

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 4 月 21 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760106

研究課題名(和文) サーボプレスと潤滑油流路付き金型を活用したパルス塑性加工法の開発

研究課題名(英文) Development of Pulse Forming Method Utilizing Servo Press and Die with Internal Channel for Lubricant

研究代表者

松本 良 (Matsumoto, Ryo)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・講師

研究者番号：50362645

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：申請者が考案した「サーボプレスのスライドモーション制御と潤滑油流路を有するパンチを活用したパルス穴成形加工法」について、(1) 難加工材であるチタン加工へ適用し、パンチモーションを設定することにより、穴深さ/直径比が2.0程度の加工が可能となった。(2) 加工穴の形状精度が高いことを見出し、その加工メカニズムをFEM解析により考察した。(3) 前後方押し出し加工へ応用展開し、加工中の被加工材の材料流動から摩擦係数を算出し、パルスモーションと摩擦変化の関係を定量的に得た。

研究成果の概要(英文)：A forming method utilizing a punch having an internal channel for supplying liquid lubricant to the punch nose was proposed. (1) the proposed forming method was applied to forming of pure titanium specimen using a servo press. The formed titanium specimen with formed hole depth/diameter of 2.0 was successfully obtained in the proposed forming method with appropriate pulse punch ram motion. (2) the proposed forming method was found to produce the formed holes with high shape accuracy. The shape accuracy of the formed hole was discussed with experimental and finite element simulation results in terms of lubrication state and temperature change. (3) The proposed forming method with pulse punch ram motion was applied to combined forward-backward extrusion process with a high height/diameter ratio. The coefficient of shear friction at the specimen–punch interface was identified from the material flow of the aluminum specimen during the extrusion with pulse punch ram motion.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：塑性加工 鍛造 押し出し 加工モーション制御 サーボプレス トライボロジー

1. 研究開始当初の背景

現在、塑性加工分野においてはサーボモータを駆動源としたサーボプレスの利用が急拡大している。サーボプレスは任意の位置でのスライド速度設定が可能であり、例えば、加工中にスライド速度の減速、加速、一旦停止、上下振動等の任意のスライド動作が可能なプレスである。このような特性を活用して、これまで実現困難であったフレキシブルな塑性加工プロセスの提案、実用化が進められている。

一方、自動車をはじめとする輸送機器分野では軽量化への関心が非常に高く、構造部材の軽量金属への変更のみならず、中空化や薄肉化といった構造の変更が急速に進められている。さまざまな塑性加工法により中空部品の作製が可能であり、その一つである穴成形加工では、加工前にパンチや試験片表面に潤滑油を塗布するのみに留まり、穴深部まで潤滑状態を十分に保つことが困難なため、深穴化は困難である。一方、ドリル加工(切削加工)では、外部ノズルによる潤滑油の供給や内部に潤滑油流路を設けたドリルによって小径深穴化が図られている。

研究代表者は潤滑油流路を有するドリルの発想を塑性加工用パンチに応用し、サーボプレスにより潤滑油流路を有するパンチのモーションを制御する新しい穴成形加工法を提案している。考案したパルス穴成形加工法はサーボプレスにより加工途中でパンチを後退させることにより、加工部へ負圧を生じさせ、パンチ先端部から潤滑油を穴加工部に逐次供給することで、穴深部まで良好な潤滑状態を保つことが可能であり、塑性加工による深穴加工を実現することを狙った加工法である。これまでにアルミニウム合金を使って本加工法の潤滑に対する有効性は確認したが、鋼材やチタン、ステンレス等の他材料への適用可否、鍛造や板材成形(深絞り、しごき加工)等の他加工への応用については未確認である。

2. 研究の目的

本研究では、研究代表者が考案したパルス穴成形加工法を難加工金属材料の一つであるチタンの冷間穴成形加工に適用し、パルス付加の効果調べ、潤滑の観点から加工限界の向上を図る。またパルス付加が塑性加工特性に及ぼす影響とそのメカニズムについてアルミニウム合金を被加工材とした加工実験、FEM解析により考察し、考案したパルス穴成形加工法の加工原理を他加工(押出し、深絞り、しごき加工等)へ応用展開を図ることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) パルス穴成形加工法のチタン加工への適用

