

論説



Paper

電磁ノズルを備えたレビテーション溶解炉におけるチタン合金粉末製造技術

奥村鉄平*¹, 芝田智樹*¹, 大河内敬雄*²

Production of Ti Alloy Gas Atomized Powder by Levitation Melting Furnace with Electric Nozzle

Teppei Okumura, Tomoki Shibata, and Norio Okochi

Synopsis

It is difficult to produce titanium alloy powders with low oxygen content because of the high reactivity of molten titanium against to atmospheric gas and refractory materials. A new gas atomization process coupled with a cold crucible levitation melting and bottom tapping electric nozzle using its features as titanium melting furnace, supplies low impurities, high temperature and enough volume of molten metal, has been constructed.

Thermal phenomena at bottom nozzle region, erosion resistivity of the sleeve, of which is one of the nozzle-constructed parts, to the molten titanium and atomization gas stream of this process have been revealed.

Followings were found from experimental and numerical investigations.

1) Additional heat supplied by sleeve made of electrically conductive material inserted in the water cooled nozzle avoid nozzle clogging even for small radius nozzle.

2) Tungsten showed lowest erosion rate among the candidate materials for sleeve.

3) Conically enclosed space by atomizing gas induces unfavorable gas flow and low pressure region.

Developed atomization system, electric bottom tapping nozzle and pencil nozzle for atomization, that is designed based on above results showed following features.

1) Tapping and atomization were stable and were continuously done without changing or repairing nozzle part.

2) Atomization yield was increased since the reuse of bottom skull was enabling.

3) This process allows the production of fine ($d_{50}=85\mu m$) Ti-6Al-4V alloy powders.

1. 緒 言

近年チタン合金は、その軽量、高耐食性、高比強度、生体適合性といった特徴を活かして、幅広い用途に用いられるようになってきている。例えばTiAl金属間化合物は、軽量であり高い耐熱性を有しているため、ターボホイールや排気バルブのようなエンジン部品に適用されている^{1), 2)}。一方、チタンは加工性に難点があるため複雑形状に加工し難く、加工コストが非常に高いという問題がある。

そこで最終形状に近い製品の製造が容易な、金属射出成形法(MIM)などのプロセスをチタンおよびチタン合金に適用することが可能であれば、大幅な加工費の削減が可能になるため、近年粉末冶金用途への展開も期待されている。

しかしながらチタンは高温では極めて反応性が高く、高純度のチタン合金粉末を工業的に製造することは困難である。特に耐火物や雰囲気からの酸素の混入は大きな問題であり、鑄造、鍛造工程における酸素の増大は延性、韌性低下の要因となる。

2006年8月30日受付

* 1 大同特殊鋼(株)技術開発研究所 (Research & Development Lab., Daido Steel Co., Ltd.)

* 2 大同特殊鋼(株)粉末工場 (Metal Powder Plant, Daido Steel Co., Ltd.)

コールドクルーシブルは、るつばからの不純物の混入がない溶解方法として知られているが³⁾、溶解原料の形状に制限がないことや、大容量の溶解が可能などの理由により高純度チタン合金粉末製造プロセスへの適用が期待される。

著者らはコールドクルーシブルとガス噴霧装置を組み合わせた CCLM-GA(Cold Crucible Levitation Melting and Gas Atomization) プロセスの開発をおこない、高純度のチタン合金粉末の製造を可能とした⁴⁾。しかしながら本プロセスは、工業生産の観点から、粉末の収率や製造効率低下の要因となる以下の問題が認められた。

- (1) 噴霧終了後に耐火物製の注湯ノズルと炉底の交換が必要
- (2) るつばボトムに形成されるスカルの交換が必要
- (3) 出湯および噴霧が不安定

上記の問題を解決するため、水冷銅製の出湯ノズルと誘導コイル（電磁ノズル）による出湯機構を開発したが、これを工業的に安定操作するためには、誘導コイルの溶解能力（出湯ノズル内メタルへの熱供給）、噴霧時のガス流れなどについての把握が必要である。そこでこれらの現象について、基礎実験や数値解析を通じた検討より、出湯に関する諸現象の解明をおこなったので、報告する。

2. レビテーション溶解

レビテーション溶解炉の溶解原理図を Fig.1 に示す。溶解炉は高周波誘導コイルと、縦に複数のスリットが設けられている、円筒状の水冷銅るつばにより形成される。高周波誘導コイルの電流 (J_0) により発生した磁場 (B) は、スリットを通してるつば内の材料に印加され、その表面に生じた誘導電流 (J_e) によるジュール熱で、熔融する。また磁場と誘導電流の相互作用により、溶湯にはるつば中心方向へのローレンツ力が働き、るつばと非接触で保持される。一方

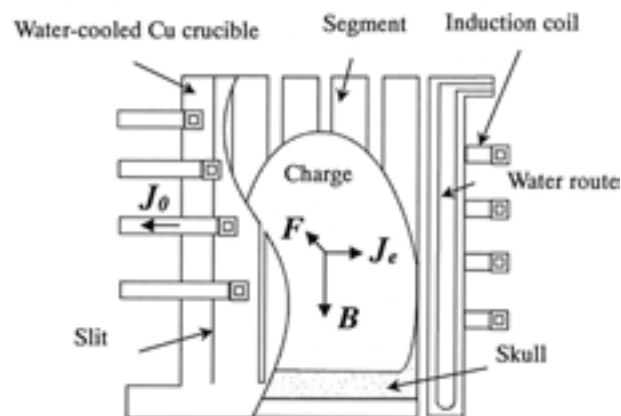


Fig.1. Principle diagram of cold crucible.

