

ピコ秒パルスレーザー照射による鋼材表面の平坦化とナノ周期構造形成

慶應義塾大学理工学部機械工学科 ○ 小林知貴 ◎ 閻 紀旺

要 旨

精密金型として使用される鋼材の表面は高い加工精度と離型性が同時に求められる。本研究では、金型鋼の表面仕上げ法としてピコ秒パルスレーザー照射を提案する。超短パルスレーザーを用いるため材料内部への熱影響が極めて少なく、焦点位置を制御することで大きな表面凹凸を除去し、表面の平坦化を実現できる。それと同時に、平坦に加工された表面にナノ周期構造を形成させ、金型の離型性を向上することも可能である。

1. 結論

現在、自動車産業などでは製品の低コスト化のために成形加工が行われており、精密金型が必要不可欠となっている。金型は高温・高圧環境下で繰り返し使用されるため割れや疲労破壊を起こしやすく、金型の寿命を長くするために高硬度の金型材料が使用される。しかし、高硬度材料は機械加工が困難であり、金型の加工コストが非常に高くなっている。また、金型と製品は高圧で密着しており、離型性が悪いと製品や金型の損傷などの問題が起るため、高い離型性が求められる。さらに、金型の精度は製品の精度に直結するため、金型の表面粗さや形状精度に対する要求も高い。現在、精度向上のため研削加工や放電加工の後に研磨加工が行われている。しかし、研削加工では複雑形状の加工が困難であり、放電加工では変質層が大きく表面粗さが悪いため、その後の研磨に非常に時間がかかるという問題がある。

そこで本研究では、ピコ秒パルスレーザーを用いた金型表面の仕上げ法を提案する。レーザー照射により金属中の原子が振動して熱が伝わり、熱反応が起こる時間は数十ピコ秒といわれている¹⁾。連続発振レーザーやナノ秒パルスレーザーを用いると、熱反応が起こり広範囲に熱影響を及ぼしてしまう。しかし、ピコ秒やフェムト秒などの超短パルスレーザーによる加工では、周囲に熱が広がる前に表層のみを高温・高圧状態にすることができるため、周辺の温度が上がる前に表層の飛散・除去が行われる。そのため、熱影響の少ないアブレーション加工が可能となる²⁾。また、金属表面にナノ周期構造が形成されると撥水性が向上するため、金型の離型性を向上させることが可能であると考えられる。これまでに、アブレーション閾値近傍のエネルギー密度でフェムト秒パルスレーザーを照射すると材料表面にナノ周期構造が形成されることが数多く報告されている³⁾。本研究では、ピコ秒パルスレーザーを用いたアブレーション加工による表面平坦化とナノ周期構造形成の同時実現を目指して研究を行った。

2. 表面創成メカニズム

図1に本研究で提案した表面創成法の概念図を示す。エネルギー密度がアブレーション閾値を越える領域で材料が除去され、同領域の表面凹凸が除去される。それと同時に、アブレーション閾値近傍のエネルギー密度ではナノ周期構造を形成させる。ナノ周期構造は表面凹凸と比較して非常に小さいため、表面粗さを低減させつつ、金型の離型性を向上させることができる。

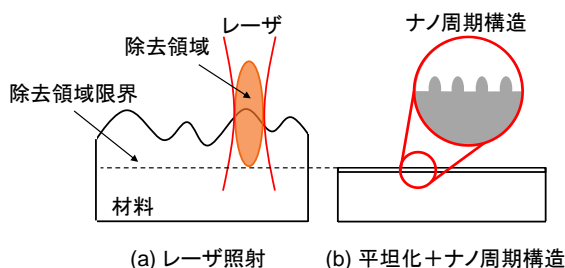


図1 表面平坦化とナノ周期構造形成

3. 実験装置および方法

(株) オプトクエスト製のピコ秒パルスファイバーレーザー PFLA-1030TP を用いて実験を行った。試料にはプラスチック成型用金型鋼 STAVAX (表面粗さ 0.94 μmRa) を使用した。試料ステージを走査させて面照射実験を行った。レーザー照射条件は表1に示す。表面凸部に焦点を合わせたときをデフォーカス量 0 μm とした。試料の表面性状の測定にはレーザー顕微鏡と三次元測定器を、表面形態の観察には走査型電子顕微鏡 (Scanning electron microscope : SEM) を用いた。

4. 結果および考察

4.1 エネルギー密度による表面形態の変化

図2にデフォーカス量 0 μm 、繰り返し数 15 回のときの各エネルギー密度における照射表面の SEM 画像を示す。エネルギー密度が 0.15 J/cm^2 のとき、照射表面にナノ周期構造が確認された。

