

サーボプレス成形におけるメカニズムの解明とプロセス設計に関する研究

首都大学東京大学院 システムデザイン研究科
教授 楊 明
(平成 25 年重点研究開発助成 AF-2013001)

キーワード： モーション制御, 変形メカニズム, シミュレーション

1. 研究の目的と背景

サーボプレスが開発されてから 15 年以上経つが、サーボ機能を塑性加工技術に生かすための系統的な技術開発は行われていない。この分野で、我が国の優位性を確保するためには、一研究室の個別研究ではなく、共通目的を持った系統的な研究が必須である^{1,2)}。そのための産学連携共同研究体制として日本塑性加工学会の中にサーボプレス利用技術の高度化研究委員会を設置し、共同研究を実施している。2007 年に「サーボプレス利用技術研究委員会」が発足し、2011 年度でその 4 年間の活動を終えた、その成果を報告書にまとめられた³⁾。2012 年度から「サーボプレス利用技術の高度化研究委員会」(以降、高度化研究委員会と称す)として、4 年間サーボプレス利用技術の研究開発活動を継続した。本研究助成は、高度化研究委員会の研究活動の一部を助成するものである。

高度化研究委員会では、サーボ機構を塑性加工に有効に利用するための各種モーションによる素材変形や摩擦特性を実験的に評価し、そのメカニズムのモデル化やシミュレーション解析を実施した。また、加工への応用として、ステップモーションやパルスモーションを板材成形や鍛造に適用した場合の効果について検証した。本報告書では、本助成金によって実施された可変速度による板材の摺動摩擦試験、薄材の成形性に及ぼすモーション制御の効果、及びパルスモーション適用板鍛造での材料変形特性評価について、報告する。

2. 速度可変摺動摩擦試験

2.1 実験装置と実験条件

プレス成形時の摩擦係数を評価するため、低速から高速まで、任意の速度で摩擦試験が可能なサーボプレス機(SDE-2025 2000kN アマダ社製)を使用した。摩擦試験は、サーボプレス機に開発した摩擦試験装置を取り付けて行った。

試験片は、長手方向が圧延方向と圧延方向に垂直に切り出した長方形のアルミニウム合金 A5023-T4(表面ダル)を使用した。使用した試験片の寸法を表 1 に示す。

表 1 摺動摩擦試験片寸法

試験方向	長さ(mm)	幅(mm)	厚さ(mm)
圧延方向	262	33	1
垂直方向	260	30	1

金型材質はSKD11を使用し、硬さHRC59、表面粗さRa0.30~0.55 μm とした。試験片との接触面積は長手方向が圧延方向に垂直の時が234 mm^2 で、圧延方向の時が264 mm^2 である。潤滑剤は、洗浄油のR303P(スギムラ科学工業社製)を使用した。

開発した摩擦試験用治具を図 1 に示す。a)が試験前、b)

が試験終了時の様子を示す。実験時、まず二つの金型の間に両面に潤滑剤を塗布した試験片を挟み、片方の金型から油圧式の手動ポンプ(TWA-0.3 大阪ジャッキ社製)とフラットジャッキ(EF10S1.1 大阪ジャッキ社製)、球面座金を使用して圧縮荷重をかける。荷重の測定は、圧縮型ロードセル(LCX-A-10kN 共和電業社製)を二個用いて測定した。荷重を負荷した状態で、サーボプレスを高速でスライドさせ、金型と試験片との摩擦力を引張型ロードセル(LUK-A 100kN 共和電業社製)で測定した。摩擦力を圧縮力の二倍で除することで摩擦係数を求めた。

サーボプレスのスライドに加速域、減速域がある為、本実験の評価区間は500mm/sでは引張り始めから0.02秒の時点から0.1秒間、5mm/sでは引張り始めから2秒の時点から10秒間とした。

