幅広い用途に対する万能性を備えたレーザクリーニング

フランチェスカ・モグリア、アントニオ・ラスパ

レーザクリーニングは、溶接の前後処理、コーティング除去、汚染除去など、さまざまな用途に対して利用が増加している技術である。

レーザクリーニングが初めて適用された事例の1つは、1970年代初頭にさかのぼる。J・F・アスムス氏（J. F. Asmus）とL・ラッツェリーニ氏（L. Lazzerini）がベネチアで、外皮に覆われた石器を対象に一連の実地試験を行い[1]、美術品の保全に対してこれを提案した。今日に至るまでにレーザは、数々の貴重な美術品に対して適用されている。現在は、レオナルド・ダ・ヴィンチが、（ミラノの）スフォルツェスコ城内にある「アッセの間」に描いた壁画の修復が続けられている。伊クオンタ・システム社（Quanta System、El. En Group傘下）の波長1064nm、パルス幅10ns ～ 120nsのさまざまなレーザ光源が使用されている（**図1**）。

この最初の適用分野に続いて、J・F・アスムス氏は、航空機からの塗料の除去にこの技術を適用し、この技術は長年にわたって、幅広い業界からの関心を集めている。最大のメリットは、錆、塗料、潤滑油、酸化物などの汚染物質を、金型や金属表面から取り除くために一般的に用いられる、環境に優しく費用対効果の高い処理であり、有害な化学物質や、その下の母材に損傷を与える恐れのあるサンドブラスティングなどの侵襲的な処理を使う必要がないことである。各種市場報告書では、世界レーザクリーニング市場が2026年までに、約4.3%の年平均成長率（CAGR）で、7450億ドル近い規模にまで成長すると予測されている[2]。次の3つのニーズが、この市場の主な推進力となっている。1つめは、小型化やインダストリー4.0（Industry 4.0）によってもたらされた、自動クリーニング処理に対するニーズである。インダストリー4.0は、複数の部品やプロセスにわたって利用できる適応性の高いシステムを提供する必要性を促している。2つめは、フレーム構造の一貫性を保証するために接合前に行われる、複合部品の処理とクリーニングをすばやく簡単に行う手段が欲しいという自動車や航空宇宙メーカーのニーズである。3つめは、コネクタ、絶縁体、パッド、半導体など、ますます小型化する電子部品のクリーニングシステムに対するニーズである。

図1　レオナルド・ダ・ヴィンチの「Tiny Landscape」の最終修復結果。右側には、最終結果に至るまでの複数のクリーニング段階が順に示されている（ミラノのスフォルツェスコ城内にある「アッセの間」の南西壁。写真提供：ミラノ当局／ Ranzani 2015年と2019年）。

技術

レーザクリーニングは、レーザアブレーションに基づく処理である。アブレーションとは、レーザビームを照射することによって、主に固体表面から材料を除去する処理である。すべての材料が、それぞれ異なる分子結合で構成されており、それによって特定のアブレーションしきい値が決まる。アブレーションしきい値とは、汚染層の結合エネルギーを上回って、それを分解するために必要となるエネルギーである。汚染層を取り除くには、レーザからのエネルギーが特定の材料のアブレーションしきい値を超えていなければならない。一般的に、アブレーションしきい値が高いほど、汚染を除去するために必要なエネルギーは高くなる。効率的にレーザクリーニングを行うには、クリーニングする材料のアブレーションしきい値が、除去する材料のアブレーションしきい値よりも、一貫し

て高くなければならない。

アブレーションに適用されるレーザの種類は、汚染物質、母材の組成、必要な処理、クリーニングが必要な表面の面積によって異なる。例えば、数十ワット（またはそれ以上）の近赤外パルスレーザは、連続波レーザよりも効率的にアブレーションしきい値に達するため、よく使用される。また、特に短いパルスには、クリーニングする表面を加熱させないという、さらなるメリットがある。

