

公益財団法人 光科学技術振興財団

委託研究報告書（令和5年度）

レーザー科学技術の将来に関する調査研究

－国内外最新のレーザーを用いた表面処理の動向と

将来に関する調査－ 2. 除去プロセス

目次

1 章 序論	1 頁
1.1 レーザークリーニング技術の先駆	
1.2 洗浄技術としてのレーザークリーニング	
2 章 レーザークリーニングのメカニズム	4 頁
3 章 レーザークリーニングの開発・実用化に向けた取り組み	6 頁
3.1 油膜を対象としたレーザークリーニングの検討例	
3.2 被膜・塗膜を対象としたレーザークリーニングの検討例	
3.3 錆を対象としたレーザークリーニングの検討例	
3.4 放射性物質を対象としたレーザークリーニングの検討例	
3.5 文化財を対象としたレーザークリーニングの検討例	
3.6 金型を対象としたレーザークリーニングの検討例	
3.7 その他のレーザークリーニングの検討例	
4 章 結言	25 頁

1章 序論

「表面処理」技術は、レーザー加工分野において、一般的に「表面改質」と呼称・分類されている。

レーザーによる表面改質技術の分類を表 1-1 に示す。

表 1-1 レーザー表面改質の分類

プロセス	名称		主たる処理目的
非溶融	変態焼入れ		表面硬化
	結晶粒微細化		表面硬化、強度特性改善等
	溶体化処理		耐食性改善
	アニーリング		残留応力・歪み低減、結晶成長
	衝撃硬化(ピーニング)		疲労強度改善、耐 SCC
	磁区細分化		電磁鋼板鉄損改善
	フォーミング		歪付与、曲げ加工
溶融	通常凝固	再溶融(偏析解消)	耐食性改善
		コンソリデーション	気孔率低減、均質化
		溶接止端部処理	疲労強度改善
		粗面化	異材接合前処理、ロール機能化
	急速凝固	チル化	耐摩耗性・耐孔食性改善
	超急速凝固	グレージング	非晶質化、耐食性改善
	合金元素添加	アロイング	耐摩耗性・耐食性等改善
素材被覆	肉盛り(クラディング)		欠損部補修、耐摩耗性・耐食性改善
	直接描画		回路形成
除去	クリーニング		除染、除錆
	ストリッピング		被膜剥離
	ホーニング		潤滑特性付与
	マイクロテクスチャリング		耐摩耗性改善、濡れ性等制御

その目的は耐疲労特性・耐摩耗性・耐食性・意匠性・濡れ性・電磁気特性・その他機能付与等多岐に亘り、加工原理も熱的(溶融・非溶融)・非熱的なものに分類でき、付加・変形・除去全ての加工方法にまたがっている。同種材料・同目的でも、異なる表面改質技術・原理を応用するケースが多く提案・実用化されていることが判明した。このため、令和4年度報告書では、材料溶融・質量変化を伴わない熱的プロセス(表 1-1 で「非溶融」と標記分類された技術領域)に焦点を絞り、夫々の技術の概要と技術開発・実用化に向けた取組みの調査結果を報告した。

表面処理技術調査 2 年目となる令和 5 年度は、質量の減少(物質除去)を伴うプロセスに関する調査を実施することとした。(表 1-1 で「除去」と標記分類された技術領域)

質量の減少(除去)を伴う表面処理技術を、大きく 2 つの範疇、

- ① レーザーによる材料除去によって、何某かの新たな機能を発現させるプロセス

(表 1-1 では、「ホーニング」と「マイクロテクスチャリング」)

- ② レーザーによる材料除去が、何某かの機能を復元するプロセス、または機能発現させるための前処理としてのプロセス(表 1-1 では、「クリーニング」と「ストリッピング」)

に大別できる。

質量の減少(除去)を伴う表面処理技術だけでも、非常に多岐に亘っているため、近年、社会的に関心の高まっているレーザークリーニング技術に焦点を絞って報告する。尚、従来は一つの独立した加工方法として取扱われてきた「レーザーストリッピング(被膜剥離技術)」も、レーザークリーニング技術の一部であるとして、併せて報告対象とする。

1.1 レーザークリーニング技術の先駆¹⁾

「レーザークリーニング」とは、「レーザー照射によって表面に付着している物質を取り除く(材料除去)技術」として、様々な領域に広く普及しつつあり、社会的にも関心の高い技術となっている。

レーザーによるクリーニング(表面の付着物除去)というアイデアを発案したとされる 2 人の先駆者を紹介する。

- ① Arthur Schawlow(レーザー分光法の開発に関する研究で 1981 年にノーベル物理学賞を受賞)
1957 年～1958 年にかけてベル研究所で Charles Townes と光学メーザー(レーザー)の開発に協力した、当にレーザー技術先駆者の一人である。

1960 年代当時、レーザーの軍事利用への取組は機密事項とされ、一般社会へのレーザー技術の普及について懐疑的な見方が一般的であったため、Schawlow はこの偏見を克服しようと努めていた。

「レーザーが実際には殺人光線ではないことを示すために、私は多くのことを行った。それが、私がレーザー消しゴムを発明し、特許も取得した理由の 1 つである」と語っている²⁾。

- ② John F. Asmus(カリフォルニア大学サンディエゴ校)

1972 年、イタリア石油協会は、深刻な洪水の後に朽ち果てた都市の重要文化財をレーザーホログラフィー技術で記録する研究のため、Asmus をヴェネツィアに招待した。この研究中、Asmus は、ホログラフィック記録を目的としていた集束ルビーレーザーと、石像との相互作用の効果を観察した。その結果、より暗い付着物が表面から選択的に除去され、その下にある白い石には明らかな損傷が生じないことが判明した。その後、Asmus は米国に戻り、美術品のレーザー洗浄の研究を開始し、その基礎を築いた。この事により、Asmus は、「レーザーを応用した美術品保存修復の始祖」と呼ばれるに至っている³⁾。

1.2 洗浄技術としてのレーザークリーニング

「洗浄」とは、「対象物から異物を除去すること」とされるが、本報告書では、「対象物表面に付着した異物を除去すること」として取り扱う。

工業分野において、「洗浄」は、製品の信頼性確保、製造品質保証にとって、重要な技術であり、従来、様々な洗浄技術が、利用されてきた⁴⁾。

サンドブラスト法は、洗浄対象物に研磨剤を高速噴射し、表面付着物を剥離する。表面に付着・残留する研磨剤の剥離工程が必要となるだけでなく、表面損傷が避けられず、また作業安全リスクを伴うという欠点がある。

