

連続波レーザー照射による素地調整の可能性

— レーザー施工研究会による安全と人材育成の取組も含めて —

○藤田和久¹⁾, 貝沼重信²⁾, 清水尚憲³⁾

1. はじめに

塗装塗替え時の素地調整では、再発錆抑止のための除塩という大きな課題がある。これに対し高温状態の生成による塩の蒸発除去の手段として、新たにレーザー技術による研究が最近盛んに行われるようになり、いくつかの種類レーザー装置についても試みがなされてきている。

本稿では、研究報告の多い連続波レーザー照射による素地調整について、その可能性を明らかにするものである。最初に、連続波レーザー照射手法の概要としてパルスレーザーとの違いを含めて紹介する。次に、熱影響に対する取り組みの流れとして、電動工具との併用手法、およびレーザー単体手法による素地調整の品質についてそれぞれ述べる。さらに、高力ボルト軸力への影響評価など、実利用に向けた研究を紹介する。合わせて、新しいパワーツール導入にあたっての安全確保と人材育成について、(一社)レーザー施工研究会の取り組みに触れ、施工事例についても紹介するものである。

2. 連続波レーザー照射による素地調整

2.1 レーザー照射による表面除去とレーザーの種類

レーザーによる素地調整の基本原則として、レーザー照射による表面除去のしくみを図1(a)に示す。この方法はレーザー照射の加熱により表面層の蒸発除去を基本としている。加えて、加熱・蒸発部分の高い圧力により周辺の冷たい部分も一部破砕され、微粒子となって飛散して除去される部分もある。この場合、表面層を加熱して必ずしも沸点を越す必要はないが、少なくとも熔融状態が必要である。さらにレーザー照射の条件により、沸点を遥かに超えて電離気体(プラズマ)にまで加熱して除去するケースもある。

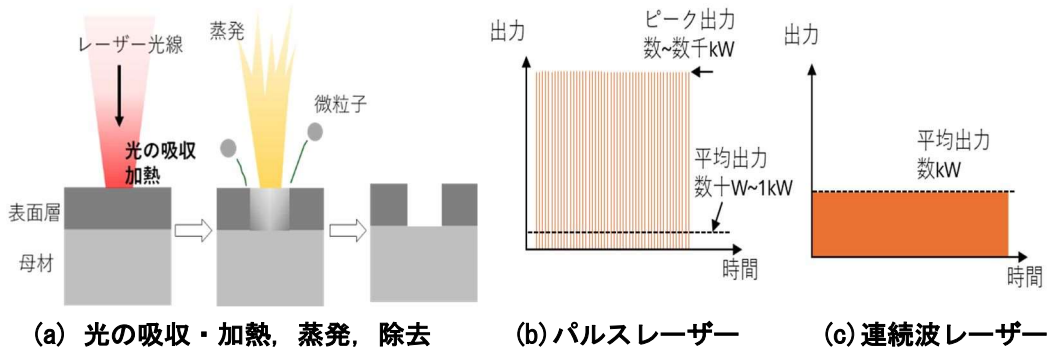


図1 レーザー照射による表面除去のしくみ(a)とレーザーの種類(b)(c)

電動工具や研削材照射などによる機械的除去、剥離剤などによる化学的除去に対し、レーザー照射による熱加工技術は、照射する光をエネルギー源とする熱的除去と位置づけることが可能であり、この技術は金属の切断や溶接といった生産技術として広く用いられ、表面層の除去であるレーザークリーニングも70年代からの歴史がある。

レーザークリーニング装置では、パルスレーザー(図1(b))と呼ばれる断続的に(1秒間に数十から数千回)繰返し強いレーザー光を出力するものが広く用いられてきた。瞬間ではあるがとても強い光(ピ

