

素形材

2020
JUNE

Vol.61 No.6

6

特集

粉末冶金素形材技術の最前線

MIMによる高機能金属部品の製造

金属粉体成形技術の最前線

放電プラズマ焼結（SPS）法による金属粉末成形技術への応用

チタン材料における酸素や窒素による固溶強化

最新の金属粉末製造とそれを用いた造形技術

政策TREND

新型コロナウイルス（COVID-19）に関連する素形材産業への
主要支援施策・補助金について

シリーズ「鑄鋼の生産技術」第8回

第5章 鑄造方案および鑄型（続き）

TOPICS

「特別講義」第21回 製品の機能・信頼性・寿命向上への高付加価値化
—バリ取り・エッジ仕上げ技術への挑戦—（その2）

放電プラズマ焼結 (SPS) 法による 金属粉末成形技術への応用

鴫田 正雄

(株)エヌジェーエス

パルス通電加圧焼結技術の放電プラズマ焼結法は金属、セラミックス系粉体・固体など様々な材種を急速加熱、低温短時間で焼結・接合可能とする電磁エネルギー支援環境低負荷型材料プロセスとして注目されている。本稿では金属系粉末の実用例について紹介する。

1. はじめに

放電プラズマ焼結 (SPS: Spark Plasma Sintering) 技術の原型は1960年代初頭に日本のジャパックス(株)井上潔博士によって発明された「放電焼結加工」である¹⁾。1989年その進化型の第3世代方式SPSが住友炭鉱業(株)から発表され全世界へと広まった。現在SPS装置は多くの国内大学・高専・国公立研究機関・民間企業で活用されている。日本で生まれ育った独自技術で大電流パルス通電焼結法とも呼ばれ加工法として「焼結」「接合」「表面改質」「合成」の4プロセス分野に跨り、省エネ・環境低負荷型・迅速・反応性焼結・電磁エネルギー支援などを特徴とする新しい材料合成技術である。今日、世界各国の研究

者・技術者の間でSPSを用いナノ、金属ガラス、セラミックス、複合材料など多種多様な先端的新材料に関する研究開発が進められており、国内外の材料学会では特別セッションとしても度々取り上げられ多くの学術講演・研究発表が行われている^{2)~5)}。

粉末冶金法による三次元 (3D) 形状づくりは通常原料粉末を成形型にてプレス成形し常圧炉で緻密化焼結 (または焼成という) を行っている。対象材種は金属をはじめセラミックス、複合材料など多岐にわたる。主に無加圧の常圧焼結法であり、加圧焼結のホットプレス法、熱間等方加圧焼結 (HIP: Hot Isostatic Pressing) 法なども多用されている。図1に

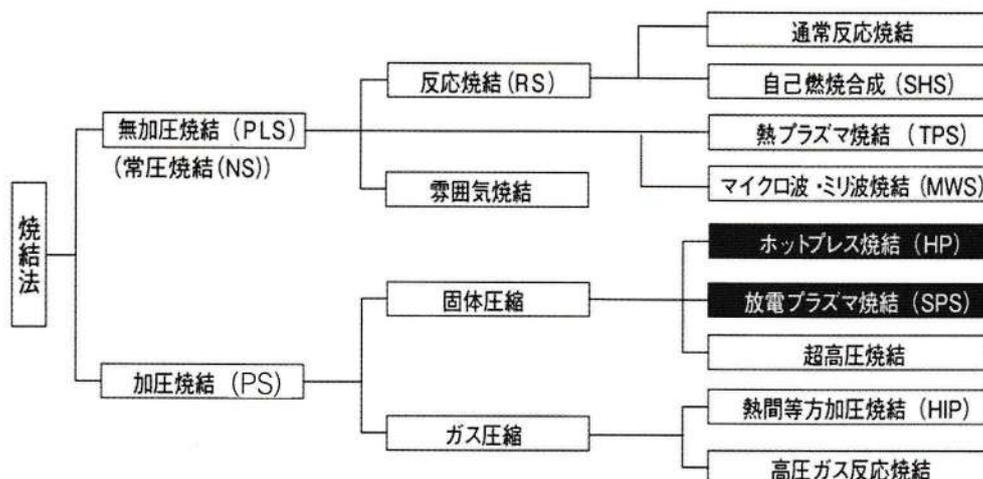


図1 代表的な各種焼結法の分類

無加圧、加圧で分類した代表的な各種焼結法を示す。

鑄造、鍛造、プレス、粉末冶金法などで製造される「素形材」は様々な部品や製品として自動車、家電、エレクトロニクス、金型・工具、バイオ、エネルギー、航空宇宙産業他など幅広く産業界で役立っている。プラスチック製品の射出成形法と類似の金属粉末射出成形法 (MIM: Metal Injection Molding) は、金属粉とバインダ樹脂とを混練した原料を成形型へ射出押し込み形状付与し、その後、脱脂・焼結工程を経て焼結金属製品を得るという複合製造技術で今日産業界での普及が進んでいる。過去 20 年間における粉末焼結技術分野で新しい焼結技術として①ミリ波・マイクロ波焼結法、②レーザー焼結法および③SPS 焼結法が挙げられる。従来型レーザー焼結法の普及度はそれほど高いとは言えないが無加圧焼結に分類される。近年注目を浴びている 3D プリンティング (Additive Manufacturing: アディティブ・マニュファクチャリング) は付加製造法、積層造形法などと呼ばれプラスチック対象の光造形法が一般的で、3D 金属プリンティングは金属粉末ベッド上の金属粉末を直接レーザー照射により選択的に固化造形するレーザー焼結法のひとつである。一方、SPS 法