化学的洗浄法は、酸・アルカリ・溶剤・界面活性剤・純水などの化学薬品を使用して、汚れ・汚染などを除去する。洗浄対象物を処理槽に浸漬して高効率で洗浄作業可能であるものの、廃液処理等の環境負荷が大きく、処理施設も含めれば、初期投資・ランニングコスト共に大きい。

超音波洗浄法は、水・有機溶剤中のワークに超音波振動を負荷して、表面付着物を除去する。化学的洗浄法ほどに環境負荷は大きく無いものの、同様に処理槽を必要とするため、初期投資は大きく、また乾燥工程を必要とする。

ドライアイス洗浄法は、洗浄対象物にドライアイス粒を高速噴射し、表面付着物を剥離する。研磨剤を利用するサンドブラスト法と異なり、後工程が不要であるが、騒音が大きい。

これらの従来洗浄方法に対して、**レーザークリーニング法**は、研磨剤・ドライアイス等の洗浄用媒体の使用・消耗がなく、乾式プロセスとなる為、廃液・排水処理等が不要でランニングコストも低減できる。

参考文献

- 1) W. M. Steen, J. Mazumder, Laser Material Processing, 4th ed.; Springer: London, UK, 2010; pp. 417–440, ISBN 978-1-84996-061-8.
- 2) https://oac.cdlib.org/view?docId=kt5b69n7k2&brand=oac4&doc.view=entire_text
- 3) Podcast 042: John Asmus on Laser Cleaning "Have Laser Will Travel",
<https://www.nps.gov/articles/000/episode-042-john-asmus-on-laser-cleaning-have-laser-will-travel.htm>
- 4) K. Zhou et al., Principle, Application & Development Trend of Laser Cleaning,
DOI:10.1088/1742-6596/2383/1/012075

2章 レーザークリーニングのメカニズム

レーザークリーニング技術は、様々な産業領域で利用されつつあり、解説・紹介する文献(技術資料)も多いが、付着材料を除去するメカニズムをアブレーション現象で説明されているものが大半である。(例えば、参考文献1)~4))

しかし、レーザークリーニング技術は、その対象とする材料(母材と付着物)・用途・目的も多岐に亘り、様々なクリーニング方法が提案・利用されており、アブレーション現象だけでの説明は不適切・不十分である。

レーザーにより、付着物質を表面から除去するメカニズムは3つの主要なグループに分類される⁵⁾。

表 2-1 レーザークリーニングメカニズムの分類

メカニズム	クリーニング方法
レーザー熱アブレーションプロセス	基板表面付着物へのパルスレーザー照射により、付着物・基板材料を急加熱。 温度がガス化閾値を超えると、付着物が蒸発。 (燃焼、分解、アブレーション、剥離等の現象を伴う) 高エネルギーUVレーザー照射による、光化学効果利用も可能。 (光子エネルギー > 分子結合エネルギーの場合)
レーザー熱応力プロセス	基板表面付着物層へのパルスレーザー照射により、付着物層を急加熱。 付着物層の急速な熱膨張による熱応力(揚力)が発生。 熱応力(揚力) > 付着力(ファンデルワールス力)となり、付着物層が剥離。 バーストモード照射による、振動効果利用も可能。
プラズマ衝撃波プロセス	レーザーは基板表面付着物直上(数 mm 以下)に集光パルスレーザーを照射。 ブレイクダウンによるプラズマ衝撃波が発生し、基板表面に付着した粒子等を除去。

ただし、実際に提案・使用されているレーザークリーニング技術においては、これらのメカニズムを単独で利用するだけでなく、複数のメカニズムを組合せたものもある。

参考文献

- 1) 日野、橋本、水戸岡、「レーザークリーニングとその応用」、表面技術、Vol.69, No.10, PP.435-440(2018)
- 2) 荒井、「環境にやさしいレーザークリーニングと SDGs への寄与」、表面技術、Vol.74, No.7, PP.352-356(2023)
- 3) G. Heidelmann, Surface Cleaning with Laser Technology, <https://www.nmfr.org/pdf/psf2009/2009-11-38.pdf>

- 4) J. Decloux, Laser replaces conventional industrial cleaning methods, Industrial Laser Solutions, Vol.33, No.3, pp.25-27
- 5) Z. Zhou et al., The Fundamental Mechanisms of Laser Cleaning Technology & Its Typical Applications in Industry, DOI 10.3390/pr11051445(2023)

3.章 レーザークリーニングの開発・実用化に向けた取り組み

3.1 油膜を対象としたレーザークリーニングの検討例

産業分野では、基材の表面を油膜で覆うことは、金属材料を酸化や腐食から保護する最も効果的な方法の1つであり、金属部品の製造、保管、輸送において重要な保護の役割を果たす。しかし、油汚れや粉塵などの汚染物質は、金属部品の溶接、塗装、梱包などの工程に悪影響を及ぼす。このため、金属素地表面の油汚れや汚れを定期的に除去する必要がある。

冷間圧延鋼板の製造ラインでは、各工程で鋼板表面に付着する圧延油、防錆油等を工程間で脱脂を必要とする。このため、工程毎にアルカリ液による脱脂ラインを設けていたが、①大規模な設置空間と敷地、②万全の環境公害防止対策(排水・大気等)を必要とし、多大な初期投資および維持管理コストが掛っている。

CO₂レーザーを吸収する高吸収率物質(脂肪酸、高級アルコール類(C-O結合)、エーテル類(C-O結合)、C-N間に二重結合を持つカーボイミン類(N-O結合)、脂肪族のアミン酸化物のNオキシド類(N→O結合)、PやSを含む化合物(P-O-C,S-O結合)、C-C-M(M=Si、P、Cl、Sn、Al等)結合型化合物)を少なくとも一部に用いた圧延油、防錆油、防錆液によって冷間圧延や防錆処理を行ない、鋼板表面に付着している油類や有機物類にCO₂レーザーを照射することによってこれらを速かに蒸発除去させることが提案されている¹⁾。

