

粉末成形過程における予備圧縮の効果

The Effects of Precompaction in P/M Compacting Process

鶴 英明*・中川 威雄**
Hideaki TSURU and Takeo NAKAGAWA

1. はじめに

粉末成形法は原料となる金属やセラミックス粉末を直接最終製品もしくはそれに近い形状に押し固める技術で、後加工が省略でき材料の歩留まりがよい点で他の加工法に比して優れた経済性および量産性を示す。製品形状を付与する方法としては金型プレス成形法が最も広く用いられ、近年焼結部品に対する要望はますます多段形状化する傾向にあり成形金型にもこれに応じた複雑な動作が要求される。一方、焼結体の寸法精度を確保して一様な材料特性を得るには圧粉密度の均一化が重要で、型内における粉末の高密度化過程を十分に考慮した成形シーケンスの設定が必要となる。こうした技術的背景から、筆者らはサーボモータ駆動/CNC 制御方式を採用した多軸プレスを開発して新しい粉末成形プロセスに関する研究を進めてきた^{1),2)}。この試作機は従来式のプレスに比して金型位置や速度の制御性に優れるだけでなく、プレス構成に制限されずプログラムにより自由なシーケンスを設定できるという特長を有す。本報ではこれを利用して圧縮成形工程を予備圧縮と最終圧縮に分割したプロセスを提案し、段差形状品の圧粉密度均一化や接合成形への適用を試みた。各プロセスにおいて全圧縮量に対する予備圧縮の最適量を調査し、これを高密度化過程における粉末挙動の変化と関連づけて考察を加えた。

2. 予備圧縮成形

粉末成形過程において給粉工程ではキャビティへ高密度かつ均一な充填を行うために流動度の高い粉末が求められる。しかし給粉が完了すれば一転してキャビティ各部に配分した粉末を流動させずに成形することが望ましい。そこでキャビティ内の粉末を高密度化して挙動特性の変化を積極的に与えるのが予備圧縮成形である。

通常の成形プロセスは給粉から圧縮成形、抜出と続く

*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

工程を1サイクルとして従来式の粉末成形プレスではシーケンサにより工程配分を行う。しかし成形シーケンス設定の自由度は一般に低く、特にクランク式を代表とする機械プレスでは加圧動作が下死点近傍に限られるという構造的な制約から上述した予備圧縮成形は実用上ほとんど不可能であった。これに対し、CNC プレスでは機械部にまったく手を触れることなくプログラム設定のみで所望の予備圧縮シーケンスを加えることが可能である。

予備圧縮成形の程度は充填粉末から圧粉体形状への全圧縮量に対するストローク比で表し、これを予備圧縮率と定義した。これに従えば通常のシーケンスは予備圧縮率を0%としたプロセスと等価である。

3. 適用例1: 二段階成形法による圧粉密度の均一化³⁾

加圧軸方向に段差を有する形状品の成形では粉末移動工程を必要とする場合が多い。これはダイ上面を基準に体積計量した粉末を、上下パンチによる一様な圧縮動作で均一密度に成形できるようあらかじめ所定の形状に再配置する操作である。しかし3段形状品を例に行った成形実験ではCNC プレスによる適切な金型作動を設定し

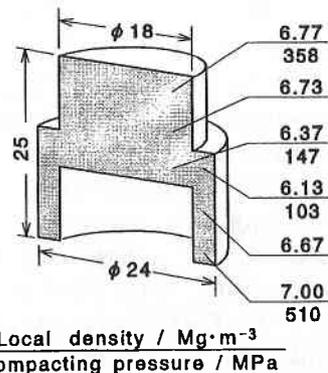


Fig. 1 Compacting pressure and local density of 3-level green compact

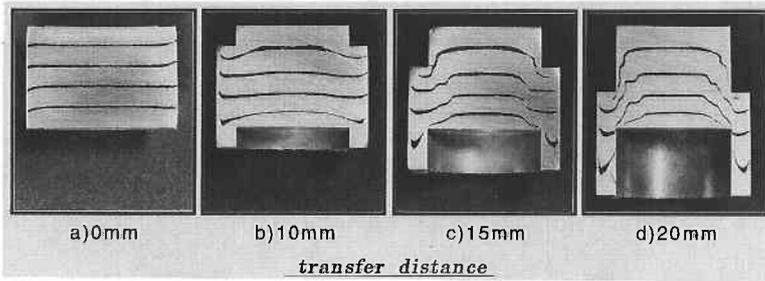


Photo. 1 Cross-section view of sintered specimens exhibiting the variation of power behaviour with transfer distance

