

## 蒸気爆発を利用した急冷凝固粉末製造法

Production of Rapidly Solidified Particles by Vapor Explosion

西尾茂文\*・秋吉 亮\*・棚澤 一郎\*

Shigefumi NISHIO, Ryo AKIYOSHI and Ichiro TANASAWA

急冷凝固材料に関する課題の一つに、より厚肉の急冷凝固材料を得ることが挙げられ、急冷凝固粉末の製造と成形とを結合した厚肉急冷凝固材料製造システムが注目されている。本稿では、急冷凝固粉末の製造法とその成形法について簡単に概説するとともに、超急冷凝固システムの開発を目指して筆者らの研究室において最近行った、蒸気爆発を利用した急冷凝固粉末製造法に関する研究成果を紹介する。

## 1. はじめに

## 1.1 超急冷凝固

周知のように、たとえば金属あるいは合金を $10^3\text{K/s}$ 程度以上の冷却速度で凝固させる「急冷凝固」では、

- (a) 結晶組織の微細化
- (b) 溶質分布の均質化
- (c) 固溶限の拡大
- (d) 非晶質相などの生成

など、通常の鑄造法では実現困難なマイクロ特性を材料に付加することができる。急冷凝固により付与されたこうしたマイクロ特性を有する急冷凝固材料は、たとえば非晶質金属では、結晶質金属に比べて、

- (A) 高引張強度、高硬度、高靱性、高耐熱性などの機械的特性、
- (B) 化学的均質性、耐腐食性、高い触媒能力や水素吸蔵能力などの化学的特性、
- (B) 高電気抵抗、電気抵抗の低温度依存性、超電導性などの電気的特性、
- (D) 零磁歪、高透磁率、高飽和磁束密度などの磁気的特性、

などといった魅力あるマクロ特性を有する。ここでは、材料のこうしたマイクロ・マクロ特性を「急冷凝固効果」と呼んでおく。

こうした急冷凝固効果は、通常の鑄造法では実現できない非平衡あるいは準安定な状態にある材料を生成する、いわゆる「Energize and Quench」効果（ここではEQ効果と呼んでおく）の典型である。EQ効果を実現する具体的方法としてこれまで検討されてきた方法には、上述の急冷凝固法のほかに、融液の静的大過冷却を利用する静的大過冷却法、蒸着、スパッタリング、CVDなどの「気

相法」、あるいは「電着法」などがある。

ここでは、静的大過冷却法と急冷凝固法とを総合して「急速凝固法」と呼ぶ。薄膜以外の材料を対象とすると、材料にEQ効果を付与するには、この急速凝固法が生産性の点で優れている。融液の大過冷却を準静的に実現する静的大過冷却法では、溶融炉壁などからの不均質核生成を可能な限り抑制することが重要である。こうした方法として、これまで、小液滴法、エマルジョン法、ガラススラグ法、落下塔法、あるいはレヴィテーション法などさまざまな方法が考案されている。しかし、現段階では、静的大過冷却法は、いずれも急速凝固材料の組織や特性を検討する際の実験手法と理解するのが妥当である。

一方、急冷凝固法では、融液を急速に冷却する「液体急冷」により、大過冷却を動的に実現する。たとえば、非晶質相の生成を目的とする急冷凝固法では、凝固核生成と結晶成長に関する動力学的過程と冷却速度との動的競合関係を利用して大過冷却を実現する。この方法では、液体急冷を実現する冷却手段が重要であり、低温固体に接触させる伝導冷却法、ガス流などを用いる単相冷却法、および水などの冷却液の沸騰を用いる沸騰冷却法などがある。こうした急冷凝固法は、すでに製造システムとして一部稼働しており、薄膜以外の急速凝固材料の生産システムとして、生産性に優れている。本稿では、この急冷凝固法を対象としている。