1) 光産業創成大学院大学

〒431-1202

静岡県浜松市中央区呉松町 1955-1

2) 九州大学大学院

〒819-0395

福岡市西区元岡 744

3) 労働安全衛生総合研究所

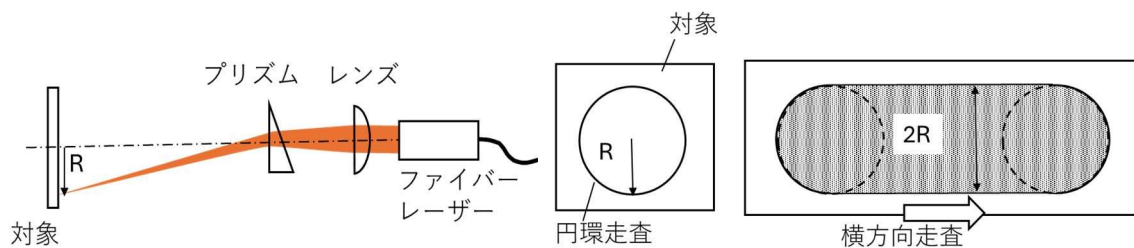
〒204-0024

東京都清瀬市梅園 1-4-6

ーク出力が高い) の照射により瞬間的な昇温加熱が可能で、断続照射であるため冷却時間の確保により過熱を抑えられる特徴がある。光の吸収が良く熱に弱い薄い層が、熱に強い金属母材の上にある場合には、母材への影響が少ない表面除去がより効率的に可能となる。例えばゴムタイヤの金型表面に付着した薄い黒色ゴムの除去が挙げられる。レーザー光の波長は、装置(主にヤグレーザー)の技術・費用の制約により概ね 1064nm が多く、近赤外領域の不可視光である。

これに対し、連続波レーザー(図 1(c))は平均出力を高くとることが容易であり、より多くの体積を除去対象とする場合、より多くの単位時間当たりの光(平均出力が高い)を供給できることから威力を発揮するものの、過熱が金属表面の酸化を招きやすいとも考えられていた。見込まれる除去性能のメリットを活かすべく、厚くて硬い錆層の除去や除塩への利用、および表面酸化の影響低減や粗さ付与も含めた素地調整確立への試みが、ここ数年で大きく進展してきている¹⁾。レーザー光の波長は、パルスレーザーとは異なる装置(ファイバーレーザー)ではあるが、技術・費用の制約により概ね 1070~1080 nm が多く、同様に近赤外領域の不可視光である。

本稿で用いた連続波レーザーは、集光したレーザー光を円環状に高速走査する方式²⁾により、除錆・除塩を試みている。図 2(a)はその円環状に走査する手法を示している。一般に光学系はガラスレンズといった繊細な部品を精緻に配置した精密機械であり、施工において堅牢な構造となるよう、光を屈折させるプリズムを中心軸(図中一点鎖線)まわりに回転させる走査機構の採用が特徴である。円環走査は走査速度を一定にでき、安定した入熱により除去性能の安定化も可能となる特徴もある。この円環走査ができる機構を手で保持し、一定の方向に走査すれば面の処理も可能となる(図 2(b))。



(a) 円環走査のしくみ(プリズムの回転)

(b) 円環走査と横方向走査の組合せによる面処理

図 2 レーザーの円環走査(a)と横方向走査との組合せ(b)

以下の各研究では、この円環走査と一方向走査の組合せが用いられている。ただし、レーザー出力をはじめとする照射条件は開発の進展に伴って変化しており、詳細は各参考文献を参照されたい。

2.2 追加手段を付加した素地調整の試み

レーザー照射による除錆に伴って表面に形成される酸化膜の問題について、追加手段による除去や、形成を回避する手段の導入検討がそれぞれ行われている。前者では、ディスクサンダー等の電動工具による追加工³⁾、その結果をうけて、表面粗さを維持するためのカップワイヤー追加工⁴⁾の利用可能性が検討されている。後者では、レーザー照射箇所を水で覆うことで到達温度を低下させ酸化を回避する手法が提案⁵⁾されている。以下、これら三つの研究について紹介する。

一つ目は、電動工具を用いた追加工による酸化膜除去効果の検討である³⁾。出力 2kW の CoolLaser システムを使用して、除錆と同時に酸化膜が形成される条件で錆鋼材の表面を処理したのちに電動工具による追加工により素地調整し、橋梁で使用される Rc-I 重防食塗装の後、腐食耐久性試験(土研式)を実施している。レーザー照射後にディスクサンダーで追加工した場合、ブラスト処理した鋼板と同等の耐久性が得られ、レーザーと電動工具の組み合わせ手法の有効性が示されている。ただし、追加工により表面の粗さが小さくなるという課題が明らかになった。

二つ目は、その結果を受け、表面の粗さを保ちながら酸化膜を除去するため、レーザー照射後のカップワイヤー追加工の効果である⁴⁾。この実験では 3kW の CoolLaser システムを用い、前述の実験と同様に照射面全面に酸化膜を形成させる条件とした。追加工なしの試験片では土研式 150 サイクル付近より Rc-I クロスカット部からの膨れが見られたものの、追加工ありの試験片では 300 サイクルでも変化が見

