

パルスレーザー誘起キャビテーションによる 金属製 3 次元積層造形材の機械的表面改質

東北大学 大学院工学研究科ファインメカニクス専攻
教授 祖山 均

(2021 年度 一般研究開発助成 AF-2021219-B3)

キーワード：金属製 3 次元積層造形材，パルスレーザー，疲労特性

1. 研究の目的と背景

金属製 3 次元積層造形材は，CAD/CAM から直接的に造形できるなどの利点から，生体インプラント^{1,2)}や航空機部品³⁾，自動車部品⁴⁾などへの適用が期待されている．しかしながら，金属製 3 次元積層造形した As-built 材は積層造形時の不完全溶融の金属粒子が表面に残存して表面粗さが著しく大きいために，As-built 材の疲労強度がバルク材の半分程度であることが実用化の障壁になっている．そこで，As-built 材の疲労強度を向上させるための機械的表面改質の構築が望まれている．

一般的な機械的表面改質にはショットピーニング SP があり，SP により金属製 3 次元積層造形材の疲労強度向上も可能であるが⁵⁾，SP では不完全溶融の金属粒子間の谷を除去することは困難である．パルスレーザーを用いて発生させたレーザーアブレーション LA の膨張波を用いたレーザーピーニング LP (レーザー・ショック・ピーニングとも呼ばれている)でも，金属材料の疲労強度向上が可能であり，LA により金属製 3 次元積層造形材の平滑化も可能なので，LP による金属製 3 次元積層造形材の疲労強度向上が期待できる．また，水中に設置した試験片にパルスレーザーを照射すると，LA の膨張波の後の負圧場に，キャビテーション的な気泡が発生して成長し，最大径に達した後に収縮して圧潰する⁶⁾．このパルスレーザー誘起気泡を，本研究ではレーザーキャビテーション LC と呼ぶ．したがって，水中に設置した加工物にパルスレーザーを照射すると，LA による衝撃力と LC の圧潰衝撃力で圧縮残留応力を導入でき，さらに，LA で積層造形した As-built 材の表面を LA で平滑化して，金属製 3 次元積層造形材の疲労強度向上を実現できる可能性がある．

よって本研究では，金属製 3 次元積層造形材の疲労強度向上を目的として，LC と LA による圧縮残留応力導入と，LA による平滑化を有効利用した機械的表面改質法の構築を目指した．本機械的表面改質法は，水中にパルスレーザーを照射して LC および LA により機械的表面改質を行っており，一般に液膜を用いて LA のみを利用する LP と区別して，本報告では，開発した表面改質法を水中レーザーピーニング Submerged Laser Peening として，SLP と簡略化して記す．

LP では，LA による衝撃波を利用しているので，LA を発生させるためにレーザーのパルス幅が ns オーダである必

要があり，そのために一般的には Q スイッチ付 Nd:YAG レーザを用いる．しかしながら，Q スイッチ付 Nd:YAG レーザの最大繰返し周波数は数十 Hz 程度であり，処理時間がかかることが実用化の障壁になっている．高頻度の繰返し周波数のレーザーも開発されているが，レーザーのエネルギーが小さいために，LP のために高パルス密度が必要となり，処理時間の短縮には難がある．LC の圧潰衝撃力を活用するのであれば，最大繰返し周波数 50 kHz のファイバレーザーなども使用可能であり，桁違いに処理時間を短縮できる可能性がある．よって，本研究では，最大パルスエネルギー 0.35 J の Q スイッチ付 Nd:YAG レーザを用いるとともに，Q スイッチが取り外し可能な最大パルスエネルギー 30 mJ の Nd:YAG レーザを用いて，パルス幅 200 μ s のレーザーパルスによる LC 発生の検討も行った．