は“新組成・素材を創製する”と“形をつくる”の両面機能を持っている点に大きな特徴がある。例えば、SPS 法は従来焼結法と比べ微細組織構造制御焼結や温度傾斜焼結が容易に行えるためナノフェーズ材料、傾斜機能材料 (FGMs: Functionally Graded Materials)⁶⁾⁻⁷⁾ など「新しい機能性材料」を生み出すことが可能である。また、構造材料と機能性材料の両方において革新的先進新材料を創製することができるため注目されている。2010 年頃以降より最近では SPS 技術延長上の通電焼結研究に「フラッシュ・シンタリング (FS: Flash Sintering)」という瞬時にファイナセラムックスなどの焼結が可能という超々高速焼結技術も活発化し現象解明途上ではあるが台頭してきている⁸⁾。ここ 2~3 年間における日本、米国、欧州での SPS 技術実用化に関する産業界動向から「3D 型焼結 (かたしょうけつ) 法」はモノづくりを指向する SPS の大きな将来発展方向であると言え鋭意研究開発が進められている。

本稿では金属系粉末を用いた 2D/3D ニヤネット/ネットシェープ成形の「SPS-2D/3D 型焼結法」他 SPS 焼結応用事例を中心に最近の SPS 技術動向について述べる。

2. 放電プラズマ焼結 (SPS) 法の加工原理と特徴

“SPS 焼結”の被加工原料は粉末であり、通常円筒状グラファイト (黒鉛) 製焼結型に粉末を充填し、水冷真空チャンバー中でおよそ 20~100MPa 程度の縦 1 軸加圧下で焼結加工を行う自己発熱方式「型焼結技術」を基本としている。不活性ガスのアルゴンや窒素中での雰囲気焼結も可能である。SPS 法は直接その圧粉体粒子間隙に 4~20 ボルト程度の低電圧で平均出力電流 500~40,000 アンペアのパルス状 ON-OFF 直流大電流を連続的に印加し熱的、機械的、電磁的エネルギーを焼結駆動力として利用している点に大きな特徴がある。一般的には毎分 20~200℃ 程度の昇温速度で利用されているが 500~1000℃ / 分の超急速昇温が可能であることも特徴のひとつである。この急速昇温により新材料開発 (試料片が小さい φ20mm 以下) では数分~20 分程度の昇温・保持時間で材料合成加工が行える。直径 100mm を超える大きなものでも 1 時間乃至 2 時間以内程度の昇温・保持時間の短時間サイクルで高品位な高密度焼結体が得られる。SPS 法は ON-OFF 大電流パルス通電効果による物質粒子間の表面拡散現象が支配的なプロセスであり、この反応性急速昇温焼結効果や電界拡散効果 (Electro-migration)

により緻密化速度が促進され粒成長を抑制しながらナノ材料をナノサイズのままバルク化できる卓越した利点がある。表 1 に示すように SPS 法の対象材種は金属、セラミックス、ポリマー、複合系材料と種類を問わず各種新素材の合成が行える。図 2 に“SPS 焼結”

表 1 SPS 法の対象材料の代表例

分類	対象材料の代表例	
金属系	Fe, Cu, Al, Au, Ag, Ni ほとんどの Cr, Mo, Sn, Ti, W, Be 金属が可能	
セラミックス系	酸化物	Al ₂ O ₃ , ムライト, ZrO ₂ , MgO, SiO ₂ , TiO ₂ , HfO ₂
	炭化物	SiC, B ₄ C, TaC, TiC, WC, ZrC, VC
	窒化物	Si ₃ N ₄ , TaN, TiN, AlN, ZrN, VN
	硼化物	TiB ₂ , HfB ₂ , LaB ₆ , ZrB ₂ , VB ₂
	ふっ化物	LiF, CaF ₂ , MgF ₂
サーメット系	Si ₃ N ₄ +Ni, Al ₂ O ₃ +Ni, ZrO ₂ +Ni, Al ₂ O ₃ +TiC, SUS+ZrO ₂ , Al ₂ O ₃ +SUS, SUS+WC / Co, BN+Fe, VN, WC+Co+Fe	
金属間化合物系	TiAl, MoSi ₂ , Si ₃ Zr ₅ , NiAl, NbCo, NbAl, LaBaCuO ₄ , Sm ₂ Co ₁₇	
その他	有機系材料 (ポリイミド他)、複合材料	

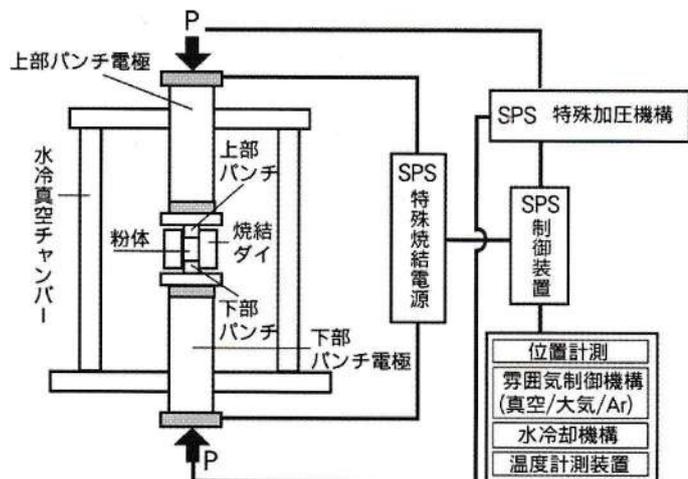


図2 放電プラズマ焼結の基本構成図

プロセスの基本構成模式図を示す。図3は最新標準仕様のシングルヘッド式生産用大型SPS焼結装置の外観写真である。最大加圧推力300トン(3MN)、最大DCパルス電流出力30,000A仕様の電源を装備している。量産用には連続炉型のトンネル式自動生産システムなどが実用されている。

