



R. Matsumoto

サーボプレスを活用した中空部品加工のための逐次潤滑冷間鍛造加工法の開発

松本 良*

1. 研究の目的と背景

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¹⁾。サーボプレスはスライド位置・速度が制御可能であることから、塑性加工プロセスの高精度化や難加工材の塑性加工特性の向上、あるいはこれまで実現困難であったフレキシブルな新しい塑性加工プロセスの開発が進められている。

一方、輸送機器をはじめ多くの構造物で軽量化が要求されており、高比強度材や軽量材料への置換、あるいは中空構造部材への置換が進められている。中空構造部材の製造プロセスの一つに穴あけ加工が挙げられ、例えば、ドリル加工では、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(高アスペクト比化)が図られている。一方、冷間鍛造による穴あけ加工では、一般に加工前の被加工材へのりん酸塩セッケン皮膜処理(ボンデ処理)等による固体潤滑皮膜あるいは加工前にパンチや被加工材表面に潤滑油を塗布するのみに留まる。このため、穴深部まで潤滑状態を十分に保つことが困難であり、深穴化は困難である。

そこで筆者らはサーボプレスのスライドモーション制御と潤滑油流路付きパンチを使用した逐次潤滑穴あけ加工法(パルス穴あけ加工)²⁾を考案した。これまでにアルミニウム合金およびチタンの冷間穴あけ加工において、アスペクト比がそれぞれ 6, 1.5 の加工穴について、かじり疵・焼付きを抑制している^{2),3)}。

本研究では、筆者らが考案した逐次潤滑穴あけ加工法に

ついて、被加工材の材料流動から摩擦係数を算出し、パンチモーションと潤滑効果の関係を定量的に評価する。またパンチモーションと加工穴の形状精度の関係について調査し、その加工機構について考察する。さらにパンチモーションとパンチ摩耗の関係について有限要素解析により検討する。

2. 潤滑油流路付きパンチを使用した逐次潤滑穴あけ加工法の加工原理²⁾

図 1 に潤滑油流路付きパンチを使用した逐次潤滑穴あけ加工(パルス穴あけ加工)法のスライドモーションと加工原理を示す。本加工法では内部に潤滑油流路を有するパンチを用いて、パンチの前進・後退を繰り返しながら穴あけ加工を行う。穴あけ加工途中でパンチを後退させることによって、穴加工部の圧力を低下させ、パンチ先端部に設けた潤滑油流路から加工穴部に潤滑油を負圧によって引込ませる。穴底部へ潤滑油を逐次供給し、穴深部まで焼付き・かじり疵の発生を抑制することで穴あけ加工における加工限界の向上を目指した加工法である。別途設けたタンクから潤滑油をパンチの潤滑油流路に供給し、タンクとパンチ間にはポンプ等の潤滑油の流量制御機器を配置しない。

パンチモーションを表現するために、加工段数を n_{total} 、加工各段でのパンチ前進ストロークを s_a 、パンチ後退ストロークを s_r 、パンチ加工ストロークを $s_f (= s_a - s_r)$ 、全加工ストロークを s_{total} と定義する。

