

粉末成形プレスの開発における CNC 技術の重要性

Significance of CNC Technology on Development of Powder Compacting Press

鶴 英明*・中川 威雄**

Hideaki TSURU and Takeo NAKAGAWA

近年、サーボモータや油圧サーボシリンダの大型化・高性能化を背景にして粉末成形プレスのサーボ化・CNC化が急速に進んでいる。本解説では、プレスの基本機能である粉末の圧縮成形過程を中心に、CNC技術がもたらす意義を従来の機械式/油圧式プレスと対比させて考える。また、金型作動バスの違いが成形に及ぼす影響を、開発機である電動式CNC粉末成形プレスを利用した成形実験を通して紹介する。

1. はじめに

粉末を原料とする焼結部品の製造プロセスでは、製品の品質を評価するうえで、成形品の密度が均一で、寸法精度が高く、割れ等の欠陥が無いことが不可欠な条件である。近年では焼結部品の用途範囲が広がるにつれて設計サイドがますます高密度で高強度かつ形状の複雑な製品を要求するようになっており、製造サイドとしては多くの技術的課題を抱えているのが現状である。こうした問題を解決するために多くの研究開発が進められているが、その方向性は二つに大別することができよう。一つは材料学的なアプローチによるもので、成形性・圧縮性といった粉末特性の改善、添加剤の開発、焼結条件の最適化などが挙げられる。その一方で、優れたポテンシャルを有する粉末であっても形状を付与する成形工程が重要なことは言うまでもなく、金型成形法に代表される圧縮成形プロセスに関する技術開発や解析が盛んに行われている。

特に後者の成形技術の開発については最近の顕著な傾向としてサーボ制御系およびCNC技術(Computerized Numerical Control)の導入が挙げられる。金属やセラミック粉末のグリーン体はその大部分が粉末プレスにより金型圧縮成形されるが、通常の鍛圧プレス機に比して1成形サイクル内で複雑な金型動作が必要とされる。製品形状が多段化すると金型の分割が必要となってプレス作動曲線はさらに複雑になるが、従来の粉末成形プレスは駆動制御軸数が限られているためツールセットの機構が複雑化して調整作業が煩雑になると同時に、金型設備が高価になることは避けられなかった。

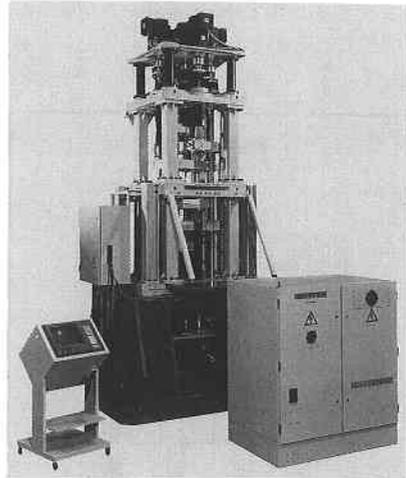


写真1 電動式6軸CNC粉末成形プレスの外観

こうした技術的問題を背景として、筆者らはプレス駆動源の純電子化、複数成形軸配置、CNC制御を3本の柱として写真1に示す電動式CNC粉末成形プレスを開発した^{1)・2)}。試作したプレスは成形形状の自由度を高めるだけにとどまらず、新しい成形プロセスの開発や従来経験的知識に頼ることの多かった成形条件の定量化が可能で、こうした特長を生かして一連の研究成果を上げてきた^{3)~7)}。また近年、成形機市場でもプレスメーカー各社による多軸CNCプレスの開発・投入が相次いでいる。最新のものではフィード機構を含む8軸すべてに油圧サーボを採用したプレスも登場し、今後もCNCサーボ技術の導入といった方向性でますます開発が進むものと考えられる。

そこで本解説では、電動式CNC粉末成形プレスの開発に着手してから6年が経過した現時点で、改めて粉末

*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

成形技術の CNC 化が有する本質的意義について考えてみる。

2. プレス駆動系のサーボ化と成形制御の CNC 化

前回の解説²⁾では電動式 6 軸 CNC 粉末成形プレスの開発経過と成形機能の特長を中心に述べた。本機は駆動源をすべて AC サーボモータに置き換えた新しいタイプのプレスであることから、機能的にも振動給粉法³⁾、二段階成形法⁴⁾、多層/多重成形法⁶⁾などの新しい成形技術の面が強調されがちだが、基本的な粉末の圧縮プロセスだけをとりても従来使われてきた機械式/油圧式プレスに比して優れた利点を有している。

