

# 冷間工具鋼へのレーザーピーニング

Laser peening for cold work tool steel

糸野 文亮\* 澁谷 紀仁\*  
Fumiaki Kumeno Norihito Shibuya

Shot peening is mainly used for automotive parts in order to improve fatigue strength because of weight saving, and Sinto's shot peening technology has been adopted for many our customers. For next peening technology, we made a start about study of laser peening. It is peening process which is used shock wave by laser abrasion, and it can apply compressive residual stress deeply compare with shot peening. Previously, it was mainly used for the parts of nuclear power plant in Japan and aircraft in USA. Therefore, there are many literatures about stainless, aluminum, titanium alloy, but there are few literatures about the other materials.

We focused cold work tool steel which is used for cold working die because of high added value products, and investigated about optimization of laser peening process and fatigue test compare with non-peening.

KEY WORDS:Laser peening, Cold work tool steel, Fatigue strength, Residual stress, Surface roughness

## 1. はじめに

ショットピーニングは冷間加工法の一つであり、直径0.05mm～1.0mm程度のショットと呼ばれる金属、あるいは非金属の球を対象となる金属の表面に高速で打ちつけることにより、ピーニング作用を得る手法である。

ショットピーニングによって得られる効果は疲労強度の向上である。金属が繰り返しの疲労を受けた時、表面近傍に疲労き裂が発生するが、ショットピーニングによって付与される硬さの向上や圧縮残留応力の付与によって、き裂の発生が遅れることと、き裂の進展が抑制されることにより、疲労破壊に対する強度が向上するといわれている。自動車産業では、部品を軽量化した際の耐久性向上を目的として、エンジン部品、トランスミッションギア、スプリングなどの部品にも採用され、浸炭処理の後に用いられることも多い。

当社では、これまでショットピーニング技術を多くのお客様に採用いただいていたが、「100年に一度の変革期」と言われている自動車産業をはじめとしたモノづくりの変化は、ショットピーニングなど、当社の表面処理技術にも大きく影響し、

当社保有技術の進化はもちろん、新しい技術を導入し、用途を拡大する必要があると考える。

当社では、前述した外部環境の変化に鑑み、特に技術の発展が著しい光・量子技術とピーニング技術の融合であるレーザーピーニングに着目し、基礎研究を開始した。本報ではレーザーピーニングの技術概要と金型の延命技術はもちろん、型寿命に課題があり、かつ付加価値の高い冷間鍛造金型にも着目し、冷間工具鋼SKD11へレーザーピーニング処理した事例を紹介する。

## 2. レーザーピーニングの概要

### 2.1 レーザーピーニングの基本原理と特徴

レーザーピーニングは、短パルスレーザーを水中で対象となる金属表面へ照射した際、レーザーアブレーションにより発生するプラズマが周囲に存在する水で膨張が抑制されて高圧プラズマとなる。この圧力により発生した衝撃波が金属に伝播し、衝撃波の動的応力が金属の降伏応力を超えると塑性変形が生じ、圧縮残留応力が付与される。

ショットピーニングと比較し、諸条件により金属表面から1mm程度の深さまで圧縮残留応力を

\*サーフェステックカンパニー 開発グループ開発チーム

付与できることや、局所処理が可能なのが特徴となる。また諸条件などを細かく制御できる為、効果も確実に再現性が高い<sup>1)</sup>。しかし一方で、処理速度はレーザーのスポット径や照射速度に依存することで、単位面積当たりの加工時間は長くなる。その為、破壊の箇所をあらかじめ特定でき、少量生産かつ高付加価値部品への適応に限定されているのが現状である。

## 2.2 学術的検討から産業利用への歴史

レーザーピーニングは1974年にレーザー衝撃硬化としてアメリカにおいて特許が取得され、1976年にはアメリカのバットル研究所の研究により疲労強度改善も報告された。その後、1992年頃から米国の軍用機部品への適用が研究され、1996年に工業的に適用されるようになった。日本では、原子力発電プラントの応力腐食割れ防止を目的に1999年より適応されている<sup>2), 3)</sup>。したがって、これまでの研究対象となる材料はチタン合金<sup>4)</sup>、ステンレス鋼<sup>5), 6)</sup>、ニッケル基合金<sup>7)</sup>、アルミニウム合金<sup>8), 11)</sup>が多い。

