

高強度アルミニウム合金の疲労特性に対するレーザーピーニングの影響

Effect of laser peening on fatigue characteristic of high strength aluminum alloy

糸野 文亮* 瀧谷 紀仁*
Fumiaki Kumeno Norihito Shibuya

高橋 宏治** 小岸 優太**
Koji Takahashi Yuta Kogishi

From the viewpoint of weight reduction, the use of high strength aluminum alloys is expanding. Aluminum alloys have high defect sensitivity, and the presence of defects reduces the fatigue strength. Laser peening is a technology for introducing compressive residual stress using the impact by irradiation of a short pulse laser, and is characterized in that deeper compressive residual stress can be induced than shot peening. In this study, we report the results of plane bending fatigue tests using specimens with surface defects introduced after laser peening.

KEY WORDS:Laser peening, Shot peening, Aluminum alloy, Fatigue strength, Residual stress, Surface defect

1. はじめに

レーザーピーニングは、パルスレーザーを材料表面へ照射した際に発生するレーザーアブレーションにより生じるプラズマの圧力を、水中や水膜などの慣性力で抑えることによって発生する衝撃波を利用して圧縮残留応力を導入する技術である。

当社では、これまで多くのお客様にショットピーニング技術を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、当社の表面処理方法にも大きく影響し、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の融合であるレーザーピーニングに着目し、基礎研究を行っている。

本報では、レーザーピーニングの技術概要を紹介した後、近年、輸送機器の軽量化という観点から、利用が拡大している比強度の高いアルミニウム合金の疲労特性について、レーザーピーニング施工後に表面欠陥を導入した試験片を用いて平面曲げ疲

勞試験を行い、高強度アルミニウム合金の疲労特性の向上及び、表面欠陥の無害化について評価を行った事例¹⁾について紹介する。

2. レーザピーニングの概要

2.1 レーザピーニングの基本原則と特徴

レーザーピーニングの基本的なプロセス概要図をFig. 1に示す。ショットピーニングはランダムなプロセスの効果である。一方でレーザーピーニングは、施工条件を精密に制御する為、再現性が高く、材料や形状に応じた局所施工が可能なことか

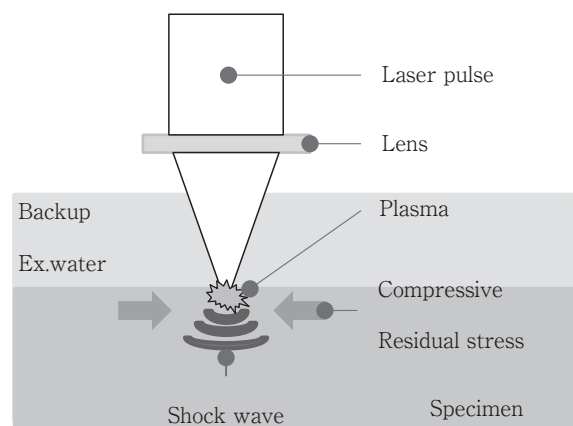


Fig. 1 Process of laser peening

*サーフェステックカンパニー 開発グループ 企画開発チーム

**横浜国立大学大学院

ら、施工条件を変更しやすいことが特徴となる。またその効果は、深い位置まで圧縮残留応力を導入できることから、腐食環境下やエロージョン環境下のような、表面から減肉が発生する疲労に対し有効な手段である。

2.2 レーザピーニングの方法

産業で実用されているレーザピーニングの方法は2種類存在する。

(a) 材料の表面に犠牲層を用いる方法と、(b) 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. 2に示す。(a)は、主に米国や欧州で航空機部品に適用されており、特徴としては、高出力のNd:glassレーザ(波長:1050nm)を用いて、高ピークパワーのパルスレーザを照射し犠牲層をプラズマ化する。この波長は水に吸収されやすい為、表面に薄い水膜を形成した状態で施工される。

