

スライドモーションと 塑性加工およびその事例

アイダエンジニアリング(株) 久野 拓律*、田村 慎太郎**

日本発の技術としてサーボプレスが開発され 14 年が経過する。これまで各社から多様なスペックのサーボプレスが開発されハード面では充実してきているが、サーボプレス特有の“スライドモーションと塑性加工との関係”というソフト面では十分に研究がなされているとは言いきれない。このような状況に、「せっかくの高機能機械を有効に活用することは開発国であるわが国の使命」という声が日本塑性加工学会からあがり、日本金属プレス工業協会との協力のもと、産学協同の研究会「サーボプレス利用技術研究会(部会)」を 2007 年に発足させ、3つのワーキンググループを設けて 4

年間の研究活動を行った。

本稿では、コイニング効果ワーキンググループで実施した研究¹⁾の一部である「スライド停留効果」の実験を紹介するとともに、本効果を適応した加工事例、ならびにサーボプレス特有のスライドモーションを積極的に利用できる生産システムの事例を紹介する。

スライド停留効果に関する実験

昨今の自動車分野を中心とした軽量化ニーズに対応して、高張力鋼板(ハイテン材)が多用されるようになった。ハイテン材は一般的に延性に欠き、降伏点が高く弾性回復量も大きい。このため、割れやスプリングバックなどの加工不良も引き起こしやすく、各種対策が講じられているが、まだ十分とは言えない。

一方、サーボプレスが開発される以前から、板鍛造などの成形においてナックルモーションを用いた「決め押し」という方法が用いられている。ナックルモーションは下死点近くにてスライドが非常に低速となり一時停留するようなモーションであり、これを用いることにより形状転写性が向上する。

このことを一般的に利用されている図 1 の「応力-ひずみ曲線」で考える。通常の成形では、加工開始から弾性変形(a)~(b)を経て塑性変形(b)~(c)、そしてスライド上昇に伴って破線で示した(c)~(d)へと変化した大きなスプリングバックが生じる。これに対しナックルモーションを用いると塑性変形終了(c)後、下死点での一時停留により応力緩和が生じ、(c)~(e)~(f)の変化となるので、スプリングバック量が減少すると

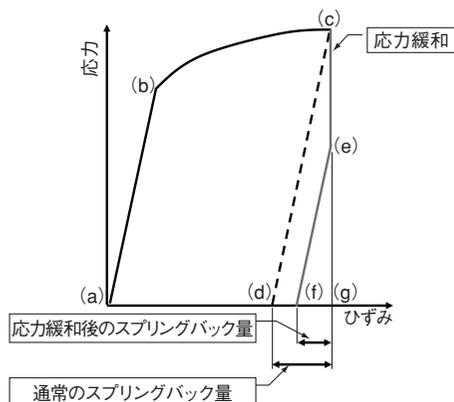


図 1 応力-ひずみ曲線

*Takunori Kyuno: 成形技術センター板成形技術グループリーダー

**Shintaro Tamura: 成形技術センター板成形技術グループ
〒252-5191 相模原市緑区根小屋 1752
TEL (042) 784-3870

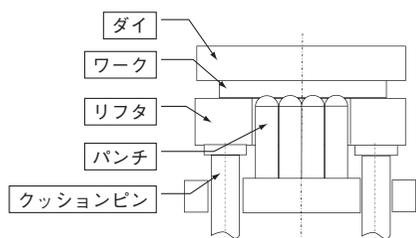


図2 コイニング金型概要

推察される。応力緩和現象がナックルモーシヨンのような極短時間でも発現し、これによる効果が従来から言われている「決め押し」効果を生んでいるのであれば、サーボプレスを利用することによって、より積極的に応力緩和現象が利用できるものと考えられる。ここにこれを検証したスライド停留に関する実験の一部を紹介する。

1. 実験

(1) プレス機械・金型

プレス機械はアイダエンジニアリング製サーボプレス NC 1-1100(D)を使用した。金型は図2に示すようにパンチ、リフタ、ダイで構成されるコイニング金型を使用した。図3に示すようにパンチは全長80mmで先端形状はSR5の球面形状からなり、図4に示すように4×4列で下型に配置してある。