られなかった。追加工後の試験片表面における酸化膜の残留面積割合は 8%であったことから、本追加工条件下では、少なくともこの程度の残存度であれば問題はない可能性が示唆されている。さらなる長期間試験や実際の鋼構造物を想定した試験が重要である。

三つ目は、レーザー照射による高温の影響を水の導入によって減少させるウェットレーザークリーニング (WLC) の検討である⁵⁾。出力 3kW の CoolLaser システムが用いられた。サンプルは鹿児島市の海岸近くで 41 年間のばく露を経た構造物から取り出されたひどく腐食した鋼材で、ダイヤモンドディスク電動工具により最も外側の緻密な錆層を除去する前処理を行った。

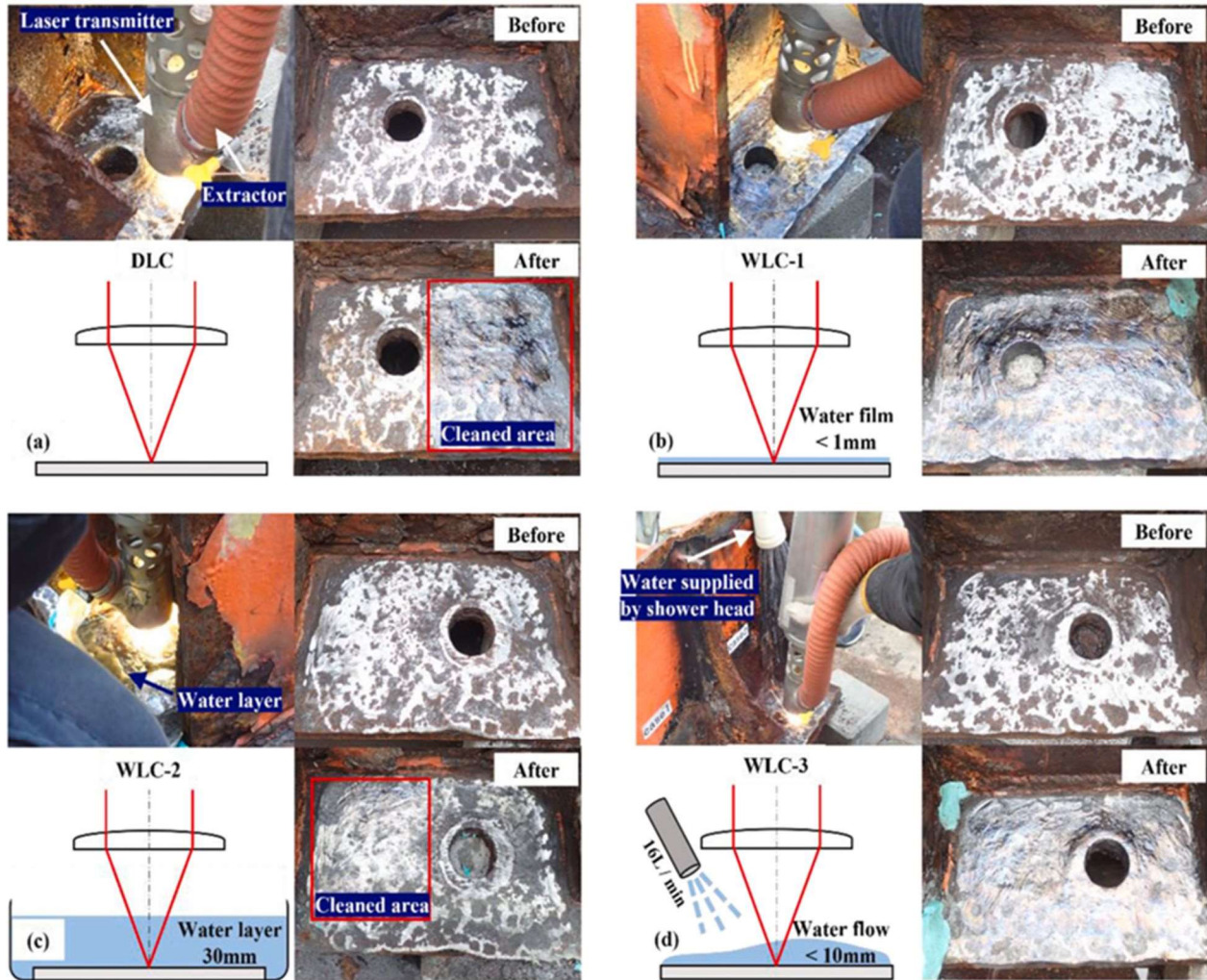


図 3 従来のドライレーザークリーニング (DLC) とウェットレーザークリーニング (WLC) 3 種の比較 (文献 5 より転載許諾済)