鋼板を冷間圧延後に、そのまま焼鈍すると、表面に付着した圧延潤滑剤が不完全燃焼し、炭化物あるいはゴム状物質となって、表面汚れとなって美観を損なうだけでなく、後工程での品質トラブルの原因になってしまう。このため、焼鈍前工程にアルカリ液洗浄ラインを設ける必要があった。

鋼板表面に付着している圧延潤滑剤に、高い吸収性を示す波長帯の高出力レーザーを照射加熱して圧延潤滑剤を加熱除去する。高出力レーザー照射領域にモニタ用低出力レーザーを照射し、その反射強度信号レベルによって高出力レーザーの出力を制御すると共に、鋼板表面にガス体を噴射して表面に付着した微粒子を除去、回収することが提案されている²⁾。

このレーザー処理の際、鋼板面法線に対し70°以上光軸を傾斜させたレーザーを照射すると共に、レーザー光を鋼板面と反射ミラーとの間で多重反射させて、圧延潤滑剤を加熱、蒸発させることも提案されている³⁾。

金属表面の所定領域に局所的にメッキするためには、前処理(マスキング・脱脂・酸洗)と後処理(マスキング剤除去)が必要となる。これらの処理工程は、化学薬品を使用するため、廃液処理等の問題もある。N₂雰囲気、ピコ秒パルス近赤外レーザー照射し、所定のメッキ処理領域だけに局所的に窒化膜を形成する方法が提案されている⁴⁾。

アルミ合金展伸材の製造工程において、圧延時の油分が残留した表面や、熱処理を経ることで特定の成分が濃化した表面では、印刷性・着色性・接着性・化成処理性等が劣化する。このため、脱脂や酸洗といった薬剤洗浄工程を必要としている。薬剤洗浄工程を廃するため、アルミ合金展伸材の連続圧延・焼鈍後、コイル巻取り前にレーザークリーニングすることが提案されてい

る⁵⁾。

アルミ合金製自動車用エンジン部品の機械加工工程では、切削面付着物質(水分・油分等)を除去する目的で、レーザークリーニングが一部で採用されているが、レーザー照射に伴うプラズマ熱放射等の熱的影響で母材に損傷に与えてしまうおそれがある。パルスレーザー照射スポット径のうち中心側の基準エネルギー強度領域とその外側の領域とを一次処理と二次処理とで使い分けてクリーニング処理を施すことにより、アルミ合金母材に熱的損傷を及ぼすことなく、除去対象物を除去することができる⁶⁾とされている。

アルミ合金の溶接では、溶接部に多量の気孔が発生しやすく、その結果として接合強度が母材の50~75%まで低下する。表面の油分残留だけでなく、アルミ合金表面に形成される酸化被膜(Al_2O_3)中にトラップされている H_2 も、気孔発生原因となることが知られている。このため、従来は、油分除去を目的とした脱脂工程、酸化被膜除去を目的としたブラッシング工程等、複数の溶接前処理を必要としていた。

これらの溶接前処理工程をレーザークリーニングに置換することにより、生産性向上とコストダウンが実現している⁷⁾。Audi、Fiat、Jaguar & Land Rover のレーザー溶接組立ラインには、60台以上の溶接前処理用レーザークリーニング装置が導入され、実稼働している⁸⁾。

参考文献

- 1) 特許 1138233 「レーザ照射による鋼板表面清浄方法」新日本製鐵株式会社
- 2) 特許 1122899 「鋼板表面清浄方法」新日本製鐵株式会社
- 3) 特許 1122900 「レーザ照射による鋼板表面清浄方法」新日本製鐵株式会社
- 4) 特許 4861785 「大気中の前処理を伴っためっき方法並びにめっき前処理装置」福井県、(株)松浦機械製作所
- 5) 特開 2008-223085 「塗膜密着性と接着性に優れたアルミニウム材の製造方法」古河スカイ(株)
- 6) 特許 6326288 「レーザクリーニング方法」日産自動車(株)、エイチアールディー(株)
- 7) L. Li, Laser cleaning prior to laser welding of aluminum alloys, Industrial Laser Solutions, Vol.30, No.3, pp.28-30(2015)
- 8) G. Heidelmann, Laser Cleaning and Surface Decoating Technology, <https://www.lbcg.com/media/downloads/events/547/day-3-2-00-georg-heidelmann-adapt-laser-systems.10737.pdf>

3.2 被膜・塗膜を対象としたレーザークリーニングの検討例

塗膜・被膜は、金属材料を酸化や腐食から保護するだけでなく、意匠性(外観)や(電氣的絶縁性)等の機能も付与する、極めて工業的に重要な方法である。しかし、塗膜・被膜にも耐用できる期間があり、使用時間が長くなるにつれて、その機能は徐々に劣化する。このため、劣化した塗膜・被膜をまず除去した後に、再処理する必要がある。

構造物の防錆・防食のため、耐食性の良好な亜鉛・アルミ等の金属を溶射被覆する方法は、古くから水門橋、梁、タンクなどに適用されており、特にアルミは海洋環境下、工業地帯の汚染環境下で優れた耐食性・耐熱性を有している。アルミ溶射鋼を溶接施工する場合、部分的にアルミ溶射膜を除去する必要がある。溶射被膜除去は従来より、機械的方法(グラインダー)や、化学的方法(NaOH 含浸体を所定の部位に塗布)によっていたが、不活性ガス吹付環境下で剥離除去対象部位だけに選択的にレーザー照射する方法が提案されている¹⁾。

絶縁電線、光ファイバ心線等の皮膜剥離方法としては、①機械的方法(ナイフ、サンドペーパー等)、②化学的方法(リムーバー等の化学薬品)、③焼却(バーナー等)があるが、何れも時間が掛かり、剥離対象周辺も剥離されてしまうという課題がある。線状の被膜剥離対象に対して、IR レーザーを、円周状に連続照射する方法が提案されている²⁾。

電線端末を他の導電部分と結合するためには、電線表面の絶縁被膜を剥離する必要があり、従来はカッターによる機械的剥離が行われていた。電線表面を傷つける恐れのある機械的方法に代わって、レーザーによる電線被膜剥離処理が普及している。通常のレーザー被膜剥離方法では、絶縁被膜の燃焼カスが剥離部に付着する問題点があった。この燃焼カス残留を回避するため、電線を金属管内に挿入し、その金属管外部をレーザー加熱する方法が提案されている³⁾。この方法により、被膜の燃焼を抑制し、溶融・除去することができる。

