

電動式 6 軸 CNC 粉末成形プレスの開発と今後の展望

Development of 6-axis Electric Drive CNC Press for Powder Compaction and Its Prospect

鶴 英明*・中川 威雄**

Hideaki TSURU and Takeo NAKAGAWA

原料から最終製品もしくはそれに近い形状を直接製造する粉末冶金法の特長はその高い経済性にある。しかし、従来の粉末成形プレスは油圧あるいは機械駆動式であり、成形能力、特に金型位置や速度の制御性に限界がある。そこでプレスの駆動を完全に AC サーボモータで置き換えた新しい粉末成形プレスを開発した。このプレスは元来必要であった複雑な成形動作を自由に設定できるだけでなく、技術的に多くの利点を持ち合わせている。

1. はじめに

粉末冶金法は、原料となる金属粉から所定の形状を有する金属製品を造る技術である。この技術は古くから知られていたが、今世紀初頭に全工程を原料粉の製造、成形、焼結、焼結体の加工の 4 工程に分け、近代工業として確立した。以後、現在に至るまでその基本工程は変わることなく、粉末冶金法で製造する焼結機械部品は市場の約 70% を占める自動車用部品をはじめ事務機器、家電製品など用途、品種とも多岐にわたっている¹⁾。

金属製品の製造手段としてみた粉末冶金法には多くの特長があるが、最大の魅力と言えやはりニアネットシェイプ (near-net shape) 成形であろう。原料粉末に形を与えるためには金型内に粉末を充填し、所定の圧力で圧縮成形するが、このときダイやパンチの形状およびその組み合わせによって最終製品形状を直接あるいはほぼそれに近い形で得ることができる。後はこれを炉中で焼結すれば良く、量産性、後加工の省略による設備、人員、時間の削減、材料費の節減など非常に優れた経済性を実現する。近年になって機械部品の形状はますます多様かつ複雑化しており、多品種少量生産の傾向は強まるばかりである。それとともに生産コスト全体に占める加工コストの割合はますます大きくなっている。こうした背景から改めて粉末冶金法のコストパフォーマンスに注目し、ほかの製造法からの切り替えを検討する生産者も多く現れており、粉末冶金法の適用範囲をさらに拡大するような技術開発や改善が待たれている。

こうした中で成形技術、特に粉末成形プレスの開発推移に目を向けると、自動車部品の製造が主力となり需要が著しい伸びをみせた 1960 年代以降、プレスの大型

化にはじまり複雑な形状を成形するための多段化、そしてならい方式切削加工機と同様の NC 化という道をたどってきた²⁾。しかし従来の機械式または油圧式成形プレスに補助駆動装置や制御装置を追加しての開発であったため、機械的にきわめて複雑でかつ高価なものとなっていた。

そこでこれらの問題を解決するために筆者らが開発したのが、プレスの駆動を AC サーボモータに置き換えた純電動式の 6 軸粉末成形プレスである。ここではこのプレスの基本構想から始まって現在に至るまでの開発経過を解説する。またこの成形プレスは単に駆動源を電動化したにとどまらず、これまで指摘されてきた粉末成形における多くの技術的問題を一挙に解決する可能性を十分に持っている。そこでプレスの有する優れた能力を紹介しながら今後の展望について触れることにする。

2. 粉末成形法と成形プレス

圧縮成形工程には通常、Fig. 1 に示すように粉末の充填、圧縮、抜出という 3 つのステップがあり、粉末成形プレスはこれを 1 サイクルとして動作する。ここで重要

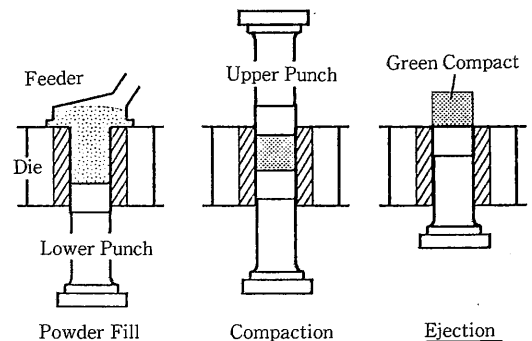


Fig. 1 Powder Compacting Process

*東京大学生産技術研究所 第 2 部

**東京大学生産技術研究所 付属先端素材開発研究センター

な点は成形体の密度ができるだけ真密度に近く均一なこと、そして抜き出し割れなどの欠陥がないことである。これに関して、Fig. 1のような単純形状を圧縮成形する場合には普通の鍛圧プレスと金型を使って何ら問題はない。しかし、製品の形状が複雑になってくるとそれに伴って以下のような成形技術上の問題を考慮しなければならない；

粉末の充填

通常、充填は粉末の自然落下により行方。しかし、薄肉壁や大きな段差をもつ製品では粉末の流動性が乏しいために狭い隙間や深い部分に十分な量が充填されず、結果として部分密度差を招く原因となる。こうした場合、金型の位置や速度を給粉装置の動きと同期して自由に設定できれば粉末の充填を助けることが可能である。

