

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05720

研究課題名(和文) 低環境負荷のボンデフリー低サイクル振動鍛造の開発と自動再潤滑システムの確立

研究課題名(英文) Development of environmentally benign lubrication system using liquid lubricant with pulsating slide motion of servo press

研究代表者

前野 智美 (Maeno, Tomoyoshi)

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：80505397

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：冷間鍛造によく用いられる「リン酸塩皮膜処理+石鹸処理」いわゆるボンデ処理は焼付き抑制効果が高いが、環境負荷が問題となっている。ボンデ処理に変わる潤滑方法としてサーボプレスの低サイクル振動モーションを利用した自動再潤滑機能を持つ低サイクル振動スプライン成形方法を開発した。成形中にパンチを低サイクルの周波数で上下するモーションを用いる事で、工具と素材の間に負圧を発生させて、成形中に素材を自動的に再潤滑した。自動再潤滑によって焼付きの発生が低減した。低粘度の潤滑材では再潤滑時の抵抗が小さくなり保持時間を小さくできた。自動再潤滑を厚板のせん断に応用し切口面品質を向上した。

研究成果の概要(英文)：To use liquid lubricants for cold forging and extrusion operations causing severe deformation without phosphate-conversion coatings, automatic re-lubricating using pulsating motion of a servo press was enhanced. In backward extrusion of a cup with internal splines, negative pressure for supplying the lubricant to the inner surface of the cup was generated under the punch bottom by the pulsating motion. The liquid lubricant is supplied through these gaps up to the punch bottom without completely taking the punch from the cup. The effects of the holding time after each punch upstroke and the viscosity of the lubricant on the seizure prevention and the surface quality of the formed cup were examined from experiments of extrusion with pulsating motion. To shorten the forming time, lubricant pockets on a punch bottom was employed.

研究分野：塑性加工

キーワード：塑性加工 鍛造 潤滑 サーボプレス リン酸塩皮膜処理 ボンデ処理

1. 研究開始当初の背景

ネットシェイプおよび精密鍛造のために冷間鍛造が注目されており、ギア部品や中空部品などを冷間鍛造によって製造することが望まれている。鍛造成形の表面拡大率は非常に大きく、鍛造前に付与した潤滑剤の機能は鍛造中に低下するため、素材は金型に凝着しやすい問題がある。鍛造における焼付きを防止するために、「リン酸塩皮膜処理 + 石鹼処理」いわゆるボンデ処理が冷間鍛造には用いられている。しかしながら、ボンデ処理は大量の温水の使用や、化成工程における重金属を含む廃液など環境負荷が問題となっている。さらには、専用設備が必要となっており、コストも問題となっている。

2. 研究の目的

本研究では、環境負荷の高いボンデ処理にかわる焼付き抑制方法として自動再潤滑機能を持つ低サイクル振動スプライン成形方法を開発し、自動再潤滑システムの確立を行った。環境負荷の小さい液体潤滑剤において低サイクル振動を持つスライド運動によって、成形中の素材を自動的に再潤滑して、焼付きを防止する冷間鍛造方法を開発する。また、振動方法や液体潤滑剤の粘度、添加剤を再潤滑メカニズムに基づいて最適化し、耐焼付き性の高い自動再潤滑システム確立に取り組んだ。また、自動再潤滑を応用し、厚板の穴抜き加工における切口品質向上にも取り組んだ。

3. 研究の方法

3.1. 振動後方押し出しによる内スプライン成形方法

図1に振動後方押し出しによる内スプライン成形における自動再潤滑方法を示す。素材とパンチ溝の間には、材料が完全充填しない隙間が生じる。パンチを成形途中に上げると、パンチ先端に空間が生じ、負圧となるため周囲の潤滑剤を吸入し底部が再潤滑される。