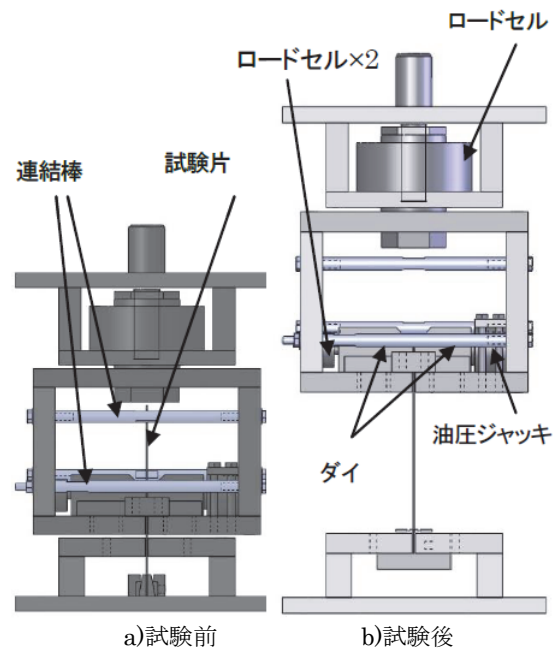


図 1 摺動摩擦金型

2.2 実験結果及び考察

試験条件と計測した摩擦係数を表 2 に示す。また、評価区間内での時間と摩擦係数の関係を図 2, 3 に示す。試験速度 5mm/s の評価区間内では、一定の値となったが、試験速度 500mm/s では徐々に摩擦係数が減少し、かつ振動が小さくなる結果となった。引抜速度を変化させた時の圧力と摩擦係数の関係を図 4 に示す。試験速度が低速の時よりも、高速の時の方が計測される摩擦係数は低い値が示された。特に今回の実験では、圧力が約 5MPa の時の試験速度 500mm/s での摩擦係数が、ほぼ同等に圧力を加えた 5mm/s での摩擦係数の半分程度の値となった。

表 2 各種実験条件下での摩擦係数

試験方向	引抜速度 (mm/s)	面圧 (MPa)	摩擦係数
圧延方向	5	5.0	0.158
		7.0	0.153
	500	6.8	0.110
		9.0	0.110
圧延方向に垂直	5	4.7	0.160
		7.1	0.160
	500	7.4	0.135
		10.1	0.111

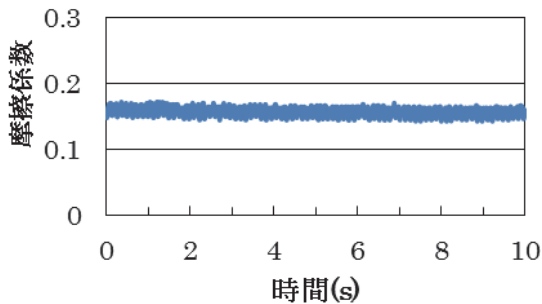


図 2 測定区間での摩擦係数の変化 (摺動速度 5mm/s, 圧力 5MPa)

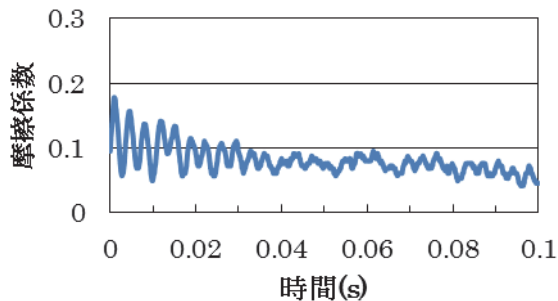


図 3 測定区間での摩擦係数の変化 (摺動速度 500mm/s, 圧力 5MPa)

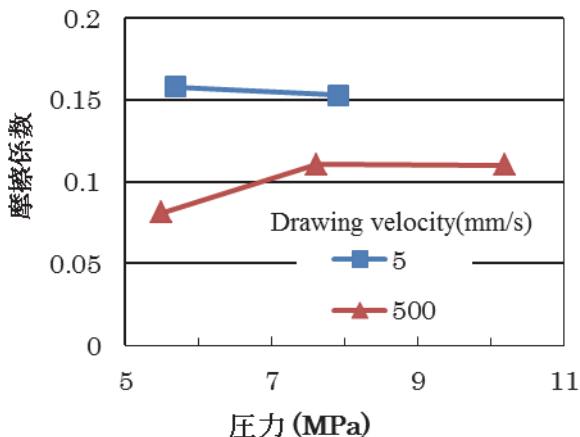


図 4 圧力と摩擦係数との関係 (引抜き方向: 圧延方向)