一方(b)は、日本で原子炉部品に適用されており、特徴としては、犠牲層を用いずNd:YAGレーザの第2高調波(波長:532nm)を使用し、水中で直接材料表面へ弱いパルスレーザを照射し施工される²⁾。

当社では、(b)の方法を用いて様々な材料へ及ぼす影響について調査を行っている。

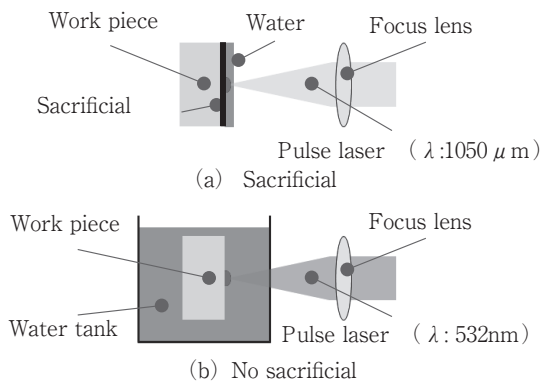


Fig. 2 The method of laser peening

Table 1 Chemical composition table (wt.%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
0.07	0.19	1.8	0.03	2.6	0.19	5.7	0.01

Table 2 Mechanical characteristics

Proof stress $\sigma_{0.2}$ (MPa)	504
Tensile strength σ_B (MPa)	578
Vickers hardness (HV)	200

3. 高強度アルミニウム合金の疲労特性に対する調査

アルミニウム合金は、鉄鋼材料と比べ欠陥感受性が高く、微小な表面欠陥の存在により疲労強度が大幅に低下することが知られている。このような課題に対し、高橋らはショットピーニングによる圧縮残留応力を導入することで、高強度アルミニウム合金A7075-T651において深さ0.1mmまでの表面欠陥を無害化する効果があることを明らかにした³⁾。更に大きな表面欠陥を無害化できれば、機器の信頼性を高めることができる。そこで本研究では、より深い位置まで圧縮残留応力を導入することが可能なレーザピーニングを用いて調査を行った。

3.1 供試材・試験片

供試材は、高強度アルミニウム合金A7075-T651を用いた。化学成分をTable 1に、また機械特性をTable 2に示す。本実験で使用する平面曲げ試験片は、供試材を試験片形状に機械加工を行い作製した(Fig. 3)。試験片は機械加工のままのUnpeening材(UP材)、ショットピーニングを施したShot peening材(SP材)、レーザピーニングを施したLaser peening材(LP材)である。放電加工により、深さ $a = 0.1\text{mm} \sim 0.6\text{mm}$ の半円スリットを試験片の最小断面部に導入した。

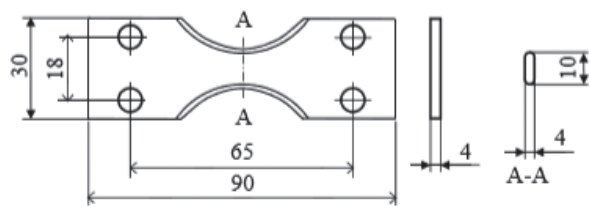


Fig. 3 Fatigue test specimen (mm)

3.2 レーザピーニング施工条件

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：単位面積あたりに照射されるエネルギー量（単位：GW/cm²）、カバレッジ：加工面積における照射面積の総和の割合（単位：%）である。

本実験は事前実験の結果から、Table 3 に示す施工条件に設定した。また、試験片へのレーザーピーニング走査はFig. 4 に示す方向へ中央部20mmの範囲で両面施工を行った。

3.3 残留応力測定方法及び疲労試験方法

試験片内の残留応力分布は、疲労強度の向上及び表面欠陥の無害化に大きな影響を与える。そこで、疲労試験の際に引っ張り応力が作用する表面近傍の残留応力分布測定をX線回析法により測定した。測定方法は、cos α法である。

X線管球はCr管球、測定面：(3 1 1) 面とした。また、試験片中央部長手方向を対象に揺動させながら、残留応力測定と電解研磨を繰り返し、深さ方向への残留応力分布を求めた。