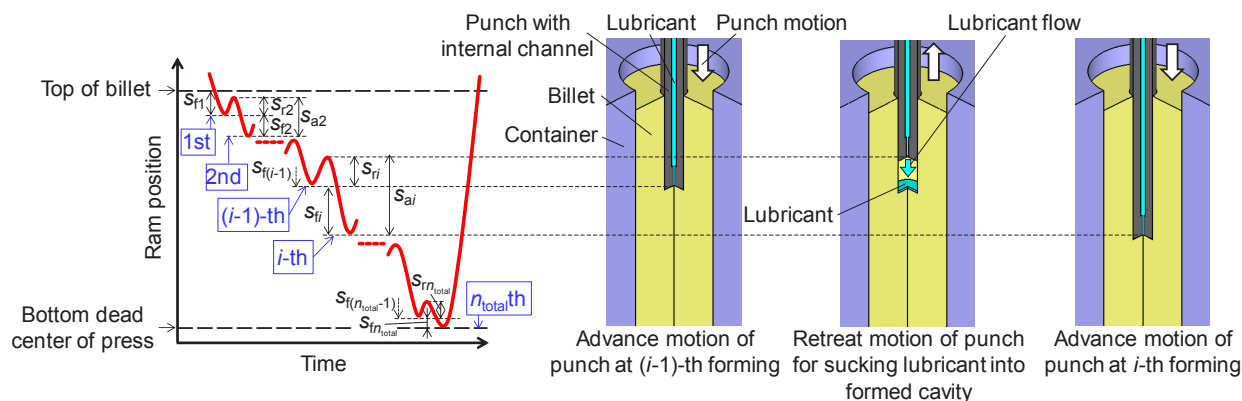


図 1 スライドモーション制御と潤滑油流路付きパンチを使用した逐次潤滑穴あけ加工法の加工原理

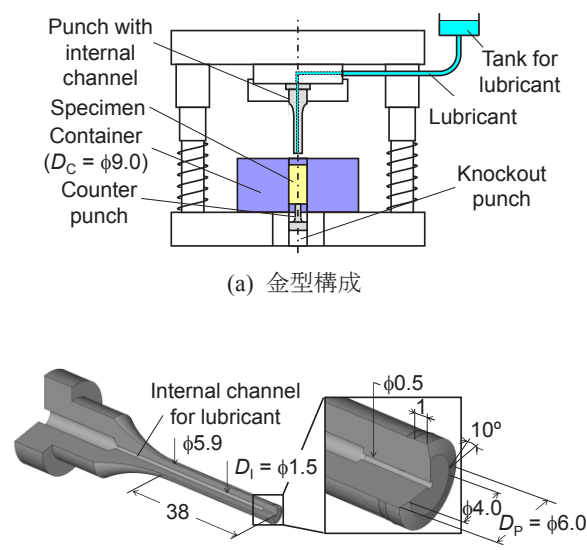
* 大阪大学 大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻 准教授

3. 潤滑油流路付きパンチを使用した逐次潤滑穴あけ加工法の摩擦低減効果の定量的評価⁴⁾

3.1 パルス前後方押し鍛造の加工条件

図2に金型構成およびパンチの形状を示す。パンチは高速度工具鋼 (SKH55)、コンテナはマトリックス高速度工具鋼 (YXR3) で作製し、表面粗さ $Ra = 0.02 \sim 0.04 \mu\text{m}$ に仕上げた。潤滑油流路付きパンチは先端部直径 $D_p = \phi 6.0\text{mm}$ 、内部に設けた潤滑油流路は直径 $D_i = \phi 1.5\text{mm}$ 、パンチ先端部で $D_i = \phi 0.5\text{mm}$ とした。一方、前方側パンチは直径 $D_p = \phi 4.5\text{mm}$ 、コンテナは内径 $D_c = \phi 9.0\text{mm}$ とし、押し出し比を前方部、後方部でそれぞれ $R = 1.33, 1.80$ とした。試験片には A6061-T6 アルミニウム合金 (直径: $\phi 8.9\text{mm}$, 高さ: 30mm) を、潤滑油には鉱油 (40°C での動粘度: $32\text{mm}^2/\text{s}$) をそれぞれ使用した。

プレスにはリンク式サーボプレス (最大許容能力: 450kN) を用いて、図3に示すような平均加工速度 $v_{\text{avg}} = 20 \sim 80\text{mm/s}$ (加工開始時速度: $150 \sim 250\text{mm/s}$)、 $s_f = 6 \sim 24\text{mm}$



(b) 潤滑油流路付きパンチ (後方側パンチ)

図2 金型構成およびパンチ形状

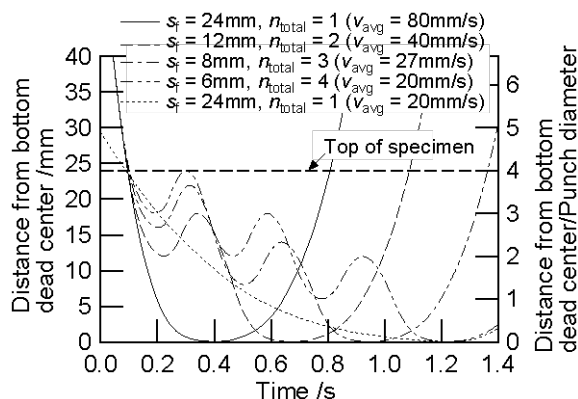


図3 パルス前後方押し鍛造におけるパンチモーション線図 (n_{total} : 加工段数, v_{avg} : 平均加工速度, 全加工ストローク $s_{\text{total}} = 24\text{mm}$)

($s_f/D_p = 1.0 \sim 4.0$), $s_r = 6\text{mm}$ ($s_f/D_p = 1.0$), $s_{\text{total}} = 24\text{mm}$ ($s_{\text{total}}/D_p = 4.0$) のパンチモーションで室温にて加工を行った。

3.2 実験結果

図4に 40°C での動粘度 $32\text{mm}^2/\text{s}$ の鉱油を用いた場合のパンチ後退ストロークと加工部へ流入する潤滑油体積 V_{Lub} およびみかけの厚さ $t_{\text{Lub}} (= V_{\text{Lub}}/(\pi(D_p/2)^2 + \pi D_p s_r))$ の関係を示す。 s_r が大きいほど V_{Lub} は大きくなり、 $s_f/D_p > 0.5$ で $t_{\text{Lub}} = 50 \sim 100 \mu\text{m}$ の潤滑油を加工部へ供給できることが分かる。