2. 実験装置および方法

2・1 供試材料と形状

図 1 に，本実験で使用した金属製 3 次元積層造形で製作したチタン合金 Ti6Al4V 製ねじり試験片とその形状を示す．試験片は，長手方向に粉末床レーザー溶融(Powder Bed Fusion-Laser Sintering; PBF-LS)で造形した．PBF-LS では，平均粒子径約 40 μ m の金属粒子を用いて，レーザーパワー 400 W，レーザースポット径 100 μ m，積層ピッチ 60 μ m で積層造形した．PBF-LS で造形したチタン合金 Ti6Al4V 製試験片(PBF-LS/Ti6Al4V)は，造形時の残留応力を除去するために，650℃で 180 min の熱処理を行った後，溶体化処理 (935℃で 105 min ; Ar 冷却) と時効処理 (705℃で 120 min ; Ar 冷却) の熱処理を行った．なお，図 1 では，試験片の端部は造形した状態(As-built)で示している

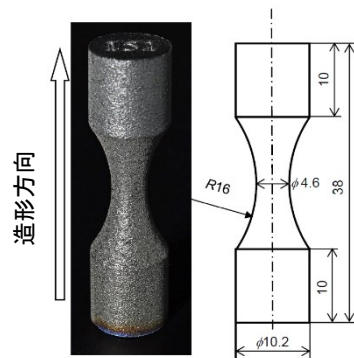


図 1 ねじり試験片(PBF-LS/Ti6Al4V)

が、ねじり試験時には、保持部が滑ることなく固定するために、保持部を研磨した。

2・2 実験装置の概要

図2にはSLPに使用した装置の写真を、図3には処理部の概要を示す。SLPは、波長1,064 nm、最大レーザーパルスエネルギー0.35 J、パルス幅4~6 ns、ビーム直径6 mm、繰返し周波数10 HzのQスイッチ付Nd:YAGレーザーを用い、図2および図3に示すように、ミラーと凹レンズおよび凸レンズにより、硬質ガラス製水槽（ガラスの厚さ3 mm）内に設置した試験片にパルスレーザーを照射して処理した。なお、表面改質効果が最大になるように、気中のスタンドオフ距離 s_a を67 mm、水中のスタンドオフ距離 s_w を34 mmとした。SLPでは、ステッピングモータにより試験片を一定速度で回転させながら、垂直方向に一定速度で移動させて処理した。レーザーパルス密度 d_L は、図3の下側の図に示すように、垂直方向のパルス間隔 d_H と水平方向のパルス間隔 d_V から式(1)のように定義した。

$$d_L = \frac{1}{d_H d_V} \quad (1)$$

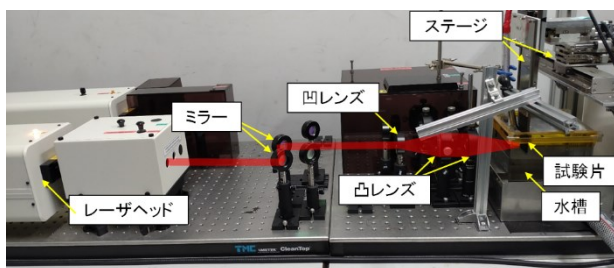


図2 SLPに使用した装置の写真

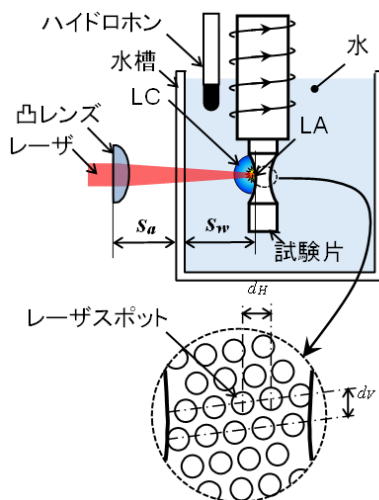


図3 SLPの処理部概要

SLPの際、残留気泡によるLCのクッション効果を低減するために、水槽には脱気水を約5 L/minで給水した。LCの大きさは、水槽にハイドロホンを挿入して、LCの発生から圧潰の時間を計測してモニタした。

前述したように、高繰返し周波数の発生が可能なレーザーシステムによるLC発生の可能性を検討するために、 μ sオーダーのレーザーパルスによるLC発生の検討には、Qスイッチの取り外しが可能な最大パルスエネルギー30 mJのNd:YAGレーザーを用いた。

