

超短パルスレーザー光を用いた金型の表層加工による離型力制御

岡山大学 学術研究院環境生命自然科学学域

助教 篠永 東吾

(2022 年度 一般研究開発助成 AF-2022212-B2)

キーワード：超短パルスレーザー，表層加工，金型

1. 研究の目的と背景

ゴムや樹脂などの圧縮成形金型は、製品を大量生産するために産業界に欠かせないツールである。一般的に圧縮成形金型は、図 1 のように上型、下型、中型などで構成されており、上型や下型では成形品が容易に離型すること（離型力：小）、中型では成形品を押し出す際に保持すること（離型力：大）が必要である。現状、下型への成形品の残着などによる成形不良が問題となっている。すなわち、金型の部位に応じて局所的に離型力を制御する技術が必要である¹⁾。

離型力は成形材料と金型表面との相互作用により変化すると考えられ、金型の表面性状（表面形状や化学組成）に大きく影響を受ける。一般的に、金型関連メーカーでは、表面自由エネルギーを低下させるフッ素などの化学成分を含む離型剤を金型へ塗布し、離型力の低減を図っている。本手法では、化学薬品の使用による環境負荷の課題があり、離型剤の塗布量の制御、再塗布や洗浄が必要であることが課題である。

金型の表面自由エネルギーを増加または低減する手法（離型力を制御する手法）として、金型表面への微細構造形成が報告されている²⁾。材料表面で水滴接触角を測定し、撥水性を示すほど成形品が金型表面に付着しにくい、すなわち離型力が低減すると考察されている。しかしながら、成形時に加熱されたゴムや樹脂は数 μm の溝や深さでも容易に入り込むため、水滴接触角の結果通りに離型力が低減するとは限らない。また、微細構造の形状が成形品に転写され、成形品の形状を損なう可能性がある。すなわち、溝幅や深さを $1\mu\text{m}$ 以下に加工する表層加工技術が必要である。

表層加工を行うには、機械加工の場合、特殊な工具や長時間の加工が必要である。近年、通常のパルス発振モードと比較して、高繰り返しに発振させるバーストモードを用いた超短パルスレーザー照射によって、極表層への入熱制御が可能であることが着目されている³⁾。パルス群によるインキュベーション効果³⁾により、通常のパルス発振モードでは加工されないレーザーフルエンスで加工が可能となり、従来よりも高精度な表面形状制御が期待される。

本論文では、鉄鋼系金型に対して超短パルスレーザー照射による表層加工を試みた。バーストモードを用いてレーザー光照射パラメータを変化することで形成される表層の形状と化学成分を評価するとともに、表層加工面が成形品の離型力に及ぼす影響を検討した。

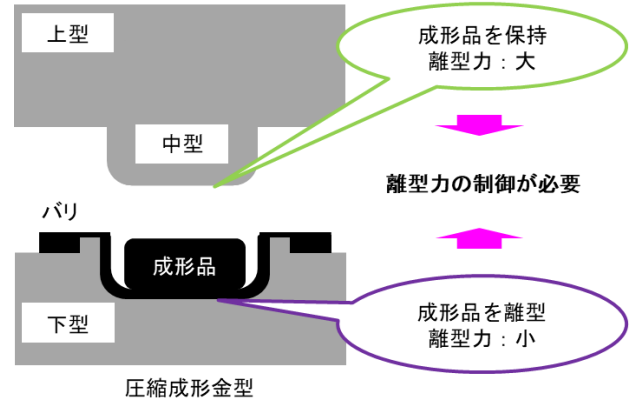


図 1 圧縮成形金型と離型力制御の必要性

2. 実験方法

2・1 超短パルスレーザー照射装置

本研究で使用した超短パルスレーザー発振器の中心波長 λ_L は 1030nm 、変更可能なパルス幅 T_p は 250fs から 10ps 、最大平均出力 W_{max} は 20W 、および繰り返し周波数 R_p は 2kHz から 1000kHz である。工作物としては鉄鋼系金型の一種である、ステンレス系金型用鋼 STAVAX を用いた。実験では、図 2 のようにガルバノスキャナーを用いて、鉄鋼系金型表面にレーザー光を走査し、レーザー光の走査速度を変更することで、単パルス加工または走査ライン加工を行った。2・2 項に示すバーストモードのパラメータ定義を基に、バーストモードを用いた表層加工を試みた。

