

ハンドヘルドレーザーによる高張力鋼溶接継手の疲労強度向上

大阪大学 産業科学研究所 量子ビーム物理研究分野

特任助教 水田 好雄

(2020年度 奨励研究助成(若手研究者枠) AF-2020239-C2)

キーワード：レーザーピーニング，ハンドヘルドレーザー，高張力鋼

1. 研究の目的と背景

レーザーピーニング(以降LPと記載)は、水や塗膜等で覆われた材料に高出力パルスレーザーを照射した時の衝撃力を利用し、材料表面に圧縮残留応力を形成する技術である。LPの特徴は、厳密な施工管理が可能な点や材料へ深い圧縮残留応力を付与することが出来る点である。これは、他のピーニング技術と比べて優れた特徴であり、材料表面に発生する応力腐食割れや疲労亀裂の抑制に高い効果を示すことが知られている^{1),2)}。さらに、LPは溶接部の疲労強度改善に優れた効果を持ち、これは「溶接部の疲労強度が小さい」という高張力鋼の欠点を補い、高張力鋼を使用するメリットが発揮できる³⁾⁻⁶⁾。LPは材料表面の改質において高い潜在能力を持っているが、使用する高出力レーザーはクリーンルーム等の設備が必要であり、装置も大型で温度や湿度管理などの運用条件も厳しい。このことよりLPの使用は、ジェット機のエンジン・ファンブレードの高サイクル疲労対策や原子炉構造物の応力腐食割れ対策などへの適用に限られていた。

小型で取り扱いが容易なハンドヘルドレーザー^{7),8)}をLPの光源として使用することが出来れば、工場における生産工程だけではなく上記理由より従来のレーザーでは適用が困難であった、橋梁等の既存の鋼構造物への適用が現実的となる。

本研究では、ハンドヘルドレーザーを使用したLPの成立性確認と高張力鋼(HT780)溶接継手の疲労強度に対するLPの効果確認を目的とした。

2. 実験方法・装置の特徴

2-1 ハンドヘルドレーザーを搭載したLP実験装置

本研究では、高出力のハンドヘルドレーザー(分子科学研究所が開発^{7),8)})をロボットアームに搭載することで、屋外などでも作業可能かつ3次元構造にも対応可能なLP装置の開発・検証を行った。図1にロボットアームを用いたLP装置の外観を示す。LP装置は6軸のロボットアームの先にハンドヘルドレーザーが搭載されており、電源装置及び水循環系とハンドヘルドレーザーを励起するためのレーザーを伝送する光ファイバー、装置を制御するPCで構成されている。ロボットアームは使用時に安全柵等の必要がない人協働ロボットが採用されている。1m×0.5mの台に収まる程度のコンパクトかつポータブルな装置である。また、各部分に分解することで、スーツケース2~3個に収納・持ち運びが可能となる(図2)。

従来のLPでは、パルスエネルギーが0.1~10Jと大きく、さらにパルス幅が数ns~数十nsと長いため、最適なLP施工条件を逸脱するとレーザー照射による熱影響が支配的になり金属表面にマクロな融解が生じることがある。このため、金属表面が引張応力状態になり、結果的に材料の脆化やき裂の起点となる可能性があった。今回使用したハンドヘルドレーザーのパルスエネルギーおよびパルス幅はどちらも従来のLP用レーザーの1/10以下であり、金属表面に与える熱影響は格段に小さくなる。このためハンドヘルドレーザーを使用したLPでは上記のような悪影響の可能性は極端に低いものと考えられる。



図1 ハンドヘルドレーザーをロボットアームに搭載したLP装置外観



図2 LP装置の梱包

2・2 高張力鋼 HT780 への LP 実験

実験に使用したハンドヘルドレーザの条件を表 1 に示す。また、実験の様子を図 3 に示す。

表 1 実験条件

パルスエネルギー [mJ]	照射スポット 径 [mm]	照射パルス密度 [pulse/mm ²]	カバレージ	パルス幅 [ns]	繰り返し [Hz]
7.5	0.42	100	14	1.3	100
		200	28		
		400	55		
		800	110		
		1600	221		
7.7	0.49	100	19	1.3	100
		200	38		
		400	76		
		800	153		
		1600	305		
8.0	0.58	100	26	1.3	100
		200	52		
		400	104		
		800	208		
		1600	415		
8.0	0.68	100	36	1.3	100
		200	72		
		400	143		
		800	286		
		1600	573		