るつばボトムでは、溶湯ヘッドがこの磁気圧に勝るため、溶湯はるつばに接触し、凝固層（スカル）が形成され、その上で溶湯は保持される。

レビテーション溶解炉は誘導炉であるため、VAR や EB といった他のチタン合金溶解法と異なり、さまざまな形状のチタンスクラップを溶解することが可能である。また電磁攪拌により熔融プール内の温度および成分分布が均一である。さらに真空溶解が必要でないため、システムは簡素化され、噴霧装置との組合せが容易である。

3. ボトムノズル部の熱的検討

3.1 電磁ノズルによるボトム出湯

誘導溶解における出湯方法としては一般的に傾動方式が用いられるが、コールドクルーシブルの場合、傾動出湯時に水冷るつばとメタルが接触するため温度低下が発生し、歩留り低下の要因となる。さらにはタンディッシュを介す必要があるため、溶湯温度の低下や汚染が生じる。一方、ボトム出湯では、出湯時のるつばへの接触が最小限に抑えられるため、溶湯の温度低下が発生せず、またタンディッシュを必要としない。さらには、通常の高周波誘導炉よりも周波数の高いコールドクルーシブル炉では、高出力化が困難な水冷ケーブルや共軸導体を必要としない。このような理由により、ボトム出湯はコールドクルーシブルにおける出湯法として最適なプロセスであると考えられる。

3.2 電磁ノズルにおける電源仕様と浮揚溶解

しかしながら、セミレビテーションプロセスでは、出湯においては、ボトムにスカルが生成するため、スカルを溶解するための熱的な解析が必要となる。Fig.2 に電磁ノズルを備えたレビテーション溶解-ガスアトマイズ装置を

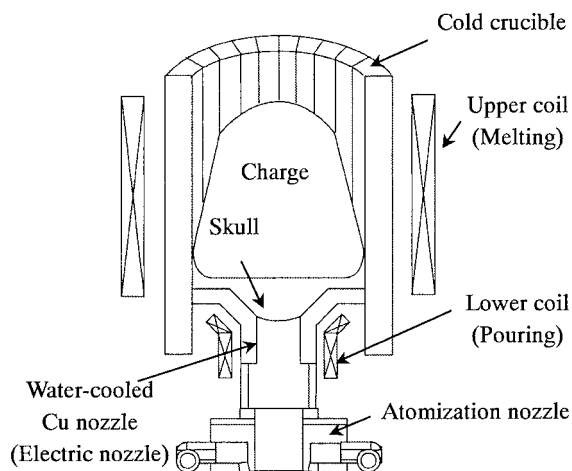


Fig.2. Schematic view of CCLM-EN-GA process.

Table 1. Specifications of the cold crucible furnace and electric nozzle.

Device	Capacity	Power	Frequency	Coil (mm)	Crucible (mm)
Melting furnace	15 kg-Ti	450 kW	15 kHz	220D × 150H × 7T	170D × 330H
Metal tapping nozzle		60 kW	30 kHz	134 ^{top} ~ 90 ^{bot} D × 78H × 8T 90D × 54H × 8T	169 ^{top} ~ 58 ^{bot} D × 50H 58D × 18H

示す。セグメントに分割された、水冷銅製の出湯ノズルがコールドクルーシブルのボトムに配置される。るつぽとノズルの溶解用コイルは、それぞれ独立した高周波電源に接続されている。るつぽおよび電磁ノズルの仕様を Table 1 に示す。

導体の表面近傍に誘導電流が流れたときの電磁浮揚力は

$$F = \frac{W}{\sqrt{\frac{\mu}{\pi f \rho}}} \dots\dots\dots (1)$$

F:電磁浮揚力 [N], W:消費電力 [W], μ :比透磁率 [-],

f:周波数 [Hz], ρ :電気抵抗率 [Ω m]

で表される^{5),6)}。式 (1) より消費電力が一定の場合、周波数が減少するに伴い電磁浮揚力は増大する。一方周波数が増大すると、電磁浮揚力は減少するが、表皮効果により誘導電流は集中し、加熱効率は増大する。

材料を誘導加熱したときの磁場の浸透深さは

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu}} \dots\dots\dots (2)$$

δ :磁場の浸透深さ [m], ρ :加熱物の比抵抗 [Ω m],

f:電源周波数 [Hz], μ :加熱物の透磁率 [H/m]