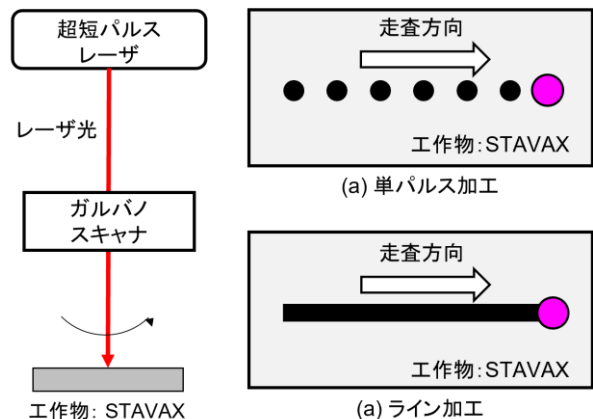


図 2 実験セットアップ概略図

2・2 バーストモードのパラメータ定義

バーストモードとは図 3 に示すようにメインの一つのパルスを分割するレーザー光発振モードであり、分割したパ

ルスとパルスの時間的間隔は、レーザ発振器のシード光の周波数に依存している。本研究ではシード光の周波数 R_p が 40MHz であるので、25ns の一定間隔でバーストモードのパルスが発振される。また、分割したサブパルスのエネルギーの合計はメインパルスのパルスエネルギーと等しく、メインのパルスエネルギー E_{main} が 5 μJ のとき、バーストモードで 2つのパルスに分割した場合（サブパルスの照射回数 N_{sub} が 2shots の場合）、そのうちの一つのサブパルスエネルギー E_{sub} は 2.5 μJ となる。また、図 3 のように、10 分割（サブパルスの照射回数 N_{sub} が 10shots）した場合のサブパルスエネルギー E_{sub} は 0.5 μJ となる。

すなわち、サブパルスのエネルギーとサブパルスの照射回数の乗数がメインパルスのエネルギーとなり、メインパルス内でパルスエネルギーと照射回数を制御できる。通常発振モードでは加工影響範囲が大きい、バーストモードではサブパルスによるインキュベーション効果によって、極表層への入熱制御が可能になる。

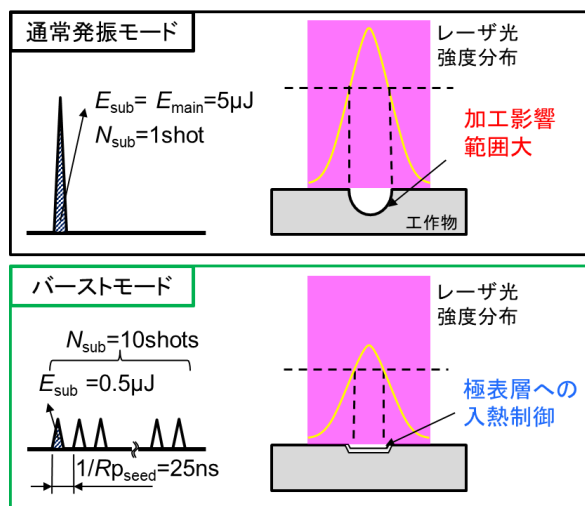


図 3 バーストモードの概略図

3. 実験結果

3・1 単パルス照射による加工閾値

表層加工を実現するため、単パルス照射加工時の加工閾値を検討した。実験条件はパルス幅 T_p を 260fs、繰り返し周波数 R_p を 2kHz とし、バーストモードを用いてサブパルスエネルギー E_{sub} を 0.1 μJ から 5.0 μJ 、サブパルスの照射回数 N_{sub} を 1shot から 60shots まで変化させた。図 1(a) のようにメインパルスの照射回数 N_{main} が 1shot となり、照射痕が独立するようレーザ光走査速度を設定した。