圧縮

圧粉体密度をできるだけ均一に成形するためには各部分での圧縮比を等しくすることが基本となる。しかし圧

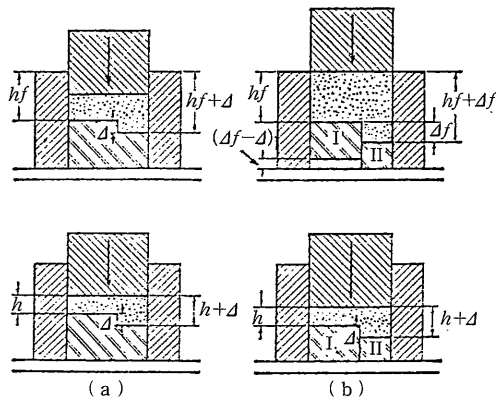


Fig. 2 Compaction of the Component with Different Levels³⁾

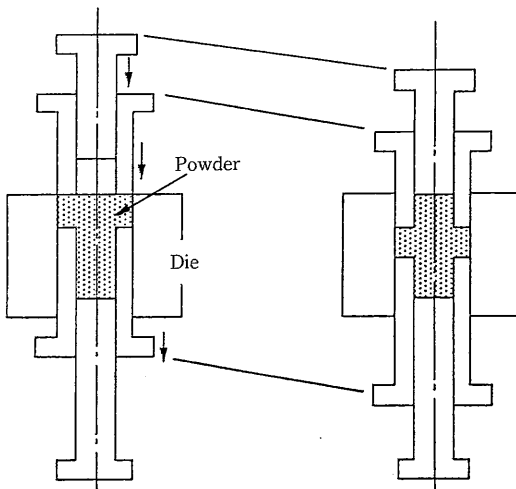


Fig. 3 Powder Transfer Operation⁴⁾

縮軸方向に段差を有する製品を圧縮する場合、Fig. 2(a)のように段付金型で成形すると厚部、薄部の圧縮比が等しくならない³⁾。そこで均一圧縮のかたちにするにはFig. 2(b)のように下パンチを段差ごとに分割し、各部分の厚さに応じたストロークで圧縮することが必要である。複雑形状品になるほどパンチの分割や圧縮量の設定、圧縮のタイミングが難しくなるのは言うまでもない。

またボス穴や中間フランジをもつ形状を成形する際にはFig. 3のように圧縮開始前に粉末移動という動作が必要となる。これは充填時の粉末の計量がその深さで行われるため、製品の形状を考慮して粉末を所定の位置まで移動する作業である。移動には上下パンチが同期して動作するよう位置と速度を制御しなければならない。

拔出

圧縮が終了しても圧粉体と金型との間には大きな摩擦力が作用しており、これに抗して機械強度に乏しい圧粉体を抜き出すのは容易でない。特に複雑形状品の場合、拔出時に発生する割れを防止するために、金型の動きのタイミングを調整しながら段差ごとに少しずつ型抜きするのは勿論のこと、形状によってはFig. 4のように上下パンチで圧粉体を挟み込んだまま抜き出すなどの動作が必要である。

またパンチは圧縮縮みから回復し、圧粉体は内部の圧縮応力が開放されて膨張するためこうした変形量をキャンセルして抜き出すことも大切である。

上述のような技術的困難さからTab. 1に代表される製品形状は粉末成形法で製造するには不適とされ、後加工に頼ってきた。

こうした制限を越えた形状を成形するには、使用する複数の金型が独立して動き、自由に制御されることが必要となる。この多軸成形への要求に対して、従来の機械式あるいは油圧式プレスに複数のラムを配置するのは容易ではない。そこで今日に至るまでラムの単軸動作を

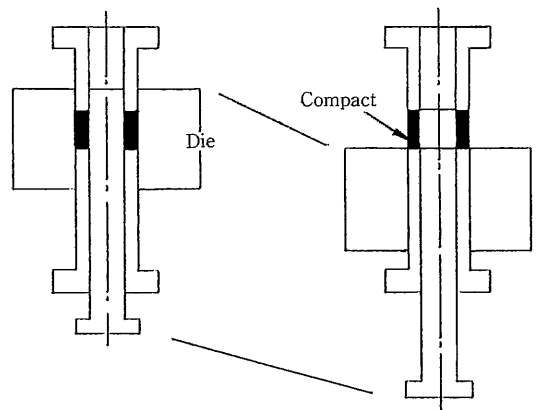
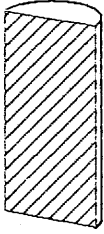
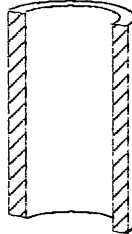
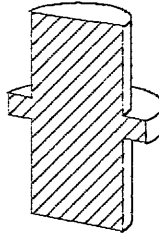
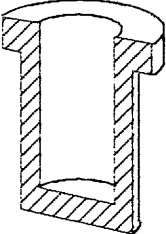


Fig. 4 Ejecting Operation Holding the Green with Punches⁴⁾

Tab. 1 Some of Current Limitation for P/M Components

Shape				
Unacceptable features	Large L/D ratio	Thin wall to length	Flanges deep from either end	Blind ends opposite to flanges

ツールセットと呼ばれる装置で複数軸動作に変換したり、あるいは空圧式や油圧式の補助駆動装置を取り付けて対応している。しかし従来の粉末成形プレスの枠を出ず、非常に複雑で高価な装置と金型を必要とするわりには各軸のもつ可動ストロークが小さく位置や速度の調節が難しい。このような現状が新しい粉末成形プレスの開発に着手する動機となったのである。