図2　レーザクリーニング用に設計された加工ヘッド（写真提供：トルンプ社とティッセンクルップ社Automotive Body Solutions）。

レーザアブレーションは、レーザによって材料を蒸気として気化する処理であるため、環境や安全性の問題が必ず伴う。例えば、酸化金属表面の場合は、酸化物粒子が表面から分離して、高圧縮プラズマ（非平衡状態によるイオン化ガス）を生成する。その膨張によって生成される衝撃波は、やがて細かく砕けて、汚染物質を大気中に放出する。この理由に基づき、レーザクリーニングシステムの近くには、蒸気抽出システムが必ず必要である。

こうした問題にもかかわらず、多くの欧州企業がレーザクリーニング技術を開発している。表面クリーニングに対するこの技術のメリットを生かして利益を上げるために、進んで初期投資を行う利用者は、ますます増加している。

レーザクリーニング市場を推進する応用分野の1つが、エレクトロモビリティ（eモビリティ）である。ここでは、電気駆動装置筐体と封止領域の接合前処理や、バッテリーセル、モジュール、バッテリー筐体／フレームのコーティングなどが行われる。

クリーンな表面は、耐久性の高い溶接接合や接点を適切に生成するための基本要件である。eモビリティの部品は、カチオン電着塗装などの塗料や機能層でコーティングされている場合が多い。レーザクリーニングと塗料除去により、部品上の接合が行われる領域や、機能層が不要な領域から、塗料や機能層を正確に選択的に除去することができる。高いピーク出力を持つレーザパルスによって、部品に影響を与えることなく極薄層が蒸発分解される。吸収材料はレーザエネルギーによって加熱され、蒸散または昇華される。独トルンプ社（TRUMPF Laser-und Systemtechnik GmbH）は、この用途を対象とした加工ヘッドを、独ティッセンクルップ社（Thyssenkrupp）のAutomotive Body Solutions事業部門と共同設計した（**図2**）。

この加工ヘッドには、スキャナ光学系（PFO 33-2）と、特別に開発された吸引ノズルが搭載されている。吸引ノズルには分離器が内蔵されており、これによって、クリーニング／塗料除去を行っている間に、除去された粒子と生成された蒸気を直接抽出して分離することができる。

独クリーンレーザ社（cleanLASER）も、特にeモビリティを対象とした、産業用表面処理のための高精度レーザシステムの開発と製造を専門としている。

その課題の代表的な例が、電動モーターを製造するための静電気生成に使われる、銅やアルミニウム製ヘアピンのコーティング除去である。ヘアピンは、アルミニウムや銅などの母材を、さまざまな耐熱性プラスチックでコーティングした材料でできている。ここでの課題は、溶接やはんだ付け処理の前に、それらのワイヤの一部を除去して、非常に高い表面品質を得ることである。具体的には、ワイヤを傷つけることなく、コーティングを4つすべての側面から完全に取り除く必要がある。さまざまなコーティング膜厚に対する高い再現性が求められるとともに、短いサイクルタイムと最小限のコストでそれを行う必要がある。高精度なレーザベースの塗料除去ならば、アルミニウムや亜鉛めっき鋼板でできたバッテリー筐体のコーティングのスポット除去だけでなく、エナメル皮膜で覆われた銅線から残余物を残すことなく塗料を除去することも可能である。これにより、電動モーターのステーターの製造における、その後のはんだ付けや溶接処理に向けて、クリーンな銅線を最適な形で準備することができる（**図3**）。

大気中での溶接と比べて、真空でのレーザビーム溶接には、品質が高いというメリットがある。つまり、溶接が難しい合金においても、溶接シームに気泡や亀裂が生成されない。また、よ