表 1 DLC, WLC, ガーネットブラストとの結果比較 (文献 5 から著者作成)

手法	効率 (m ² /h)		再腐食面積	表面粗さ (μm)		色
	理論上	実際		Ra	Sa	
ガーネット ブラスト	15-30	0.72	<5%	13.6	15.3	灰色, 艶消
DLC	0.84	1.20		11.8	12.3	黒と青 真珠光沢
WLC-1		1.07		17.3	19.5	青, 真珠光沢
WLC-2		1.23		8.03	8.11	黄色
WLC-3		0.95	~30%	14.3	15.3	真珠光沢

WLC はさらに次の 3 つの方法とした。WLC-1 (浸漬) は処理前に深さ 1mm 以下の水膜を形成し (図 3(b)), WLC-2 (浸水) は深さ 30 mm の水層に浸し (同(c)), および WLC-3 (水流) は連続的に水を供給するものである (同(d))。従来のドライレーザークリーニング (DLC) (同(a)) やガーネットブラスト処理とともに清浄度や処理速度を比較した。処理前後の表面形状と化学組成については、三次元デジタル顕微鏡, レーザー共焦点顕微鏡, 走査電子顕微鏡-エネルギー分散型 X 線分光計 (SEM-EDX) を使用してそれぞれ分析した。その結果を表 1 に示す。

DLC では、腐食生成物や塩分が効果的に除去され、再腐食時間を延長できるものの、レーザー照射による高温の影響である酸化膜の形成が確認された。WLC はレーザー照射による高温の影響を低減できた。中でも、深さ 1mm 以下の水膜を利用する WLC-1 (浸漬) が特に優れ、除去対象物が少ない水と共に吹き飛んでいる効果をもたらしていると考えられ、少ない水量でよいことから実用上有用である可能性が見出されている。

WLC-2 (浸水) や WLC-3 (水流) でも高温抑制効果や除去効果は確認できるものの、表面からの剥離物の再付着による再汚染が問題となる可能性がわかった。清浄度は DLC および WLC いずれも、ブラストと同じ Sa 2.5 から 3 程度であった。

処理効率については、DLC がガーネットブラストよりも 50%以上効率がよい 1.2m²/h であった。WLC でもガーネットブラストより効率的であった。前処理との組合せが有効である示唆と考えられる。

これらの追加手段の検討に先立ち、照射表面から深さ方向への温度分布推定⁶⁾も検討されている。その他として鋼材への熱影響⁷⁾や重防食塗料の付着性や腐食抵抗性⁸⁾も調べられており、上記の対策や次節のレーザー単体の試みのための基礎理解を深めるための情報が提供されている。

2.4 レーザー照射のみの試み

追加工を必要とせずに、レーザー照射のみを用いて耐久性を確保する研究が報告されている⁹⁾。

この研究では、出力 6kW の CoolLaser システムを用いて、酸化膜形成を抑制する条件にて素地調整を行った。試験片は SS400 (150×70×6.0 mm) で、グリットブラスト処理の後、塩水噴霧試験機により腐食鋼材とし、素地調整の対象とした (図 4 左)。レーザー照射後の表面は金属光沢を示しており、比較対象のブラスト処理と同様、Sa 2 1/2 (JIS Z 0313) であった (図 4 中央および右)。表面の残留塩分濃度はサンコウ電子研究所製 SWT-9000 で計測し、平均 7.1mg/m² (N=5) と鋼道路橋・防食便覧にある基準値 50mg/m² 以下を満たしている (図 5)。表面粗度はミツトヨ製 sj-210 で計測し、Rz_{JIS} で平均 44.5μm (N=30) で同基準値 80μm 以下を満たしている (図 6)。



