

サーボプレスによる鍛造部品の高精度化技術開発

名古屋大学大学院 工学研究科

教授 石川孝司

(平成 19 年度一般研究開発助成 AF-2007011)

キーワード：冷間鍛造，サーボプレス，寸法精度

1. 研究の目的と背景

鍛造加工は自動車部品を始めとした多くの製品に適用されるようになってきている。ギアなどの複雑形状を有する部品の加工は切削加工が中心であったが、歩留まり性の向上、リードタイム短縮などの観点から鍛造加工の適用が急速に増加している。特に冷間鍛造は高歩留まり性、高生産性以外にも多くの利点を有する。大きな塑性変形を付与することにより組織の微細化、加工硬化による強度上昇など機械的特性の改善が加工中に行え、常温で加工するため酸化スケールの付着が回避でき非常に良好な表面性状を有するといったことが挙げられる。そのため冷間鍛造では素材から最終形状またはそれに近い形状まで、一気に成形することが可能である。しかし高荷重による設備の大型化や金型の割れ、摩耗といった工具損傷、潤滑処理など問題点も併せ持つ。寸法精度の問題もその一つである。一般的に、冷間鍛造は常温での加工のため温・熱間成形に比べて寸法精度は良好である。しかし機械加工と比較すると見劣りするのは事実である。そのため厳密な精度が要求される製品は、鍛造工程の後に機械加工やしごき加工といった寸法矯正工程が導入されるが工程数の増加はコスト増加になるため問題視される。冷間鍛造の寸法精度が設計値と異なる要因については以下のようなことが挙げられる。¹⁻⁵⁾

- 1) 金型および製品の弾性変形
- 2) 加工発熱の冷却過程における熱収縮
- 3) 上下型の偏心
- 4) プレス機械の剛性 (変形)

上記による偏差量を見込んだ工程設計、金型設計を行う必要があるが、最適条件を見いだすのは容易ではない。そこで著者らは冷間鍛造の加工速度に着目しサーボプレスを用いることで、製品の高精度化を図った。サーボプレスは従来の機械プレスとは異なり、加工中のスライド速度変化、下死点での静止、クランクの逆転など自由度の高いモーション設定を行うことが出来る⁶⁾。本研究ではサーボモータとクランクのリンク機構を有するサーボプレスを用いて、

スライドモーションが鍛造品の寸法精度に与える影響について調査を行った。

円柱試験片を冷間後方押し加工によって成形し、製品の外径を測定することで寸法精度の評価を行った。さらに有限要素変形解析を行うことで、スライドモーションが製品寸法に及ぼす影響についてより詳細な考察を行った。

2. 実験方法

2.1 実験条件

図1に試験片形状と加工後の形状をそれぞれ示す。材料にはS10Cを用い、潤滑処理として冷間鍛造で用いられることが多いボンデ処理を施したものを使用した。図2に本試験で用いた金型形状を示す。パンチ材質は超硬(G5)、ダイス、ロックアウトピン材質はSKH51を用いた。