2・3 表面改質効果の評価

疲労特性は、研究代表者が開発したトルク制御型ねじり式疲労試験機⁷⁾を用いて（図4参照）、負荷せん断応力 τ_a 一定の条件で、 d_L を変えて疲労寿命を評価して、好適な d_L を求め、当該 d_L で試験片を処理して、ねじり角制御型ねじり式疲労試験機を用いてS-N特性を得た。なお、いずれの場合も負荷応力比 R は-1とした。なお、本研究で開発したSLPの優位性を示すために、SP⁸⁾や水中水噴流で発生させたキャビテーションを用いたキャビテーションピーニングCP⁹⁾でも試験片を処理して、ねじり疲労試験に供した。なお、SPやCPでは、ねじり試験片を回転させながら軸方向に移動させて処理したので、単位長さ当たりの処理時間 t_p を処理時間の指標とした。

疲労特性に深く関わっている残留応力は、図5に示すような2次元検出器を有するX線回折装置を用いて評価した。使用した管球はCu管球で、回折面はTi(213)、無歪時の回折角は139.5°、ポアソン比は0.32、ヤング率は113 GPaを用いた。また、表面粗さは触針式の表面粗さ計で計測した。

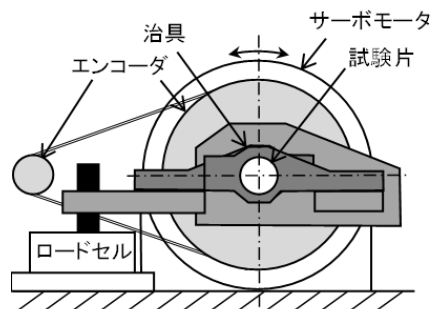


図4 トルク制御型ねじり式疲労試験機

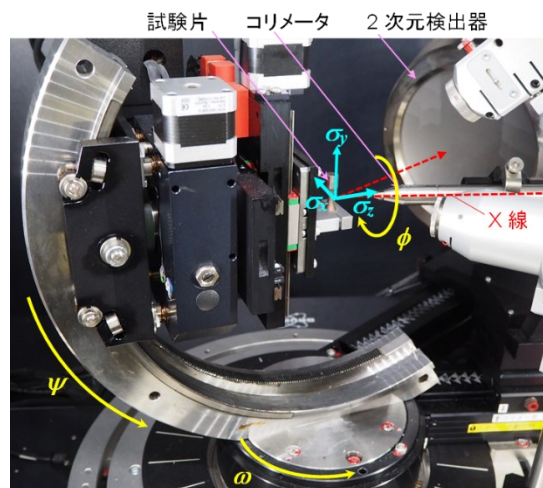


図5 残留応力測定用X線回折装置

3. 実験結果

3・1 水中レーザピーニング SLP の様相

図 6 に、高速度ビデオカメラで撮影した SLP の様相を示す。図 7 には、高速度ビデオカメラの撮影と同時に記録したハイドロホンからの信号を示す。パルスレーザ照射時 ($t=0$ ms) に LA が認められ、その後、半球状の LC が試験片表面に発生して発達し、 $t \approx 0.4$ ms において最大径となった後に収縮して、 $t \approx 0.8$ ms で圧潰している。図 7 からわかるように、 $t = 0$ ms において LA による圧力波が検出され、 $t \approx 0.8$ ms で LC の圧潰による圧力波が検出されている。なお、図 6 と図 7 は、高速度ビデオカメラによる SLP の撮影とハイドロホンによる圧力波の検出を同時に記録するために、単発のパルスレーザを照射した場合であるが、図 8 には、パルスレーザを連続して照射したときのハイドロホンで検出した圧力波の信号を示す。図 8 では、LC 圧潰後の小さな残留気泡が水中に残存し、残留気泡が圧力波を吸収するために、LA と LC による大きな圧力波のみが際立って見える。いずれにせよ、SLP では、LA と LC により、1 つのレーザパルスで 2 回試験片をたたくことが可能であることがわかる。なお、水中に伝播する衝撃波を水中衝撃波センサで検出した場合には、LA による圧力波の振幅のほうが LC による圧力波の振幅よりも大きい、被加工面に衝撃力センサを組み込んで材料内に伝播する衝撃力を検出した場合には、LC 圧潰時の衝撃力のほうが LA による衝撃力よりも大きいとの報告⁶⁾もある。

