



入門講座

素材を形に～素材の加工方法－6

粉末成形（粉末冶金）
Powder Forming “Powder Metallurgy”

三浦秀士 九州大学鉄鋼リサーチセンター
Hideshi Miura 特任教授

はじめに

粉末冶金（Powder Metallurgy：以下P/Mと略記する）の定義はJISZ2500にも規定されているように、「金属粉の製造および金属粉の圧縮と焼結による金属製品の製造についての技術。広義には同様の技術による酸化物磁性体、サーメットなどの製造技術を含む」とある。すなわち、金属粉あるいは合金粉の製造に始まり、これらの粉末を型に入れて加圧成形（射出成形のように加圧しない場合もある）したのち、融点以下の温度（混合粉の場合、一部の粉末が融解することもある）で焼き固め（焼結）、直接最終製品形状（Near NetあるいはNet shaping）の金属製品とする技術のことである。加圧と加熱を同時に行う緻密化技術も発達しており、金属粉末のみならず、金属間化合物、フェライト、セラミックス、サーメットなどの粉末も対象として、粉末冶金の範疇に入っている。このことから、種々の金属加工技術の中でP/Mは、最も対象範囲の広い製造方法であると言える。

P/Mの最大の魅力は、高品質で複雑な部品を、寸法精度良く経済的に製造可能なことである。つまり粉末冶金は、大きさ、形状および充填状態などの特定の性質を有する金属粉末から出発し、これを強固で寸法精度が良く高性能を有する形状のものに変える技術である。主要な工程は、粉末の形状付与あるいは成形、およびそれに続く焼結による粒子の熱的結合である。このプロセスは、エネルギー消費量が相対的に少なく、材料歩留まりも良く、設備投資の少ない自動生産システムを有効に利用することができる。P/Mのこれらの特徴は、生産性、エネルギーおよび材料歩留まりの向上に関する最近の要求を非常に良く満たしている。その結果、本分野は従来の金属加工技術の代替技術として成長を遂げつつある。さらに粉末冶金は、広範囲に新しい材料、組織および特性を生み出す可能性を持った自由度の大きい生産プロセスであり、例えば耐摩耗複合材料に代表されるようなP/M特

有の適用例が生み出されている。P/Mが利用できる分野は非常に広い。その多様性を示す例として、タングステン電球のフィラメント、歯科用修復材、無潤滑軸受、自動車用変速器のギア、装甲板貫通砲弾、電気接点、原子力発電用燃料素子、整形外科用生体材料、事務機器部品、高温用フィルター、航空機用ブレーキパッド、充電可能電池、およびジェットエンジン部品の製造における金属粉末の利用が挙げられる。さらに金属粉末は、塗料用顔料、プリント配線基板、濃縮粉末食品、爆薬、溶接用電極、ロケット燃料、印刷用インク、ろう付け用コンパウンドおよび触媒などの多様な製品に利用されている。表1¹⁾は、金属粉末が一般的に利用されている例を産

表1 金属粉末の適用例

適用例	用 途
研摩材	金属研摩用砥石、研削砥粒
医療歯科	インプラント、アマルガム、鉗子
航空宇宙	ジェットエンジン、熱遮蔽、ロケットノズル
自動車	バルブインサート、プッシング、ギア、コネクティングロッド
化学製品	着色剤、フィルター、触媒
被覆	塗料、硬質肉盛、溶射障壁
建設	アスファルト屋根、水漏れ防止
電気関係	接点、ワイヤークランプ、ろう材、コネクタ
電子関係	ヒートシンク、インク、集積回路
金属製品	錠前、レンチ、切削工具
事務機器	複写機、カム、ギア、静電印刷用トナー
工業	工具、型、軸受、吸音材料
接合	ハンダ、電極、溶接棒、ダイヤモンドの結合
磁気	リレー、磁石、磁心
原子力	遮蔽、フィルター、反射材
兵器	起爆装置、弾薬、弾頭（ペネトレーター）
生活用品	ビタミン、化粧品、石鹸、ボールペン
石油化学	触媒、掘削ビット
印刷	インク、コーティング、積層板

