

レーザー洗浄技術の適用拡大

松坂 文夫^{*1}
Matsuzaka Fumio

非接触洗浄装置「レーザークリア®」の技術、製品、適用事例について紹介する。レーザーによる非接触洗浄技術の概要、洗浄の原理および特長について解説し、環境負荷が低く、取り扱いが簡便で、自動化にも適した洗浄技術であることを示す。

キーワード：レーザー洗浄、ドライプロセス、環境改善、低ダメージ

1. はじめに

洗浄技術は、多くの分野と適用対象に必要とされる幅広い技術であり、さまざまな方法が用途に応じて実用化されている。

その中で、レーザー洗浄は、近年実用化された新しい技術であり、非接触での処理を特長とする。

図1に当社で開発した非接触洗浄装置レーザークリア®「LF-100」の外観を示す。レーザー洗浄は、以下に示すような幅広い業種や用途に適用可能である。

- ①橋梁：塗装剥離・除錆
- ②自動車：溶接前後処理、金型洗浄、酸化膜除去、塗装剥離
- ③原子力：火力タービンの洗浄、除染
- ④航空機：部品洗浄、塗装剥離
- ⑤食品：ベーキングプレートなどの油脂・焦げ残滓ざんしの洗浄
- ⑥電力：鉄塔のメンテナンス（除錆など）
- ⑦半導体製造：ICパッケージ金型の洗浄、パーティクル除去
- ⑧文化財・美術品：さびなどコンタミ層の除去
- ⑨産業機械：板金加工（局所塗膜剥離）



図1 レーザクリア®「LF-100」外観

レーザー洗浄は、加工原理となるレーザーアブレーションが多種多様な材質に作用できることで幅広い分野に適用可能であるが、一方で各用途において最適な洗浄品質を得るためには用途に応じた施工法の確立が必要である。

例えば、①橋梁の塗装剥離においては、表面粗さより除去速度を重視する性能が求められるが、②自動車の金型洗浄などでは洗浄後の表面粗さの

*1：機器装置事業部 企画・開発部 主幹

維持が重視されるため、レーザー照射仕様は異なる。また膜厚の厚い塗装剥離のように発塵量が多い対象の場合は、集塵機能が不可欠となる。さらに、③の原子力においては周辺への粉塵拡散の防止が重要な技術となる。

本稿では、レーザー洗浄を各用途に適用を拡大する際に重要となる技術のうち、レーザー整形技術について紹介する。

はじめにレーザー洗浄技術について2章で概略を紹介し、4章でレーザー整形技術の解説、適用の効果について述べる。

2. レーザ洗浄の原理・特長

2.1 レーザ洗浄の原理

レーザー洗浄の原理の模式図を図2に示す。

図2は、洗浄対象(母材)の表面に、汚染物質など(表面層)が付着している状態を示す。ここに強いレーザー光を照射すると、「レーザーアブレーション」と呼ばれる現象が生じる。

この現象は、レーザー照射により除去対象となる表面層が蒸散して生成されるプラズマの作用が高速かつ複雑に絡み合いながら進行する現象で、レーザー波長や照射時間、エネルギー、対象物質の違いによりさまざまな様相を見せる。

レーザークリア®において、この現象は以下のプロセスを踏むとされる⁽¹⁾。

- ①レーザー光を材料(表面層/母材)に照射
- ②表面から電子を放出、プラズマ発生
- ③プラズマ輻射により加熱・材料溶融酸化
- ④プラズマ圧力が上昇
- ⑤プラズマ圧力により溶融材料が拡散

このプロセスでは、対象物質がレーザー光を吸収した結果、沸点に達し気体となり飛散するのではなく、レーザー誘起による材料蒸気プラズマが、加熱と除去の働きを担うことを示している。対象物質は沸点まで加熱される必要はなく、プラズマ圧力が物質の剛性に勝り変形に至れば、固体または液体の状態でも除去されうることを示す。

一例として、SS400などの鉄鋼材料の融点は1550℃程度であるが、500℃では剛性(降伏力)が常温の半分程度まで下がり、力学的溶融温度域(おおむね850~950℃以上)でほぼ失われるため、融点以下でもプラズマ圧力が降伏力を上回れば、除去することが可能となる。

図3にレーザー洗浄の状況を高速度カメラで撮影した例を示す。図3では、照射近傍が発光しプラズマ化したガスとともに表面の物質が粒子となって噴き上がる様子が観察される。これは、固体または液体にて分離された表面の物質がプラズマの圧力により拡散するプロセスを示している。