で表される。材料加熱効率を増大させるためには、磁場の浸透深さを材料の 1/3 程度にすることが望ましい⁷⁾。本プロセスにおける溶解材料の直径を 1.5×10^{-2} m としたとき、浸透深さをその 1/3 以下 ($<5 \times 10^{-3}$ m) にするためには、チタンの 1073 K における比抵抗 1.65×10^{-6} Ω m, 透磁率 1.26×10^{-6} H/m より、電源周波数は 16.7 kHz 以上が必要となる。本プロセスにおいては、溶解炉電源はメタルへの電磁浮揚力と攪拌を重視し低周波 (15 kHz) に、電磁ノズル電源は強加熱と溶解を重視し、高周波 (30 kHz) に設計した。

3. 3 ろうと部への熱供給

Fig.3 に電磁ノズルの断面図を示す。電磁ノズルはボトムスカルへの熱供給効率と出湯流の整流化を考慮し、ろうと部とストレート部により形成されている。先に述べたとおり、ボトム出湯のためには、ボトムスカルを溶解させることが必要であり、そのためにはろうと部への熱供給について明らかにする必要がある。そこで電磁ノズルの電

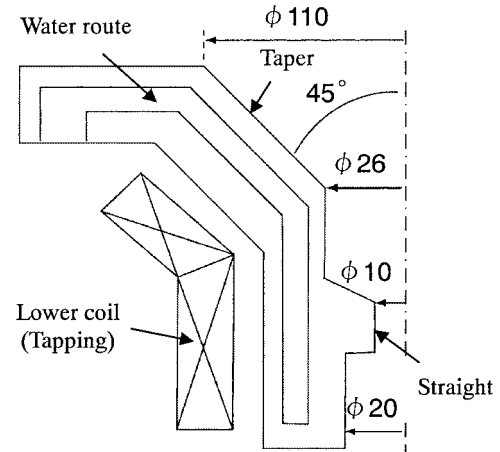


Fig.3. Dimension of electric nozzle.

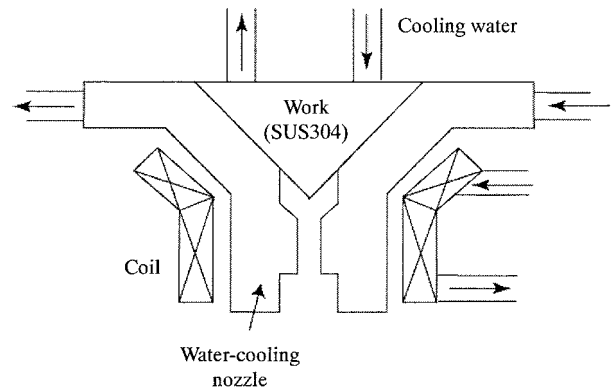


Fig.4. Measuring method of power distribution of electric nozzle.

力配分を測定した。Fig.4 に実験の模式図を示す。冷却水を通水できる構造のステンレス容器（ワーク）を模擬溶湯としてノズル内に装入し、ワーク、ノズル、コイルに冷却水を流しながら電力を投入した。その時の各部での冷却水の温度差より、各部で消費された電力および電力配分を測定した。ワーク、ノズル、コイル以外で消費された電力はまとめてその他の消費電力とし、全投入電力に対するワークの消費電力の割合を電磁ノズルの電力効率とした。Table 2 に電磁ノズルの電力配分を示す。投入電力の大部分はコイルと水冷銅製のノズルで消費され、ワークの電力効率は 13 % (8 kW) であった。

Table 2. Power distribution of electric nozzle system.

	Flow rate of cooling water (l/min)	$\Delta T(K)$	Power distribution(%)
Work	4.4	26	13
Coil	16.0	23	43
Nozzle	60.0	4	28

次にろうと部の凝固層を溶融するのに必要な熱流束をワークの電力効率を用いて試算した。Fig.5 に試算したモデルを示す。凝固層と銅の界面温度と凝固層厚および熱流束の関係は一次元定常状態において

$$Q = \lambda_{Ti} \frac{T_m + T_{sm}}{L_s} = h(T_{sm} - T_{sw}) = \lambda_{Cu} \frac{T_{sw} + T_w}{L_c} \dots\dots(3)$$

Q : 熱流束 $[W/m^2]$

T_m : 溶湯と凝固層の界面温度 $[K]$

T_{sm} : 凝固層とギャップの界面温度 $[K]$

T_{sw} : ギャップと銅の界面温度 $[K]$

T_w : 冷却水の温度 $[K]$

λ_{Ti} : チタンの熱伝導率 $[W/m K]$

λ_{Cu} : 銅の熱伝導率 $[W/m K]$

L_s : 凝固層厚 $[m]$

L_c : 銅と冷却水間の距離 $[m]$

h : ギャップの熱伝達係数 $[W/m^2 K]$

で表される。チタンの熱伝導率 $12 W/m K$ 、銅の熱伝導率 $390 W/m K$ 、ギャップの熱伝達係数を $750 W/m^2 K$ (下注3 鋳造における熱伝達係数⁸⁾)、銅と冷却水間の距離 $0.005 m$ とし、測定値より凝固層厚を $0.01 m$ 、冷却水の温度を $323 K$ とすると、熱流束の大きさは $743 kW/m^2$ となり、ノズルろうと部の面積 $0.01 m^2$ と電力効率を考慮したとき、出湯口開口のために必要な電源出力は $57 kW$ となった。よって