パンチの周りにはダイクッション力によりワークを保持するリフタを配置してある。上型にはダイフェースがフラットなダイを配置し、このダイとリフタでワークを挟み込み、コイニング成形を行う構造とした。図3に示したようにパンチにはひずみゲージ (KFG-1-120-D16-11：共和電業) を貼り付け、パンチ1本当たりにかかる成形荷重を測定できるようにした。また、図2に示したリフタ位置をレーザー変位計 (LKG-35：キーエンス) で計測することにより、成形中のワーク位置を測定できるようにした。双方のデータはデータロガー (EDX-100：共和電業) で収集できる金型とした。

(2) 実験方法

ワークごとの板厚および面粗さのばらつきを抑えるため、60×60×t5~6に切り出したSPHC、SUS304を、圧延方向揃えて同時研削したものをワークとした。潤滑油はX-2893 (日本工作油) を手で塗布した。成形力は測定誤差を極力少なくなることを考慮し、パ

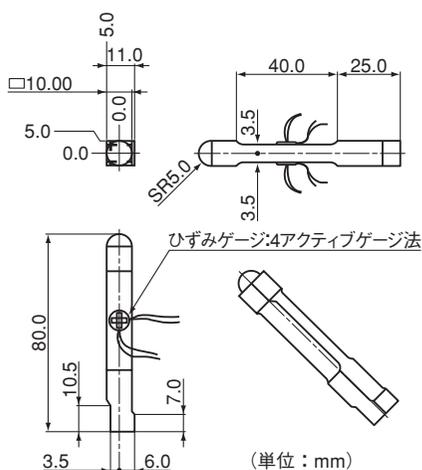


図3 パンチ概要

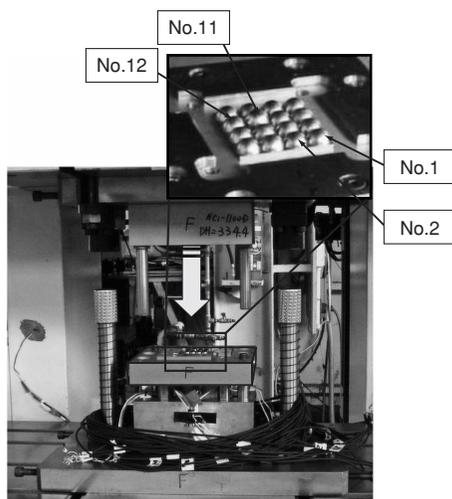


図4 金型概観写真

ンチ (SKD11) が塑性変形しない範囲で高い値としパンチ荷重17kN (パンチ先端面圧でSPHC:1,200MPa、SUS304:1,500MPa) とした。