業別に集めたものである。この多様性は発展の一助となる一方、P/Mの研究を技術的に困難なものにもしている。

初期のP/Mにおいては、材料基盤を広げ、新しい低コストの技術によりFeやCuのような一般的な元素を作ることによって成長してきたが、1940年代以降は、耐熱金属（Nb, W, Mo, Zr, TiおよびRe）およびその合金といった特殊な材料も、粉末より作られるようになった。さらに、粉末より作られる構造用部材は自動車産業とともに大きな成長を遂げており、その大部分は鉄系であるが、原子力、航空、電気および磁性材料用に開発されたいくつかの特殊な組成のものも、また粉末冶金によって作られている。当初の粉末冶金製品は低コストであるというだけの理由で選ばれたが、最近になってP/M的手法を選ぶ基準は、コストおよび生産性の魅力とともに、品質の向上、均一性あるいは特性を考慮するようになってきた。高温で使用されるNi基超合金、高い比強度を有する航空機用Ti合金、および熱膨張係数を制御したAl基複合材料は後者の良い例である。これらの材料は、P/Mにより材料の節約ができるばかりでなく、組成や微細組織の制御という利点も得られるために、新しく改良された組成を有する材料が次々に開発されつつある。

以上はどちらかと言えば、P/Mの材料開発史的なものを述べており、技術史的には従来からの粉末を金型に充填しプレスにより常温で加圧成形後、焼結するという手法から加圧と加熱を同時に行うホットプレスの登場以来、今日まで様々な成形・焼結方法が研究開発されている。とくに1950年以降の技術開発は著しいものがあり、50年代に米国での熱間等方圧成形法（HIP）の登場に始まり、60年代ではやはり米国で粉末鍛造法が現れ、70年代に至ってはメカニカルアロイング法（米国）や噴霧成形法（英国）が開発された。さらに80年

代ではバインダを用いた金属粉末射出成形法（米国）や急冷凝固粉末真密度固化成形法（米国）、そして90年代ではパルス通電加圧焼結法（日本）や粉末積層3D造形法（米国）など、挙げたら枚挙にいとまがないほど斬新で効果的な成形・焼結法が生まれている。ここでは、幾つかの新しい粉末成形法について紹介する。

2 新しいプレス成形技術

P/M産業界で最も用いられている成形法としては、従来からの金型によるプレス成形（図1参照）があり、高度に発達した各種機械や機器の部品性能の要求に応えるべく、より一層複雑な形状で高密度、かつ高性能な特性を兼ね備えた部品の製造のための金型プレス成形関連技術が多数開発されている。例えば、圧縮性に富む粉末製造技術の開発²⁾から成形用金型・プレス機周辺技術の改善³⁾、焼結鍛造⁴⁾や熱間静水圧成形（HIP）⁵⁾の利用、接合技術の改良⁶⁾に至るまで広範囲に及んでおり、枚挙にいとまがないほどである。ここでは成形技術そのものに着目し、近年急速に発達しつつある2つの新しい工業的にも有用なプレス成形技術を紹介する。

2.1 CNC粉末成形

プレスによる粉末圧縮成形工程において最も重要な点は、成形体の密度ができるだけ高くして均一なことと、抜出時に割れなどの欠陥が生じないことである。単純形状のものを成形する場合には普通のプレス機と金型を用いて何ら問題はなかったが、製品の形状が複雑多様化（含大型化）するに伴い、プレス機的大型化、金型セットの多段化、コンピュータ導入による数値制御化へと展開しており、なかでも駆動源にサー



図1 金型プレス成形（P/M）による製品例の一例
（提供、日立粉末冶金（株）（現 日立化成（株））

ボ機構を導入してすべての粉末成形動作をCNC (Computer Numerical Control) 制御するCNC粉末成形プレス⁷⁾の開発がある。CNC粉末成形によれば、まずサーボ技術の適用による高精度の送り・位置決めが可能となり、金型動作・成形速度・加圧力なども厳密に制御できることから、健全かつ高精度の製品が再現性良く得られるとともに、多層/多重成形や多段成形などの複雑な成形動作も管理・制御でき、工程時間の短縮化や稼働率の向上にも大きく貢献することが期待されている⁸⁾。