パルス前後方押し鍛造におけるパンチモーションと後方押し出し部の加工穴の表面粗さの関係を図5に示す。表面粗さは加工穴の側面を周方向に接触式表面粗さ計により測定した。 $s_f/D_p > 2.0$ でのパルス加工では加工穴の表面粗さは高く、加工穴全面にかじり疵が生じ、 $s_f/D_p < 1.3$ でのパルス加工では加工穴の表面粗さは低く、穴深部までかじり疵を生じることなく加工可能であり、パルスモーションによりパンチ内に設けた潤滑油流路から加工部へ潤滑油が逐次供給されたものと考えられる。

次にパンチモーションと試験片の前方部、後方部押し

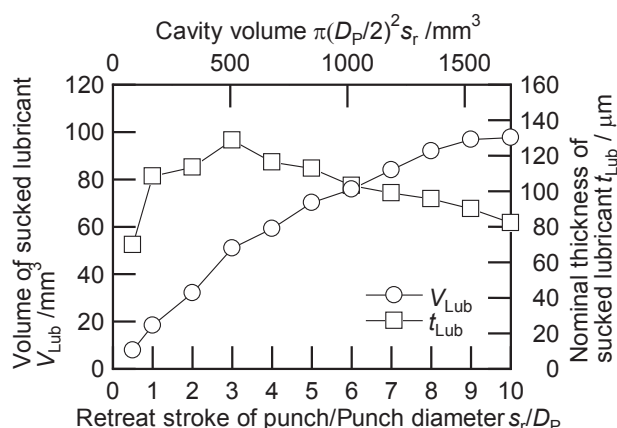


図4 パンチ後退ストロークと加工部へ流入する潤滑油体積およびみかけの厚さの関係 (鉱油 (40°C での動粘度: $32\text{mm}^2/\text{s}$))

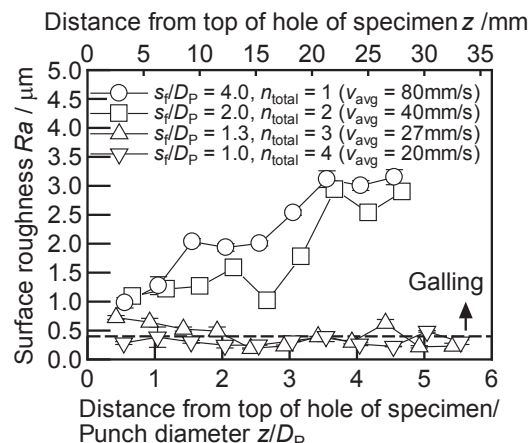


図5 パルス前後方押し鍛造におけるパンチモーションと後方押し出し部の加工穴の表面粗さの関係

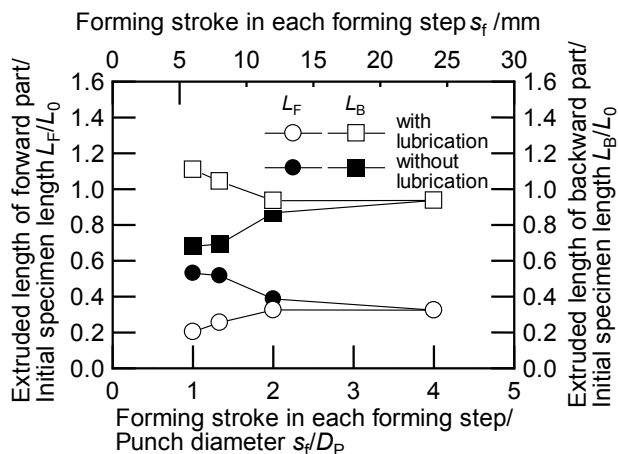


図 6 パルス前後方押し鍛造におけるパンチモーションと試験片の前方部、後方部押し長さの関係 (L_F : 前方部押し長さ, L_B : 後方部押し長さ)

長さ L_F , L_B の関係を図 6 に示す。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、無潤滑の場合は、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。

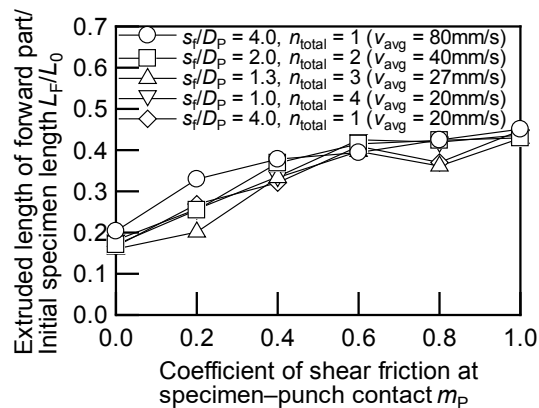
3.3 パンチ試験片間のせん断摩擦係数の算出

有限要素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た。弾塑性有限要素解析ソフトウェア simufact.forming ver.11 を使用し、二次元軸対称解析で試験片の弾塑性変形と温度変化を計算した。前方側パンチ試験片間、コンテナ試験片間のせん断摩擦係数は 0.2 とした。