処理前腐食鋼材 レーザー処理後 ブラスト処理後

図 4 SS400 試験片写真⁹⁾

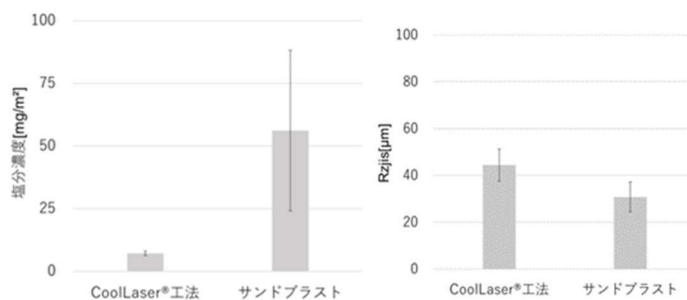


図 5 残留塩分濃度⁹⁾

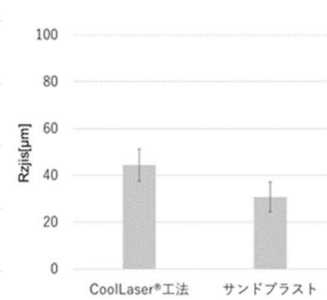


図 6 表面粗度⁹⁾

塗膜の耐久性評価は、防錆塗料の有機ジンクリッチ単層、および Rc-I 重防食塗装の二種類について別々に実施した。素地調整後 4 時間以内に塗装し、適切な養生期間を設けて、JIS K 5600-5-6 で指定された手法に従ってクロスカットを施した。ジンクリッチ単層に対しては JIS Z 2371 の中性塩水噴霧試験、Rc-I に対してはサイクル D 法の複合サイクル試験をそれぞれ N=5 で行った。

図 7 にジンクリッチ単層に対する塩水噴霧試験の試験片の典型例を示す。クロスカット周辺部に異常な膨れや起伏等などは確認されず、ブラスト処理と同様であった。Rc-I の複合サイクル試験についても

発表時点の 200 サイクルまで良好であることが報告されている。前述までは出力 3kW までで、今回は二倍の 6kW である。熱入力として大幅に増加しているにもかかわらず、照射条件を工夫することにより対象物への熱影響が逆に低減して酸化膜形成が抑制されていることになる。簡単な理解としては、熱加工による除去に貢献するエネルギーの割合を高め、除去に貢献しない加熱するだけのエネルギー成分を低める条件を見出したということであろう。このようにレーザー加工技術は、高い制御性というメリットがある一方、専門性も高く参入が難しいというデメリットを持つとも捉えることができる。

2.5 高力ボルト軸力への影響評価

連続波レーザーの照射による熱影響については、鋼構造物への適用にあたり、上述の酸化膜形成などの照射表面における影響のみならず、高温側の使用制限がある高力ボルト軸力への影響も明らかにする必要があり、出力 3kW の連続波レーザーシステムを用いた研究が報告されている¹⁰⁾。

この研究では、3kW の連続波レーザー処理後の M22 高力ボルトの軸力損失について検討されている。90mm× 140mm の鋼材をボルトとナットで締付け、供試体とした。締付軸に対して固定された角度でレーザーが照射されるように配置され (図 8(a))、かつ締付軸を中心に供試体が回転する機構を配し、ナットへの回転照射とした (図 8(b))。レーザー処理中にボルトの軸力と温度の変化を歪みゲージおよび熱電対でそれぞれ計測した。



図 7 素地調整後のジंकリッチ単層に対する中性塩水噴霧による耐久性試験結果 (上段レーザー、下段ブラスト)⁹⁾

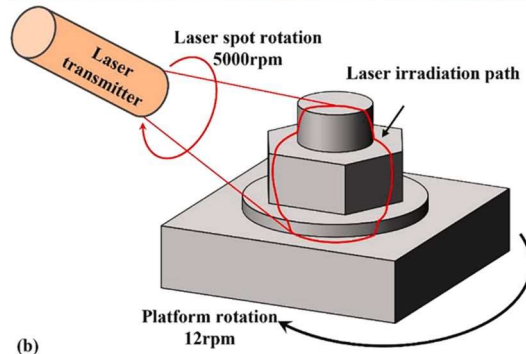
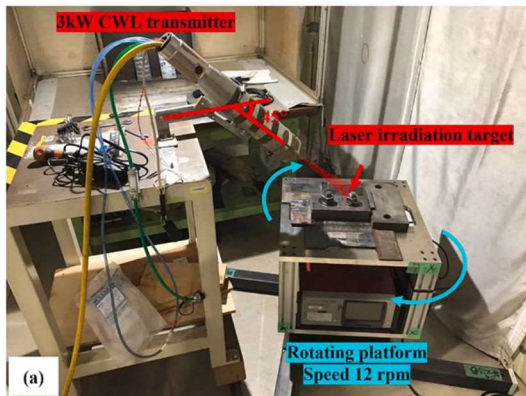


図 8 M22 高力ボルトへの熱影響調査の実験配置 (文献 10 より転載許諾済)