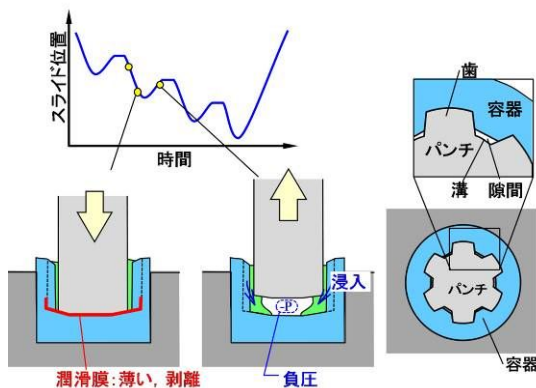


図1 振動後方押し出しによる内スプライン成形における自動再潤滑

振動後方押し出しによる内スプライン成形に用いた工具とピレットを図2に示す。ピレットには高さ15mm、直径20.5mmの焼鈍し

したS10Cを用いた。パンチはSKH51であり、歯数6のスプラインを有している。潤滑剤には動粘度 $\nu = 40, 130, 610$ の硫黄添加潤滑剤を用い、動粘度を変える実験以外は $\nu = 130 \text{ mm}^2/\text{s}$ を用いた。

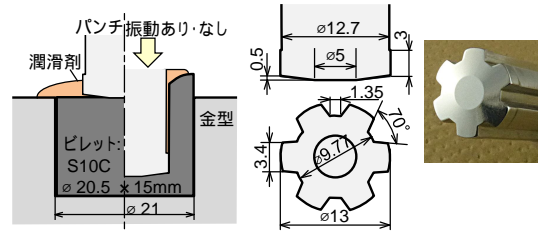


図2 振動後方押し出しによる内スプライン成形に用いた工具

図3に振動後方押し出しに用いたスライドモーションを示す。スライドの総ストロークは12mmであり、振動なしは速度23mm/sのクランク運動である。振動ありは速度12.5mm/sであり、振動回数 n の除荷を等間隔のストローク毎に行う。除荷時にはスライドを1.2mm上昇させ、パンチ下面と容器底の間に0.3mmの隙間を生じさせた。振動あり、保持ありは、上昇時に潤滑剤流入させるためにスライドを保持時間 t 秒停止させた。

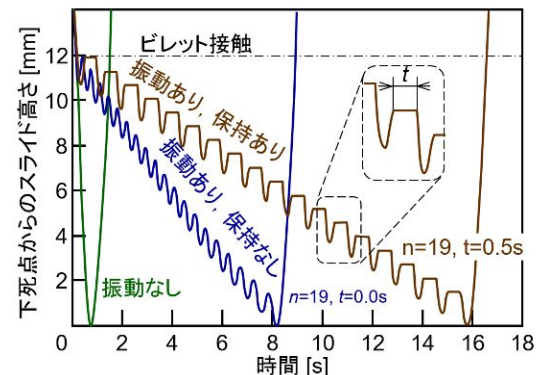


図3 振動後方押し出しに用いたスライドモーション

3.2. 有限要素シミュレーションによる隙間の検討

除荷時に生じるパンチとピレットとの隙間について有限要素シミュレーションによって調べた。構築した計算モデルを図4に示す。市販有限要素ソフト DEFORM を用いピレットを弾塑性体、工具を弾性体とし1/4モデルで計算した。計算における摩擦係数は振動なしの実験における最大荷重と計算結果が一致するように調整を行った。

3.3. 潤滑剤ポケットパンチによる保持時間の省略方法

パンチ上昇時の停止保持によって、十分な再潤滑がされ焼付きが抑制されるが、成形時間が増加する。図5に示すように、パンチ先端のポケットから潤滑剤を供給するパンチを用いて振動後方押し出しスプライン成形を行った。振動なしと $n=19, t=0\text{s}$ で成形を行った。また、除荷のみでパンチ上昇なしも試みた。

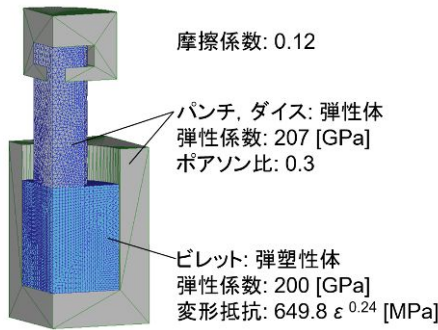


図 4 有限要素シミュレーションによる解析に用いたモデルと計算条件

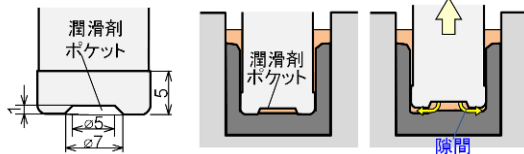


図 5 潤滑剤ポケットによる自動再潤滑

3.4. 低粘度潤滑油に固体潤滑剤を添加したハイブリッド潤滑剤の検討

自動再潤滑では、低粘度の潤滑剤を用いると隙間を潤滑剤が通り抜ける際の抵抗が小さく、焼付き防止に効果があった。そこで、図 6 に示すような低粘度の液体潤滑剤に固体潤滑剤を添加した構造の潤滑剤の適用を試みた。固体潤滑剤として黒鉛粉末を採用した。