2.2 温間成形

焼結体の機械的特性は一般に密度の上昇とともに向上し、とりわけ高密度域 (真密度の90%以上) での向上には著しいものがある。このため、通常のプレス成形による成形体の密度を少しでも上げようと再加圧再焼結や焼結後に鍛造あるいは銅溶浸などを施すという様々な手法⁹⁾が採用されているが、経済的にコスト高になっているのが現状である。そこで、高強度焼結部品を従来法に比べて経済的に製造できる技術として開発されたのが、温間成形¹⁰⁾ (Warm Compaction) プロセスである。本プロセスの特徴は、単に粉末および成形用金型を加熱して従来通りの成形を行うことにある。粉末は加熱されるために従来のステアリン酸系の潤滑剤は使用できず、加熱温度での潤滑特性を損なうことなく、しかも添加量が少なく済む新しいタイプの有機系潤滑剤が開発されている。粉末の流動度や抜出応力を考慮すると、粉末の加熱温度は130℃、金型温度は150℃が望ましいとされている¹¹⁾。いずれにしても、温間成形によれば従来の成形法に比べ0.15~0.30Mg/m³の密度上昇が得られ、この値は再加圧再焼結によるものとほぼ同程度である。潤滑剤の液化に伴う粉末粒子の再配列充填や温度上昇に伴う塑性変形のし易さが寄与しているものと思われる。なお圧粉強度が約100%増加することから、複雑形状部品の成形歩留まりの向上や直接機械加工ができることも利点とされている。

3 バインダを利用した新しい成形技術

焼結により十分に緻密化する粉末は、有機系バインダを用いることで低い圧力で成形することができる。バインダは形状付与と焼結に至るまでの形状保持という重要な役割を果たすが、最終的には除去される。ここでは、この30年間で急速に発達した金属粉末射出成形¹²⁾ (MIM: Metal Injection Molding) プロセス技術を紹介する。

3.1 金属粉末射出成形

P/Mにおいては高い形状の自由度と高密度化を比較的容

易に両立させようような成形技術が望まれているわけであるが、その1つとして開発された技術がMIMプロセスである。本プロセスは図2¹⁾に示すように、まず金属粉末と有機系バインダを加熱混練し、プラスチックの場合と同様な成形を行ったのち、本プロセス特有の脱バインダ工程を経て焼結を施すのが基本工程である。とくに原料粉末として平均粒径が10μm前後の、従来のP/M用に比べ1桁細かい球状に近い粉末を用いることから、焼結の促進に伴う高密度材 (真密度に近い) が得られ、機械的性質のみならず各種機能性も著しく向上するのが特徴である。この他、旧来のP/M法 (プレス成形) では成形が難しい硬質金属材料、あるいはこれまでの成形技術では困難であった低熱膨張合金やTi合金、軟質磁性材料などの難加工機能材料にも適用できるため、用途に応じた材料の選択自由度が大きいことも特徴である。MIMの用途はとくに限定されておらず、1kg以上の大物品もあるが、一般には100g以下の複雑形状の小物品が主な対象で、時計などの精密機器部品、医療機器部品、電子・磁気部品、OA関連ならびに自動車・航空機用部品などの多岐にわたる分野で使用されている。図3に製品の一例を示す。

