サーボプレス現状と金型に与える影響*

The Present Status of Servo-Press and Its Effects on Die

遠藤 順一**
Junichi ENDOU

Key words servo press, eccentric load, parallel control, slide inclination, progressive stair die working

1. プレス加工がおかれている状況

プレス加工は大量生産に最も適した加工であるがゆえに、大企業、特に電機産業における生産拠点の東南アジア移転のあおりを受けている。金型と材料さえあれば、プレス加工はどこで行っても同じような製品ができる。人件費の安いところに生産拠点が移動するのは当然となってしまう。このような状況において、日本国内に残されたプレス加工製品は小ロットでかつ加工が難しいもののみとなる。

加工が難しいプレス加工製品であっても、量が確保できれば、金型に十分な機能・強度を持たせることができるが、必然的に金型がコスト高となる。小ロットであってもリピートが多いことが分っていれば、量産金型の作製が可能であるが、保障されていなければ金型にコストをかけることができない。金型が担っていた機能の一部をプレス本体に担わせることができれば、金型のコストを下げることも可能となる。

最近、プレスの駆動にサーボモータを用いたサーボプレスが開発された。このプレスは、従来の機械式（メカ）プレスのスライドの運動がサインカーブ（リンク等を利用して、サインカーブを少し変えることはできる）であったものを、様々なスライド運動を可能としている。しかしながら、メカプレスの駆動系をサーボに置き換えただけのプレスは、いわゆるロストモーションがあり、その下死点精度は $\pm 10\mu\text{m}$ が限度である。これに対し、ボールスクリュウを用いたダイレクトドライブのサーボプレスはフルクローズド制御を行うことにより、 $\pm 1\mu$ の下死点精度がだせる。これを利用することにより、金型の機能を機械側に担

わせることが可能になる。

2. 金型内の現象の計測・可視化の現状

プレス加工において、金型内部で生じている現象をセンシングしたいという希望は昔からあったにせよ未だに実現していない。金型内部あるいはその周辺にセンサーを入れる試み¹⁾はないわけではないが、それによって金型内部の現象を捉えることに成功したという事例を筆者は知らない。また、加工中の工具面圧を測定する方法²⁾はこれまでに種々試みられているが、金型（工具）内部の材料の挙動を測定することはできていない。一般に金型形状は極めて複雑であり、その内部の材料の変形はさらに複雑となる。薄板のV曲げのような極めて簡単な断面の金型においても、板の変形は複雑で、変形段階によって板と金型の接触位置が変わることが知られている³⁾。

鍛造においては、プラスチックや鉛といったモデル材料を用い、素材内部の材料流動の状況を可視化することは昔から行われているが、板のプレス成形では、プラスチックや鉛といったモデル材料すら用いることができない。本稿では板のプレス成形加工に議論を限ることにしたい。

3. サーボプレスの機能を利用したプレス成形加工

サーボプレスといっても実は様々なタイプがある。鍛圧機械工業会サーボプレス規格・標準化委員会における議論によれば、

- 1) 従来のクランク/リンクプレス（メカプレスと呼ぶ）の駆動源をサーボモータに置換したプレス
- 2) スクリュープレスをサーボモータで駆動するプレス
- 3) 油圧プレスの動力源にサーボモータを利用するプレス

に大別される。

1) のメカプレス形サーボプレスはスライドの位置、速度を制御できるが、フルパワーは下死点近傍で可能で、かつロストモーション（バックラッシュ+プレス本体の弾性たわみ）を補正することができない。すなわち、メカプレスの弱点をそのまま引き継いでいる。しかしながら、スト

*原稿受付 平成 18 年 12 月 4 日

**神奈川工科大学工学部（神奈川県厚木市下荻野 1030）

遠藤 順一

早大大学院修士修了、工博（東工大）、東工大助手、助教授、（株）アマダ技術研究所所長を経て現職。専門は塑性加工・生産システム。最近では超精密塑性加工、加工機械の高機能化・知能化の研究に従事。

図1 従来型メカプレス（左）とサーボプレス（右）による成形の相違（アマダプレステック提供）

図2 サーボダイクッション（小松産機提供）

ロック線図は、従来のメカプレスとは異なり、様々に変えることができる。

図1は従来型メカプレスとサーボプレスで同じ金型を使用して成形した結果の1例である。従来型メカプレスでは破断した製品（図の左側の製品）がサーボプレスでストローク曲線の最適化を図ると成形が可能（図の右側）になる。