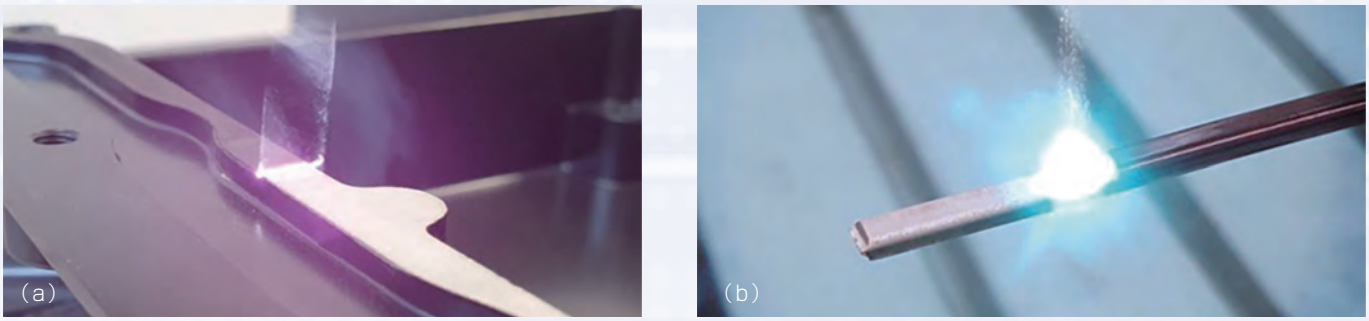

図3　レーザで塗料を剥離することにより、バッテリートレイのカチオン電着塗装を優しく除去することができる(a)。バッテリー筐体に加えて、銅線のコーティングも残余物を残すことなく除去することが可能である。これは、電動モーターのステーターの製造において、特に必要な処理である(写真提供:クリーンレーザ社)。

り低いレーザ出力で同じ溶接結果が得られるため、生産性も高い。加えて、真空でのレーザビーム溶接は、スパッタ、蒸着、酸化が生じず、10μmから100mm以上までの幅広い範囲の溶け込み深さに対応するスケーラブルな処理である。

独ラヴァX社(LaVa-X)は、真空でのレーザビーム溶接を行うターンキー式装置の開発と製造を手掛ける企業で、クリーンレーザ社とともに現在、アルミニウム製ヘアピンの溶接に取り組んでいる。両社が実現する、残余物を残さない表面前処理は、アルミニウムを対象とした高品質の溶接加工に対して、非常に重要な工程である。アルミニウムは特に気泡が生成されやすく、飛散も生じやすい。表面上のあらゆる潤滑油、油分、有機材料が、レーザビームの照射によって蒸発する。これが、無数の気泡やスパッタの他、最悪の場合は、溶接池の放出につながる恐れがある。

独4JET社も、クリーニング、パターニング、マーキング、切断、材料改変を対象に、高品質な部品表面を得るためのレーザシステムを開発している。同社のレーザクリーニングと表面前処理は、タイヤをはじめとする一般的な車載製品の製造を含む、さまざまな用途を対象としている。高い柔軟性や、ポータブルシステムの使用が必要となる、産業用クリーニング処理に対し、4JET社は、柔軟性に優れたハンドヘルド型のレーザクリーニングシステムである「JETLASER」シリーズを開発した(**図4**)。これらのポータブルシステムは、電源さえあれば動作可能である。ハンドヘルドレーザクリーニングの主な適用分野としては、ゴム金型や射出金型のクリーニング、複合材製造、食品業界などがある。

図4　4JET社のポータブルレーザクリーニングシステムの1つを使って、錆を除去する様子(写真提供:4JET社)。

電源から流線型の軽量なハンドヘルド装置までをつなぐ、長さ15mのホースによって、数時間にわたって快適に作業を続けられるような柔軟性が実現されている。この柔軟性によって、重い工具を取り外すことなく、大型で複雑な金型のクリーニングが可能で、プレス機内部を直接クリーニングすることも可能である。同社の装置の重要なメリットは、容易に着脱可能な機構を介して集光レンズを取り換えることにより、レーザエネルギー密度を簡単に調整できることである。これによって作動距離やレーザフルーエンスの変更が可能で、対象用途の範囲が大幅に拡大される。