図4は焼結中の水冷真空チャンバー内部と代表的各種FGMs焼結体例である。

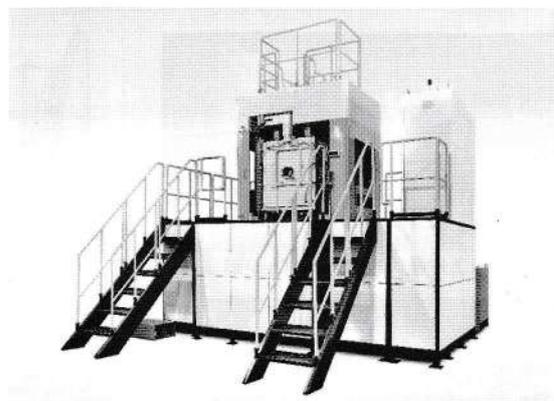


図3 生産用大型SPS装置
(最大加圧力3MN/最大パルス電流30,000A)

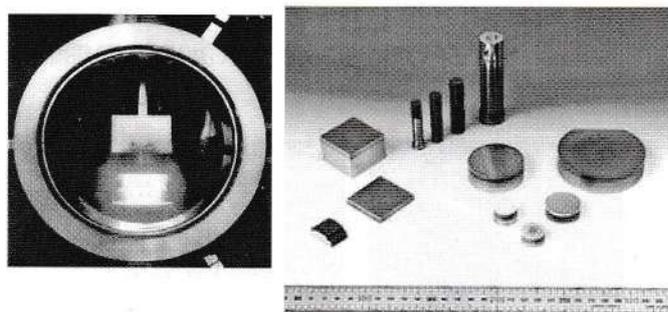


図4 焼結中の水冷真空チャンバー内部とFGMs焼結体例
(SPS焼結温度約1,000°Cに灼熱化した焼結型)

3. SPS法によるモノづくり

SPS法の素形材分野への応用は幅広く、鋳造、鍛造品に並ぶ成形技術として2通りのアプローチがある。第1には“素材からモノづくりを変える”ことで、素材に新しい機能性を付与し従来に無い材料で、従来製造法の問題点を解決し新しい高付加価値素材の「創製」あるいは従来品の「改良」を行う。第2に“粉末加工プロセスの2D/3Dニヤネット/ネットシェープ成形へ変える”ことで、新しい素形材を近似的にSPS製造し従来加工法の機械切削・研削等による後加工との組合せによるモノづくり、あるいは直接SPSのみで最終寸法形状へ製造する。後加工工程を如何に少ない取り代で、短時間、簡便かつ安価に行えるかが重要ポイントである。前者では傾斜機能材料(FGMs)が代表的な複合系先進新材料であり様々な新機能性付与が可能な「夢の新素材」と言われている。例えば、そのひとつ熱応力緩和型FGMsは、片側にセラミック100%層、反対側金属100%層で中間層に組成・組織を徐々に変化させた混合層を配し一体化させた材料である。セラミックの超耐熱性・高硬度と金属の高い強度・靱性の優れた両面

を併せ持つ新材料が創製できる。超耐熱・耐摩耗材料、硬さ傾斜のプレス金型材料など提供可能となる。図5は鋼材に通常溶接不可能な超硬材を当該超硬の組成・硬さを傾斜化させ溶接可能超硬(ウエルダブルFGMs超硬)へと変えTIG溶接で押出成形機用スクリー部品とした実用例である。従来品の焼入れスクリーと比べ3倍以上寿命を延ばすことに成功した。後者の単体材料例では、図6に示すスパッタリングターゲット材料が代表的実用例である。また、焼結特性やナノ材料、複合材料応用で後述するWC/Co系/Cu系薄刃ダイヤモンド切断ブレード工具やナノ構造バインダレス超硬が非球面ガラスレンズ金型に実用されている。「SPS固相拡散接合」技術では冷却構造付プラスチック金型や冷却構造付スプルーなど3Dプリンティング用途相当品が製造されている。将来の新産業創生に向け新エネルギーの熱電発電用半導体材料、カーボンナノチューブ(CNT)応用の超放熱ナノ複合材料、高性能レアアース磁性材料などへの利用が期待されている。