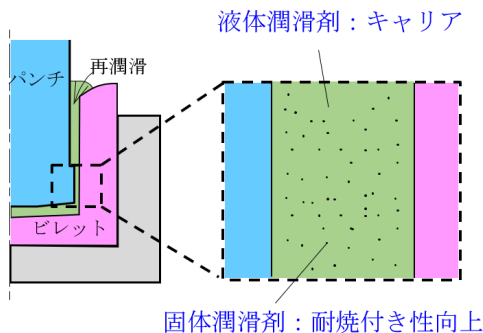


図 6 低粘度液体潤滑剤への固体潤滑剤添加の検討

3.5. 自動再潤滑を有する穴抜き加工方法

自動再潤滑を鍛造だけで無く、精密せん断への適用を検討したでは厚板を取扱う場合も多く、凝着の問題が顕著となる。フェライト系及びオーステナイト系ステンレス鋼板を振動ありとなしで穴抜きを行い、切り口面性状およびパンチ凝着に及ぼす振動モーションの影響を調査した。

図 7 に振動モーションによる自動再潤滑を有する穴抜き加工方法を示す。パンチの上昇によってパンチ下部に負圧が生じ、周囲の潤滑剤が浸入して切り口面は逐次潤滑される。図 8 に実験に用いたパンチ形状と穴抜き条件を示す。平坦パンチと、パンチ肩に丸みを設けた丸み付きパンチを用いた。材料にはフェライト系 SUS430、オーステナイト系 SUS304 の厚さ 10 mm のステンレス鋼板を焼鈍して用いた。

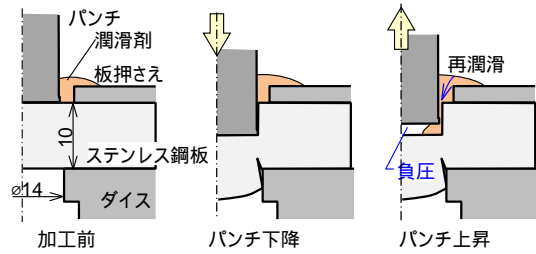


図 7 振動モーションによる自動再潤滑を有する穴抜き加工方法

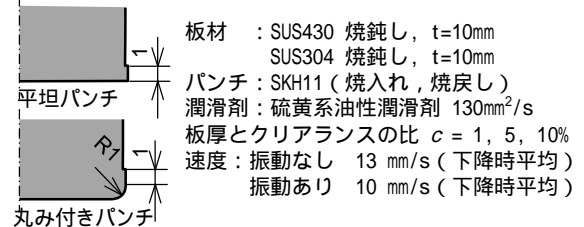


図 8 パンチ先端形状および加工条件

4. 研究成果

4.1. 有限要素シミュレーションの結果

図 9 に有限要素シミュレーションで得られた荷重除荷前後のパンチ先端部分の断面を示す。荷重除荷前においてパンチ溝部には 90 μ m の隙間が生じている。荷重を除荷するとパンチの弾性回復によってその隙間はさらに大きくなっている。

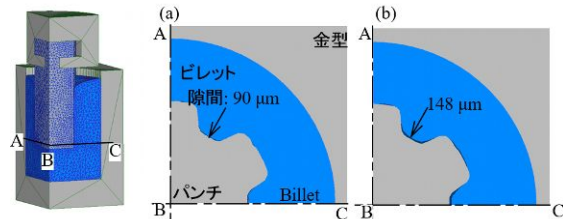


図 9 有限要素シミュレーションにおける、加重除荷(a)前(b)後のパンチ先端部断面

4.2. 振動ありとなしでスプライン成形した結果

図 10 に振動ありとなしにおける押し出し荷重ストローク曲線および成形されたスプライン容器断面を示す。振動ありは押し出し荷重が低減している。振動なしはスプライン容器内面に強い焼付きが生じているが、振動ありの焼付はわずかであり、振動の跡が薄く見られる程度である。