加工後、熔融除去加工が行われているかを光学顕微鏡およびレーザ顕微鏡にて観察し、幅と深さを確認できる加工痕を○、加工が行われているが形状が不均一なものを△、加工されなかったものを×として 3 種類に分類した。図 4 にそれぞれの加工条件における加工痕の形態を示す。図の横軸はサブパルスのパルスエネルギー、縦軸はサブパルスの照射回数であり、幅と深さを確認できる○印の右側に深さと幅を示す。図より N_{sub} が 1shot では E_{sub} が 0.7 μJ のと

き加工が行われなかったが、バーストモードを用いて N_{sub} を 2shots 以上照射すると E_{sub} が 0.7 μJ 以下でも加工が行われた。さらに、 E_{sub} が 0.5 μJ のとき、 N_{sub} が 10shots 以上で幅、深さを確認できた。本結果は、バーストモードのサブパルスによるインキュベーション効果によって、通常モードで 1shot した場合よりも加工閾値が低下したことを示しており、鉄鋼系金型表面に対して、バーストモードによって表層加工が実現できる可能性を示している。

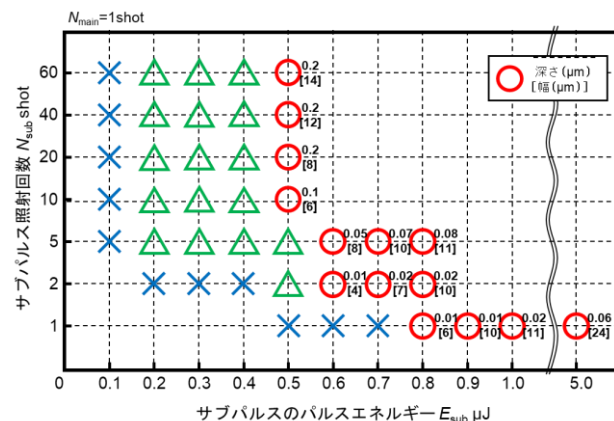


図 4 バーストモードによる加工閾値の変化

3・2 繰り返し周波数による形状変化

表層加工ライン形成のため、レーザ光を走査しメインパルスを重ね合わせることで 1 ライン形状の作成を行った。ここで、メインパルスを重ね合わせることは、メインパルスを一点に複数回照射することを示す。繰り返し周波数 R_p 、スポット径 D_s 、走査速度 V_s によって、レーザ光走査時のメインパルスの照射回数 N_{main} は、 $N_{\text{main}} = D_s \cdot R_p / V_s$ で求めることができる。

実験条件はパルス幅 T_p が 260fs、集光スポット径 D_s が 30 μm 、サブパルスのパルスエネルギー E_{sub} を 0.5 μJ 、サブパルスの照射回数 N_{sub} を 10shots と一定とし、繰り返し周波数 R_p を 100kHz から 1000kHz の間で変化させた。走査速度を変更することで、レーザ光走査時のメインパルスの照射回数 N_{main} が繰り返し周波数によらず 360shots で一定となるようにした。ここで、繰り返し周波数を変化させることは、パルス群とパルス群の時間的間隔を変化させることであり、熱的な影響が変化すると考えられる。

図 5 に各パルスの時間間隔における 1 ライン形状の断面プロファイルと走査型電子顕微鏡 (SEM) 観察画像を示す。超短パルスレーザのバーストモードを用いることで、繰り返し周波数 R_p が小さいとき、幅 10 μm 程度でアスペクト比 1 程度の V 字微細構造が形成された。また繰り返し周波数 R_p が大きいとき、深さ 1 μm 程度で表層のみが除去熔融されたフラット形状が形成された。図 6 は、パルスの時間間隔における溝幅と溝深さのグラフである。図より、極表層のみを加工するにはパルスの時間間隔 $1/R_p$ が 1 μs 、つまり、繰り返し周波数 R_p が 1000kHz の条件が適していると考えられる。以降、繰り返し周波数 1000kHz の条件で表層加工形状の形成に関する基礎的検討を行う。