3. 電動式6軸CNC粉末成形プレス

粉末成形プレスを開発するにあたって以下に挙げる点をその目標とした：

- 1) 複数の成形軸を持ち、各軸が独立した駆動系を有する
- 2) 軸間で干渉しない十分な可動ストロークをもつ
- 3) 位置、速度、圧力の制御が可能である
- 4) 多様な成形シーケンスに対して柔軟に対応し、機能拡張性が高い

そこで注目したのがプラスチック射出成形機に始まり板曲げプレスと進んできた鍛圧機械の分野の電動化である。従来より油圧駆動式が主流を占めるこの分野で、全電動式のもつ優れた成形安定性や制御特性はすでに広く認められている⁹⁾。こうした背景から本格的な全電動式射出成形機を世界で初めて送り出した実績をもつFANUC(株)と共同で粉末成形プレスの開発を行った。

Photo 1に試作した電動式6軸CNC粉末成形プレスの写真を、Fig. 5にプレスの機械寸法を示す。

3.1 高性能サーボモータと直動機構

鍛圧機械の駆動の電動化を可能にしたのは、最大負荷を安定して出すことができる高性能サーボモータの登場である。従来使用されるフェライトマグネットに代わり磁力の強いサマリウムコバルト系磁石を採用することで小さなロータ慣性と強力な出力トルクを得ている。モータ単体としては指令速度まで15msec、最大トルクまで僅か数msecで立ち上がるなどきわめて優れた応答性

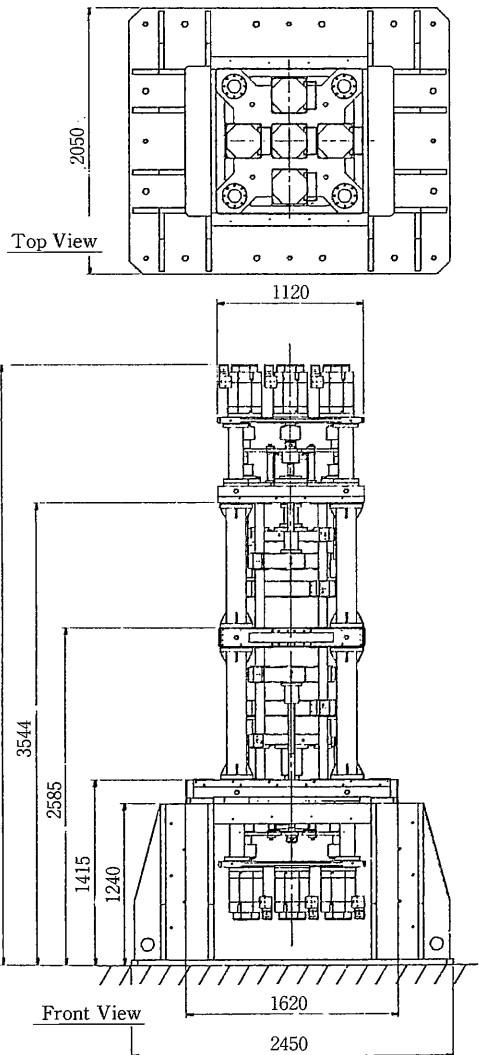


Fig. 5 Final Design of the 6-axis Electric Drive CNC Press

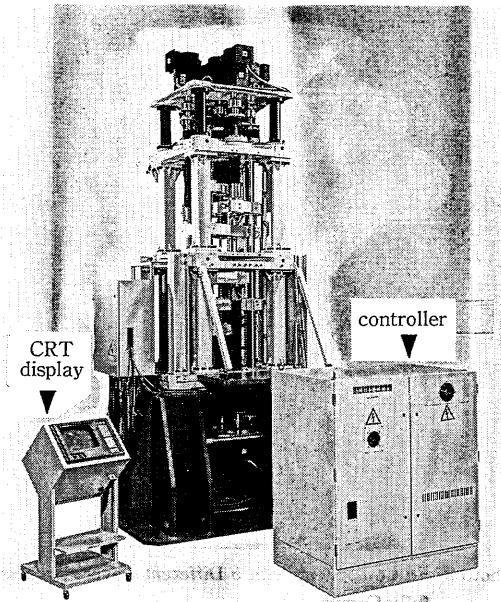


Photo 1 View of the Assembled CNC Press

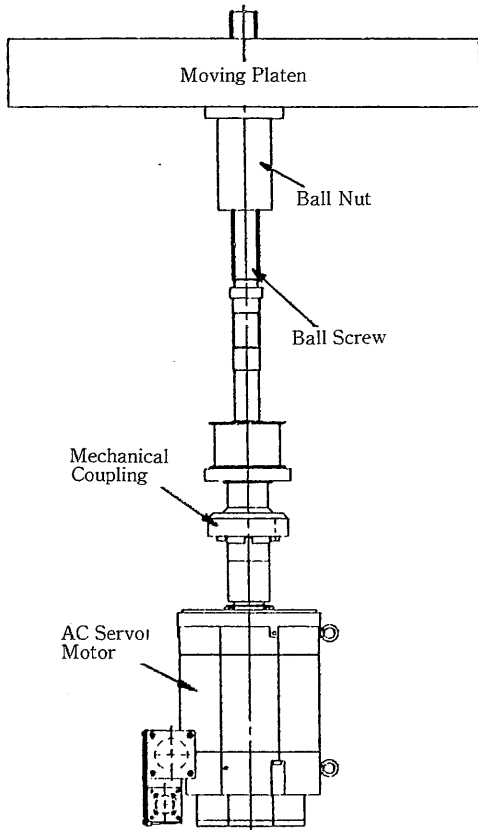


Fig. 6 The Direct Electric Drive Mechanism (single unit)