サーボプレスのダイクッションもサーボ化されたものがある。図2はサーボ化ダイクッションの挙動を従来型のものと比較した模式図である。ダイクッションをサーボ化することにより、成形のより一層の最適化を図ることができる。

以上の例はいずれもメカプレスの駆動源をサーボモータに置換したプレスでの例であるが、スクリープレスをサーボモータで駆動するタイプのプレスはさらにサーボモータの持つ能力を引き出している。図3はこのタイプのサーボプレスの構成の1例を示している。プレスのスライドは4隅のボールスクリーによって上下に運動するが、ボールスクリーは各軸独立にサーボモータに直結されている。また、スライドの運動は軸に独立に取り付けられた変位センサーにより測定され、測定結果はサーボモータにフィードバックされ、フルクロード制御がなされている。もっとも精度の高いプレスではサブミクロンの変位センサーを有し、1 μ mの位置制御が可能となっている。

図3 ダイレクトドライブデジタルサーボプレスの例

4. ダイレクトドライブデジタルサーボプレスの機能

4.1 静的精度⁴⁾

図4は市販の精度が高いと言われている3000kN級メカプレスに偏芯負荷をかけたときのスライドの変位の測定値を示す。負荷は油圧ジャッキにより静的に加えている。

スライドはロストモーションによる変位と偏芯による傾きが現れている。この図から、偏芯負荷が金型には悪影響を及ぼすことが見てとれる。普通のメカプレスの駆動源をサーボモータに置換しただけでは、このスライドの変位（ロストモーションと傾き）は避けることができない。

図5は、図3に示すサーボプレスに、図4と同じ負荷を加えたときのスライドの変位の測定結果である。ロストモーションと傾きが見られない。これはロストモーションや傾きが生じたときに、4軸それぞれのセンサーにより、スライド位置が測定され、フィードバック制御により補正されるからである。中央部にわずかな変位がみられるが、これは負荷によるスライドの弾性変形によるものである。この弾性たわみは、図3のプレスでは避けることができない。サーボの軸数を増やし、インナーライドをスライド中央に設けたプレスも開発されており、中央部に生じるたわみを打ち消すことができるようになった。

4.2 動的精度⁴⁾⁵⁾

プレスによるブランキング（打ち抜き）では、加えられた負荷により、プレス本体に大きな弾性ひずみエネルギーが蓄えられる。ブランキングにおいて、クラックが貫通する（いわゆるブレイクスルー）と除荷が生じ、蓄えられた弾性ひずみエネルギーが一時に解放され、衝撃荷重としてプレス本体に作用する。図6は偏芯したブランキングにおける4軸のスライド変位と荷重変化を測定した結果である。4軸の変位が最大荷重付近でずれている。これをより明確に示すために、4軸の変位を拡大して示したものが図

(a)

(b)

図4 スライド変位 (a) と偏芯負荷条件 (b)

図5 ダイレクトドライブデジタルサーボプレスのスライド変位

図6 偏芯負荷（プランキング）における荷重とスライドの変位

7である。4つの軸の変位がそれぞれ異なり、スライドが瞬間的に傾いていることが示されている。すなわち、瞬間的な偏芯負荷に対しては、フィードバック制御では追従できない。図からフィードバック制御が有効となるのは

図7 スライド変位の拡大図

図8 平行制御適用後のスライド変位

0.04秒後であることがわかる。

上述のように、瞬間的にせよスライドが傾くことは金型に悪影響を与える。そこで、これに対処するために、学習制御を利用した方法が開発された。開発された平行制御法のアルゴリズムは次のようである。

- ① まず制御せず、試し打ちを行い、各軸の荷重・変位を記憶する。
- ② 次に実加工を行う際は、試し打ちで記録された各軸の変位のずれを補正し、4軸の変位を等しくするよう、サーボモータを制御する。

この平行制御法を採用したときの、図6、7と同じ負荷条件における各軸の変位を図8に示す。各軸変位は瞬間的負荷に対しわずかに異なっているが、ずれは図7に比べ改善されており、実用上は問題とならない程度にスライドの傾きを抑えることに成功している。