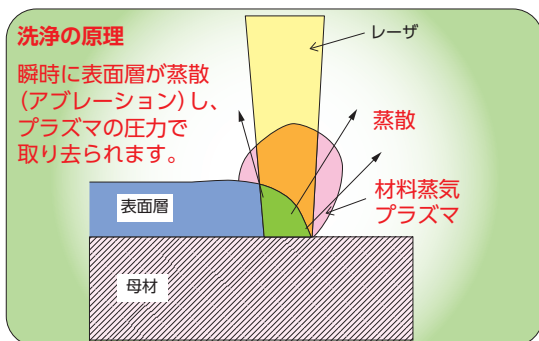


図2 レーザ洗浄の原理 模式図

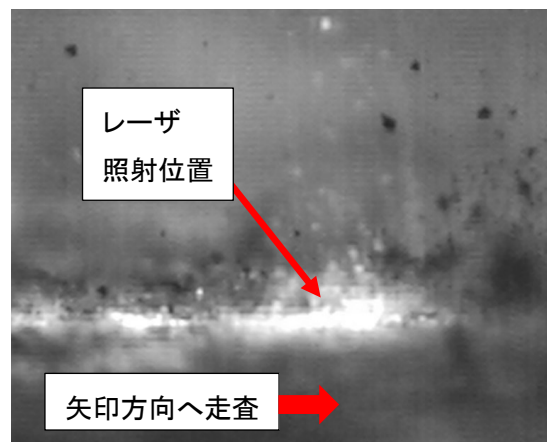


図3 レーザ洗浄の高速度カメラ撮影例

2.2 レーザ洗浄の施工条件

図2に示す「表面層」は、除去対象となる汚染物、酸化物、塗装膜などに相当するが、レーザ洗浄においては表面層のみを選択的に除去する必要がある。

そのためには、アブレーション^{しきい}閾値のエネルギーを式(1)に示す場合、レーザ光のエネルギー E_L は式(2)の範囲に制御する必要がある。

$$E_c < E_s \quad (1)$$

E_c ：表面付着物のアブレーション閾値

E_s ：母材のアブレーション閾値

$$E_c < E_L < E_s \quad (2)$$

なお、式(3)の条件では、表面層とともに母材もアブレーションされるため、表面層のみを洗浄することが難しくなる。ただし表面層と母材の境界面の結合力が弱い場合は、表面層のみをはがすように洗浄できる場合がある。

$$E_s < E_c \quad (3)$$

式(1)を満たす条件でも、閾値が表面層と母材で近接する場合は E_L の設定可能範囲が狭く、精密な制御を要する。

レーザ洗浄では、出力制御性が高く、さらに精密な非接触による位置制御が可能のため、 E_L の設定は比較的容易である。しかしながら、上記のようにアブレーションは材質とレーザ、プラズマが、動的に相互作用する現象のため、施工を最適化するためにはエネルギー以外にもレーザの集光条件や環境条件などの整備も重要となる。3章では、レーザクリア[®]の仕様について簡単に触れた後、レーザ洗浄を支える技術としてレーザ整形技術について紹介する。

3. レーザクリア[®]の仕様

レーザクリア[®]「LF-100」仕様一覧を表1に示す。

レーザクリア[®]では、レーザ光源として最大平均出力100WのQスイッチパルスファイバーレーザを用いている。このファイバーレーザは、小型軽量ながら大出力であり、さらにファイバー伝送の限界に近い集光性能($M_2 < 1.6$) (※1)を持つことが特徴である。この集光性能は、式(2)に示すレーザ光のエネルギー E_L は小面積に集光可能であるほど高い数値を実現できるため、アブレーション

表1 レーザクリア[®]「LF-100」仕様

レーザ種類	ファイバーレーザ クラス4
レーザ波長	1,085 ~ 1,095nm
発振モード	Qスイッチパルス
レーザ平均出力	0 ~ 100W
レーザ繰り返し周波数	100 ~ 200kHz
スキャン幅	0 ~ 100mm (標準レンズ使用時)
スキャン周波数	0 ~ 300Hz
ダイオード寿命	10,000 時間 (期待値)
重量	47kg (照射ヘッド：2.4kg は含まず)
サイズ 本体 / 照射ヘッド	W642mm × D465mm × H990mm (車輪含む) / W104mm × D370mm × H57mm
電源	50/60Hz AC100V 15A (最大消費電力 1.5kW)
冷却方式	空冷
動作環境条件	動作温度範囲：+5 ~ +35℃ 動作湿度範囲：75% RH 以下 (ただし結露なきこと) 動作雰囲気：オイルミスト、粉塵、腐食性および可燃性ガスのなきこと