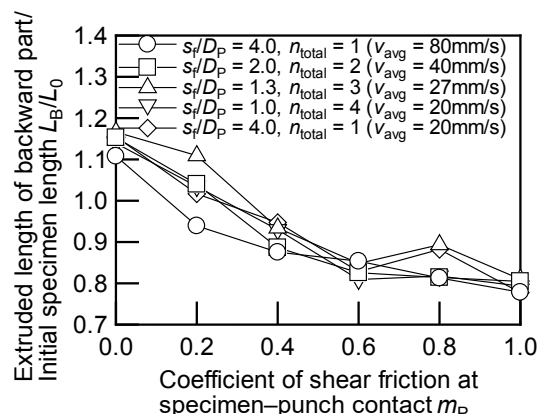
図 7 にパルス前後方押し鍛造における前方部、後方部押し長さの計算結果を示す。低摩擦の場合は後方部、高摩擦の場合は前方部への材料流動が促進され、実験結果と同傾向を示した。そこで、図 6 で得られた実験結果と図 7 の計算結果を比較することで、各パンチモーションでの m_p を算出した結果を図 8 に示す。前方部、後方部押し長さのいずれから算出した m_p も、非パルス加工 ($s_f/D_p = 4.0$, $n_{total} = 1$) では約 0.4 となった。一方、パルス加工 ($s_f/D_p = 1.0$, $n_{total} = 4$) では、無潤滑の場合は 0.8 以上の高いせん断摩擦係数となったが、潤滑油を使用した場合は、逐次潤滑の効果で 0.05 以下と低いせん断摩擦係数となった。

以上の結果より、考案したパルス穴あけ加工法は加工途中のパンチモーション制御による逐次潤滑により潤滑効果を得られることが分かる。

4. 潤滑油流路付きパンチを使用した逐次潤滑穴あけ加工法の加工穴の形状精度⁵⁾



(a) 前方押し長さ



(b) 後方押し長さ

図 7 パルス前後方押し鍛造におけるパンチモーション、せん断摩擦係数が前方部、後方部押し長さへ及ぼす影響 (有限要素解析)

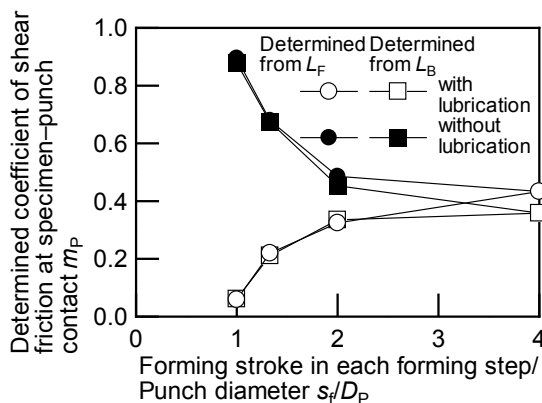
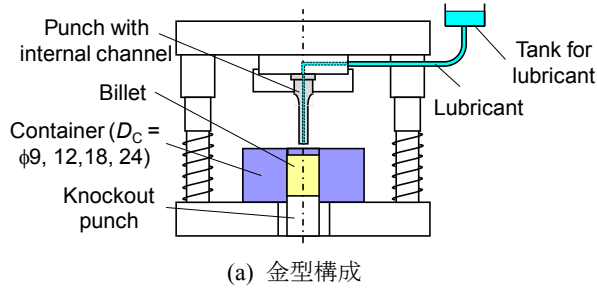


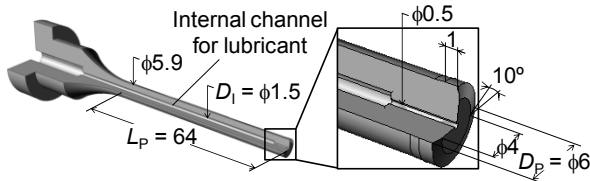
図 8 実験結果と有限要素解析結果から算出されたせん断摩擦係数とパンチモーションの関係

4.1 パルス後方押し鍛造の加工条件

図 9 に金型構成およびパンチの形状を示す。パンチは超硬合金 (WC-10mass%Co) で作製し、先端部直径 $D_p = 6\text{mm}$ 、長さ $L_p = 64\text{mm}$ とし、表面粗さ $Ra = 0.02 \sim 0.04\mu\text{m}$ に仕上げた。またパンチ内部に設けた潤滑油流路は直径 $D_l = 1.5\text{mm}$ 、パンチ先端部での直径 $D_r = 0.5\text{mm}$ とした。一方、コンテナはマトリックス高速度工具鋼 (YXR3) で作製し、



(a) 金型構成



(b) 潤滑油流路付きパンチ

図9 金型構成およびパンチ形状

内径 $D_C = 24, 18, 12, 9\text{mm}$ とし、押し出し比をそれぞれ $R = 1.07, 1.13, 1.33, 1.80$ とした。試験片には A6061-T6 アルミニウム合金（初期高さ：41mm）を、潤滑油には鉱油（40°C での動粘度：32mm²/s）をそれぞれ使用した。