2.1 複数成形軸の同時制御

その第一に挙げられるのがプレス作動の制御方法の違いである。すでに述べたように従来の粉末成形プレスは図 1 に示すようなツールセット方式が主流で、ツールセット内にはウェッジ、ローラ、メカニカルストップ、スプリングやエアシリンダなど複雑な機構要素が組み込まれている。これらが上下加圧ラムに連動して必要な金

型動作を創出し、可動成形軸数だけで見れば 5 軸以上を使用した成形も決して不可能ではない。

しかしながら各成形軸を同時に制御することが難しく、結果として上下方向から交互に圧縮する非同期成形を行っているのが現状である。その一例としてフローティングダイ方式ツールセットの作動曲線を図 2 に示す。上下パンチ 1 組を使用する最も単純な成形で、理想的には上下方向から同時にかつ一様な速度で加圧することが望ましい。ところが成形中にダイに働く摩擦力とスプリングなどが支えるフロート圧（支持圧）との関係から、実際には上パンチの下降とともに上方加圧が先に始まり、続いてダイの下降が始まって相対的に下方加圧が進むという非同期圧縮成形となる。また、ダイの下降動作を強制的に行うウィズドローアル方式ツールセットの場合でも、厳密には上方加圧（一次）→下方加圧→上方加圧（二次）といった三段階非同期動作で粉末を成形する。こうした非同期圧縮成形法は、理想的な同期圧縮法と等価であり、金型動作に制約がある場合には有効な手段とされてきた¹⁰⁾。しかし、図 2 に例示したような単純形状品の成形では問題とならないが、加圧方向に大きな段差を有する形状を非同期成形すると、圧縮過程の初期段階で密度の部分差が生じる。その結果、配分充填したはずの粉末が段差間で流動を起し、最終的には圧粉密度が不均一となって場合によっては成形欠陥の原因となることもある。

これに対して、CNC 粉末成形プレスは金型動作のすべてを個別に駆動および制御することが可能である。速度やタイミングの制御対象としては、両押し成形を行う電動式 CNC プレスは上下パンチ、またツールセットを使用してウィズドローアル方式で成形する CNC プレ

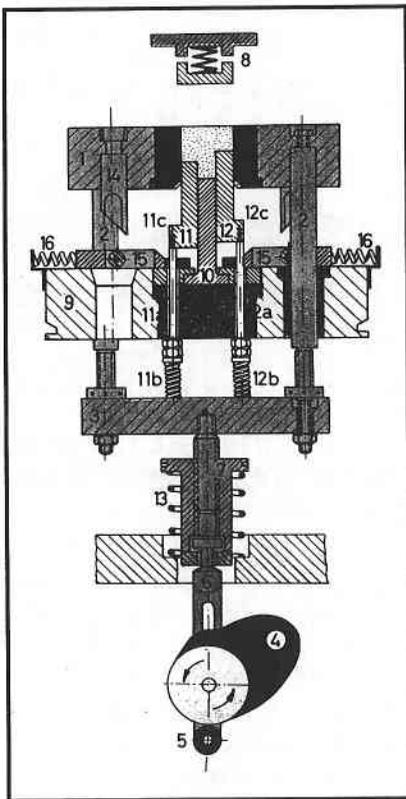


図 1 代表的なツールセットの機構概略図⁸⁾
 (1:ダイプレート 4:カム
 8:上パンチ 14:ウェッジ
 15:フォーク)

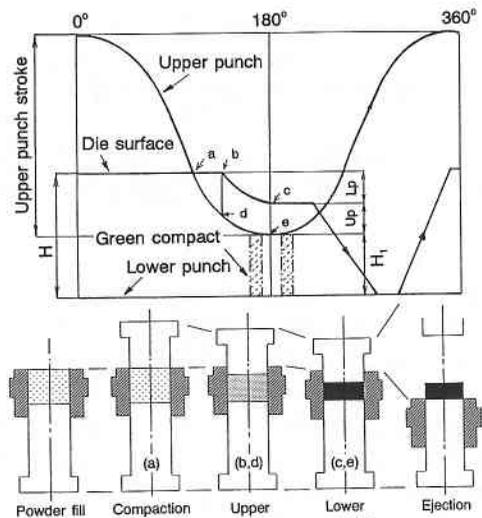


図 2 代表的な金型作動曲線⁹⁾ (フローティングダイ方式)