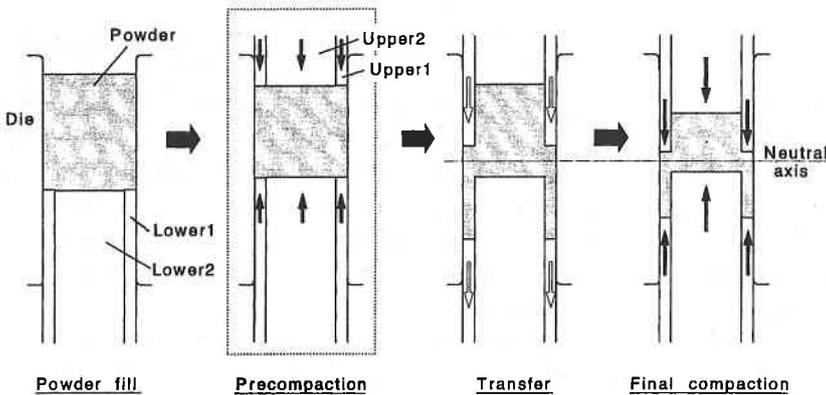


Fig. 2 Schematic diagram of Double Step Compaction process

たにも関わらず成形圧力や圧粉密度に Fig. 1 に示すような顕著な部分差が認められた。充填時に薄い銅粉末層を等間隔に挟み込んで成形過程における粉末挙動の可視化を試みた結果、Photo. 1 に示すように移動工程の金型作動にともない段差間で粉末の再配分が生じることが明らかになった。キャビティに充填した粉末はルースな状態にあるため金型壁との摩擦により流動が起こるものと推測した。そこで移動工程に先立つ予備圧縮成形での高密度化による粉末流動の抑制を考えたのが二段階成形法である。

3.1 実験方法

二段階成形工程の概念図を Fig. 2 に示す。給粉終了後、上パンチの下降に続いて両押法により予備圧縮成形を行う。最終圧縮寸法比2.0に対し予備圧縮率を0~60%の範囲で変化させて先の3段階形状品を成形し、圧粉体の密度分布や各段の成形圧力および成形過程における粉末挙動に及ぼす影響を調査した。供給粉末として鉄基系混合粉 (Fe-1.5 Cu-0.6 Gr, 1wt% ZnSt を混合、見掛密度 $3.42\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、日立粉末冶金株) を使用した。成形圧力を各金型にはった歪ゲージにより測定し、圧粉体を分割して水アルキメデス法により内部密度分布を求めた。

3.2 実験結果

Fig. 3 に予備圧縮率に対する圧粉体部分密度の変化を示す。圧縮率が低い範囲では Fig. 1 に示した密度分布との相違は見られないが40~45%の範囲で各部密度が急激に接近した。圧粉体各段の成形圧力も予備圧縮率に対してほぼ同様の傾向で変動した。しかしさらに圧縮率が増大すると粉末移動時の圧力が成形時を上回るようになり再び内部密度差が生じるとともに圧粉体表面や段差境界線上に成形欠陥が観察された。Photo. 2 に示した粉末挙動の変化も上述した結果とよく一致している。以上から二段階成形法により密度が均一でかつ欠陥の無い3段階形状品を成形する最適予備圧縮率は40~45%と判断した。

4. 適用例 2 : 多重成形法による径方向複合品の製造⁴⁾

給粉と圧縮成形を繰り返し行う特殊プロセスにより加圧軸方向または径方向に圧粉体を組み合わせた複合焼結部品の製造が可能である。材料特性の異なる粉末を配置すれば単一素材では不可能な複合機能を付与することができ、すでにその一例として単純形状の二層軸受が実用化されている。従来法では二種類以上の粉末を配置するためキャビティ間に仕切パンチを設けて複合充填を行っているが金型構成が複雑化することは避けられない。そ