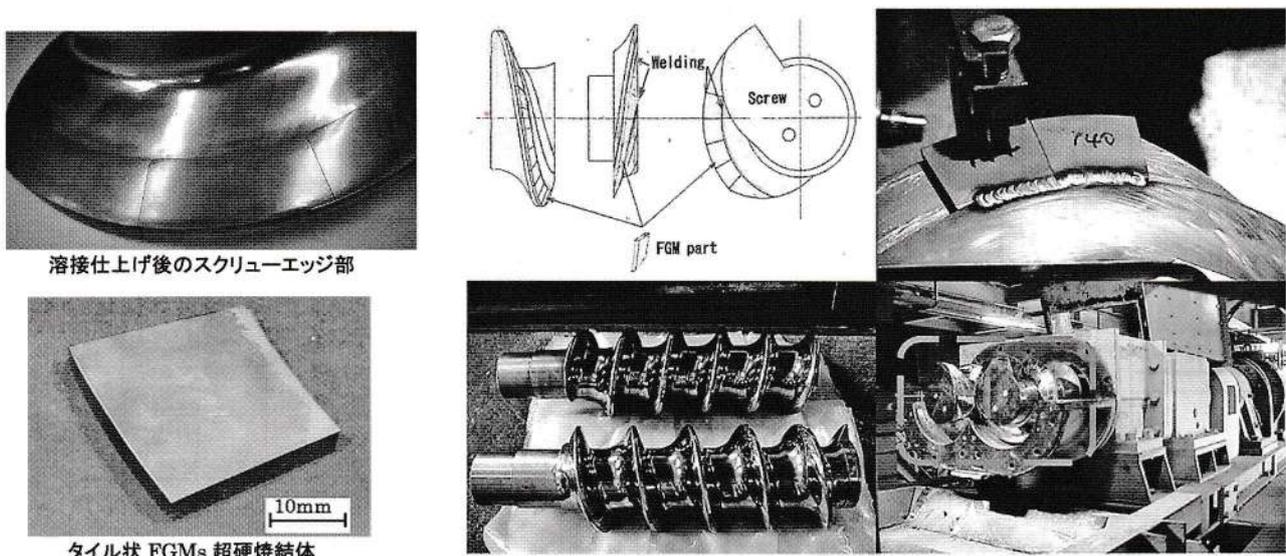


図5 SPS焼結法により作製した押出機用超硬スクリー部品（溶接可能傾斜機能材料）と押出成形機例

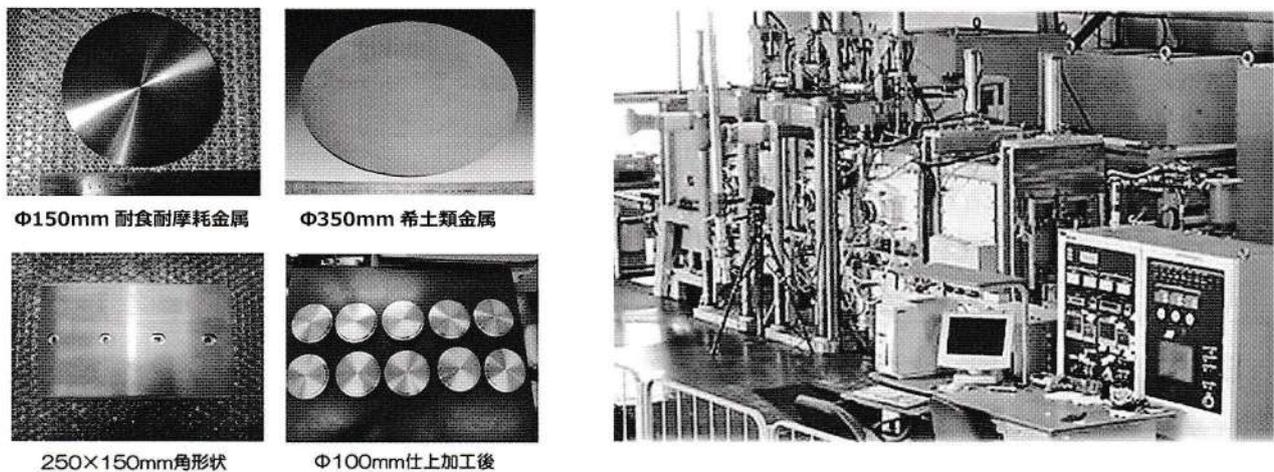


図6 各種スパッタリングターゲット材料例と自動生産用5 stage-chamber トンネル型 SPS 装置（連続炉）

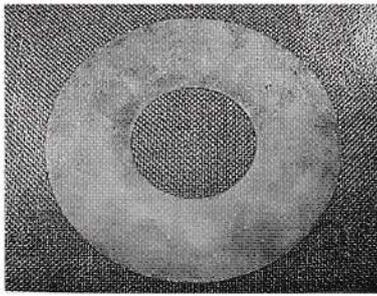
4. 2D/3D ニヤネット / ネットシェープ成形

SPS法の素形材分野への応用は多岐に亘る。SPS焼結特性に加え素材に新しい機能を付与すると従来課題の諸問題点を解決でき、新しい構造の材料・製品設計を行うことが可能となる。短納期、低コスト、独自特性（品質）で優位性の高い製品製造ができる。以下いくつかの代表的な応用事例を紹介する。

4.1 WC/Co系ダイヤモンド精密切断ブレードへの応用

図7は切断工具・耐摩耗材料業界で実用販売されている代表的なSPS量産製品例である。ある企業では2シフト/20時間、3シフト/24時間のフル稼働

状態で3台の大型SPS装置で生産を行っている。直径100~150mm、厚さ0.35/0.4mm WC/Co系薄刃の切断ブレード（ダイシングソー）を15~20枚多重積層同時焼結によりひとつの焼結型の中でバッチ処理される。メタルボンドダイヤモンド工具の台金であるが厚さ0.5mm以下の薄板焼結を平坦度±20μm以内に残留歪を低減し相対密度99~100%、ヤング率500~580GPaの健全緻密体がネットシェープで得られている。SPS焼結温度は1200~1250℃である。従来製造工程では平坦度を得る歪回避のため3~4mm厚さに余肉を付け焼結し、研削加工で所定薄板へ削った後ラッピング工程で仕上げている。SPS