急冷凝固法では、急冷凝固効果を実現するために、融液内部の冷却速度ひいては凝固速度を所要条件にまで高めることが必須条件である。最小所要冷却速度＝臨界冷却速度は、すでに述べたように、実現しようとするマイクロな急冷凝固効果にかかわる動力学的過程に依存する。非晶質金属を例とすると、この臨界冷却速度が $10^3\text{K/s}$ を越えるものも多い。2.2節で述べるように、この程度の冷却速度を製造システムとして実現するには困難が伴い、

\*東京大学生産技術研究所 第2部

10°K/s程度以上の冷却速度を要する急冷凝固を、特に「超急冷凝固」と呼ぶ場合がある。

## 1.2 急冷凝固粉末

さて、融液内部のある場所での冷却速度は、無論、回転に伴う融液内部での発熱、融液内部の伝熱抵抗、および融液・冷却材間の伝熱抵抗とにより決定される。

いま、簡単のために、融液は静止しており、融液内部での発熱はなく、融液内部の伝熱抵抗は熱伝導抵抗として記述できるとする。この場合、融液内部の熱伝導抵抗がある程度以上であると、この熱伝導抵抗が融液内部の冷却速度を支配するようになり、融液内部の冷却速度に限界が生じる。この熱伝導抵抗は、材料の熱物性と代表寸法(板材であれば板厚)により定まる。したがって、材料を特定すれば、急冷凝固効果を実現するに足る冷却速度や凝固速度を実現するには、材料の代表寸法に上限界があることになる。無論、この上限界の代表寸法は、期待する急冷凝固効果に関する臨界冷却速度に依存するが、たとえば非晶質相の生成を目的とすれば、通常、mm程度以下のオーダーを有する。

そこで、より厚肉の急冷凝固材料を得るには、急冷凝固粉末を作成し、これを成形するプロセスが注目されてきた。急冷凝固とPowder Metallurgyとを融合したこの方法は、例えば固溶限の拡大により従来の高力合金よりさらに高組成の合金を製造するなど、上述の厚肉急冷凝固材料の製造において重要であるのみならず、次世代航空機材料として期待されているリチウム含有アルミニウム合金など難加工材の成形にも適していると思われる。ただし、急冷凝固粉末は、成形せずとも、触媒や水素吸蔵材料として魅力的であることを付言しておく。

本稿では、こうした急冷凝固粉末の製造と成形について簡単に述べるとともに、筆者らの研究室で試みた「蒸気爆発による急冷凝固粉末製造法」<sup>1)</sup>に関する研究成果について紹介する。

## 2. 急冷凝固粉末の製造法と成形法の現状

### 2.1 急冷凝固粉末の成形法

急冷凝固粉末の製造法について述べる前に、急冷凝固粉末の成形法について簡単に触れておきたい。

粉体の成形技術の基本は、焼結である。しかし、急冷凝固粉末を成形するには、粉末に付与された急冷凝固効果を維持する必要がある。時効効果との関連からおのずから成形温度、成形時間に制約が生じる。このため、急冷凝固粉末の成形には、焼結のみでなく粉末の塑性変形を利用する必要がある。ここでは、急冷凝固粉末の成形法の基本に関する新宮<sup>2)</sup>の優れた考察を紹介しておく。

急冷凝固粉末の成形に関する温度および時間的制約の要となる量は、材料の「粘性」と「特性保持の緩和時間」である。材料の粘性は、成形プロセスにおいて粉体が圧

着、固化されて粒子が変形密着し、さらに界面での原子の移動による接合が行われる過程と関連しており、成形が可能となる最低温度を代表する。緩和時間は、粉末をある温度で保持した場合に、急冷凝固特性が失われる時間スケールを意味しており、成形に使用できる最長時間を代表する。

粉末の成形に必要な粘性値としては、日常的観測時間スケールで「流動する」と表現できる程度の粘性値 $10^{12} \sim 10^{13}$ ポアズをとるのが妥当であろう。粘性は温度の関数であるから、この粘性値に相当する温度が、急冷凝固粉末が成形可能となる最低温度を意味することになる。急冷凝固材料の粘性は、クリープ試験による引っ張り応力と歪みとから定められる。