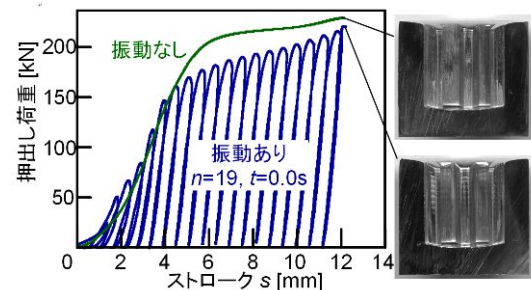


図 10 振動ありとなしにおける押し出し荷重ストローク曲線および成形されたスプライン容器断面

図 11 に振動ありとなしにおけるパンチおよびスプライン凹部表面を示す。振動なしではパンチに強い焼付きが生じ、スプライン凹部にはクラックが生じている。振動ありでは焼付きが低減しているが、パンチにわずかな焼付きを生じており十分でない。

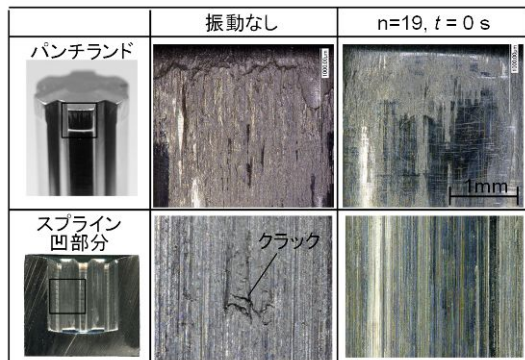


図 11 振動ありとなしにおけるパンチおよびスプライン凹部表面

図 12 に保持時間がパンチおよびスプライン凹部表面に及ぼす影響を示す。 $t = 0.5\text{ s}$ 以上では焼付きが防止されており、保持時間によって潤滑剤の供給が増加し、焼付きが防止できた。また、スプライン凹部表面において油溜まりのような窪みが確認された。

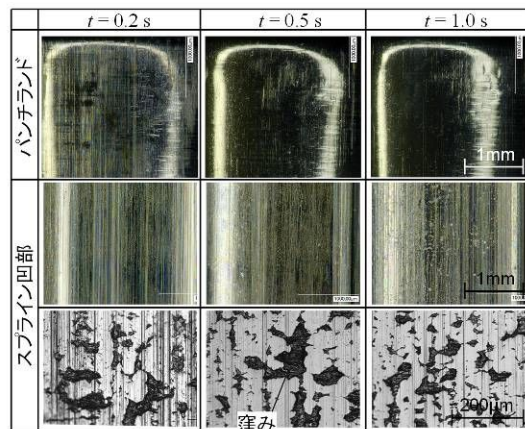


図 12 保持時間がパンチおよびスプライン凹部表面に及ぼす影響 ($n = 19$)

図 13 に $n = 19, t = 0.5$ の振動モーションで成形した容器の内面を示す。内面に形成された油溜まりは振動モーションのサイクルと一致した感覚で濃淡が生じていた。振動回数と保持時間がパンチランドとスプライン凹部の焼付きに及ぼす影響を図 14 に示す。十分な保持時間によって振動回数を減らす事が可能となり、 $n = 4, t = 1.0\text{ s}$ においても焼付きが防止され成形時間が 4.7 s に短縮された。

図 15 に動粘度 $\nu = 40, 130, 610\text{ mm}^2/\text{s}$ の潤滑剤を用いて $n = 19, t = 1.0$ の振動モーションにおいて成形した容器内面の平均的油溜まり深さを示す。粘度が大きくなると潤滑膜が厚くなり容器内面に生じる油溜まりの深さが深くなった。また、容器底部にむかって徐々に油溜まりの深さが浅くなった。加工が進行

して成形荷重が大きくなると、プレスおよび工具の弾性変形が大きくなり、パンチの設定の上昇量に対してパンチ下部に実際に生じる隙間が小さくなり、供給される潤滑剤が減少したためと考えられる。