## 2.3 レーザーピーニングの方法

レーザーピーニングの方法は2種類存在する。加工対象である金属表面のアブレーションを防ぐ為に犠牲層と呼ばれるアルミなどの薄膜を貼り付け、薄膜をアブレーションすることで衝撃波のみを金属へ伝播させる方法と、犠牲層を用いず直接表面へ照射する方法である。各々の模式図をFig. 1に示す。前者の特徴は、レーザーピーニング処理前後の表面への影響がほとんどないことが魅力だが、犠牲層の貼り付け作業が必要であることや金属へ衝撃波を直接伝播させない為、狙いとする応力の付与が困難となる。一方、後者の特徴は、深さ方向へ効果的な応力付与が行えるものの、表面はレーザーアブレーションによる焼けが発生し、加工前後の表面粗さが変化することである。当社では、後者の方法を用いて基礎研究を行っている。

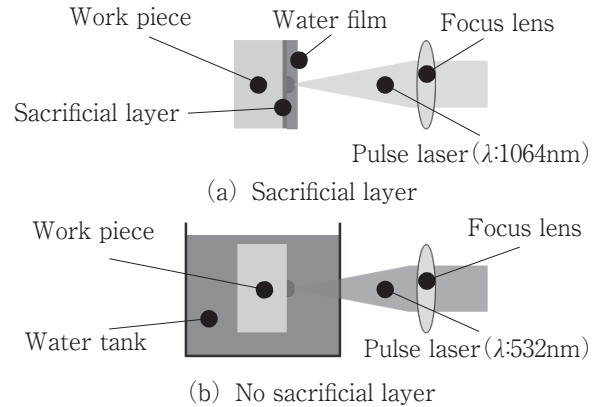


Fig. 1 The method of laser peening

## 3. レーザーピーニングの基礎評価試験

2章では、レーザーピーニングの概要について記述した。レーザーピーニングは技術的に確立されているものの、適用される市場及びそこで用いられる材料に限定されており、技術の拡大には、これまで研究された材料以外へのレーザーピーニングの効果を把握する為の基礎研究と、アプリケーションの創出が重要であると考えられる。そこで当社では、取り組むべき最初の材料として、付加価値が高く長寿命化が課題である冷間鍛造金型に着目し、それに用いられる冷間工具鋼SKD11に対するレーザーピーニング処理を行った結果と、それによる疲労特性に及ぼす影響について評価を行った。

### 3.1 実験方法

#### 3.1.1 供試材及び試験片

供試材はSKD11（大同特殊鋼株製、DC11）を用いた。化学成分をTable 1に示す。本実験で使用する回転曲げ疲労試験片は、供試材を機械加工で切り出し、Fig. 2に示す熱処理条件にて熱処理後、Fig. 3に示す試験片形状に機械加工を行い作製した。試験片中央部はエメリ紙、バフ研磨により鏡面仕上げとした。

また、SKD11は表面の切欠き感受性が高く、切欠きの存在による応力集中の影響から、レーザーピーニングによる圧縮残留応力の効果確認が難しい可能性がある。そこで本実験では、未処理材（NP材）、レーザーピーニング処理した試験片（LP材）、

LP材にNP材と同等の表面粗さまで鏡面仕上げした試験片（LPP材）の3種類の試験片を準備し、それぞれの疲労特性を検証した。

Table 1 Chemical composition table (wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo	V
1.46	0.29	0.34	0.29	0.10	0.07	11.6	0.81	0.21

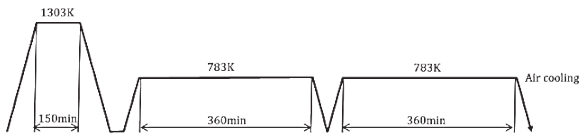


Fig. 2 Heat treatment conditions

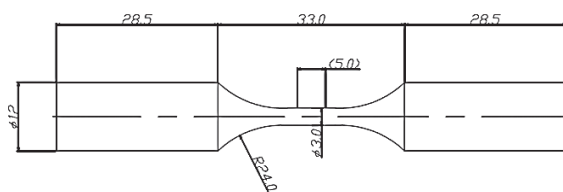


Fig. 3 Test piece (mm)

### 3.1.2 レーザピーニング処理条件

レーザーピーニング処理条件の主要なパラメータは、スポット径：レーザーの照射される領域の直径（単位：mm）、パワー密度：単位時間当たりに照射される単位面積当たりのエネルギー量（単位：W/cm<sup>2</sup>）、カバレッジ：加工面積に対する加工痕面積の総和の割合である。本実験は事前実験により、スポット径：1.0mm、パワー密度：13GW/cm<sup>2</sup>、カバレッジ：50に設定した。試験片へのレーザーピーニング処理方法は、試験片を軸方向に回転させながら長さ方向にオフセットさせることで走査させながらレーザーを定点で照射し、試験片直径φ 3mmの範囲を処理した。