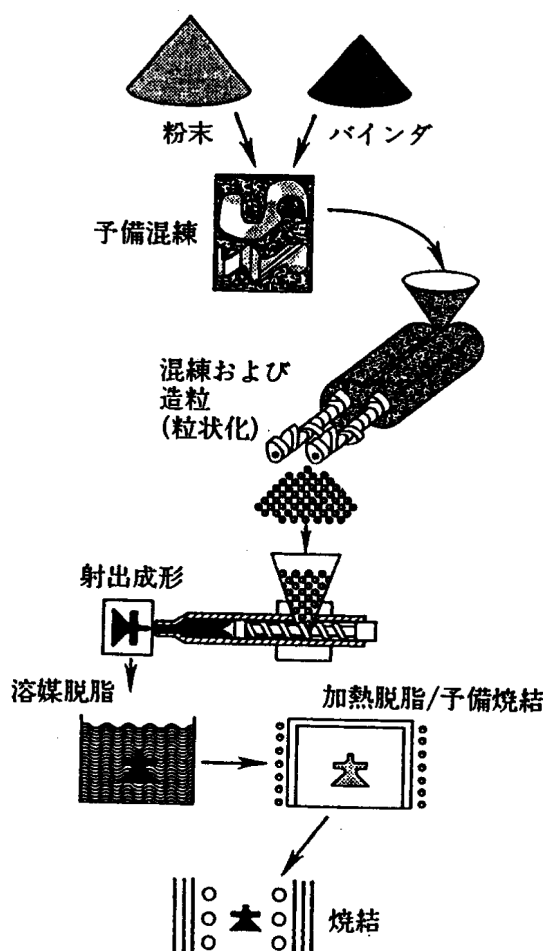


図2 金属粉末射出形成の工程概略図

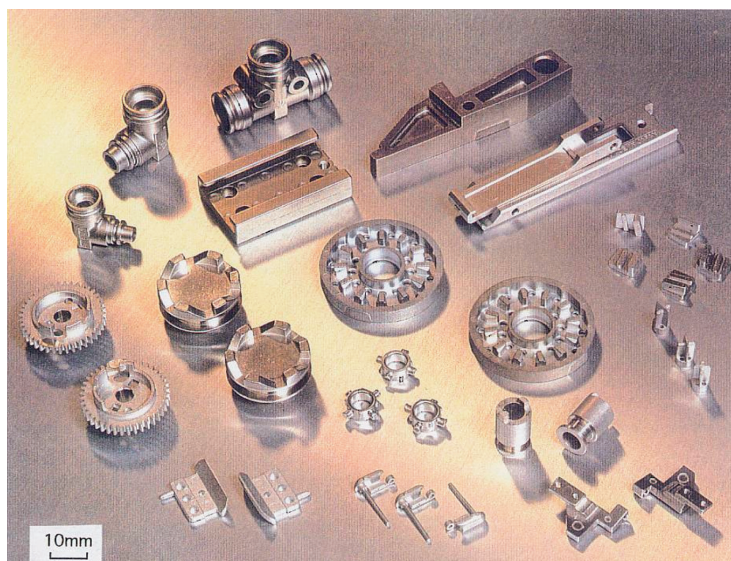


図3 金属粉末射出成形（MIM）による製品の一例
（提供、（株）インジェックス（現 エプソンアトミックス（株））

バインダには成形性、離型性、保形性、脱バインダ性などの各種特性が要求されるが、すべての要求を十分に満たすようなバインダは開発されておらず、下記の各種脱バインダ法に合った多種多様なバインダ系が開発されている。今のところ、取扱いや処理が容易なワックス系（熱可塑性樹脂と混合）のものが最も多用されている。脱バインダ法としては、加熱、溶媒、触媒、超臨界ガス、紫外線などを用いた多種多様のプロセスが開発されているが、工業的には熱分解や溶媒抽出が主に採用されている。ただ前者では、脱バインダに長時間を要したり、製品形状の変形が生じ易いなどの問題が依然として残されている。また後者では、それらの欠点がかなり克服されるものの、溶媒には人体に害を及ぼすものや環境汚染につながるものが多いことから、その取り扱いが問題である。このため、エタノールや水溶性の新しいバインダ系の開発も行われている。いずれにしても、脱バインダに長時間を要することは生産的には不利であり、このことがMIM製品の許容肉厚を大きく制限している。ちなみに、10数年前までは約10mm位の肉厚までが経済的見地からすれば限界とされていたが、最近では脱バインダ技術も進歩して25mm程度の肉厚までは可能となっている。焼結は従来のP/M法と同様である。ところで、焼結部品の寸法精度は機械構造用部品の場合、最も厳しく要求される場所であるが、MIM製品の精度としては現在のところ $\pm 0.3 \sim \pm 0.1\%$ まで向上している。これは精密鋳造品やダイキャスト製品の精度に比べると優れているが、全般的にはP/M製品の精度（ $\pm 0.1\%$ ）レベルまでには達していない。二、三の例としては $\pm 0.05\%$ という数字も挙げられており、このレベルまで精度を向上させることができれば、精密切削加工品と拮抗しよう。