疲労試験は、室温大気中、応力比R=0、周波数20Hzの条件で平面曲げ疲労試験を行った。応力は、試験片最小断面部の表面における公称応力である。また、アルミニウム合金には疲労限度が存在しない為、10⁷回の繰返しに耐久した最大の応力幅Δσを10⁷回疲労強度(Δσ_w)と定義した。

Table 3 Laser peening conditions

Spot size (mm)	0.4
Power density (GW/cm ²)	12
Coverage (%)	700



Fig. 4 Laser peening scanning

4. 実験結果

4.1 残留応力分布

Fig. 5 に、LP材とSP材の深さ方向の残留応力分布を示す。圧縮残留応力の最大値は、LP材：-400MPa、SP材：-435MPaとSP材の方が35MPa大きい。一方で、圧縮残留応力の導入深さに関しては、LP材はSP材と比較し3倍程度深い結果となった。

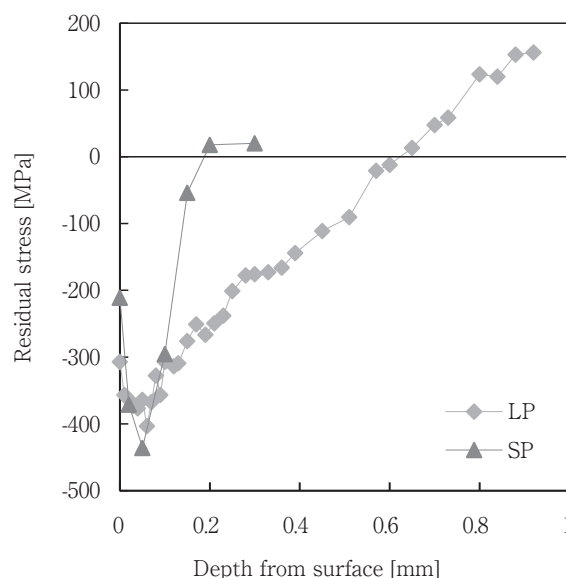


Fig. 5 Residual stress distribution

4.2 疲労試験結果

Fig. 6 に、応力幅Δσとスリット深さaの関係を示す。UP材では、aが大きくなるに従い、Δσ_wが低下した。a=0.6mmのスリットが入った際には、70%以上Δσ_wが低下した。それに対し、SP材とLP材では、UP材と比較してΔσ_wは向上した。

本実験におけるスリットの無害化条件は、

- ①Δσ_wがピーニングを施したUP材の95%以上まで向上
- ②破壊起点がスリット部以外であることのいずれかを達成した場合とした⁴⁾。

上記①からレーザピーニングにより $a=0.4\text{mm}$ の半円スリットを無害化できた。同様にショットピーニングにより、 $a=0.1\text{mm}$ の半円スリットを無害化できた。したがってレーザピーニングは、ショットピーニングよりも4倍程度大きな表面欠陥を無害化できることが明らかとなった。