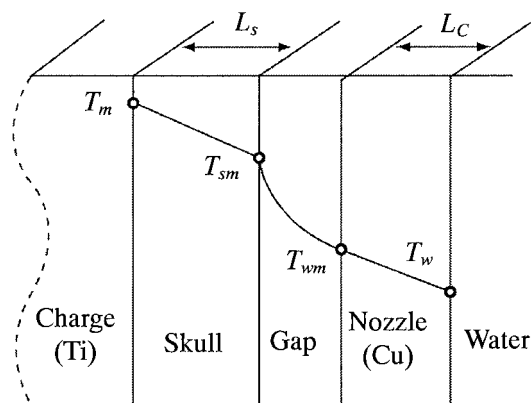


Fig.5. Heat resistance model.

ノズル通電用電源を $60 kW$ とすれば、ろうと部スカルを溶解することは可能であると考えられる。

一方ノズル通電用の電源は高周波数を選定していることおよび溶湯ヘッドの影響により、ノズル通電による電磁力の影響は小さく、ノズル内メタルを保持(浮揚)させ、銅ノズルからの抜熱を抑制することは困難である。また、ろうと部を溶解することができた場合においても、下には小径($\phi 10 mm$)のストレート部がある。出湯径が小さいとき、スカルの厚さは極めて薄いと推定され、莫大な熱流束を誘導加熱で補償する必要がある、ノズルへの抜熱により閉塞が発生することが推測される。以上の結果より、水冷銅ノズル内メタルからノズルへの抜熱を抑制し、発熱によりノズル内メタルの溶解を促進可能な補助スリーブを、ろうと部およびストレート部に装入することを検討した。

3. 4 スリーブ材質の検討

スリーブ材質は、(1) 融点(高融点材料)、(2) 熱膨張係数(熱膨張係数が小さく、繰返し使用しても破損しない)、(3) 被誘導加熱体(導電体)、(4) 溶湯と材質の反応性(反応性が小さい)を考慮して選定をおこなった。Fig.6 に適

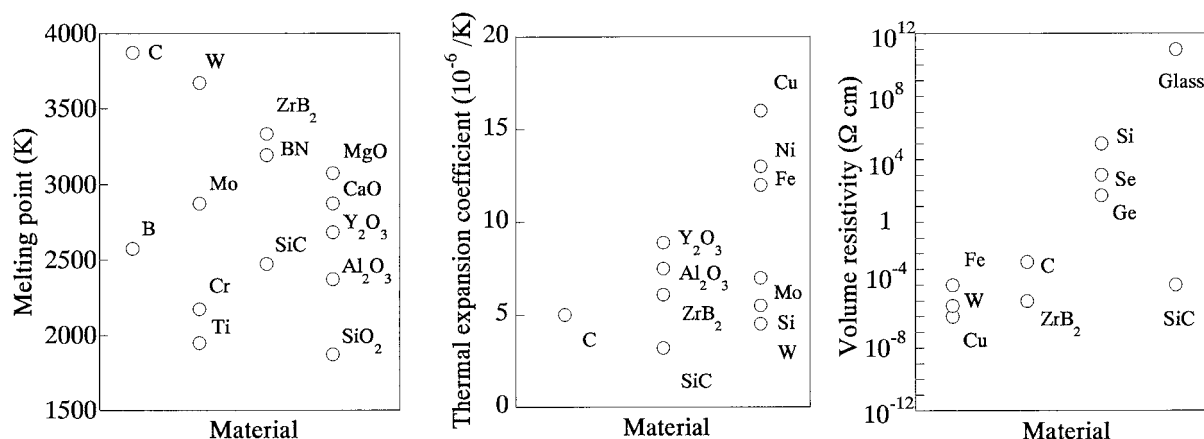


Fig.6. Melting point, thermal expansion coefficient and volume resistivity of materials.