検討するモーシヨンは図5に示すような、(a)クラ

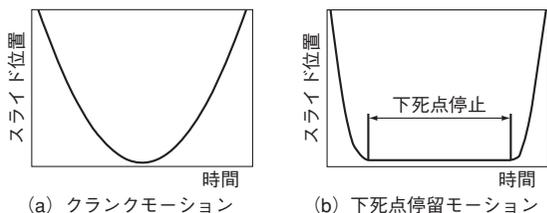


図5 検討モーシヨ

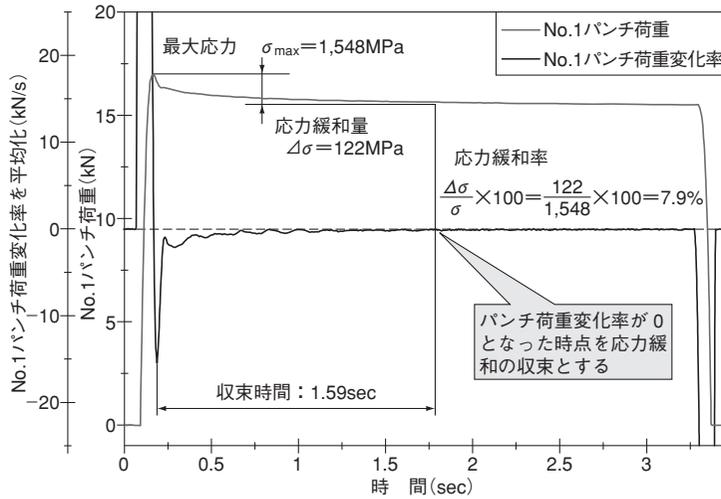


図6 SUS304の下死点停留モーション（20 spm）における応力緩和説明図

クモーションと(b)下死点停留モーションの2種類とした。(b)下死点停留モーションとは、(a)クランクモーションにおいて下死点でスライドを停留させるモーションのことを指す。パンチがワークに接触した瞬間の速度（以下、パンチタッチ速度）は(a)、(b)ともに1 (0.9)、10 (9)、20 (18)、40 (36)、55 (50) spm (mm/sec) とし、下死点停留時間は3秒とした。図4に示す4×4に配列された16本のパンチのうちNo.1、No.2、No.11、No.12にひずみゲージを取り付けてパンチ荷重を計測したが、プレス正面に向かって、右前のコーナーに配置されたNo.1パンチに注目して報告する。実験条件を下記にまとめる。

- ・ワーク材質：SPHC、SUS304
- ・ワーク寸法：60×60×t5~6（同時研削して板厚を揃える）
- ・クッション力：80 kN
- ・潤滑：X-2893（日本工作油）手塗り
- ・1本当たりのパンチ荷重：約17 kN
- ・1本当たりのパンチ先端面圧：約1,200 MPa；SPHC、約1,500 MPa；SUS304
- ・検討モーション：クランク、下死点停留

2. 計測・評価

(1) スプリングバック率

成形性の主な指標をスプリングバックとして捉え、下記の式(1)に示すスプリングバック率を評価する。 H のスプリングバック前成形深さは、パンチがワー

クに当たった位置からの押込み量であり、レーザー変位計にて測定したりフタ位置の変化量からパンチのひずみ量を引いた値である。 h のスプリングバック後成形深さは、成形後ワークの凹高さの実測値であり、隣接したパンチとの中間地点で凹部周辺の盛り上がりの影響がない箇所を基準にワーク最凹部点までの深さを計測した。測定には高精度輪郭測定器(ミットヨ：CV-524)を使用し、プレス左右方向 x 方向(研削目方向)に測定した。

$$\text{スプリングバック率} = \frac{H-h}{H} \times 100 \quad (1)$$

H ：スプリングバック前成形深さ (mm)

h ：スプリングバック後成形深さ (mm)

$$H = H_0 - H_1 - \lambda_p \quad (2)$$

H_0 ：パンチにワークが接触したときのりフタ位置 (mm)

H_1 ：下死点でのりフタ位置 (mm)

λ_p ：パンチひずみ量 (mm)

$$\text{パンチひずみ量 } \lambda_p \text{ (mm)} = \frac{PL}{AE} \quad (3)$$

P ：成形荷重 (N)

L ：パンチ全長 (mm)

A ：パンチ断面積 (mm²)

E ：ヤング率 (N/mm²)