2.3 考察

引抜速度 500mm/s の時に計測された摩擦係数よりも 5mm/s の時に計測された摩擦係数の方が大きい値を示した理由として、試験中の試験片表面の潤滑剤内の圧力が影響していると考えられる。試験片表面がダル仕上げとなっているので、試験中、素材と金型間に潤滑剤が溜まり易い状態となっている。引抜速度が高速の場合、素材と金型間の潤滑剤が、外に出る量が少なく、潤滑剤の圧力上昇により、摩擦係数が減少したと考えられる。

圧力と摩擦係数の関係に関しては、本実験では表面ダル仕上げの試験片を使用しているため、圧力を増大させることで、試験片表面の凹凸が潰れていき、潤滑剤内の圧力が上昇したために摩擦係数が減少すると考えられる。ただし、試験速度 500mm/s の場合は、圧力の影響が低速の場合と異なっている。摺動速度と面圧によって、摩擦特性が異なることが分かった。

3. 薄材の成形性に及ぼすモーション制御の効果

サブミリメートルオーダーのマイクロプレス成形では、代表寸法に対する結晶粒径比が大きくなるため、個々の結晶粒に起因した不均一変形が生じ、成形が低下する⁴⁾。成形性向上のアプローチの一つにステップモーションがある⁵⁾。加工停止中の応力緩和による可動転位の粘性移動が生じ、均一な材料変形が促される。

一方、超音波振動による転位拡散の促進効果が報告されており、ステップモーションとの複合化によりさらなる成形性の向上が期待できる⁶⁾。本実験では、ステップモーション制御と超音波振動の複合化による効果を明らかにすることを目的とした。複合モーション制御が可能なマイクロ圧縮試験により、単軸圧縮変形中の応力緩和量を定量的に評価した。これにより、超音波振動によるステップモーションにおける応力緩和の重畳効果およびその寸法依存性を検証する。中島法に基づいた板材の成形限界線図を求めるために、形状の異なる試験片を用いた球頭張出試験を行った。ステップモーションなどが成形限界に及ぼす影響を調査した。板厚が 0.1mm 以下の薄材の成形限界への影響も調査した。

3.1 実験装置および実験方法

モーション制御および超音波援用が金属薄材の成形限界に及ぼす影響を調査するために、図 5 に示す超音波振動装置を有するマイクロプレス成形システムを開発した。本システムでは、自動で加工モーションを制御可能かつ分解能 0.001mm/s の高精度な加工が可能のため、卓上型精密サーボスクリーンプレス機 (合同会社微細加工研究所: DT-J32) を用いた。超音波振動子は、卓上プレス機へ導入するために発振周波数 100kHz の小型振動子を採用した。加工工具は超音波振動子先端にネジ締結によって取り付けられ、用途に応じて種々の形状のパンチを用いることができる。超音波発振器は周波数自動追尾機能を有しており、共振周波数 100±10kHz の範囲内では一定振幅で加工可能である。パンチへの負荷荷重は上部金型に内蔵されたロードセルによって測定した。また、中島法に基づくマイクロ球頭張出し試験金型を作製した。図 6 に張出し加工部の断面を示す。超音波振動パンチは Ø5mm の球頭型となっている。

