

粉末のネットシェイプ成形における最近の技術動向

Recent Technological Trends of Net Shape Powder Compaction

中 川 威 雄*
Takeo NAKAGAWA

焼結機械部品の製造において、原料粉の準備と焼結条件の選択は主要なものであるが、実際の生産現場では粉末の成形工程も極めて重要であり、焼結品の品質と形状的制約を決めている。最近、金属ばかりでなくセラミックスにも広く応用されるようになって、各種の粉末成形法が次々と開発されている。特に、プレス成形機のカNC化とCADデータから直接立体形状を創成する積層造形法は注目を集めている。本稿では、これらの最新技術を含めた粉末成形法を概説する。

1. は じ め に

粉末冶金の歴史はかなり古いものであるが、近代産業に取り入れられたのは、鑄造、鍛造、板金プレス加工といった他の金属素形材加工に比べると新しい。粉末冶金によるタングステン線が登場したのは20世紀初頭であり、多くの機械部品が製造されるようになったのはこの半世紀であり、さらにファインセラミックスの機械部品は極く最近のことである。歴史が新しいことは、技術進歩も著しいことを意味し、材料や加工法の技術革新の動きも急である。特に材質的な多様性に富むこともあって、多くの新素材や高機能材が粉末を原料として製造されている。

粉末冶金による機械部品の製造においては、使用する原料粉末や焼結プロセスもさることながら、粉末の成形が極めて重要となる。機械部品としての必要な品質、形状、精度を得るには、その成形法が決定的な影響力を持つからである。焼結機械部品の製造技術において、この粉末成形法の最近の技術進歩はかなり顕著なものである。粉末成形法としては図1に示すように数多くの方法がある。この中には素形材製造法ばかりでなく素形製造法も含まれている。

これらの粉末冶金の特徴として複雑形状の高精度成形品を高効率に安価に製作できるという経済的メリットがあげられる。製造業においては高品質をより安価に製造するという永遠の課題をかかえているが、粉末冶金はまさにその課題に解決を与える成形技術と見なされている。しかし、より複雑な機械部品をより高精度にというnet shape化への更なる期待は高まるばかりであり、それに応じて幾つかの技術開発が進められてきている。本報告ではこの中で素

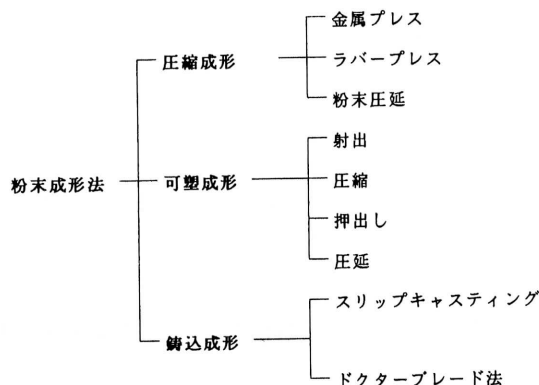


図1 粉末成形法

形材製造のための粉末成形法に焦点をあて、net shape化に関連する最近の技術開発の動向をまとめた。

2. 鉄系材の粉末鍛造

焼結機械部品で大量に使用されているのは鉄系材料である。通常の金型成形と焼結による粉末冶金法では、内部に空隙が存在するため溶製材に比較して靱性が劣る。この空隙をなくし、真密度化して高靱性を得る方法に粉末鍛造法がある。粉末鍛造法というのは、図2のように金型により圧縮成形したプリフォームを、焼結工程を経て熱間で型鍛造を行う方法である。すでにプリフォームは最終形状に近い状態に成形されているので、鍛造作業としては熱間サイジングを加えて真密度化したものと言える。したがって粉末鍛造品は焼結品より寸法精度は劣るものの、金型の磨耗も少なく一般の精密鍛造品に比べてはるかに高い寸法精度が得られ、net shapeにより近い成形法である。

*東京大学生産技術研究所 第2部

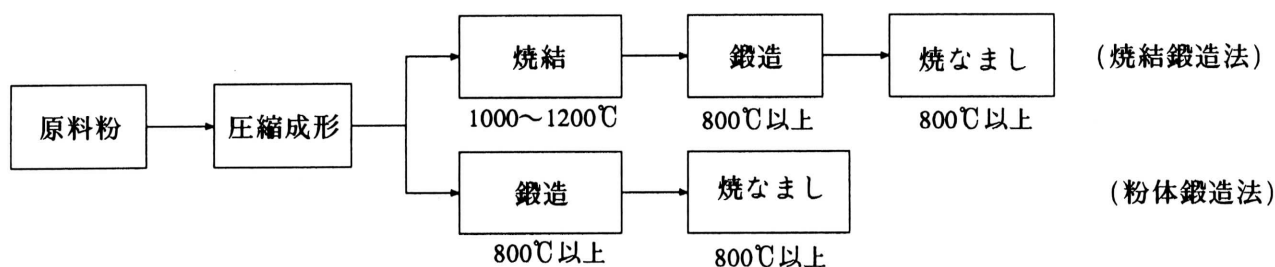


図2 粉末鍛造工程 (鉄系機械部品)