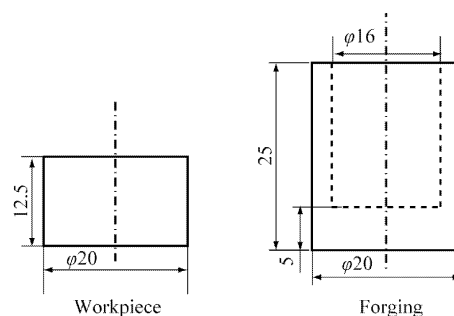


図1 試験片初期および成形後形状

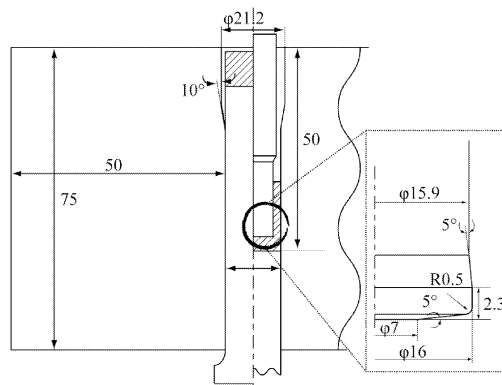


図2 金型形状

図2に示すダイセットはスライドの動きに合わせてパンチが降下し、同時にノックアウトピンも降下する。その後成形が完了した後パンチの上昇に合わせて製品がイジェクトされる構造になっている。また図3に実験で使用したサーボプレス (KOMATSU 社製 H1F80) の外観を示す。プレスの最大加圧出力は 800kN、最大加工速度は 75spm でサーボモータとクランクのリンク機構を有するプレスである。図4に本研究で行ったスライドモーション条件を示す。従来のクランク式機械プレスの動きに加え、下死点での静止、加工中のクランク逆転などを考慮したものを設定しそれらが製品の最終形状に及ぼす影響を調査した。各条件につき 7.5spm、40spm の 2 水準を設定し実験を行った。



図3 サーボプレス外観図

2.2 評価方法

本研究では製品寸法を評価するために製品外径に着目した。マイクロメータを用いて製品底部より 3mm 毎に直径を測定した。得られた直径の値から寸法精度を評価するために 2 つのパラメータを用いた。一つは(1)式で定義される外径変化量 ΔD 、もう一つは(2)式で求められる標準偏差 S である。

$$\Delta D = D_{out} - D_{in} \quad (1)$$

$$S = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (D_{out} - D_{ave})^2 \right\}^{1/2} \quad (2)$$

外径変化量は製品の寸法が設計値との偏差量を意味し、 ΔD が 0 である時設計値との誤差が小さく寸法精度が良好であるといえる。また標準偏差は外径のばらつきを表し $S=0$ ならば、製品直径が測定箇所によらず一定である、つまり製品外壁がストレートであるといえる。仮に製品外径

が設計値と異なる値を示している、その偏差量が一定、つまり外壁がストレートであれば金型の内径を調整することで狙いの寸法を持たせることが十分可能であるため標準偏差を評価項目の一つにした。

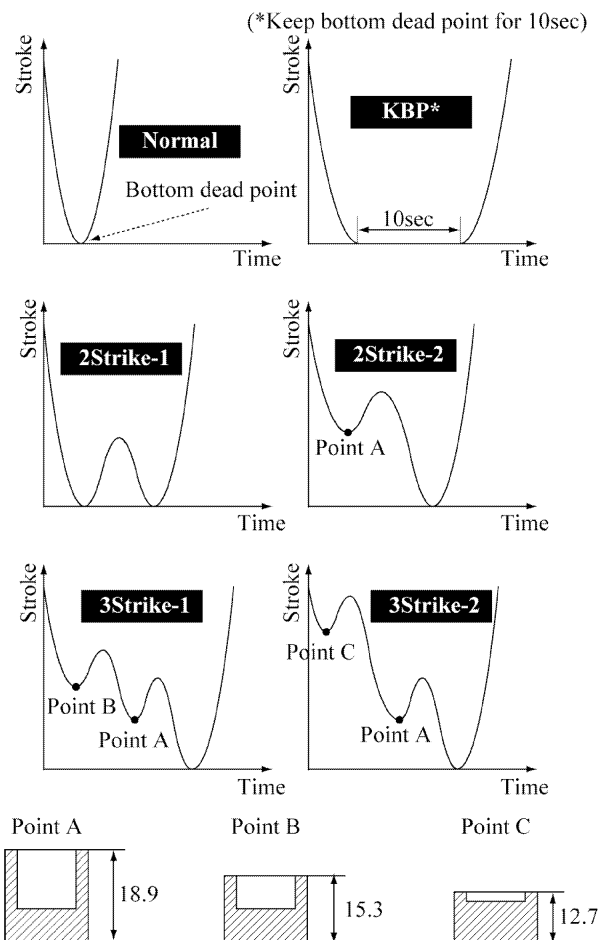
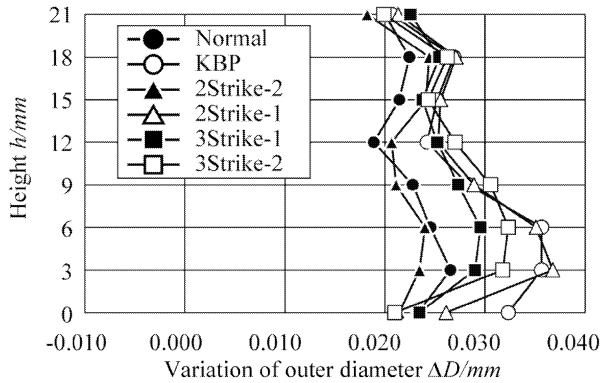