表1 レーザ照射条件

パルス幅 [ps]	50
波長 [nm]	1030
エネルギー密度 [J/cm^2]	0.15, 0.76, 3.1, 4.5
周波数 [kHz]	100
スポット径 [μm]	6×7 (楕円形)
デフォーカス量 [μm]	0, 10, 26, 40
繰り返し数	15, 50
雰囲気	大気

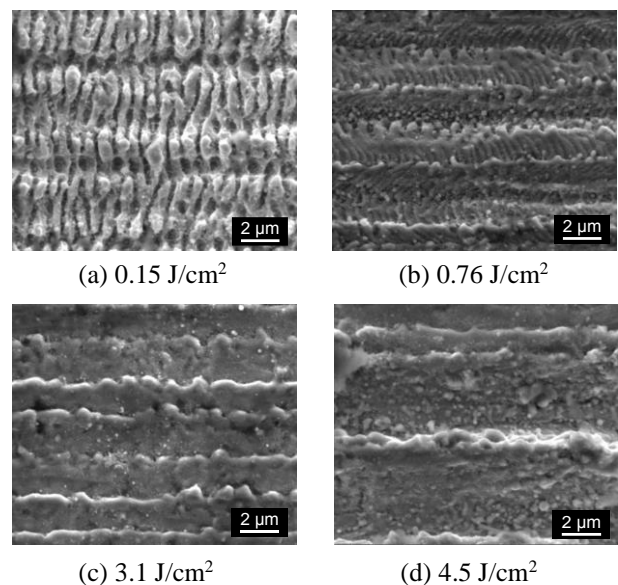


図2 各エネルギー密度における照射表面の SEM 像

また、エネルギー密度が 0.76 J/cm^2 のとき、ナノ周期構造の一部が残され、 3.1 J/cm^2 、 4.5 J/cm^2 のときは、ナノ周期構造が消滅し溶融層の重なりによると思われる盛り上がり部分が確認された。これらエネルギー密度による表面形態の変化は材料に侵入する熱の違いによるものと考えられる。エネルギー密度が 0.15 J/cm^2 と小さい場合、材料へ侵入する熱が少ないため熱影響が非常に小さくなる。その結果、アブレーション閾値近傍でナノ周期構造が形成されたと考えられる。一方で、エネルギー密度が大きいと材料へ侵入する熱が多くなり、熱影響が広範囲に広がる。すると、アブレーションにより材料が除去された後、侵入した熱で表層がわずかに溶融するため、ナノ周期構造が消滅し、盛り上がり部分が形成されたと考えられる。

4.2 デフォーカスによる表面形態の変化

図3にエネルギー密度 0.76 J/cm^2 、繰り返し数50回のときの各デフォーカス量における照射表面のSEM画像を示す。デフォーカス量 $0 \mu\text{m}$ のとき、周期構造の一部が確認された。デフォーカス量が $10 \mu\text{m}$ 、 $26 \mu\text{m}$ のときにはナノ周期構造が形成され、 $40 \mu\text{m}$ まで大きくなると表面は細かい粒子状へと遷移した。この表面形態の変化はデフォーカスによるビーム径の広がりエネルギー密度に関係するものと考えられる。デフォーカス量が $0 \mu\text{m}$ のとき、ビーム径が小さいためエネルギー密度が大きく、溶融部分が発生してナノ周期構造が一部しか残らない。一方、デフォーカスによりビーム径が広がりエネルギー密度が小さくなると、熱の侵入が少なくなり、アブレーション閾値近傍で表面にナノ周期構造が形成される。さらにデフォーカス量を大きくして $40 \mu\text{m}$ になると、エネルギー密度がアブレーション閾値を下回りナノ構造形成が十分に行われておらず、細かい粒子状になったと考えられる。

4.3 加工深さと表面粗さの変化

図4に各デフォーカス量による断面プロファイルを示す。デフォーカス量が増加するにつれて除去量は減少していき、 $40 \mu\text{m}$ になるとほとんど除去されていないことが分かる。図1に示すように、レーザビーム内にはエネルギーの分布があり、デフォーカス量が大きくなるとエネルギーの低い部分で除去することになる。そのため、除去領域が狭くなり除去量が減少する。デフォーカス量が $40 \mu\text{m}$ のときは表面の大部分が除去領域に含まれなくなり、除去されなかったと考えられる。

また、図5に各デフォーカス量における表面粗さの変化を示す。初期表面粗さ $0.94 \mu\text{mRa}$ の試料にレーザを照射することで表面粗さが向上し、デフォーカス量が $26 \mu\text{m}$ のときに表面粗さが $0.56 \mu\text{mRa}$ となり、41%低減された。これについて除去領域の