(2) 応力緩和率

パンチにはひずみゲージを取り付けているのでパン

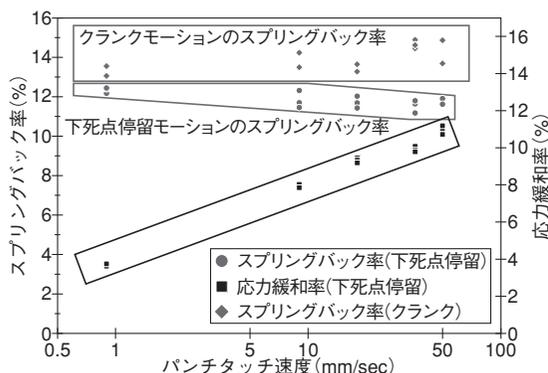


図7 SPHCにおけるパンチタッチ速度とスプリングバック率・応力緩和率の関係

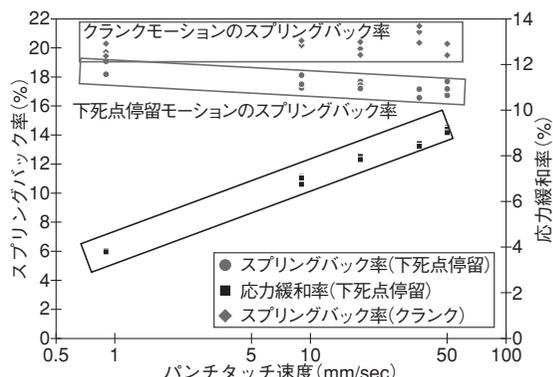


図8 SUS304におけるパンチタッチ速度とスプリングバック率・応力緩和率の関係

チ荷重が計測できる。図6はSUS304の下死点停留モーション(20spm)におけるパンチ荷重とパンチ荷重を時間で微分したパンチ荷重変化率の時間に対するグラフである。パンチ荷重のカーブは、ワークがパンチに当たってから下死点まで上昇するが、下死点停留直後に急激に減少し、時間とともに減少率は緩和しながら一定値へと収束している。この現象において、パンチ荷重変化率が0となった時点応力緩和の収束と定義し、そのときの応力と最大応力の差を応力緩和量 $\Delta\sigma$ とした。この応力緩和量 $\Delta\sigma$ を最大応力 σ_{max} で除した値を応力緩和率[式(4)]とした。例えば図6における応力緩和率は7.9%となる。

$$\text{応力緩和率 (\%)} = \frac{\Delta\sigma}{\sigma_{max}} \times 100 \quad (4)$$

σ_{max} : 最大応力 (MPa)

$\Delta\sigma$: 応力緩和量 (MPa)

3. 実験結果

前述の図6に示したように、スライド下死点停留直後に応力は急激に減少し、時間とともに減少率は緩和しながら一定値へと収束する。そして、応力緩和が収束するには1.59秒を要している。しかし、下死点停留直後の応力緩和は急激であり、例えば応力緩和の85%、すなわち収束する応力緩和率7.9% \times 85% \approx 6.7%の応力緩和は0.2~0.3秒以内に生じている。

図7にはSPHC、図8にはSUS304のパンチタッチ速度に対するそれぞれ応力緩和率およびスプリングバック率の関係を示す。どちらもスプリングバック率は、クランクモーションより下死点停留モーションの方がどの速度域においても小さいことが確認できる。

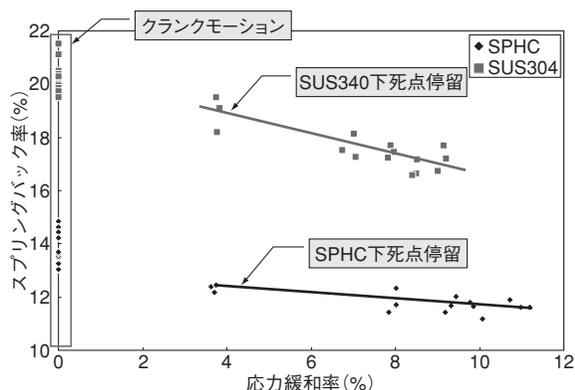


図9 SPHCとSUS304の応力緩和率とスプリングバック率の関係

また、応力緩和率はパンチタッチ速度が増加すると上昇する線形的関係があることがわかる。さらに、前述の図1の関係を適応すると、応力緩和率が上昇するとスプリングバック率も減少することになるので、パンチタッチ速度が上昇するとスプリングバック率も減少することになる。図7、図8において、ともにこの傾向がうかがえる。

図9はSPHCとSUS304のスプリングバック率を応力緩和率に対比させたグラフである。グラフ上の応力緩和率が0の位置にはクランクモーションのデータを示した。これによれば、クランクモーションより下死点停留モーションの方がスプリングバック率は少なく、応力緩和率とスプリングバック率の関係は線形で表記でき、応力緩和率が増加するほどスプリングバック率は減少するということがわかる。

