

# インパクト成形における寸法精度向上のための サーボプレススライドモーションの検討

## *Servo Press Slide Motion for Improvement of Dimensional Accuracy in Impact Extrusion*

四宮 徳章\* 白川 信彦\*  
Naruaki Shinomiya Nobuhiko Shirakawa

(2013年6月17日 受理)

Experimental and analytical studies were conducted to clarify the preferred servo press slide motion for obtaining uniform cups by one operation of impact extrusion. Cylindrical billets of aluminum (A1070) were extruded into cups using a servo press. The inner and outer diameters were measured along the longitudinal axes. Effects of the servo press slide motion on the billet temperature were investigated using finite element method. The following results were obtained: 1) Heat generated by processing strongly influenced the cup diameter accuracy. 2) A constant sliding speed made the diameter small at the cup bottom. 3) Slowing the slide speed in the middle of the extrusion process improved the dimensional accuracy.

**Key Words:** plastic working, servo press, impact extrusion, finite element method, heat generation

### 1. はじめに

衝撃押出し成形は、バルク状の素材から深い薄肉容器形状を一工程で成形できる加工法であり、近年、リチウムイオン電池などの電池筐体の加工において注目を集めている。深い薄肉容器形状を加工する場合に多工程を要する深絞り成形に比べて、衝撃押出し成形は高効率の製造ができる、残留応力が小さいなどの長所を有するが、寸法精度が低い、適用できる材料に制限があるなどの課題がある。特に寸法精度は、加工発熱による素材の熱膨張・熱収縮や、金型の弾性変形<sup>1)</sup>などが影響を及ぼすと考えられている。

一方、サーボプレスは、従来のプレス機では実現できなかったスライドモーションの自由な設定を可能にするプレス機である。塑性加工の現場ではサーボプレスの導入が急速に進んでおり、スライドモーションの

検討により、成形性の向上<sup>2)</sup>や寸法精度の向上<sup>3)</sup>を達成した事例が報告されている。しかし、衝撃押出し成形を対象にしたものはほとんど報告されていない。また、スライドモーションの設定を考慮した成形解析を行い、解析からそのメカニズムを明らかにした例も見当たらない。本報では、サーボプレスのスライドモーションを駆使して、加工発熱による素材の温度上昇をコントロールし、衝撃押出し成形において寸法精度を向上させた。さらに、成形解析を用いて成形中の素材の温度分布を明らかにすることで、寸法精度向上のメカニズムについても検討を加えた。

### 2. 実験および解析方法

成形には2000 kN リンク式 AC サーボプレス (コマツ産機, H1F200) を用い、工具には、SKD11 製のパンチおよびコンテナを用いた。また、パンチ上部に設置した SKD11 製の円柱ブロックにひずみゲージを貼

\* 加工成形科

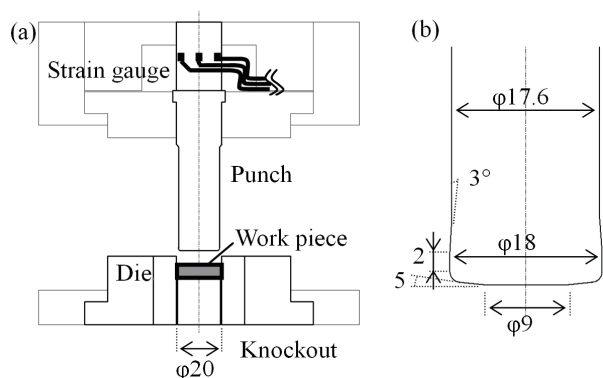


Fig. 1 Schematic illustrations of (a) cross section of experimental apparatus and (b) front edge of punch.