画像形成装置に使用される感光体ドラム外周面への感光性塗膜形成は、浸漬法によっている。この浸漬法では、端部や内周面にも感光性塗膜が形成されてしまい、フランジ装着工程や導電処理工程前に不要な塗膜部分のみ除去する必要がある。従来、感光性塗膜除去には、化学的方法(有機溶剤で溶解)や機械的方法(切削刃による切削)があるが、品質的にもコスト的にも課題があった。感光性塗膜の不要部分のみを選択的に除去するため、レーザークリーニングが適用されている⁴⁾。

鉄道車両等の大型構造体表面に存在する皮膜、例えば、塗装膜、油膜等を除去する方法として、機械的方法と化学的方法があるが、機械的方法では塵埃による作業環境の悪化、化学的方法では薬剤の毒性に対する安全対策等の課題があり、作業者の負荷が大きいため、自動化・無人化が望ましい。レーザークリーニング技術をベースとした全自動大型構造体塗膜剥離システムが提案されている⁵⁾。

被覆電線は、銅をポリイミド、ポリウレタンまたはエナメル等の絶縁材で被覆されており、端子に接続する際には、絶縁被膜を剥離して半田付けされる。絶縁被膜除去は、機械的方法か化学

的方法がとられるが、生産性が低いという問題がある。第1工程(一絶縁被膜を除去すべき領域にQスイッチパルスレーザーを走査・照射し、直接的に絶縁被膜を除去)と、第2工程(CWレーザーを走査・照射し、第一工程でパルスレーザーが照射されず残留した被膜を熱伝導加熱で除去)の2工程レーザー被膜剥離方法が提案されている⁶⁾。

ガスレンジ等の調理装置においては、吹き溢れた煮汁等を除去し易くするために施したトッププレート表面上のフッ素樹脂コーティングは、五徳に接触する部分が擦れによって醜く剥離する不都合がある。五徳に接触する部分のフッ素樹脂コーティングを、事前にレーザー照射により剥離することが行われている⁷⁾。

自動車の製造・修理工程において、塗装欠陥部位の塗膜剥離にレーザーが既に利用されているが、ビームプロファイル(エネルギー分布)が不均一であると、縁に剥離不良が発生する。エネルギー分布を均一化する光学系(筒状カライドスコープ)の利用が提案されている⁸⁾。

航空機等の機体外板の塗装除去には、主にメチレンクロライドと呼ばれる毒性の強い薬品を吹付け、塗料を脆弱化させた後、手作業で塗装膜を除去されてきた。このような化学的剥離処理方法に代わり、レーザーによる塗膜剥離が注目されており、関連する様々な方法・装置が提案されている。

レーザーを集光・発散し処理表面に照射するレンズと、処理表面・レンズ間距離を調節可能な支持機構を有し、レーザー照射位置近傍には、飛散ガス・微粒子を吸引する流路と微粒子を捕捉するフィルタが配置される⁹⁾。

レーザー照射部の温度モニタリング機構と、エネルギー密度可変光学系を用いて、塗膜剥離工程を自動制御することも提案されている¹⁰⁾。

またレーザー照射部分の色の変化をモニタリングすることにより、塗膜剥離工程の自動制御をおこなうという提案もある¹¹⁾。レーザー照射部分の色の変化をモニタリングするため、可視光を加工用レーザー光と同軸で照射させる光学系も提案されている¹²⁾。

処理対象物の表面温度上昇を抑制するために、加工ガスを吹付けることも行われている¹³⁾。

モータやトランス等の小型化・薄型化のため、平角絶縁電線(平角エナメル線等)を渦巻状に巻回積層した超高占積率コイルが開発され、端末被膜剥離にレーザーが利用されている¹⁴⁾。

被膜電線の接合端子部分をレーザーで剥離する工程と、半田槽による半田付け工程を連続して行える装置が提案されている¹⁵⁾。

デジタルカメラの本体ケース(金属製)への印字は、表面に形成された塗膜をレーザーで部分的に剥離することにより、描かれている。従来の塗膜への直接レーザー照射方法では、基材表面が焦げてレーザー痕が残ることがあり、外観の見栄えが悪いという問題があった。これを回避するため、金属ケースの裏面からレーザー照射する方法が提案されている¹⁶⁾。

建設機械の燃料タンクには、メッキ鋼板が使用されている。タンク本体にドレンボスやサクシヨンボスを溶接する際には、溶接箇所メッキ層を剥がす必要があり、グラインダ処理されている。このグラインダ処理に代わり、レーザークリーニングによるメッキ層の部分剥離が行われて

いる¹⁷⁾。

耐熱性要求に対応する電線では、絶縁被覆としてポリアミドイミドが使用されるが、継線時の熱による被覆剥離は容易ではない。機械的方法に代わり、レーザー剥離も普及しつつあるが、溶融した被覆の一部や、炭化した被覆の一部が芯線に残留付着する場合がある。パルスレーザーを照射し、芯線・絶縁被覆界面に気泡発生・膨張させて被覆を破裂し飛散させる方法が提案・権利化されている¹⁸⁾。

航空機の機体に施されている塗装は、定期的にメンテナンス(剥離と再塗装)を必要としており、従来は、溶剤を利用した化学的方法と機械的方法によっていた。

化学的方法による塗膜剥離には、

- ① 溶剤塗布前に機体のデリケートな部分をマスキングする必要がある。(塗装剥離後にはマスキングを剥がす作業も発生する)
- ② 化学物質を取り扱うための、作業者の安全衛生管理。
- ③ 大量の水を必要とする。(航空機から溶剤を洗い流すため)
- ④ 有害廃棄物が大幅に発生。
- ⑤ 発がん性の六価 Cr プライマーが廃棄物となり流出。
- ⑥ 胴体部分のみに使用限定。(翼部分は、溶剤が機構内に侵入する恐れがあり、溶剤使用禁止)
- ⑦ 有害廃棄物処理コストの発生。

という課題がある。このような背景から、米空軍(USAF)兵站部門は、1970年代より、従来の化学的・機械的方法に代わる軍用機機体の塗膜除去方法の調査を開始し、1980年には、既にレーザーが最も有力な塗膜剥離ツールであるとの結論に達していた¹⁹⁾。出力20~30kWのCO₂レーザーを搭載した自動塗膜剥離システムにより、フルサイズ(胴体部分と翼部分)の航空機のメンテナンス作業が実現している²⁰⁾。