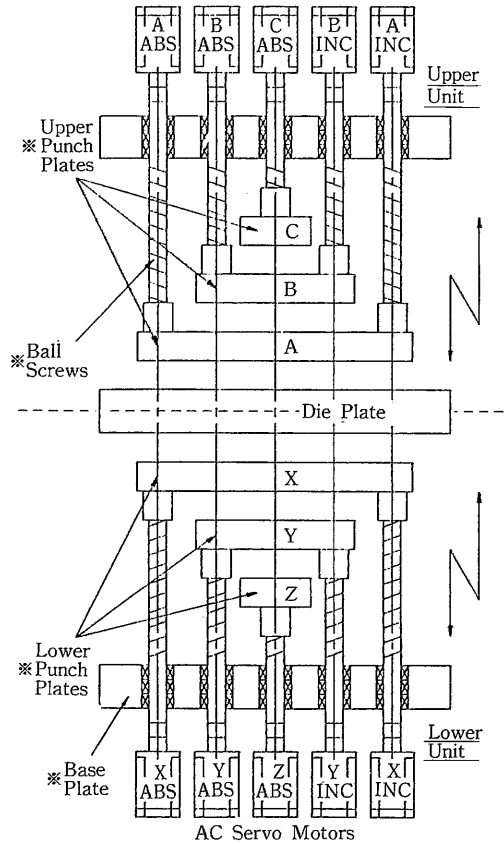


Fig. 7 Schematic Diagram of the Electric Drive CNC Press

を示し、従来のプレス駆動装置にない高加速・加圧特性を發揮する基礎となっている。

このサーボモータにボールスクリュを直結したのが Fig. 6 に示す直動機構である。モータの回転はボールスクリュにより直接パンチプレートの上下運動に変換されモータ 1 基で最大 7.5tf の加圧力を発生する。この伝達系は高い変換効率を示すだけでなく、バックラッシュがないためモータの回転を忠実にプレートに伝えることができる。

3.2 プレスの構造

Fig. 7 は試作成形機の構造を簡単に図示したものである。成形軸数は上下それぞれ 3 軸で、第一、二軸はツインモータ駆動、第三軸はシングルモータ駆動とし、合計 10 基の AC サーボモータを使用して最大 38tf の加圧能力を有する。プレスストロークなどプレス仕様の詳細について Tab. 2 を参照されたい。

3.3 プレスの制御系

給粉装置も含めてすべてのプレス動作は CNC 装置により完全に自動化されている。成形軸の位置は全軸で共通した座標系で示され、位置決め精度と再現性に優れて

Tab. 2 Specification of the Electric Drive CNC Press

Number of Platens	3 Uppers / 3 Lovers	
	Total	37.7
Maximum Capacity (tonf)	Upper 1/2/3	15.1/15.1/7.5
	Lower 1/2/3	15.1/15.1/7.5
Stroke (mm)	Upper 1/2/3	100/50/50
	Lower 1/2/3	100/100/100
Maximum Speed (mm/sec)	208	
Feeder	Size (mm)	100×130
	Stroke (mm)	400
Controller	FANUC SERIES 15-MA	
Actuators	AC Servo Motor	
Press Size (mm)	4610×2450×2050	
Weight (ton)	13	

いることは言うまでもない。移動速度はプログラムの指令ブロックごとに200mm/sec近い最高速度まで厳密な制御が可能である。圧力についてはモータの出力トルクや各成形軸に取り付けたロードセルによって軸荷重を検出してフィードバック制御することができる。

成形シーケンスの設定は従来のような機械的な調整を必要とせず、プログラムの作成、変更、呼出だけできわめて簡単に行える。セットアップ作業が短時間で済むことで、たとえば複雑形状品を成形する場合に幾とおりの中から最適なシーケンスを迅速に選定することが可能である。

4. 電動式粉末成形プレスの特長

動作能力と制御技術の向上が、以前には考えられなかったプレス駆動源のモータへの置き換えを可能にしたわけだが、粉末成形プレスは元来動きが複雑な機械であったためそれは単なる駆動源の電動化にとどまらない。つまり上下それぞれ3軸を独立して駆動・制御するので5段までの段差ならば自由な成形シーケンスを設定することができ、これまでなかなか困難であった密度の不均一、抜き出し割れなどの技術的問題を大幅に解決し、従来では成形不能であった形状の成形が期待できる。以下に電動式6軸CNC粉末成形プレスの特長を挙げる。

4.1 多段形状製品の圧縮成形

Photo 2に上下3軸を使って成形した成形品の一例を示す。成形段数が多いことによりニアネットシェイプ成形という粉末冶金法本来の利点はさらにクローズアップされる。