外径	Φ100/150mm
内径	Φ40/60mm
厚さ	0.35/0.4mm
SPS焼結温度	1473 ~ 1523K
加圧力	40 ~ 50MPa
相対密度	99 ~ 100%
ヤング率	500 ~ 580GPa
平坦度	<±20 μm

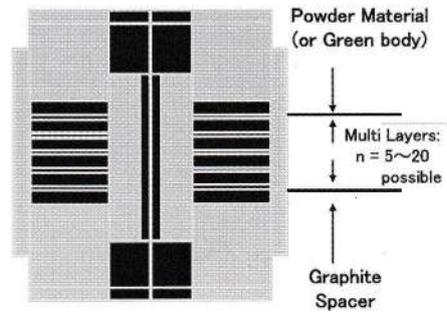


図7 WC/Co系ダイシング薄刃ブレード切断工具への応用

ネットシェープ成形ではラップ仕上げだけで最終製品となるため省資源かつ大幅な工程・コスト削減に成功した。写真は焼結した状態のままの台金の外観である。

4.2 SKDダイス鋼のアルミダイカスト金型への応用

図8は鉄系アルミダイカスト金型のコア型、キャビティ型を型彫り放電加工機 EDM などを使うことなく粉末焼結により直接三次元形状のコア・ダイキャビティを得る例である。直径160~180mmのグラファイト（黒鉛）製SPS用パンチ・ダイ（通電電極）を用いる。なだらかな曲面や抜き勾配を有する3Dダイカスト金型形状はSPS型焼結法により転写成形で形状付与し密度97~99%のダイス鋼材金型ブロック成形ができる。実際のダイカスト金型として使用可能ということが検証された。

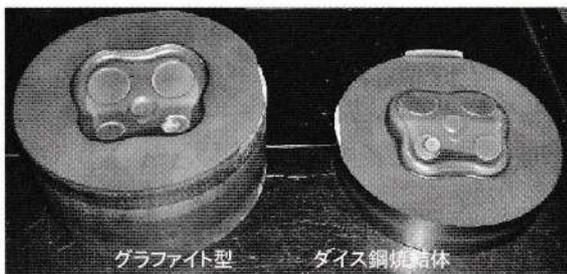


図8 SKDダイス鋼焼結体のアルミダイカスト金型への応用

4.3 Ti-6Al-4Vチタン合金のゴルフフェース部への応用

チタン系、アルミニウム系軽金属材料は高活性金属であり原料粉末表面にTiO₂、Al₂O₃の酸化被膜があるため通常焼結では難焼結材の範疇に入る。一方、パルス通電加圧効果により表面酸化膜を破壊・除去促進しながら焼結可能なSPS法ではTi、Alは好適材料になる。また、チタン合金は切削加工しにくい材料であるためSPS-3Dニヤネット成形により後加工容易となりコスト削減を図ることができる。図9のゴルフ部品例は、平均粒径45μmのTi-6Al-4Vチタン合金粉末を黒鉛製SPS焼結型に充填し加圧力40MPa、焼結温度900℃、昇温10分保持10分で相対密度98~99%に作製の3Dネットシェープ成形体である。アニール処理により引張強度1029~1938MPa、伸び22.1~22.6%、硬さHRC34~35の良品を得ている。

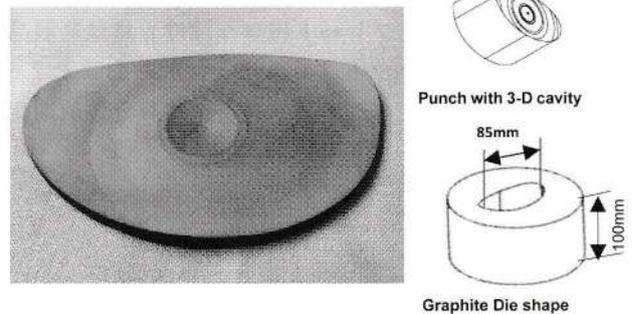


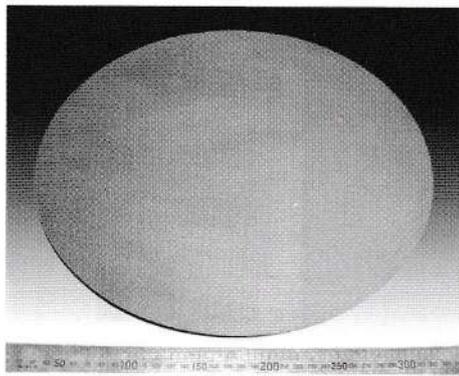
図9 チタン合金のゴルフフェース部品例

5. SPS焼結と後加工

5.1 スパッタリングターゲット材料

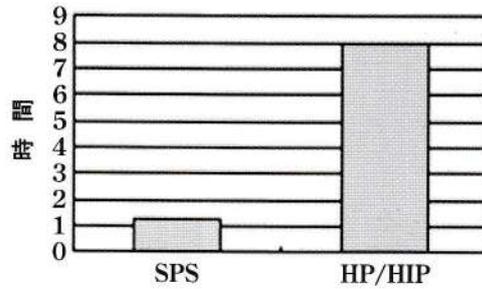
成膜技術に使用されるスパッタリングターゲット材料は、例えば液晶用ITO (Indium Tin Oxide)、