ファイバレーザなどの高繰り返し周波数が可能なレーザシステムによる LC 発生を検証するために、図 9 には Q スイッチを外した Nd:YAG レーザ (パルス幅 200 μ s) による SLP の様相を示す。

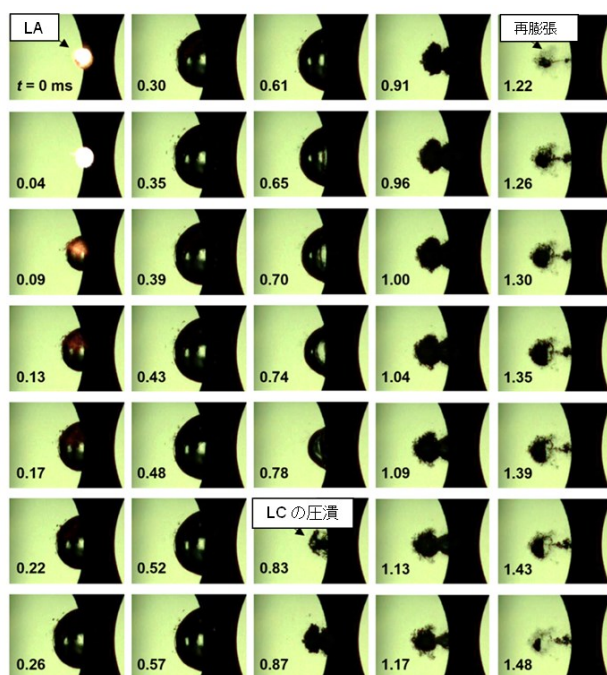


図 6 水中レーザピーニング SLP の様相

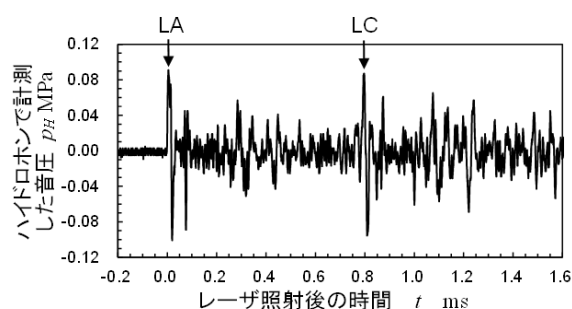


図 7 SLP におけるハイドロホンからの信号(単発パルス)

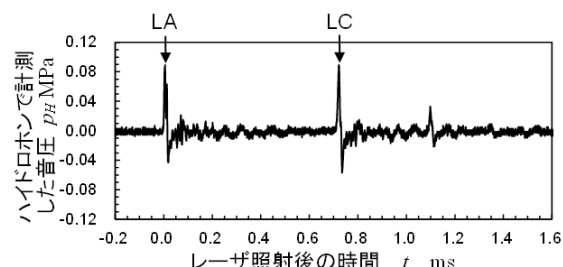


図 8 SLP におけるハイドロホンからの信号(連続パルス)