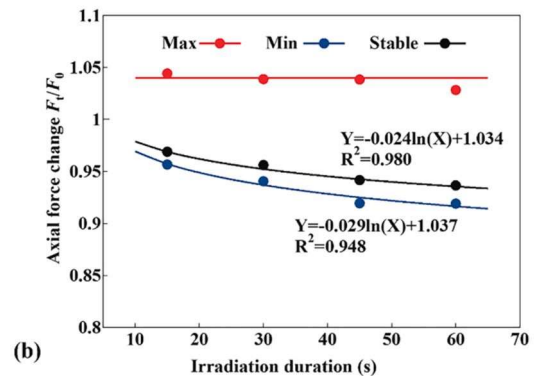
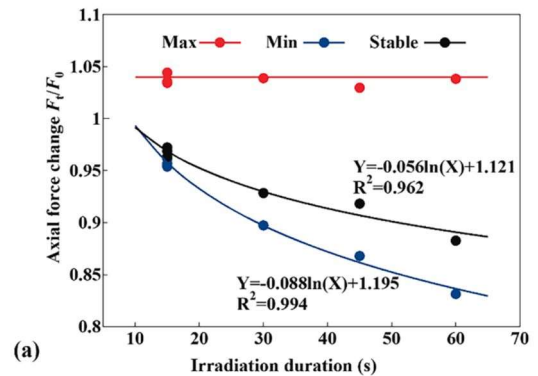


図 9 実験結果 (説明は本文) (文献 10 より転載許諾済)

図 9 に軸力（縦軸）に対するレーザー照射時間（横軸）依存性を示す。レーザー照射中および照射後で軸力は変化し、その時間変化の中における最大値（赤色）、最小値（青色）、および照射後の定常値（黒色）がそれぞれ示されている。図 9(a) は連続照射時のもので、最大値はさほど変化がないが、最小値や定常値では連続照射時間に伴って低下し、60s で 10%程度の定常的低下が見られている。連続照射時間が 45 秒未満であれば、ボルトの全体的な温度が 300℃を超えず、10%以内の軸力損失で維持できるところが示された。図 9(b) は、15s 照射を 10 分間隔で繰返し、横軸は総照射時間とした結果で、断続的な照射により軸力損失がより抑制されている。ほかの断続的な照射時間の組合せや、有限要素法を用いた熱解析による実験結果の再現も提示している。

実際の施工において多数配置されている高力ボルトへの照射は、ひとつのボルトに連続照射するよりも多数のボルトに連続的かつ繰返して照射する作業となることが一般的であること、前節で述べた照射条件よりも熱影響の少ない条件を用いれば、加熱の程度がより低くなることがそれぞれ考えられる。

このように施工の方法およびレーザー機器の発展に伴うリスクの低減が考えられるが、今後はデータにより示されていくことが期待される。

3. 安全確保と人材育成の取組

新しいレーザー技術の普及にあたり、作業員の技能習得と安全確保が重要である。2019 年に設立された一般社団法人レーザー施工研究会は、インフラ等の構造物の維持技術としてレーザーを用いた施工技術の普及発展に関する活動を行い、社会インフラの維持管理に寄与することを目的としている。具体的には、レーザー施工に関する安全ガイドラインの策定・公表事業、人材育成事業を中心に行っている。

2024 年 4 月現在において会員数は 105 社である。また、その事業内容から研究会内に人材育成部会と安全部会を設置している。本稿では、Structure Painting で先に示した安全ガイドライン¹¹⁾と資格講習による人材育成について簡単に紹介する。

3.1 安全ガイドライン¹¹⁾の策定

屋外の工事現場で起こりうる様々な問題や題や課題、及び安全なレーザー機器の運用方法について検討し、作業員及び管理者に向けた労働安全に関する「レーザー照射処理に関する安全ガイドライン」が 2021 年 6 月に発行された。

表 2 にそのガイドラインの目次を示す。

表 2 レーザー照射処理に関する安全ガイドラインの目次

この安全ガイドラインは、屋外環境でレーザー照射処理による塗膜やさび除去を行う際に、作業の準備から撤収までの全ての段階において、事故の未然防止と被害の最小化を目指すために、的確なレーザー機器の使用操作方法作業手順、及び管理手法を規定している。

このガイドラインは、労働安全衛生法（昭和 47 年法律第 57 号）及び関連法令、JIS C6802「レーザ製品の安全基準」（平成 9 年 12 月）及び厚生労働省通達「レーザー光線による障害の防止対策要領」（基発第 0325002 号）に基づいて策定されている。