ハードディスク用Ru系、BaTiO₃誘電体、配線用アルミニウム合金、TiN系電極材料などのエレクトロニクス分野、またTiTa、TiN、TiAl合金系および



SPS Sintering temperature: 1373-1473K
Relative density: 99-100% Material: Ru

SPS 法と HP/HIP 法の製造時間比較



(その他の例) CrB₂, CrB, SiC, SiO₂, Ta₂O₅, ITO, BaTiO₃, PbTiO₃, TiN, TiAl, Ti-Al-Si, Mg₂Si, Ru, RuCo, NiCr

図 10 希土類材料系大形スパッタリングターゲット材料の SPS 焼結体例

その他材種による切削工具、耐食耐摩耗材料分野などにも幅広く利用されている。高純度と高密度な緻密体が必要とされ、従来はホットプレス法、HIP 法、常圧焼結法など各種粉末焼結プロセスにより製造されているが SPS 法での量産製造に成功している。従来法に比べ短時間に均質・緻密なターゲット材料を得ることができる。図 10 は SPS により作製された相対密度ほぼ 100% の直径 350mm 大形ターゲット材料の外観である。微細組織構造のまま高品位の緻密体を得られるためターゲット材として従来から課題とされていた焼結体の「低パーティクル化（微細組織化）」を解決した。これによりスパッタ時のスプラッシュ現象発生が少ない、ターゲット材欠陥部分が無く異常放電しないなど、使い易く安定性の高い高機能ターゲット材料が容易に作製できる。焼結体はワイヤカット放電加工機と研削盤によって外形加工後バックプレートにロウ付けされ最終製品となる。従来のホットプレス法と比較しおよそ 7~8 倍の焼結生産能力がありコストダウンと短納期化を達成した。

5. 2 SPS と鍛圧成形法によるアルミニウム合金製エンジンピストンの製造

ナノ結晶構造 Al-Si アルミニウム高シリコン合金の創製と自動車産業への応用例である。

通常アルミニウム合金焼結体は伸び率が低く鍛圧成形には不向きと言われている。SPS 法では粒成長を抑制し微細組織構造の緻密体を作製できる大きな特徴がある。微細なアルミニウム粉は高価であり、また発火し易く危険性が高くその取り扱いが容易では無い。ナノ結晶構造を内部に有する Al-Si 系急冷凝固アトマイズ粉末（原料粉末平均粒径 120~400 μ m）を用い SPS 法によりナノ焼結体を作製し結晶粒径約 600~800nm 相対密度 99~100% の高緻密体を得た。このナノ結晶構造 SPS 焼結体は高速塑性加工用プリフォーム体（予備成形体）をビレットとし油圧プレス成形で $>10^2$ S⁻¹ の“高速超塑性加工”の発現に成功した。新機能性の『水飴のように延びるアルミニウム合金材料』の創製である。図 11 に原料粉末、SPS 焼結体ビレット、自動車エンジンピストン形状プレス成形体およびこの TEM 像を示す。この新アルミニウム材料による自動車、家電用各種高機能部品への応用製造が期待されている⁹⁾。

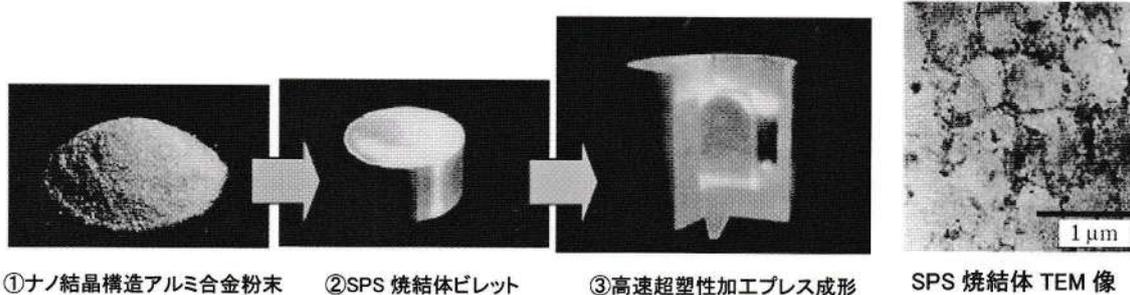


図 11 ナノ結晶構造アルミニウム合金粉末による高速超塑性加工例

5.3 ナノ WC バインダレス超硬と超精密研削加工

近年デジタルカメラや携帯電話用非球面ガラスレンズ成形金型としてバインダレス超硬が採用されている。SPS 法では従来焼結法で困難な“固相焼結”が容易にできる大きな特徴がある。“液相焼結”によって作製される WC/Co 系、WC/Ni 系等の従来超硬合金では Ra 数 nm の超鏡面の面粗さを得られない。SPS バインダレス超硬焼結体 (M78) はワイヤカット放電加工機、円筒研削盤、多軸制御超精密球面レンズ加工機などの後加工工程を経て Ra4~8nm の超鏡面仕上げが達成できる。既存バインダレス超硬と比べ高い耐酸化性、HV2600 の高硬度、耐摩耗、耐塑性変形、耐腐食性、耐熱性、耐凝着摩耗性 (剥離性)、低熱膨張率、鏡面加工に優れるなどの特徴を有し多くの光学レンズメーカー、カメラメーカーに納入されている。200nm 以下の超微粒 WC 粉末を出発