なお、MIMプロセスの実用化はまだまだ新しいことから、バインダの適正化や仕上がり製品の寸法精度、大型化など技術的に解決しなければならない問題点も数多く残されているが、その将来性は大いに期待されている。

4 プラズマやレーザ・電子ビームを利用した新しい焼結・造形技術

焼結とは、粉末から特異な性質を引き出すために高温にて粒子同士を接合することであり、成分系によって固相焼結か液相焼結、あるいは遷移的液相焼結や活性化焼結、反応焼結、自己燃焼合成焼結、超固相線-遷移的液相焼結などがある¹³⁾。焼結は一般には雰囲気調節したバッチ式あるいは連続式の電気炉内で行われるが、ここでは最近開発されたプラズマやレーザ・電子ビームを利用した新しい焼結・造形技術について簡単に触れておく。

4.1 プラズマ焼結

プラズマを利用した焼結法を総称して“プラズマ焼結”と呼ぶが、プラズマ焼結には大別すると熱プラズマ焼結¹⁴⁾と放電プラズマ焼結¹⁵⁾（SPS法：Spark Plasma Sintering）の2つがある。前者は真空容器中およそ5000～20000℃の連続・定常的な超高温プラズマ熱を利用して無加圧焼結を行うもので、特殊用途に限られるのに対し、後者は瞬間・断続的な火花放電エネルギーを利用して加圧下で焼結を行うもので、新しく開発された比較的操作が容易な焼結法である。SPS法（図4¹⁵⁾）においては、粉末粒子間隙に直接パルス状の電気エネルギーを投入することで、火花放電により瞬時に発生する

高温プラズマを利用して、放電衝撃圧力とともにスパッタ作用で粉末表面の吸着ガスの除去や酸化皮膜を破壊することで、容易に焼結を促進させるといわれているが、プラズマが発生しているかどうかは今後の検討課題とされている。また良好な焼結を行うためには、パルス電流の流れを適切に制御する必要があり、抵抗体である型・パンチも当然加熱され被焼結材料を保温する役割を果たすが、この保温方法と時間が良好な焼結体を得るための重要因子とされている。いずれにしても、SPS法は従来のホットプレスや抵抗焼結などの通常の通電焼結法と上記の点で異なることから、従来法と比べ低温・短時間での焼結体を得られることを特徴としており、粒成長の制御や難焼結性の粉末の焼結に適しているようである。現在、金属とセラミックスなどの異種材料の接合や傾斜機能材料、あるいはサーメットなどの複合材料の開発に応用研究されており¹⁶⁾、新しい材料の創製のための有力手段の1つとして、将来発展への期待が高まりつつある。

4.2 粉末積層造形 (3Dプリンティング)

様々な部品や製品の開発設計にCADは常套手段として用いられるようになってきたが、なかでも部品形状が3次元CADデータとして貯えられるようになって、これを実体として取り出すための新しい付加工法：AM (Additive Manufacturing) が開発されてきた。その代表は光造形法 (Stereolithography) とも呼ばれるもので、光硬化性の液状樹脂を用いてレーザー光の走査により薄層を形成し、随時積層することで造形していくものである。これを金属やセラミックスの粉末にも応用展開されているのがレーザーや電子ビームを用いた粉末床溶融積層法：PBE (Powder Bed Fusion) (以後、前者をレーザーフォーミングと略記する) や指向性エネルギー堆積法：DED (Directed Energy Deposition) 法と称される、プラズマやレーザーを用い金属粉末等を液化してノズルか

