性質を Table 2 に示す。

### 2.2 実験方法

Fig. 1 に LHC 遠心噴霧装置の原理図を、また

Table 3. Condition for centrifugal atomization.

	Condition	
Pouring temperature	1400°C	
Pouring rate	120 g/s	
Material of disc	Graphite, Steel, Asbestos	
Diameter of disc	90 mm	
Revolution of disc	5000–15000 rpm	
Introducing cooling media and its amount	Ar	4 l/min
	N <sub>2</sub>	4–12 l/min
	He	3–5 l/min

Table 3 に本研究における噴霧条件をそれぞれ示す。不活性ガスで置換した噴霧チャンパー内で母材を再溶解し、所定の方法で回転中のディスク面上に液化ガスを導入しながら注湯し、ディスクからの遠心力作用で噴霧・飛散させる。これによる噴霧粒子はチャンパー内で急速凝固し、得られた粉末はその底部に設置された補集筒より回収した。

各粉末ともロータップ式篩振盪機を用いて 20 メッシュ以下 8 段階に分級し、粒度分布を測定した。また累積粒度分布曲線 (縦軸: 累積重量百分率, 横軸: 粒径) の傾きが最大となる粒径を最頻出粒径とした。また 37~44, 63~74, 125~149, 210~250  $\mu\text{m}$  の 4 種類の分級粉を樹脂に埋め込み、研磨後、高塩酸ピレラで腐食し、光学顕微鏡により 2 次デンドライト・アーム間隔<sup>9)</sup> ( $S_{II}$ ) を測定した。これら  $S_{II}$  の平均値 ( $n=10\sim 20$ ) をもって組織微細度 (=凝固速度) の指標とした。

この内、125~149  $\mu\text{m}$  の粉末の走査型電子顕微鏡写真をイメージ・アナライザー<sup>10)</sup> (LUZEX-500) で画像処理し、粒子のアスペクト (長軸/短軸) 比<sup>11)</sup> の形で球状度を評価した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 噴霧条件と粉末性状との関係

まず粉末冶金用超合金粉末として重要な二つの粉末特性である粒子形状および粒度と噴霧条件との関係につい

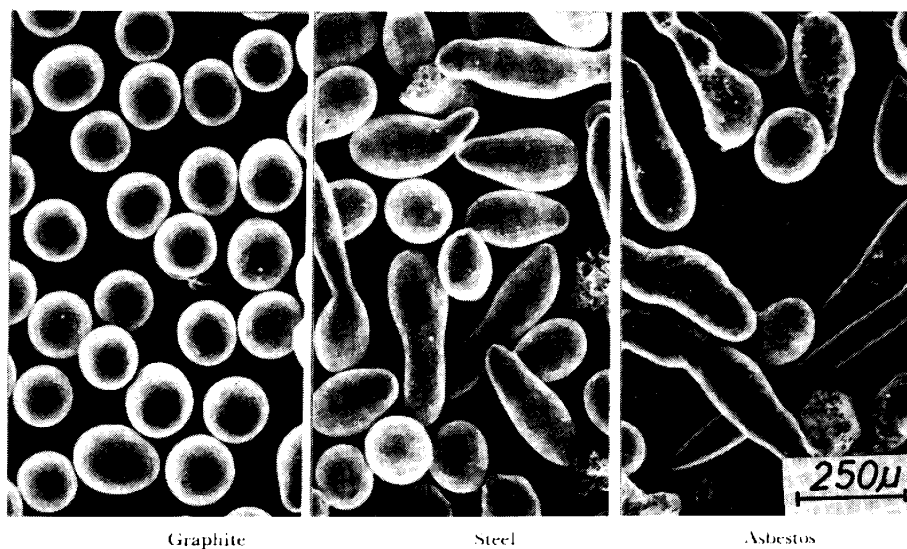


Photo. 1. Shape of powders atomized using disc of various materials.

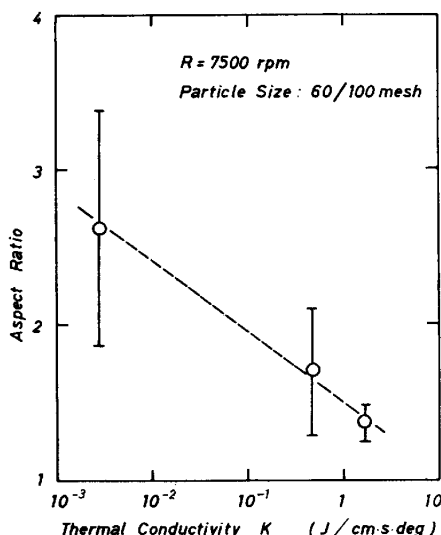


Fig. 2. Dependence of aspect ratio on thermal conductivity of disc material.