図4 スライドモーション条件

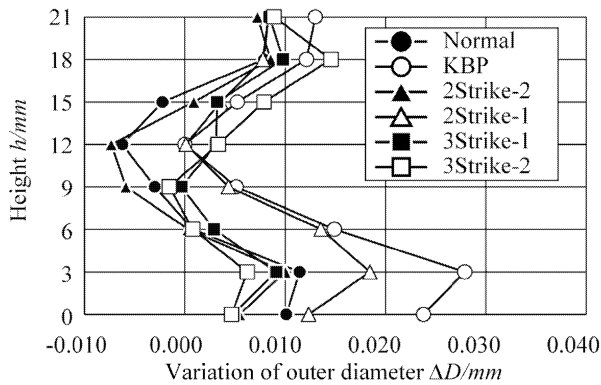
3. 実験結果

図5に実験より得られた外径変化量 ΔD を示す。7.5spm で加工した製品の設計値との偏差量は平均で 25 μ m 程度、40spm のものは 10 μ m 程度という結果であり、40spm の速い速度で加工した方が設計値との偏差量は小さくなるということが分かった。しかしどちらの速度でも、同一速度条件下ではスライドモーションの違いによって外径変化量に大きな違いは見られなかった。また図6に実験より得られた標準偏差 S を示す。標準偏差はいずれのスライドモーションにおいても 7.5spm の低速で加工した方が小さい、すなわち外径がよりストレートであるという結果が得られた。しかし同一速度条件下でもスライドモーションを変えることで標準偏差が大きく異なることが分かった。特に 40spm の速度で加工した場合、KBP 条件下より 3Strike-1 条件下の方がおよそ 60% 近く低下しており高速でもストレ

ートな外径を持つように加工できたといえる。以上のようにスライドモーションを変化させることで最終形状の寸法精度を異なるものに出来ることが確認された。



(a) 加工速度 7.5spm での外径変化量



(b) 加工速度 40spm での外径変化量

図5 各モーションにおける外径変化量

(a) 7.5spm, (b) 40spm

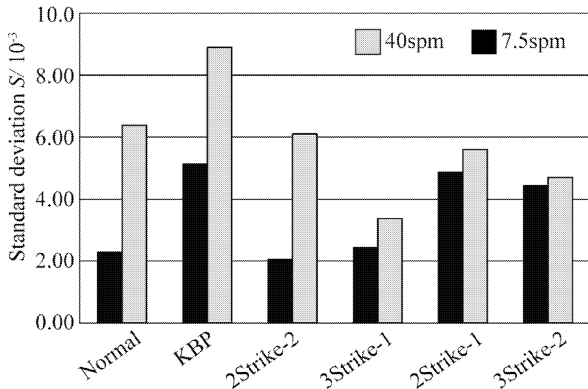


図6 各モーションにおける標準偏差

4. 解析条件

実験より得られた寸法精度の結果を詳細に考察するために有限要素法を用いたシミュレーションを行った。解析ソフトには DEFORM2D を使い、二次元軸対称で解析を行った。試験片形状、ダイス形状、スライドモーションなどは