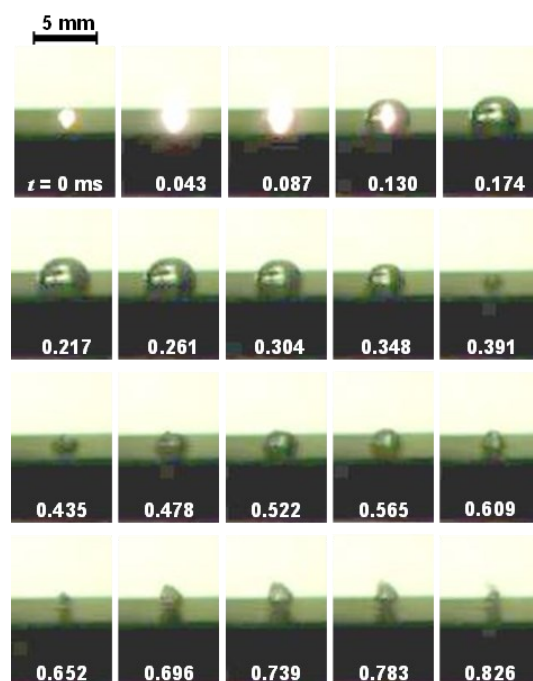


図 9 Q スイッチ無の Nd : YAG レーザによる水中レーザピーニング SLP の様相

パルス照射後から LC が発生して発達し、約 0.2 ms で最大径を取った後に収縮して圧潰している。すなわち、パルス幅 200 μ s のレーザパルスで LC を発生できることがわかる。図 10 には、Q スイッチを外した Nd : YAG レーザでパルスレーザを照射した際の SLP におけるハイドロホンからの信号を示す。LA および LC の圧潰時に音圧の振幅が大きくなるのは、図 7 および図 8 と同様であるが、パルス幅が大きくなったために LA の振幅は相対的に小さくなっている。いずれにせよ、パルス幅 200 μ s のレー

ザパルスで LC を発生でき、LC の圧潰による衝撃波が生じていることがわかる。したがって、ファイバレーザのように、比較的パルス幅が大きなレーザシステムでも LC を発生できる可能性が明らかになり、LC の応用の可能性が広がったといえる。

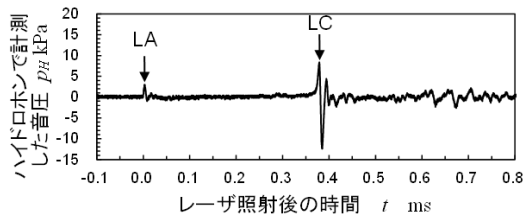


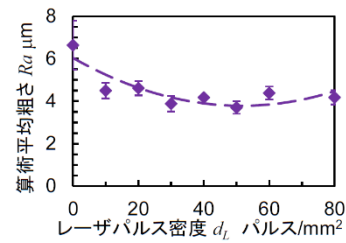
図 10 Q スイッチ無の Nd : YAG レーザによる SLP におけるマイクロホンからの信号

3・2 水中レーザピーニング SLP におけるパルス密度の影響

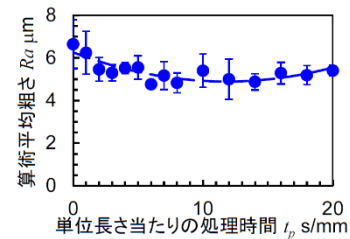
図 11 には算術平均粗さ Ra 、図 12 には残留応力とパルス密度 d_L の関係を、CP や SP と合わせて示す。 d_L の増大とともに Ra および Rz が減少し、SLP により圧縮残留応力を導入できることがわかる。なお、図 11 より、SLP、CP、SP ともに、処理の増大とともに Ra は減少するが、極小値をとった後に若干 Ra が増大する傾向が見て取れる。また、図 12 より、SLP および SP では、処理の増大とともに、圧縮残留応力が最大（残留応力が最小）を取った後に圧縮残留応力が若干減少する傾向がある。

図 13 には、負荷応力一定 ($\tau_a = 460$ MPa) の条件下で、トルク制御型ねじり式疲労試験機を用いて、疲労寿命を評価した、レーザパルス密度や処理時間と疲労寿命の関係を示す。図 13(a)より、SLP では、レーザパルス密度の増大とともに疲労寿命が増大し、やがて飽和する傾向がわかる。なお本実験の範囲内では、 $d_L = 40$ パルス/mm²において疲労寿命が最大であった。図 13(b)に示したように、CP では t_p の増大とともに、疲労寿命がわずかに減少した後に、 t_p の増大とともに疲労寿命が増大して $t_p = 10$ s/mm で最大となった後に、 t_p がさらに増大すると疲労寿命が若干減少する傾向を示した。図 13(c)に示したように、SP では t_p の増大とともに疲労寿命が増大して $t_p = 3$ s/mm で最大となり、 t_p がさらに増大すると疲労寿命が減少した。以上のことから、疲労寿命が最大となるパルス密度や処理時間から、SLP は $d_L = 40$ パルス/mm²、CP は $t_p = 10$ s/mm、SP は $t_p = 3$ s/mm を最適パルス密度および最適処理時間と判断した。