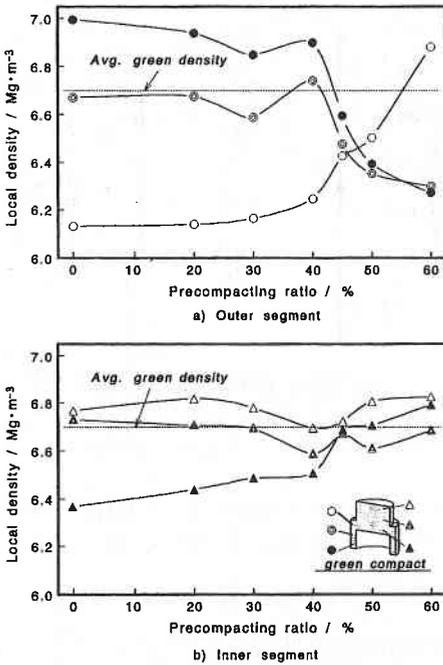


Fig. 3 Effects of precompaction on local green density

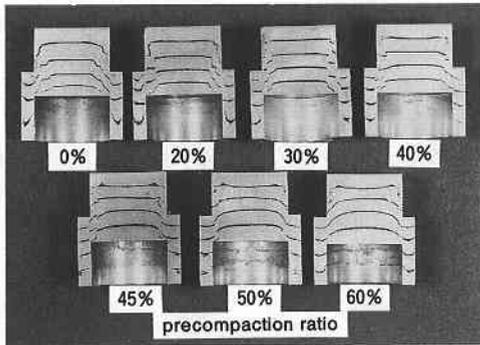


Photo. 2 Variation of powder behaviour during transfer and compression with precompaction

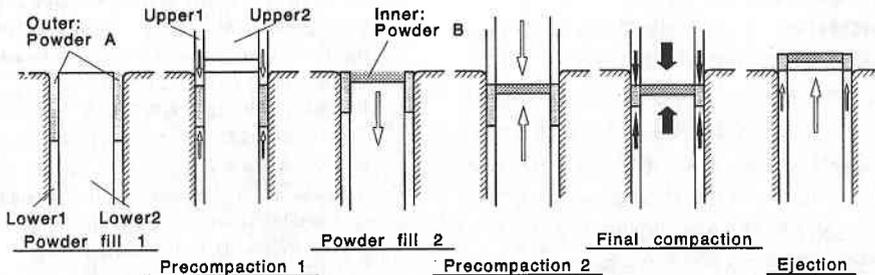


Fig. 4 Process diagram of vertical double layer compaction with precompaction

ここで CNC プレスを利用して先に充填した粉末を予備圧縮することにより仕切パンチを用いず通常の金型構成で径方向に圧粉体を複合化する多重成形プロセスを考えた。

4.1 実験方法

Fig. 4 に二重成形法の工程概略図を示す。最初にアウター部に充填した粉末 A を両押法で予備圧縮成形する。その内面を新たなキャビティ壁としてインナー部に粉末 B を充填した後、予備圧縮により全体密度を均一化してから製品形状に最終圧縮する。粉末 A の予備圧縮体には粉末 B の充填時に混合しないよう十分な保形強度が要求されると同時に焼結を経て両粉末が強固に接合することが重要である。そこで予備圧縮率が及ぼす粉末 A の保形性および焼結体接合部強度への影響を調査した。本実験では供試粉末として Gr 量が異なる鉄系混合粉 (粉末 A : Fe-1.5 Cu-0.6Gr, 粉末 B : Fe-1.5 Cu-1.0Gr, 共に 1 wt% ZnSt を混合) を組み合わせて使用した。分解アンモニアガス中、1130°C で 30 分間焼結した二重成形体を荷重試験機 (AUTOGRAPH AG-10TE, (株)島津製作所) による打ち抜き試験に供し、最大測定荷重を接合部面積で除した値を接合部強度として比較した。

4.2 実験結果

Fig. 5 に予備圧縮率による接合部強度の変化を示す。Type I は粉末 A をアウター部、粉末 B をインナー部に配置し、Type II はその逆の組み合わせとした。アウター部の予備圧縮体とインナー部粉末との混合を完全に避けるには 30% 以上の予備圧縮率を必要とした。圧縮率 40% まではインナー部で破壊が生じて測定強度は基材のせん断強度とほぼ同値を示すが、圧縮率の増大とともに接合部周上での破壊が始まって強度が低下し最終的には境界部全周にわたる破断となった。接合部強度には粉末粒子の機械的結合や固相拡散、焼結中の寸法変化による焼きばめ効果などの力が作用するが、予備圧縮率の増大に対する低下傾向は境界部における粒子相互のアンカー効果が弱まることに起因すると推察される。予備圧縮率 100% に近い領域での接合部強度については浅香⁵⁾が行った実験と異なる結果を得ており、今後さらに詳細な