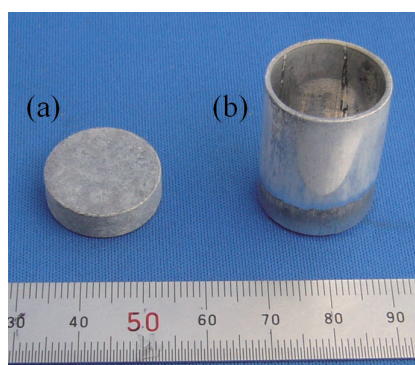


Fig. 2 Appearance of (a) billet and (b) extruded cup.

付して、成形荷重を測定した。Fig. 1 に概略図を示す。素材には、化成皮膜処理を行った直径 19.5 mm、高さ 6 mm の A1070 材 (耐力 :86 MPa, 引張強さ :95 MPa, 伸び :28 %) を用いた。Fig. 2 に素材および成形品を示す。成形品の内・外径の測定には、三次元形状測定機 (ミットヨ, Quick Vision PRO) を用いて、スタイラスにより内径で 8 点、外径で 6 点の座標を測定し、円近似することで直径を求めた。

今回検討を加えたサーボプレスのスライドモーションを Fig. 3 に示す。リンクモーションの 50 spm を 100 % として、① 100 % 一定モーション、② 20 % 一定モーション、③ 下死点上 5 mm で 100 % から 20 % に減速するモーション、④ 下死点上 4 mm で 100 % から 20 % に減速するモーション、⑤ 100 % の速度で下死点上 4 mm において 0.1 s 停止するモーション、⑥ 100 % の速度で下死点上 4 mm において 1s 停止するモーションの 6 種類を検討した。以降、①②を一定モーション、③④を減速モーション、⑤⑥を停止モーションと称す。

解析には、鍛造シミュレータ (NTT データエンジニアリングシステムズ, simufact. forming 10.0) を用いた。二次元の軸対称問題とし、素材は弾塑性体、工具は弾塑性体と定義した。工具形状は上述の三次元形状測定機

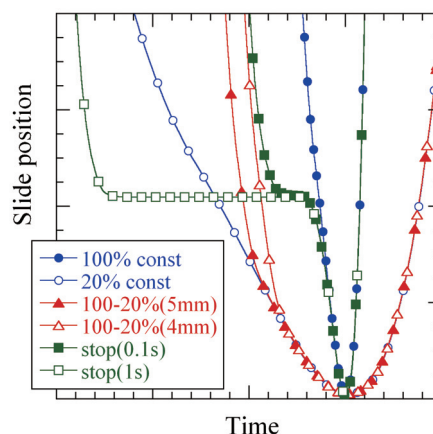


Fig. 3 Various slide motion patterns used in this study.

を用いてパンチ外径について 2 断面およびコンテナ内径について 9 断面の測定を行い、解析に用いた。また、素材および工具の機械的特性には、ソフトウェアに収録されているライブラリデータを引用し、素材には速度依存性 (ひずみ速度  $0.001 \sim 10 \text{ s}^{-1}$ ) および温度依存性 ( $20 \sim 120 \text{ }^\circ\text{C}$ ) を考慮した 1000 番系のアルミニウム、工具には SKD11 を設定した。実際の成形では、スライド条件によりひずみ速度  $10 \text{ s}^{-1}$  や素材温度  $120 \text{ }^\circ\text{C}$  を超える変形箇所が存在すると思われるが、素材の変形抵抗はひずみ速度の低い範囲で支配的に変化し、また、温度依存性については変形時の素材温度を概ね包含していると考えられるため、大きな差異はないと思われる。摩擦係数としては、素材-パンチ、素材-コンテナともせん断摩擦係数を 0.1 に設定し、素材および工具の初期温度は  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 、素材-工具間の熱伝達率は  $20 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  に設定した。サーボプレスのスライドモーションの設定には、実際にプレスから出力される時間-ストロークデータを用いた。また、直径は、加工発熱により昇温した成形品の冷却解析を行い、熱収縮後の最終形状を三次元の STL 形式で出力して求めた。