実験と同様に設定素材、金型の材料定数は DEFORM にあるデータベースより引用した。摩擦係数、熱伝達係数などの境界条件は文献から引用したものをを用いた⁷⁾。表1に解析条件の詳細を、図7に解析におけるメッシュ図をそれぞれ示す。

後方押し出しのプロセスは図8に示すように大きく5段階に分類される。実験では⑤空冷後の最終形状しか測定することは出来ないが、解析ではそれぞれの段階における外径形状を算出し実験結果との比較を行った。

表1 解析条件

Workpiece	Elasto-Plastic		
Die, Punch	Elastic		
K.O. pin	Rigid		
Friction coefficient	$\mu=0.1$		
Heat transfer coefficient	11N/sec/mm/ $^{\circ}$ C (tool-material)		
Initial temperature	20 $^{\circ}$ C		
Element number	2000 (Workpiece) 1500 (Punch) 2000 (Die)		
Material properties	S10C	SKH51(Die)	G5(Punch)
Young' s modulus /GPa	206	Function(T/ $^{\circ}$ C)	524
Poisson' s ratio	0.3	0.3	0.23

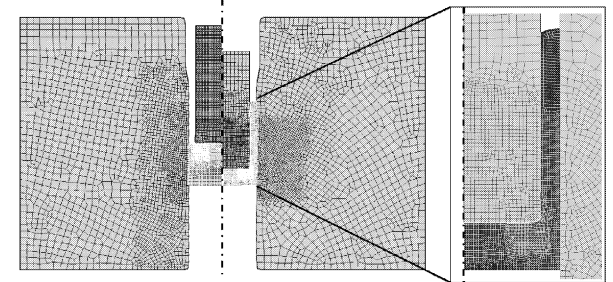
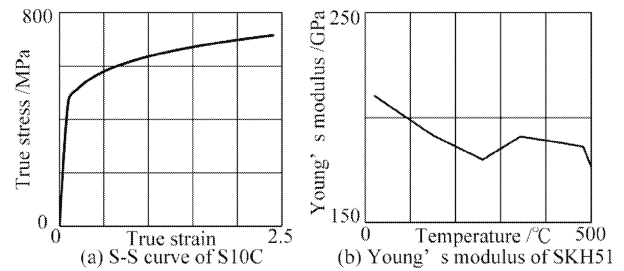


図7 解析におけるメッシュの例

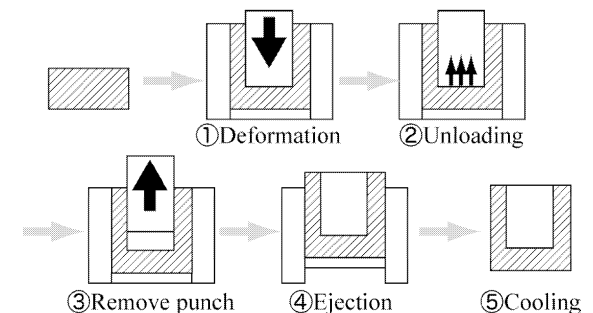


図8 後方押し出しのプロセス

5. 解析結果

図9に40spmにおけるNormal モーションでの解析結果と実験結果の比較を示す。解析結果の形状変化の推移をみると、成形直後から除荷にかけて外径が収縮し、パンチが除去されるとさらなる外径の収縮が確認できる。これは内側の材料拘束が外れるためと考えられる。その後製品がイジェクトされると外径は大幅に拡大する。これはダイス内部から抜け出ることにより外部からの拘束が外れるためであると考えられる。そこから加工熱の冷却による熱収縮がおこり最終形状が決まる。このように有限要素解析を行うことで時々刻々と変化する製品の形状変化を追跡することが可能である。また最終形状と実験結果の比較をすると最大で20 μm 程度のずれはあるものの、定性的にはよい一致を示しており今回の解析手法の妥当性を示しているといえる。解析結果の精度をより向上させるためには要素分割をより細分化したり、境界条件をきちんと決めるなどの措置が考えられる。