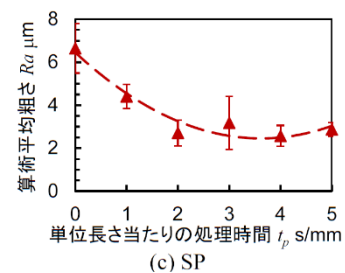
図 14 と図 15 には、最適パルス密度および最適処理時間で処理した試験片表面をデジタル光学顕微鏡ならびに走査型電子顕微鏡(SEM)で観察した様相を示す。図 14(a)および図 15(a)に示すように、PBF-LS/Ti6Al4V の As-Built 材の表面は、PBF-LS による造形時に残存した不完全溶融した金属粒子により、表面粗さが著しく大きい。図 14(b)および図 15(b)に示すように、SLP 時の LA により表



(a) SLP

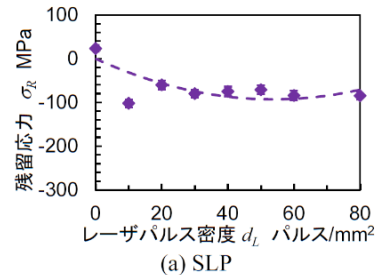


(b) CP

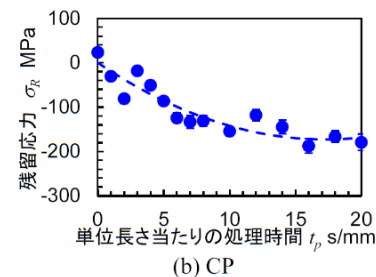


(c) SP

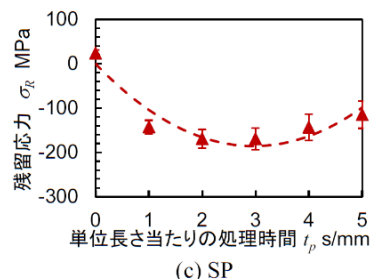
図 11 パルス密度と算術平均粗さ



(a) SLP



(b) CP



(c) SP

図 12 パルス密度と残留応力

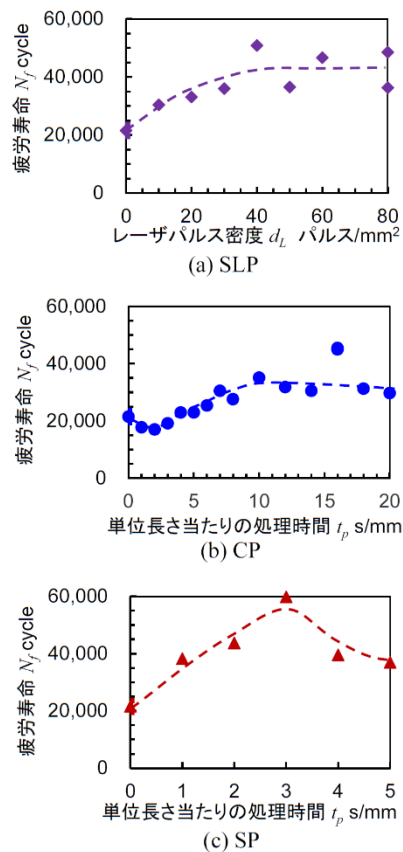


図 13 パルス密度と疲労寿命

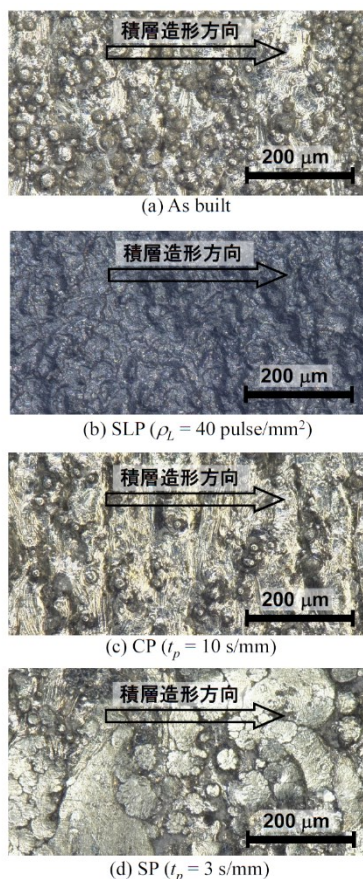


図 14 処理面の様相 (デジタル光学顕微鏡)