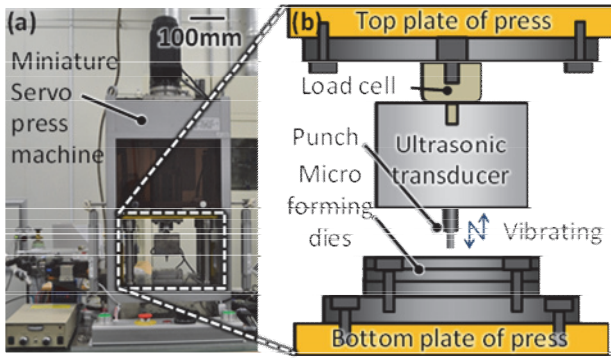


図5 卓上型精密サーボスクレプレス機と超音波援用マイクロ成形システム概要 (a) 装置写真 (b) 超音波援用システムと金型の拡大図

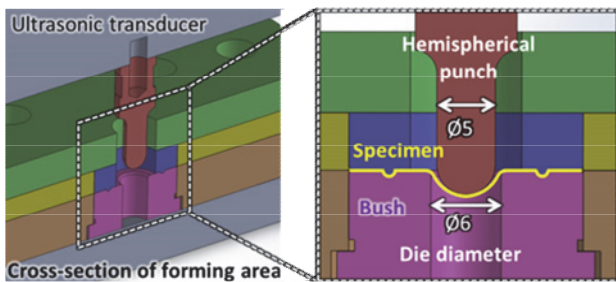


図6 球頭張出金型の断面図

本加工システムを用い、ノーマルモーションおよび図7 (a), (b) に示すステップモーション、ステップ・超音波振動複合モーションにより張出し加工を行った。また応力緩和による成形性向上効果を最大限発現させるため、応力緩和回数を10回、応力緩和時間を10秒、超音波振動を最大振幅である $0.6\mu\text{m}$ とした。ここで応力緩和の間隔は、ノーマルモーションにおいて破断するまでのストロークの平均を11で除した値とした。加工速度は 0.01mm/s で一定とし、摩擦の影響を抑制するために、パンチと接触する供試材表面にグラファイトスプレーを塗布した。加工後は、ネッキング部における円の変形量から最大主ひずみおよび最小主ひずみを算出した。再現性を確認するため各条件3サンプルずつ試験を行った。

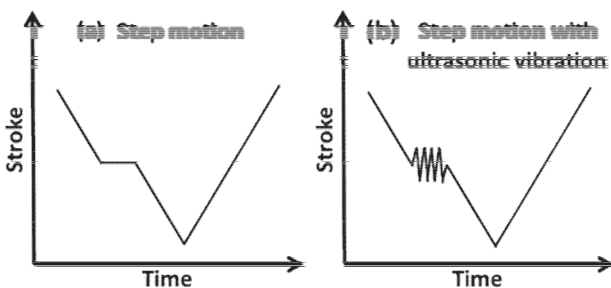


図7 張出成形の各種モーション (a) ステップモーション, (b) ステップと振動の複合モーション

供試材として板厚 0.03mm 、 0.05mm および 0.08mm の黄銅箔材 (JIS: 2680-H) を用いた。ここで、応力緩和は転位

拡散に起因する効果のため、多くの転位が拡散されることを期待し、圧延後に焼鈍しされておらず転位密度の高いH材を採用した。異なる応力状態を表現するために、ワイヤ放電加工により、図8 (a) に示すように幅4、10mm および $\phi 20\text{mm}$ のダンベル型と円形の試験片を作製した。また破断限界ひずみを測定するために、図8 (b) に示すように、黄銅表面にフォトリソグラフィーによって $\phi 50\mu\text{m}$ 、ピッチ $60\mu\text{m}$ 、厚さ $2\mu\text{m}$ のドットパターンを作製した。

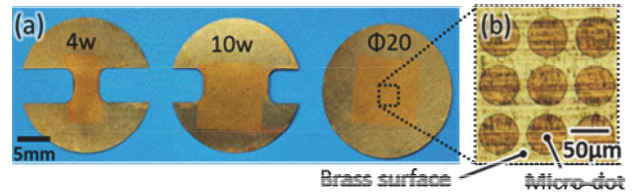


図8 試験片写真 (a) 幅4、10mm および $\phi 20\text{mm}$ のダンベル型と円形の試験片 (b) 試験片表面のドットパターン

3.2 各応力状態での成形限界へ及ぼす応力緩和効果

図9に各幅を有する板厚 0.08mm の試験片における変形後のドットの観察画像を示す。試験片の幅を変えることでドットの変形挙動が変化していることから、異なる応力状態を得られたと言える。図10に、これらのドットから成形限界ひずみを算出しプロットした結果を示す。成形限界は、単一応力状態であればひずみは比例的に増大する。全応力状態において、応力緩和を利用したモーションによって加工した際のひずみは、ノーマルモーションと比較して、おおよそ比例的にひずみが増大していることから成形限界が向上したものと考えられる。また本実験ではネッキング部のひずみを用いていることから、最大主ひずみがより顕著に表れる。そこで最大主ひずみ (縦軸) に着目すると、