ス¹¹⁾ではダイと下パンチ、とタイプが異なるが、複数の成形軸を同時制御して理想的な同期圧縮を行う点でどちらも従来機の技術的問題を解決している。これとは逆に、形状的に充填時の密度差が不可避な場合もしくは意図的に圧粉密度差をつけたい場合などは部分的に圧縮の程度を調整することも可能である。

2.2 サーボ機構による金型作動パスの補間制御

CNC プレスのもう一つの特長は、前項にも深く関連することだが、金型作動パスを厳密に補間制御できることである。従来機のツールセットでは、金型の部分的動作をメカニカルストップの ON/OFF で行う PTP (Point-to-Point) 制御していたため、圧縮過程で高密度化の程度を知ることはほとんど不可能であった。こうしたブラックボックスに近い金型内での成形過程が、圧粉体の密度制御やクラックなどの欠陥の回避を難しくしていたと言っても過言ではない。その点、CNC プレスはあらゆる成形条件を数値化して目標とする金型位置までサーボ機構により直線あるいは必要な曲線で補間し、リアルタイムで成形過程を監視することが可能である。

2.3 圧粉体各部における成形圧力の測定

従来の油圧式/機械式プレスでは、各成形サイクルにおける加圧力を上ラム (油圧式はメインシリンダ、機械式はクランクやトルク軸) の総加圧容量で表していた。これは先に述べたように、ツールセットの各金型動作が上ラムに従属して決定され、最終的にはストップによって圧縮力を支持する構造となっていることに起因する。しかし実際には、圧粉体各部の圧縮過程や最終密度を監視したり、金型に過負荷が作用するのを防ぐため、各成形軸で個別に加圧力を測定することが望ましい。

電動式 CNC 粉末成形プレスにおける成形圧力の測定方法を図 3 に示す。その一つは加圧源である AC サーボモータの出力トルクから換算する方法で、油圧サーボプレスの場合にはシリンダ圧の測定となる。特別な測定素子を必要とせず簡便に成形圧力の変化傾向をモニタすることができるが、その反面、加圧点に至るまでに作用する摩擦などの外力やプラテンの自重などの成分が含まれるため正確な圧力値を測定することは難しい。

他方は歪ゲージにより金型変形量を検知して加圧力に換算する方法で、加圧点に近い位置での測定が可能である。歪ゲージを圧縮形ロードセルに代えてプラテン受圧部に埋め込めば、金型に対する汎用性は高くなる。この方法では測定点の決定に十分な配慮が必要であるが、ノイズの少ない純粋な加圧力を成形軸ごとに検出することができる。

基本的に、粉末成形におけるプレス動作は位置制御/加圧力モニタとするのが望ましく、既存の CNC プレスはほとんどがこの方式を採用している。しかし、圧粉体の抜出工程に限っては、摩擦力に打ち勝ちながらもバラ

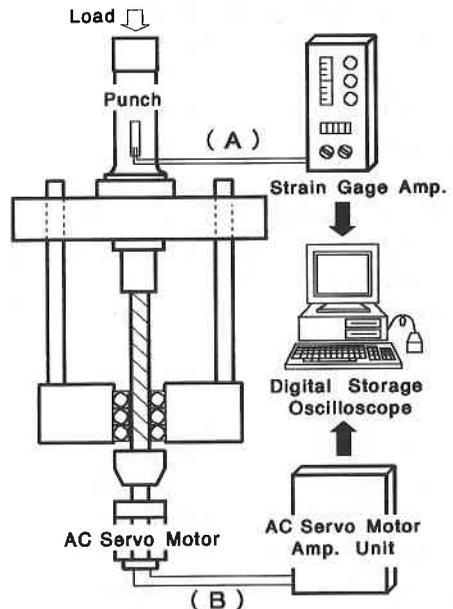


図3 電動式 CNC 粉末成形プレスにおける成形圧力の測定方法 (A) 歪ゲージ法 (B) トルク換算法

スよく割れを発生させずに抜き出すという圧力優先制御の必要性が指摘されており、今後、各成形軸で測定した加圧力を制御対象とする圧力サーボ系への展開も可能である。

3. CNC プレスを利用した成形実験例

それでは段差形状品の成形実験例を通して、CNC プレスの特長を考えてみる。ここでは前節の内容に沿って、特にプレスの圧縮および抜出動作について述べる。

3.1 実験方法

試験成形体の形状は、図 4 に示すような上一段下二段の L 字形、上面 30×15、下ボス面 10×15、下フランジ面 20×15 (寸法単位はすべて mm) とした。下ボス面を下第一パンチ、下フランジ面を下第二パンチで成形し、使用した金型構成から上面は 2 つのパンチで形成する。供試粉末には、アトマイズ鉄粉 (見掛密度 2.9Mg/m³) に潤滑剤として 1 wt% ステアリン酸亜鉛を混合調製したものを使用した。