粉末鍛造は1970年代より極めて将来性のある自動車用素形材製造法として注目され、世界各所で検討されたが、これを活用している工場は必ずしも多くはない。我が国では粉末冶金専業メーカーで先行したが、その生産量はまだまだ限られている。粉末鍛造対象部品として自動車エンジン用コネクティングロッドがあり、最初ヨーロッパのスポーツカーに採用され、その後日本のトヨタ自動車でも生産している。最近では米国フォード社をはじめとする欧米各メーカーで大規模に採用されるようになってきている。コンロッド以外にも、ミッションのギヤなどにも用途が拡大している。

粉末鍛造法においては初期の段階で問題となった生産技術的な問題はほぼ解決された。コンロッドについて言えば軸受部を一体で製造し、その後破壊分割して組み付ける簡便な方法が開発されコスト的にも従来法に比べて有利となったと言われている。

3. 急冷アルミニウム合金粉末の真密度焼結機械部品

アルミニウム鑄造品は、通常の収縮による巣や空気の巻き込みによる欠陥の他に、結晶の粗大化と合金成分の偏析によって強度低下を招いている。さらに合金成分上の制約もあり、アルミニウムの特性が十分生かされているとはいえない。アルミニウム粉末冶金には、これら溶製材の材質的問題を解決する形で発展したものもあり、SAP (Sintered Aluminium Product) もその一つである。このSAPは1940年代に提示されたもので、アルミニウム粉末にアルミナ粉を混入させ、焼結後に熱間で大きな塑性変形

を与えて粉末同志の強固な結合をはかるものであるが、これまで実用された例は報告されていなかった。最近急冷アルミニウム合金粉末が製造され、優れたアルミニウム合金粉末が供給されるようになり、このSAPの手法を応用して真密度の焼結機械部品が製造されるようになった。

溶融したアルミニウム合金よりアトマイズ法で粉末化すると、粉末の粒子が小さいために冷却速度を極めて大きくとれ、急冷凝固粉末が得られる。この場合多量の合金成分が過飽和のまま固溶したり、晶出物が微細に分散し、合金構成元素の拡散が抑制され、ミクロ的にみても微細かつ均一組織をもつ粉末が製造できる。即ちこの方法でシリコンや鉄元素を多量に含む均質な粉末が製造できる。しかし、もともとアルミニウムのエアアトマイズ粉末は表面に酸化膜を形成しており、焼結性は良好とは言えないが、合金成分も多いのでさらに焼結性が劣る。そのため図3に示すように、SAPと同様な手法で製造するシステムが採用される。つまり、粉末を予備成形した後、熱間で押出すことにより長尺棒材を製造する。この棒材は切削又は切断後熱間鍛造して素形材となる。合金成分として多量のシリコンを含有させれば、耐摩耗性が向上するため、すでにロータリコンプレッサのペーンやロータとして使用されるようになっており、自動車部品、電機部品を含めて生産量は拡大している。鉄分を含んだものやセラミック粉末を混入したものは、耐熱性も向上するのでコネクティングロッドを含む自動車部品としての大きな用途が期待されている。バルブリテーナについては一部の部品に試用したことが報告さ

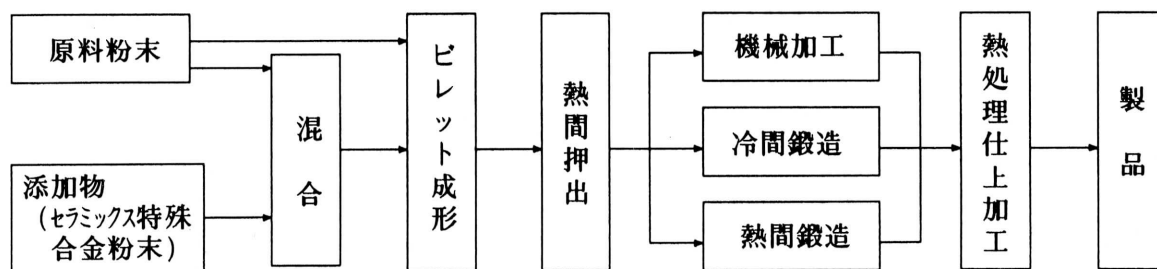


図3 急冷アルミ合金粉末を原料とする真密度焼結機械部品の製造工程

れている。

押出し棒材の工程を経ないで、粉末から粉末鍛造で直接素形材製造するプロセスの開発も進められている。この場合は前述の鉄系材の粉末鍛造のような熱間再圧縮の圧密ではなく、ある程度以上の流動を併った本格的な粉末鍛造が必要となる。