参考文献

- 1) 特開 S59-200765「Al 溶射鋼の Al 溶射被膜除去方法」住友金属工業(株)
- 2) 実開 H01-157519「表面皮膜剥離装置」藤倉電線(株)
- 3) 特開 H02-297913「マグネットワイヤの絶縁被膜剥離方法とその装置」ソニー(株)
- 4) 特許 2784224「ドラム端部の塗膜除去方法および装置」三田工業(株)
- 5) 特開 H06-092100「表面処理装置」(株)サンケイプランニング
- 6) 特開 H09-174263「被覆線の絶縁被膜除去方法及び装置」ミヤチテクノス(株)
- 7) 特許 3583233「金属板の表面を被覆するフッ素樹脂塗膜の剥離方法」リンナイ(株)
- 8) 特開 H10-128227「塗膜除去装置」スズキ(株)
- 9) 特開 H10-305376「レーザー処理装置と塗装除去方法」住友重機械工業(株)
- 10) 特開 H10-309515「レーザーによる塗装除去方法及びレーザー処理装置」住友重機械工業(株)
- 11) 特開 H10-309516「レーザーによる塗装除去方法及びレーザー処理装置」住友重機械工業(株)
- 12) 特開 H10-309517「レーザー処理装置及びそれを用いた塗装除去方法」住友重機械工業(株)
- 13) 特開 H10-309899「レーザー処理装置及び塗装除去方法」住友重機械工業(株)

- 14) 特許 4000187 「コイル端末の絶縁被覆除去方法」 ミヤチテクノス(株)
- 15) 特開 2000-299240 「被膜剥離機能付の半田付装置」 松下電器産業(株)
- 16) 特開 2006-192334 「塗膜剥離方法」 富士写真フイルム(株)
- 17) 特開 2007-039716 「レーザー光によるメッキ層剥離方法、加工メッキ鋼板、作業機械の防錆燃料タンク及びレーザー加工機」 新キャタピラー三菱(株)・(株)日平トヤマ・木下製缶(株)
- 18) 特許 4275120 「コイル部品の製造方法及び製造装置」 TDK(株)
- 19) S. Ream, Laser system strips paint from full-size aircraft Process alleviates costs and environmental impact, Industrial Laser Solutions Vol.31, No.5, pp.5-10(2016)
- 20) <http://lrsystems.com>.

3.3 錆を対象としたレーザークリーニングの検討例

錆を除去するには、ブラスト、火炎放射、手作業による掻き落とし、酸洗い等の方法が取られてきた。これら従来法は、安全・環境面の問題だけでなく、生産性(作業性)・コスト面でも大きな問題であった。このような問題の解決手段として、レーザーによる除錆が注目を集めている¹⁾。

ブラスト加工での除錆において、不活性と還元との混合雰囲気、または単独雰囲気中でレーザーを照射することにより、処理表面の面粗度のバラツキを抑制することが提案されている²⁾。

還元性雰囲気下で、レーザー除錆することにより、処理された表面だけを部分的に活性化することが提案されている³⁾。

レーザー除錆は、錆を蒸発温度以上に加熱して蒸発させるものであるが、母材側に熱的影響を及ぼすことが、脱炭部の発生等の問題を引き起こす場合もある。クラックが入ったスケールの破片(島)をできるだけ少ない照射エネルギーで溶融、蒸発させ母材への熱影響を少なくするため、パルス幅 200ns 以下の UV レーザーを使用することが効果的であるとされている⁴⁾。

金属表面の酸化皮膜中に汚染物質が含まれ、酸洗浄や電解研磨では、酸化皮膜中の汚染物質を除去することができない場合があり、従来は加熱脱ガス処理が為されて来た。これをレーザーによる除錆(酸化被膜除去)に置換することが効果的であるとされる⁵⁾。

送電線用鉄塔など屋外設置設備は、厳しい環境条件下に晒されるため、母材鋼板の表面防錆を目的として溶融亜鉛メッキと、一部には航空障害標識塗装が施される。このようなメッキや塗装が経年変化により劣化した場合は、除錆・再塗装作業が必要である。屋外設備のレーザー除錆には、パルス幅約 10ns の IR レーザー照射(エネルギー密度 $0.4\sim 0.28\text{J}/\text{cm}^2$)が有効とされる⁶⁾。

また、パルス幅 5nsec 程度の Nd-YAG レーザー(基本波・2 倍波・3 倍波)を、エネルギー密度 $250\sim 11000\text{mJ}/\text{cm}^2$ 、ピークパワー密度 $70\sim 2200\text{MW}/\text{cm}^2$ で照射するとの提案もある⁷⁾。

屋外での作業を想定した車載レーザーシステムと携帯型レーザー照射装置に関する提案もなされている⁸⁾。

金属材料の製造には、溶解・精錬・鍛造・圧延・熱処理等の高温の工程が存在する。高温の工程において大気中の酸素や窒素と反応し、金属材料表面に酸化物や窒化物などからなる表面物質(スケール)が生成付着する。工程で発生したスケール除去に、所定のエネルギー密度と走査速度の適正範囲が存在するとされる⁹⁾。

金属材料の製造現場で、圧延・熱処理等の後に、ロールに巻き取られる。金属素材表面に形成されたスケール除去速度は、ロールの巻き取り速度に対応して、高速であることが要求される。帯状素材の幅をカバーするラインビームに成形されたレーザー光を使用するとの提案がある¹⁰⁾。

電子部品の電極表面や、はんだ表面に生成した酸化膜は、機械的方法か、化学的方法で除去されている。150°C以上に加熱された不活性ガス噴射とレーザー照射を併用することによって、電子部品電極の表面酸化膜を除去する方法が提案されている¹¹⁾。