プレスにはリンク式サーボプレスを用いて、平均加工速度 $v_{\text{avg}} = 20 \sim 80\text{mm/s}$ （加工開始時速度：150～250mm/s）、 $s_f = 9 \sim 36\text{mm}$ （ $s_f/D_P = 1.5 \sim 6.0$ ）、 $s_r = 6\text{mm}$ （ $s_r/D_P = 1.0$ ）、 $s_{\text{total}} = 36\text{mm}$ （ $s_{\text{total}}/D_P = 6.0$ ）のパンチモーションで室温にて加工を行った。

4.2 実験結果

加工穴の形状精度を評価するため、深さ方向 $s = 3\text{mm}$ 毎（ $s/D_P = 0.5$ 毎）に加工穴の直径と中心位置を測定した。 $s_{\text{total}}/D_P = 6.0$, $R = 1.07$ の場合の加工穴の直径分布の測定結果を図10に示す。非パルス加工（ $s_f/D_P = 6.0$, $n_{\text{total}} = 1$ ）と比較して、パルス加工（ $s_f/D_P = 1.5$, $n_{\text{total}} = 4$ ）による加工穴の方が直径分布のばらつきは小さく、寸法精度は高い。図11に加工穴の直径分布の標準偏差 σ_d を示す。ここで、 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、

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

と求めた。押し出し比によらず、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る。同様に、図12に加工穴の中心位置分布の標準偏差 σ_a を示す。ここで、 σ_a は試験片側面から加工穴中心までの距離を r_i 、試験片側面から加工穴中心までの平均距離を r_{avg} 、測定点を i として、

$$\sigma_a = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (r_i - r_{\text{avg}})^2} \quad (2)$$

と求めた。押し出し比によらず、パルス加工の方が標準偏差は小さいが、 $R = 1.13$ 以外の押し出し比では非パルス加工とパルス加工で大きな差は見られなかった。

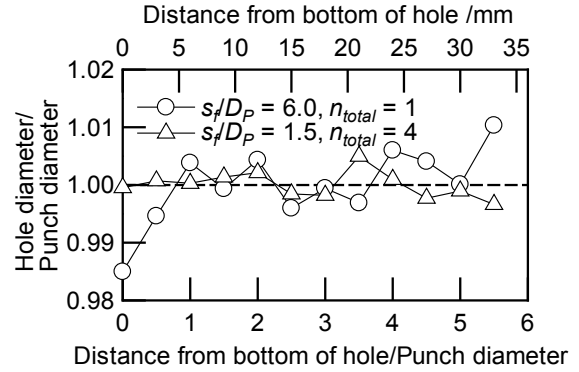


図10 加工穴の直径分布（押し出し比 $R = 1.07$ ）

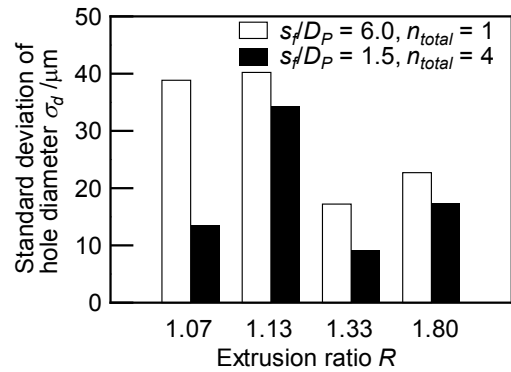


図11 加工穴の直径分布の標準偏差

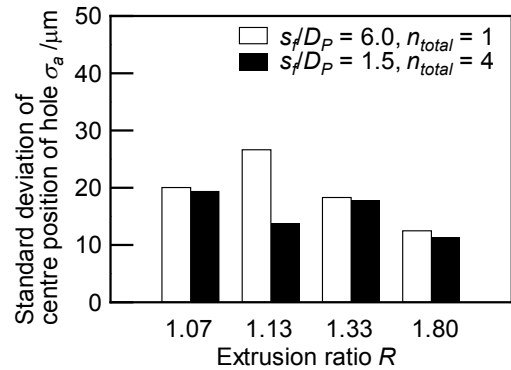
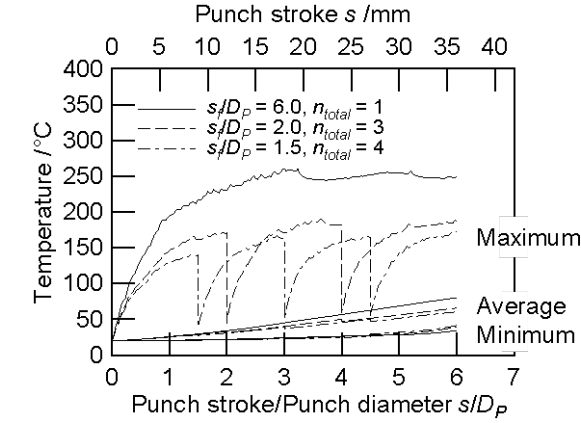