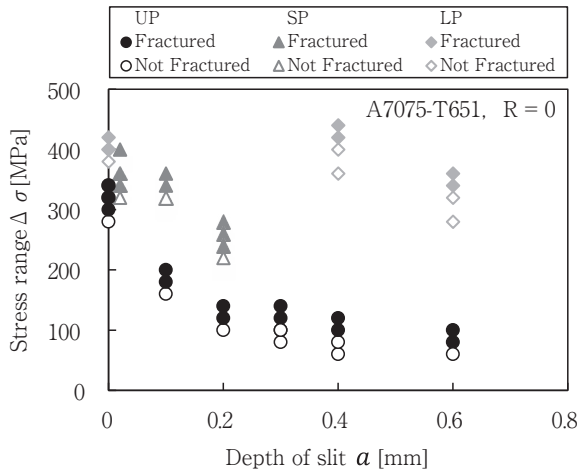


Fig. 6 Stress range and slit depth

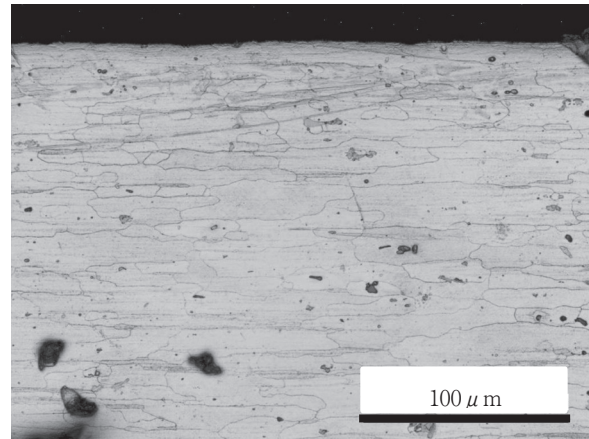
次に、UP材と疲労試験後のSP材、LP材を短軸方向に切り出した後、横断面において表面近傍の組織観察を行った結果をFig. 7に示す。

Fig. 7 (a) は、UP材であり、横方向に延伸された組織が確認できる。一方Fig. 7 (b) のSP材は、表層0.03mm程度までショットピーニングの影響と考えられる塑性流動層を確認した。

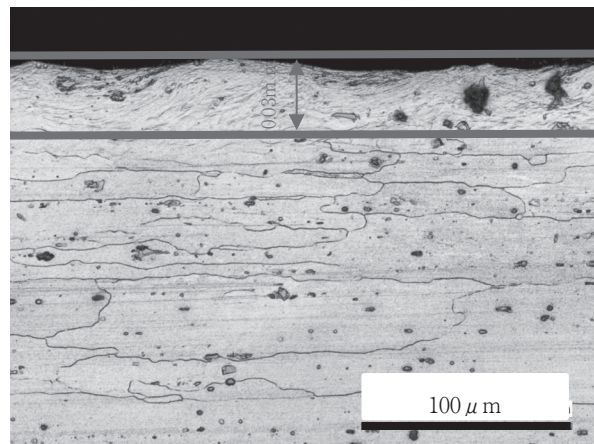
Fig. 7 (c) のLP材においては、塑性流動層は確認できず、表層の組織に変化が発生していないことがわかる。

また、EBSD解析により得られたIPFマップをFig. 8に示す。Fig. 8 (a) は、UP材の結晶状態を示したものである。Fig. 8 (b) のSP材は、ショット材と被加工材の硬さに大きな差がある為、組織がアモルファス状となり、表面から0.05mmまでは解析不可となっている。

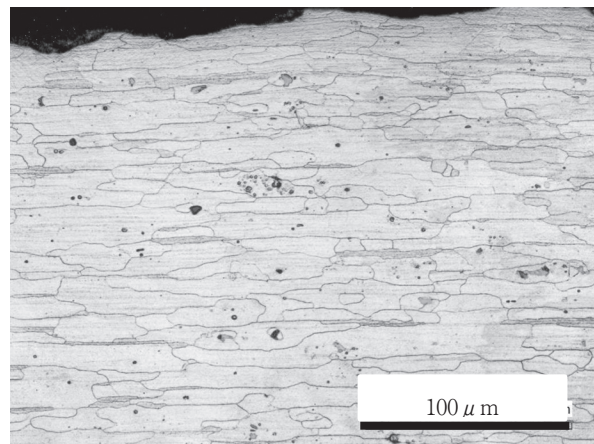
Fig. 8 (c) のLP材は、Fig. 7 (c) の結果と同様、結晶の微細化、塑性流動は確認できない。しかしながら、結晶粒内に色の変化、すなわち方位のずれが生じている。