### 3.1.3 疲労試験方法及び破面観察方法

疲労試験は、Fig. 4に示す小野式回転曲げ疲労試験機（株島津製作所製 H5形）を用いて、室温、大気中の環境下にて応力比R=-1の条件で実施した。すべての試験片において同応力振幅（σ<sub>a</sub>=800MPa）にて疲労試験を実施し、疲労試験開始から試験片が破断するまでの応力繰り返し数を疲労寿命として評価した。

また、本供試材は介在物を起点に破壊が起こることが報告されている<sup>12)</sup>。その為、NP材とLPP材は、介在物の位置や大きさの影響を加味し、同応力振幅にて試験を3回実施し、介在物によるバラツキの影響も確認した。

疲労試験後の破断した試験片の破面は、走査型電子顕微鏡：SEM（日本電子(株)製JSM-6610）によって観察し、疲労破壊起点の特定を行った。

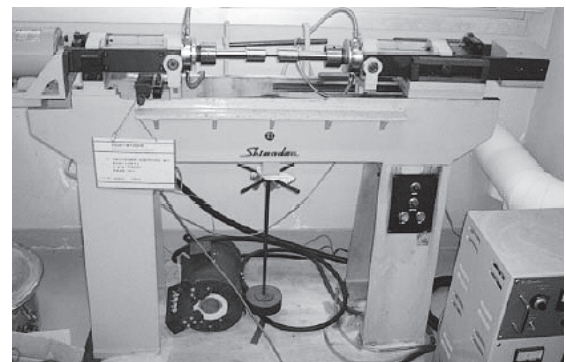


Fig. 4 Ono type rotating bending test machine

## 3.2 実験結果

### 3.2.1 回転曲げ疲労試験結果

回転曲げ疲労試験で得られた結果をFig. 5に示す。なお、同図において矢印を付したプロットは、図示の繰り返し数において破断が発生しなかった為、試験を停止したデータである。NP材と比較して、LP材の試験データは長寿命側に位置しており、レーザーピーニングを施すことで疲労寿命が改善することが明らかとなった。また、LPP材の

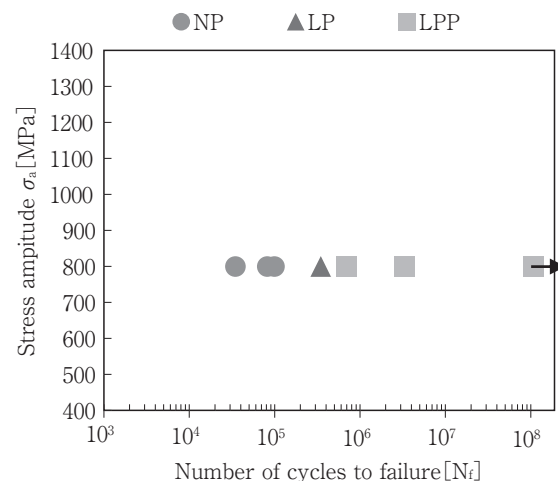


Fig. 5 Fatigue test result

疲労寿命は、LP材よりも更に長寿命側に位置しており、レーザーピーニング後に研磨を施すことは疲労寿命の改善に有効であることも確認された。

3. 2. 2 破面観察結果

Fig. 6 に、各試験片における破面観察写真を示す。Fig. 6 (a) はNP材であり、疲労き裂の発生起点は表面近傍の介在物であることが確認できる。一方Fig. 6 (b) のLP材は、表面に存在する欠陥を起点にき裂が発生し、介在物に進展、破断に至った様相を呈している。またFig. 6 (c) のLPP材においては、LP材と同じレーザーピーニング処理を施したにも関わらず、破断の起点は表面ではなく、内部に存在する介在物を起点にフィッシュアイを形成しながらき裂の進展が確認された。観察の結果、全ての破断面上に介在物の存在が確認され、NP材、LPP材においては破断の起点となっている。またLP材のみ介在物ではなく、表面欠陥を起点に破断する結果となった。