研 究 速 報

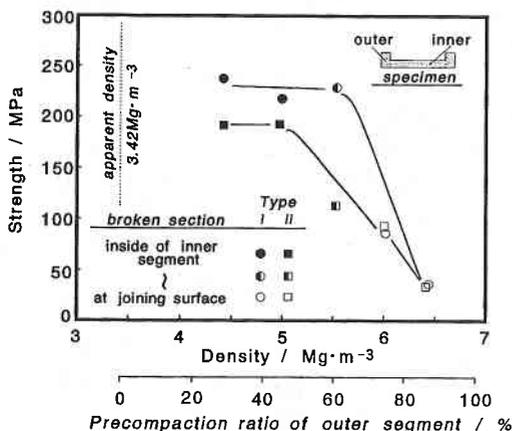


Fig. 5 Relations between joining strength and precompaction of outer segment [Type I: Fe-1.5 Cu-0.6Gr (outer)/Fe-1.5 Cu-1.0Gr (inner), Type II: in reverse combination]

調査を行う予定である。以上より供試鉄基系混合粉の二重成形法における最適予備圧縮率は30~40%と判断した。

5. 最適予備圧縮率に関する考察

予備圧縮成形を導入した2つのプロセスについて同種の供試粉末に対する最適予備圧縮率を調査した結果、二段階成形法では40~45%、二重成形法では30~40%という値を得た。これらの圧縮率範囲はほぼ一致した上限値を示しており、これを越えた圧縮率では段差境界部に成形欠陥が生じたり複合体の接合部強度が低下するなど焼結品の機械的品質に悪影響を及ぼす点で共通している。そこで高密度化に伴う粉末挙動特性の変化という観点から以下のような考察を行った：

通常充填した粉末は多くの空隙を含んでルースな状態にあり粉粒体的挙動を示す。これを圧縮して高密度化すると粒子は再配列を繰り返しながら次第に動きが拘束され、ある密度以上になると塑性体的挙動を示すようになる。この境界域は一般に相対密度で70%近傍と考えられ、近年研究が盛んな粉末成形過程のシミュレーションでもこの領域を境に解析モデルを離散型と連続体とに区別している。本実験での予備圧縮率40%を見掛密度と最終圧縮比から相対密度に換算すると Fig. 6 に示すように約62%となりこの境界域とほぼ一致することが明らかになった。これは経験的に論じてきた密度に対する粉末挙動特性の変化を CNC プレスにおける成形変数として定量的に表現したものと解釈できる。同時に実際の成形では粉末特性値として従来の見掛密度や流動度だけでなく、

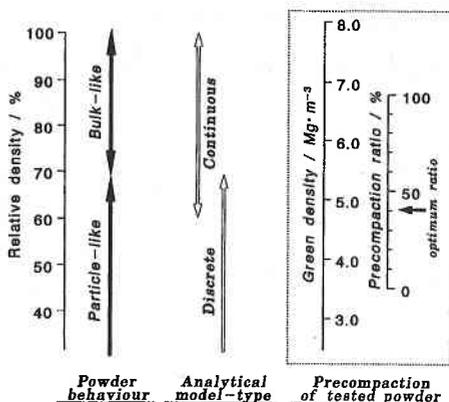


Fig. 6 Relation between optimum precompaction ratio and powder characteristics depending on density

高密度化過程における流動性や粒子圧着性の変化を把握することが非常に重要であることを示唆している。

6. おわりに

予備圧縮成形を利用した新しいプロセスとして二段階成形法および多重成形法を提案し、CNC プレスにより最適予備圧縮率の調査を行った。最適範囲の上限値は両成形法ではほぼ一致しており、これは高密度化に伴い粉末挙動特性が変化する領域と深く関わっていると考えられる。今後は予備圧縮成形が材料学的特性に及ぼす影響についても詳細に調査していきたい。

本実験を遂行するに当たり実験試料の提供および技術的協力を戴いた日立粉末冶金㈱に深謝致します。

(1993年3月16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) 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.
- 4) 鶴 英明, 中川威雄: 電動式 CNC 粉末成形プレスによる径方向多重成形の試み, *粉体粉末冶金協会平成4年度秋季大会講演概要集* (1992) 192.
- 5) K. Asaka and T. Hayasaka: Diffusion Bonding Method to Assemble Green Compacts during Sintering, *Metal Powder Report*, **39**, 6 (1984) 347.