ション閾値 E_c の高い材質など、広い適用対象に対応可能であることを示す。

※ 1: M_2 とはレーザーの集光性（ビーム品質）を表す指標。最も集光性の良い TEM_{00} モードのレーザーとの集光面積の比率。

4. レーザ整形技術

4.1 原理

TEM_{00} モードと呼ばれる光強度の空間分布を持つレーザー光は、最も集光性が良いため、その比率 (M_2) が集光性能の指標となる。レーザークリア® の出力はこのモードではないものの、近似した性質 ($M_2 < 1.6$) であり、高い集光性により高いエネルギーの照射が可能である。一方で、式 (2) に示すレーザー光のエネルギー (E_L) は対象物質により決まるので、エネルギーを調整する機能を備える必要がある。レーザークリア® は、出力を 1W 単位で簡単に調整可能ではあるが、出力条件によってはレーザークリア® の能力をより活用するため、さらなる調整が必要となる。ここでの調整では、集光レンズの焦点距離の変更も有効であるが、その方法だけでは選択肢が少ないのが問題である。

本開発では、より柔軟にエネルギー強度を調整する手段として、回折光学素子 (Diffractive Optical

Element: DoE) に着目した。これは、光の干渉性を用いて光分岐や、強度分布変調が可能な素子で、ガラス上に微細な凹凸パターンを形成し作製する。これにより逆フーリエ変換による自由度の高いパターン形成が可能となる。

レーザークリア® では、DoE をエネルギー強度の調整に用い、種々の光分岐による分岐パターンを利用している。一例として図 4 に直線状 5 分岐、格子状 4 分岐、6 分岐の例を示す。

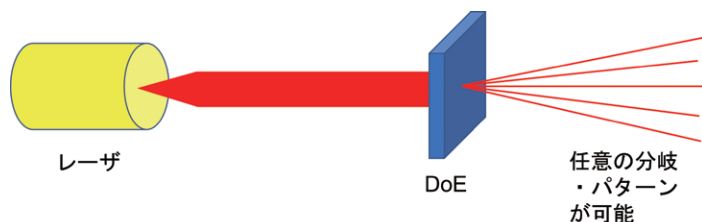
分岐パターンは、自由度が高く、100 分岐以上の多分岐や、ここに示す以外の 2 次元配列が可能である。分岐した各ビームは元のレーザー光と同じ空間分布を再現し、エネルギー配分も均等になるので、均一性が高く断面積の大きい照射が可能となる。

4.2 レーザ洗浄への応用

レーザークリア® では、用途により、分岐数やパターンを適切に選択することで高効率かつ高品質なレーザー洗浄を可能としている。

4.2.1 洗浄効率の向上

4.1 節で触れたように、母材を除去することなく表面層の汚染物などを除去するためには、式 (2)



DoEによるレーザー光分岐の模式図

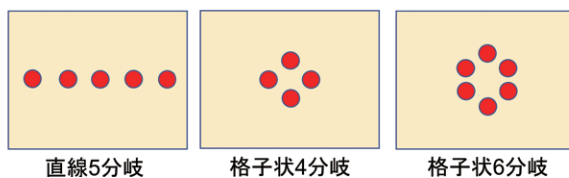


図 4 DoE を用いたビーム分岐例

に示すエネルギー条件への調整が必要である。この調整では、DoEを活用すれば洗浄の効率化を図れる。例えば、調整条件として平均出力4W、200kHz、集光径50 μm (1パルス当たりのエネルギー密度は10.2mJ/mm²)で表面層の塗装が除去可能とする。この同一対象を5Wで処理した際に母材側に除去痕(照射痕)が残るケースを、分岐数20のDoEを使用することで、調整条件平均出力100Wの照射でも母材に除去痕を残さずに洗浄可能となる。そして平均出力を大きくした洗浄を可能とすることで高速な(この場合では20倍の)処理が可能となる。

DoEによる除去痕(照射痕)抑制の効果の一例を図5に示す。図5(a)(b)は、鏡面研磨したSUS304材にレーザクリア®を照射した例で、(a)はDoEなしで平均出力100W、(b)は6分岐DoEを使用し平均出力20Wの照射を示す。(a)(b)ともSUS材の表面を除去できるが、DoEを使用した(b)では除去痕は確認できない。なお、ここには示さないが、平均出力30Wの条件では除去痕が見えてくるた

め、SUS304を式(2)の条件で施工するためには、平均出力20Wの照射条件に近い、エネルギー密度9mJ/mm²程度に制御するのが適切となる。一例として、(b)で用いた6分岐光強度測定画像を(c)に、(d)はこれを感熱紙上に横方向に走査しながら照射した除去痕(照射痕)を示す。

4.2.2 高速洗浄への対応

レーザクリア®は、ガルバノスキャナによりレーザを走査することで面を洗浄する。しかし、DoEにより照射断面積が図5(c)のようになると、(d)で示されるように1走査あたりの除去幅を広くとることができる。