3. 3 考察

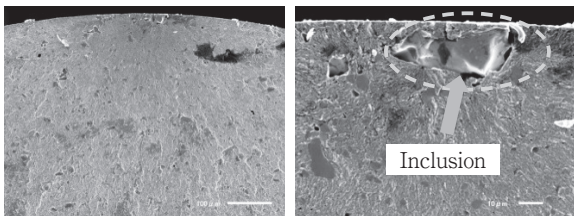
3. 3. 1 レーザピーニング処理の表面への影響

疲労特性は、一般的に表面粗さに大きく依存する。表面粗さ測定機（株東京精密製 Surfcom 1500X）を用いてNP材、LP材、LPP材の表面粗さRaを求めたところ、Table 2に示すように、LPP材はLP後に研磨している為、NP材と同等の表面粗さであるが、LP材は表面粗さが著しく増加していた。また、表面性状を確認する為、走査型電子顕微鏡にてLP材、LPP材の表面観察を行った。観察結果をFig. 7に示す。LP材表面には、全域に無数の微小クラックや穴が存在していることが確認された。レーザーの照射により、金属表面がアブレーションした際に生じた表面粗さの悪化及び微小クラックや穴が発生したことにより、これらを起点として表面からき裂が発生し、疲労寿命が低下したと考えられる。

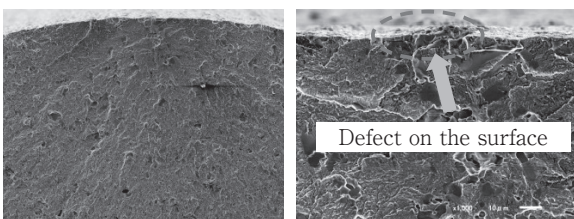
一方でLPP材は、レーザーピーニング処理後に研磨したことで微小クラックと穴がLP材より減少し、内部に存在する介在物を起点にき裂が発生し、進展したものとする。

Table 2 Surface roughness of each test piece

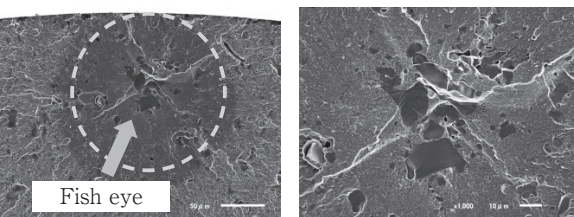
Test piece	NP	LP	LPP
Ra [ $\mu\text{m}$ ]	0.030	0.800	0.029



(a) Fracture surface of NP

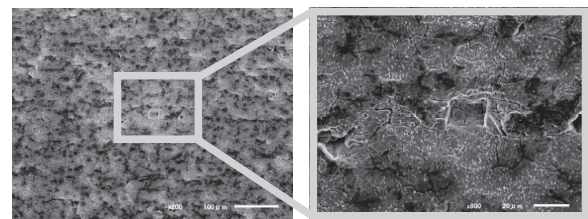


(b) Fracture surface of LP

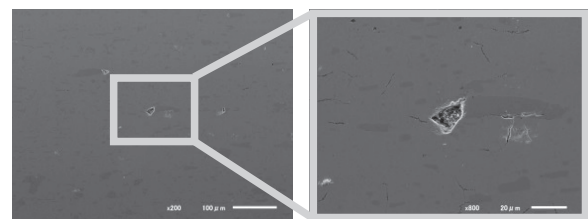


(c) Fracture surface of LPP

Fig. 6 The fracture surface of each test pieces



(a) LP



(b) LPP

Fig. 7 Surface observation

### 3.3.2 残留応力分布

レーザーピーニング処理により付与された圧縮残留応力を調査する為、試験片表面近傍の圧縮残留応力をX線解析法により測定した。演算方法はCos  $\alpha$  法である。測定器はパルステック製  $\mu$ -X360sを用いて、X線管球はクロム管球、管球電圧30kV、管電流1.50mA、コリメータ直径 $\phi$ 0.3mmの条件の下、試験片のくびれ中心部を対象として、残留応力測定と電解研磨を繰り返しながら、深さ方向への残留応力分布をクロッシングポイントまで求めた。Fig. 8にNP材とLP材の応力分布を示す。NP材は、深さ方向での応力値変化は確認されなかった。一方、LP材は表面から深さ10  $\mu$ m程度で最大圧縮残留応力値となる。これは先に述べたレーザーアブレーションによる熱影響によって、表層の一部に引っ張り応力が付与され、結果として表面の圧縮残留応力は小さくなることと考えられる。またクロッシングポイントまでの残留応力の測定結果より、本研究におけるレーザーピーニング処理は、表面近傍の深さ300  $\mu$ m程度まで圧縮残留応力が存在する結果となった。ここではLPP材の残留応力分布について記載していないが、表面から約20  $\mu$ m研磨により溶融層を除去したことにより、最大圧縮残留応力値が表面近傍に存在する。