レーザー照射処理に関する安全ガイドライン	
1. 概要	7. レーザー管理区域
2. 用語の定義	8. リスク低減処置と保護対策
3. 適用文書	9. 施工計画
4. クラス 4 レーザーの危険性	10. 現地作業
5. 管理体制	11. その他
6. 安全衛生	附属書 A

3.2 資格講習による人材育成

人材育成部会では、屋外レーザー工事機器の安全管理および品質管理や技能について検討を重ね、資格講習試験制度を策定し、2021 年度から毎年、資格講習を実施している。2023 年度までに、レーザー照射処理施工士 72 名、レーザー照射処理管理技士 59 名の資格者が誕生している。講習ではレーザーの基礎、施工の原理から実習、そして上述の安全ガイドラインの内容も盛り込まれ、一定の知識と技能の獲得を試験により確認し、資格が付与されている。

4. 施工例

連続波レーザー照射による施工例を以下に二例示す。

一つ目の施工例 (図 10) は、橋梁の下フランジ添接部でありブラストとの併用例であり、仕上げの塩分除去の役割の実証である。

二つ目の施工例 (図 11) は、2022 年に実施した JAXA 殿のパラボラアンテナの施工である。40m の高所にあり衛星追尾で動くため足場が組めず、ブラスト等の一種ケレンが実施出来ない状況であった。しかも沿岸部で塩害が酷いため、塩分除去も目的として CoolLaser による施工を実施した。高所作業車を用いて簡易な養生で一種ケレン相当の施工が出来る唯一無二の工法とされ、通信会社の通信鉄塔の事例等から、今後は航空・宇宙や防衛の分野などに展開も予定されている。

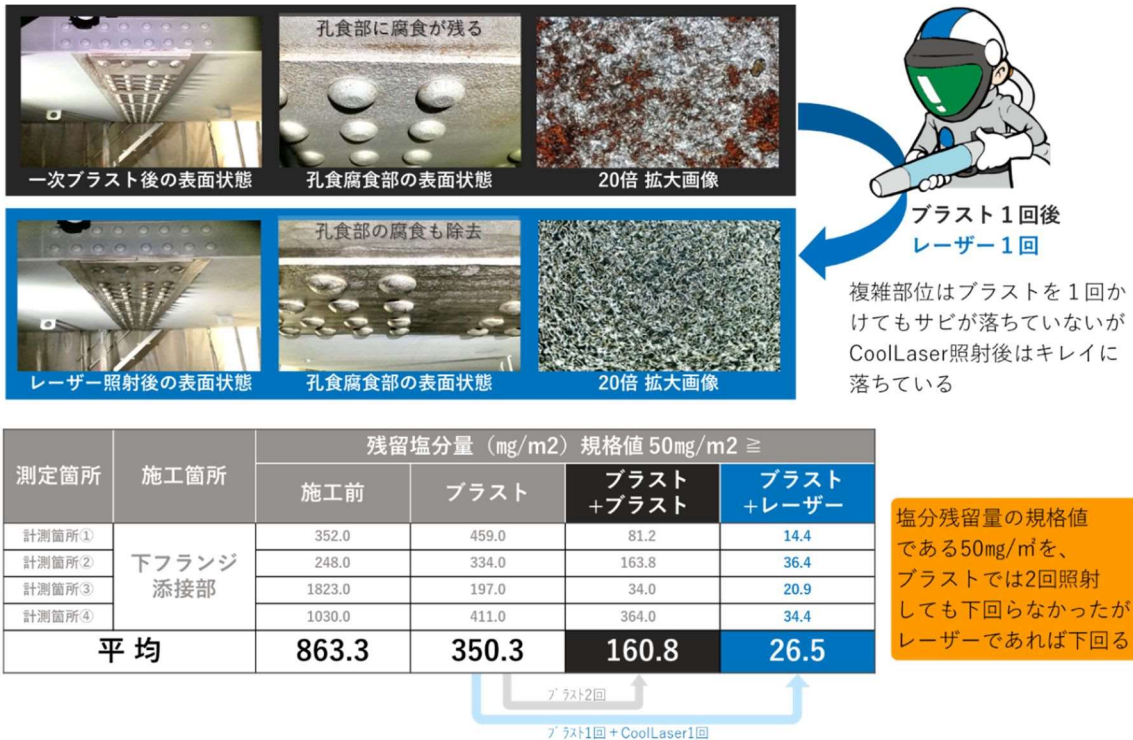


図 10 橋梁の下フランジ添接部における孔食部への対応と塩分除去の例 (トヨコー殿提供)