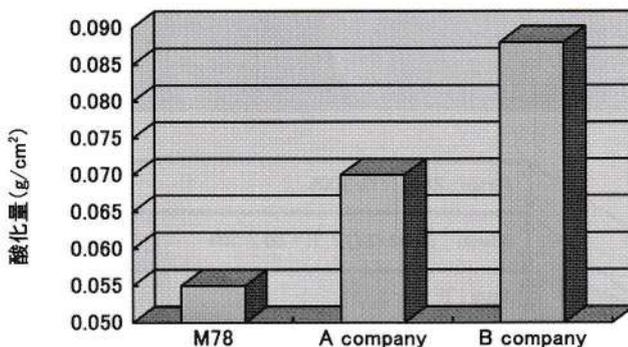


図 12 大気炉での 700°C × 10hrs 加熱後の試料片単位表面積あたりの重量変化の比較

原料とし Co, Ni バインダを含まず Cr₃C₂, VC, TiC 等の粒成長抑制添加剤も無いナノ WC の SPS 焼結体はナノ構造の微細な結晶組織がレンズ面の転写性に極めて有効となっている。SPS 法の粒成長を極限まで抑制可能な微細組織構造制御焼結と反応焼結技術が応用されている。図 12 は大気炉中 700°C、10 時間加熱後の重量変化 (酸化量) を他のバインダレス超硬と比較したもので M78 の酸化量が最も少なく長寿命金型としガラスレンズ生産に寄与している。図 13 は SPS による WC 焼結体素材、スリーブ・上下パンチの 3 点セットに研削研摩仕上げした非球面レンズ金型および成形されたガラスレンズの外観写真例である。φ50~80mm 程度の大形レンズ用金型も実用に供している。

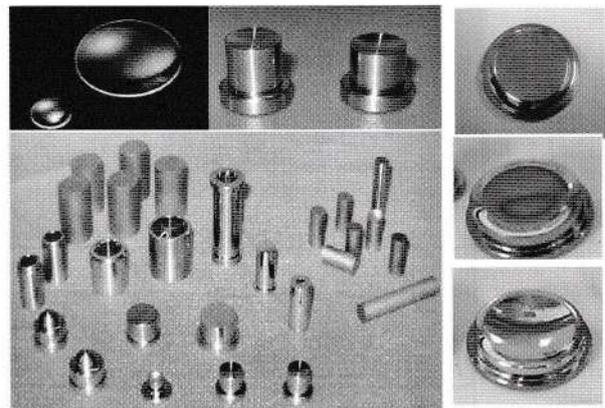


図 13 ナノ WC 非球面ガラスレンズ金型用材料と成形レンズおよび金型例

6. SPS 焼結と傾斜機能材料 (FGMs)

SPS 法は傾斜機能材料を合成する上で極めて有効な手段である。今日までに SPS 法で ZrO₂/TiAl 系、ZrO₂/Ni 系、Al₂O₃/SUS 系、Al₂O₃/Ti 系、TiB₂/Ti 系、Al₂O₃/Ti-6Al-4V、WC/Co 系、WC/SUS 系、WC/Ni 系、Cu/SUS 系、SiO₂ガラス/SUS、W 系、アパタイト/Ti 系、ポリイミド樹脂/Al 系、ポリイミド樹脂/Cu、フェノール樹脂/Cu 系他、Si₃N₄ 複合材の相変態無段階傾斜 FGMs など各種バルク状傾斜機能材料が創製されている。

6.1 WC/Co 系 FGMs 超硬の打ち抜きプレス金型

SPS 超微粒超硬合金は硬さと抗折力に優れ長寿命と短納期製造可能を特徴にしている。この WC/Co 系超硬合金のコバルト濃度を傾斜化させることで片側高硬度、基材部分は高靱性の両特性を兼ね

備えた新しい耐摩耗材料機能を発現することが可能となる。図 14 はコバルト濃度・粒度を 4 層に変えた傾斜各層 HV 硬さと表面からの距離との関係を示す傾斜プロファイル、光学顕微鏡写真・EPMA 分析および硬さ傾斜 FGMs 超硬製打ち抜きプレス金型例である。

6.2 ZrO₂/Ti/Ti-Al/Al 合金系平面上の 3D ニヤネットシェープ成形 FGMs

SPS 法による 3D ニヤネットシェープ成形技術と傾斜化技術との組み合わせにより図 15 に示す健全緻密体のセラミックス-金属系 FGMs の作製が行える。ジルコニア、チタン、アルミ合金 3 種類の粉末原料を 100% 層と混合層で傾斜化積層充填して同時焼結を行った。トップコートの ZrO₂100% 層密度は

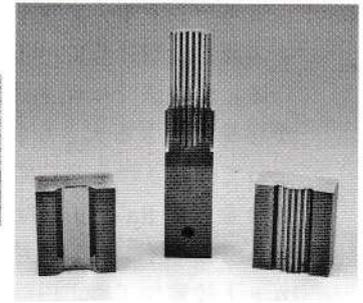
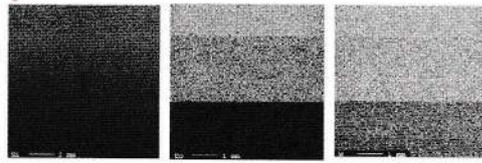
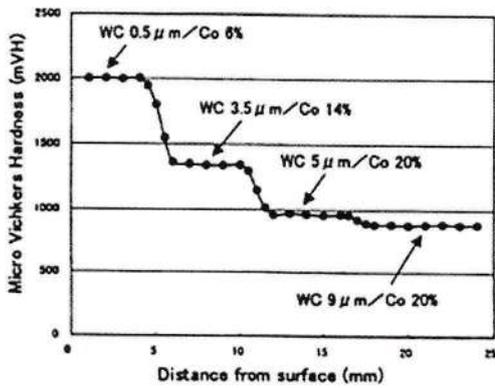