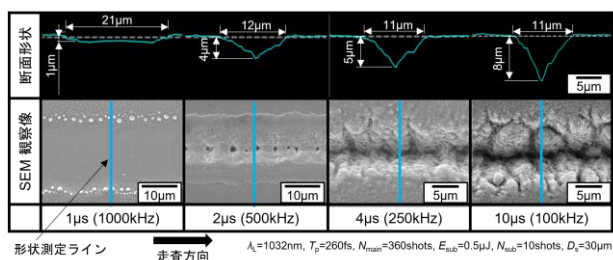


図5 パルスの時間間隔による表面形状変化

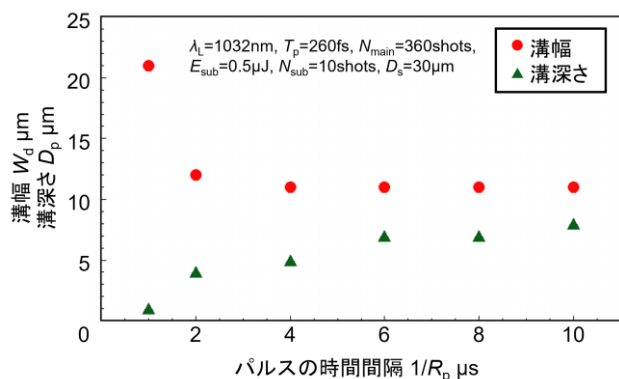


図6 パルスの時間間隔による溝幅と溝深さの変化

3・3 パルス幅による形状変化

繰り返し周波数 R_p が 1000kHz の場合、図 5 で示したように、表層のみが除去溶融されたが、メインパルスの照射回数 N_{main} が 360shots の場合には、加工ライン周囲へ堆積物が多く形成されていた。そこで、事前検討によりメインパルスの照射回数を変化させると、照射回数の増加に伴い幅、深さ、堆積物の幅は増加する傾向が明らかになった。表層加工面を形成する際、ライン同士を重ねることから、堆積物の幅が小さい条件が望ましい。

そこで、堆積物の幅が小さい照射回数を 15shots と設定し、繰り返し周波数 R_p が 1000kHz の条件で、パルス幅 T_p を変化させて形成された 1 ライン形状の断面プロファイルと SEM 観察画像を図 7 に示す。断面プロファイル画像は形状を明確にするため縦方向に約 30 倍拡大して示している。SEM 観察画像から、パルス幅が変化すると、表面の様相が変化しており、断面プロファイルより、パルス幅が長くなるほど深さが小さくなり、パルス幅が 10ps のとき、基準面より高い盛り上がりが形成されていることが明らかになった。

ここで、図 8 のように表層加工形状の定義として、溝幅を W_d 、溝深さを D_p 、盛り上がり部の基準面からの高さを H

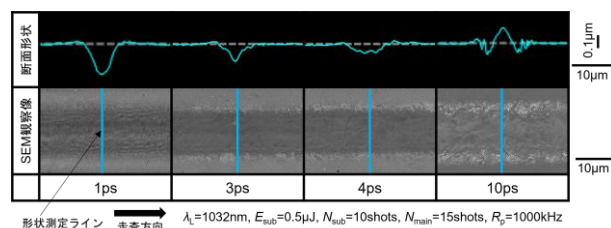


図7 パルス幅による表面形状変化

とした。図 9 にパルス幅による表面形状変化を示す。図より、溝幅はパルス幅による変化が少なく、溝深さはパルス幅が長くなるほど小さくなることが分かる。また、パルス幅が 5ps 以上になると基準面より盛り上がり高さが大きくなっていることが明らかになった。

W_d : 溝幅(μm), D_p : 溝深さ(μm), H : 高さ(μm)