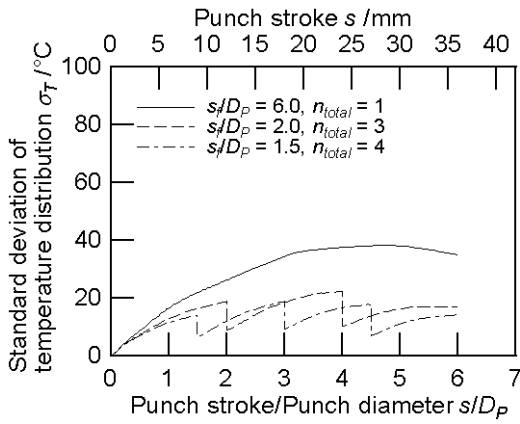
図12 加工穴の中心位置の標準偏差

4.3 有限要素解析による考察

4.2 節で得られた加工穴の形状精度の実験結果について、有限要素解析により考察する。有限要素解析では二次元軸対称解析とし、アルミニウム試験片の塑性変形と温度変化を計算した。ただし、二次元軸対称解析のため、加工穴の形状精度を有限要素解析では直接求めることは行わない。有限要素解析において加工穴の形状を高精度に得るためには、試験片、金型の物性値（例えば、応力-ひずみ線図、熱伝導率）や境界パラメータ（例えば、摩擦係数や熱伝達率）について温度依存性や圧力依存性を含めて高精度な値を入力する必要があるが、これらの物性値や境界パラメータをすべて測定することは困難なためである。冷間後方押し出し加工での形状精度には、加工発熱による加工中の試験片の温度分布が影響することが示唆^{6,7)}されているため、



(a) 最高、最低、平均温度の変化



(b) 温度分布の標準偏差

図 13 有限要素解析で計算されたパルス穴あけ加工中のアルミニウム試験片の温度変化（押し出し比 $R = 1.07$ ）

ここでは試験片の温度分布に着目して議論する。

図 13 に加工中の試験片の温度分布の計算結果を示す。

ここで、 σ_T は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、

$$\sigma_T = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_i - T_{avg})^2} \quad (3)$$

$$T_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i V_i}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad (4)$$

と求めた。パルス加工では各段でパンチ後退により塑性変形が断続的に行われるため、パンチ後退中に試験片が金型接触により冷却されることが分かる。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 σ_T は低く抑えられることが示唆される。試験片温度分布が均一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。

5. 逐次潤滑穴あけ加工におけるパンチ摩耗の検討⁸⁾

5.1 加工条件および有限要素解析条件

4.1 節で述べた加工条件に従い、パンチは先端部直径 $D_p = \phi 6.0\text{mm}$ 、コンテナは内径 $D_c = \phi 24.0\text{mm}$ 、試験片は直径 $\phi 23.9\text{mm}$ 、高さ 41mm で押し出し比を $R = 1.07$ とした。

弾塑性有限要素解析ソフトウェア simufact.forming ver.11 を使用し、二次元軸対称解析で A6061-T6 アルミニウム合金試験片の弾塑性変形と温度変化を計算した。一方、金型は剛体とし、温度変化のみ計算し、パンチの潤滑油流路は設けなかった。試験片-パンチ間のせん断摩擦係数は $m_p = 0.2, 0.4, 0.8$ とし、試験片-コンテナ間のせん断摩擦係数は 0.2 とした。また試験片-金型間、試験片-大気間の熱伝達係数は、それぞれ $10000\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ 、 $20\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ とした。試験片の比熱および熱伝導率は温度依存性を考慮せず、室温での物性値を用いた。

5.2 パンチ摩耗量の計算結果および考察

1 回のパルス穴あけ加工におけるパンチ摩耗を有限要素解析により見積もった。摩耗量 W は Archard の式⁹⁾により、摩耗係数 K 、試験片-工具間の接触圧力 P 、接触面の相対すべり速度 v 、接触時間 t 、パンチ材料の硬さ H ($= 11.3\text{GPa}$ (超硬合金)) として、

$$W = \int K \frac{Pv}{H} dt \quad (5)$$

を算出した。本研究では K を一定と仮定して、 W/K を摩耗量として取り扱った。

1 回のパルス穴あけ加工後のパンチ摩耗の分布図を図 14 に示す。いずれのパンチモーションにおいても、パンチ先端部側面ストレート部で W/K は最大となり、パルスモーションでの加工の方が W/K の最大値は高く、また $W/K \geq 2$ となる範囲は広がった。図 15 に各パンチモーションとパンチ先端部側面ストレート部（図 14 内の参照点）での W/K の関係を示す。ただし、各パンチモーションでの W/K を非パルスモーション ($s_f/D_p = 6.0$, $n_{total} = 1$, $m_p = 0.4$) での W/K で除したものを示す。非パルスモーションにおいては m_p が高いほど W/K は小さくなり、パルスモーションでの W/K は非パルスモーションでの W/K の $1.5 \sim 2.4$ 倍となった。