図 14 FGMs 超硬の硬さ傾斜プロファイル、光学顕微鏡写真・EPMA 分析および打ち抜きプレス金型例

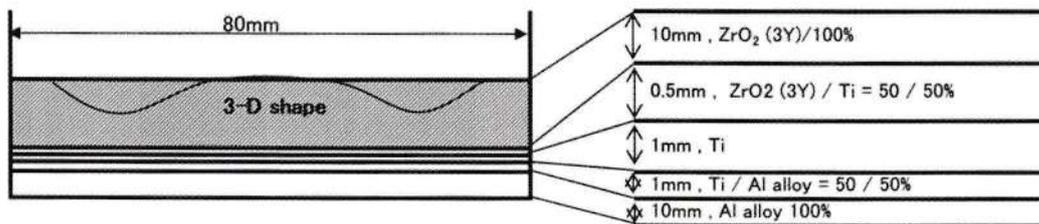
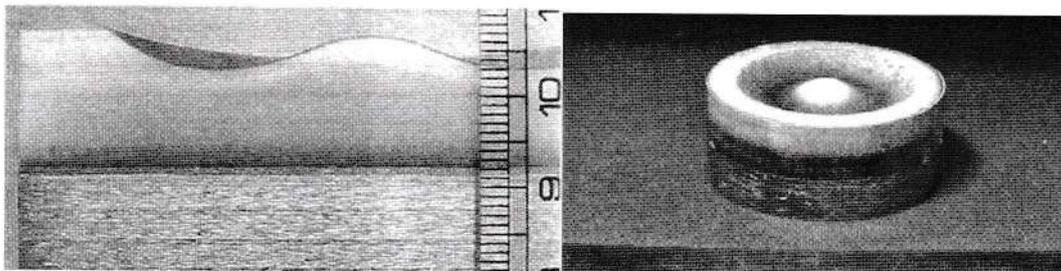


図 15 φ80 mm ZrO₂ (3Y)/Ti/Al 合金系 FGMs の例

ほぼ 100% であった。XYZ 全方位フルフェース型三次元ニヤネット成形 FGMs の開発も進みつつある。

大型ホーン工具の開発も実現でき用途拡大に成果を挙げた。

6. 3 ZrO₂/Ti 合金系 FGMs 超音波ホモジナイザー装置用ホーン先端チップ工具への応用

図 16 は SPS 法で作製したジルコニア ZrO₂ とチタン合金による超音波ホモジナイザー用ホーン先端チップ工具への製品化実施例である。従来のチタン合金製ホーンチップでは、キャビテーションによる損耗が大きく、また総セラミック製は破損し易い問題点があった。従来ホーンチップ品に比べ FGMs ホーンチップ工具は 8~10 倍の長寿命を達成し、かつチップ損耗による攪拌時のコンタミネーションを激減できたことから、特に電子産業界から高い評価を受け今後の需要拡大が期待されている。更に、FGMs ホーンの強度アップによりハイパワー高効率



図 16 超音波ホモジナイザー (左) と FGMs ホーン (右) (写真提供: 三井電気精機株式会社)

7. まとめと今後の展望

放電プラズマ焼結 (SPS) 技術の最近の動向について述べ主に金属系材料の産業界への実用化例を紹介したが SPS は更なる用途開発の途上にある。SPS 法は迅速焼結、微細組織構造制御焼結および温度傾斜焼結を特徴とし高付加価値かつ中・少量生産の各種素形材分野へ適性が高い技術である。ナノ、FGMs、ファインセラミックス、超微粒超硬材料、磁性材料、熱電変換材料、バイオ材料など各種材料、プロセス技術では 3D ニヤネット / ネットシェープ成形技術および本稿で割愛した SPS 接合法など素材とプロセス一体化のアイデアを駆使することで新しい機能性材料が既存技術問題の解決や製造工程削減・コストダウン等の実現が可能となろう¹⁰⁾。今後の発展のため、SPS システム装置は生産現場で誰もが簡単に利用できる、より高度な自動化・量産化・NC 化などハード・ソフトシステムの技術開発が重要である。

参考文献

- 1) K. Inoue: U. S. Patent No. 3241956 (1966 registered/1962 filed)
- 2) 鶴田正雄: 粉体工学会誌, Vol. 30 [11] (1993) 790-804
- 3) 鶴田正雄: 高温学会誌, Vol. 31, No. 4, (2005) 215-224
- 4) M. Tokita: Advanced Ceramics Handbook 2nd Edition, Academic Press Elsevier Inc., (2013) 1149-1177
- 5) S. Grasso, Y. Sakka, G. Maizza: Science and Technology of Advanced Materials, 10 (2009) 053001
- 6) M. Tokita: CIMTEC2009, Advances in Science and Technology, Vol. 63, (2010) 322-331
- 7) 鶴田正雄: コロナ社, 「図解・傾斜機能材料の基礎と応用」上村誠一・渡辺義見編著, (2014) 36-75
- 8) 吉田英弘, 山本剛久: セラミックス (日本セラミックス学会誌) Vol. 53 [9], (2018) 591-594
- 9) 黒石農士: 塑性と加工 (日本塑性加工学会誌) Vol. 42, No.484, (2001) 31-35
- 10) M. Tokita: Powder Metallurgy Review, Inovar Communications Ltd., Vol. 8, No. 2 Summer, (2019) 89-102