

レーザーピーニング処理による 脊柱固定ロッド材料の疲労強度向上

東京工業大学 工学院
准教授 青野 祐子

(2020 年度 一般研究開発助成 AF-2020217-B2)

キーワード：レーザーピーニング，疲労強度，CoCr 合金

1. 研究の目的と背景

脊柱側湾症や脊柱後湾症と呼ばれる、背骨が大きく湾曲する症例に対し、近年、生体親和材料である CoCr 合金や Ti 合金製のロッドを背骨に直接締結し矯正する整形外科手術が行われている（図 1）。この矯正術では、背骨の S 字カーブに沿うように締結するため、真直なロッド材を術中にオンサイトで背骨に合わせて曲げ加工し、そのまま体内へ設置している。このため、応力緩和処理などが施されていないので、ロッドには残留応力のある状態で使用される。更に体内のロッドには、日常生活において体重や運動による負荷が常にかかるため、術後数年以内に図 2 のように湾曲部を起点に体内で折損する事例が多い。これは、湾曲部の内側には曲げ加工により引張残留応力が存在する上に、上半身の前屈動作に併せてさらに引張応力が繰り返しかかることによる疲労破壊であると予想される。

そこで、筆者らは、この湾曲している脊柱固定ロッドの疲労強度向上のためにレーザーピーニング（LP）と呼ばれる表面処理を適用することを検討した。LP は、水中に設置した材料表面に短パルスレーザーを照射し、発生するプラズマの衝撃力により材料表面に圧縮残留応力を付与し疲労強度の向上や応力腐食割れ感受性の低減をはかる手法である。類似の手法であるショットピーニングと比較し、水とレーザーのみで実施可能であるため、クリーンかつ再現性の高い処理が可能なので、医療現場での応用や医療材料との親和性が高い。

本研究では、脊柱固定ロッドに用いられる CoCr 合金への LP の適用と、その効果を評価し明らかにする。さらに、

曲げ加工後の脊柱固定ロッドに LP を施し、疲労試験により提案手法の有効性を示す。

2. 実験方法

2・1 供試材

試料として、医療用に使用されている直径 6 mm の CoCr 合金ロッド（NuVasive 製）を使用した。組成は Co64%、Cr28%、Mo8% である。本研究では、CoCr 合金への LP 適用の基礎検討として応力測定、硬さ測定や耐摩耗性試験に平面試料も使用する。平面試料はこの丸棒をワイヤ放電で切断し高さ 5 mm の円柱形状に加工し、その加工断面を使用した。ワイヤ放電加工直後の断面は熱影響等による変質層が存在する粗面であるので、ダイヤモンドペーストによる機械研磨で仕上げた。

疲労試験用のロッドは、真直ロッドと湾曲ロッドを用意した。進捗ロッドは長さ 90 mm にカットした後、中央部をワイヤ放電加工で薄板にカットした。一方、湾曲ロッドは丸棒を約 45° に曲げ加工したものを使用した。

2・2 レーザーピーニング処理

レーザーは Q スイッチ Nd:YAG レーザ (Continuum Precision II 9100) の第二高調波 (波長 532 nm) を用いた。レーザー光はミラー 2 枚を経由し、レンズを介してレーザー光を試料表面に照射した。2 枚のミラーの内、1 枚に波長 532 nm 付近の光のみを反射するダイクロイックミラーを用い、同軸上に後方配置した CMOS カメラにより、試料表面を観察し、焦点および照射位置の調整を行った。また、

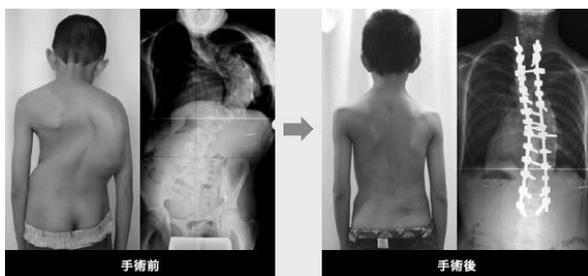


図 1 脊柱支持ロッド 2 本の埋込手術による
脊柱側湾症の改善 (参照: 慶應義塾大学病院 HP)