今回の実験では、プレスの成形作動の違いによる圧縮過程への影響を比較するため、3 タイプの金型作動パスを設定した。ボス側 40mm、フランジ側 20mm に充填した粉末を、

- (a) 全成形軸による同期圧縮成形
- (b) 非同期圧縮成形 1 (ボス部を先に加圧)
- (c) 非同期圧縮成形 2 (フランジ部を先に加圧)

して最終的に均等な圧縮寸法比 (1.74) となるようにした。最終加圧時には 2 秒間、非同期圧縮成形における一

次加圧時には1秒間の保持時間を設定した。圧縮成形終了後、上パンチの上昇により加圧力を除荷し、下パンチで圧粉体を抜き出した。歪ゲージ法により、成形に使用した4軸の加圧力の変化を加圧開始から抜出完了まで連続的に測定し、デジタルストレージオシロスコープに記録・保存した。

3.2 作動パスが圧縮成形過程に及ぼす影響

各金型作動パスについて、経過時間に対する加圧力変化を図4に示す。同期圧縮成形(a)では、ボス部とフランジ部の加圧方向高さが異なること、下第一パンチを固定としたことなどから最大成形圧力には差があるが、圧粉体内各部では均等に高密度化が進行していると推測できる。

これに対してボス部の加圧を先行させた(b)では、フランジ部を成形する上下第二パンチの成形圧力が著しく増大しているのが認められる。充填後のルーズな状態でボス部の粉末を加圧したため、その一部がフランジ側に流動したことがその理由として考えられる。フランジ側が極度に高密度化しており、圧粉体にはL字コーナ部から

ボス側に走る亀裂が観察された。また、フランジ部を先に加圧した(c)では(a)、(b)とまったく異なる圧縮過程を示した。上下第二パンチの一次加圧により、圧縮が始まっているボス側にも圧力が伝達されている。(b)の場合とは逆の粉末流動が起こってボス側密度が非常に高くなっており、コーナ部からフランジ側にヒゲ状の亀裂が発生した。

CNC プレスの特長は、図4(a)に示すように段差形状品を複数の成形軸によって均等に圧縮成形することであるが、疑似的に(b)、(c)のような非同期圧縮成形の過程を設定することもできる。これを換言すれば、CNC プレスを利用して、従来式プレスによる圧縮成形過程の解析が可能であることを意味しており、ある製品形状に対する金型作動パスの最適設定に大いに役立てることができる。

3.3 抜出圧力と割れの発生

図4に示した加圧力変化では、圧縮成形が終了して上パンチが上昇した後、下第一・第二パンチによる圧粉体抜き出しの過程が記録されている。圧粉体の抜き出し割れを防止するためには、圧粉体に張力が作用しないよう留意し、下面に均等な抜き出し力を加えることが重要である。図4(a)は良好な抜き出し例を示すが、下第一パンチを主体にL字形圧粉体を抜き出すとフランジ部側面に大きな割れが生じた。一方、下第二パンチの抜出圧力が過大になるとコーナ部から水平方向に割れが発生してボス部が破断した。電動式 CNC プレスでは、最終加圧力による金型変形量を考慮して除荷時に下パンチ位置を微調整し、抜出圧力分布を変化させる。抜き出し割れの発生原因はモニタした圧力から容易に判断することができる。

4. おわりに

MC/TC に代表される加工機械分野ではサーボ化および CNC 化が早くから進められ、現在の精密加工技術の基盤となっている。ところが、鍛圧機械分野では近年になってやっとこうした潮流が押し寄せてきたところと言えよう。これは加圧力の発生源となるサーボモータや油圧サーボ機構の大型化・高性能化といった開発成果に負うところが大きい。そこで筆者らは鍛圧機械の中でも粉末成形プレスに着目してモータ駆動/CNC 制御とした試作機を開発し、成形技術に関する研究を進めてきた。粉末成形には複雑な金型動作、高精度な位置決め能、多様なシーケンスの設定などが必要であり、CNC 技術が最も有用な加工技術であると判断したためである。CNC 粉末成形プレスについては多くの特長が挙げられるが、本解説では特にサーボ化・CNC 化が粉末の圧縮成形にもたらす意義を従来機と比較して考え、電動式 CNC 粉末成形プレスを利用した実験例を紹介した。