ガルバノスキャナは、モータを反転動作させながら走査を行うため、おおむね100~300Hz程度の走査周波数である。レーザクリア®による洗浄では、走査方向と直角に照射位置を移動させて面を施工するが、その速度は走査速度と照射幅の積で制限されるので、DoEにより照射幅を広くとれば除去速度の高速化が可能となる。

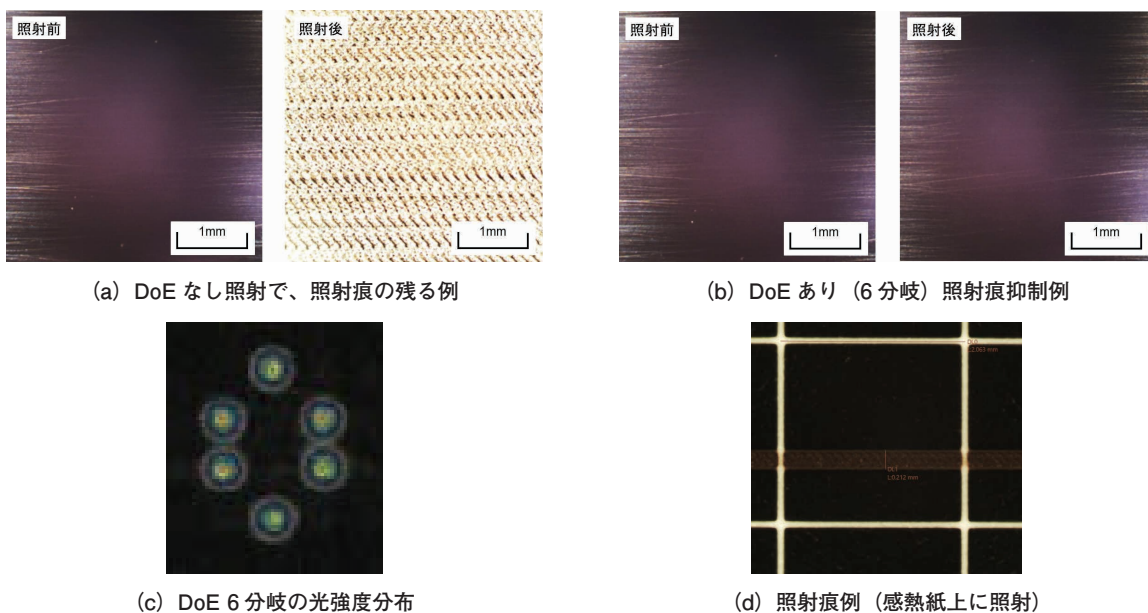


図5 DoEの効果および分岐パターン

例えば同一速度による洗浄処理を必要とする製造ライン上では、高速化への対応が重要となる。

幅 50mm の対象物の洗浄ラインにレーザクリア®を組み込む場合、焦点距離 160mm レンズ (照射径 50 μ m) を使用した時の最大洗浄速度は DoE なしで 300mm/min 程度が限界であるが、分岐数を 5 分岐とすれば 5 倍の 1,500mm/min の速度への対応も可能となる。

高いパルスエネルギーを必要とする対象では制限はあるが、分岐による施工はレーザクリア®の高いエネルギー強度を有効に生かす手段となるものと期待できる。

DoE による高速ラインへの適用が期待される対象としては、線材の洗浄がある。線材圧延後の酸化膜除去や被覆除去などを行う際は、線材の射出速度は 10m/min 以上となる場合があり、これはガルバノスキャンでは処理できない速度である。一方で線材では洗浄幅は多くの場合数 mm 以下なので、DoE による分岐で洗浄幅を大きくすることで

スキャンなしで処理することが可能となる。例えば、直径 1.5mm の線材の場合は 30 分岐で直径分の照射が可能となる。この場合は、ガルバノスキャンがないため、100m/min 程度の速度まで対応できる。

5. おわりに

「レーザクリア®」は、工場での自動化、現場での環境改善などに貢献するレーザ洗浄装置であり、レーザ整形技術を組み合わせることにより幅広い対象に効率良く洗浄能力を発揮することができる。今後、多くの分野、用途で幅広く効率的な洗浄装置として「レーザクリア®」をご活用いただければ幸いである。

参考文献

- (1) 矢部孝：レーザーアブレーションプラズマの膨張・冷却過程、プラズマ・核融合学会誌、79 巻、11 号、2003、pp.1160-1168



機器装置事業部
企画・開発部
主幹

松坂 文夫

TEL. 045-791-3525
FAX. 045-791-3538