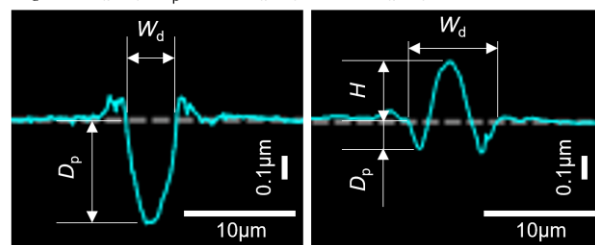


図8 表層加工形状の定義

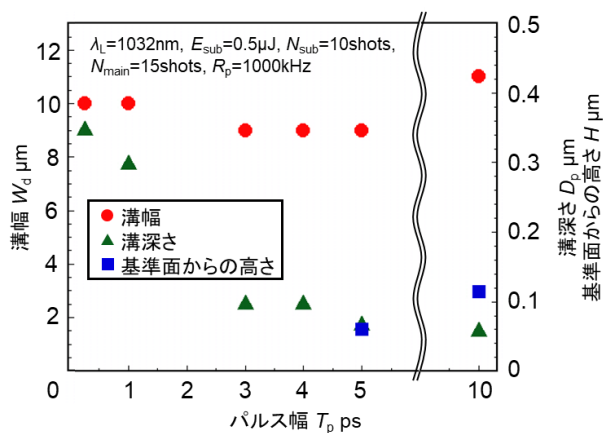


図9 パルス幅による表層加工形状の変化

3・4 表層加工時の表面性状変化

バーストモードによる表面性状変化を調べた。本実験で用いた STAVAX は Cr が点在しており、レーザ光照射による溶融と急冷により均一化する可能性がある。図 10 にレーザ光未照射面と照射回数とパルス幅を変化させて形

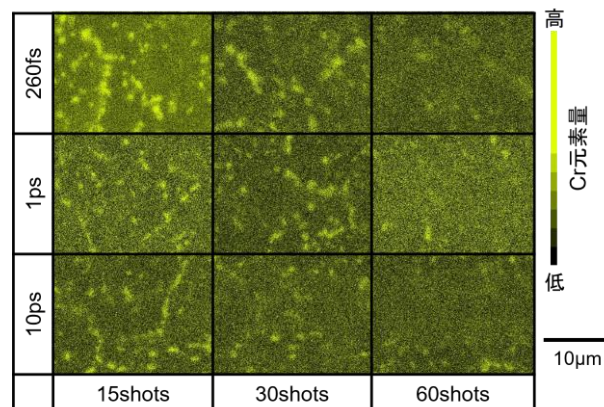


図10 加工面の Cr 元素マッピング画像

成した1ライン形状のCr成分をEDXにより分析した結果を示す。図のコンターはCrの量を示している。図より、いずれのレーザ照射条件でも、未照射面と比べてCrの分布が不明瞭になり均一化しているように見える。また、照射回数が多く、パルス幅が長いほど、表層のCrがより均一化していることが明らかになった。

よって、バーストモードを用いて繰り返し周波数を1000kHzとし、照射回数とパルス幅を変化させることで、表層加工が可能であり、形成される形状と性状が変化することが示された。

3・5 表層加工面形成

3・4項までのバーストモードを用いた表層加工に関する基礎検討結果を基にレーザ光照射条件を選定し、走査ラインを重ねることで表層加工面の形成を試みた。目標形状は深さが小さく、面形成のために周辺の影響物が少ない、単純形状とした。図7の結果から、盛り上がり部が生じず、形状が単純かつ深さが小さなパルス幅4psの条件と、表層加工の中でも比較的深さが大きなパルス幅1psの条件を用いて領域加工を行い、離型力測定を行った。

このとき、面加工形成時の1ラインを重ねるラインピッチは1ライン形状の幅の長さとして設定した。金型の上型に対して22×22mmの領域を加工した。加工時間は約40秒である。図11に形成された面の断面プロファイルとSEM観察画像を示す。断面プロファイル画像は形状を明確にするため縦方向に約30倍拡大して示している。断面プロファイルとSEM観察画像から、深さ1μm以下で均一な表層加工面が形成できることが明らかとなった。