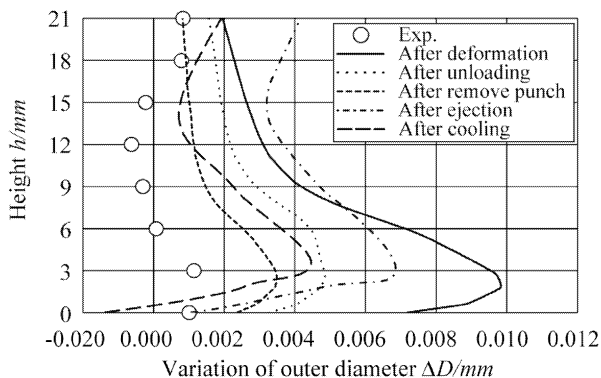


図9 40spm-Normal の実験と解析結果の比較

図5において40spmの加工速度で行ったものの方が7.5spmのものより外径変化量小さかった理由について考察する。40spmは加工速度が速いため金型との接触時間が短く加工熱が多く残留した状態で金型からイジェクトされる。しかし7.5spmは接触時間が長いので加工熱が金型に放熱しイジェクト時に高い温度を有していない。そのため40spmでの加工では冷却過程における熱収縮量が7.5spmに比べて大きい。40spm条件下では金型からの解放によるイジェクト時の外径拡大と冷却過程における熱収縮量がちょうど相殺することで最終寸法がより設計値に近いものを示したと考えられる。次に図6においてスライドモーションを3Strike-1のように振動させることで製品外壁がストレートに加工できた理由について考察する。図10に40spm-Normalと40spm-3Strike-1のイジェク

ト直後の製品形状および冷却後の最終製品形状を示す。

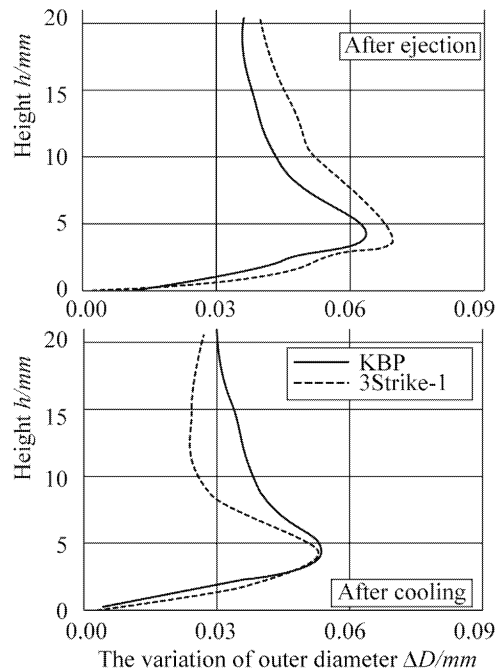


図10 イジェクト直後および冷却後の製品形状

今回の実験に用いたパンチは図2に示すように底部から2.3mm程度のランド部を有している。そのため成形された製品は、上部にいくほど外径が小さくなるような縮口形状をしている。図10のイジェクト直後の形状線はどちらもそのような縮口形状を示しており、形状に大きな違いは見られない。しかし冷却後の形状線を見るとKBPで加工された製品は縮口形状を保ったまま熱収縮しているのに対し、3Strike-1は製品の中腹部が大きく熱収縮することで縮口形状が解消された形状線を示している。この違いは冷却過程の収縮量が大きな影響を及ぼしているため図11にイジェクト直後のそれぞれの温度分布を示す。KBPで加工した製品の内部温度は製品底部にわずかに高い温度領域が見られるのみで製品外壁部はそのほとんどが冷却されている。KBPは下死点で10秒間保持しているためイジェクト前は室温に近い値まで温度が低下する。その後イジェクトされるときに製品外壁が金型の内壁と擦れることによる摩擦熱が最終的な熱収縮量を決める。そのため図10においてもKBPの形状線は冷却前後でほとんど変わらない。一方3Strike-1は金型の接触時間が短いのでイジェクト時の残留温度が高い。さらに高温域が製品中腹部に広く残っているため、その箇所の熱収縮量が非常に大きいと考えられる。そのため熱収縮量が製品上部と中腹部で異なり、結果として縮口形状を解消することが出来たと考えられる。