一方、緩和時間については、たとえば定加熱速度の示差走査熱分析から $\tau_0$ と $E$ が決定できるアレニウス形の、 $\tau = \tau_0 \exp(-E/RT)$ 、を用いて定めることができる。すなわち、少なくとも、粘性より定まる上述の成形可能最低温度に相当する時間 $\tau$ 以内に成形を完了する必要があることになる。

新宮らの報告によれば、たとえば $Fe_{75}Si_{10}B_{15}$ の非晶質合金に関する成形可能最低温度は750°C、この温度における緩和時間はほぼ10<sup>2</sup>秒程度である。彼らは、この条件下で強制圧延法により、非晶質相の特性を失うことなく粉末の成形に成功している。

### 2.2 急冷凝固粉末の製造法の現状

さて、急冷凝固粉末の製造法については、これまで極めて数多くの方法が考案されているが<sup>3)</sup>、ここでは機械的粉碎を伴わないものの典型について簡単にまとめておく。

急冷凝固粉末の製造法としての基本形は、さまざまな微粒化プロセスで実績のある「ガストマイズ法」である。この方法では、高速のガス流により融液を微粒化・急冷する。また、融液に圧力や遠心力を作用させて、スプレーとして気中に噴霧する「スプレーアトマイズ法」もある。こうした方法では、球状粉末が得られるが、粉末径としては10 $\mu$ m程度以上であり、粒径分布の分散が比較的大きい。冷却速度については、試みに50 $\mu$ mの粉末を相対速度100m/sのアルゴン流により冷却すると、10°K/s程度の値となる。冷却材として優れているヘリウムを用いるとさらに高い冷却速度が期待できるが、コストの問題が生じる。いずれにしても、現実には、粉末と気流との相対速度を大きくすることは粉末径が小さくなるほど困難である。したがって、こうした気相冷却に頼る方法の冷却速度は、通常10°K/s程度以下であると言われており、超急冷凝固の実現は困難であると思われる。

さらに小さい $\mu$ mオーダーの粉末を得るためには、融液流に超音波を作用させる「超音波アトマイズ法」、融液中に溶存ガスを混入させスプレー過程におけるフラッシ

ングを用いる「フラッシュアトマイズ法」などがある。特に超音波アトマイズ法では、粒径分散の低減が期待できるとともに、粒径が小さくなることにより $10^6\text{K/s}$ 程度の冷却速度が可能となると言われている。ただし、気相冷却に頼る方法では、粉塵爆発に対する考慮が必要である。

比較的粒径の大きい粉末で $10^5\sim 10^6\text{K/s}$ 程度までの冷却速度を得る方法として、固体との接触伝導冷却や冷却液の沸騰伝熱を用いる方法がある。まず、固体との接触伝導冷却の典型は、微粒化させた融液滴を、凝固する以前に低温固体に接触させ薄液膜化して急冷凝固させる「スプラット法」である。スプラット法には、融液噴霧を形成しこれを低温固体に衝突させる方法や、融液ジェットを低温固体面に衝突させ微粒化と急冷とを同時に行う方法などがある。前者では、融液噴流をダブルロール間に供給し微粒化するローラアトマイズ法や上述のガスアトマイズ法、固定電極と回転電極（試料金属製）との間のスパークによる融解を利用する回転電極法などの微粒化法を用いる必要がある。後者の例としては、メルトイクストラクション法、メルトスピン法などが挙げられる。こうしたスプラット法では、超急凝固も可能な高い冷却速度が期待できるが、固体表面への焼付きを防止するために、スプラットと固体間に通常 $10^{-3}\sim 10^{-2}\text{MW/m}^2\text{K}$ 程度の接触熱伝達率が介在する場合が多い。この接触熱伝達率は、冷却速度に大きな影響を及ぼし、現実には超急凝固は困難である場合が多い。また、スプラット法で得られる粉末は、フレーク状となる。