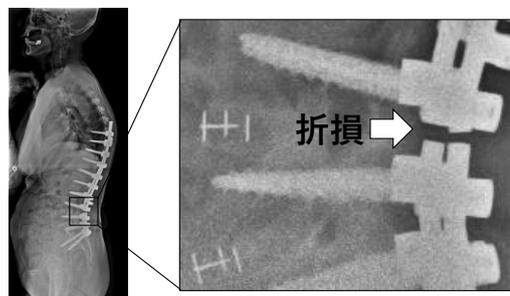


図 2 体内での折損症例。曲率が大きく、引張残留応力が高いと予想される背中側部分に、前屈姿勢による引張応力が繰り返し作用し、折損する (東邦大学病院提供)

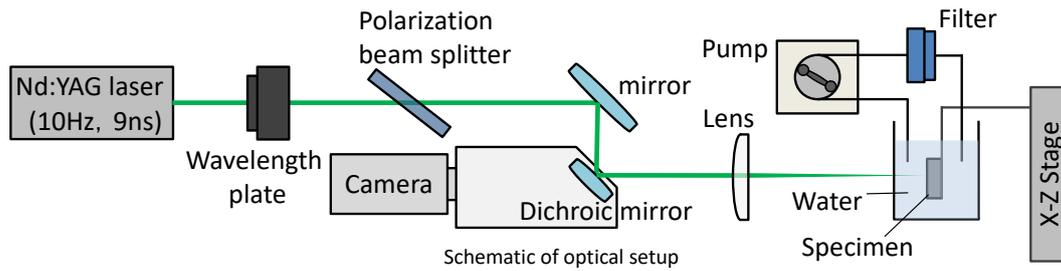


図3 レーザピーニング光学系

表1 レーザ条件

Wave length [nm]	532
Pulse duration [ns]	9
Reputation frequency [Hz]	10
Pulse energy [mJ]	50~200
Spot diameter [μm]	100

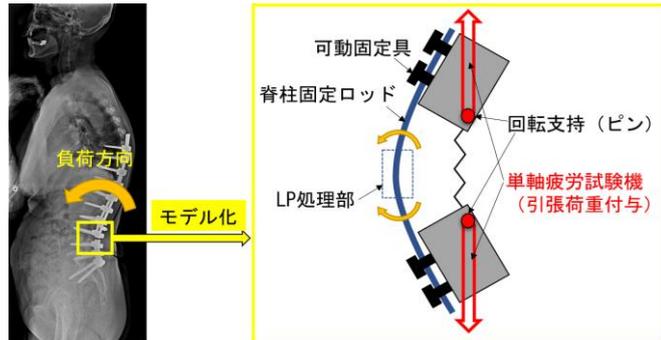


図4 湾曲ロッドの曲げ試験の概略図

低出力での出力調整のため、 $\lambda/2$ 波長板と偏光ビームスプリッターから構成したアッテネータを挿入した。

試料は二軸ステージに固定し、水中に設置した。レーザー照射中に試料を走査することで改質面を得た。LP の条件は表1 の通りである。出力と走査回数については各実験結果で言及する。また、丸棒や湾曲ロッドなど曲面へのLP では、曲面上の最もレンズに近い点を焦点位置として設定した。曲面では徐々に試料表面が焦点位置から離れることになるが、光学系の追従は行わず、デフォーカスを許容することとした。

2・3 湾曲ロッドの疲労試験

体内で湾曲ロッドが受ける負荷を模擬した疲労試験として、図4 に示す単軸疲労試験機に搭載可能な、湾曲したロッドを真直に戻す方向の曲げ応力を繰り返し与える装置を設計・製作し、疲労試験を実施した。疲労試験機に回転支持により接続したブロックへ、湾曲ロッドを固定し、引張荷重振幅を付与することで、湾曲ロッドに曲げモーメントが作用する。

3. 実験結果

3・1 残留応力⁽¹⁾

CoCr 合金の残留応力測定には、X 線回折装置(XRD: Bruker AXS 製 D8 DISCOVER)を用いた。2 次元 X 線検出器および Cu-K α 線を用い 2D 法により残留応力値を計測した。

パルスエネルギーを変更したときの圧縮残留応力を図 5

に示す。LP 処理により最大約 200MPa 程度の圧縮残留応力が付与された。走査回数は 5 回程度で効果は飽和し、それ以上の圧縮残留応力の付与は見られなかった。これは、効果層の深さに限界があり、それ以上のレーザー照射ではアブレーションによる表面除去と効果層の深化がバランスするためと考えられる。同様に、パルスエネルギーについても 100 mJ 程度で効果は飽和しており、それよりも大きいエネルギーを与えると、表面への熱影響が大きくなることにより残留応力値のばらつきが大きくなる傾向が見られた。