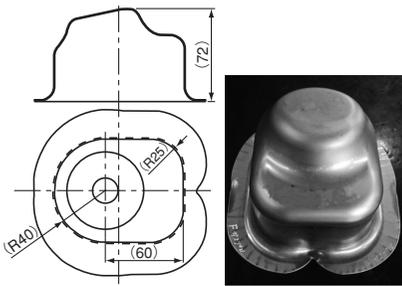


図 10 異形絞り製品

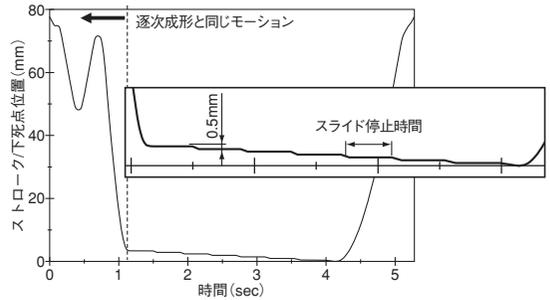


図 11 異形絞り製品成形モーション

以上の検証により、スプリングバックを減少させるモーションはクランクモーションと比較して下死点停留モーションが効果的であり、下死点停留前のパンチタッチ速度は応力緩和率の大きい高速が望ましいということが明らかになった。この応力緩和現象は、本田技術研究所の山下裕之氏²⁾によって詳しく説明され

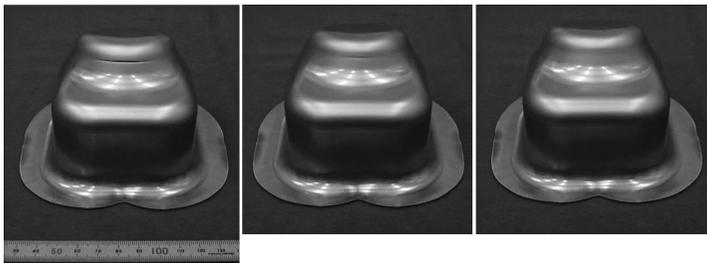
ている。

応力緩和現象を利用した成形事例

スライドの停留を下死点のみならず、より積極的に用いた成形事例があるので紹介する。図 10 は SUS 304 L、板厚 1 mm を供試材としたステップモーション

による絞り成形を行った事例である。

ステップモーションは、図 11 に示すように、胴体部の絞り成形後期に同時に行う頭部張出し工程を下死点上 3.5 mm の位置から 0.5 mm ずつ押し込み、逐次スライドを停止させるモーションとした。その結果を図 12 に示す。スライド停止時間が 0.1 sec の場合は割れが発生しており、0.2 sec の場合ではネッキングが発生し、0.3 sec の場合ではネッキングもなくきれいに成形された。スライド停止時間ごとの応力緩和現象の進行度合いにより成形性が変化しているのが確認できる。これらのスライド位置とパンチひずみで表した応力の様子を図 13 に示す。