一方、沸騰冷却法には、高速水噴流により融液噴流を微粒化・急冷する「水スプレーアトマイズ法」、回転ドラム内に保持された冷却水中に融液を噴霧する「回転水噴霧法」などがある。これらの方法では、 $10^6\text{K/s}$ 程度までの冷却速度が期待できると言われているが、 $10\mu\text{m}$ 程度の平均粒径の粉末や球形粉末を得ようとする、かなりの工夫が必要となる。

以上、極めて簡単に急冷凝固粉末の製造法を眺めたが、各方法とも、得られる冷却速度、粉末径、粉末形状の点で一長一短がある。粉末形状については、球形の粉末を得るためには融液滴が表面張力により球形になる時間が必要であるが、このことと冷却速度の要請とは相反している点が困難な問題として存在する。さらに、一般的課題としては、粉末の酸化や異物の混入による汚損、粉末の回収法、製造コストの低減などの問題がある。しかし、固溶限の拡大や非晶質相の生成などの観点からすれば、超急凝固を実現できる方法が限られていることが、重大な障壁となっていると考えられる。

### 3. 蒸気爆発の超急凝固粉末製造への応用の可能性

#### 3.1 蒸気爆発

蒸気爆発とは、軽水炉の炉心溶融事故、タンカーから海水へのLNG流出事故、鋳物工場での溶湯と水の接触事故、あるいは海底火山爆発などにおいてみられ、化学反応を伴わない爆発現象である。大規模な蒸気爆発では高い衝撃的圧力を伴うので、蒸気爆発の発生防止法や機構解明は、安全工学上の重要な課題である。しかし、現象が極めて短時間かつ微細な空間領域で発生するため、これまでの多くの研究にもかかわらず、その発生機構は解明されていない。しかし、たとえば高温液滴—低沸点（液滴温度より相対的に沸点が低い）液体系での蒸気爆発については、少なくとも以下のことが明らかにされている<sup>9)</sup>。

- (1) 蒸気爆発が発生する際の高温液滴温度には、上限界と下限界がある。特に、低沸点液体の均質核生成温度以下にある高温液滴では蒸気爆発は発生しない。
- (2) 蒸気爆発の発生には、高温液滴が低沸点液体に突入した際に蒸気膜に覆われることが必要である。
- (3) 低沸点液体が飽和温度近くにある場合には、蒸気爆発は発生しにくい。
- (4) 蒸気爆発は、高温液滴の種類、寸法、初期温度、および低沸点液体の温度を同一にしても、確率的にしか発生しない。
- (5) 蒸気爆発が起こる場合には、高温液滴はさらに微粒化され粉末となる。

この内、(1)～(3)項は、蒸気爆発の発生が、なんらかの原因による蒸気膜の崩壊とその際の激しい伝熱とに関連があることを意味していると考えられる。また、(5)項は、蒸気爆発現象にはそもそも粉末を作成する微粒化能力が備わっていることを意味している。

そこで、筆者らの研究室では、 $10^6\text{K/s}$ 以上の超急凝固を実現するために、通常は回避されるべき事故として認識されている「蒸気爆発」を超急凝固粉末製造法へ応用することを試みた<sup>12)</sup>。

#### 3.2 期待できる冷却速度

まず、蒸気爆発発生時に、どの程度の冷却速度が期待できるかを試算する。井上ら<sup>6)</sup>は、蒸気爆発時の熱伝達を評価するために、薄膜加熱面上に大気圧水の膜沸騰を形成し、この系に衝撃波を印加した際の過渡熱伝達特性を測定している。測定結果によれば、衝撃波到達時の熱流束は、大気圧水で最高 $50\text{MW/m}^2$ に達している。また、薄膜をレーザー加熱したBoardら<sup>7)</sup>の実験では、大気圧水について $90\text{MW/m}^2$ の過渡ピーク熱流束が報告されている。これらの測定値は、気液界面からの限界蒸発量に対応する熱流束（大気圧水では約 $230\text{MW/m}^2$ ）の値に近い。