て述べる。

始めに、噴霧条件を種々変化させて粉末の形状との関係について検討した結果、粒子形状は回転ディスクの材質の影響を大きく受けることがわかった。Photo. 1 にグラファイト、炭素鋼 (S25C) およびアスベストで作製したディスクを用いて噴霧した粉末の走査型電子顕微鏡写真を示す。また Fig. 2 に、この粒子形状をディスクの熱伝導度 ( $\log K$ ) との関係で整理した。ディスク材質の熱伝導度がよいほど粒子のアスペクト比は 1 に近づき、球状化する傾向がみられる。これはディスク材質の熱伝導度の差異により噴霧粒子の形成機構が異なる<sup>7)</sup>ためと推定される。

一般に、超合金焼結体は高密度化手段として熱間押し出しや HIP 処理が採用<sup>8)</sup>されるため、キャニングされ

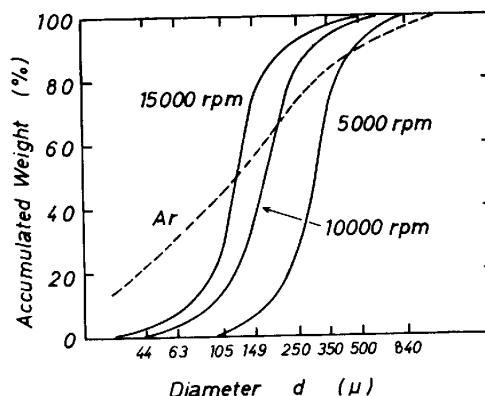


Fig. 3. Particle size distribution of centrifugally atomized powder and gas atomized powder.

やすい、すなわち粉末充填率や流動性のよい球状粉末が最適といわれる。先に行った実験結果<sup>7)</sup>では、ディスク形状や回転数、液体ガスの導入量の粉末形状に対する影響は比較的小さいことが明らかになった。そこで以後の実験では、熱伝導度のよいグラファイト製ディスクを使用し、他の条件はできるだけ一定とした (Table 3)。

Fig. 3 にディスク回転数をパラメータとした場合の粉末の累積重量百分率と粒径との関係を示す。ディスクの回転数が大きくなるにつれて粒度分布曲線は小粒径側に移動する。また同図に Ar ガス噴霧粉の粒度分布<sup>12)</sup>も併記した。遠心噴霧粉は、Ar ガス噴霧粉に比べて粒度分布の広がりが小さくなっている。Fig. 4 に最頻出粒径 ( $d_m$ ) とディスク回転数 ( $R$ ) との関係を示す。  $\log d_m$  と  $\log R$  との間にはほぼ直線関係があり、これらの関係は  $d_m$  を  $\mu\text{m}$ 、 $R$  を rpm で表すと次式で近似される。

$$d_m = 4.0 \times 10^5 \times R^{-0.84} \dots\dots\dots (1)$$

一般に遠心噴霧法によつて得られる粉末の粒径 ( $d$ ) は、

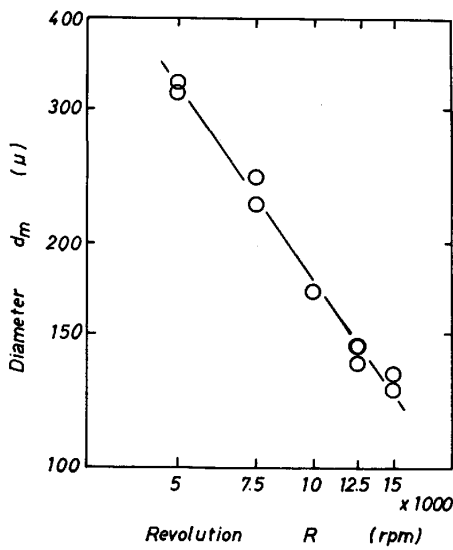


Fig. 4. Effect of disc revolution speed on most frequent diameter of centrifugally atomized powder.

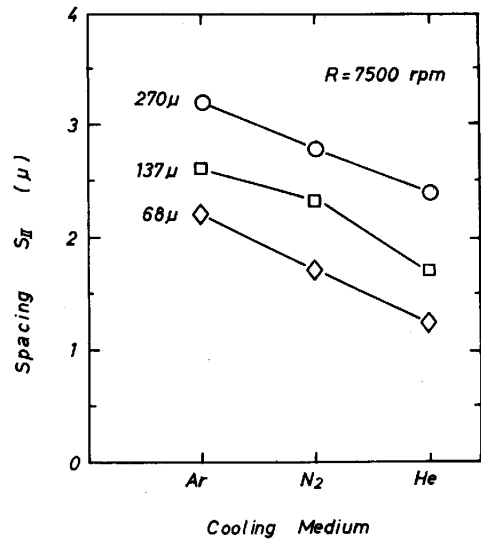


Fig. 5. Relationship between secondary dendrite arm spacing ( $S_{II}$ ) of powder and cooling media.