### 3. 実験および解析結果とその考察

#### 3.1 実験および解析結果

設定したスライドモーションと実際のスライド動作にかい離がないかを確認するために、まず、各モーションのスライド速度について調べた。Fig. 4 は、スライド速度を下死点からの距離で整理したものである。100 % 一定モーションでは、下死点上 5 mm の位置まで急激に速度が低下し、その後 1 mm 付近まで  $40 \text{ mm/s}$  程度のほぼ一定速になった。これは実験に使用したサーボプレスのリンク機構に起因するものである。また、20 % 一定モーションでは、100 % の 20 %

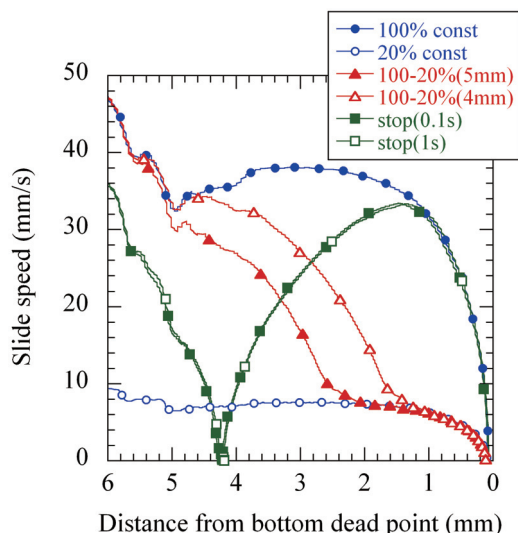


Fig. 4 Slide speed of various slide motion patterns used in this study.

程度(8 mm/s 程度)になっており、設定どおりに動作したと言える。減速モーションでは、下死点上 5 mm および 4 mm から 20 % の速度に向けて減速を開始するため、2 mm および 1 mm 付近まで 20 % の速度に減速できていなかった。また、停止モーションでは、常に 100 % の速度設定であるにもかかわらず、成形開始の 6 mm 付近から 1 mm 付近まで、0.1 s、1 s の両停止モーションとも、100 % 一定モーションより速度が低かった。これは、4 mm での停止に向けた減速区間とその後の再起動による加速区間が必要なためである。素材と金型の熱移動に及ぼすスライド速度の影響は大きく、それによる素材の熱収縮は大きいと思われる。寸法精度の向上を達成するためには、このような実際のスライド動作を把握することが非常に重要であると考えられる。

次に、各モーションで成形した時のパンチ荷重-ストローク線図の一例を Fig. 5 に示す。また、解析結果も併せて示す。最大パンチ荷重はモーション間では大差はないが、実験結果の方が解析結果より高い荷重を示した。これは解析に用いた材料データおよび摩擦係数に起因するものと考えられる。また、成形後半で各モーションのパンチ荷重に差が生じた。成形後半にスライド速度の低い 20 % 一定モーションや減速モーションで荷重が高くなるという傾向は、実験と解析で一致した。素材強度の温度依存性を考慮しない解析の場合には、成形後半のパンチ荷重の低下が現れなかったことより、パンチ荷重の低下は、加工発熱による素材の昇温と素材強度の温度依存性に起因するものと考えられる。