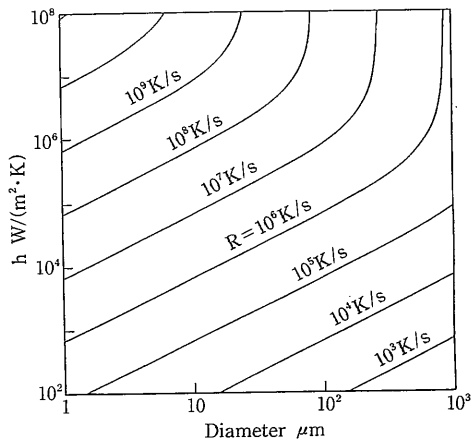


図1 熱伝達率, 冷却速度, および直径との関係(超超ジュラルミンA-7075の物性を使用し, 初期温度差は600Kとした)

一方, 図1は, 超超ジュラルミンA-7075の固体球を例として, 球表面の熱伝達率と球直径との関係を, 球中心部での最大瞬間冷却速度をパラメータとして図示したものである。1.2節で述べたように, 直径の増大とともに球内部の熱伝導抵抗が支配的となり, 冷却速度に限界が生じていることがわかる。

ここで, 上に述べた限界蒸発量に相当する熱流束を蒸気爆発時における一応の上限熱流束とし, たとえばアルミニウム系合金を対象として過熱度を600Kと取る。これらの値と図1より, 大気圧水中での蒸気爆発により, 50 $\mu\text{m}$ の直径の粉末では10<sup>4</sup>K/sを越える冷却速度が期待できることになる。蒸気爆発時の水がサブクールされているとこの値がさらに高くなる可能性があることを考慮すると, 蒸気爆発を応用することにより, かなり冷却速度の高い超急冷凝固が実現できる可能性があると考えられる。

そこで, 以上の考察を基にして, 蒸気爆発実験を行った。図2は, 使用した実験装置の概略である。実験装置は, 溶融部, 雰囲気調整部および冷却水容器からなっている。溶融部で融解された金属は, 液滴となって, 雰囲気調整部を通って, 水中に落下する。なお, 雰囲気調整部と冷却水とは高温液滴通過時を除いて, 断熱板により分離されている。

### 3.3 蒸気爆発の発生確率制御

さて, 蒸気爆発を応用した急冷凝固システムでは, 蒸気爆発を確実に発生させる必要がある。したがって, 3.1節で述べた(1)~(5)項の知見のうち, (4)項の確率的性格がまず問題となる。

蒸気爆発発生の確率的性格は, (2)項と密接な関連にあると考えられる。すなわち, 蒸気爆発が発生するには, 高温液滴まわりに蒸気膜が形成されることが必要である

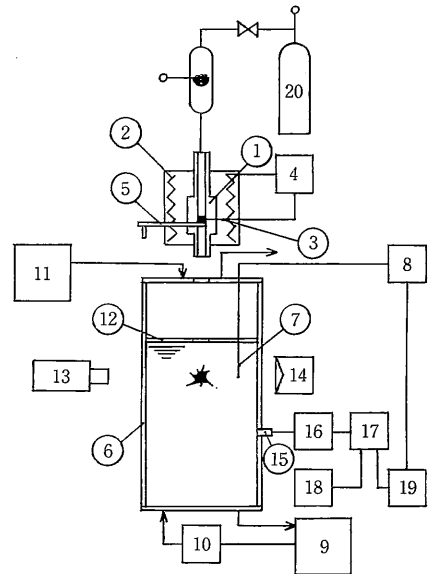


図2 蒸気爆発実験装置の概略(1. ノズル, 2. 融解用ヒーター, 3. 熱電対, 4. 温度調節器, 5. シャッター, 6. 冷却水槽, 7. 水温測定用熱電対, 8. 冷接点, 9. 恒温水槽, 10. ポンプ, 11. 水蒸気ボイラ, 12. 断熱板, 13. 撮影装置, 14. ストロブスコープ, 15. 圧力変換器, 16. 増幅器, 17. トランジェントメモリー, 18. オシロスコープ, 19. ペンレコーダ, 20. アルゴンガスポンペ)