面が溶融あるいは蒸発・昇華されて、不完全溶融した金属粒子が判別しにくくなっている. 図 14(c)および図 15(c)に示すように, CP では不完全溶融した金属粒子が脱落しているが, 表面に固着して残存している粒子もある. 図 14(d)および図 15(d)に示すように, SP は不完全溶融した金属粒子の凸部は平滑化できるが, PBF-LS で生じた鋭い谷底部の形状は残存したままである.

3・3 水中レーザーピーニング SLP による PBF-LS/ Ti6Al4V の疲労特性向上

図 16 には, SLP は $d_L = 40$ パルス/mm², CP は $t_p = 10$ s/mm, SP は $t_p = 3$ s/mm で処理した試験片を, ねじり角制御型ねじり式疲労試験機を用いて $S-N$ 特性を評価した

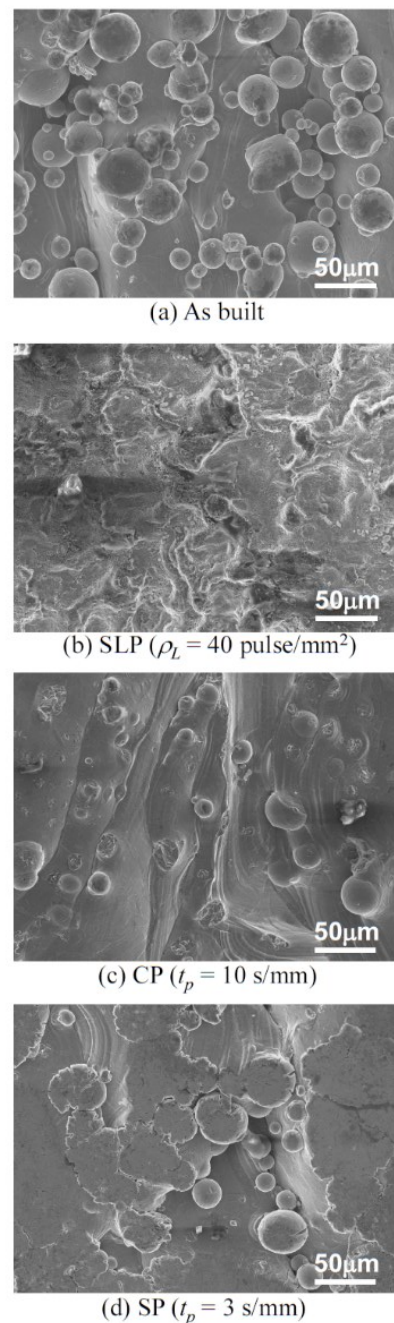


図 15 処理面の様相(SEM)

結果を示す。図 16 には、As-built 材とともに、熱間圧延材を機械加工で本試験と同様な試験片形状に加工して、本熱処理条件と同様な熱処理を行った試験片の S-N 曲線も併せて示す。Little の方法¹⁰⁾を用いて 10^7 回における疲労強度を求めると、As-built 材は 217 ± 7 MPa であるのに対し、SLP は 361 ± 8 MPa、CP は 313 ± 11 MPa、SP は 285 ± 10 MPa であった。また、熱間圧延材の場合は、 347 ± 26 MPa であった。すなわち、SLP は PBF-LS/Ti6Al4V の疲労強度を向上できるのはもちろんのこと、従来技術の SP よりも良好な結果を得ることができ、さらには 3 次元積層造形材であるにも関わらず、熱間圧延材と同等レベル以上の疲労強度を達成できたといえる。この疲労強度向上の要因は、SLP による平滑化と圧縮残留応力導入と考えられる。