次に、成形品の内径および外径の測定結果を Fig. 6

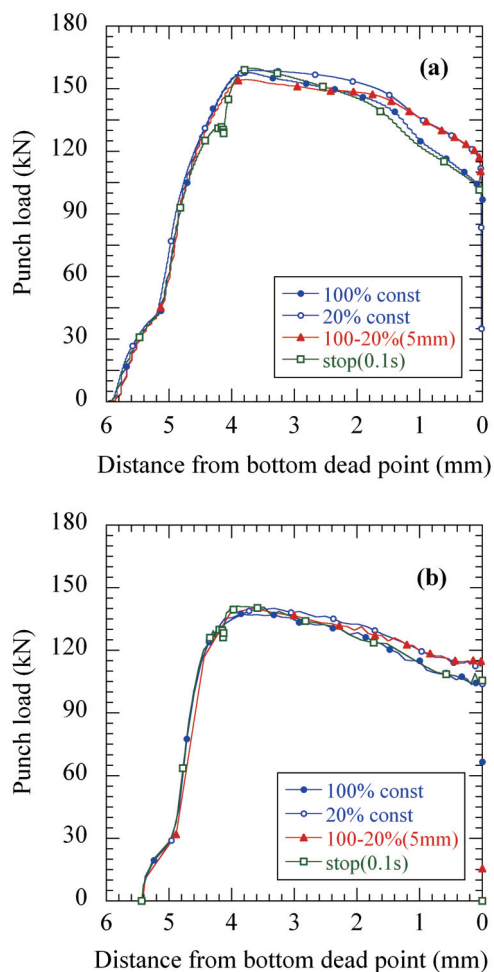


Fig. 5 Load curves for various slide motion patterns of (a) experimental and (b) calculated.

に示す。なお図中、縦軸は成形品の底部を 0 mm としてその高さを示し、本報では、高さ方向の直径の差が小さい場合に寸法精度が良いものとして評価した。図より、減速モーションを除く他のモーションでは、内径および外径は、底部(高さ 5 mm)から端部(高さ 21 mm)に向かって徐々に大きくなるのがわかる。また、20 % 一定モーションと比較して、100 % 一定モーションでは、底部から端部のいずれにおいても内径、外径ともに小さかった。これらは成形時の加工発熱に応じた加工後の熱収縮が原因と考えられる。一方、減速モーションでは、高さ方向に対する直径の差が他のモーションに比べて小さく、下死点上 5 mm の減速モーションでは内径において、4 mm の減速モーションでは外径において、直径の差が小さかった。また、停止モーションでは、0.1 s、1 s ともに高さ方向に対する直径の差が大きかった。これらは成形中の素材温度に起因するものと考えられるが、詳しくは次節で考察する。以上より、スライドモーションが直径に及ぼす影響は大きく、スライドを適切に制御することで高さ方向の直径の差を小さくすることができた。また Fig. 7 に示

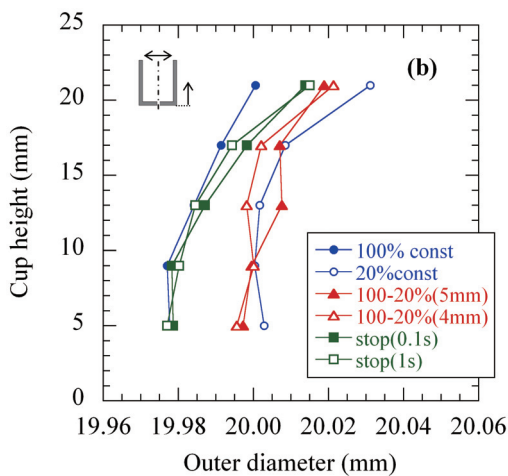
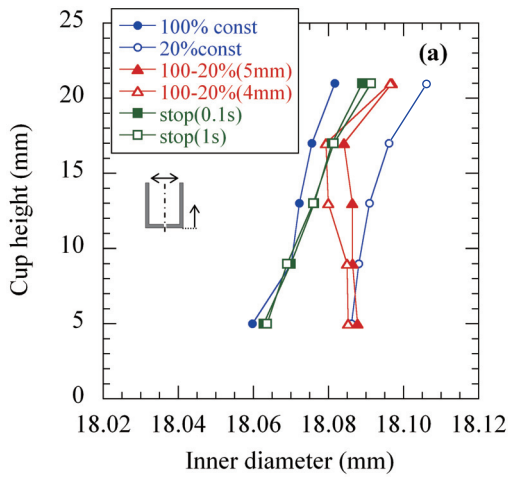


Fig. 6 Variation of (a) inner and (b) outer diameters of impact extruded cup (experimental).