図 11 高所の足場が組めない構造物への施工例 (トヨコー殿提供)

5. まとめ

本稿では、連続波レーザー照射による素地調整技術の可能性を検討し、特に塩分除去と酸化膜形成の抑制に関する研究成果を示した。また、レーザー施工研究会におけるレーザー照射処理の安全な普及と人材育成にも焦点を当てた内容とした。以下に、本稿における要点をまとめる。

- 1) 連続波レーザー照射手法の概要について、パルスレーザーとの比較を含み、熱加工が原理であることを示した。
- 2) 熱影響として酸化膜の形成が当初の検討対象に掲げられ、形成前提の後工程処理として電動工具との併用手法、および薄い水膜を事前に配置することで温度抑制と再付着回避を実現できるウエットレーザークリーニング (WLC) が提案されている。
- 3) レーザー機器の開発進展に伴って、レーザー単体での素地調整品質も検証されるようになり、有機ジンクリッチ単層の塩水噴霧試験や Re-I 塗装のサイクル D 法によって耐久性がそれぞれ一定程度確認されている。
- 4) 高力ボルト軸力への影響評価として、連続 45 秒以内の照射が推奨された。実際の連続照射は今回の実験条件ほど長くなく、また今後のレーザー機器発展に伴ってその時間の延長可能性があり、それらの再検討のためのシミュレーション・実験技術が確立している。
- 5) 安全確保と人材育成：レーザー施工研究会による安全ガイドラインの策定や資格講習による人材育成の取り組みにより、技術の普及と安全確保が進められている。
- 6) 施工例として、橋梁下フランジ添接部でのブラストとの併用例や足場の組めない高所でのレーザー施工例を紹介し、塩分除去仕上げや 2 次産廃物がないメリットを活かした現場適用に可能性があることが示唆された。

謝辞

施工実績の記載にご協力いただいた株式会社トヨコーの古牧雄二様に謝意を表します。

参考文献

- 1) 藤田和久：高出力 CW レーザーがもたらす地上インフラ維持管理の産業化と宇宙インフラ構築の可能性，レーザー研究 Vol.51, No.9, pp.567-572, 2023.
- 2) 藤田和久，豊澤一晃，沖原伸一朗，前橋伸光，高原和弘，秋吉徹明：レーザークリーニングによる鋼構造物のメンテナンス，レーザー研究 Vol.45, No.7 pp.418-422, 2017.
- 3) 富山禎仁，百武壮，西崎到：第 39 回防錆防食技術発表大会 (2019) 105.
- 4) 近藤祐介，森川凌雅，霍鵬，原口学，藤田和久，三木啓央：土木学会令和 3 年度中部支部研究発表会，I-31, 2022.
- 5) Q. Wang, S. Kainuma, S. Zhuang, K. Shimizu, M. Haraguchi: Laser cleaning on severely corroded steel members: Engineering attempt and cleanliness assessment, Journal of Cleaner Production **376**, 134224, 2022
- 6) S. Zhuang, S. Kainuma, M. Yang, M. Haraguchi, T. Asano: Investigation on the peak temperature and surface defects on the carbon steel treated by rotating CW laser, Optics & Laser Technology **135**, 106727, 2021.
- 7) S. Zhuang, S. Kainuma, M. Yang, M. Haraguchi, T. Asano: Characterizing corrosion properties of carbon steel affected by high-power laser cleaning, Construction and Building Materials **274**, 122085, 2021.
- 8) Q. Wang, S. Kainuma, S. Zhuang, M. Haraguchi: Effect of continuous wave laser treatment on the adhesion and durability of Heavy-Duty Paint coated carbon steel, Case Studies in Construction Materials **19**, e02420, 2023.
- 9) 森川凌雅，近藤祐介，霍鵬，原口学，藤田和久，三木啓央：土木学会令和 3 年度西部支部研究発表会，I-4, 2022.
- 10) Q. Wang, S. Kainuma, P. Huo, S. Zhuang: Continuous-wave-laser surface cleaning of high strength bolts: Analysis of bolt axial force loss, Structures **48**, 1598-1608, 2023.
- 11) 清水尚憲，清水紀圭，加尻慎也，野田健太，原口学，柴田泉，関田隆一，藤田和久：レーザー照射処理に関する安全ガイドラインの概要，Structure Painting **50**, 25, 2022.