ら溶滴として噴出させて積層造形する方法がある。特に最近では、材料開発や造形手法の改良が進み、AMが単に形状設計チェック用の金型作りのためだけでなく、機能性に富んだ製品をある程度精度良く造形できるようになってきたため、その適用範囲も広がりつつある。ここではレーザーフォーミングに関する事項を主に取り扱うこととする。

粉末を用いたレーザーフォーミングについては、粉末供給の形態から様々な方法が研究されている¹⁷⁾。まず、初期のものでは、バインダ成分を混合あるいはコーティングした粉末を用いて、バインダのみをレーザー熱で溶融接合させるもので、本焼結を必要とするものと必要としないものがある。前者の場合には脱脂が必要であり、両者とも含浸が併用されることが多い。樹脂バインダの量が多いほうが成形速度は大きくなるため、グリーン体成形では著しく時間が短縮されるが、樹脂バインダを使用しない場合には成形時間が長くなる傾向がある。前者の場合には樹脂 (熱硬化性フェノールとパラフィンワックス) の配合とコーティング方式、そして基材特性を換えることによって、脱脂・焼結+溶浸から脱脂・焼結・溶浸の1工程への工程短縮が図られている。溶浸の代わりにHIP処理したり、あるいはニッケルリン青銅系の液相焼結後に含浸や溶浸を施し、レーザーの出力制御によって完全溶融して強度と寸法精度を向上させる改良も行われている。Fe-Ni系混合粉末を用いた例では残留気孔をショットピーニングによって封孔処理して寸法精度を高める開発もなされているが、いずれも多工程であり、強度的にも不十分である。そこで、金属粉末のみに直接レーザーを照射して溶融・接合させ、製品を作り上げていく方法が最近では盛んに開発・研究されている。その原理を図5¹⁸⁾に示す。まず造形テーブル (シリンドラ) 上に一層だけ粉末を敷きつめ、これにCADデータに基づいてレーザーが照射され、粉末同士が溶融固化する。ついで、粉末供給シリンドラから次の層を造形テーブル上にローラにより敷きつめ、レーザー照射・溶融固化させる。この積層操作を繰り返していくことで、所望の3次元形状物を得ることがで

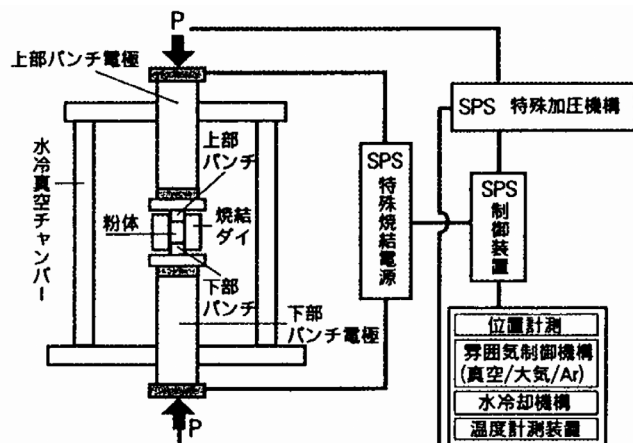


図4 放電プラズマ焼結装置の概略図

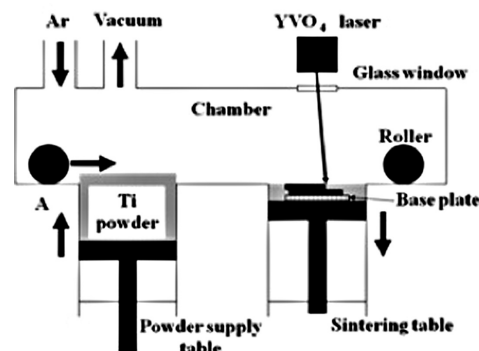


図5 レーザ焼結装置の一例

きる。この場合、寸法精度や面粗度の点で工業的に満足できるレベルまでには至っていないことから、付加加工として精密切削技術を組み合わせた金属光造形複合加工技術も開発されており、これにより短納期・低コストの金型製作が行われている。著者らも生体材料や航空機用部材としてのTi合金に着目し、Ti合金粉末を用いた脱気・Arガス雰囲気下でのレーザフォーミングについて、複雑構造物のネットシェイプ加工技術としての基礎研究¹⁸⁻²³⁾を進めている。