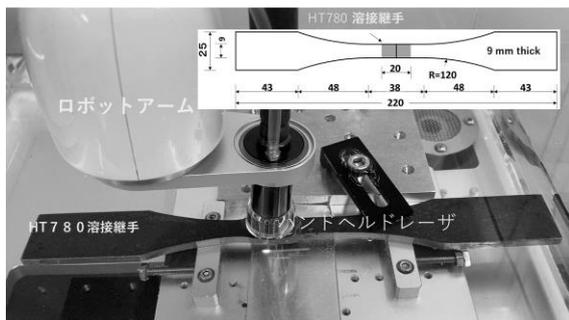


図 3 高張力鋼 HT780 溶接継手への LP の様子

使用したハンドヘルドレーザは、波長 1064 μm 、パルス幅 1.3 ns、照射パルスエネルギー 10 mJ、繰り返し周波数 100 Hz であった（ただし、1064 μm の光は水により吸収されるため実際の照射パルスエネルギーは表 1 のようになる）。実験においてはまず、HT780 平板試験片に LP を行い、条件出しの後に、溶接継手への施工を行った。表 1 より、各照射スポット径において照射パルス密度を 100, 200, 400, 800, 1600 pulse/mm² に変化させて実験を行った。

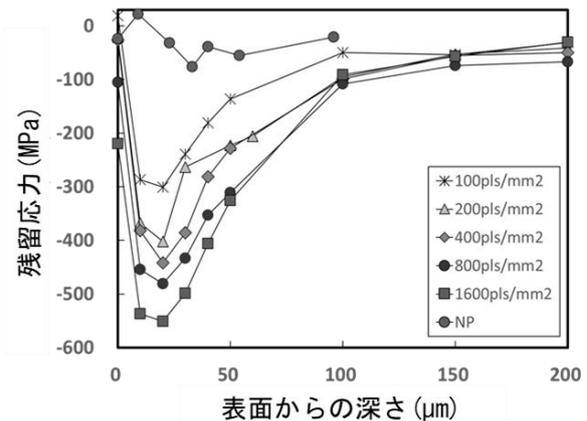
3. 研究成果

3・1 高張力鋼 HT780 への残留応力改善効果の確認

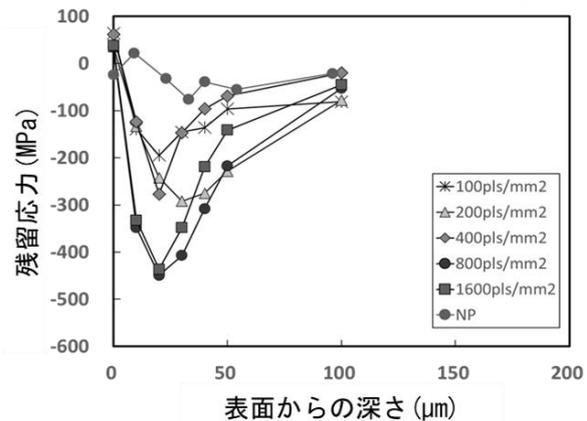
LP 済み高張力鋼 HT780 の残留応力測定は X 線回折装置を用いて行った。使用した装置はパルステック工業株式会社製の μ -X360s (cos α 法, Cr-k α 管球, コリメータ径 Φ 1.0 mm) である。残留応力の深さ方向分布は、電解研磨と X 線回折による測定を交互に繰り返すことにより推定した。また、LP 未処理の材料に対しても同様に測定を行い、結果を比較・評価した。なお、実験に用いた HT780 表面はミル

スケール（黒皮）で覆われているため、安定した残留応力の測定が得られない場合があった。電解研磨や黒皮除去剤等によりミルスケールを取り除いた状態で測定を行うことで安定した測定結果が得られた。

LP 済み HT780 平板試験片の残留応力深さ分布測定結果の一部を図 4 に示す。図 4 (a) は、レーザスポット径 0.49 mm、図 4 (b) は、レーザスポット径が 0.68 mm の時の結果である。