3・2 硬さ⁽¹⁾

マイクロビッカース試験機(Akashi 製 HM124S)を用い、LP 処理前後でのビッカース硬さを測定した。LP 後の試料には熱影響層があるため、最表面を研磨後に試験を行った。押し込み荷重は 0.5 kgf、保持時間は 15 s とした。また、各条件について 4 点の硬さを測定し、その平均を算出した。

パルスエネルギーを 50 から 100 mJ まで変えて測定した結果を図 5 に示す。エネルギーが高くなるに従い、ビッカース硬さも高くなり、最大で約 450 HV の硬さ向上が見られた。走査回数については、10 回程度で向上効果は飽和が見られた。これは残留応力測定と同じ傾向である。

さらに、硬さ向上の効果層深さを分析するために、ナノインデント測定を行った。深さ分析は表面から約 200 μm まで、電解研磨で都度表面を除去しながら測定することで実施した。ナノインデントの荷重は 100 mN、このときの圧痕深さは約 1 μm であり、十分な深さ方向分解能

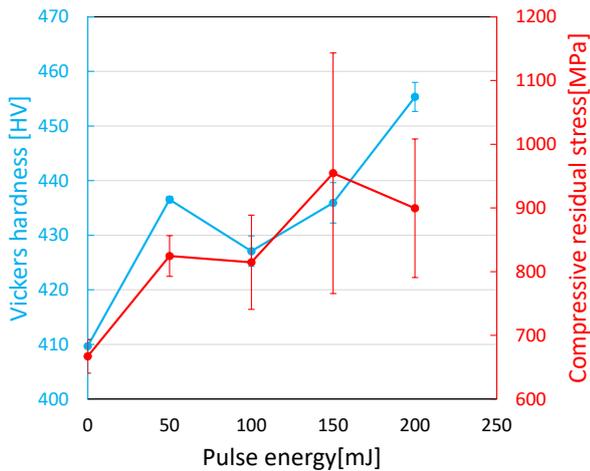


図5 圧縮残留応力と硬さ

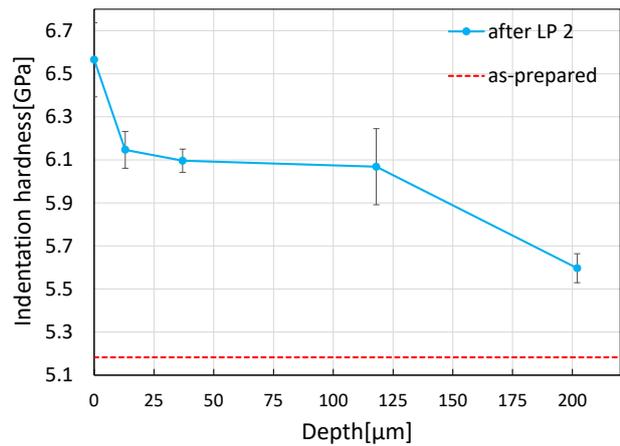


図6 硬さの深さ方向分析

を有すると判断した。

200 mJ, 10 回走査で LP を行った表面の深さ方向分析の結果を、図 6 に示す。表面から深さ 10 μm 程度までで急激に硬さは低下しているが、その後は硬さの変化は緩やかである。今回分析した最大深さである 200 μm の時点でも、母材よりも高硬度を維持していることを明らかにした。この結果から、本手法では数百 μm にわたって効果層が得られることが示唆された。

3・3 耐摩耗性

CoCr 合金は脊柱矯正ロッド以外にも、人工関節などでも用いられる材料である。また、ロッドの固定部でも、摩耗が問題になる。LP 処理により、残留応力の付与とともに硬さも大きく向上したことから、耐摩耗性についても評価を実施した。

耐摩耗性は、振動摩擦摩耗試験機 (SRV) により行った。SRV では、球形のプロープに荷重を印加し基板に接触させた状態で高速に直線往復運動を行う装置である。本研究では、体内を模擬し、生理食塩水内で試験した。また、プロープ材料にアルミナ球を用い、基板を評価対象の CoCr 合金とした。面圧 275 MPa, 振動振幅 1 mm, 20 Hz で 1200 s の摺動を行った後、摩耗痕をレーザ顕微鏡により評価した。評価は、硬さが約 50 HV 向上した 200 mJ で 10 回の LP を実施した試料と、参照として未改質試料を用いた。