4. 金属粉末の射出成形 (MIM)

通常の焼結機械部品の製造においては、圧粉体は金型により圧縮成形されるが、金型内の粉末は加圧方向に移動するのみであるため、複雑な形状の成形は不可能である。この問題を解決するために登場したのが粉末射出成形法である。金属粉末はそれだけでは流動性をもたないので、樹脂やワックスなどの有機バインダを混ぜ合わせバインダが流動する温度まで上昇させ成形する。バインダ量は体積で40～50%に達するので、いわば金属粉末を多量に混入したプラスチックの射出成形とも言える。

製造工程は図4のようであり、焼結前の加熱脱脂後の成形体は40～50%の空隙を持つが、その後の焼結で高密度化し最終的には95%以上の密度を得る。この方法の技術的な課題の一つに、原料粉末の焼結性が良好であり、焼結時に高密度化できることがある。そのため微粉末が使用され原料コストの上昇を招いている。また次の問題点として脱バインダ工程があり、バインダを成形体表面より気化させる方法をとるため、炉の昇温速度を極めて遅くせざるを得ず、かなり長時間の脱バインダ時間を要する。そのため、厚肉

品や大物部品には適用することが出来ない難点をもつ。さらに焼結後の収縮は10数%あるため、寸法精度の維持に注意を要する点をあげることが出来る。

しかしながら、プラスチックの射出成形のように複雑形状の金属製品が簡単に製造できる魅力は大きく、他の競合する素形材製造法に比較しても図5に示すように数々の利点をもつ。そのため、現在その生産は着実に増えており、多くの小物の複雑形状素形材がこの方法で製造されるようになっている。

5. ファインセラミックスの粉末射出成形 (CIM)

粉末の射出成形は金属粉末から生まれたものであるが、日本における実用化はファインセラミックスから始まった。これはファインセラミックスの開発がとりわけ我が国で活発に行われたことにもよるが、ファインセラミックスを量産の機械部品に適用する場合、射出成形以外に適切な製造方法がなかったことに依っている。この点金属素形材では、鋳造や鍛造など多くの競合する製造法が存在する点と大きく異なる。ファインセラミックスの分野が、世界の中で日本が特に進んでいることもあり、この射出成形法は日本で専ら用いられている。ファインセラミックスの粉末射出成形も、技術的には金属粉末射出成形と大差なく、むしろ、やや易しい程度と言われている。

世界で最初に採用されたのは有名な図6のような日産自動車用の窒化けい素ファインセラミックスのターボチャージャロータである。この部品の場合ファインセラミックス

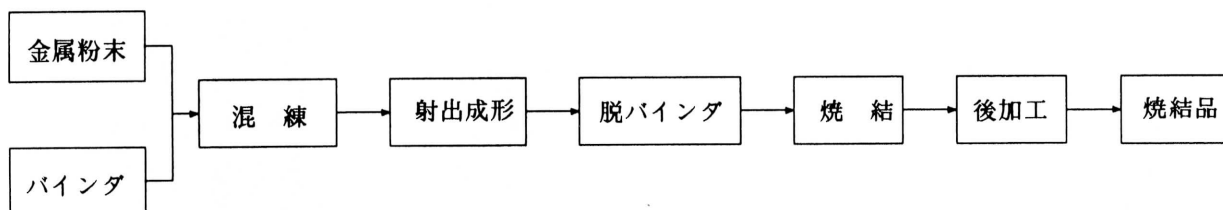


図4 射出成形による粉末焼結品の製造工程

加工法 特徴	粉末 (金属・セラミックス)				鋳造		機械加工	プラスチック 射出成形
	射出成形	金型成形	泥しょう	精錬	ダイカスト			
高強度	◎	◎	◎	○	△	○	○	×
強度	○	○	○	○	△	◎	◎	×
複雑形状	◎	×	○	◎	◎	△	△	◎
寸法精度	○	◎	△	△	△	◎	◎	◎
小物	◎	○	×	△	△	○	◎	◎
大物	×	△	○	△	◎	◎	◎	◎
材料歩留り	◎	◎	◎	△	△	×	×	○
量産性	○	◎	△	△	◎	×	×	◎
少量生産	×	×	○	△	×	◎	◎	×
コスト	○	◎	×	△	◎	×	×	◎

◎ 最良 ○ 良 △ 普通 × 悪

図5 粉末射出成形法と他の素形材製造法との比較

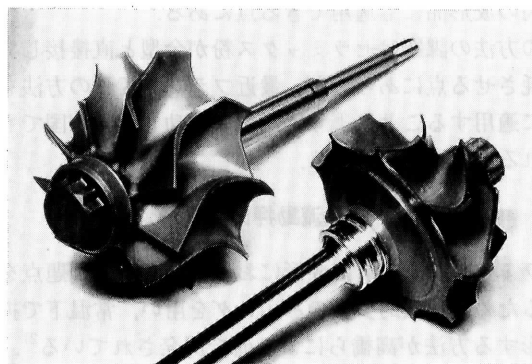


図6 粉末射出成形による窒化けい素セラミックスのターボチャージャロータ (日本特殊陶業)