(a)



(b)

図 4 残留応力深さ分布測定結果 (a) 照射レーザスポット径 0.49 mm, (b) 照射レーザスポット径 0.68 mm

実験結果図 4 (a) より、照射パルスエネルギー 7.7 mJ のレーザを集光径 0.49 mm、照射パルス密度 1600 pulse/mm² で材料に照射した結果、残留応力のピークは -551 MPa で深さ約 200 μm まで圧縮残留応力が形成されることが分かった。また、照射パルス密度が大きくなるほど材料に付与される残留応力が大きくなることが分かった一方、パルスエネルギー 8.0 mJ、照射スポット径 0.68 mm の条件では残留応力のピークは -449 MPa、深さは 100 μm 程度までしか達しないことが分かった。

さらに、同じ照射パルス密度においてスポット径の違いによる比較を行った例を図 5 に示す。

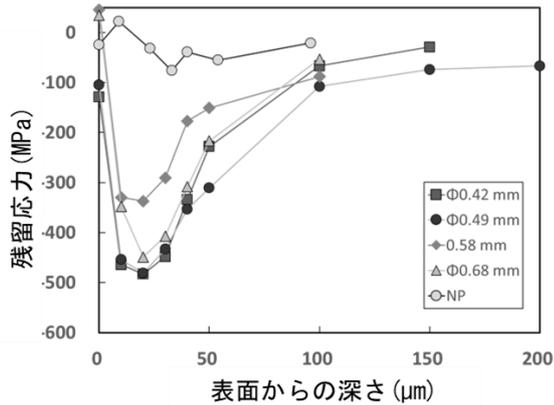


図5 残留応力深さ分布測定結果(スポット径による比較, 照射パルス密度 800 pulse/mm²)

図5より, 照射スポット径が0.49 mmの時に最も深く(約200 μm)まで残留応力が付与されていることが分かった。

3・2 高張力鋼 HT780 溶接継手の疲労試験結果

LP 施工の効果の有無を確認するため, LP 済み高張力鋼 HT780 溶接継手の引張疲労試験を行った。試験には, パルスエネルギー7.7 mJ (パルス密度 800 pulse/mm²)にて施工した材料を用いた。表2に疲労試験の条件を示す。また, 図6に疲労試験の様子を示す。さらに, 図7に疲労試験の結果を示す。

表2 疲労試験の条件

応力範囲	応力比	载荷周波数	打ち切り限界
200~300 MPa	0.1	20 Hz	10 ⁷



図6 疲労試験の様子

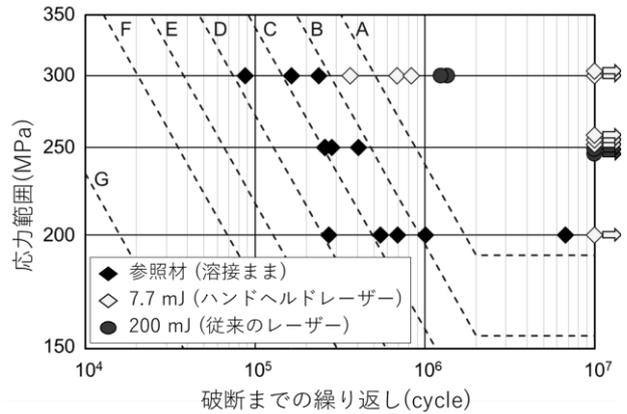


図7 疲労試験結果⁵⁾

図7より, 応力範囲 200 MPa および 250MPa において, ハンドヘルドレーザーにより施工された試験片は, ほぼすべてが打ち切り限界 (10⁷ cycle) に達し, 従来のレーザー (YAG レーザ 200 mJ) と比べても遜色のない結果が得られた。また, 応力範囲 300 MPa の場合には, 打ち切り限界まで達しないものがあり, 結果が安定しないことが分かった。