図 7 にレーザ顕微鏡で測定した、摩耗長さおよび深さの結果を示す。摩耗痕の最大深さは約 20%, 摩耗幅は約 10% の減少が観察され、LP により耐摩耗性が向上することを明らかにした。

3・4 三点曲げ疲労試験

三点曲げ疲労試験は、上述の通り、丸棒の表面をワイヤ

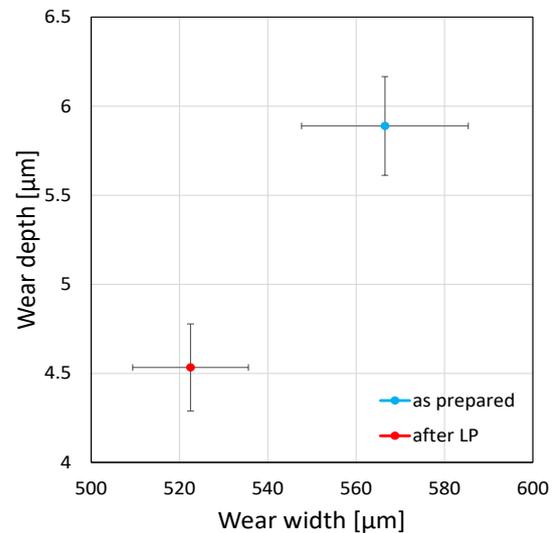


図7 SRV 試験後の摩耗深さおよび摩耗幅

放電加工により平面化した試料で実施した。LP は荷重印加部の反対面に施した。これは、三点曲げでは印加部の裏側に引張応力がはたつき、疲労破壊の起点となることを抑制するためである。LP 条件は 200 mJ, 6 回とした。また、荷重は正弦波で与え、はりに働く曲げ応力の最大値が引張強さの 80% 程度となるように荷重を設定した。応力比を 0.1 とし、周波数 10 Hz で実験を行った。

LP 未処理の試料と処理後の試料でそれぞれ実験したところ、疲労寿命は約 60% 向上がみられた。この結果から、LP により CoCr の疲労寿命向上が可能であることを明らかにした。

3・5 湾曲ロッド疲労試験

次に、実際の脊柱固定の状況を模擬し、湾曲ロッドに対

して疲労試験を実施した。約 45° の曲げ加工を実施し、湾曲部内側には塑性変形に伴い引張残留応力が生じることを確認した。そこで、湾曲部内側に 200 mJ、6 回の条件で LP を実施し、2・3 節の方法で疲労試験を実施した。有限要素解析より、疲労試験機の軸方向に与える引張荷重が 500 N のとき、湾曲部内側では最大約 1300MPa の曲げ応力が発生する。これは、引張強さと同程度となるが、実際にはこの荷重以下では破断まで長時間を要したため、この最大荷重を選択した。これは、実際には回転支持部やロッドの固定部での減衰があり、有限要素解析での見積よりも曲げ応力が小さくなっていたためと考えられる。

疲労試験の引張荷重を 500 N、荷重比を 0.1、5 Hz で試験を実施した。その結果、LP 未処理材に比べ、疲労寿命は約 2 倍まで向上が見られた。これは、提案手法の有用性を示唆している。

4. 結 言

本研究では、脊柱固定用ロッドの疲労強度向上を目的として、その代表的な生体適合材料である CoCr 合金に対しレーザーピーニングによる表面処理の適用を提案し、残留応

力、硬さ、耐摩耗性、疲労強度の観点から評価を実施した。

その結果、レーザーピーニングにより圧縮残留応力の付与と硬さの向上を確認した。これらの効果により、耐摩耗性と疲労強度の向上が図られた。さらに、脊柱固定用ロッドの実際の使用状況をモデル化した、湾曲ロッドに対するレーザーピーニングと疲労強度評価を行い、未処理材の約 2 倍の疲労寿命を達成した。

謝 辞

本研究の実施に多大なご支援をいただいた、公益財団法人天田財団に御礼申し上げます。また、東邦大学医学部和田明人教授には、試料提供や医学的知見からアドバイスをいただきました。疲労試験の実施には、東京工業大学轟章教授、黒川悠助教にご支援いただきました。

参考文献

- (1) 王 胤, 山田 悠太, 王 迪, 黒川 悠, 平田 敦, 和田 明人, 青野 祐子 “レーザーピーニングによる医療用 CoCr 合金の表面硬さと摩耗特性向上” 機械材料・材料加工技術講演会講演論文集, 2020, 28 巻, p. 157.