パルス穴成形加工用の金型を改良して、サーボプレスを用いてチタンのパルス穴成形

加工を行った。まずチタン加工用の液体潤滑油を選定して、適切な液体潤滑油を用いて、チタンのパルス穴成形加工を行い、穴深さ/直径比が2以上の穴を焼付き・かじり疵なく加工することを目標とした。パンチモーションと加工穴部のかじり疵、パンチの焼付き発生との関係を調べ、焼付き・かじり疵が生じないパンチモーションや加工限界等を導出した。

(2) パルス穴成形加工における加工穴の形状精度

パルス穴成形加工における加工モーションと加工穴の塑性変形の関係について、被加工材にアルミニウム合金を用いて、パルス付加が加工穴の形状精度に及ぼす影響を加工実験により調べた。また加工メカニズムについて、FEM解析により考察した。

(3) パルス加工法の押出し加工への応用とパルス加工の摩擦係数の導出

パルス穴成形加工法の加工原理について、他加工(押出し、深絞り、しごき加工等)への応用展開を図った。上記(1)、(2)で得られたパルス穴成形加工における知見やCAEによるFEM解析を活用することで、他加工への応用展開の可否を検討した。応用展開が可能と判断したパルス前後方押出し加工においては、潤滑・摩擦状態により被加工材の材料流動が大きく変化することに着目し、材料流動の実験結果から、FEM解析を介して、摩擦係数を算出し、パルス加工の摩擦低減効果を調べた。

パルス穴成形加工、パルス押出し加工を通じて得られた知見を基に、サーボプレスによるパルス付加条件(振幅、周波数、付加回数等)が塑性加工特性(本研究では加工品の形状精度、潤滑特性)へ及ぼす効果について考察した。

4. 研究成果

(1) パルス穴成形加工法のチタン加工への適用

被加工材に工業用純チタン(JIS 2種)を使用し、まず純チタンの穴成形加工に適切な液体潤滑油を選定した。液体潤滑油は基油(鉱油を含め4種類)および添加剤(各種極圧剤を含め8種類)の組み合わせ、配合比を変更して、約30種類を準備した。それぞれの液体潤滑油を用いて、純チタンの穴成形加工を行い、耐焼付き性およびかじり疵抑制効果の観点で液体潤滑油を評価した。その中から効果的であったエステル+リン系極圧剤+Si化合物の潤滑油を選択し、以下のパルス成形加工を行った。

加工穴深さ/直径比1.5の穴成形加工後の試験片断面写真を図1に示す。加工穴側面に生じるかじり疵はパンチ前進中および後退中に生じ、パルス穴成形加工の方がかじり疵の程度は軽く、純チタンの加工においても、

パルス穴成形法の有効性が確認できた。

図2にパンチモーションと加工穴側面の周方向表面粗さの測定結果の関係を示す。非パルス加工では、無潤滑(図2中の), 潤滑あり(同中)いずれの場合も表面粗さは $Ra = 1.5 \mu\text{m}$ 以上であり、潤滑油の効果がないことが分かる。一方、パルス加工(同中 ,)では、表面粗さは $Ra = \text{約} 0.8 \mu\text{m}$ であり、本加工法の潤滑効果が確認できる。一方、既報のアルミニウム合金のパルス穴成形加工では、 $Ra = 0.2 \mu\text{m}$ 以下のかじり疵のない滑らかな穴表面が得られた。これは純チタンは焼付き・凝着が発生しやすく、本実験で使用したエステル系潤滑油では潤滑性能が不十分であったためと考えられ、チタンの冷間鍛造用の潤滑油についてはさらなる開発が必