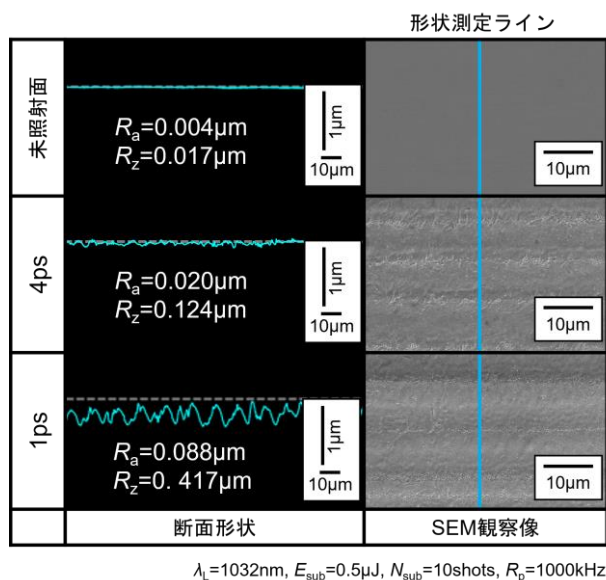


図11 表層加工面の形状

3・6 表層加工面による離型力変化

離型力測定には汎用の離型力測定器を用いた。金型の上型表面にレーザ加工を行った。金型メーカー推奨条件で成型を行い、成形物が金型と完全に離型するときの離型力を測

定した。

図12(a)はレーザ光未照射面と硬質クロムメッキ面、パルス幅4psの表層加工面、パルス幅1psの表層加工面での離型力測定結果である。離型力は複数回成形して離型力が安定した際の平均値とし、未照射面を基準とした比で表している。グラフから、レーザ光未照射面と硬質クロムメッキ面での離型力を比較すると、クロムの有無による離型力変化は小さいことが明らかになった。また、レーザ光未照射面とレーザ光照射面を比較したとき、パルス幅が4psと1psのレーザ光照射面では離型力がレーザ光未照射面より大きくなり、表層加工で成形物を保持することができた。また、成形物の表面粗さを測定した結果を図12(b)に示す。パルス幅1psの表層加工面では成形物に表面形状が転写され、粗さが増大したが、パルス幅4psの表層加工面の場合では、レーザ光未照射面と同等な粗さを維持していることが明らかになっている。よって、パルス幅4psでの表層加工面を用いることで成形物の表面形状を大きく損なわず、成形物を金型に保持することができることが示された。

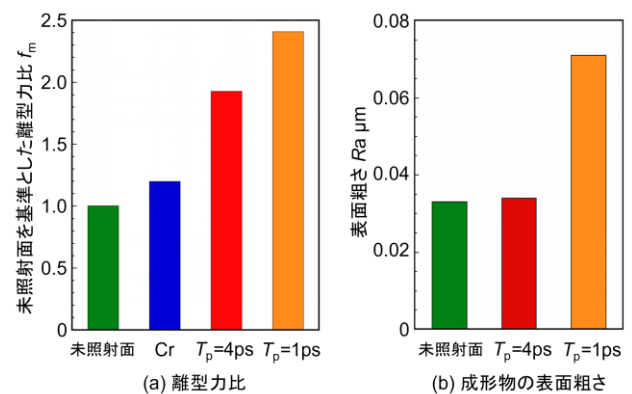


図12 (a)離型力比および(b)成形物の表面粗さ

4. まとめ

超短パルスレーザのバーストモードにより、鉄鋼系金型表面に深さ1μm以下の表層加工が可能である。また、パルス幅4psの表層加工面を用いることで、成形時の離型力がレーザ光未照射面より増大し、成形物の形状を損なわずに金型に保持できる。

参考文献

- 1) Xincal Wang et al.: Picosecond Laser Surface Texturing of a Stavax Steel Substrate for Wettability Control, Engineering, 4 (2018), 816-821.
- 2) M. Domke et al.: Surface ablation efficiency and quality of fs lasers in single-pulse mode, fs lasers in burst mode, and ns lasers, Applied Surface Science, 505 (2020), 144594.
- 3) D Ashkenasi et al.: Surface damage threshold and structuring of dielectrics using femtosecond laser pulses: the role of incubation, Applied Surface Science, 150 (1999), 101-106.