(a) 0.1sec停止 割れ発生
(b) 0.2sec停止 ネッキング発生
(c) 0.3sec停止 問題なく成形

図 12 スライド停止時間の違いによる製品概観

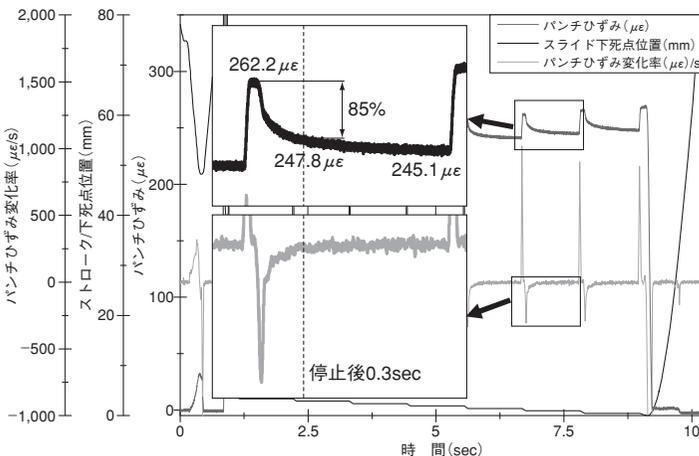


図 13 スライド停止 1 sec 時の時間に対するパンチひずみ量とスライド位置の関係

成形システムへの展開

スライド停留効果を利用すると当然のことながら生産性は低下する。表に SPHC と SUS304 のクランクモーションと下死点停留モーションのスプリングバック率と生産性 (spm: 1 分間の生産個数) の関係を示す。ともに下死点停留モーションによりスプリングバック率は減少しているが、応力緩和

が収束するまでスライドを停留させると、停留させないとき(100%)に比べSPHCで53%、SUS304で44%の生産性となり低下する。一方、生産性を向上させるため、応力緩和率を収束の85%程度まで進行する停留時間とすると、生産性はSPHCで73%、SUS304で66%まで改善させることができ、成形性の低下もさほど見られない。実際にはこのようなモーションが現実的な設定と考えられる。

次に多工程の成形において、サーボプレスをより積極的に活用する生産システムの事例として図14に示すシステムを紹介する。本システムは汎用サーボプレスを複数台並べ、搬送を3次元のロボットでつないだラインである。このシステムの特徴は各プレスで成形内容にマッチしたモーション設定が可能であり、かつ高速搬送装置を装備しているので生産性も高い。モーション設定や生産条件にもよるが最大で40spm程度のロボット搬送も可能となっている。例えば第1プレスでは前述のステップモーションを利用した絞り成形を行い、第2プレスでは下死点停留モーションを利用したコイニング成形を行うなど、それぞれのプレスで最適なモーションによる精度の高い加工ができる。また本システムは、独立した1ポイントプレスのタンデムラインなので、スライド、ボルスタのたわみも少なく、他工程からの影響も受けずに成形できる³⁾。さらに、ピットレスで設置できるなど、多くの利点があげられる。

☆

以上のように、スライドを停止することにより発現する応力緩和現象を上手に使用することはサーボプレスを利用するうえで重要なポイントになると考えられる。応力緩和現象は比較的短い時間に急激に発現するので利用価値は高いと考える。また、今回の実験ではパンチタッチ速度が速いほど成形性に良い影響を与えている。すなわち、1サイクルの加工の中で、速い部分と停留(停止または低速)部分を効果的に用いるこ

表 クランクと下死点停留モーションのスプリングバック率と生産性の比較

材質	モーション	スプリングバック率 (%)		クランクモーション基準の生産性 (spm:1分間の生産個数)	
				応力緩和収束	応力緩和約85%
SPHC	クランク	平均値	13.9	100% (55)	
	下死点停留モーション	平均値	11.7	53% (29)	73%*1 (40)
		差	2.2		
SUS304	クランク	平均値	20.2	100% (55)	
	下死点停留モーション	平均値	17.1	44% (24)	66%*2 (36)
		差	3.1		

※1: 下死点停留 0.2 sec
 ※2: 下死点停留 0.3 sec



図14 成形別モーションが成立するシステム例

とにより成形性が向上できることを示した。これは、まさにサーボプレスでなければできない動作であり成形である。まだまだ、調査・研究すべき点は多々あるが、サーボプレスを効果的に使うことが高付加価値製品を安定的に生産することにつながることを確信する。

参考文献

- 1) サーボプレス利用技術研究委員会: サーボプレスの利用技術研究成果報告書、コイニング効果、(社)日本塑性加工学会・(社)日本金属プレス工業協会(2011年9月)、pp. 38-62
- 2) 山下裕之、上野宏明、中井浩之、檜垣貴大: 応力緩和現象を利用したひずみ分散化による深絞り性向上技術、HONDA R&D Technical Review, Vol.24, No.1, pp.142-148
- 3) 久野拓律: 今さら聞けないハイテン材成形の基本、プレス技術、Vol.50, No.6 (2012)