が, 高温液滴が空気などの非凝縮性ガス中を経路して低沸点液体に突入すると, 形成される蒸気膜には, この非凝縮性ガスが随伴され混入するものと考えられる。この非凝縮性ガスは, 蒸気膜の薄化や崩壊の抵抗となり, 蒸気爆発の発生を抑制することになる。

そこで, 雰囲気調整部を空気とした場合と, 水蒸気とした場合とについて, 蒸気爆発発生確率を測定した。実験に使用した液滴は, 1.5~2g程度の錫液滴である。まず, 図3, 4は, 両雰囲気における発生圧力と蒸気爆発の様相を比較したものである(ただし雰囲気条件以外は, 同一である)。図中の各写真上部の黒い部分が雰囲気調整部であり, 白い部分が水である。図3, 4中の写真の比較によりわかるように, 空気雰囲気を経路した場合は, 水蒸気雰囲気を経路した場合に比べて, 高温液滴まわりの蒸気膜は厚く, 蒸気膜内には多量の空気が混入しているものと思われる。このために, 空気雰囲気における発生圧力は, 蒸気雰囲気におけるそれより顕著に低くなっており, 蒸気膜に空気が混入することにより蒸気爆発が起こりにくくなっていることがわかる。なお, 冷却水容器はガラス窓を有しているが, この程度の高温液滴量における蒸気爆発では, 破損などの発生は全く見られなかった。

こうした実験により, 水蒸気雰囲気中を経路して水中

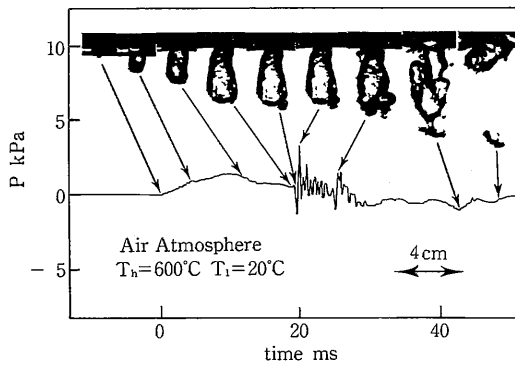


図 3 空気雰囲気中を通過して水中に突入した錫液滴による蒸気爆発

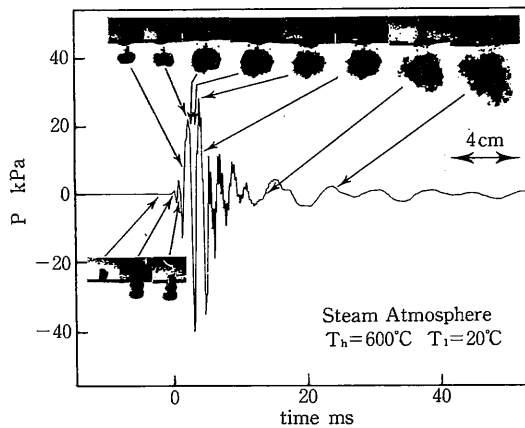


図 4 水蒸気雰囲気中を通過して水中に突入した錫液滴による蒸気爆発

に突入する場合の蒸気爆発発生確率は、空気雰囲気の場合に比べて格段に高くなることがわかった。例えば、水温20および40°Cの場合、水蒸気雰囲気の場合の蒸気爆発発生確率は高温液滴初期温度によらずほぼ100%であった。このことから、融液滴が水中に突入する以前の雰囲気調整し、水温を適切にとれば、急冷凝固システムにおいて蒸気爆発を確実に起こすことができると考えられる。