多段成形では分割金型を使用するが、本プレスでは各成形軸のモータトルクあるいはパンチの歪量から製品の

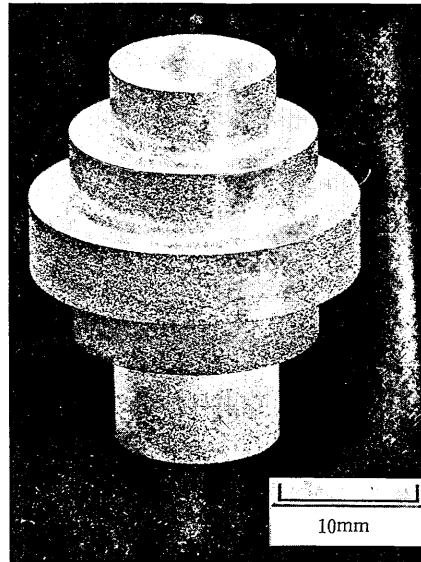


Photo 2 Fe Component with 5 Different Levels Successfully Compacted

段差ごとに圧力情報が得られる。Fig. 8はその概念図を、Fig. 9は成形圧力曲線の一例を示す。このように各部分の粉末の圧縮過程をリアルタイムでモニタできることは

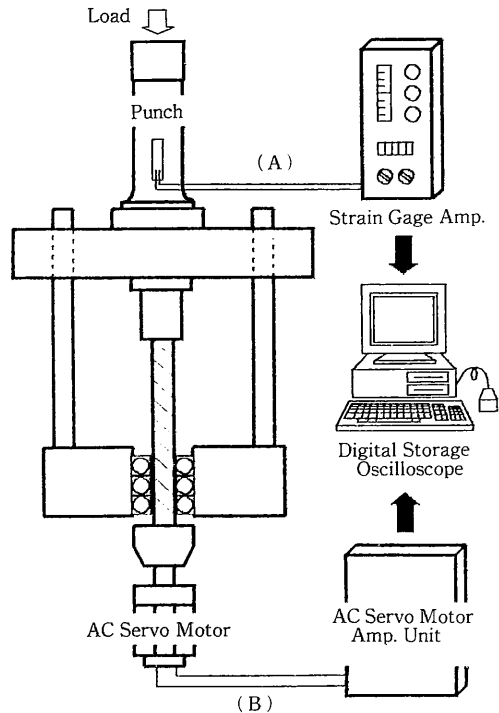


Fig. 8 Load Monitoring System through (A) Strain Gauge Output and (B) Motor Torque

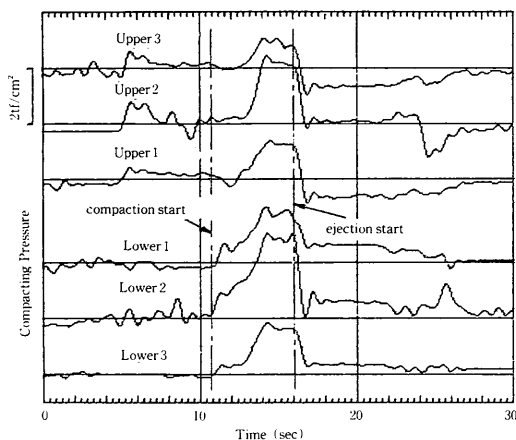


Fig. 9 Load Curve during a Compacting Process Monitored through AC Servo Motor Torque

大きな意義をもつ。

圧縮時、各パンチは鉄系粉末の場合、通常 $6 \sim 8 \text{ tf/cm}^2$ の圧縮応力を受けて変形する。その結果、パンチプレートで位置決めをしてもパンチ端面は目標位置まで到達せず圧粉体は上下方向に若干大きめのものとなる。そこで、これまでは金型の設計段階で予想する最大圧縮応力から得た推定縮み量の分だけあらかじめ長めにパンチを製作しておき、圧粉体の寸法精度を確保していた。しかし、圧縮時の粉末の挙動についてはいまだにわからないことが多く、複雑形状品では理論とおりの圧縮応力で成形できることはまれである。こうして生じた寸法誤差を補正

するために粉末成形プレスには金型の位置やラムのストロークを変える調整ネジが付いているが、この調整作業は煩雑で経験と勘に頼っていた。もし補正許容量を越えるような場合には最終的にパンチを追加するとといった方法が取られ、金型設計者や製造業者を大いに悩ませてきた。

これに対し、電動式粉末成形プレスは6軸の動きを自由に設定できるため、金型の設計が大幅に容易となる。予想した圧縮応力が得られない場合でも座標指令を変更するだけでモータがパンチ位置を微調整するため、短時間で最適成形条件を決定し、寸法精度の高い製品を成形することが可能となる。

4.2 給粉特殊動作

給粉の際にはできるだけ高い密度で均一に、かつ安定して粉末を供給する必要があることはすでに述べた。しかし粉末の特性や製品の形状によっては粉末が入りにくかったり充填量がバラついて満足な結果が得られないことも多い。このような場合には吸込充填法やオーバフィル法といった、下パンチと給粉装置が同期した給粉動作により充填状態の向上が期待できる。

粉末を自由落下させて給粉する落とし込み充填法に対して吸込充填法はキャビティを形成しながら下パンチが粉末を引き込む方法であり、オーバフィル法は特にキャビティが狭い場合に過剰量を充填しておいてから余分な粉末を押し出す方法である。Fig. 10にこれらの給粉動作の例を示す。