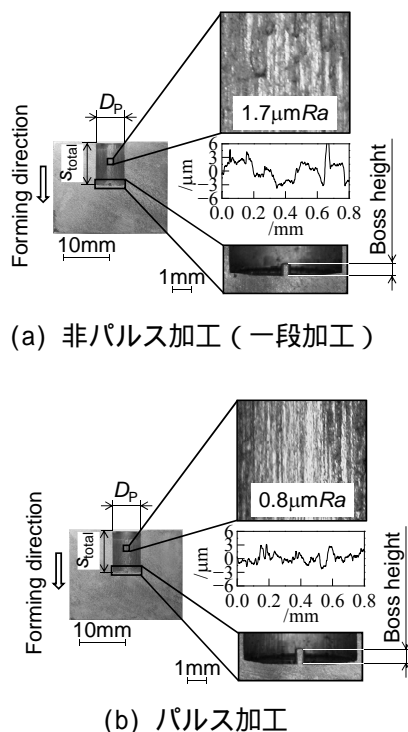


図1 穴成形加工後のチタン試験片断面写真

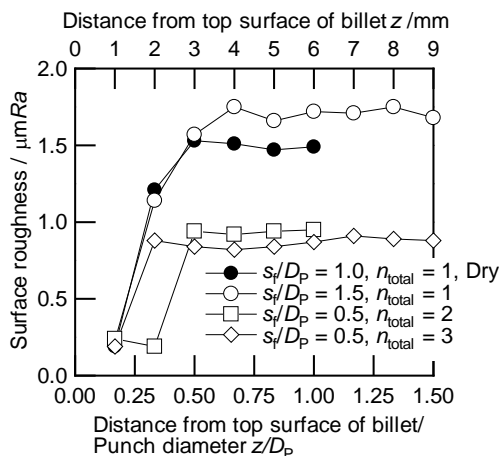


図2 チタンの穴成形加工におけるパンチモーションが加工穴側面の表面粗さに及ぼす影響

要である。

チタンの穴成形加工においては、通常のパルス成形加工やドリルによる穴あけ加工では、穴深さ/直径比が 1.0 程度の加工で焼付き・かじり疵が生じるが、パルス穴成形加工法では、適切な潤滑油、パンチモーションを設定することにより、穴深さ/直径比が 2.0 程度の加工までかじり疵の程度は軽減できることが以上の結果より確認された。

(2) パルス穴成形加工における加工穴の形状精度

被加工材に A6061-T6 アルミニウム合金を用いて、押し比 1.07~1.80 で加工穴深さ/直径比 6.0 のパルス穴成形加工を行った。加工後の加工穴の形状精度について、加工実験で得られた加工穴の直径分布の標準偏差を図3に示す。ここで、加工穴の直径は加工穴の深さ方向に 3mm 毎(加工ストローク/パンチ直径比 0.5 毎)に測定し、標準偏差 σ_d は加工穴直径を d_i 、加工穴平均直径を d_{avg} 、測定点を i として、

$$\sigma_d = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - d_{avg})^2}$$

と求めた。押し比によらず、パルス加工の方が標準偏差は小さく、寸法精度の高い加工穴が得られることが分かった。

加工穴の形状精度の実験結果について、FEM 解析により考察した。図4に加工中の試験片温度分布の計算結果を示す。ここで、温度分布の標準偏差 σ_T は FEM 解析の各要素の試験片温度を T_i 、体積を V_i 、試験片平均温度を T_{avg} として、

$$T_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i V_i}{\sum_{i=1}^n V_i}$$

$$\sigma_T = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_i - T_{avg})^2}$$

と求めた。パルス加工では各段でパンチ引上げにより塑性変形が断続的に行われるため、パンチ引上げ中に試験片が金型接触により冷却されることが分かった。そのため、非パルス加工と比較して試験片の温度上昇が抑制され、温度分布の標準偏差は低く抑えられることが示唆された。試験片温度分布が均一