レーザビームの波長、パルス長、出力は、固体表面から除去する特定の材料に合わせて調節することができる。従って、UV領域を含む短い波長が、レーザクリーニングに対する最も効率的な選択肢である可能性がある。

UV領域に放射波長を持つレーザシステムは、繊維強化プラスチック(FRP)の接合またはコーティングの前処理に対して、多大な可能性を示している。パルスエネルギーは、樹脂材料にほぼ

吸収されるため、繊維の損傷を回避することができる。クリーニングを行い、少しの活性化作用を得るために、パルスエネルギーは、樹脂のアブレーションしきい値よりも高くなければならない。その一方で、過熱は避けなければならない。その理由は、繊維周辺の樹脂材料を完全に取り除くと、FRPの境界領域の機械的安定性は低下するためである。

この処理に対して独コヒレント社（Coherent）は、さまざまなレーザ波長（193nm、248nm、308nm）、出力レベル（3W ～ 3kW）、パルスエネルギーレベル（10 ～ 6000mJ）に対応するUVエキシマレーザシステムを開発している。また、同社は顧客に対し、用途に適応させたビーム成形光学系を供給している。これによって、トップハット型のエネルギー分布を持つ、定義されたビーム寸法が得られ、最大限の処理速度が達成される。UVレーザ照射は、ファイバによる導波ができないため、大型部品や単純な3D部品の処理は、複雑な問題である。一般的には、ポータブルシステムのレーザ光学系の出射口の前に、部品を移して処理することが必要だが、それによって適用可能な用途は制限されてしまう。

独フラウンホーファー生産技術・応用マテリアル研究所（Fraunhofer IFAM）は、低～中出力システム（最大30W）の処理速度を増加させつつ、UVエキシマレーザによる処理の柔軟性を高めるためのコンセプトを開発している。**表**は、その2つの主なアプローチである、走査光学系とロボットによる処理の適用について、まとめたものである。

ロボット処理に対しては、低出力で比較的軽量な種類のレーザを、カスタムメイドのコンパクトな光学系とともに適用することができる。レーザまたは処理対象部品のどちらかを動かすことが可能で、処理対象部品の形状という点で、高い柔軟性が得られる。走査に対しては、ビーム成形光学系（コヒレント社の「COMPexPro 205F」）を備えた30Wレーザに、1次元走査（1Dスキャン）光学系（米ノヴァンタ社[Novanta]傘下の独アージェス社[Arges]がカスタム製造したもの）と、独自開発のフルーエンス補正を組み合わせて、線形のレーザビームによる数m^2/hの速度での処理が可能となっている（**図5**）。例えば、エポキシ樹脂を使用するFRPは、最大11m^2/hの速度で処理可能である。この設定により、高い速度での表面処理に加えて、（例えば、接合処理に向けた）選択領域の前処理も可能である。

イタリアの新技術エネルギー環境局（ENEA）では、興味をそそる研究が行われている[3]。ENEAのフラスカティトカマクアップグレード（Frascati

表　UVエキシマレーザ処理の柔軟性と処理速度を高めるためのコンセプト

	走査光学系	ロボット処理システム
設定	•パルスエネルギーと寸法の理想的な関係を実現するビーム成形 •選択領域の処理や、サンプルの動きが制限される場合に対応する走査ヘッド	•レーザまたはサンプルをロボット上に配置 •コンパクトな集光光学系をレーザ出射口に配置して、パルスエネルギー密度を最適化
効果	•表面処理速度の向上 •サンプルの1次元移動のみで、コンパクトなレーザによるフルスケールの処理が可能（現行設定）	•単純な3D形状の処理が可能 •（接合処理などに向けた）選択的なレーザ処理が可能