参考文献

- 1) 特許 1358536「錆除去方法および装置」ローベルト・ランゲン
- 2) 特開 S59-053688「金属表面の酸化スケール除去方法」新東工業株式会社
- 3) 特開 H01-2492841「被処理物の表面活性化方法」三菱電機(株)
- 4) 特許 2627187「鉄鋼品のスケール又は錆除去方法」新東工業(株)
- 5) 特開 H08-027584「金属材料の洗浄方法および表面処理方法」日立造船(株)
- 6) 特許 3306291「屋外設置方金属製設備の錆の除去方法」東京電力(株)
- 7) 特開 2000-263259「パルスレーザー表面処理方法およびその装置」東京電力(株) (株)東芝
- 8) 特開 2003-285171「レーザー除去加工装置、ハンディトーチ及びレーザー除去加工方法」(株)東芝
- 9) 特開 H09-310189「金属材料のデスケール方法」住友金属工業(株)
- 11) 特開 H11-269683「金属表面から酸化物を除去する方法及び装置」アームコ・インコーポレイテッド
- 12) 特開 2001-158985「金属酸化膜の除去方法および金属酸化膜の除去装置」上田日本無線(株)・(株)大成化研

3.4 放射性物質を対象としたレーザークリーニングの検討例

全世界での発電用原子炉数は、2023年3月時点で、運転中437基、建設中58基の計495基である¹⁾。原子炉の耐用年数を40年と仮定すると、今後の40年間(～2064年)に500基近くの原子炉を安全に廃止措置しなければならない。原子炉稼働中に、1基当たり平均でドラム缶12万本(24,000m³)の固体廃棄物を発生するとされており²⁾、これらの運転中に発生する廃棄物の処理も併せて考えると、放射化した物質を安全に処理するための「除染」は、極めて重要な技術であり、その中でも、レーザーは非常に有用な技術として広く、認識されている。

1996年、米国エネルギー省(DOE)が、原子力施設廃止措置に関する31件の国家的ニーズに対するレーザー技術適用検討の優先順位を規定した³⁾。このうち、優先順位2位の「汚染された金属の除染」と、優先順位5位の「材料リサイクル」については、レーザーが最も有望な技術であると位置付けされた。金属汚染除去は、研磨剤ブラストおよび化学的汚染除去技術が適用されているが、大量の二次放射性廃棄物の発生が課題とされた。(安全性(捕集)の問題だけではなく、コスト(放射性廃棄物の保管)増に繋がるためである。)

放射線で汚染した金属の酸化物層を除染対象とした場合、パルス幅30～40nsecのNIRパルスレーザー光を4.6～23J/cm²の表面エネルギー密度で照射することが報告されている⁴⁾。

レーザー除染の際、同軸ノズルからのアシストガスによる除去物質飛散のみでは、対象物表面に再び堆積してこれを再汚染するおそれがある。この再汚染を回避するため、サイドガスノズルからのアシストガスにより、除去物質を飛散させることが提案されている⁵⁾。

同軸ガスノズルとサイドガスノズルを併用しつつ、除去物質を吸収する吸収塔を設けるという提案もなされている⁶⁾。

当初、レーザーによる除染には、空間伝送されたCO₂レーザー光を一点に集光された状態で行われていた。近赤外レーザー光をファイバ導光し、シリンドリカル光学系により、線状集光ビームによる除染効率向上が提案されている⁷⁾。

加圧水型原子炉用水蒸気発生器の一次冷却水配管内では、外部から高出力レーザーを除染対象部位に導光することは困難である。除染対象部位近傍まで、レーザーを光ファイバで導光し、そのファイバ先端に取付けられた光増幅器で出力増幅されたレーザー光で除染するという提案がある⁸⁾。

原子力施設内では、Co⁶⁰、Ce¹³⁷、Sr⁹⁰のような放射性核種、PuO₂、UO₂のような放射性化合物で汚染される部分が発生する。汚染物質を除去しようとする、汚染物質が拡散する危険性もある。高強度レーザー光を照射することにより、表面を加熱溶融させることにより、放射性核種を固定又は封止するという提案がある⁹⁾。

放射性物質による汚染に対して、CWレーザーの垂直照射ではなく、ラインビームに成形したパルスレーザーを斜め照射する事により、除染効率を高める方法が提案・権利化された¹⁰⁾。

金属材料に付着堆積した酸化物層に取り込まれている放射性核種をレーザー除染する際には、放射性核種を取込んでいない酸化物層も同時に除去される。酸化膜は、耐食性によって、放射性

核種の取り込みを抑える働きがあるため、除染後に酸化剤による酸化膜形成処理が必要となる。除染を行うレーザー照射第1工程を実施後、酸化改質剤を供給しながらレーザー照射する第2工程を連続して行う方法が提案されている^{11),12)}。

原子力施設で発生する放射性汚染物質が、コンクリート構造物に付着した場合、コンクリートの多孔性により、汚染物がかなりの深さまで侵入・存在することとなる。汚染物の大部分(約90%)は、表層(数mm以内)にあり、表層を安全に除去できれば、放射性汚染レベルを低減できる。レーザー照射により、コンクリート表面近傍には、脱水による水蒸気の発生膨張と、熱応力が生じる。その結果として、コンクリート表層にクラックが発生し、汚染部分の剥離を起こすことができる¹³⁾。

高出力レーザー照射により、コンクリート表層を溶融・凝固させた後、超音波振動を負荷することにより、汚染物質を回収する方法が提案されている¹⁴⁾。

コンクリートの除染では、粉塵発生部に筒状の吸引ノズルを設置して粉塵を回収する。吸引ノズル先端に毛丈の長い柔軟なブラシを取付けることにより、回収対象面の凹凸にも対応可能とする技術が提案・権利化されている¹⁵⁾。

レーザー照射によるコンクリート溶解層に高圧ガスを噴射し、溶融層を汚染物質粉として回収する除染方法も提案されている¹⁶⁾。

金属(多くはステンレス鋼と軟鋼)製原子力プラント機器は放射性物質で汚染され、微粒子または溶液の形態で、鋼基質中に深さ約4mmまで浸透し得るとされている。アシストガスを使用せず、高パワー密度レーザーを照射し、スパッタとして溶融金属を吹飛ばす。圧縮空気と水混合のスプレーを横方法から噴霧し、溶融飛散金属スパッターを吸引・回収する方法が提案されている¹⁷⁾。

有機物質内に埋没した汚染物質を対象とした除染方法としては、レーザー加熱により、①200～700°Cの温度範囲に加熱し、C-H結合が分解し、炭素(チャーコール)を形成させて回収するか、②700～1000°Cの温度範囲に加熱し、燃焼させてガス及び煤煙を回収する方法が提案されている¹⁸⁾。