4. 結び

生体インプラントや航空機部品等への応用が期待されながら、その疲労強度が実用化の難点であった金属製 3 次元積層造形材について、水中に被加工物を設置して行う水中レーザーピーニング(SLP)により、レーザーアブレーション LA による平滑化とパルスレーザー誘起気泡（レーザーキャビテーション LC）による圧縮残留応力導入により、疲労強度を向上できることを実証した。さらに、パルス幅 200 μ s のレーザーパルスによる LC の発生を実証し、Q スイッチ付 Nd:YAG レーザ以外のファイバレーザなどの SLP への応用の可能性を明らかにした。

謝 辞

本研究の実施にあたり、天田財団から助成していただき、ありがとうございました。お蔭様で、パルスレーザー誘起による金属製 3 次元積層造形材の疲労強度向上を実証することができました。どうもありがとうございました。

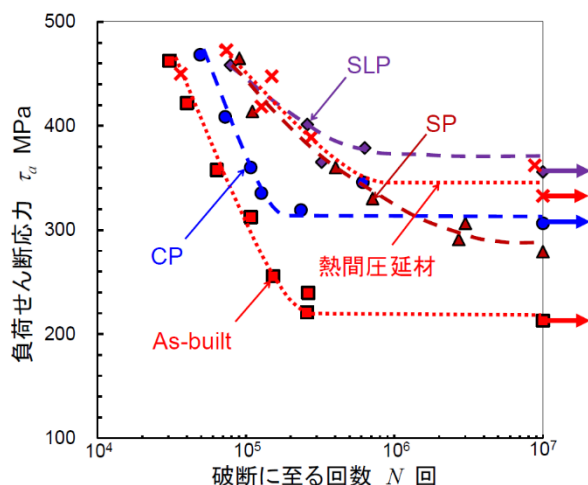


図 16 SLP による PBF-LS/Ti6Al4V の疲労特性向上

参考文献

- 1) H.I. Kok, et al., Front Bioeng Biotechnol, 13, pp. 1526873, (2025).
- 2) C. Garcia-Hernandez, et al., Scientific Reports, 15, 1, pp. 14087, (2025).
- 3) M. Srivastava, et al., Applied Materials Today, 41, pp. (2024).
- 4) N. Zhao, et al., Journal of Manufacturing Systems, 68, pp. 368-375, (2023).
- 5) P. Edwards, et al., Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the Asme, 135, 6, pp. 1-7, (2013).
- 6) H. Soyama, Journal of Materials Processing Technology, 269, pp. 65-78, (2019).
- 7) H. Soyama and C. Kuji, Surface and Coatings Technology, 451, pp. 129047, (2022).
- 8) A. Naito, et al., Materials Science and Technology, 28, 2, pp. 234-239, (2012).
- 9) H. Soyama and A.M. Korsunsky, Journal of Materials Processing Technology, 305, pp. 117586, (2022).
- 10) R.E. Little, ASTM STP, 511, pp. 29-42, (1972).

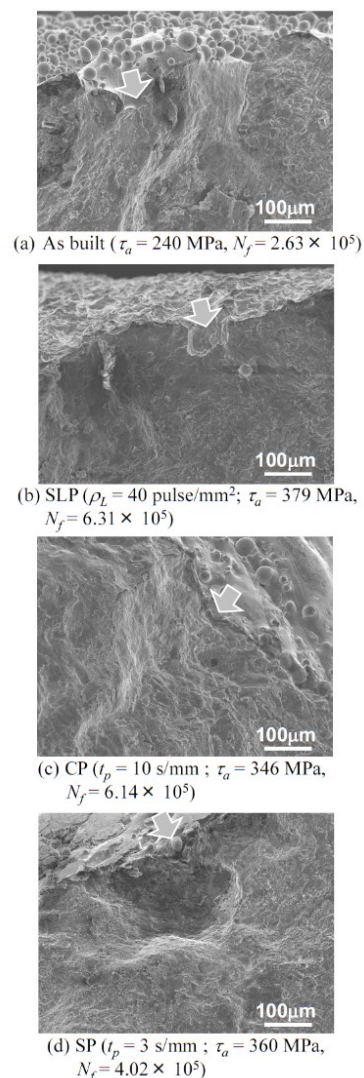


図 17 破断面の様相