融滴の表面張力と遠心力との釣合いの関係より次式で与えられることが知られている<sup>13)</sup>.

$$d = \frac{1}{2\pi R} \cdot \sqrt{\frac{12\gamma}{\rho D}} \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 $\gamma$ :表面張力、 $\rho$ :密度、 $D$ :ディスク径である。この式で表される粒径( $d$ )は、最頻出粒径( $d_m$ )に相当するものと考えられる。 $d_m$ の $R$ への依存性は(2)式によると $R^{-1}$ であるが、本研究結果に基づく計算では $R^{-0.84}$ と求められた。このように回転数 $R$ への依存性が小さいのは、ディスク上での熔融金属の滑りに起因するものと判断されるが、滑り量の計算式<sup>14)</sup>とは十分な一致は見られなかつた。単純な釣合いの関係式だけでなく、もつと複雑な機構によつて熔融金属が霧化されるものと推定される。

3.2 噴霧条件と粉末組織との関係

粉末組織の微細度(2次デンドライト・アーム間隔: $S_{II}$ )に及ぼす噴霧条件の影響として、まず冷却媒体の影響について実験した。Fig. 5に3種類の冷却媒体中で噴霧したときの粉末粒子の $S_{II}$ と粒径との関係を示す。またPhoto. 2および3にそれぞれの粉末の表面および断面組織写真の一例を示す。冷却媒体がAr, N<sub>2</sub>, Heの順に $S_{II}$ は小さくなつていく。Fig. 6に $S_{II}$ と液化He, N<sub>2</sub>の導入量との関係を示す。ここでは導入量の都合上、液化Heについては3~5 l/min, 液化N<sub>2</sub>については4~12 l/minの範囲で導入量を変動させた。いずれの冷却媒体においても導入量が増加すると粉末組織は微細化する傾向が見られる。

Fig. 7に粉末粒子の $S_{II}$ とディスク回転数( $R$ )との

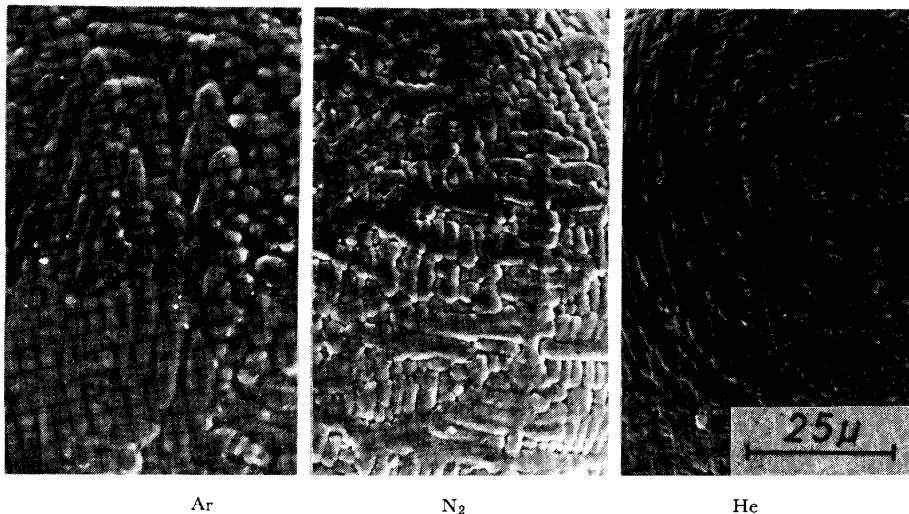


Photo. 2. Surface structure of powder atomized at various atmosphere.

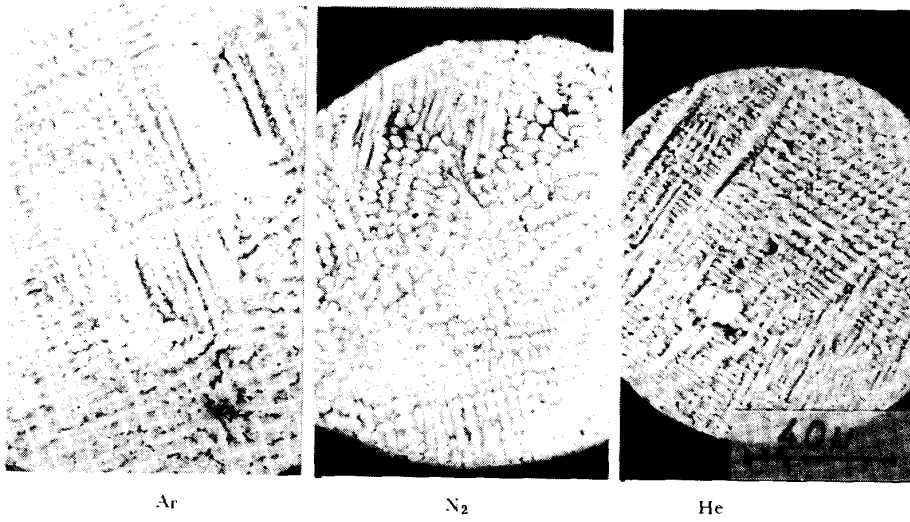


Photo. 3. Microstructure of powder atomized at various atmosphere. ( $R=7500$  rpm)

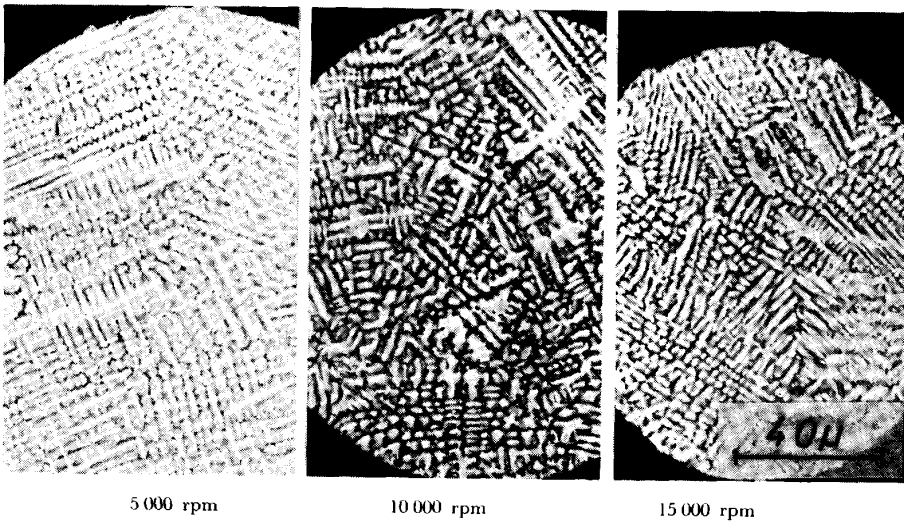


Photo. 4. Microstructure of powder atomized at various disc revolution speed. (Atmosphere : He)

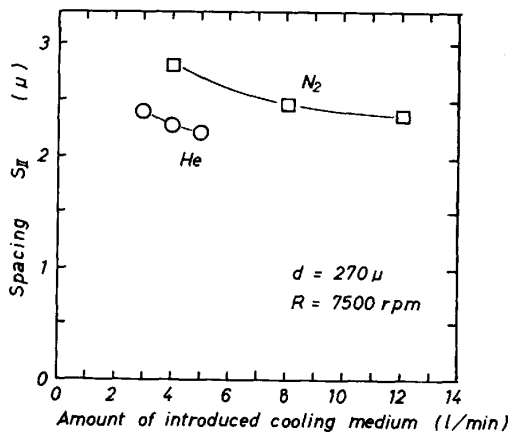


Fig. 6. Effect of amount of introduced cooling media on secondary dendrite arm spacing ( $S_{II}$ ) of powder.

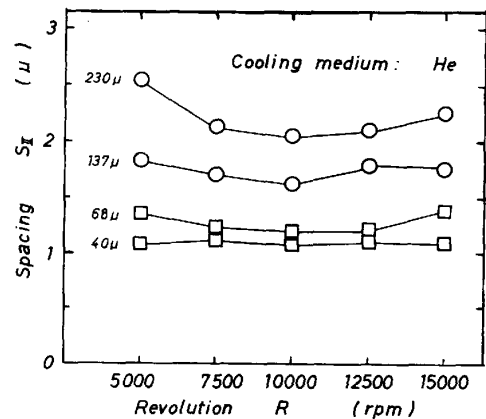


Fig. 7. Effect of disc revolution speed on secondary dendrite arm spacing ( $S_{II}$ ) of powder with various diameter.

関係を示す。いずれの粉末粒径とも当初  $S_{II}$  はディスク回転数が増大するほど減少するが、10000 rpm 以上の高速回転になると逆に増加する傾向が見られる。Photo.

4 に各回転数に対応する噴霧粉末粒径 137  $\mu$ m でのミクロ組織を例示する。

2次 dendrait・アーム間隔  $S_{II}$  は、粉末粒子の冷

却速度  $\dot{T}$  の  $(\dot{T})^{-n}$  に比例し、次式で表される<sup>5)</sup>。

$$S_{II} = b(\dot{T})^{-n} \dots\dots\dots (3)$$

ここに  $b$  は比例定数,  $n$  は定数である。一方、飛行中の粉末の冷却速度は次式で与えられる<sup>15)</sup>。

$$\dot{T} = \frac{6}{d\rho C_p} \left\{ h_c(T_s - T_g) + \epsilon\sigma(T_s^4 - T_b^4) \right\} \dots (4)$$

$$h_c = a \frac{k}{d} \left( \frac{d\nu\rho_g}{h_f} \right)^{0.6} \dots\dots\dots (5)$$

ここに  $h_c$ : 熱伝達係数 (cal/cm<sup>2</sup>·K·s),  $d$ : 粉末粒径 (cm),  $\rho$ : 粉末金属の密度 (g/cm<sup>3</sup>),  $C_p$ : 比熱 (cal/g·K),  $T_s, T_g, T_b$ : それぞれ粉末, 雰囲気ガス, 容器壁の絶対温度 (K),  $\epsilon$ : 輻射率,  $\sigma$ : ステファン・ボルツマン係数 (1.36 × 10<sup>-12</sup> cal/cm<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>·s),  $a$ : 定数,  $k$ : 雰囲気ガスの熱伝導度 (cal/cm·K·s),  $\nu$ : 粉末の飛行速度 (cm/s),  $\rho_g$ : 雰囲気ガスの密度 (g/cm<sup>3</sup>),  $h_f$ : 雰囲気ガスの粘性 (g/cm·s) である。なお,  $d\nu\rho_g/h_f$  はレイノルズ数である。(4)式右辺は, 粒子表面より放散する熱量を粒子の熱容量で割った形のもので, 粒子内部での熱勾配はないものと仮定している。本実験においては,  $T_s = 1536 \sim 1605$  K (固液共存温度域),  $T_g = 573$  K,  $T_b = 300$  K,  $\epsilon = 0.3 \sim 0.9$  であるので,  $h_c(T_s - T_g)$  および  $\epsilon\sigma(T_s^4 - T_b^4)$  は大略

$$h_c(T_s - T_g) \approx 36 \sim 140 \text{ (cal/cm}^2 \cdot \text{s)} \dots\dots\dots (6)$$

$$\epsilon\sigma(T_s^4 - T_b^4) \approx 1.2 \sim 3.5 \text{ (cal/cm}^2 \cdot \text{s)} \dots\dots (7)$$

となる。(6) ≫ (7) であるので, (7) 式の項を無視すると (4) 式は

$$\dot{T} = \frac{6ak}{d^2\rho C_p} \left( \frac{d\nu\rho_g}{h_f} \right)^{0.6} \cdot (T_s - T_g) \dots\dots\dots (8)$$

よつて (3) 式は

$$S_{II} = C \cdot \left\{ \frac{6k}{d^2\rho C_p} \cdot \left( \frac{d\nu\rho_g}{h_f} \right)^{0.6} \cdot (T_s - T_g) \right\}^{-n} \dots\dots\dots (9)$$

で表される。ここで  $C = b \cdot a^{-n}$  (定数) である。

Table 4 に 573 K における Ar, N<sub>2</sub>, He ガスの  $k, \rho_g, h_f$  の値を示す。

次に本研究の実験結果と (9) 式との対応を試みる。(9) 式において,  $6/\rho C_p$  は母材が同一なので定数と考えられる。そこで,  $H$  を次のように定義した。

$$H \equiv \frac{k}{d^2} \left( \frac{d\nu\rho_g}{h_f} \right)^{0.6} \dots\dots\dots (10)$$

本来  $\nu$  は凝固時の値を採用すべきであるが, 式の算出が複雑となるためディスクの周速度で代表させた。Fig. 8 および Fig. 9 に Fig. 5 および Fig. 7 から横軸に  $\log H$  を取つて整理し直したものを示す。両図において, いずれの雰囲気ガス, ディスク回転数においても,  $\log S_{II}$  と  $\log H$  間にはほぼ直線関係があり, 次式で近

似される。

$$\log S_{II} = -n \log H + C_1 \dots\dots\dots (11)$$

ここで  $n$  は (3) 式の  $n$  に相当し, Fig. 8 または Fig. 9 における直線の傾きである。各種噴霧条件での  $n$  および  $C_1$  の値を Table 5 に示す。

もとの (3) 式では  $n$  は定数であるが, この計算結果では  $n$  の値は冷媒によつて異なつている。これは (10) 式中の  $\nu$  の取扱い, すなわち  $\nu$  をディスクの周速度 (一定) として計算したことと起因すると考えられる。実際の凝固温度での粒子の飛行速度は, 冷媒が He の場合冷却速度が大きく飛行抵抗が小さいため, ディスク周速度に近く, よつて  $n$  の値は真の値に近いと推測される。他方 Ar の場合冷却速度が小さく飛行抵抗が大きいため, 凝固温度での粒子の飛行速度は小さく, (10) 式の  $H$  は実際の値より大きく計算される。この影響は粉末粒径が小さく, 失速しやすいほど顕著で, Fig. 8 における  $H$  が大きい (粒径が小さい) 領域では, 実際の値は

Table 4. Physical properties of gases for cooling media. (300°C)

Properties Gas	Thermal conductivity	Absolute viscosity	Density
	$k$ (cal/cm·s·°C)	$h_f$ (g/cm·s)	$\rho_g$ (g/cm <sup>3</sup> )
He	562 × 10 <sup>-6</sup>	397 × 10 <sup>-6</sup>	85.5 × 10 <sup>-6</sup>
N <sub>2</sub>	101 × 10 <sup>-6</sup>	357 × 10 <sup>-6</sup>	599 × 10 <sup>-6</sup>
Ar	76 × 10 <sup>-6</sup>	476 × 10 <sup>-6</sup>	854 × 10 <sup>-6</sup>

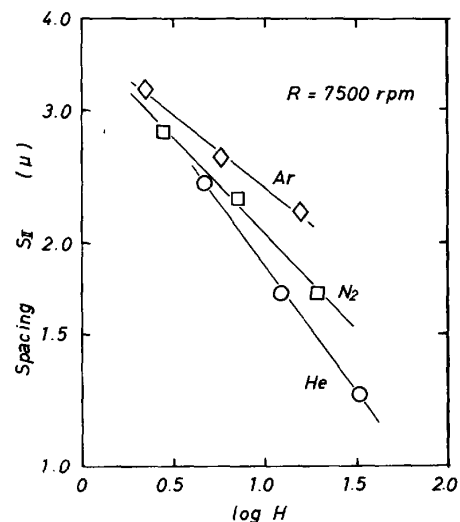


Fig. 8. Relationship between  $H$  and secondary dendrite arm spacing ( $S_{II}$ ) of powder atomized at various atmosphere.

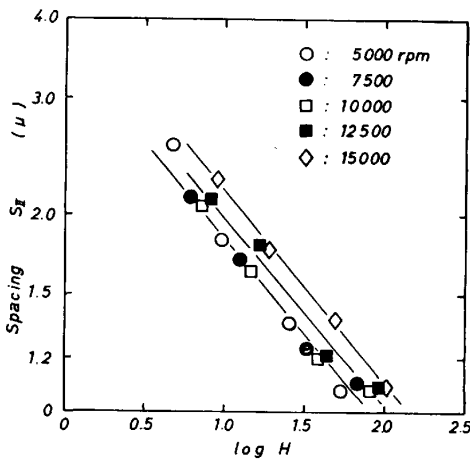


Fig. 9. Relationship between  $H$  and secondary dendrite arm spacing ( $S_{II}$ ) of powder atomized at various disc revolution speed.

Table 5. Values of  $n$  and  $C_1$  obtained from Fig. 7 and Fig. 8.

Cooling medium	Disc revolution (rpm)	$n$	$C_1$
Ar	7500	0.194	0.571
N <sub>2</sub>	7500	0.259	0.571
He	5000—10000	0.294	0.560
	12500	0.288	0.587
	15000	0.291	0.626

$H$  の小さい側にずれることになる ( $n \rightarrow$ 定数). この理由で Table 5 の Ar における  $n$  の計算値が小さくなったものと考えられる.

さて, (9) および (10) 式より

$$\log S_{II} = -n \log H + \log C - n \log (6/\rho C_p) - n \log (T_s - T_g) \dots (12)$$

(11), (12) 両式を対応させると,

$$C_1 = \log C - n \log (6/\rho C_p) - n \log (T_s - T_g) \dots (13)$$

液化 He 導入雰囲気では  $R=7500$  rpm の場合, 噴霧当初の圧力はほぼ 1 atm (ゲージ圧) になっているので,  $T_g \approx 300^\circ\text{C}$  程度と推定される. (13) 式に  $n=0.29$ ,  $\rho=7.89 \text{ g/cm}^3$ ,  $C_p=0.15 \text{ (cal/g)}$ ,  $T_s=1300^\circ\text{C}$ ,  $T_g=300^\circ\text{C}$  を代入すると,

$$C=43$$

(5) 式では, 通常  $a=0.33^{16)}$  が与えられているので, 前記の  $C=b \cdot a^{-n}$  式から

$$b=31.2$$

他方, Table 5 の数値を (13) 式に入れ,

$$\left. \begin{aligned} T_g(R=12500 \text{ rpm}) &\approx 500^\circ\text{C} \\ T_g(R=15000 \text{ rpm}) &\approx 700^\circ\text{C} \end{aligned} \right\} \dots (14)$$

と求められる. ただし, Table 4 では便宜上  $300^\circ\text{C}$  の物性値を採用したので, 実際の雰囲気ガス温度とは若干ずれがあるものと推定される.

Fig. 7 において, ディスクの回転数が 5000 rpm から 10000 rpm に増加するにつれて  $S_{II}$  が減少しているが, これは粉末の飛行速度 ( $v$ ) の増加によるものである. また 10000 rpm を越えると  $S_{II}$  が増加に転向するのは, 噴霧粒子が細かく, 雰囲気ガスとの熱交換が活発となるため, 一定の冷却媒体を導入する場合は噴霧空間での雰囲気ガス温度が上昇し, かつて冷却効率が低下したものと考えられる.

(9) 式に以上の実験値を代入して整理すると,

$$S_{II} = 52.7 \frac{d^{0.40} \cdot (\rho C_p)^{0.29} \cdot h_f^{0.17}}{\{k(T_s - T_g)\}^{0.29} \cdot \rho_g^{0.17} \cdot (DR)^{0.17}} \dots (15)$$

ここで,  $v = \pi DR/60$ ,  $D$ : ディスク径 (cm),  $R$ : ディスク回転数 (rpm) である. (15) 式より実際の粉末製造にあたり, 粉末組織を微細化 ( $S_{II} \rightarrow$ 小) するために,

- (1)  $d \rightarrow$ 小 : 粉末を細粒化
- (2)  $k \rightarrow$ 大 : H<sub>2</sub>, He など熱伝導度の大きい冷却媒体を使用
- (3)  $\rho_g \rightarrow$ 大 : 雰囲気圧力を増大
- (4)  $T_g \rightarrow$ 低 : 冷却媒体の導入温度を下げるか, 導入量を増大
- (5)  $R \rightarrow$ 大 : ディスク回転数 (rpm) を増大
- (6)  $D \rightarrow$ 大 : 噴霧可能でかつ安定な範囲内でディスク径を増大

といった手段をとれば良いことがわかる.

ここで, 噴霧条件を一定にした場合, (15)式から

$$S_{II} \propto d^{0.40} \dots (18)$$

が得られる. 一方, 本実験で得られた粉末粒径と  $S_{II}$  との関係を図 10 に, また粉末粒径とマイクロ組織との関係を Photo. 5 に示す. この図中, いずれのディスク回転数とも実測値を結ぶ直線の勾配は 0.40 程度であり, 上式は十分よい近似式であることが確認された.

#### 4. ま と め

LHC 遠心噴霧法により製造した Ni 基超合金粉末の製造条件と粉末特性および組織微細度 ( $S_{II}$ ) との関係について検討し, 以下の結果を得た.

まず粉末の最頻出粒径 ( $d_m$ ) は主に回転ディスクの周速度に依存し, ディスク径が一定の場合, 回転数 ( $R$ )

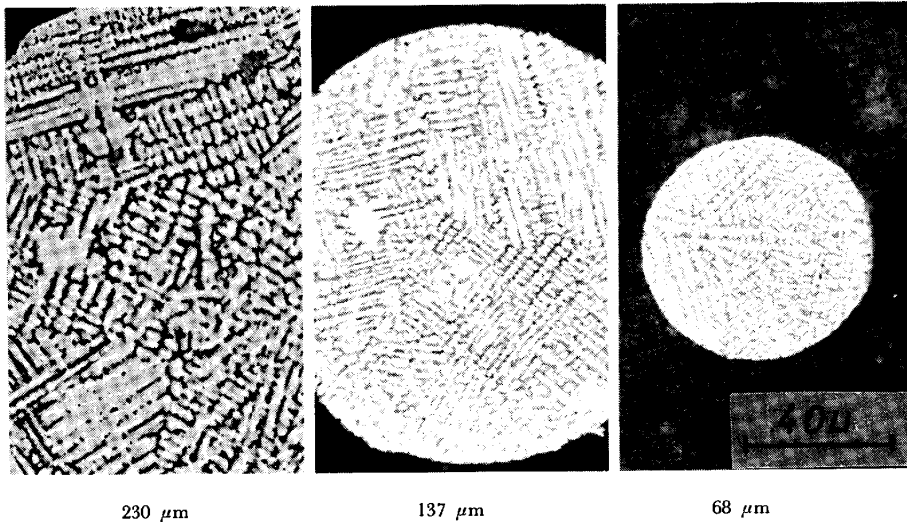


Photo. 5. Microstructure of various size powder atomized at He atmosphere. ( $R=7500$  rpm)

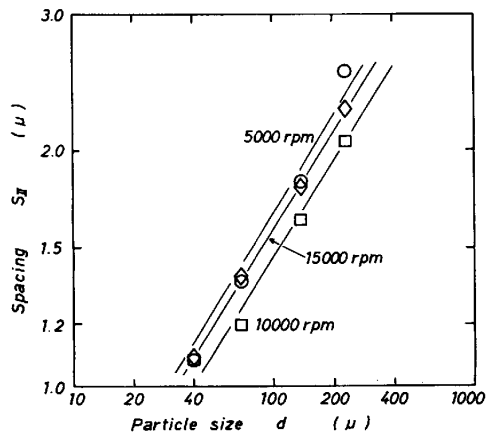


Fig. 10. Relationship between particle size and secondary dendrite arm spacing ( $S_{II}$ ) of powder atomized at various disc revolution speed.

の  $R^{-0.84}$  に比例して細粒化する。また、回転ディスクの材質により粉末形状が変化し、熱伝導のよいグラファイトを使用した場合、最も球状化する。通常、超合金粉末はキャニング<sup>5)</sup>された状態で冷間または熱間加工される都合上、充填率の高い球状粉末が好ましいと考えられる。

次に溶質偏析の一つの尺度<sup>17)</sup>となる2次 dendrite アーム間隔 ( $S_{II}$ ) は、回転ディスクの周速度 ( $DR$ )<sup>0.17</sup> に反比例し、粉末が細粒化するほど減少する。すなわちディスクの回転を増速することが最も効果的である。さらに、噴霧粒子の冷却には  $H_2$ ,  $He$  など熱伝導度のよい冷却媒を使用し、液化ガスの導入量を多くすると同時に、雰囲気圧力を高めることも有効であることがわかった。

なお、本研究は通産省工技院のプロジェクトである「次世代産業基盤技術開発」の一環として実施したものである。

終わりに本研究にあたりご支援をいただいた大同特殊鋼(株)中央研究所研究第1部長 福井彰一博士、第2研究室室長 磯部 晋氏に厚く謝意を表する。

#### 文 献

- 1) 西山幸夫: 機械の研究, 35 (1983), p. 237
- 2) J. E. COYNE: Met. Prog. (1980) Nov., p. 35
- 3) D. G. GEORGE, B. T. BROWN and A. R. COX: Pap. Am. Inst. Aeronaut Astronaut (1979) 77, p. 1226
- 4) A. A. ATONJA: J. Mech. Working Tech., 3 (1980), p. 331
- 5) 加藤哲男, 草加勝司: 鉄と鋼, 70 (1984), p. 305
- 6) R. MEHRABIAN: Int. J. Met. Rev., 27 (1982), p. 185
- 7) 加藤哲男, 草加勝司, 洞田 亮, 市川二郎: 電気製鋼, 54 (1983), p. 174
- 8) R. D. ENG and D. J. EVANS: Superalloys 80, (1980), p. 491
- 9) P. A. JOLY and R. MEHRABIAN: J. Mat. Sci., 9 (1974), p. 1446
- 10) M. COLE: Microscope & Crystal Front, 15 (1966), p. 148
- 11) H. H. HAUSNER: Planseeber Pulvermet., 14 (1966), p. 75
- 12) A. LAWLEY: J. Met., 35 (1981), p. 13
- 13) H. SCHMITT: Powder Metall. Int., 11 (1979), p. 17
- 14) 生井武文, 井上雅弘: 粘性流体の力学 (1973), p. 163[理工学社]
- 15) C. ACRIVOS: J. Mat. Sci., 11 (1976), p. 1159
- 16) 坪内為雄, 加藤清雄, 共訳: 熱伝達の基礎(1963), p. 268[朝倉書店]
- 17) S. H. REICHMAN and E. K. WEAVER: P/M Superalloys; Current and Future; Seminar Perprints of '84 Int. Powder Met. Conf. (1984), p. 21