(a) UP

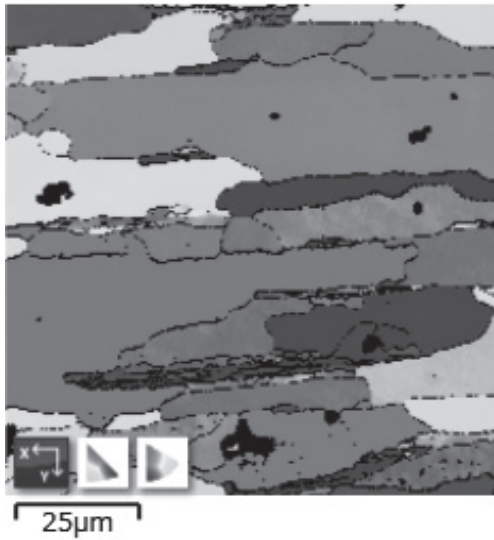


(b) SP

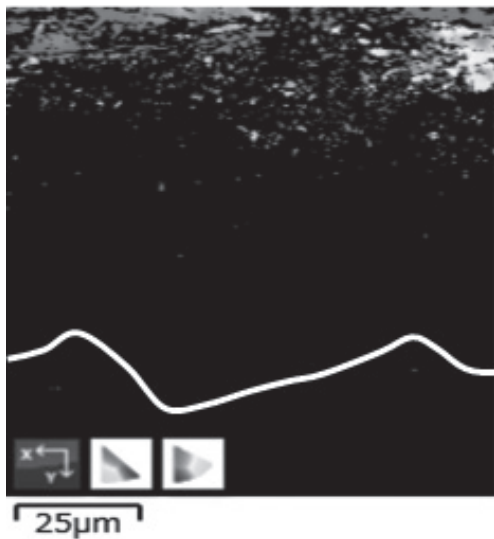


(c) LP

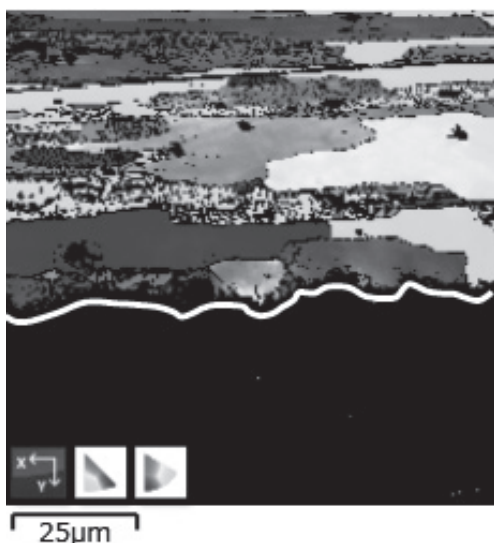
Fig. 7 Microstructure observation



(a) UP



(b) SP



(c) LP

Fig. 8 EBSD-IPF maps observation

5. 考察

レーザピーニングによりショットピーニングと比べ、表面欠陥を無害化できた理由を考察する為、式 (1) に各試験片のスリット深さ a 及び $\Delta\sigma_w$ の実験値を代入することで、みかけの下限界応力拡大係数幅 ΔK_{th} を計算した。

$$\Delta K_{th} = F \Delta \sigma_w \sqrt{\pi a} \quad \dots (1)$$

ここで、 F は形状補正係数であることからNewman-Rajuの式⁵⁾を用いて算出した。Table 4 に各試験片における ΔK_{th} の平均値を示す。 ΔK_{th} はUP材と比較して、ショットピーニングによって約2倍、レーザピーニングによって約5倍に増加した。この理由は、圧縮残留応力の導入により、半円スリットからの疲労き裂の進展が抑制された為である。実験結果として、 $\Delta\sigma_w$ と a の関係を両対数グラフに整理した結果をFig. 9に示す。Fig. 9における水平線は、平滑材の 10^7 回疲労強度 $\Delta\sigma_w$ である。傾きが $-1/2$ の直線は、以下の式(2)にTable 4内の ΔK_{th} を代入して評価した $\Delta\sigma_w$ と a の関係である。