純鉄粉を供試粉末として外径24mm、内径18mm、深さ

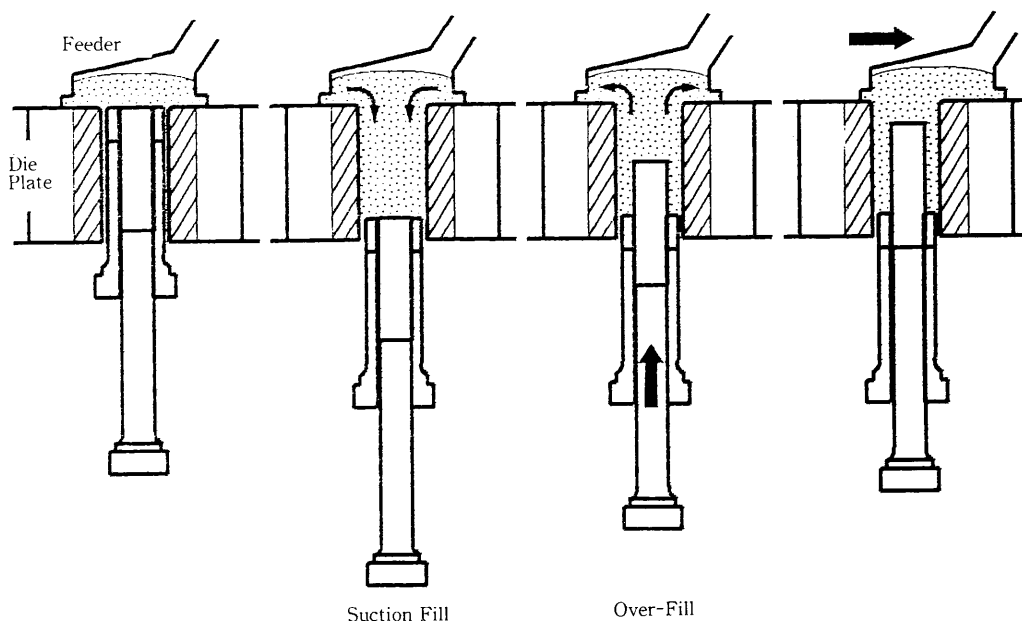


Fig. 10 Combination of Suction Filling and Overfill System Available with the CNC Press

50mmのキャビティに充填方法を替えて給粉し、充填密度を比較した結果、吸込充填法とオーバフィル法の組み合わせによって最も高い密度が得られることを確認している⁶⁾。

また上述した給粉動作を利用してもブリッジング(bridging)などによる充填不良が起こる場合には振動給粉法が効果的である。これは給粉時に下パンチを振動させ粉末にエネルギーを与えて充填を助けようとするもので、Fig. 11に示すようにプログラム指令と発振器信号に

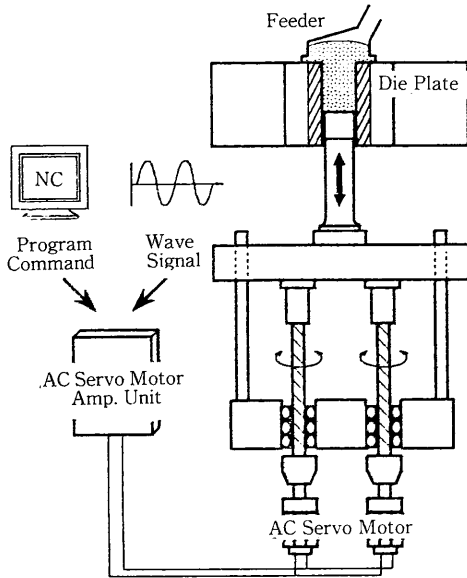


Fig. 11 Diagram of Vibratory Filling System

よる2つの加振方法が考えられる。駆動源のモータ軸がボールスクリュに直結しており伝達部にバックラッシュがないことからモータの正逆転は応答性よく忠実にパンチの上下振動へと変換される。

Fig. 12は $\phi 18 \times 50$ mmのキャビティに純鉄粉を充填した際の充填密度に及ぼす振動周波数と振幅の影響を示したものである。加振は発振器からの信号を重畳して5 sec行った。この結果、低い周波数でも小さい振幅から十分な加振効果が現れ、最大で見かけ密度の16%の充填密度が得られた。

4.3 クラックを生じない抜出動作

圧縮が完了すると、抜出のためにまず圧縮荷重を解放する(除荷工程)。これにより縮んでいたそれぞれのパンチは元の寸法に戻るが、分割パンチを使用する場合パンチ長さで圧縮歪量が異なるため圧粉体とパンチとの間に隙間ができることになる。この状態のまま抜出を行うとパンチの突き上げによって薄肉部や複雑形状品で強度が低い部分などにクラックを生じる結果となる。こうした欠陥を防ぐため、このプレスでは除荷の際に圧縮歪量をキャンセルして常にそれぞれのパンチが圧粉体を支持するようにパンチ位置を微調整することが可能である。

除荷に続く抜出工程では、下パンチからの抜出力とダイやパンチ壁との摩擦力が圧粉体に作用する。特に圧粉体の薄肉壁やボス部分には引張応力が働き、その結果クラックを生じやすい。そこでFig. 13のように圧粉体の各部分を上下パンチで挟み軽い与圧をかけながらダイの外に抜き出す方法が考えられる。電動式CNC粉末成形プレスは複数軸に対して位置と速度の高精度制御が可能であ