用を検討した材料の融点，熱膨張係数，電気抵抗率を示す．物性値から容易に検討できる上記(1)～(3)条件を考慮して選定した，黒鉛，タングステン，シリコンカーバイドについて溶損実験により各材質の溶湯との反応性を調査した．

各材質を円柱状のサンプルに成形し，純チタン溶湯中へ浸漬させ，材質の溶損度合いを調査した．純チタン溶湯の温度は 2023 K，浸漬時間は 60 秒とした．浸漬後にサンプルを取り出し，サンプルの寸法とるつば内で凝固させた溶湯の成分分析をおこなうことにより，溶損量を評価した．

それぞれの材質の体積溶損速度を Fig.7 に示す．タングステンの体積溶損速度は 1.6×10^{-6} m/s であり，3 材質中で最小の溶損量を示した．アトマイズされた粉末の平均粒径は，溶湯質量流量の 0.5 乗に比例して増大するため⁹⁾，スリーブの内径が溶損により拡大すると，微粉末の収率が減少する．内径の拡大が顕著な場合には，スリーブを出湯および噴霧操作ごとに交換する必要がある，本プロセスの目的である連続操業への支障となる．安定して微粉末を作製するという観点からは，スリーブの材質はタングステンが最適である．

電磁ノズル内に取り付けるタングステンスリーブの昇温状況を調査するため，スリーブを設置した電磁ノズルのコイルに通電して温度を測定すると，出力 60 kW において，2083 K であった．これより出湯用高周波電源によりスリーブをチタン融点以上の温度まで昇温可能であり，スリーブ内のメタルが，通電時には未凝固であることを確認した．

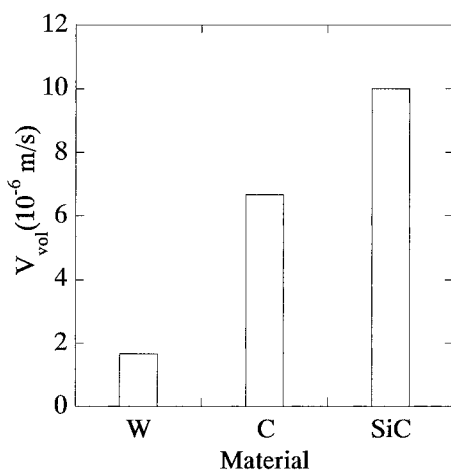


Fig.7. Erosion rate of each screened materials.

4. 噴霧ガスの流れに関する検討

4. 1 ガス流れとアトマイズの安定性

ガスアトマイズ粉末製造では，目標粒度の粉末を安定して生成することができるアトマイズノズルが重要である．噴霧ガス流に起因する不安定な流れが生じると，溶滴を吹き上げ，アトマイズノズルに付着，成長させることによるノズル閉塞が発生し，安定操業が妨げられる．しかしながら，一般に微粉末を製造するためには，大流量，高流速のガスが必要で，その結果不安定なガス流が生じやすい．従って安定したガス流れとなるようなノズル構造の設計が必要となる．^{9), 10)}

従来のレビテーション溶解-ガスアトマイズ装置を Fig.8 に示す．溶湯は耐火物製の溶湯ノズルから出湯され，溶湯ノズル直近に配置された，噴霧ノズルからの噴霧ガスにより粉化される．Fig.9(a) にコンファインド型，Fig.9(b) にフリーフォール型のガス噴霧ノズルを示す．コンファインド

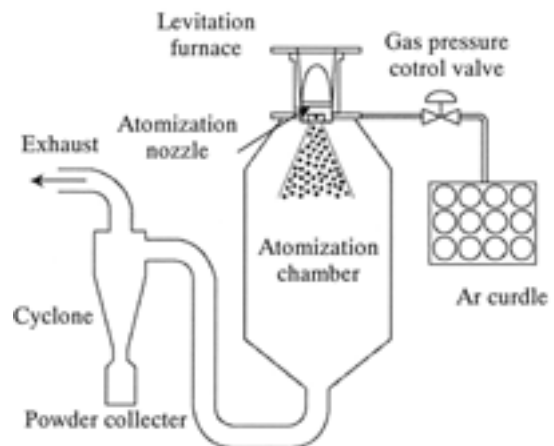


Fig.8. Cold crucible levitation melting and gas atomization system.

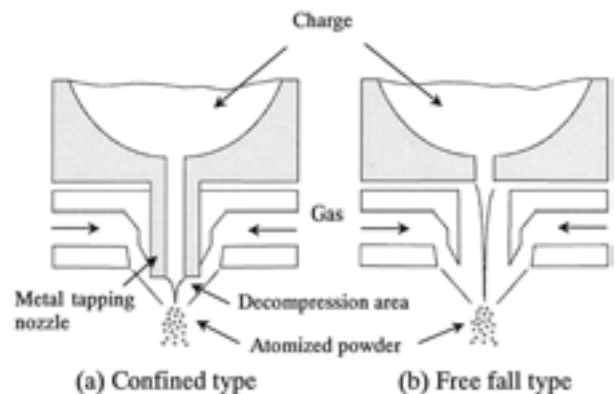


Fig.9. Gas atomization methods.