図9 変形後のドットパターンの様子

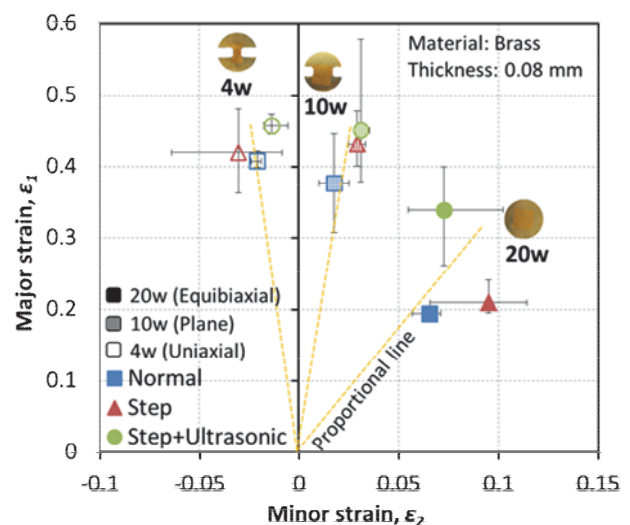


図10 板厚 0.08mm 材の成形限界図

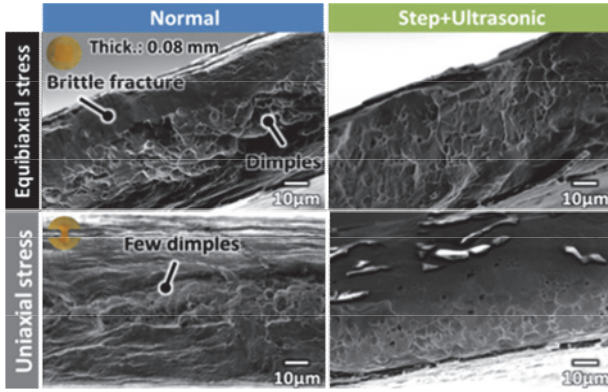


図 11 板厚 0.08mm 材は断面の SEM 観察写真

幅 4mm から 20mm, つまり単軸から等二軸応力状態に近づくにつれ, 複合化による成形限界の向上効果がより増大していることがわかる. さらに各試料における破断挙動を明らかにするために, 図 11 に示すように試験片破断面を走査型電子顕微鏡 (SEM: Scanning Electron Microscopy) によって観察した. ここで, 特に違いが顕著である単軸および等二軸応力状態における, ノーマルおよび複合モーションによって加工されたサンプルを観察した. その結果, 等二軸応力状態ではノーマルモーション時において脆性的な破面が観察されるのに対し, 複合モーション時では, ディンプルを全面的に有する延性破面が観察された. 一方, 単軸応力状態では, 元々脆性破面が占める割合も少なく, 複合モーションによりディンプル数のわずかな増大が確認できる. 等二軸応力状態では, 本試験片は転位密度が高い H 材であることに加え, 二軸応力によって転位のすべり面が交差し, 転位が堆積しやすいため, 過度な加工硬化が生じていたと考えられる. そのため, ノーマンモーション時は割れによる脆性的な破面が生じるものの, 複合モーションによって堆積した転位を拡散し加工硬化を抑制することで, 延性を促し成形限界が向上したと推察できる. 一方, 単軸応力状態では, 等二軸応力状態よりも転位の堆積量が少なく, ノーマルモーションにおいても適度に延性を有していたため, 応力緩和の効果が高かったものと考えられる.

3.3 応力緩和による成形性向上効果の板厚依存性

図 12 (a), (b) に, 異なる板厚を有する試験片を等二軸および単軸応力状態で加工したときの最大主ひずみの結果を示す. 板厚 0.05mm の試験片では板厚 0.08mm とは逆の傾向で, 単軸応力に近づくほど成形性が向上している. 一方, 0.03mm の板厚では幅 10mm の平面応力状態も含め明確な傾向は得られなかった. そこで図 13 に示すように, 最も変化が大きいと考えられる条件の試験片の破断面を観察した. 板厚 0.05mm では複合モーション時に板厚が大幅に減少しており, 板厚 0.03mm のときには応力緩和の有無にかかわらず脆性的な破面が支配的であった. これらの現象は, 加工に伴い発生する自由表面あれによって説明できる. 金属箔材の加工では, 板厚に対する表面粗さの割合が増大するため, 表面あれを起点とした破壊が生じやすくなる⁷⁾. そのため板厚 0.05mm の試験片では, 加工硬化しやすいう等二軸応力に近づくほど, 表面あれを起点とした割れの発生が促進され応力緩和効果よりも支配的となったため, 成形性向上効果が小さいと考えられる. 一方, 単軸応

力状態では, 等二軸応力状態よりも加工硬化が生じにくいいため, 表面あれを起点とした割れが抑制されたと考えられる. さらに, 転位堆積量の少ない単軸応力状態においても, マイクロ圧縮試験の結果で示唆したように, 板厚減少に伴い応力緩和による転位拡散が促進されたため, 成形限界が大きく向上したと推察できる. これらに対して, 板厚 0.03mm の試験片では, 板厚に対して表面あれが支配的となり, 加工硬化の度合いに依らず表面あれを起点とした割れによって破断するため, 応力緩和による成形性向上効果が大きく低減したと考えられる.