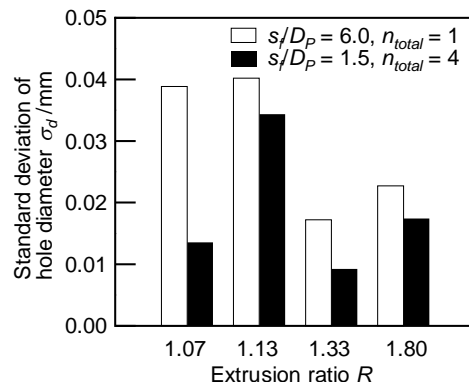


図3 穴成形加工で得られた加工穴の直径分布の標準偏差

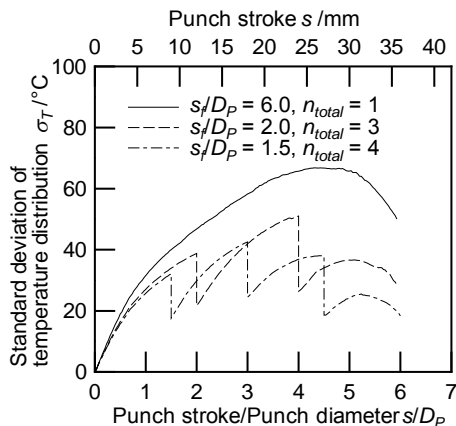


図4 FEM解析で計算されたパルス穴成形加工中のアルミニウム試験片の温度変化(押し出し比:1.07)

であるほど、加工中の不均一変形や加工後の熱変形が均一に近づき、パルス加工の方が高い形状精度を有する穴を加工できたものと考えられる。

(3) パルス加工法の押し出し加工への応用とパルス加工中の摩擦係数の導出

パルス穴成形加工の加工原理を応用し、パルス前後方押し出し加工用の金型を作製した。被加工材に A6061-T6 アルミニウム合金を用いて、パルス付加条件と被加工材の材料流動の関係から、パルス付加が塑性加工特性(ここでは、潤滑特性)について考察した。前後方押し出し加工では、パンチ-試験片間の摩擦によって前方部、後方部への材料流動が変化することが知られており、低摩擦の場合は後方部、高摩擦の場合は前方部への材料流動が促進される。このことを利用して、被加工材の塑性変形の様子から、加工中の摩擦係数を導出することを試みた。

図5にパンチモーションと試験片の前方部、後方部押し出し長さ L_F 、 L_B の関係を示す。潤滑油を用いた場合、パルス加工では s_f が短くなるとともに、 L_F は短く、 L_B は長くなり、パルスモーションにより各段での加工間に潤滑油が加工部へ逐次供給され、後方部への材料流動が促進されたことが分かる。一方、潤滑油を用いない場合は、パルス加工では s_f が短くなるとともに、 L_F は長く、 L_B は短くなった。これはパルスモーションによりパンチ-加工穴間の摺動距離が長くなり、かじり疵が生じ、摩擦を高めたと推察される。

次に得られた実験結果とFEM解析を組み合わせ加工中の摩擦係数を導出した。あらかじめFEM解析により後方側パンチ-試験片間のせん断摩擦係数 m_p と試験片の材料流動の関係を調べおき、図5で得られた材料流動の実験結果と比較し、 m_p を算出した。図6に m_p の算出結果を示す。前方部、後方部押し出し長さのいずれから算出した m_p も、非パルス加工では約0.4となり、潤滑油を使用したパルス

加工では、0.05以下と非常に低いせん断摩擦係数が得られた。一方、潤滑油を使用しないパルス加工では、パンチ-加工穴間の摺動距離が長くなるため、摩擦は0.5~0.9と高くなった。

以上より、本研究で提案するパルス加工法は適切なパンチモーション設定により潤滑効果を得られることが定量的に示すことができた。

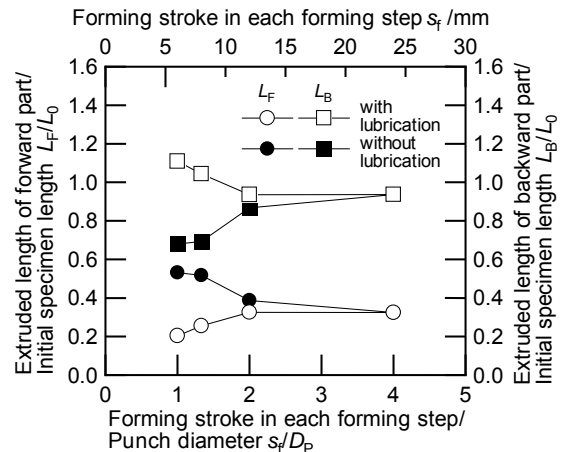


図5 パルス前後方押し出し加工におけるパンチモーションと試験片の前方部、後方部押し出し長さの関係 (L_F : 前方部押し出し長さ、 L_B : 後方部押し出し長さ)