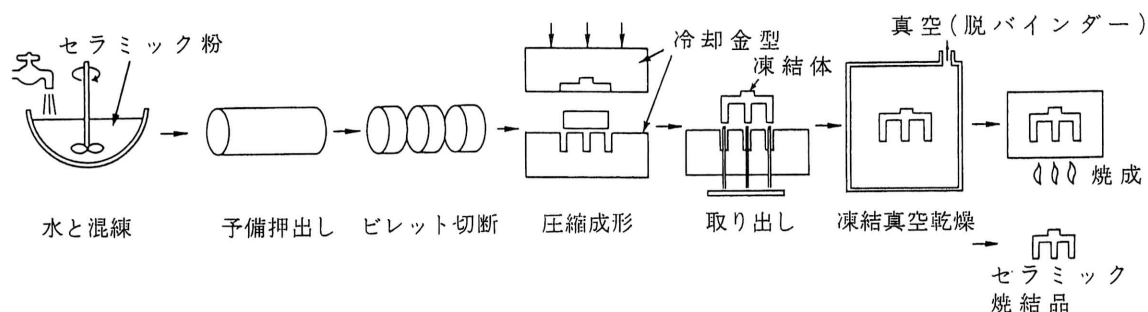


図7 水バインダによるセラミックスの凍結成形工程 (東大生研)

部品の製造もさることながら、金属製回転軸との接合の問題も解決すべき大きな課題であったと言われている。その後繊維機械用部品をはじめとして、耐磨耗部品の製造にも利用されるようになっていく。ファインセラミックスは次世代の新素材として、機械構造物材料用に多くの期待があるが、先にも述べたようにこの場合金属のように他に競合する量産成形法が存在しないこともあり、粉末射出成形法はファインセラミックスの普及の鍵を握っていると言えよう。

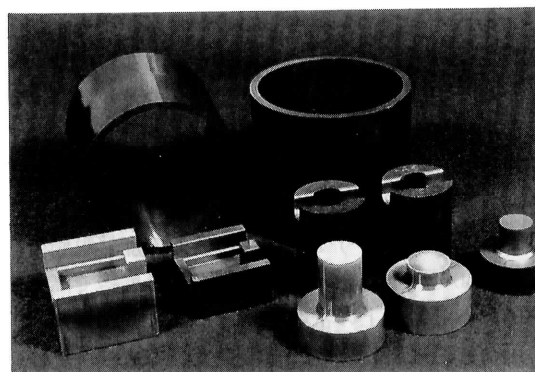
6. 水バインダによる凍結射出成形

粉末射出成形におけるバインダ除去の困難さを解決する方法として、図7のような揮発性の水を用い成形後乾燥させることによりバインダを除去する方法が高橋らにより研究開発された¹⁾。この方法はいわば旧来技術である瓦のような窯業分野での成形技術とファインセラミックの射出成形技術とを組み合わせたものと考えればよい。粉末は液体を混合した上で加圧すると流動性を示し、金型キャビティ内に容易に充填される。しかし、そのままでは成形体は軟弱で型から抜き出すことが出来ない。この凍結射出成形法では、射出成形後冷却してバインダである水分を、凍結することにより固体化して取り出すことに成功している。乾燥時にそのまま凍結乾燥炉に送れば、乾燥収縮による亀裂発生も防ぎ易い。したがってこの方法の利点は射出成形法を厚肉の成形品にも適用できる点にある。

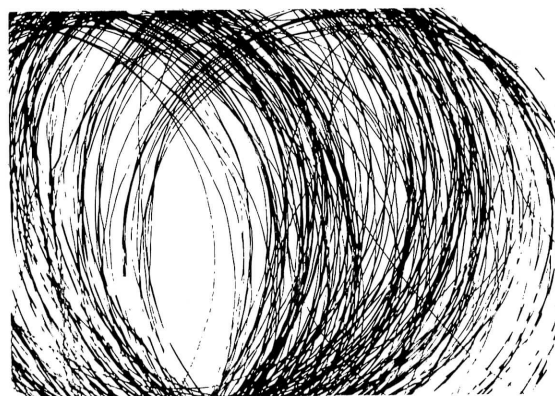
この方法の課題はセラミックス粉が金型と直接接して型を磨耗させる点にあったが、最近フランスでこの方法を金属粉に適用することにより実用化に成功し、我が国でも生産されるようになっていく。