$$\Delta \sigma_w = \frac{\Delta K_{th}}{F \sqrt{\pi a}} \quad \dots (2)$$

Fig. 9に示すように、式 (2) による評価結果は $\Delta\sigma_w$ の実験値と相関がある。 $\Delta\sigma_w$ と式 (2) の交点のスリット深さを、無害化可能な最大欠陥寸法 a_{max} とする。 a_{max} の値は、SP材で0.1mm、LP材では0.4mmであった。これらの値は、実験結果と整合していた。以上から、レーザピーニングにより、深くて大きい圧縮残留応力を導入することで、見かけの ΔK_{th} を増加させ、ショットピーニングと比べ大きな表面欠陥を無害化できることが明らかになった。

Table 4 Apparent ΔK_{th} in each test piece

UP	SP	LP
2.0MPa · m ^{1/2}	4.0MPa · m ^{1/2}	9.7MPa · m ^{1/2}

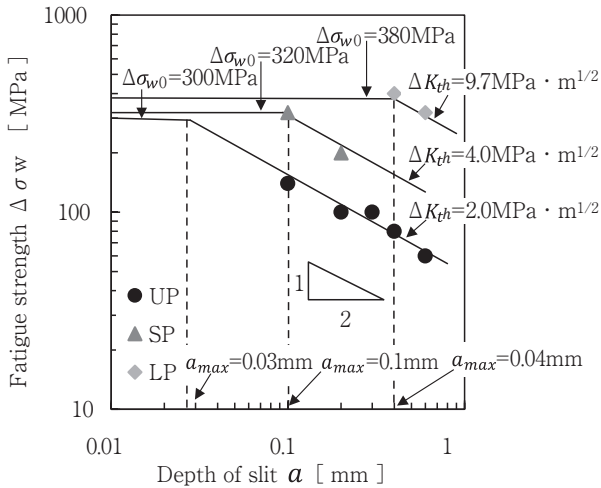


Fig. 9 10^7 cycles fatigue strength and slit depth

6. 結言

- (1) レーザピーニングを行うことにより、深さ $a=0.4\text{mm}$ の半円スリットを疲労強度上、無害化できた。
- (2) ショットピーニング及びレーザピーニングによって、見かけの ΔK_{th} はUP材と比較して、それぞれ約2倍及び約5倍に増加した。
- (3) 見かけの ΔK_{th} に基づいて算出した無害化可能最大欠陥寸法は、ショットピーニングで $a_{max}=0.1\text{mm}$ 、レーザピーニングで $a_{max}=0.4\text{mm}$ と予想され、実験結果と整合した。
- (4) EBSD解析の結果から、レーザピーニングは、結晶の微細化、塑性流動を発生させることなく圧縮残留応力を付与することができる。

7. おわりに

今回は、レーザピーニング処理したアルミニウム合金A7075-T651 に対し表面欠陥を導入し、平面曲げ疲労試験を行い、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ながら、レーザピーニングの用途開発及び技術発展に努めていく。

また、ショットピーニングとは異なる材料への影響及び現象についても、素形材における研究・開発側の抱えている疑問、課題に対し本報告をきっかけとし、更に取り組んでいきたい。

参考文献

- 1) 小岸優太、高橋宏治、糸野文亮、澁谷紀仁：ショットピーニング技術 Vol.31 No2 P4-5
- 2) 佐野雄二、政木清孝、秋田貢一、久保達也、佐藤真直、梶原堅太郎：放射光Sept.2008 Vol.21 No.5 P270-276
- 3) K.Takahashi, H.Oseda, T.Suzuki, S. Fukuda, Eng. Fract. Mech, 193 (15), (2018), 151-161
- 4) ばねの許容欠陥寸法に関する研究委員会、ばね論文集、53、(2008)、P 57-66
- 5) J.C Newman Jr, IS Raju, Eng. Fract. Mech, 15, (1981) P185-192