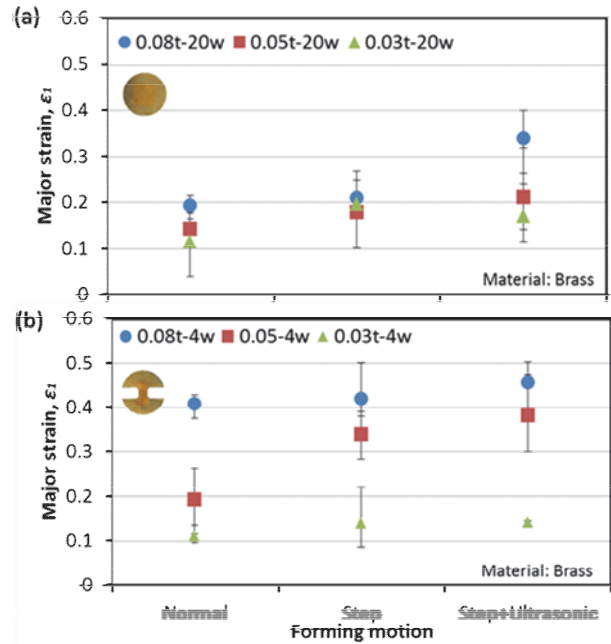


図 12 各種モーションによる張出試験での成形限界時の主ひずみの比較 (a) 等 2 軸の場合 (b) 単軸の場合

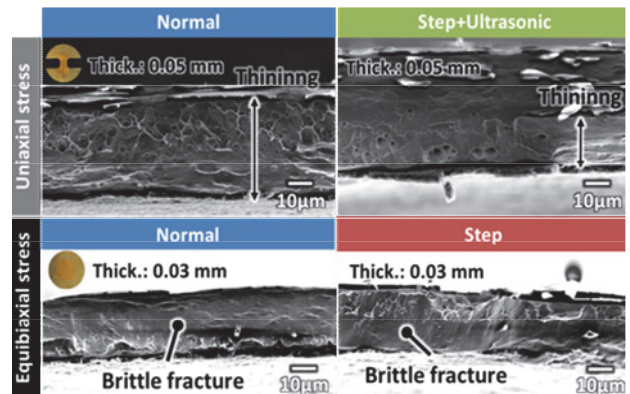


図 13 板厚 0.05mm と 0.03mm 材の破断面観察

4. パルスモーション適用板鍛造での材料変形特性評価

部分的に冷間鍛造技術を利用する板鍛造に関して, サーボプレスを用いた際のスライドモーションが荷重や寸法精度に及ぼす影響を解析と実験により調査した.

4.1 実験・解析方法

供試材は板厚 $t_0 = 3.2\text{mm}$ の軟鋼 SPCC を用いて、長さ 80mm 、幅 20mm の長方形に切り出したものを使用した。加工条件として長さ 80mm の先端 15mm をプレスで 1.6mm (板厚の 50%) 圧下した。潤滑剤は VG-100 を用いた。また、スライドモーションは、図 14(a) に示す通常のプレス機と同様の Crank motion (加工速度 5spm , 50spm の 2 種類 C5, C50), 図 15 (b) の振動荷重であるパルスモーション (加工速度 50spm , 表 3 に示す 5 種類 P1~P5), 図 14(c) のクランクモーションの下死点で一定秒保持するキープモーション (加工速度 50spm , 下死点での保持時間 2sec , 10sec の 2 種類 K2, K10), 図 14(d) のパルスモーションの戻し量を 0mm としたステップモーション, 図 15(e) のパルスモーションの振動を除いて圧下したソフトモーションとした。ただしステップモーション, ソフトモーションは対応するパルスモーションの P_n に応じて $St(P_n)$, $So(P_n)$ と表す。