7. 常温流動押し成形

セラミック粉末の射出成形における幾つかの問題点を解決するため、比較的少量のバインダを用い、常温下で押し出し成形する方法が高橋らにより研究開発されている²⁾。この方法はバインダを含有するものの粒状をなして流動性をもつ粉末を準備し、この粉末を金型内に自動給粉して充填



a) 後方押し出し



b) 線材押し出し

図8 SiC セラミックス粉末の常温流動押し出し成形 (東大生研)

した後、常温下で圧縮して押し出し成形しようとするものである。常温下で行われるため簡便であるものの、射出成形のような複雑な形状の成形には適さない。図8にSiCの成形体を示す。成形における技術的なポイントは粉末状でポッパによる自動給粉が可能で、かつ圧縮成形体の均一な密度が保たれるバインダの選択にある。最近ワックス系のバインダで、比較的少量の混入で流動性もよく均一密度が得られるものが見つかり、かなり実用性が高まった。この方法を超伝導線材の成形や金属やフェライト粉末に応用できることが明らかにされ、実用化を目指した取り組みがなされている。

8. スリップキャストイング

ファインセラミックスの成形法としては、単純形状品の多量生産には金型成形と射出成形、少量生産はラバープレスが主流である。複雑形状品のファインセラミックスの成形法としては、古くから陶磁器材の成形法として広く用いられてきたスリップキャストイング法も活用し得る。スリップキャストイング法は石こう型を用い、スラリー状粉末を鑄込んで水分を型内に浸み込ませて成形する方法である。ファインセラミックスの場合には、粉末が微粒であったり、一部の粉末では水と反応するものがあるが、必ずしも簡単には応用できないと言われている。

石こう型を用いたスリップキャストイングでは、石こう型の寿命が短いため多量生産には適さないと言われていたが、京セラでは窒化けい素のターボチャージャのロータの製造をスリップキャストイング法により行っている。ここでは耐久性のある金型を用い、硬化剤を用いることによりこれらの問題点を解決している。

スリップキャストイング法の問題点を解決する方法として、新東工業で鑄造の V プロセス法からヒントを得た新しいスリップキャストイング法が開発されている。この方法は図 9 に示すようにモデル表面に薄いプラスチックフィルムを貼り付けた後、粉末鑄型を転写成形する。この鑄型を用いて、スリップキャストイングを行うが、プラスチックフィルムに微細な穴があいており透水性があることに特徴がある。この方法では石こう型のような割型を用いることは困難であるため、形状には自ずと制約がある。

スリップキャストイング法で成形されたセラミックは、

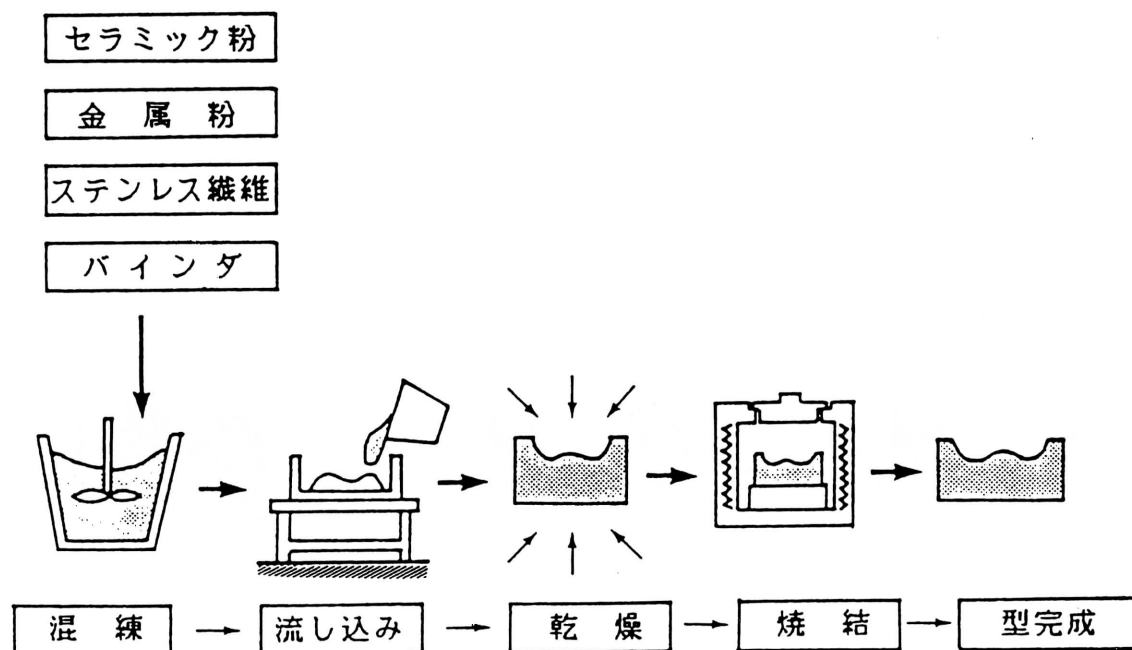


図10 通気性セラミック型型の製造工程 (東大生研)