型では、噴霧ノズルと溶湯ノズルを近接しているため、噴射口と溶湯ノズルが分離されたフリーフォール型のガス噴霧ノズルと比較し、噴霧ガス流速の減衰が小さく、溶湯流は細かく分断され、微細粉となる。このようにコンファインド型噴霧ノズルでは、微細粉末が得られるが、一方で噴出される噴霧ガスが、突出した溶湯ノズルの先端に衝突し、溶湯ノズルを冷却するため、ノズル閉塞の原因になるという問題がある。

本プロセス（CCLM-EN-GA プロセス）においては、電磁ノズル内に配置されたスリーブの冷却および出湯流が電磁ノズルコイルと接触する可能性を考慮し、フリーフォール型のガス噴霧ノズルの適用を検討した。フリーフォール型においては、出湯流は重力落下し、出湯流径は溶湯ノズルからの距離が増大するに従い減少する。小径の出湯流は流体力学的に不安定であり、出湯流の落下による分裂を考慮した噴霧ノズルの設計をおこなった¹¹⁾。

4. 2 ガス流れの検討

4. 2. 1 噴霧ガス流れの二次元流体解析

最適な噴霧ノズル形状の選定のため、汎用流体解析ソフトによる噴霧ガスの流れのシミュレーションをおこなった。解析ソフトは、差分法を用いている FLOW-3D (Flow Science 社) を使用した。乱流モデルは RNG k- ϵ モデルを用い、噴射されるアルゴンガスを圧縮性流体として取り扱った。また実際の系においては溶湯の流れおよび溶湯と雰囲気との熱交換が存在するが、本解析においては、モデルの簡略化のため考慮しなかった。

解析に用いた二次元計算モデルを Fig.10 に示す。計算領域は噴霧ノズルの対称性を考慮して軸対称モデルとした。フリーフォール型噴霧ノズルは、噴射口が環状に 360° 開かれているフルコーン型とした。

解析初期条件として、モデルの上端は、電磁ノズルの出湯部が存在するため障壁とし、右側境界のガス貯めに 3.0 MPa の圧力を、その他の位置には、常圧を設定した。

4. 2. 2 溶湯ノズル出口の圧力

ガス流れ場の圧力の安定性を調査するため、溶湯ノズル下部の圧力測定をおこなった。Fig.2 のガスアトマイズ実験装置にて、噴霧ノズルにアルゴンガスを最大 10 MPa まで印加し、溶湯ノズル先端、噴霧ガスおよび噴霧チャンバー内の圧力を測定した。溶湯ノズル上端の圧力測定は溶湯ノズルの上端を密閉して取り付けした圧力計にておこなった。

4. 3 結果および考察

定常状態における算出されたガス流速分布を Fig.11 に示す。噴霧ガスは衝突点に向かって移動した後、上方へ移

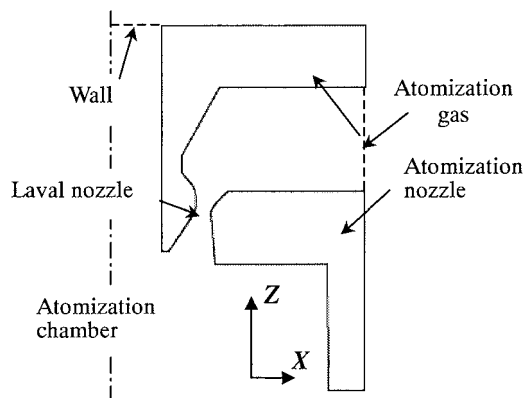


Fig.10. Geometry of simulation model.

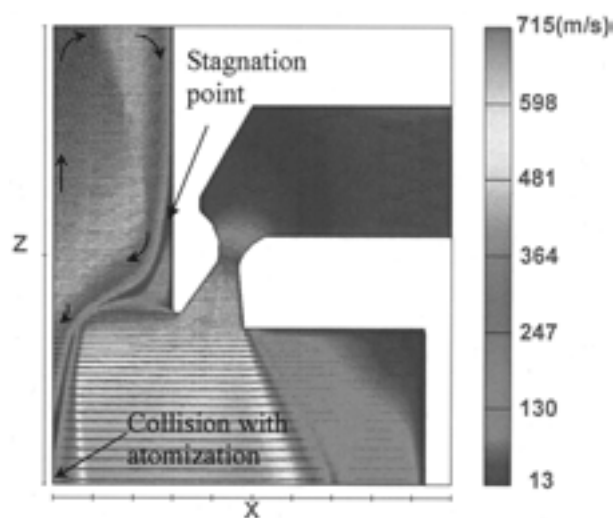


Fig.11. Velocity distribution of the atomization gas in steady-state.