図8に疲労試験後の溶接継手の一部を示す。

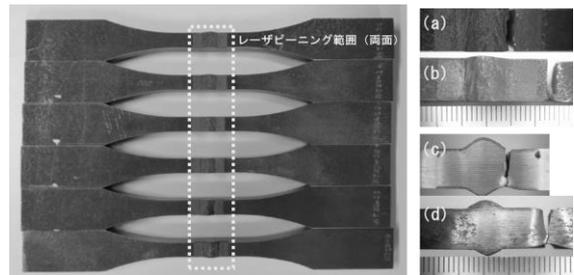


図8 疲労試験後の溶接試験片

通常は, 図8(a), (c)に示すように溶接止端部から破断するが, LP 施工後の一部は図7(b), (d)のようにLP 施工部と未施工部の境界付近で破断するものもあり, これはLP により, 溶接止端部や熱影響部が強化されたものだと考えられる。

4. 結論

本研究では, LP の適応範囲の拡張を目指し, ハンドヘルドレーザーを使用したLP の成立性確認と高張力鋼 (HT780) 溶接継手の疲労強度に対するLP の効果確認を目的とした実験を行った。以下に, 本研究における成果および得られた知見を示す。

- (1) ハンドヘルドレーザーをロボットアームに搭載したLP 装置の開発と検証を行った。
- (2) 最大出力 10 mJ 級のハンドヘルドレーザーを搭載したLP 装置を用いて高張力鋼 HT780 平板試験片への条件出し実験を行い, 照射パルスエネルギー 7.7 mJ, 照射スポット径 0.49 mm, パルス密度 1600 pulse/mm²の時に残留応力のピークは-551 MPaで深

さ約 200 μm まで残留応力が形成されることが分かった。

- (3) 照射スポット径を(2)の場合より大きくした 0.68 mm の条件では残留応力のピークは-449 MPa, 深さは 100 μm 程度までしか達しないことが分かった。
- (4) LP 済み高張力鋼 HT780 溶接継手の引張疲労試験を行い, 応力範囲 200 MPa および 250MPa において, ハンドヘルドレーザにより施工された試験片は打ち切り限界の 10^7 に達した. この結果は, 従来のレーザ(YAG レーザ 200 mJ)を使用した場合とほぼ同等の疲労特性改善効果であった。
- (5) 以上より, ハンドヘルドレーザを使用した LP による高張力鋼(HT780)溶接継手への残留応力および疲労強度の改善の可能性を示すことができた。

謝 辞

本研究は公益財団法人天田財団の 2020 年度奨励研究助成(若手研究者枠) AF-2020239-C2 を受けて, 実施されたものであり, ここに厚く謝意を表します。

本研究の遂行にあたり, たくさんのご協力をいただきました, 近畿大学の崎野良比呂教授, 加藤智治氏, 分子科学研究所の平等拓範特任教授, 大阪大学産業科学研究所の玉置悟司氏に感謝いたします。また, 実験装置及び環境を提供していただきました, 大阪大学産業科学研究所の細貝知直教授に感謝いたします。

実験に使用したハンドヘルドレーザをご提供いただきました, 株式会社ユニタックの高橋一哲代表取締役社長, 横藤田光輝氏に感謝いたします。最後に, 研究に関するすべてにおきましてご助言・ご指導をいただきました, 大阪大学産業科学研究所の佐野雄二特任教授に感謝いたします。

受 賞

2022 年度日本機械学会機械材料・材料加工部門部門一般表彰(優秀講演論文部門)

参考文献

- 1) Clauer, A.H., Metals, Vol.9 (2019)
- 2) Y. Sano, Metals, 10, 152 (2020)
- 3) 崎野良比呂, 佐野雄二, 角谷利恵, 金裕哲 (2011), 溶接学会論文集, vol.29, pp.146-153.
- 4) Kato, T, Sakino, Y. and Sano, Appl. Mech., Vol.2 (2021)
- 5) Yuji Sano, Tomoharu Kato, Yoshio Mizuta, Satoshi Tamaki, Koki Yokofujita, Takunori Taira, Tomonao Hosokai, Yoshihiro Sakino, Forces in Mechanics 7 (2022)
- 6) 水田好雄, 細貝知直, 政木清孝, 加藤智治, 崎野良比呂, 玉置悟司, 佐野雄二, 日本機械学会 2022 年度年次大会講演論文集, F041-05 (2022)
- 7) L. Zheng, Kausas. A. and Taira T, Opt. Exp, **27** (2019)
- 8) Taira T, Opt. Mater. Express, Vol.1, No.5 (2011)