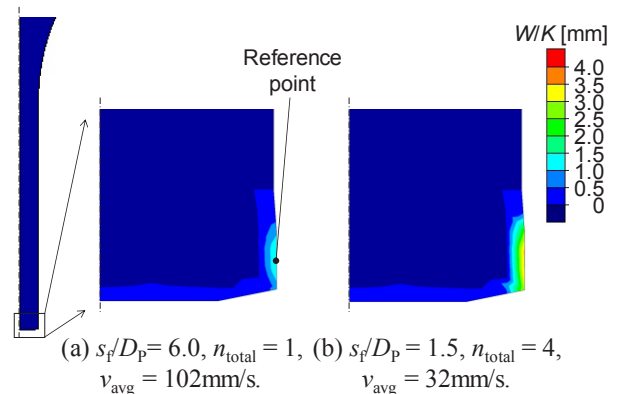


図 14 1 回のパルス穴あけ加工後のパンチ摩耗量の分布図 ($m_p = 0.4$)

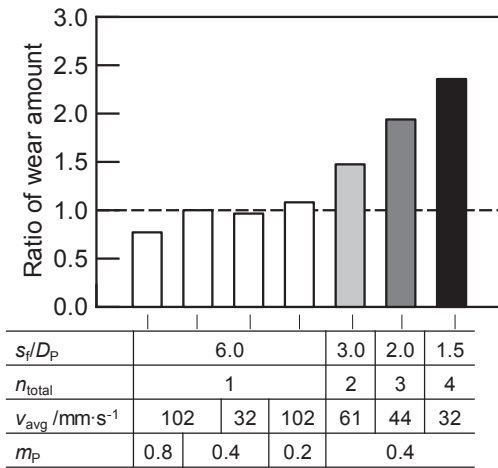


図 15 各パンチモーションにおけるパンチ先端部側面ストレート部 (図 14 内の参照点) での摩耗量

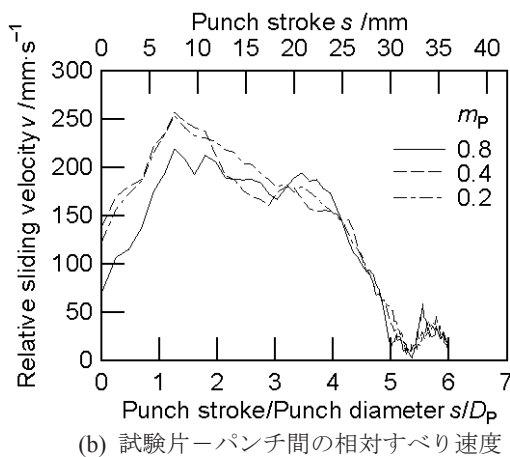
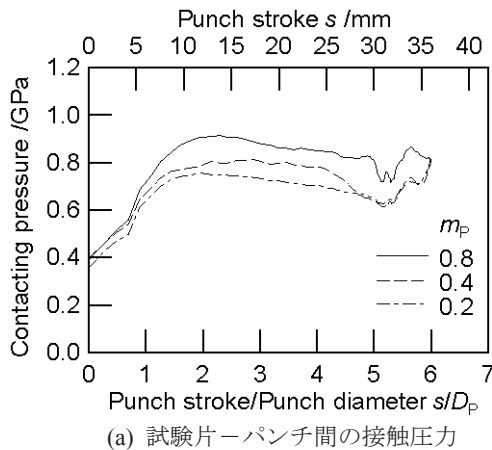


図 16 パンチ先端部側面ストレート部 (Fig. 3 内の参照点) での接触圧力とすべり速度 ($s_{total}/D_p = 6.0$, $n_{total} = 1$, $v_{avg} = 102mm/s$)

非パルスモーション ($s_t/D_p = 6.0$, $n_{total} = 1$, $v_{avg} = 102mm/s$) におけるパンチ先端部側面ストレート部での接触圧力と相対すべり速度の計算結果を図 16 に示す。 m_p が高いほど P は高くなったが、加工初期から中盤において v は低くなり、図 15 において m_p によって W/K が変化した

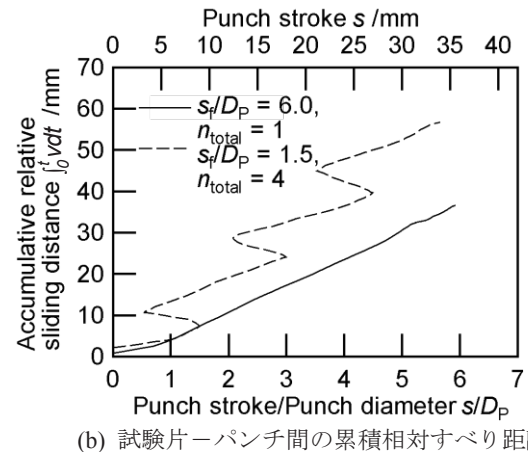
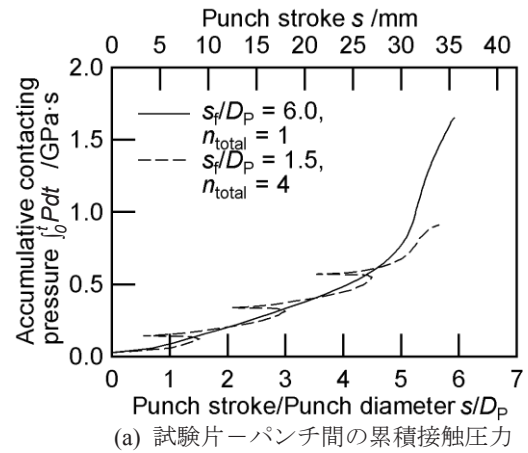