した解析結果においても、内径・外径に及ぼすスライドモーションの影響は実験結果に近い傾向を示し、減速モーションでは、高さ方向の直径の差が小さいことを確認できた。

### 3.2 成形中の素材温度と寸法精度の考察

内径寸法および外径寸法は成形中の素材温度によって大きく影響を受けると考え、成形中に最も素材温度が高くなると思われるパンチ肩近傍の素材温度の推移を、解析により調べた。結果を Fig. 8 に、下死点での素材および金型の温度分布を Fig. 9 に示す。図より、スライド速度が 100 % と高い場合は素材温度の上昇が大きく、最高で約 140 °C に達することがわかる。一方、スライド速度が 20 % と低い場合は、最高温度が 85 °C 程度であった。これは、スライド速度が低速の場合、加工により発生した熱が金型へ多く移動するためと考えられる。また、減速モーションでは、成形初期に素材温度が上昇した後、成形中期以降で素材の昇温が抑制された。特に、下死点上 5 mm の減速モーションでは、下死点上 3 mm 以降の素材温度が 80~85 °C

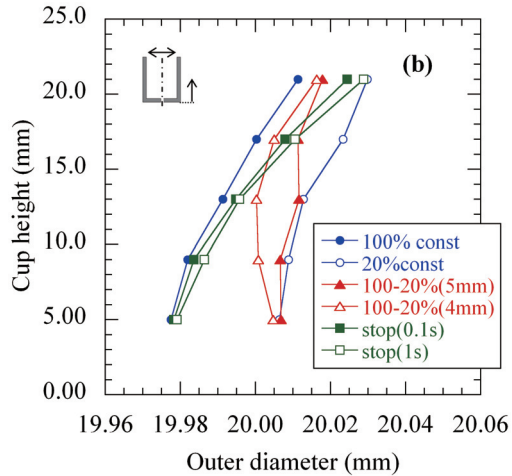
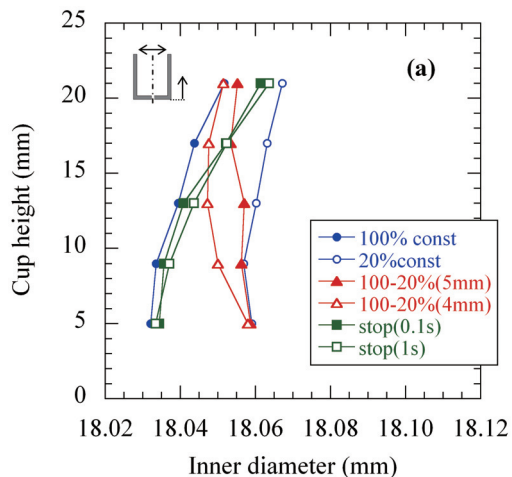


Fig. 7 Variation of (a) inner and (b) outer diameters of impact extruded cup (calculated).

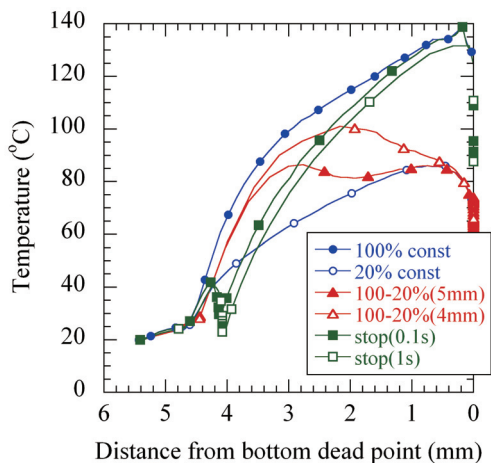


Fig. 8 Effect of slide motion patterns on maximum work piece temperature (calculated).