上型と下型を合せてセラミックススラリーを注入

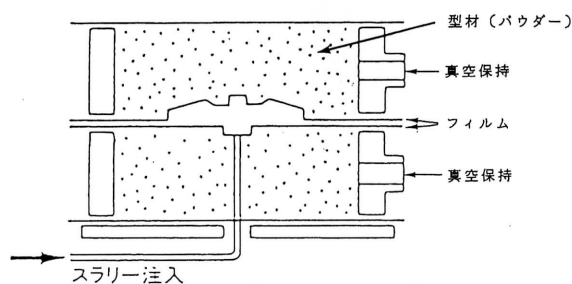


図9 浸透 V プロセス法の造形原理 (新東工業)

焼結すると大幅な収縮を示すがこの収縮を抑制する方法も柳沢らにより開発されている。図10のようにセラミックス粉末に金属粉を混入し、酸化焼結を行って収縮を抑える方法である³⁾。寸法変化がなく、多孔質にもかかわらず、ある程度の強度も得られるので、プラスチックシートの真空成形用の通気性型として活用されている。

9. CNC粉末成形プレス

金型成形用の粉末成形機はこれまで機械プレス又は油圧プレスが使われてきた。駆動源をモータとし直接スクリューを介してラムを動かす図11のような上下3軸計6軸の電動式プレスが鶴らとファナックで共同開発された。このプレスの主な特徴は、①ラムの動きを CNC にて自由に動作できる、②粉末成形時のき裂発生の制御が容易である、③厚さ精度を向上できる、④複雑形状の成形が可能となる、⑤つぎ足し成形や2層成形が可能となる、⑥成形条件の自動制御やデータ処理が可能となる、⑦成形中の騒音が少な

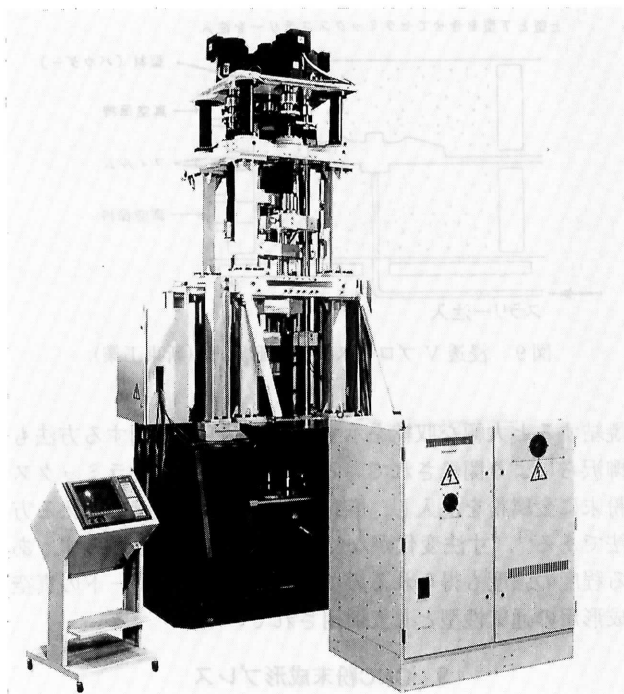


図11 6軸 CNC 粉末成形プレス (東大生研)

い、などである。この開発が契機となり、油圧および機械両方式とも CNC 化が着実に進行し、すでに内外の粉末成形プレスメーカーは実用機を市販するに至っている⁴⁾。CNC の粉末成形プレスはこれまでカム式で動いていたならい旋盤がNC旋盤に変革したようなもので、将来の粉末成形機の新しい一つの方角を示すものとなった。

10. ラピッドプロトタイピングによる粉末成形

3次元 CAD データを用い積層造形法よりモデルや試作品を製作する技術が開発されているが、この方法の一つに粉末成形法がある⁵⁾。

具体的な方法としては、図12のように粉末層を CO₂ レーザビーム走査により粉末同志を結合させるものと、図13のようにインクジェットノズルから結合剤を供給する

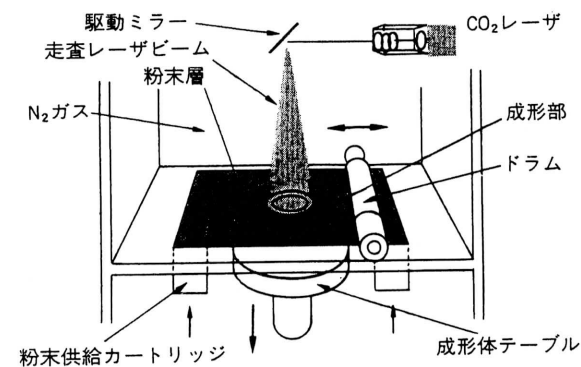


図12 粉末結合法によるラピッドプロトタイピング (DTM 社)