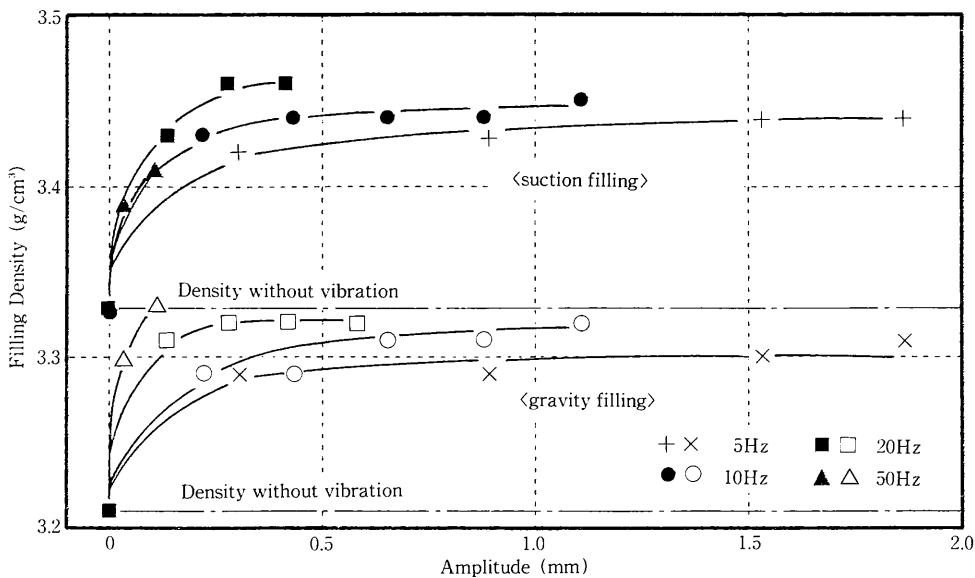


Fig. 12 Effect of Vibration Frequency and Amplitude on the Filling Density

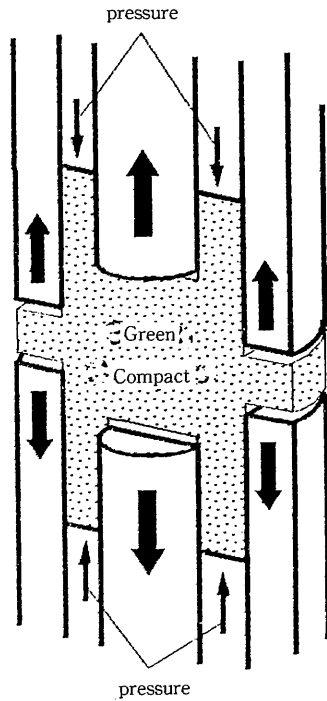


Fig. 13 The Ejection Sequence Applying Small Load to Avoid Cracking

り、それぞれのパンチを同期させて圧粉体形状に応じた抜出動作を自由に設定することができる。

4.4 多層成形法

アスペクト比の大きな形状を単軸圧縮成形する場合、成形力の減衰により端面と中央部で密度差が生じることは避けられない。そこで長尺棒状体や薄肉の深いチューブの成形には給粉と圧粉を繰り返して圧粉体を継ぎ足していく方法が考えられる。Fig.14に本法の概念図を、Photo 3に成形品の例を示す。単軸の一回成形に比べると圧縮軸方向の部分密度差を小さく抑えることができる。継ぎ足した境界部は焼結を経て機械強度を得る。また、内外に組成の異なる粉末を給粉・圧縮成形して圧粉体を多層化した複合成形体も同様の手法で可能となる。

こうした多層成形法はすでに広く知られており、実験室的には可能であったが、従来の粉末プレスを使用した実際の生産はほとんど不可能に近く、機構上の特別な工夫を必要としていた。給粉・圧縮・抜出という通常の工程にとらわれず、自由なパンチのシーケンスを設定できるのも電動化した粉末成形プレスの大きな利点である。