動する。その後壁に沿って旋回した後、再び衝突点に向かって移動する。解析と同形状の噴霧ノズルを用いて、噴霧実験をおこなったとき、粉化点でガスとの衝突により生成した溶滴が上方に吹き上げられる現象があらわれた。吹き上げられた溶滴の挙動は、シミュレーションにより計算された噴霧ガスの流れとほぼ一致しており、実験におけるガス流れが解析によりほぼ再現されていると考えられる。

シミュレーションにおいて、噴霧ノズルに沿って移動するガスが、粉化点に向かって再流入するため、流れが壁から剥離している位置では、ガス流速が減少し、淀み点が形成されている。実験においては、吹き上げられた溶滴が淀み点周辺の噴霧ノズル内周に付着している。吹き上げられた溶滴が淀み点の流速減少によりガス流から離脱し、噴霧ノズル内周に付着し凝固したものと推定される。粉化点上部には噴霧ガスにより遮蔽された負圧領域、下部には噴霧ガスにより高圧となった領域が形成されており、噴霧ガ

スの吹き上げは、噴霧チャンバーと噴霧領域の圧力の不安定さにより促進されていると考えられる。

ノズル周辺の負圧領域の形成と派生する噴霧ガスの吹き上げを防ぐため、ペンシル型の高圧噴霧ノズルの適用を検討した。Fig.12にペンシル型の高圧噴霧ノズルを適用した CCLM-EN-GA プロセスを示す。ペンシル型高圧噴霧ノズルは 8 本のトーチを一定角度に粉化点に向け傾斜させ、環状に配置した構造とした。

ペンシルおよびフルコーンフリーフォール型噴霧ノズルにおける溶湯ノズル先端圧力を Fig.13 に示す。フルコーン型噴霧ノズルは、噴霧圧力の増加に伴いノズル先端圧力は減少し、負圧領域が形成されている。ノズル先端圧力は、

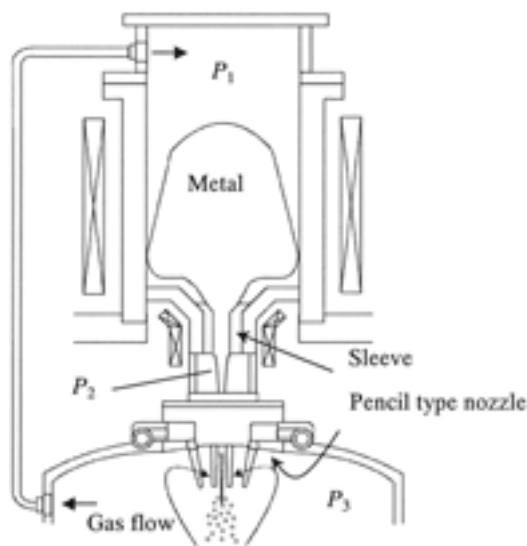


Fig.12. Developed CCLM-EN-GA process (pencil type nozzle).

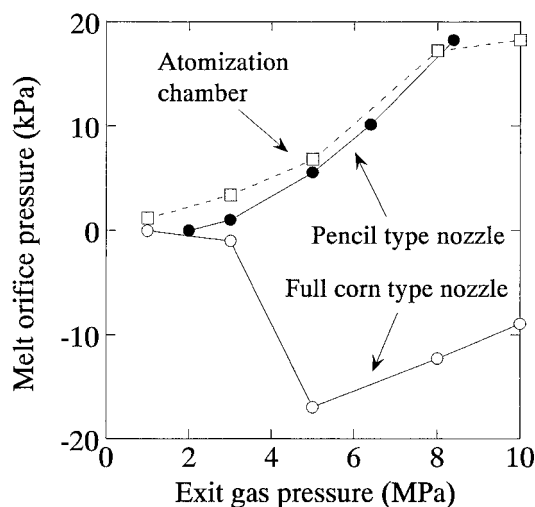


Fig.13. Effect of atomization nozzle type on pressure at metal outlet.

は、噴霧圧力 5 MPa で最小値を示し、噴霧圧力の増加に伴い増大しており、噴霧ガス的高圧化に伴い衝突した噴霧ガスの影響が大きくなり、ノズル先端の負圧が減少していると考えられる。一方ペンシル型噴霧ノズルは、噴霧ガス的高圧化に伴いノズル先端圧力は、正圧でゆるやかに上昇する。また噴霧チャンバーの圧力とノズル先端の圧力はほぼ一致した挙動となった。

噴霧により粉化点下には、噴霧ガスの衝突により正圧の領域が形成されるが、ペンシル型噴霧ノズルにおいては、トーチ間に隙間が存在するため、負圧領域は形成されず、溶湯ノズル下と粉化点下の領域は同一圧力となっていると考えられる。フルコーン型噴霧ノズルにおいては、負圧領域の形成によりガス流れ場への溶湯の供給は安定するが、派生する噴霧ガスの吹き上げが顕著であるため、本プロセスにおいては吹き上げの発生しないペンシル型噴霧ノズルが最適な噴霧構造であると考えられる。

さらに噴霧チャンバーと溶解炉の圧力の安定性を向上させるため、噴霧チャンバーと溶解炉間にバイパス配管を設置し、全ての領域を同一圧力とした。全領域の圧力は同一となり、安定した連続噴霧が可能となった。

5. 新プロセスと粉末特性

以上の結果に基づき、構築したプロセスは以下のとおりである。

- (1) 溶湯の出湯方法は電磁ノズルによるボトム出湯方式
 - (2) タングステンスリーブを電磁ノズル内に装入
 - (3) アトマイズノズルは、ペンシル型高圧噴霧ノズルを適用
- その結果以下の操業技術を確立した。