駆動源にサーボ機構を導入してすべてのプレス作動を

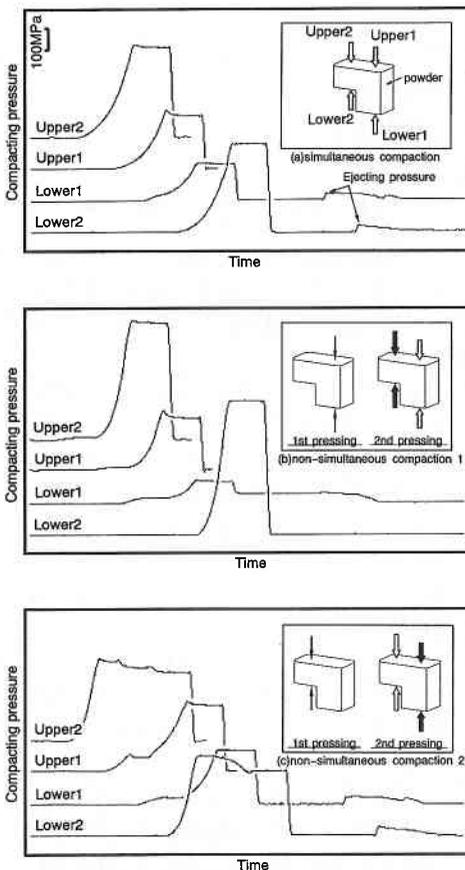


図4 金型動作パスが及ぼす圧縮過程への影響 (a)同期圧縮成形 (b)非同期圧縮成形1 (c)非同期圧縮成形2

CNC 制御することにより、従来式プレスが根本的にもつ曖昧さや経験的知識に頼る部分を排除し、粉末の圧縮過程を厳密にかつ定量的に管理することが可能となった。製品寸法精度、圧粉体密度、成形欠陥など粉末成形技術には永年にわたる課題が多く残されており、これからの CNC 粉末成形プレスの開発および利用がこれらの解決に大きく寄与することが期待される。

最後に、電動式 CNC 粉末成形プレスの開発および研究に御協力いただいた FANUC(株)、日立粉末冶金(株)に深く感謝の意を表します。
(1993年9月17日受理)

参 考 文 献

- 1) H.Tsuru, Y.Inaba, M.Muranaka and T.Nakagawa: Electric Drive CNC Press for Powder Compaction, Advances in Powder Metallurgy - 1991, MPIF/APMI, 1(1991) 89.
- 2) 鶴 英明, 中川威雄: 電動式 6 軸 CNC 粉末成形プレスの開発と今後の展望, 生産研究, 43, 11 (1991) 62.
- 3) 鶴 英明, 中川威雄: 粉末の充填および成形特性に及ぼす振動給粉法の効果, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1992) 927.
- 4) H.Tsuru, T.Masuda and T.Nakagawa: Double Step Compaction of Multi-level Components with the Electric Drive CNC Press, Advances in Powder Metallurgy - 1992, MPIF/APMI, 2(1992) 173.
- 5) H.Tsuru and T.Nakagawa: Studies on Crack Formation in P/M Compacting, Advances in Powder Metallurgy - 1992, MPIF/APMI, 2(1992) 291.
- 6) H.Tsuru and T.Nakagawa: Multi-layered P/M Components by Repetitive Compaction Process Using CNC Compacting Press, Advances in Powder Metallurgy - 1993, MPIF/APMI (to be published in October, 1993)
- 7) 鶴 英明, 中川威雄: 粉末成形過程における予備圧縮の効果, 生産研究, 45, 6 (1993) 437.
- 8) S.I.Hulthén: Höganäs Iron Powder Handbook, Höganäs-Billesholms AB, D20(1963) 33.
- 9) 日本粉末冶金工業会規格: 粉末冶金プレス用語 JPMA4 - 1987, 付図 25 8009 (1987)
- 10) 粉末冶金技術協会編: 金属粉の成形, 日刊工業新聞社, (1964) 188.
- 11) T.Yokoyama and T.O'Connor: A New System to Achieve Simultaneous Compaction Using Computer Controlled Mechanical Pressing Motions, Proceedings of 1993 Powder Metallurgy World Congress, Kyoto, July 11-15, 1993