5. 段 差 加 工⁶⁾

プレス加工では順送型を用いることが多い。普通のメカプレスでは最大負荷は下死点近傍でのみ加わるので、順送型ではパンチ長さは一定である。図3に示すサーボプレスはフルストロークにわたりフル荷重を加えることができる。この機能と前述の平行制御を組み合わせることにより、順送型においてパンチ長さを変えることができる。これを段差加工と名付け、図9で説明する。

図9は6ステージの順送型であり、加工は図9の右側から順に行われる。第1ステージはパイロット穴抜き工程

図9 段差加工の例

図10 段差加工時の各軸トルクとスライド変位

(必要な負荷 910 kN) で、その隣の第2ステージ (図の③の意味については後述) は絞り工程 (200 kN)、第3ステージ (図では②が記載、以後は省略) はブランクング (1100 kN)、第4ステージはコイニング (600 kN)、第5ステージはシェーピング (1760 kN)、第6ステージはブランクング (30 kN) である。ステージ間にはアイドルステージが設けられているがここでは省略している。この順送型を用いて普通のメカプレスで加工するには各ステージの必要負荷の合計 4600 kN が必要である。段差加工では、第1と第5、第3と第6、第2と第4ステージを組合せ、ステップと呼ぶことにし、それぞれ第1ステップ (図の①)、第2ステップ (図の②)、第3ステップ (図の③) として加工が行われるようにパンチ長さを変えると最大で 2670 kN ですむことになる。すなわち、従来のメカプレスでは 5000 kN 級のプレスが必要であった加工が 3000 kN 級のプレスですむことになる。

図10は前述の3ステップの段差加工を行ったときの各軸のトルクと変位を示している。

第1ステップと第3ステップには抜きが入るので前述の衝撃負荷が加わる。例えばスライド変位を平行に保っていても、プレス本体には衝撃が加わることになり、望ましくない。衝撃は除荷によるものであるから、除荷を急激に与えないように工夫すればよい。そこで、パンチの長さをわずかに変え、例えば第1ステージでブランクスルーが生じているときに第5ステージではまだ負荷が加わっているようにすれば、1ステップ内での急激な除荷衝撃を緩和することができる。図11はこのような対策を施した金型による

図11 段差加工におけるパンチ長さ最適化後の各軸トルクとスライド変位

段差加工時の各軸トルクと変位を示している。図10と11を比較すると衝撃的負荷が緩和されていることがわかる。段差加工を行う場合には、衝撃を緩和するような設計が必要となる。

6. 終わりに

プレス加工は、被加工材とプレスと金型から成り立っている。にもかかわらず、従来、プレス技術は金型技術といっても過言ではなかった。プレスがサーボ化され、進化したことに伴い、金型も対応しなければならない。それは、従来のように、金型に加工力以外の加工機能を受け持たせるのではなく、機械と金型の機能の分担が必要とされる。機能の分担により、金型が進化することが期待される。本特集の目指す「型の知能化と型内現象の計測・可視化」は、プレス加工においては、むしろこれからの課題といえる。それは金型の知能化ではなく、金型と機械 (プレス) の一つのシステムとしての知能化を図るべきであろう。本稿では今後の「機械+金型」の知能化の進歩を見据えたプレスと金型の現状を述べた。参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 例えば、真鍋健一、添田建太郎、長島敏幸、西村尚：変圧しわ抑え方式を利用した材料特性のインプロセス同定による適応制御深絞り法、塑性と加工、**33**, 375 (1992) 423.
- 2) 例えば、高橋壮治：円柱圧縮時の接触圧力分布に関する2, 3の実験、塑性と加工、**9**, 84 (1968) 30.
- 3) 益田森治監修：薄板の曲げ加工、誠文堂新光社、(1958) 136.
- 4) C. Murata, T. Machida, S. Futamura and J. Endou: Development of Direct Drive Digital Servo Press, Steel Grips, Suppl. Metal Forming, **2**, (2004) 371.
- 5) C. Murata, T. Machida, S. Futamura and J. Endou: Intelligent Control System for Direct Drive Digital Servo Press, Proc. of the 5th International Conf. on Intelligent Processing and Manufacturing of Materials, (2005), CD-Rom.
- 6) C. Murata, T. Machida, S. Futamura and J. Endou: A Proposal of "Progressive Stairs Die Working" (Development of Direct Drive Digital Servo Press, 2nd Report), Proc. of the International Conf. on Technology of Plasticity, (2005), CD-Rom.