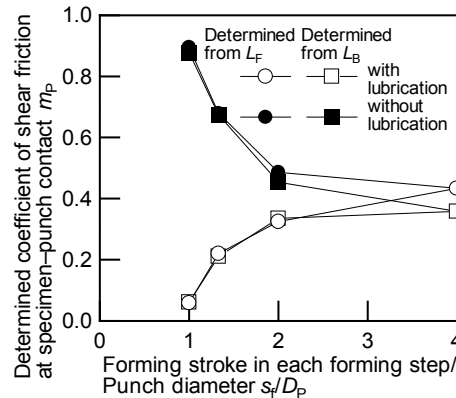


図6 実験結果とシミュレーション結果から算出されたパルス前後方押し出し加工におけるパンチモーションとせん断摩擦係数の関係

5. 主な発表論文等

(雑誌論文)(計2件)

R. Matsumoto, K. Hayashi, H. Utsunomiya, Experimental and Numerical Analysis of Friction in High Aspect Ratio Combined Forward-Backward Extrusion with Retreat and Advance Pulse Ram Motion on a Servo Press, Journal of Materials Processing Technology, 査読有, 214巻, 2014, 936-944.

DOI:10.1016/j.jmatprotec.2013.11.017

R. Matsumoto, J.Y. Jeon, H. Utsunomiya, Shape Accuracy in the Forming of Deep Holes with Retreat and Advance Pulse Ram Motion on a Servo Press, Journal of Materials Processing Technology, 査読有, 213 巻, 2013, 770-778.
DOI:10.1016/j.jmatprotec.2012.11.023

〔学会発表〕(計6件)

松本 良, 林 和紀, 宇都宮 裕, サーボプレスと潤滑油流路付きパンチを用いたパルス前後方押し鍛造における潤滑効果, 平成 26 年度塑性加工春季講演会, 2014/6/8, つくば国際会議場(茨城県).
R. Matsumoto, J.Y. Jeon, H. Utsunomiya, Shape Accuracy of Forged Deep Hole for Lightweight Structural Component in Forging with Pulse Ram Motion on a Servo Press, 46th International Cold Forging Group Plenary Meeting, 2013/9/16, Novotel Convention & Wellness Roissy CDG (フランス).
松本 良, J.Y. Jeon, 宇都宮 裕, サーボプレスを用いたパルス穴あけ加工における加工穴の形状精度, 平成 25 年度塑性加工春季講演会, 2013/6/8, 大同大学(愛知県).
R. Matsumoto, H. Utsunomiya, Cold Piercing of Cylindrical Aluminum Billet with Counter Punch Pressure, 16th ESAFORM Conference on Material Forming, 2013/4/24, University of Aveiro (ポルトガル).
松本 良, J.Y. Jeon, 宇都宮 裕, サーボプレスと潤滑油流路付きパンチを用いたパルス穴あけ加工における加工穴の形状精度, 日本機械学会第 20 回機械材料・材料加工技術講演会(M&P2012), 2012/12/2, 大阪工業大学(大阪府).
R. Matsumoto, J.Y. Jeon, H. Utsunomiya, Enhancement of Forming Limit in Backward Extrusion with Pulsating Lubricant Supply on Servo Press, 3rd Asian Symposium on Materials and Processing, 2012/8/30, IIT Madras (インド).

6. 研究組織

(1)研究代表者

松本 良 (MATSUMOTO, Ryo)
大阪大学・大学院工学研究科・講師
研究者番号: 50362645

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし