環境対応型潤滑剤に対するレーザー加工による素材表面処理技術および複数工程時の潤滑評価手法の開発

静岡大学　工学部　機械工学科
教授　早川　邦夫
（2024 年度 一般研究開発助成 AF-2024013-B2）

キーワード：レーザー，表面処理，潤滑

１．研究の目的と背景

冷間鍛造においては，素材の表面に皮膜を化学的に生成する化成皮膜固体潤滑剤が永らく使用されてきているが，環境に対する負荷が大きいため，その代替として，素材表面への塗布と乾燥のみで使用可能な冷間鍛造用環境対応潤滑剤が開発され，近年の性能向上も大きい．

環境対応型潤滑剤は，塗布および乾燥のみで表面に密着させるので，塗布前の素材の表面性状（粗さ，清浄性）は潤滑特性に大きな影響を及ぼす．著者ら[1]は，ウェットブラスト処理により作成された表面性状が，潤滑性能評価試験により得られた摩擦係数に及ぼす影響について，表面粗さの高さ方向の尺度 *Ra* と長さ方向（周期）の尺度 *RSm* を使った新たな尺度 $Ma = Ra/RSm$ と摩擦係数との間に高い相関が見られることを示した（図 1）．しかし，ブラスト処理では，理想的な表面性状を作ることは難しい．図 2 は，図 1 の実験の際に作成した表面性状のマップを示す．なるべく広範囲に分散するように処理を行ったが，*Ra* と *RSm* にはある程度の相関が見られ，自由に表面性状を制御することは困難であった．さらに，ブラスト材は消耗品であり，装置もブラストによる摩耗などの理由でメンテナンス頻度が大きいことが問題となる．

この問題点を解決できる理想的な表面性状を創成できる表面処理技術として，最近の発展が著しいレーザー加工技術の利用が考えられる．現在のレーザーの走査速度は非常に大きく，またその精度も高く，量産を見据えた際にも，環境対応型潤滑剤のための素材表面処理として有望と考えられる．

また，環境対応型潤滑剤は，たとえ適切な表面処理が施されても，あくまで表面に物理的に付着しているだけのため，複数工程に対する皮膜維持能力は高くない．しかし，その評価手法についてはまだ研究は十分とは言えない．高性能の環境対応型潤滑剤開発のための評価手法の確立が，適切な表面処理技術とともに，環境対応型潤滑剤の適用限界の向上のために望まれている．

そこで，本研究では，以下の 2 点について研究を行う．第 1 は，環境対応型潤滑剤に対するレーザー加工による素材表面処理技術の開発である．レーザーによる表面加工を，潤滑処理の下地処理として用いる際，どのような表面性状が最適かを調査する．第 2 は，複数工程時の潤滑評価手法の開発である．冷間鍛造の複数工程では，前段で据込みや押出しの工程があり，その際に塗布した潤滑剤は剥落したり，密着性が低下したりする．そのまま次の工程を行った場合，想定した潤滑特性が得られずに凝着などのトラブルが発生する．そのため，ここでは複数工程からなる試験法を提案し，その妥当性を評価する．

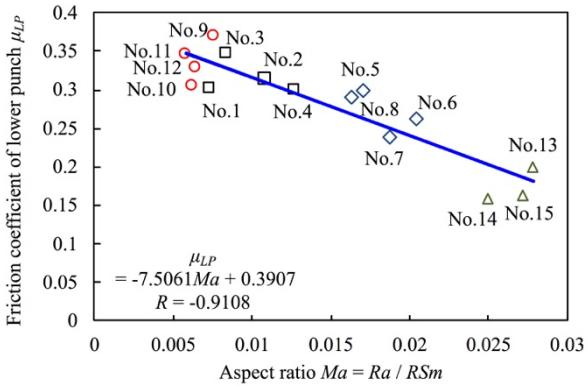


図 1　摩擦係数と表面性状の関係例 [1]

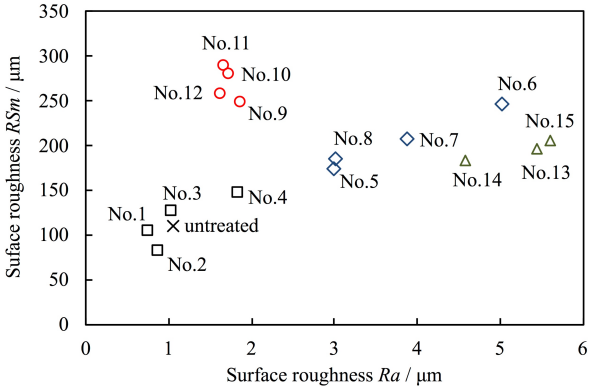


図 2　ブラスト処理による *Ra* と *RSm* の分布例 [1]

２．冷間押出し加工におけるレーザーによる素材の表面処理が潤滑特性に及ぼす影響

表面粗さの精密な制御が可能で，初期導入コストのみで長期的にはコスト削減が見込めるレーザー加工による下地処理の可能性を調査した．押出し型鍛造を模擬した摩擦試験により，レーザーによる下地処理システムにより処理を行った素材における潤滑特性を，りん酸塩皮膜およびショットブラスト処理の場合と比較した．

2・1　スプライン付き前方押出し型摩擦試験

図 3 は, 鷺坂らが提案したスプライン付き前方テーパー軸押出しと後方直缶押出しを組み合わせた摩擦試験法の概念図を示す [2]．3 か所の歯型形状部の変形により局所的表面拡大を実現することができる．パンチストローク *Sp* の増加に伴って前方テーパー軸が押し出され，その後，後方に直缶が押し出される．

有限要素ソフトウェア Simufact Forming を用いて，摩擦係数を変更してストローク *Sp* と前方軸長さ *Sf* に関する較正線図を作成した．その後，試験後の試験片寸法から真ストローク *Sp* を求め，較正線図にプロットし，内挿法を用いてクーロン摩擦係数 μ を同定した．

2・2　レーザー加工による下地処理

図 4 は，加工後の素材表面を示す．表面性状の影響を調べるため, レーザーによる凹みのピッチと深さ *D* の比 *P*/*D* の異なる 2 種類の表面処理 (a); *P*/*D* = 12 および (b); *P*/*D* = 4 を行った．なお，これらはいずれも目標値である．

表 1 は，本研究で用いた潤滑条件を示す．条件 1 は表面処理なしおよびりん酸塩皮膜の対照実験である．条件 2～5 には，表面処理および 1 液型または 2 液 2 層型環境対応型潤滑剤の異なる 4 つの条件を用意した．

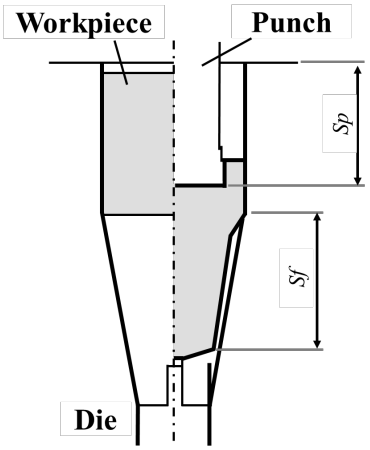


図 3　スプライン付き前方テーパー軸押出しと後方直缶押出しを組み合わせた摩擦試験法 [2]

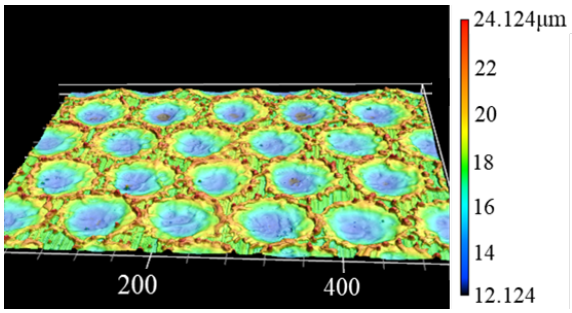
2・3　実験および考察

2・3・1　実験条件

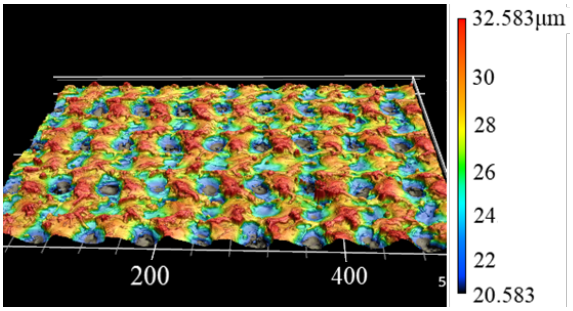
表 2 は実験条件を示す．素材には SCM420H (JIS) を用いた．また，2 つの異なる *Sp* = 14.44 mm および 20.44 mm で実験を行った．

2・3・2　試験結果および考察

図 5 は, 作成した較正線図と実験から測定した値をプロットしたものを示す．また，図 6 は，図 5 で内挿法を用いて求めた各 *Sp* の μ を示す．図 6 より，下地処理の影響を見ると，μ は条件 3，条件 2，条件 4 の順に大きく，下地処理条件(a)の場合の潤滑性能が高いことがわかる．潤滑剤の影響については，*Sp* が大きい場合に μ が条件 3 より



(a) *P*/*D* = 12



(b) *P*/*D* = 4

図 4　レーザー処理表面性状の例

表 1　潤滑条件

Condition	Surface treatment	Lubricant
1 (control)	No treatment	Zinc-Phosphate
2	Shot blast	Single-layer-type environmentally-friendly
3	Laser treatment (a): *P*/*D* = 12	Single-layer-type environmentally-friendly
4	Laser treatment (b): *P*/*D* = 4	Single-layer-type environmentally-friendly
5	Laser treatment (a): *P*/*D* = 12	Double-layer-type environmentally-friendly

表 2　実験条件

Work material	SCM420H
Lubrication	Listed in Table 1
Temperature	Room Temperature
Punch stroke /mm	14.44 and 20.44
Punch speed /mm•s^{-1}	60

も条件 5 の方が大きい．以上より，より厳しい加工条件でも潤滑性能の高い環境対応型潤滑剤がレーザー加工による下地処理と相性が良いことが示唆される．全体的に，条件 1 のりん酸塩皮膜が最も μ が小さく潤滑性能が高いといえるが，その差はわずかである．

以上より，レーザー加工による下地処理と環境対応型潤滑剤の組合せは，りん酸塩皮膜と同等の潤滑性能が得られることが期待される．

図 7 (a)～(c)は，条件 2，条件 3 および条件 4 における摩擦試験後の表面性状を示す．摩擦試験後の突出山部高さ *Spk* は，条件 2 で約 1.10 μm，条件 3 で 0.69 μm，条件 4 で

0.94 μm であった．また，突出谷部高さ *Svk* は，条件 2 で約 2.56 μm，条件 3 で約 2.73 μm，条件 4 で約 1.85 μm であった．

潤滑面において，*Spk* は小さく，*Svk* は大きいことが潤滑剤の保持において有効であることが知られている [3]．そこで，*Spk* および *Svk* の値に注目し，異なる下地処理条件において比較を行った．その結果，条件 3 において最も *Spk* が小さく，最も *Svk* が大きい．これより，条件 3 の表面形状が潤滑剤の保持に対してより効果的であると考えられる．さらに，同定された μ からも，条件 3 における潤滑性能が最も優れていることが確認できる．これは，レーザー加工により周期的なディンプルが表面に形成され，一定の間隔で潤滑剤が保持されることにより，潤滑性能が向上するためであると推察される．

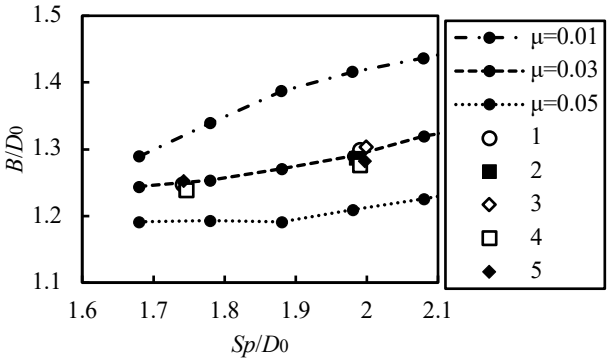


図 5　較正線図と実験結果

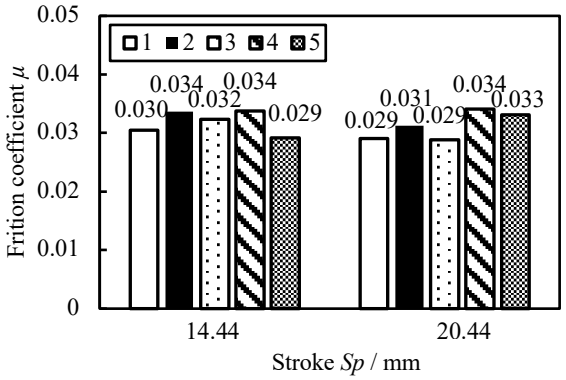
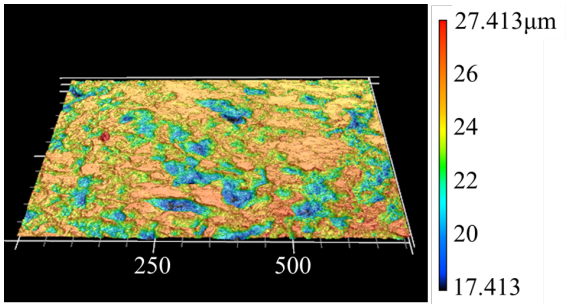
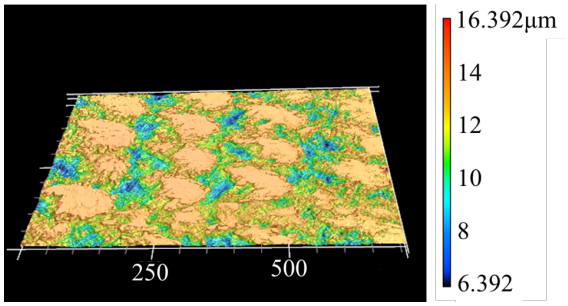


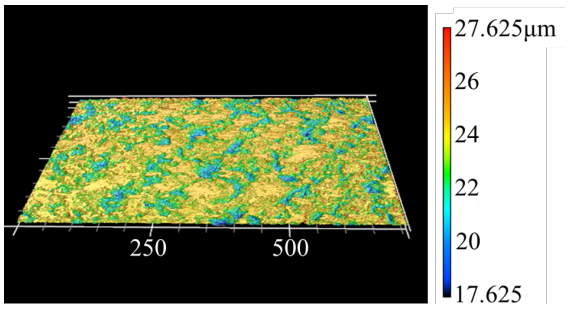
図 6　摩擦係数の同定結果



(a) 条件 2, *Spk* = 1.10 μm, *Svk* = 2.56 μm



(b) 条件 3, *Spk* = 0.69 μm, *Svk* = 2.73 μm



(c) 条件 4, *Spk* = 0.94 μm, *Svk* = 1.85 μm

図 7　実験後の表面性状

3．先行する据込みが前方押出しのトライボ特性に与える影響

実際の鍛造工程では，据込み，型鍛造，押出しなどの加工法を組み合わせた複数工程により，目的の形状を実現していることが多い．そこで，複数工程を想定した試験法が開発され，耐焼き付き性や摩擦係数に関して評価した研究が行われている [4, 5]．この複数工程での加工における被加工材や潤滑剤の変化を追跡し，摩擦係数に与える影響を調査することは，工程設計に用いられる有限要素解析の精度向上のためにも重要である．

ここでは，据込み加工の後に前方押出し加工を行う 2 段工程において，被加工材と金型間における摩擦係数を評価した．また，本試験結果から，複数工程の潤滑特性に及ぼす影響を評価した．

3・1　試験方法および条件

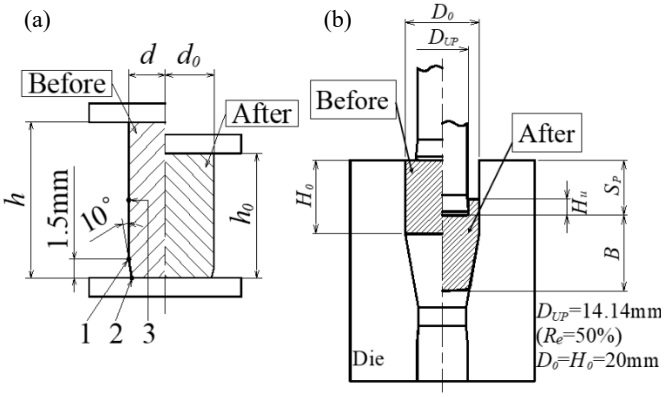
本研究では，据込み試験の後に前方軸-後方缶押出し型摩擦試験 [6]（以後，RC 型摩擦試験）を実施した．被加工材には，低合金クロム鋼 SCr415H (JIS) を使用した．また，

潤滑剤には，りん酸亜鉛皮膜＋石けん処理皮膜（以後，ボンデ皮膜）（BASF-Chemetall 製）を使用した．

クーロン摩擦係数 μ を同定するために用いる較正線図の作成のため，Simufact Forming を使用し，据込み試験および RC 型摩擦試験の解析を行った．なお，固体潤滑皮膜を使用する場合，すべての面圧域においてクーロン摩擦則が成り立つため，本研究の解析には，クーロン摩擦係数を使用した [7]．

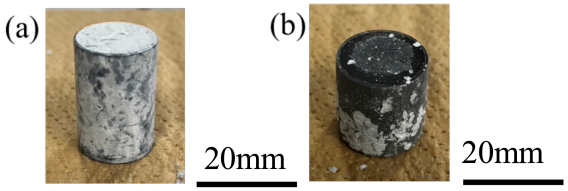
3・2　据込み試験

図 8(a)は，据込み試験の原理図を示す．本試験には，万能試験機 UH-100A（島津製作所製）を使用した．据込みでは，試験片が座屈しないよう，高さと直径の比を 1.5 以下にし，かつ後続の RC 型摩擦試験で使用する金型に挿入可能な寸法（直径 $d = 20$ mm 以下，高さ $h = 20$ mm 程度）にする必要がある．これを満たす試験片の最大高さが $h_0 = 26$ mm であることから，圧縮率 $\{(h_0 - h) / h_0\} \times 100 = 23$ ％を目標とした．そこで，試験片の初期寸法は，直径 $d_0 = 17.4$ mm，高さ $h_0 = 26$ mm の円柱とした．また，後続の RC 型摩擦試験において，過度の面圧による凝着や焼付きの発生を防ぐため，試験片先端に 10°のテーパーを設け，試験片と金型が面接触となるようにした．



(a) 据込み試験　　(b) RC 型摩擦試験試験

図 8　複数工程の潤滑試験の模式図



(a) 据込み前　　(b) 据込み後

図 9　据込み前後の試験片表面

表 3　較正線図作成のための解析条件

Punch stroke /mm	14, 16, 17, 17.5, 18 and 20
Punch speed /spm	20
Friction coefficient μ	0.01, 0.03, 0.05 and 0.07
Mesh size /mm	0.48

3・3　前方軸–後方缶押出し型摩擦試験

中村らが開発した RC 型摩擦試験は，荷重測定を必要とせず，試験片形状の測定結果から，ダイステーパー面におけるクーロン摩擦係数 μ の評価を行うことができる [6]．模式据込み工程で発生するたる形変形の影響を考慮する必要があるため，据込み後の試験片の最大直径が 20 mm 以下になるように予備試験を行い，ストロークを 5.7 mm に設定した．パンチ速度は 2.0 mm/s とした．

図 8(b)は，RC 型摩擦試験の模式図を示す．ストローク Sp に対する後方缶押出し高さ Hu および前方軸押出し長さ B を測定し，有限要素解析により得られた較正線図を用いて，内挿法により μ の同定を行った．本試験には，サーボプレス AIDA1500 NS1-1500（アイダエンジニアリング製）を使用した．本試験では，先述した据込み試験により得られた試験片を使用した．金型材質は超硬であり，$Sp = 18$ mm，試行回数は 9 回とした．テーパー部は，算術平均粗さ $Ra = 0.2$ μm で仕上げた．

較正線図の作成のため，本試験の有限要素解析をいくつかの μ を仮定して行った．解析条件を表 3 に示す．解析に使用する試験片は先述した据込み試験の解析で得られたものである．

3・4　実験結果

3・4・1　据込み試験

据込み試験前後の試験片を図 9 に示す．図 9 より，据込み加工の影響で表面に処理された石けん層が脱落していることがわかる．据込み試験後の試験片寸法は，最大直径 19.75 mm，高さ 20.53 mm となった．したがって，本試験における真の圧下距離は 5.47 mm，真の圧縮率は 21 ％であった．また，据込み試験後の試験片を再現するため，パンチ - 試験片間の μ を調整した有限要素解析を行った結果，据込み時のダイス素材間の摩擦係数は $\mu = 0.034$ と同定された．その時，解析により得られた試験片は最大直径 19.74 mm，高さ 20.54 mm であった．

3・4・2　RC 型摩擦試験

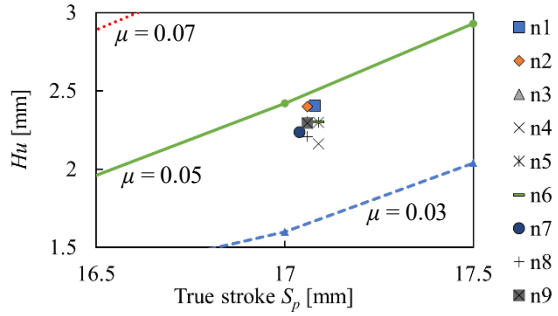
図 10 は，本実験結果を較正線図中にプロットした図を示す．図 10 (a)および(b)より，$\mu = 0.0450$ および $\mu = 0.0405$ と同定された．平均値は $\mu = 0.0427$ であった．

図 11 は，試験後の試験片の表面を示す．金型に挿入した際の正面を $\theta = 0°$ とした．図 11 より，テーパー部終点において局所的にかじりが生じ，テーパー部開始点においても一部の試験片のみかじりが生じていることがわかる．また，各方向により異なる特徴が見られ，$\theta = 60°$，120°および 270°方向の試験片先端において，テーパー部開始点を起点とした軸方向に伸びたかじりが確認できる．

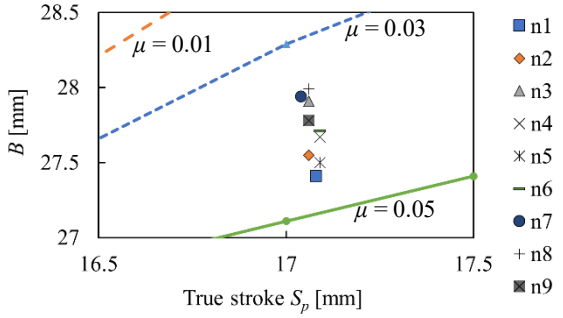
3・5　考察

3・5・1　据込み加工の影響

先行研究より，単一の RC 型摩擦試験の場合は $\mu = 0.0377$ であった [8]．つまり，複数工程での加工により，摩擦係数が 0.005 程度，約 14%大きくなった．これは，据込みにより試験片表面が収縮されたことで，摩擦の低減に寄与する



(a) 後方缶高さによる較正線図と実験結果



(b) 前方押出し長さによる較正線図と実験結果

図 10　較正線図と実験結果

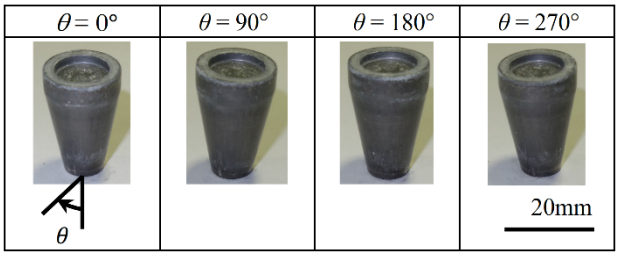


図 11　試験後の試験片の表面

ボンデ皮膜上層の金属石けん層がはく落し，下層のりん酸亜鉛皮膜が露出した状態で前方押出しが行われたことが原因と考えられる．先行研究により，圧縮率 45%でボンデ皮膜の膜厚が 9.21 μm 程度小さくなることが確認されている [4]．

また，先行の据込み加工による影響で，試験片に設けた 10°のテーパー角が 18.8° に変化した．この変化により，後続の RC 型摩擦試験において，試験片のテーパー部開始点と金型が線接触となり，局所的に高面圧となり，ボンデ皮膜の膜切れによるかじりが生じたと考えられる．試験片先端に見られた軸方向に伸びたかじりについては，金型のテーパー部における傷が転写されたと考えられる．これより，先行工程による寸法変化が潤滑性能に及ぼす影響も大きいことがわかる．

実験における *Hu* および *B* にばらつきが見られた原因の 1 つとして，パンチの偏心が挙げられる．これは，荷重が大きいと起きやすい．先行工程で材料が加工硬化することで，強度が増加する影響も大きいことがわかる．

3・5・2　前方押出し加工による影響

図 12 は，RC 型摩擦試験中の表面変化率を示す．測定点は，図 8(a)に示す 1 のテーパー部開始点，2 のテーパー部終点，ならびに 3 の試験片中央である．前方押出しにより，1 において，約 30%の表面拡大が見られた．また，2 では据込みにより約 25%の表面拡大が見られ，前方押出しにより表面の拡大と収縮が繰り返されていることがわかる．この表面の拡大と収縮により，テーパー部を含む試験片側面において，ボンデ皮膜上層の石けん層が脱落，また，ボンデ皮膜の膜厚が小さくなったと考えられる．そして，前方押出し加工により，試験片先端において，局所的に高面圧となり，すべり距離が長くなった影響も受け，膜切れによるかじりが生じたと考えられる．

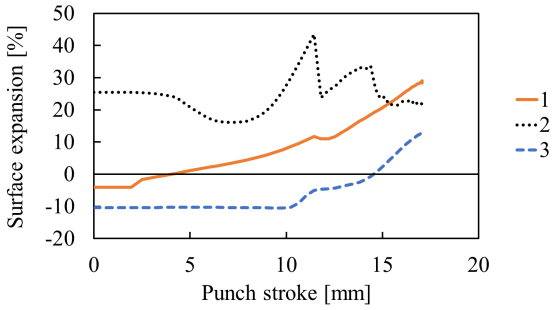


図 12　RC 型摩擦試験中の表面変化率の変化

4．結　言

表面での物理的結合のみで密着する環境対応型潤滑剤の，冷間鍛造への適用に有効なレーザーを用いた素材の表面処理について調査した．また，実際の冷間鍛造工程を模擬した複数工程における潤滑特性の評価手法を提案し，その効果や妥当性を評価した．得られた結果は，以下の通りまとめられる．

【レーザー加工処理】

(1) 摩擦試験の結果，レーザー加工による下地処理に環境対応型潤滑剤を使用した素材とりん酸塩皮膜の摩擦係数を比較したところ，同等の潤滑性能が得られた．

(2) 鍛造後において突出山部高さが小さく，突出谷部高さが大きいため，一定の間隔で潤滑剤が保持でき，潤滑性能が向上した．

【複数工程での潤滑評価】

(3) 複数工程での加工では，単一工程に比べて被加工材と金型間の摩擦係数が大きくなった．

(4) 先行する据込み加工により，試験片表面が収縮したことにより，潤滑皮膜がはく落および劣化した．

(5) 試験片先端に施したテーパー部において，高面圧かつすべり距離が長くなったことで，局所的に潤滑剤の膜切れによるかじりが生じた．

謝　辞

本研究の一部は, 公益財団法人天田財団の一般研究開発助成 (AF2024013-B2) の下で実施されたことをここに記し，深甚なる謝意を表する.

参考文献

1）K. Hayakawa and T. Nakamura: Key Engineering Materials, **767** (2018), 157-162.

2）Y. Sagisaka, K. Hayakawa, T. Nakamura, I. Ishibashi and T. Nakakura: Advanced Materials Research, **966-967** (2014), 301-310.

3）安部洋平・森謙一郎・畑下文裕・柴孝志・W. Daodon: 塑性と加工, **56**-658 (2015), 972-978.

4）Z. G. Wang, S. Komiyama, Y. Yoshikawa, T. Suzuki, K. Osakada: CIRP Annals-Manufacturing Technology, **64** (2015), 285-288.

5）王志剛・小見山忍・徳永龍一・山岡祐一: 塑性と加工, **51**-591 (2010), 336-341.

6）中村保・鷺坂芳弘: 塑性と加工, **48**-552 (2007), 56-60.

7）王志剛: 天田財団助成研究成果報告書, (2017), 1-4.

8）P. Groche, P. Kramer, N. Bay, P. Christiansen, L. Dubar, K. Hayakawa, C. Hu, K. Kitamura, P. Moreau: CIRP Annals-Manufacturing Technology, **67** (2018), 261-264.