2つの方法がある。前者の方法では主として樹脂粉末が用いられるが、金属粉末に樹脂コーティングしたものを使い、後に Cu の溶浸処理を行って金属モデルや金型を製作する方法も開発されている。さらに、Cu 合金粉末を使いレーザービームの出力を大きくして金属粉末を熔融する方法も開発されている。また図14のように粉末をノズルより供給しながらレーザービームを使用して熔融していく方法についても研究開発が進められている。これは溶接技術の一つである溶造とラピッドプロトタイピングとを組み合わせたとと言える。さらに、プラズマによるラピッドプロトタイピングも研究されている。

また後者のインクジェットバインダによる方法は、粉末の薄層に結合剤を滴下して粉末成形を行うものである。樹脂・金属・セラミックのいずれの粉末にも適用可能であるが、セラミック粉末を用いた図15のように鋳型製作の開発が最も進んでいる。

以上のようにラピッドプロトタイピングにより粉末成形を行う方法の開発が積極的に進められているが、野口らによるスリップキャストと組み合わせる方法も有望である⁶⁾。石こう型を用いる方法は複雑形状体には適用が困難であるため、弾性体のシリコンゴム型を用いる方法の開発が進んでいる。その例を図16に示す。

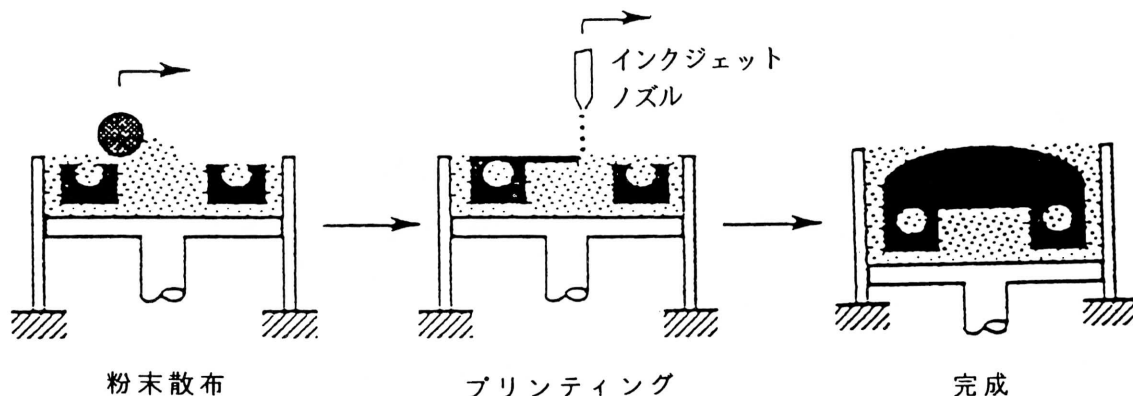


図13 インクジェットを用いた粉末結合ラピッドプロトタイピング (MIT)

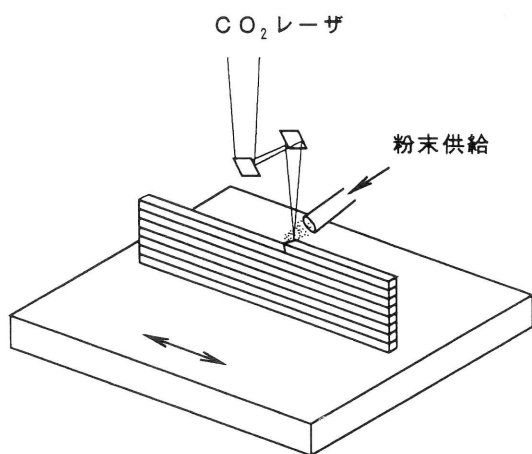


図14 金属粉末溶融によるラピッドプロトタイピング
(Aachen 工大, Texas 大など)

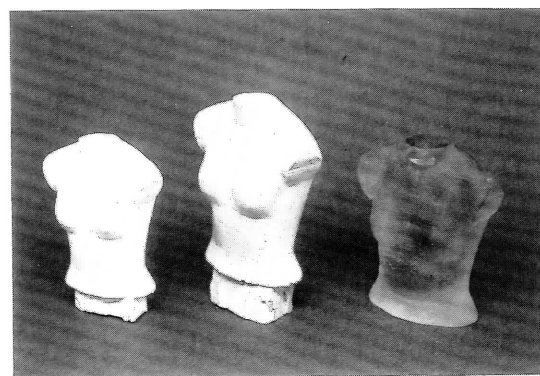


図16 ゴム型を用いたスリップキャストによるラピッドプロトタイピング
(東大生研)