- A. スリーブおよび炉底の溶解ごとの交換を行わない、連続した溶解 - 出湯 - 噴霧操業
- B. スカルの大気雰囲気中に曝さず、連続して使用
- C. ガス流れの制御により、派生する噴霧ガスの吹き上げを抑制した安定した噴霧
- D. 安定した噴霧により電磁ノズルのメンテナンスが不要となり工業的に適用可能な製造プロセスを開発

本プロセスにより製造した粉末の不純物分析結果を Table 3 に示す。レビテーション溶解炉により溶解された本粉末のプロセスに起因する不純物の上昇はなく、高純度のチタン合金粉末を製造することが可能である。また Ti-6Al-4V 合金粉末を MIM により成型した引張試験片は、870 ~ 900 MPa という良好な引張強度を示した。

粉末表面は非常に清浄であり、ガス噴霧粉特有の球状粉 (Fig.14) が得られた。製造粉末粒径のガスメタル比との相関を Fig.15 に示す。本プロセス (ペンシル型噴霧ノズルを

Table 3. Impurities of Ti-6Al-4V powders by levitation melting and gas atomization process.

Element	C	W	N	O
#1	0.03	0.005	0.028	0.066
#2	0.03	0.007	0.026	0.057
CaO crucible	0.03	-	0.017	3.6
Raw material	0.01	-	<0.005	0.05

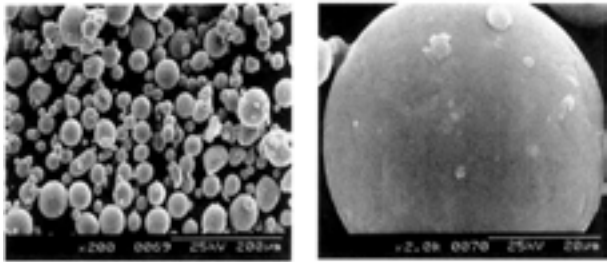


Fig.14. SEM photograph of Ti-6Al-4V powder by levitation melting and gas atomization.

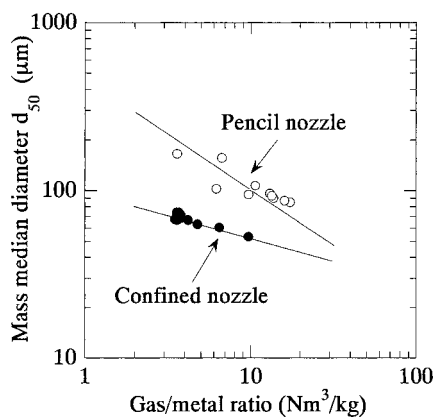


Fig.15. Effect of the nozzle design on mass median diameter.

用いた CCLM-EN-GA プロセス) で製造された粉末は、コンファインド型噴霧ノズルを用いた CCLM-GA プロセスより粉末粒径がやや大きいため、今後微粉末および超微粉末 (<10 ~ 20 μm) の製造を視野に入れたとき、本プロセスに適した噴霧ノズルの開発が課題となる。

6. 結 言

レビテーション溶解, 電磁ノズル出湯およびガスアトマイズを組み合わせたプロセスを新規に開発した. 誘導コイルの溶解能力 (出湯ノズル内メタルへの熱供給), 噴霧時のガス流れなどについての基礎実験を行い以下の技術を確立した.

(1) 電磁ノズルおよび噴霧ノズルのメンテナンスをすることなく, 安定した溶解 - 出湯 - 噴霧操業をすることが可能

となった.

(2) 本プロセスにより, 高純度で微細 ($d_{50}=85 \mu\text{m}$) な球状粉を製造することが可能となった.

(文 献)

- 1) T. Shibata, N. Demukai and H. Uemura : Proceedings of the 2nd Electromagnetic Processing of Materials, Paris, France, 1(1997),231.
- 2) 出向井登: チタン, 47(1999), 1, 25.
- 3) M. Garnier and I. Madylam : Proceedings of 6th Int. Iron and Steel Cong., (1990), Nagoya, ISIJ, Vol.4, 260.
- 4) 大河内敬雄, 清水孝純: 電気製鋼, 74 (2003), 227.
- 5) E. Fromm and H. Jehn, Brit J Appl Phys, 16(1965), 653.
- 6) H. Tadano, K. Kainuma, T. Take, T. Shinokura and S. Hayashi, Proceedings of the 3rd Electromagnetic Processing of Materials, Nagoya, Japan, (2000), 277.
- 7) 田口一洋, 加納利行: 富士時報, 68 (1995), 4, 220.
- 8) 大中逸雄: 鉄鋼の凝固, 付録 鉄鋼の凝固現象に関するデータ集, (1977), 付録54.
- 9) 福田匡, 阿佐部和孝: 鉄と鋼, 85 (1999), 703.
- 10) 福田匡, 中西睦夫, 久保敏彦: 鉄と鋼, 82 (1996), 665.
- 11) G. Schulz, Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials, 1 (1996), 43.