

補助事業番号 2024M-392  
補助事業名 2024年度インプラントの耐久性と生体適合性の同時改善表面加工技術の  
開発補助事業  
補助事業者名 東京都市大学 教授 秋田貢一

## 1 研究の概要

生体用チタン合金Ti-6Al-4V ELI および純チタンバルク材（JIS 2種）に、数ミリジュールという比較的エネルギーの小さいパルスレーザを照射することで表面加工し、疲労特性および生体適合性への影響を調査した。その結果、疲労寿命が母材のそれに対し最大約10倍延伸でき、また、生体適合性についても従来法で表面加工した場合よりも良好であることが明らかとなった。さらに、疲労強度と生体適合性の両特性が同時に向上するレーザ照射条件を示した。以上から、一工程のレーザ照射によって両特性の向上が可能な表面加工技術の基盤を確立した。

## 2 研究の目的と背景

世界的な高齢化社会の進行に伴い、高齢者の生活の質（Quality of Life: QOL）の向上は社会的な重要課題となっている。人工歯根や骨折時の固定器具として用いられるインプラントは、この課題の解決手段のひとつであり、今後の普及拡大が予想されている。インプラントの生体骨への埋没部分には、生体適合性に加えて、構造体としての疲労強度特性が求められる。本研究では、比較的エネルギーの小さいパルスレーザを照射することで、生体用チタン合金の生体適合性および疲労特性の両特性が同時向上可能な表面加工技術の基盤を確立することを目的とする。

## 3 研究内容

<http://sds1.mse.tcu.ac.jp/jka.html>

本研究では、生体用チタン合金Ti-6Al-4V ELIおよび純チタンバルク材（JIS 2種）に様々な条件でレーザパルス照射した試料において疲労強度特性と生体適合性を評価し、さらに、両特性が同時に向上するレーザ照射条件について検討した。得られた主要な成果について以下に述べる。

【実験方法】 供試材は、医療用チタン合金Ti-6Al-4V ELIおよび純チタンバルク材（JIS 2種）とした。レーザ照射にはNd:YAGレーザ（波長1064nm）を使用し、いわゆる低エネルギーレーザピーニング（Low-energy laser peening: LELP [1]）の条件（レーザパルスエネルギー 1.5~6.1mJ、パルス幅約 1ns）で施工した。疲労試験には電気油圧式疲労試験機（容量100kN）を用い、応力比を0.1、負荷周波数を20Hzとし、室温大気中で軸荷重による試験を行った。細胞培養実験では主に細胞の初期接着過程を観察した。細胞はマウス頭蓋冠由来骨芽細胞（MC3T3-E1）を用い、インキュベータ内で培養した。所定時間までの培養後、試料表

面の細胞の状態を走査電子顕微鏡（SEM）で観察した。レーザ照射による試料表層の物理的・化学的変化を明らかにするため、レーザ顕微鏡、SEM、X線回折装置、硬さ試験機、電子線後方散乱回折装置、X線光電子分光装置、グロー放電発光分光分析装置などの各種分析装置を用いた。

【残留応力】 Fig. 1にパルス照射密度に対する表面残留応力を示す。照射密度の増大に伴い、圧縮残留応力も増大し、最大で 700 MPa程度の圧縮残留応力が付与された。また、残留応力値は、照射密度に加え、レーザエネルギー $E$ とパルス幅 $w$ の組み合わせにも依存して系統的に変化している。したがって、レーザ照射条件により圧縮残留応力の制御が可能であることが分かった。