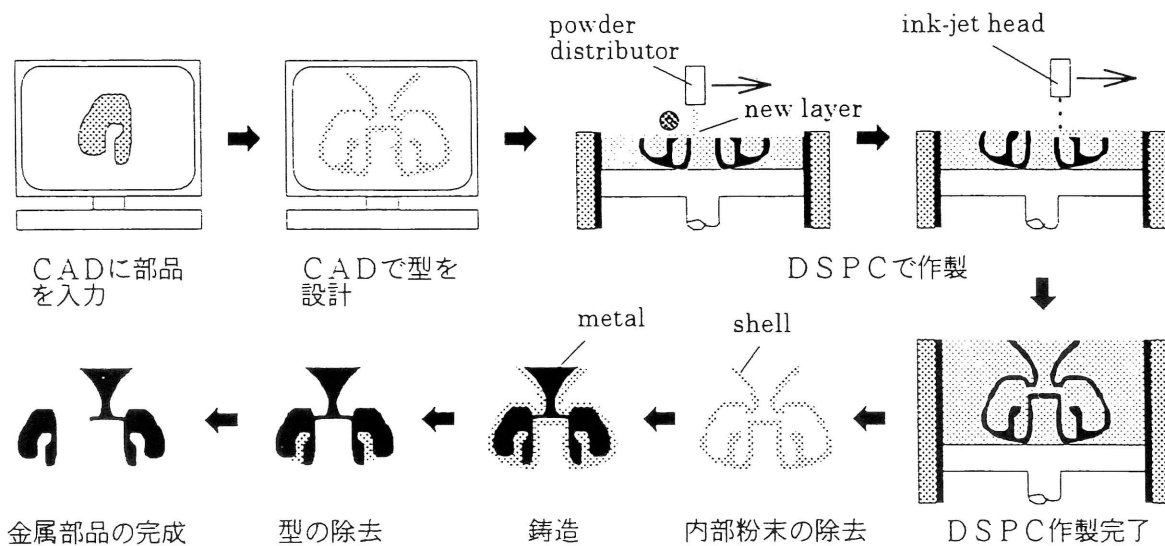


図15 バインディングジェットによる鋳造用シェルのラピッドプロトタイピング (Soligen)

11. その他の特殊粉末成形技術

最近の粉末成形技術の一つに熱間静水圧成形法 (HIP, Hot Isostatic Press) がある。HIP 法はこれまで超硬合金やハイスなど、主として工具用材料の高密度化による靱性や耐摩耗性の向上のための処理法として活用されている。HIP法はその他航空機エンジン用部品などにも用途が考えられているが、いずれも高級特殊材料のための手段の域を出ていない。しかし最近 HIP 法を一般の機械部品の製造法としても検討されるようになってきている。例えば神戸製鋼では耐摩耗性が要求される射出成形用のスクリー部などかなりの大型部品も製造されており、少しずつ near net shape の製造法としての地位を確立しつつある。

ガスアトマイズを行いながら、その粉末を溶射する形で高強度の鋼塊をつくることのできる。これはイギリスで誕

生しオスプレイ法と呼ばれ粉末溶射に近い方法であるが、この鋼塊を型鍛造して素形材を製造する方法も提案されている。最近住友重機ではこの方法により圧延ロールが製造されるようになった。これはロール軸材の表面に耐摩耗特殊鋼を肉盛りするもので、オスプレイ法の初めての本格的な実用化例とみなすことができよう。

12. おわりに

粉末冶金やファインセラミックスを発展させるに重要な粉末成形法に関連する最近の技術動向を述べた。以前は粉末成形の研究者が少なかったが、最近は塑性加工の研究者を中心に次第に関心が高まっている。この分野は、とくく材料科学的な面ばかり強調されるが、生産技術面では粉末成形は極めて重要で、今後更なる技術面での検討を続け一層の発展をはかるべきであろう。(1995年12月22日受理)

参 考 文 献

- 1) 中川威雄, 張黎紅, 野口裕之, 高橋信之: 水バインダを用いたファインセラミックスの凍結 圧縮成形, 粉体粉末冶金, 39, 1, (1992) P. 44-49.
- 2) 高橋清造, 中川威雄: アルミナ顆粒粉の流動成形におよぼす流動性の影響, 粉体および粉末冶金, 42, 3, (1994) 277-282.
- 3) 柳沢 章, 野口裕之, 中川威雄: セラミック・金属粉末焼結による通気性成形型, 精密工学会誌, 53, 1, (1987) 91-97.
- 4) 素形材センター研究調査報告書470; 粉末成形機のカNC化の調査研究報告書.
- 5) 中川威雄: ラピッドプロトタイプング: 型技術, 9, 11, (1994) 39-47.
- 6) 野口裕之, 中川威雄: 光造形のセラミックス成形への応用, 光造形シンポジウムテキスト, (1994).