その結果、LPP材は研磨による表面粗さの滑らかさとレーザーピーニングによる圧縮残留応力の効果により、疲労寿命が高くなったと考える。

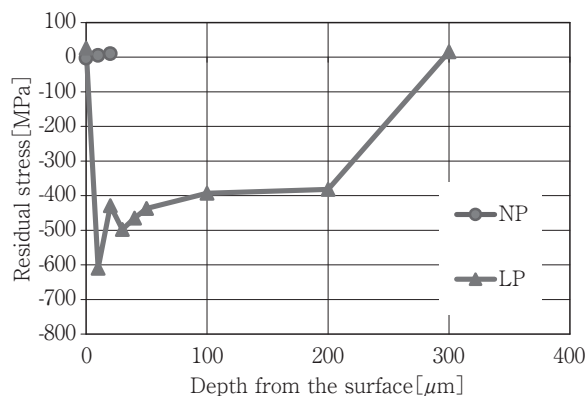


Fig. 8 Residual stress distribution

### 4. おわりに

今回はレーザーピーニング処理したSKD11の回転曲げ疲労試験を行い、ピーニング効果と回転曲げ疲労特性に及ぼす影響について報告した。

今後も様々な材料に対する基礎研究を行い、レーザーピーニングの用途開発及び技術発展に努めていく。

### 謝辞

本実験の遂行には、豊田工業高等専門学校 機械工学科 中村裕紀准教授の協力を得た。ここに記して感謝の意を表す。

### 参考文献

- 1) ショットピーニング技術協会：金属疲労とショットピーニング、現代工学社、(2004)、p.1-12.
- 2) B.P. Fairand and A.H. Clauer: SPIE Industrial Applications of high Power Laser Tech. 86, (1976), p.112-118.
- 3) A.H. Clauer, B.P. Fairand : Proc. of Conf. on Applications of Laser in Materials Processings, by AWS, Ohio, US, (1979), p.291-315
- 4) 政木清孝、亀島洋介、久森紀之、佐野雄二、秋田貢一、菖浦敬久：Ti-6Al-4V合金の回転曲げ疲労特性に及ぼすレーザーピーニング処理の影響、日本材料学会論文集、62巻、5号(2013)、P.297-304
- 5) Y. Masaki, Y. Ochi, T. Matsumura, T. Ikarashi, Y. Sano: Effects of laser peening treatment on high cycle fatigue and crack propagation behaviors in austenitic stainless steel, Journal of Power and Energy Systems, Vol.4, No.1 (2010), P.94-104
- 6) Y. Sano, M. Obata, T. Kubo, N. Mukai, M. Yoda, K. Masaki, Y. Ochi: Retardation of crack initiation and growth in austenitic stainless steels by laser peening without protective coating, Vol.417 (2006), P.334-340

- 7) 佐野雄二：構造物の寿命を延ばすレーザーピーニング、表面技術、60 巻、11 号（2009）、P.698
- 8) K. Masaki, Y. Ochi, Y. Kumagai, T. Matsumura, Y. Sano and H. Naito: "Influence of laser peening treatment on high-cycle fatigue properties of degassing processed AC4CH aluminum alloy", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.55, No.7 (2006), P.706-711
- 9) Y. Ochi, K. Masaki, T. Matsumura, Y. Sano, K. Akita, K. Kajiwara: "Effects of laser peening on fatigue crack behaviors in pre-cracked cast aluminum alloy", Key Engineering Materials, Vols.345-346 (2006), P.255-258
- 10) 澁谷紀仁、小林祐次：ショットピーニングとレーザーピーニングの効果の違いとそのアプリケーション、第 89 回レーザー加工学会講演論文集（2018）
- 11) 政木清孝、辻俊哉、小林祐次：A7075-T651 材の片振り平面曲げ疲労特性に及ぼすピーニング処理の影響、日本機械学会論文集、81 巻 826 号、(2015)、P.15-00003
- 12) 尾崎公造：冷間工具鋼の疲労強度に及ぼす一次炭化物分布の影響、電気製鋼、76 巻、4 号、P.249-257