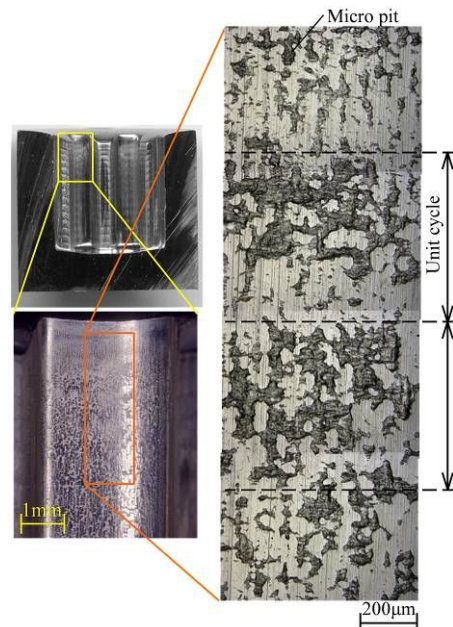


図 13 $n = 19, t = 0.5$ の振動モーションにおいて成形されたスプライン容器の内面

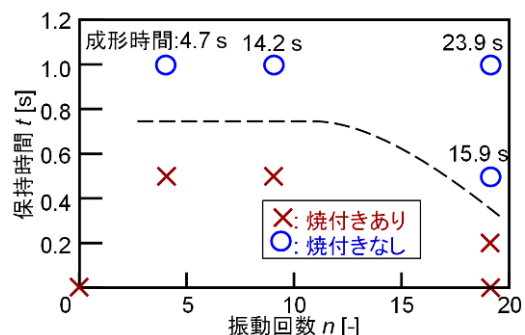


図 14 振動回数と保持時間がパンチランドとスプライン凹部の焼付きに及ぼす影響

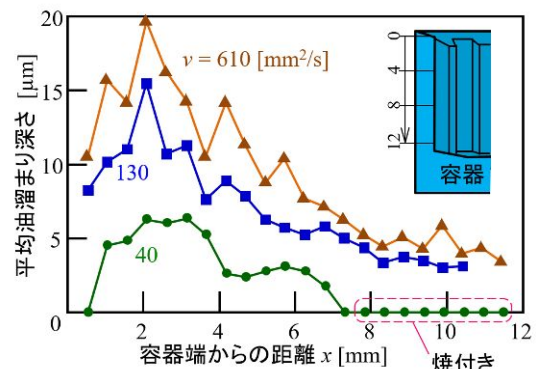


図 15 各動粘度の潤滑剤で成形された容器内面に生じた油溜まりの深さ分布

図 16 に $\nu = 130, 610\text{ mm}^2/\text{s}$ において各停止保持時間で成形した際の容器内面表面粗さを示す。低粘度の潤滑剤の方の表面粗さが小さ

なくなった。また、小さい保持時間においても焼付きを防止することができており、再潤滑の際に隙間で生じる抵抗が小さく十分な量の潤滑剤が再潤滑されていることがわかる。

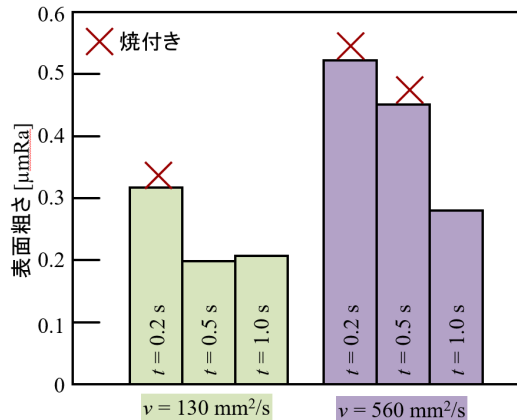


図 16 $v = 130, 610 \text{ mm}^2/\text{s}$ において各停止保持時間で成形した際の容器内面表面粗さ ($n = 19$)

4.3. 潤滑ポケットパンチによる保持時間の省略

振動あり振動中の停止保持は加工時間を大きく増加させてしまう。停止保持を省略するために、パンチ先端にポケットを設けて、潤滑剤をパンチ先端に封じた。潤滑剤ポケットパンチを用いたときのパンチランドおよびスプライン凹部表面を図 17 に示す。振動なしでは潤滑剤がポケットから供給されず図 11 の振動なしと同じ結果となった。一方、振動ありでは $t = 0 \text{ s}$ でも焼付きが抑制された。また除荷のみの場合、過度な潤滑剤供給や、パンチの滑りが減り窪みのない良好な表面性状が得られた。