図 17 パンチ先端部側面ストレート部 (図 14 内の参照点) での累積接触圧力と累積相対すべり距離 ($s_{total}/D_p = 6.0$, $v_{avg} = 32mm/s$, $m_p = 0.4$)

ものと考えられる。図 17 に $s_{total}/D_p = 6.0$, $v_{avg} = 32mm/s$ のパルスおよび非パルスモーションにおけるパンチ先端部側面ストレート部での累積接触圧力 ($\int_0^t P dt$) と累積相対すべり距離 ($\int_0^t v dt$) の計算結果を示す。パルスモーションでは、 $\int_0^t P dt$ は加工終盤では非パルスモーションの約 0.5 倍となったが、加工中盤までは非パルスモーションと同程度であった。一方、パルスモーションでは、加工初期よりパンチが前進・後退を繰り返すため、 $\int_0^t v dt$ は非パルスモーションと比較して長くなった。このことより、図 15 においてパルスモーションの方が W/K が大きくなったものと推察される。

6. まとめ

本研究では、筆者らが考案した逐次潤滑穴あけ加工 (パルス穴あけ加工) 法について、アルミニウム合金の冷間鍛造を対象にして、パンチモーションと材料流動、加工穴の形状精度の関係を加工実験により調べ、有限要素解析を併用して摩擦係数を算出するとともに、その加工機構について考察した。また有限要素解析によりパンチモーションとパンチ摩耗の関係について検討した。以下に得られた結果をまとめる。

- 1) パルス穴あけ加工法では, 加工途中でのパンチ後退により潤滑油が加工部へ逐次供給される. 適切なパンチモーションを設定することにより, パンチー被加工材間のせん断摩擦係数を0.05以下(非パルス加工では, 約0.4)に低減できることが被加工材の材料流動特性より明らかになった.
- 2) パルス穴あけ加工法による加工穴の方が深さ方向に対する直径分布のばらつきが小さく, 中心位置の真直度も高精度であることが加工実験により示された. これはパルス加工の方が加工中の被加工材の温度分布の不均一度を抑制できることにより, 不均一変形が抑制され, また加工後の試験片の熱変形の不均一度も抑制されるため, 高い形状精度を得られることが有限要素解析により示唆された.
- 3) 取り扱った加工形状におけるパルスモーションでは, 試験片ーパンチ間の接触圧力は加工最終盤を除き, 非パルスモーションと同程度であり, 試験片ーパンチ間の摺動距離が長くなることに起因して, パンチ摩耗量が大きくなる傾向が見られた. 今後, 加工実験での検証が必要であるが, パルスモーションの実用化に際しては, パンチ摩耗量の増大には注意を要する.

謝 辞

本研究は(公財)天田財団・平成25年度一般研究開発助成(交付番号: AF-2013010)および科学研究費補助金・

若手研究(B)(課題番号: 24760106)を受けて実施したことを付記し, 深く感謝の意を表する.

参考文献

- 1) Osakada, K., Mori, K., Altan, T. & Groche, P.: CIRP Annals – Manufacturing Technology, **60-2** (2011), 651-672.
- 2) Matsumoto, R., Sawa, S., Utsunomiya, H. & Osakada, K.: CIRP Annals – Manufacturing Technology, **60-1** (2011), 315-318.
- 3) Matsumoto, R., Sawa, S. & Utsunomiya, H.: Key Engineering Materials, **504-506** (2012), 381-386.
- 4) Matsumoto, R., Hayashi, K. & Utsunomiya, H.: Journal of Materials Processing Technology, **214-4** (2014), 936-944.
- 5) Matsumoto, R., Jeon, J.Y. & Utsunomiya, H.: Journal of Materials Processing Technology, **213-5** (2014), 770-778.
- 6) Ishikawa, T., Ishiguro, T., Yukawa, N. & Goto, T.: CIRP Annals – Manufacturing Technology, **63-1** (2014), 277-280.
- 7) 四宮徳章, 白川信彦: 日本機械学会論文集 A 編, **79-804** (2013), 1107-1111.
- 8) Matsumoto, R. & Utsunomiya, H.: Key Engineering Materials, **611-612** (2014), 127-133.
- 9) Archard, J.F.: Journal of Applied Physics, **24-8** (1953), 981-988.