### 3.4 蒸気爆発により得られる粉末形状

水蒸気雰囲気における蒸気爆発により、水温40°Cの場合に得られた錫粉末の粒径分布を図5に示した(ただし、粉末回収率は70~80%程度であり、粒系の小さい粉末は回収できていないものと思われる)。直径100 $\mu\text{m}$ 以下の粉末が重量分率で10%程度得られているが、重量平均粉末径は数100 $\mu\text{m}$ 程度と大きい。さらに、この条件で得られた粉末の多くは細長い回転楕円体状であり、形状にも問題があった。

一方、一連の実験により、水温を高めると、蒸気爆発発生確率、微粒化能力はともに低下するが、球形に近い

粉末が得られることがわかった。そこで、粉末形状を改善するために水温を80°Cとし、蒸気爆発発生確率と微粒化能力の低下を軽減するために、錫液滴が水中に突入しある水深に至ったとき、エキスプローディングワイヤ法により錫液滴-蒸気膜系に圧力波を印加することを試みた。図6は、こうして得られた錫粉末の写真の一例である。粉末は、比較的球形に近いことがわかる。この場合に得られた粉末の粒径分布は、図5とほぼ同様であり、エキスプローディングワイヤによる圧力波の印加が、微粒化能力を高めるのに有効であることがわかる。

### 3.5 非晶質粉末の試作

以上の結果を踏まえて、本方法により、非晶質粉末の試作を試みた。対象とした合金は、融点との関連から、 $\text{Pa}_{80}\text{Si}_{20}$ とした。この合金の非晶質化に関する臨界冷却速度は $10^{4.6}\text{K/s}$ 程度である。また、実験した液滴重量は錫液滴の場合と同じであり、水温は40°Cである。

得られた粉末をX線回折により分析するとともに電子顕微鏡による写真観察した結果、エキスプローディングワイヤによる圧力波印加を行わない場合には直径180 $\mu\text{m}$ 以下、圧力波印加を行った場合には直径355 $\mu\text{m}$ 以下の粉末が非晶質相と判断された。得られた粉末の断面を

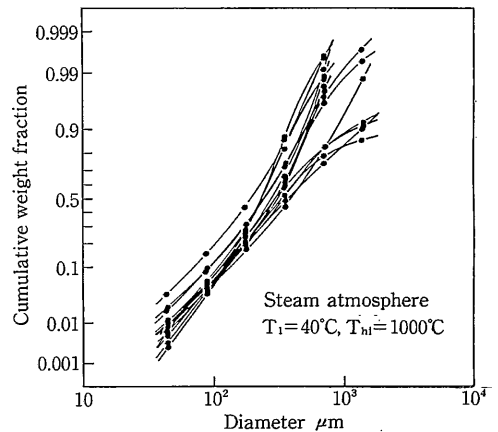


図 5 40°Cの水中で得られた錫粉末の粒径分布(図中の実線で結ばれた分布が1滴あたりの分布)

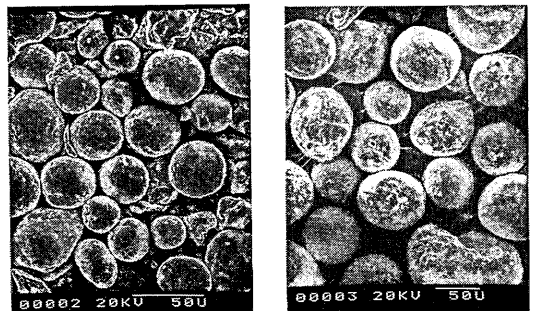


図 6 エクスプローディングワイヤを用いて80°Cの水中で得られた錫粉末の電子顕微鏡写真

電子顕微鏡により観察した結果によれば、粉末内部にはキャビティは発生していなかった。ただし、この合金においては錫の場合に比べて、圧力波を印加しても重量平均粒径は500 $\mu\text{m}$ 程度であるとともに、粉末には球形に近いものと偏平楕円体のものとが混在していた。