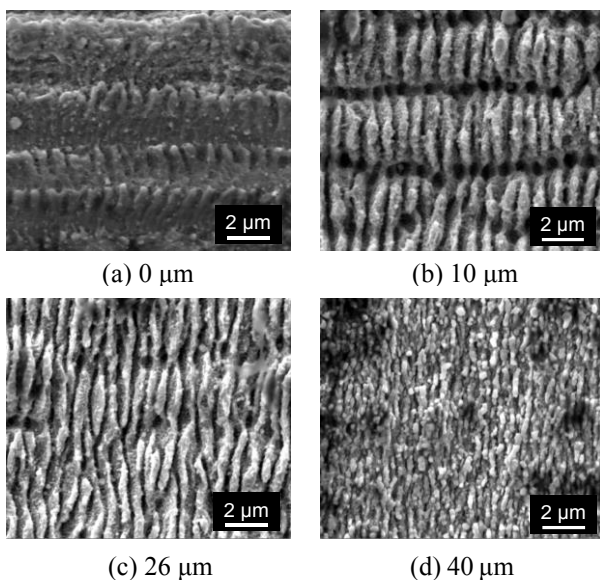


図3 各デフォーカス量における照射表面のSEM像

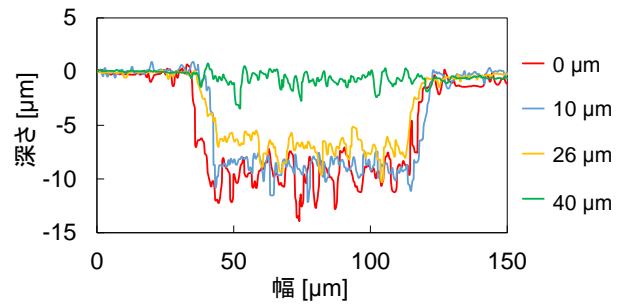


図4 各デフォーカス量における加工深さ

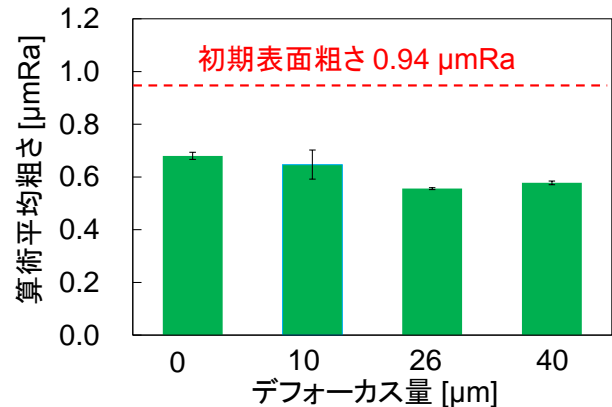


図5 表面粗さの変化

限界付近で加工されたため、表面が平坦化され表面粗さが向上したと考えられる。この実験により、デフォーカス量が $26 \mu\text{m}$ のときに表面粗さを最も向上させると同時にナノ周期構造も形成することが分かった。

5. 結論

金型鋼 STAVAX に対してピコ秒パルスレーザのエネルギー密度とデフォーカス量を変化させて面照射実験を行った。その結果、以下の結論を得た。

- (1) エネルギー密度が 0.15 J/cm^2 の場合、ナノ周期構造が形成される。エネルギー密度が 3.1 J/cm^2 以上になると、溶融部分が発生し、ナノ周期構造が消滅する。
- (2) デフォーカス量が $10 \mu\text{m}$ 以上ではナノ周期構造が形成されたが、 $40 \mu\text{m}$ になると除去が進まなくなり、細かい粒子状の表面となる。
- (3) デフォーカス量を $26 \mu\text{m}$ とし除去領域の限界付近で加工すると、表面粗さが $0.56 \mu\text{mRa}$ まで向上すると同時にナノ周期構造も形成できる。

以上より、ピコ秒パルスレーザを用いた鋼材表面の平坦化とナノ周期構造形成を同時に実現する可能性が確認された。

参考文献

- (1) R.L.Harzig, D.Breitling, M.Weikert, S.Sommer, C.Fohl, S.Valette, C.Donnet, E.Audouard, F.Dausinger, "Pulse width and energy influence on laser micromachining of metals in a range of 100 fs to 5 ps", *Applied Surface Science*, Vol.249, (2005), issue 1-4
- (2) S.-S.Wellershoff, J.Hohlfeld, J.Gudde, E.Matthias, "The role of electron-phonon coupling in femtosecond laser damage of metals", *Appl Phys A*, Vol.69, (1999), S99
- (3) J.E.Sipe, J.F.Young, J.S.Preston, H.M.V.Driel, "Laser-induced periodic surface structure. I. Theory" *PHYSICAL REVIEW B*, Vol.27, No.2, (1983), pp.1141-1154