5 おわりに

冒頭でも述べたように、P/Mは多くの成分からなる製品をネットシェイプで作るための高い生産性を有した技術であるとともに、機能性や物性に富んだ新規の粉末を実用的で特徴のある工業用製品に転換できる技術でもある。ただ、この粉末加工をうまく行うためには、粉末の形状や粒度、組成、組織などの特性とともに固化技術、および合金組成など、数多くの要因の影響を十分に理解しておく必要がある。ここでは、紙数の都合でP/M技術の一部を述べたにすぎないが、粉末の製造やその特性評価、あるいはコンピュータを利用した成形や焼結に関する理論展開やシミュレーションについてもかなりの進歩が見られることから、これらをうまく利用することでP/Mは今後さらに大きく展開していくものと期待される。

参考文献

- 1) R.M.German (著), 三浦秀士, 高木研一 (訳): 粉末冶金の科学, 内田老鶴圃, 東京, (1996)
- 2) W.B.James: Int. J. of the Powder Metallurgy, 30 (1994), 157.
- 3) 森岡恭昭: 粉体および粉末冶金, 40 (1993), 755.
- 4) 木村尚: 塑性と加工, 34 (1993), 232.
- 5) 河合伸奏: 粉体および粉末冶金, 41 (1994), 209.
- 6) 浅香一夫: 粉体および粉末冶金, 42 (1995), 884.
- 7) R.Nies and R.Link: Proceedings of Europe PM'94, European Powder Metallurgy Association, 2 (1994), 1141.
- 8) 鶴英明, 中川威雄: 素形材, 36 (1995) 11, 15.
- 9) 宗倉雅章: 粉体および粉末冶金, 42 (1995), 982.
- 10) J.Capusm: Metal Powder Report, 49 (1994) 7/8, 22.
- 11) 上田勝彦, 大場毅: 粉体粉末冶金協会平成8年度秋季大会講演概要集, (1996), 128.
- 12) R.M.German: Powder Injection molding, MPIF, Princeton, NJ, (1990)
- 13) R.M.German: Sintering Theory and Practice, Wiley-Interscience Pub., New York, NY, (1996)
- 14) 木島弼倫: 工業材料, 34 (1986) 8, 17.
- 15) 鷺見新一: 月刊ニューセラミックス, 7 (1994), 14.
- 16) 大森守: 月刊ニューセラミックス, 7 (1994), 4.
- 17) 今村正人, 粉体および粉末冶金, 48 (2001), 415.
- 18) 三浦秀士, 前田浩幸, 竹増光家, 上村誠, 大津雅亮: 粉体および粉末冶金, 53 (2006), 740.
- 19) 三浦秀士, 永田優, 石橋秀基, 上村誠, 大津雅亮: 粉体および粉末冶金, 54 (2007), 707.
- 20) 三浦秀士, 長田稔子, 石橋秀基, 大河内健太, 上村誠: 粉体および粉末冶金, 55 (2008), 738.
- 21) H.Miura, K.Okawachi, H.G.Kong, H.Uemura, M.Fujita and N.Arimoto: Proceedings of the MPIF/APMI International Conference on Powder Metallurgy & Particulate Materials (CD-ROM), (2009), 708.
- 22) H.Miura, K.Okawachi, H.G.Kong, F.Tsumori, K.Kurata and N.Arimoto: Materials Science Forum, 654-656, (2010), 2057.
- 23) H.G.Kong, K.Yamada, T.Osada, F.Tsumori and H.Miura: Proceedings of the 2012 Powder Metallurgy World Congress & Exhibition (CD-ROM), (2012)

(2017年11月6日受付)