放射性物質・化学的毒物取扱施設は、漏洩や摩耗防止、対薬品耐久性向上のため、壁や床等にエポキシ、ウレタン樹脂等で塗装されている場合が多い。除染対象部に覆いを被せ、内部に不活性ガスを供給しつつ、レーザー照射し、塗膜を炭化させることによって除去する方法が提案・権利化されている¹⁹⁾。

金属・有機物を問わず、UVパルスレーザーを照射して衝撃力で表面剥離を起こす除染方法が提案されている²⁰⁾。ステンレス鋼に対しては、還元(弗化ガス)ガス雰囲気有効とされている。

原子力施設における比較的大口径の配管内に付着する放射性汚染物質除去は、高圧水、研磨材入り流体、化学薬品による溶解等の方法が取られ、二次廃棄物の発生が問題であった。レーザー除染に置換することにより、二次廃棄物の発生がなく、無人で稼働できるレーザー除染システムが提案されている²¹⁾。

除染対象物表面は、平坦とは限らず、凹凸の大きい場合、従来のレーザー除染方法では、適切なレーザー照射条件を維持できず、除染が不十分となる恐れがある。アシストガスノズル内に集光レンズを組込み、且つガスをレーザー光軸に対して非対称に供給するヘッド部分を除染対称面に倣い制御する方法が提案・権利化されている²²⁾。

原子炉圧力容器に設けられた給水管、主蒸気管等の内周面には、放射化した金属酸化物層が付着しており、圧力容器内部点検の際には、除染が必要であり、レーザー除染装置が提案されている²³⁾。

水中でのレーザー除染実現のため、配管壁面に密着する2重ノズル構造とし、内筒からはレーザー光と高圧空気を供給すると同時に、外筒は吸引・除塵する方法が提案されている²⁴⁾。

水中または薬剤(酸化剤・還元剤等)を含む液中で、放射性流体と接触する構造材や機器の表面の広範囲に、均一化低エネルギー密度レーザーを照射することにより、剥離放射性物質の気中への拡散放出を防ぐ方法が提案されている²⁵⁾。

反射光強度または発光強度より除染完了の判定と除染装置ヘッドの移動機構を動作させる制御装置を装備することにより、除染を短時間・高効率で確実にを行い、過剰なレーザー照射を防止するとともに、汚染物質の拡散を抑制する方法及び装置が提案されている²⁶⁾。

二次生成物回収フードを取付けたレーザー照射ヘッド・伝送光ファイバ・レーザー発振器・レーザー照射ヘッド駆動機構・移動装置・制御装置を備えた無人レーザー除染システムが提案・権利化されている²⁷⁾。

原子力施設の熱交換用配管内を自走するYAGレーザー除染装置も提案されている²⁸⁾。

レーザー除染装置光学系の劣化を監視する手段(光学素子の振動計測)と、劣化監視手段の出力信号から光学系劣化と判断された場合には、レーザー照射を自動停止させるシステムが提案・権利化されている²⁹⁾。

除染装置には、放射化粉塵の吸排気用配管が付帯するが、除染作業の自由度を拘束する場合もある。レーザー除染装置のヘッド先端に雰囲気ガス循環装置と粉塵吸着装置を取付けることにより、粉塵吸排気配管を廃する方法が提案されている³⁰⁾。

使用済核燃料の再処理に伴って発生する高レベル放射性廃液の処分は、ガラス溶融炉を用いて高レベル放射性廃液をホウ珪酸ガラス固化後、ガラス固化体を炭素鋼製厚肉円筒形容器(オーバーパック)に密封収納・地中埋設される。ガラス溶融炉内レンガ表面に付着した高レベル放射性廃液固化ガラスにレーザー照射し、熱膨張・脆性破壊を誘起粉碎して回収する方法が提案・権利化されている³¹⁾。

放射性固体廃棄物を、まず機械的方法等によって細断した上で、パルスレーザー照射による衝撃力で放射性物質を剥離・回収する2工程プロセスが提案されている³²⁾。

参考文献

- 1) 原子力白書(令和4年度版), 資料編, p.351

- 2) L. Lin, The Potential Role of High-Power Lasers in Nuclear Decommissioning, Nuclear Energy, Vol.41, No.6, pp.397-407(2002)
- 3) E. C. Crivella et al., Laser Surface Cleaning, Industry Partnerships to Deploy Environmental Technology, DOE/MC/30359-97/C0820(1996)
- 4) 特許 1559860 「レーザーによる除染法」 ウェスチングハウス エレクトリック コーポレーション
- 5) 特開 S63-241399 「レーザー除染装置」 (株)東芝
- 6) 特開 H04-109200 「レーザー除染装置」 中部電力(株)・(株)東芝
- 7) 特許 2773785 「レーザーによる除染法と除染装置」 住友重機械工業(株)
- 8) 特開 H04-289500 「レーザーによる加工装置」 フラマトム
- 9) 特許 3141030 「表面を処理する方法」 ブリテイッシュ・ニュークリアー・フューエルズ・ピー・エル・シー
- 10) 特許 2615362 「レーザーによる表面付着物の除去方法及び装置」 理化学研究所
- 11) 特開 H08-110396 「レーザーによる除染方法」 石川島播磨重工業(株)
- 12) 特開 H08-112683 「レーザーによる表面改質処理方法及び装置」 石川島播磨重工業(株)
- 13) 特許 3530961 「表面処理方法」 ブリテイッシュ・ニュークリアー・フューエルズ・パブリック リミテッド カンパニー
- 14) 特開 H11-142591 「無機物質表層剥離装置」 三菱電機(株)・新菱冷熱工業(株)
- 15) 特許 3054711 「ブラシ状の囲いを備えた粉塵回収用ノズル」 科学技術庁原子力局長
- 16) 特開 2001-116892 「レーザーと高圧ガスを用いた無機物質表層の除染方法及びこれに用いる装置」 大成建設(株)・三菱電機(株)・新菱冷熱工業(株)
- 17) 特表 H08-505704 「放射性物質除染」 ブリテイッシュ・ニュークリアー・フューエルズ・ピー・エル・シー
- 18) 特表 H10-502166 「汚染除去方法」 ブリテイッシュ・ニュークリアー・フューエルズ・ピー・エル・シー
- 19) 特許 4054105 「塗膜処理方法」 大成建設(株)
- 20) 特開 H10-075991 「紫外線レーザービームによって物体を清掃または汚染除去するための方法および装置」 コミツサリア タ レネルジー アトミック
- 21) 実新 3022303 「レーザー光による自走式配管内壁除染装置」 (株)アトックス
- 22) 特許 3044188 「レーザー除染法」 核燃料サイクル機構・(財)産業創造研究所
- 23) 特許 4398774 「管状部材のクリーニング方法およびクリーニング装置」 (株)東芝
- 24) 特開 H09-281296 「レーザー除染装置」 石川島播磨重工業(株)
- 25) 特開 H11-183693 「除染方法およびその装置」 (株)東芝・東芝エンジニアリング(株)
- 26) 特開 2000-206292 「レーザー除染装置の制御方法及びレーザー除染装置」 (株)日立製作所
- 27) 特許 3151667 「汚染された無機物質表層に適用するレーザー除染システム」 科学技術庁原子力局長
- 28) 特開 2001-059892 「レーザー除染方法及び装置」 石川島播磨重工業(株)
- 29) 特許 4295885 「レーザークリーニング装置」 (株)東芝