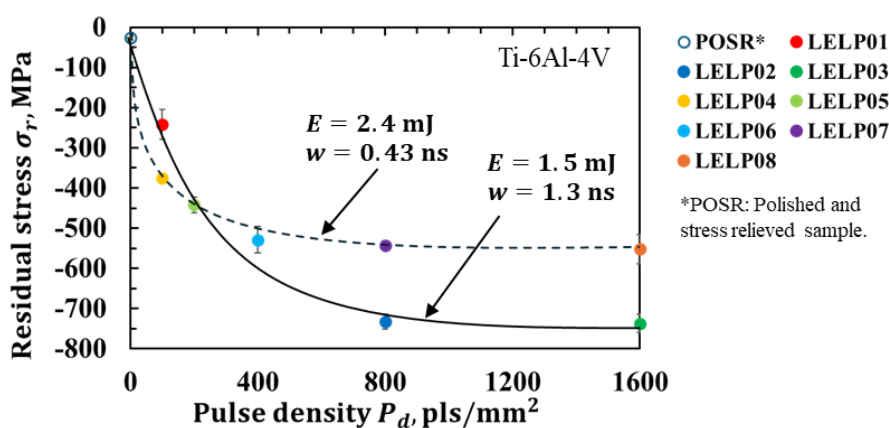


Fig. 1 Surface residual stress in laser-irradiated samples under various LELP conditions.

【疲労特性】 リファレンス材、すなわち、熱処理により残留応力を除去したSR (Stress relief annealing) と、鏡面研磨と熱処理により粗さと残留応力を除去したPOSR (Polishing and stress relief annealing) に対して、レーザを照射した試験片では疲労寿命の向上が確認された。疲労寿命は圧縮残留応力が高いほど延伸され、本実験範囲内では最大約10倍の寿命延伸効果が示された。疲労破断後の破面観察の結果、残留応力を除去したSRおよびPOSRはすべて表面起点型破壊であったのに対し、LELP施工試験片では12本のうち3本が内部起点型破壊であった。これは、LELPにより導入された圧縮残留応力により、表面におけるき裂発生が抑制されていることを示している。

【生体適合性】 細胞の初期接着（細胞播種後6h）を観察したところ、POSRではまだら状かつ平坦に細胞が接着しているのに対し、LELP試験片では全面に近い領域に細胞が接着しており、LELP施工により生体適合性が向上していることがわかった。また、LELPではレーザ照射痕の窪みに分散しているようであった。Fig. 2に、レーザ顕微鏡によるLELP施工面観察結果の一例を示す。レーザ照射面にはレーザアブレーションによって規則的な表面微細構造が形成されており、この微細構造が細胞接着に寄与していると考えられる。

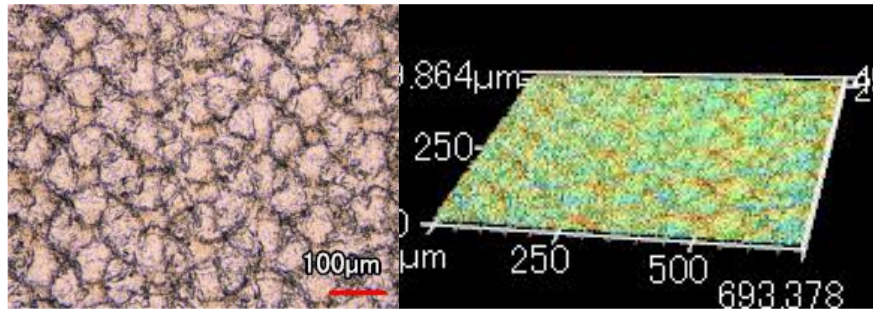


Fig. 2 An example of surface morphology of LELP surface observed using laser microscope.

以上のように、LELPを施工することで最大約10倍の疲労寿命の延伸が達成され、また、生体適合性の改善も見られた。本実験範囲内では、これらの特性向上はレーザ照射密度が1600pl/s/mm<sup>2</sup>の場合に確認されており、したがって、一工程のLELP施工により、疲労特性と生体適合性の両者が同時に向上できることが示された。

- ・共同研究者：本研究は、桃沢 愛准教授（東京都市大学理工学部医用工学科）と共同で実施した。
- ・謝辞：本研究は競輪の補助を受けて実施した。試験片へのレーザ照射および有益なディスカッションをしていただいた大阪大学産業科学研究所の佐野雄二博士、水田好雄博士、玉置悟司氏に謝意を表す。試験片の熱処理を行っていただいた（株）上島熱処理工業所の坂田玲瑩博士はじめ関係各位に謝意を表す。
- ・参考文献：
  - [1] 佐野雄二, ImPACT: 掌サイズの高出力パルスレーザによるモノづくりの革新、溶接学会誌, 第89巻第1号, (2020) 16-20.