（フラウンホーファー生産技術・応用マテリアル研究所提供）

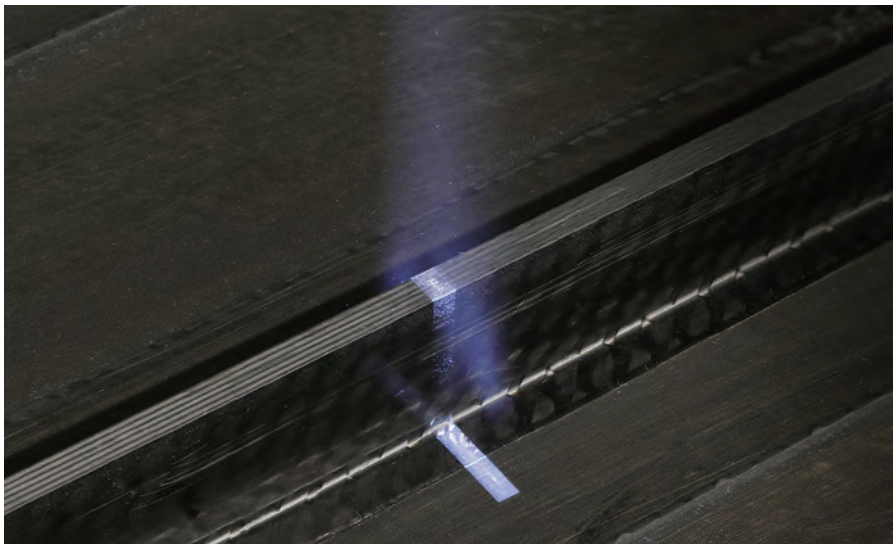

図5　UVエキシマレーザビームによる、繊維強化プラスチック（FRP）の前処理の例（写真提供：フラウンホーファーIFAM）。

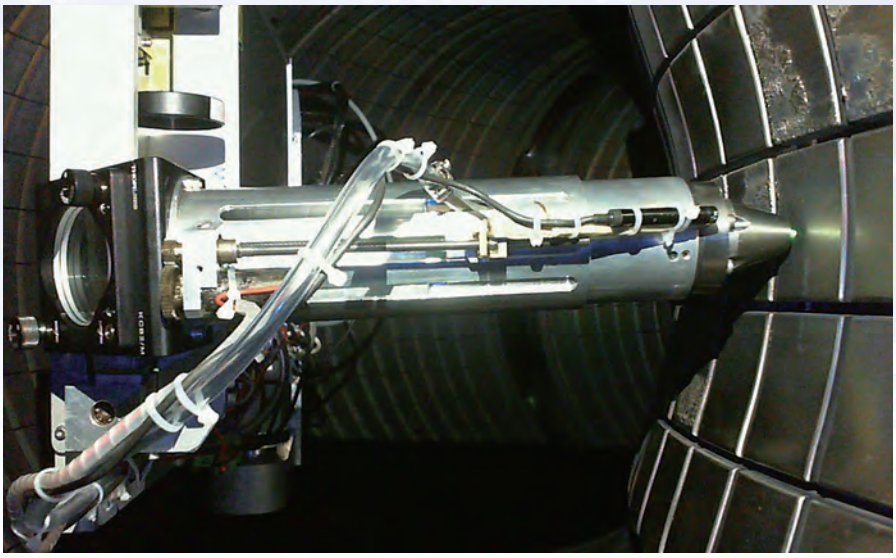

図6　FTU真空容器の第一壁を構成する、トリチウムで汚染されたステンレス鋼に対する、レーザ誘起ブレークダウン分光法（LIBS）試験[3]（写真提供：ENEA）。

Tokamak Upgrade：FTU）の真空容器の解析が、レーザ誘起ブレークダウン分光法（Laser Induced Breakdown Spectroscopy：LIBS）手法によって行われている。定められた時間にトリチウム汚染レベルを測定し（**図6**）、最終的には、その選択的除去を目標としている。レーザクリーニングとオンラインLIBS測定の組み合わせは、そのような重要な処理の実行手段として有望である。