解析は FEM ソフトの simufact. forming を用いた。解析条件を表 4 に示す。

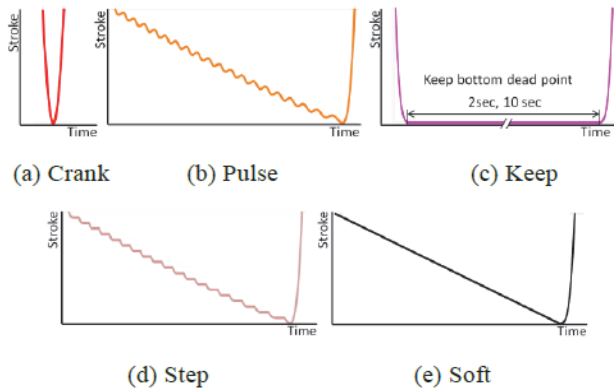


図 14 各種スライドモーションの概略図

表 3 パルスモーション条件

motion	押込量 a	戻し量 b	追込量 c	追込回数
P1	1.2mm	0.8mm	0.4mm	4 回
P2	1.0mm	0.8mm	0.2mm	8 回
P3	2.0mm	1.6mm	0.4mm	4 回
P4	1.22mm	1.2mm	0.02mm	80 回
P5	3.6mm	3.2mm	0.4mm	4 回

表 4 解析条件

解析ソフト	simufact. forming
モデル	3次元モデル
供試材	SPCE (弾塑性体)
工具	剛体
摩擦条件	$\mu = 0.1$ (Coulomb)
加工温度	20°C (室温)

4.2 結果および考察

実験後の試験片を図 15 に示す。すべての試験片の被圧下部において長さ方向および幅方向に伸びが生じた。各モーションの長手方向および幅方向の伸びと最大荷重を表 5 に示す。被圧下部を図 16 に示す 9 箇所で板厚測定した結果、伸びの先端に行くにつれて板厚が減少していること

が分かった。



図 15 加工後の試験片

表 5 モーション毎の伸び量

motion	長手伸び [mm]	幅伸び [mm]	幅伸び最大位置* [mm]	最大荷重 [kN]
C50	6.4	10.4	75.6	667
P1	6.6	10.4	76.8	641
P4	7.4	10.4	85.4	615
K10	6.2	10.2	75.4	646
St(P4)	5.5	9.4	76.2	657
So(P1)	6.0	9.6	76.2	646

*試験片の被圧下部反対側先端からの距離を示す。

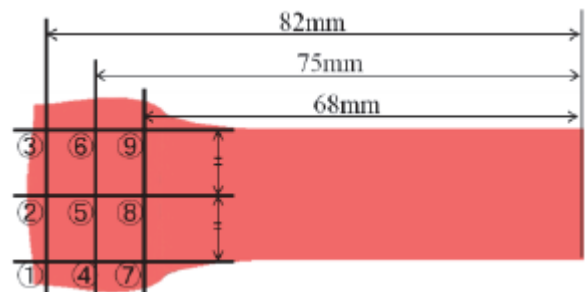


図 16 板厚測定箇所

各モーションの最大荷重の測定結果 (表 5) から、パルスモーションにおいて荷重が小さくなるのが分かる。図 17 に P4 の全体図および図 18 に 1 回の追込を抜き出した荷重履歴を示す。荷重の振動によって、荷重が抜けきりフラットな部分が生じていることが図 19 からわかる。この時、パンチー材料間にすきまが生じ、その際の負圧で液体潤滑剤がすきまに流れ込むことで、自動的に再潤滑されたと考えられる。その結果、パルスモーションでは他のモーションに比べて潤滑条件が良くなり荷重が低減したと考えられる。また、P1 と P4 を比較すると、P4 の方が 1 度の追込量が小さい。そのため、潤滑剤の膜切れが起こりにくくより良好な潤滑条件を保てたので、荷重が小さくなったと考えられる。被圧下部の伸びに関して、パルスモーションでは他のモーションに比べて長手方向に伸びる割合が大きいことが分かる。

これは逐次的に圧下していく際に、他のモーションと比べて摩擦条件が良くなり材料が流れやすいことが原因で

あると考えられる。摩擦条件の差による材料流動の違いを Fig. 7 に示す。図 19 は同じステップの結果であるが、摩擦係数が小さい時より長手方向に伸びていることが分かる。