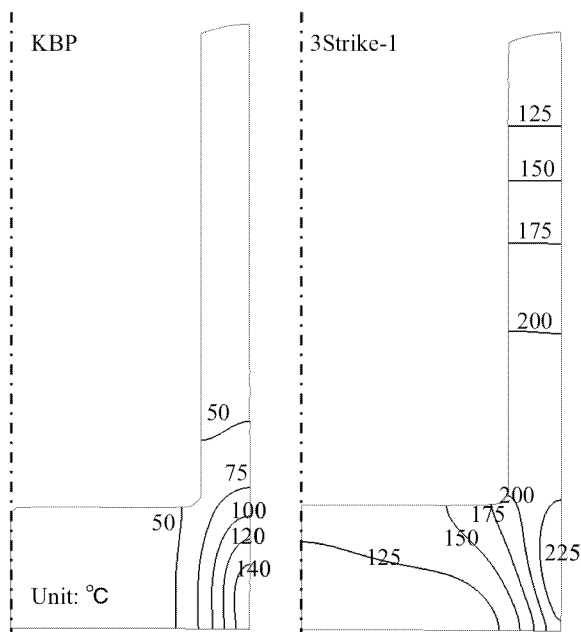


図11 イジェクト直後の温度分布

6. 結言

サーボプレスを用いて冷間後方押し実験を行った。プレスのスライドモーションを種々設定し、成形品の外径から設計値との偏差量および標準偏差を算出し寸法精度の評価を行った。また有限要素解析を行うことで実験結果の詳細な考察を行った。その結果以下の知見を得た。

- ・ 製品の最終寸法を決定する要因として、加工熱の冷却過程における熱収縮量が大きな影響を及ぼす。
- ・ 本研究の条件下では高速で加工する方が設計値に近い製品形状を有する。これはイジェクト時に残留している加工熱が大きいいため、金型からの解放による弾性回復と熱収縮量が相殺することによるものと考えられる。

- ・ 製品外壁は低速加工の方がストレートに近い形状を示す。
- ・ 高速加工でもスライドを振動させることで熱分布を異なるものにすることが可能で、結果として熱収縮量も異なるため製品形状を調整することが可能である。

謝 辞

本研究は天田金属加工機械技術振興財団の研究助成により実施したものであり、財団に感謝いたします。また研究に協力した名古屋大学大学院生、石黒太浩君、劉彤君に感謝します。

参考文献

- 1) K. Kondo: Journal of Japan Society for Technology of Plasticity, 38-438 (1997), 605-610.
- 2) M. Matsubara: Journal of the Japan Society of Precision Engineering, 44-520 (1978), 434-441.
- 3) B. Y. Jun, S. M. Kang, M. C. Lee, R. H. Park and M. S. Joun: Journal of Materials Processing Technology, 189-1-3 (2007), 459-465.
- 4) Y. Lee, J. Lee and T. Ishikawa: Journal of Materials Processing Technology, 130-131 (2002), 532-539.
- 5) T. Kawabe, T. Kato, A. Matsuda, M. Ichikawa and K. Nakanishi: Journal of Japan Society for Technology of Plasticity, 33-380 (1992), 1057-1062.
- 6) T. Ishikawa: Journal of Japan Society for Technology of Plasticity, 49-565 (2008), 114-117.
- 7) T. Ishikawa, N. Yukawa, Y. Yoshida, H. Kim, Y. Tozawa: CIRP Annals (2000), 169-172