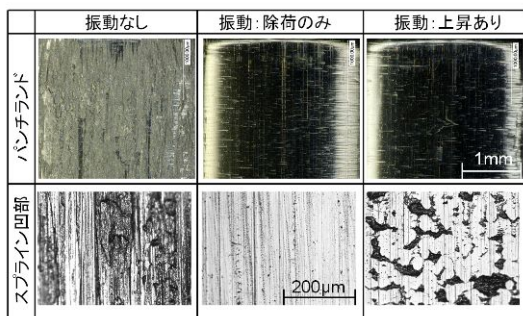


図 17 潤滑剤ポケットパンチにおけるパンチランドおよびスプライン凹部表面

振動あり ($n = 19, t = 0 \text{ s}$) となしにおいて成形した容器の軸方向断面を図 18 に示す。振動なしにおいてはパンチ先端のポケットに形成される盛上がりはわずかである。振動がないためにポケットの潤滑剤は外に出なく、パンチ側壁が再潤滑されなかった。一方振動ありではポケットに素材が充満しており、その分の潤滑剤が周囲にしみ出したことがわかる。

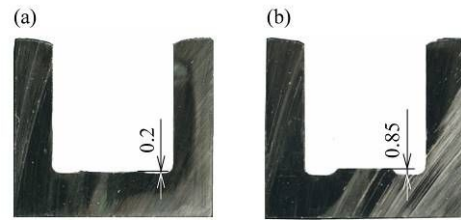


図 18 振動あり ($n = 19, t = 0 \text{ s}$) となしにおいて成形した容器の軸方向断面

4.4. 低粘度潤滑剤に黒鉛粉末を添加した潤滑剤を用いた結果

図 19 に動粘度 $v = 70, 130 \text{ mm}^2/\text{s}$ の潤滑剤に平均粒径 $50 \mu\text{m}$ の黒鉛を $10 \text{ wt}\%$ 添加した潤滑剤を用いた時の容器内面を示す。焼付きの有無で潤滑性能の差を評価するために、振動回数および停止保持時間を小さくして評価を行った。いずれの動粘度においても黒鉛を添加すると焼付きが生じてしまった。わずかな隙間から潤滑剤を浸入させるため、黒鉛が隙間に詰まってしまったと考えられる。

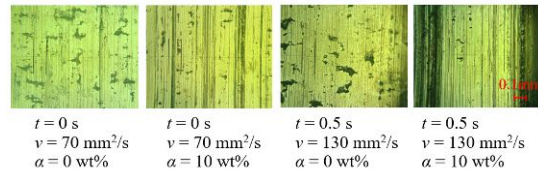


図 19 動粘度 $v = 70, 130 \text{ mm}^2/\text{s}$ の潤滑剤に黒鉛を $10 \text{ wt}\%$ 添加した潤滑剤を用いた時の容器内面 ($n = 4, t = 0$)

工具と素材との間に生じる隙間への固体潤滑剤のつまりを避けるために、黒鉛の粒径を低減した。粒径 $4 \mu\text{m}$ の土壌黒鉛、粒径 200 nm のオニオンライクカーボンを $v = 40 \text{ mm}^2/\text{s}$ 添加して実験を行った。その結果を図 20 に示す。粒径 $4 \mu\text{m}$ の土壌黒鉛においては添加なしよりも焼付きが増加し、その割合も添加量が増すほど増加した。粒径の小さいオニオンライクカーボンでは焼付きの増加は見られなかったものの、添加なしと変わらない結果となった。潤滑剤への固体潤滑剤添加は自動再潤滑を阻害し、適さない事がわかった。

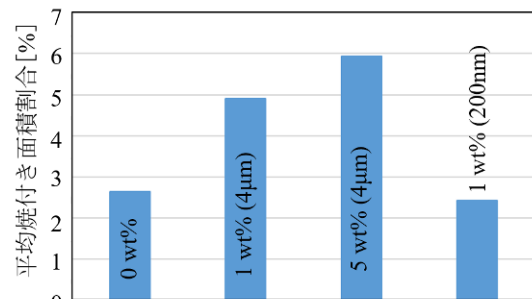


図 20 潤滑剤に添加した黒鉛粒径が成形後の焼付きに及ぼす影響

4.5. 自動再潤滑を有する穴抜き加工結果

図 21 に $c = 5\%$ 、平坦パンチおよび丸み付きパンチにおける振動ありとなしで穴抜きされた穴切り口面およびパンチ先端を示す。平坦パンチでは、振動なしにおいて、穴に焼付きおよびパンチに凝着が見られ、振動ありでは焼付きおよび凝着は見られない。しかしながら、せん断面の割合に大きな差はなく板厚の 50%程度である。一方、丸み付きパンチでは振動ありにおいて、せん断面が著しく向上しており、焼付きも生じていない、振動なしでは平坦パンチの結果とあまり変わっていない。以降においては丸み付きパンチを用いる。