#### 4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

本研究は高性能インプラント開発に向けた第一段階であり、今後、模擬生体環境下におけるLELP効果の確認などを経て、最終的には高性能かつ経済的なインプラントが開発できると考えている。これが実現すれば、患者は再手術の心配や過度な経済的負担無くインプラントが安心して利用できるようになり、また、口腔機能が維持できる結果、栄養摂取能力向上、咀嚼による脳の活性化と認知症抑制などにより、健康を維持し、食を楽しんだり仕事を継続できたりすることから生活の質 (Quality of life: QOL) の向上が可能となる。このように、超々高齢化社会における課題解決への貢献が期待される。

したがって、本研究は、少子高齢化が進行する現代社会において極めて大きな医療的・社会的波及効果をもたらすものと期待される。

## 5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

過去約30年間、主にX線や中性子等の量子ビームを用いた結晶材料の残留応力測定技術の開発、パルスレーザー照射による残留応力発生メカニズム、金属材料の疲労特性におよぼすパルスレーザー照射の影響などに関する研究を行ってきた（基礎研究フェーズ）。本研究では、それらの研究成果を総合的に活用して実機に適用し、具体的な成果を挙げることを目指している。したがって、本研究は研究歴の集大成としての社会実装フェーズに位置づけられる。

## 6 本研究に係わる知財・発表論文等

- 1) “Simultaneous improvement of fatigue strength and biocompatibility of Ti-6Al-4V by low-energy laser peening”, K. Akita, Y. Iino, K. Sugiyama, A. Momozawa, Y. Sano, Y. Mizuta, S. Tamaki, and T. Shobu, 11th European Conference on Residual Stresses: ECRS-11, June 3-8, 2024, Prague, Czech Republic. (*Keynote lecture*)
- 2) “低エネルギーレーザーピーニングによるTi-6Al-4V ELIの疲労強度および生体適合性の向上”、杉山恭介、佐野雄二、水田好雄、玉置悟司、菖蒲敬久、桃沢 愛、秋田貢一、第58回X線材料強度に関するシンポジウム講演論文集, 37-39, 2024年7月.
- 3) “Enhancement of Fatigue Strength and Biocompatibility of Ti-6Al-4V by Low-energy Laser Peening”, K. Sugiyama, Y. Sano, Y. Mizuta, S. Tamaki, T. Shobu, A. Momozawa, and K. Akita, 14th Asia-Pacific Conference on Fracture and Strength (APCFS 2024), Nov. 25-29, 2024, Matsue city Shimane pref. Japan.
- 4) “高輝度ラボX線および放射光X線を用いた低エネルギーレーザーピーニングによる残留応力の評価”、杉山恭介、佐野雄二、水田好雄、玉置 悟司、菖蒲 敬久、小西真晶、秋田 貢一、第61回X線材料強度に関する討論会講演論文集, 20-22, 2025年1月. (最優秀講演論文賞)

## 7 補助事業に係る成果物

該当なし

## 8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名：東京都市大学（トウキョウトシダイガク）

住 所：〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1

担 当 者：事務員 井利 彩香（ジムイン イリ アヤカ）

担 当 部 署：学術研究推進部 研究支援課

（ガクジュツケンキュウスイシンブ ケンキュウシエンカ）

E - m a i l : gaibushikin@tcu.ac.jp

U R L : <https://www.tcu.ac.jp/>

<http://sds1.mse.tcu.ac.jp/>