被圧下部の伸びに関して、パルスモーションでは他のモーションに比べて長手方向に伸びる割合が大きいことが分かる。これは逐次的に圧下していく際に、他のモーションと比べて摩擦条件が良くなり材料が流れやすいことが原因であると考えられる。摩擦条件の差による材料流動の違いを Fig. 7 に示す。図 20 は同じステップの結果であるが、摩擦係数が小さい時より長手方向に伸びていることが

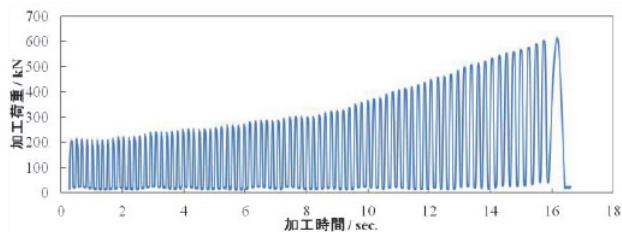


図 17 P4における荷重履歴(全体)

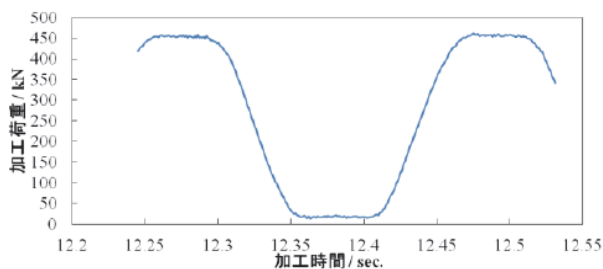


図 18 P4における荷重履歴(追込1回抜出し)

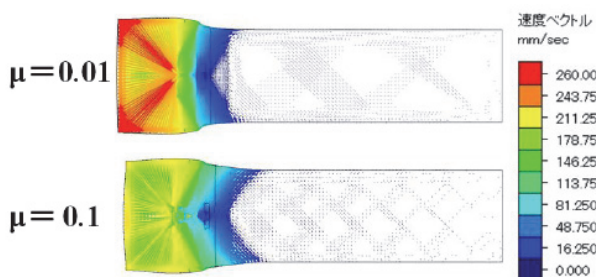


図 19 材料流動の速度ベクトル

分かる。本研究では板鍛造による段付け実験を行い、以下の知見を得た。

1) パルスモーションにおいて、特に荷重が完全に抜けて一度の変形量が小さい場合に、より大きな荷重低減が生じた。

2) パルスモーションにおいて、他のモーションと比べて幅方向に対して長手方向に伸びる割合が大きくなった。

4. 結 言

「サーボプレス利用技術の高度化研究委員会」で進められていたサーボ機構を塑性加工に有効に利用するための各種モーションによる素材変形や摩擦特性の評価やそのメカニズムのモデル化やシミュレーション解析に関する研究開発の中で、本研究では、可変速度による板材の摺動摩擦試験、薄材の成形性に及ぼすモーション制御の効果、及びパルスモーション適用板鍛造での材料変形特性評価について実施した。実プレス加工条件に即した各種圧力および摺動速度における摩擦特性を実験的に求めた。薄材の成形限界特性を中島法に基づいて求め、ステップモーションや超音波円との複合モーションの効果の評価した。また、板材鍛造における各種モーションの効果を実験的、数値シミュレーション的に評価した。このような基礎変形特性からプレス成形応用効果までの実験およびシミュレーション結果が今後サーボプレスの更なる利用技術の発展に寄与するものである。

謝 辞

本研究は公益財団法人天田財団重点研究開発助成(平成25年度)の支援を受けて行われたものであり、同財団に深甚の謝意を表す。

参考文献

- 1) 楊明・西村尚：サーボプレスの高度利用技術とその応用事例，塑性と加工，55-645 (2014)。
- 2) 楊明：IT を活用したサーボプレスの国内外の最新技術動向，プレス技術，53-10(2015),18-21。
- 3) 日本塑性加工学会・日本金属プレス協会：サーボプレスの利用技術，2011。
- 4) M. Geiger et al. : CIRP Annals –Manuf. Technol., 2001。
- 5) H. Yamashita et al. : Honda R&D Technical Rev., 2012。
- 6) T. Wen et al., Miner. : Metall. and Mater., 2011。
- 7) 古島ら：第 64 回塑性加工連合講演会 講演論文集。