5. 今後の展望

前節では電動式CNC粉末成形プレスの特長を紹介した。さらに今後の開発研究によって次のような粉末成形技術の可能性が期待される。

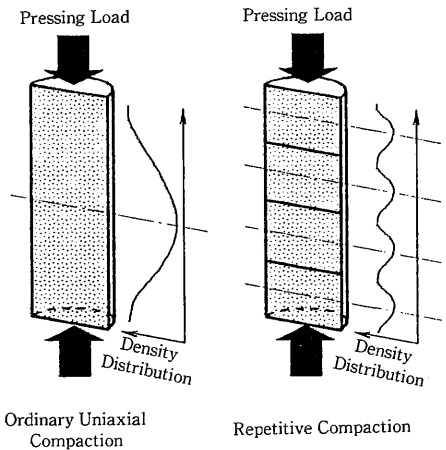


Fig. 14 Diagram Illustrating the Concept of Repetitive Compaction

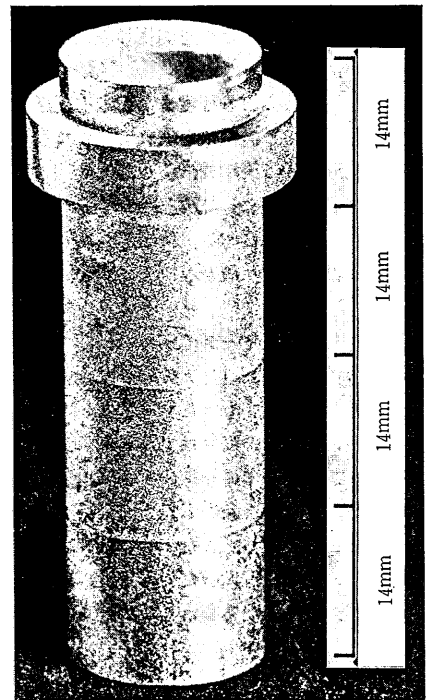


Photo 3 A Sample of P/M Component Produced by Repetitive Compaction

5.1 充填粉末量の自動補正

実際の生産ではフィードにより粉末を自動給粉する。しかし、充填するキャビティの形状や温度・湿度による流動性の変化のため安定した給粉量を得ることは容易でなく、製品重量のバラツキは大きな問題となっている。そこで圧粉体を秤量し、目標重量を越えていれば充填深さを浅く、足りなければ深くして給粉量を自動的に補正

するシステムを構築すれば安定した製品重量を確保することができる。充填深さの補正には特に付加駆動装置を設置する必要はなく、NCの有するオフセット機能を利用してバラツキに対する迅速な対応が可能となる。

5.2 パンチ圧縮縮み量の自動調整

成形パンチは圧縮荷重を受けて縮むため、圧粉体の寸法精度を確保し、抜き出し割れを防ぐにはパンチ位置の微調整が必要なことはすでに述べた。そこで、それぞれのパンチの圧縮縮み量を成形圧力から計算し、CNCがこの量を加味したプログラムを生成して成形を行う自動調整機能が考えられる。この方法では金型の摩擦や圧粉体のスプリングバック量を考慮していないものの、従来の金型設計や成形条件設定の煩雑さを大幅に改善するものと考えられる。

5.3 二段階成形法

複雑形状品を成形する際、粉末移動を行うとパンチの動きとともに計量した粉末が流れて充填密度に部分差ができる。この差はそのまま圧粉体の部分密度差となり、パンチ間の成形圧力に大きな差が生じて成形不良の原因となりやすい。

そこで給粉終了後、ある程度まで粉末を仮圧縮して粒子間の空気を追い出し、粉末を流れにくくしてから移動を行い圧縮成形する二段階成形法を考えた。この方法は一度圧縮したものを移動して再圧縮するという点で、一種の圧縮接合成形とも言える。仮圧縮し過ぎると圧粉体をせん断することになり最適な仮圧縮率の調査が必要である。

5.4 電動式モータフィーダの開発

給粉に関しては主に下パンチの動作について述べたが、フィーダの動きの重要性もまた見逃すことはできない。自動給粉でのフィーダの役目はブリッジングを起こさぬように揺すりながら、常に一定の条件で粉末を供給することにあるが、こうした条件も粉末の種類や製品の形状によってさまざまである。また、先に述べた給粉特殊動作や振動給粉の効果を最大限に引き出すには十分な量の粉末がキャピティに送り込まなければならない。そこ

で成形プレスと同様に駆動源を電動モータとして給粉位置や速度を制御できるモータフィーダの開発を行う。従来のフィーダと比較して複雑形状部分や薄物製品に対して安定した充填密度が得られるものと期待される。

6. ま と め

駆動源をACサーボモータに置き換え、上下それぞれ3軸をCNCが同時制御する電動式6軸CNC粉末成形プレスについてその開発経緯と特長を紹介し、今後の開発の展望を述べた。近年、粉末冶金でもますます高品質・高精度の製品が要求され、従来の粉末成形技術および粉末成形プレスでは満足できない風潮にあり、その結果として粉末射出成形や冷間加圧流動成形などが脚光を浴びている。これに対し、本研究で行った粉末成形プレスのCNC化は簡便で工程数の少ない冷間・乾式成形の利点を最大限に生かすものであり、機械的にも機能的にも粉末成形技術に新たな可能性をもたらすであろう。

今後は成形軸数を増やしてもっと複雑な形状を成形したり、ファインセラミクス製品を成形することも考えられ、その展開が注目される。(1991年8月14日受理)

参 考 文 献

- 1) 日本粉末冶金工業会：焼結機械部品—その設計と製造一，技術書院(1987)
- 2) 古川信雄：粉体粉末冶金協会昭和61年度秋季大会講演集，p.7(1986)
- 3) 若林章治，渡辺俊尚：新版 粉末冶金，技術書院(1978)
- 4) 日本粉末冶金工業会：粉末冶金用プレス用語，JPMA 4-1987
- 5) 稲葉善治，平 尊之，分部修一，千田浩司：全電動式射出成形機の動作特性と特長 FANUC AUTOSHOT series, FUNUC Tech. Rev., 3, 2, pp 77-88, (1990)
- 6) H. TSURU, T. NAKAGAWA, Y. INABA, M. MUR-ANAKA: Electric Drive CNC Press for Powder Compaction, Advances in Powder Metallurgy-1991, Proceedings of the 1991 Powder Metallurgy Conference, Chicago (To be published in October 1991)
- 7) 間山 治，山田晃二：焼結機械部品の接合技術について，素形材，27(1986)9, p.11-15