上述のように、355 $\mu\text{m}$ 以下の直径の粉末が非晶質化できたことは、以下のことを意味している。すなわち、図1を参照すると、本方法における急冷凝固時の粉末表面熱流束は、少なくとも30MW/m<sup>2</sup>以上と推定される。このことは、蒸気爆発時において期待できる冷却速度に関する3.2節での推論を裏付けている。

#### 4. おわりに

##### 4.1 本方法の特徴

3章で述べた結果は、以下のようにまとめられる。通常、回避すべき事故として扱われてきた蒸気爆発を非晶質粉末を含む急冷凝固粉末の製造に利用することが可能であり、10°K/s以上の超急冷凝固が実現できる可能性もある。また、この方法は、微粒化と急冷凝固とを同時に実現できるため、スプラット法のように微粒化装置を別に用意する必要が無く、システムとして簡素である。さらに、比較的大きい直径の粉末の製造に限れば、コンプレッサーや電力などのエネルギーを必要とせず、製造コスト的にも利点がある。

##### 4.2 解決すべき課題

しかし、急冷凝固粉末製造システムとして組み上げるには、以下の課題をさらに克服する必要がある。

まず、第1に、3.1節で述べた(1)項について検討する必要がある。たとえば、非晶質粉末を対象とすれば、蒸気爆発発生温度が融液のガラス転移温度程度に対応している必要があり、高融点材料では、蒸気爆発発生温度の上限値がガラス転移温度を下回ることが予想される。したがって、本方法が利用できる材料の範囲を広げるためには、超音波や衝撃波の印加により蒸気爆発を高温で強制発生させるなど、蒸気爆発発生温度範囲を拡大する

方法が必要である。

次に、粉末の平均粒径を小さくする方法を検討する必要がある。これにより、粉末としての用途が広がるとともに、臨界冷却速度以上で冷却された粉末の重量割合を増すことができる。ただし、冷却速度が高い場合、凝固するまでの時間が短いために、粉末形状は非球形となる傾向がある。球形粉末を必要とする用途に対しては、水温を高くして圧力波などを印加すれば、比較的球形に近い粉末が得られるが、この場合にも冷却速度および微粒化能力をさらに高めるよう工夫する必要がある。これらの要請に対しても、上で述べた蒸気爆発発生温度範囲の拡大法と類似した方法が有望と思われる。

さらに、酸化、異物質混入による純度低下、および粉末回収法などの問題を解決する必要がある。これらは、本方法固有の問題でなく、急冷凝固粉末製造法における共通課題であるが、酸化については水の脱気を十分に行えば空気中よりは十分防止できるとの報告もある。

超急冷凝固が粉末製造システムとして確立できれば、過飽和固溶体など非平衡あるいは準安定な状態にあるさらに新しい材料の開発、製造が可能となると期待される。本稿が、こうした研究・開発の一助となれば幸いである。

(1990年3月13日受理)

#### 参考文献

- 1) 秋吉, 西尾, 棚澤: 日本機械学会論文集 (B編), 54-499 (1988), 630.
- 2) 秋吉, 西尾, 棚澤: 日本機械学会論文集 (B編), 56-521 (1990), 94.
- 3) 新宮: 日本金属学会シンポジウム論文集, (1987).
- 4) 日本鉄鋼協会「鉄鋼の急速凝固部会」編: 急速凝固プロセスの基礎と応用, (1989).
- 5) 井上: 伝熱研究, 19-2 (1980), 22.
- 6) 井上, 青木, 片岡: 第17回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (1980), 214.
- 7) Board, S.J., Clare, A.J., Duffey, R.B., Hall, R.S. and Poole, D.H.: Int. J. Heat Mass Transfer, 14(1971), 1631.