程度でほぼ一定であった。一方、停止モーションでは、スライド停止の下死点上 4 mm までに素材温度の上昇がほとんどないため、素材温度の低下に対する効果は小さかった。また、再起動後は素材の温度が急激に上昇し、100 % 一定モーションとほぼ同程度の約 140 °C

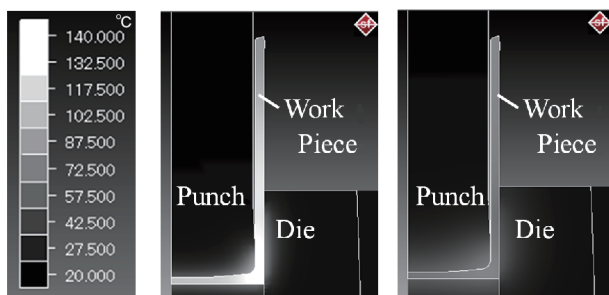


Fig. 9 Distribution of work piece and tools temperature at bottom dead point (calculated).

にまで達した。この点については、スライド停止位置を見直し、素材温度の上昇を抑制するモーションを検討する必要がある。

次に、成形品側壁部の各部位が成形中パンチ肩近傍を通過する際の温度を Fig. 10 に整理した。図より、100%一定モーションや停止モーションでは、成形品底部に近いほど成形時の温度がきわめて高く、熱収縮により寸法が小さくなると考えられる。一方で、下死点上 5 mm の減速モーションは、各高さの成形温度が約 80 °C で一定であり、成形高さごとの熱膨張、熱収縮の差が小さいと考えられる。これらは、Fig. 6 および Fig. 7 に示した直径と同様の傾向を示し、成形途中のスライドの減速は、素材温度の適切な制御を可能にするため、成形品高さ方向の直径の差を小さくできることがわかった。

#### 4. まとめ

衝撃押し出し成形の寸法精度向上のため、サーボプレスのスライドモーションの検討を行った。また、解析を用いて現象の解明を試みた。その結果、成形品の内径および外径に及ぼすスライドモーションや加工発熱の影響は大きいことがわかった。また、スライド速度を一定に設定した場合、素材温度は成形初期から完了

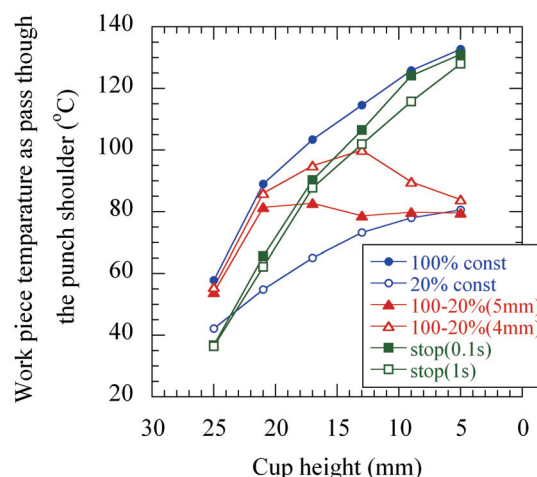


Fig. 10 Distribution of work piece temperature as pass through the punch shoulder (calculated).

まで上昇し続けるため、熱収縮の影響で成形品底部ほど直径が小さくなることがわかった。さらに、成形途中でのスライドの減速は、素材温度の上昇を抑制し、成形品高さ方向の直径の差を小さくできることがわかった。

#### 謝辞

本研究の一部は、財団法人天田金属加工機械技術振興財団の平成 22 年度一般研究開発助成 (AF-2010020) により行われたものであり、ここに謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 渡辺 翼, 本村 貢, 萩原明夫, 小西玄太: 軽金属, 62, 10 (2012) 363.
- 2) 四宮徳章, 白川信彦: 第 62 回塑性加工連合講演会講演論文集 (2011), 109.
- 3) 寺野元規, 郭 放, 湯川伸樹, 石川孝司: 平成 24 年度塑性加工春季講演会講演論文集 (2012), 119.