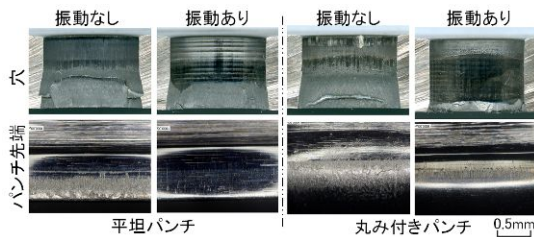


図 21 $c = 5\%$ 、平坦および丸み付きパンチによる振動ありとなしで穴抜きされた SUS430 材穴切り口面およびパンチ先端

図 22 に各クリアランス比において振動ありとなしで穴抜きされた SUS430 材の切り口面を示す。振動なしではクリアランスの減少にもなって切り口が垂直になっているものの、切り口面の構成比はあまり変わっていない。振動ありではクリアランスの減少とともにせん断面の割合が向上しており、 $c = 1\%$ ではほぼ全せん断となっている。

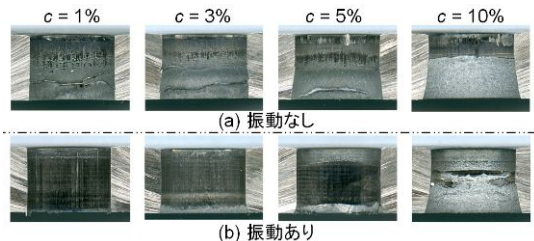


図 22 各クリアランス比において振動ありとなしで穴抜きされた SUS430 材の切り口面

4.6. まとめと課題

「リン酸塩皮膜処理 + 石鹸処理」の代替潤滑として自動再潤滑機能を持つ低サイクル振動モーションを冷間鍛造のスプライン成形に適用し、その特性と本システムに有効な潤滑特性を調査した。その結果冷間鍛造においての焼付きを防止するのに有効であることが示された。また、通常は高粘度の潤滑剤が高い焼付き特性を示すが、自動再潤滑においてはある程度粘度の低い潤滑剤の方が自動再潤滑の効率が向上することがわかった。流動抵抗の少ない低粘度の潤滑剤への固体潤滑剤添加を試みたが、固体潤滑剤が工具と素材の隙間に詰まり、自動再潤滑を阻害してし

まうことがわかった。厚板の穴抜き加工に振動モーションを適用し、穴抜き最中の工具との焼付きを防止したところ、パンチ角に丸みをもたせたパンチにおいて、せん断面の割合が増加した。適切なクリアランスにおいては切口面が全領域でせん断面となった。

振動モーションは焼付きを防止するために有効であったが、加工時間が大きくなってしまいう問題がある。適切な時期に最小の振動回数の振動モーションを設計する方法については今後の検討が必要である。また、隙間の生じにくい工具形状において効率的に潤滑剤を供給する方法の検討も今後の課題である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

T. Maeno, K. Mori, Y. Ichikawa, M. Sugawara, Use of liquid lubricant for backward extrusion of cup with internal splines using pulsating motion, Journal of Materials Processing Technology, 査読有, 244(2017) 273-281.

DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.02.001

前野 智美, サーボプレスを活用した低サイクル振動モーションを用いた自動再潤滑, プレス技術, 査読無, 56 巻, 2018, 70-74.

〔学会発表〕(計 2 件)

前野智美, 菅原稔, 森謙一郎, 平成 27 年度 塑性加工春期講演会 2015 年 5 月

前野智美, 菅原稔, 森謙一郎, 平成 28 年度 塑性加工春期講演会 2016 年 5 月

6. 研究組織

(1)研究代表者

前野 智美 (MAENO, Tomoyoshi)

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号: 80505397

(2)研究分担者

森謙一郎 (MORI, Ken-ichiro)

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 80127167