今後数年間で、従来の方法に勝るメリットを本質的に備えるレーザクリーニングによって、レーザアブレーションの適用分野が、特に製造業界において拡大することは間違いない。欧州連合（EU）が資金を提供してレーザクリーニングとレーザ加工全般の開発を支援するイニシアチブであるPULSATEは、レーザを利用する製造技術の専門知識と最先端装置によって、欧州内の多数のデジタルイノベーション拠点を結び、デジタル製造とインダストリー4.0の環境への適応を望み、レーザを主要な実現技術とみなすが、テスト能力を持たないために実装ができない、すべての中小企業（SME）を対象とすることを目的としている。このイニシアチブは、カスケードファンディングと、コンソーシアムパートナーからの技術とビジネスの専門家によって構築された独自の支援プログラムによって、SMEを支援する。関心のある企業は、「Technology Transfer Experiments」（2022年7月受付開始）と「Adopter User Cases」（2022年3月受付開始）という、2種類の公募方法を通じてこのプログラムに応募することができる。レーザクリーニングは、実装とさらなる開発の対象となる技術の1つになる可能性がある。

フォトニクス業界が克服する可能性のある既存課題としては、レーザクリーニングのスループットの向上、さまざまなコーティング膜厚に対する高い再現性の維持、レーザクリーニングにレーザベースの表面パターニングを組み合わせられるかどうかの検討がある。こうした課題に対し、高速なレーザスキャナに加えてロボットまでもが、基本的な役割を担うことになる。また、1m/sのフィード速度を達成する高速インライン処理監視システムと、高い速度に適応したレーザビーム成形技術が、装置メーカーによって求められている。

謝辞／注記

EPICは、常に進んで熱意とビジョンを共有してくれる会員と協力者に謝意を表したいと思う。特に、トルンプ社のサブリナ・フォクト氏（Sabrina Vogt）、ラヴァX社のベンジャミン・ゲルハルツ氏（Benjamin Gerhards）、4JET社のジャン・フローレ氏（Jan Flohre）、コヒレント社のラルフ・デルムダール氏（Ralph Delmdahl）、ENEAのサルバトーレ・アルマヴィーヴァ氏（Salvatore Almaviva）とアントニオ・パルッチ氏（Antonio Palucci）、クリーンレーザ社のトビアス・ウェイチェルト氏（Tobias Weichert）とエレナ・メクレ氏（Elena Mekle）、フラウンホーファーIFAMのトーマス・ルカスジク氏（Thomas Lukasczyk）、ミラノ市のクラウディオ・サルシ氏（Claudio Salsi）、フランチェスカ・タッソ氏（Francesca Tasso）、イレーネ・スカーセラ氏（Irene Scarcella）、そしてすべてのPULSATEパートナーに感謝する。PULSATEは、欧州連合（EU）の研究・イノベーション促進プログラムであるHorizon 2020による資金助成を受けている（贈与契約番号951998）。また、ICT Innovation for Manufacturing SMEs（I4MS）とPhotonics Public Private Partnershipの支援を受けている。本稿の内容は、著者らの見解のみを反映したものであり、欧州委員会（European Commission）及びPhotonics21は、本稿に含まれる情報のいかなる使用に関しても責任を負わない。

参考文献

(1) J. F. Asmus et al., First International Conference on the Deterioration of Building Stones, 72, 1, 63–68 (1972).
(2) See https://bit.ly/3qfKaVR.
(3) S. Almaviva et al., Fusion Eng. Des., 169, 112638 (2021); doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.111685.

著者紹介

フランチェスカ・モグリア（FRANCESCA MOGLIA）は、欧州フォトニクス産業コンソーシアム（European Photonics Industry Consortium：EPIC）のプロジェクト・リーダー。アントニオ・ラスパ（ANTONIO RASPA）は、EPICのイノベーション・マネージャー。e-mail: antonio.raspa@epic-assoc.com URL: epic-assoc.com

ILSJ