- 30) 特開 2002-189099 「レーザ除染装置」(株)日立製作所
- 31) 特許 4228226 「ガラス除去方法」(株)I H I
- 32) 特開 2006-184088 「放射性固体廃棄物の除染方法および装置」(株)東芝

3.5 文化財を対象としたレーザークリーニングの検討例

Asmus は、大理石等へのルビーレーザー照射するヴェネツィアでの研究において、下層の材料と比較して表面汚染物質の選択的蒸発の結果として、クリーニング現象(濃い色の付着物の吸収係数が蒸発に有利な温度上昇をもたらすほど十分に大きかったのに対し、下にある材料の吸収係数が十分に小さく、温度上昇を亀裂の発生を許さない適度に抑制)が発現することを見出した¹⁾。

Asmus の研究以降、歴史的建造物を含めた貴重な文化財のレーザークリーニング技術研究は、欧州を中心として進められ、1995 年に設立された「Lasers in the Conservation of Artworks (LACONA)」は、200 名を超える現役の保存修復家と 100 名を超えるその他の科学者によってサポートされ、文化財修復分野におけるレーザー応用に関する国際会議を隔年で開催するに至っている²⁾。現在、大理石や石灰岩の彫刻のクリーニング、絵画の修復、写本のクリーニングと修復、博物館収蔵の工芸品保存など、幅広い保存活動に、300 台以上のレーザーシステムが稼働している³⁾。

石材、ガラス、金属、セラミック、木材、紙等、文化財には、様々なクリーニング対象物質が想定される。ピークパワーが数百 kW～数十 MW、集光パワー密度が十数～数十 MW/cm²、パルス幅が数 nsec～数 μsec のパルスレーザーを使用し、クリーニングの進行に応じて、レーザー波長を連続的又は断続的に調整する方法が提案されている⁴⁾。

屋外での文化財レーザークリーニング作業を想定した、携行型レーザークリーニング装置が提案されている⁵⁾。

参考文献

- 1) W. M. Steen, J. Mazumder, Laser Material Processing, 4th ed.; Springer: London, UK, 2010; pp. 417–440, ISBN 978-1-84996-061-8.
- 2) <https://lacona-conferences.org/>
- 3) S. Siano et.al, Laser cleaning in conservation of stone, metal, and painted artifacts: state of the art and new insights on the use of the Nd:YAG lasers, Appl Phys A (2012) 106:419–446, DOI 10.1007/s00339-011-6690-8
- 4) 特表 H03-504687「レーザーを用いた素材表面の洗浄方法」アジャンス レジヨナル ドゥ デ ブロプマン テクノロジク
- 5) 特開 2002-301439「携行型レーザークリーニング装置」平尾大輔

3.6 金型を対象としたレーザークリーニングの検討例

ポリマー・モノマー等の有機材料を成形する為に金型が使用される。金型成形面・合せ面の付着物残留は、成形不良に直結するため、定期的な金型洗浄は不可欠である。自動化・無人化が容易なレーザー技術応用は、広く普及しつつある。工業材料だけでなく、食材成形・焼成処理用に金型を利用する食品産業においては、薬品や溶剤を利用する必要がなく、非接触で洗浄処理が可能なレーザーは利用されている。

ゴムや樹脂等の成形金型においては、金型を繰返し使用するため、製品の離型後に成形金型に付着残留している材料カスを除去する必要がある、様々な機械的・化学的方法が提案、使用されている。

低出力の短パルスレーザー照射により、金型表面に断続的な熱衝撃波と微少共鳴を起こさせる方法が提案されている¹⁾。

自動車タイヤの加硫加熱金型は、加硫プロセス中の発生ガスによって汚染されやすく、洗浄頻度が高い。短パルス高出力レーザー照射により、金型表面で発生する衝撃波の作用により、金型表面に付着残留している材料カスを排除することが提案・権利化されている²⁾。

タイヤ成形金型面には、タイヤ溝に対応した複雑なパターンが加工されており、定期的な金型洗浄には、多くの労力と、金型を変形させないような細心の注意を必要としていた。3次元多軸制御レーザークリーニングシステムと金型搬送台車を組合せた、自動化システムが提案されている³⁾。

3次元多軸制御レーザークリーニングシステムでは、光軸がズレて洗浄不良になる恐れがあるとして、洗浄対象である金型を3次元揺動姿勢制御するシステムが提案されている⁴⁾。

加硫成形装置に搭載されたままの状態、金型を洗浄する工場内移動型レーザークリーニングシステムが提案されている^{5),6)}。

LSI封止処理では、表面にクロムメッキが施された金型にエポキシ樹脂等を充填・硬化処理を行う度に、金型表面に徐々に樹脂残渣が付着していく。このため半導体製造封止用金型は、クロムメッキ層を損傷しないように留意しつつ、高い頻度で定期的にクリーニングが必要である。ダブルパルスレーザー光(発振器からのレーザー光を一旦2分岐し、光路長を変えて一方を遅延させる形で、再度同一光路上に戻す)ことにより、クロムメッキ層の損傷抑制と熱応力緩和する方法が提案・権利化されている⁷⁾。

参考文献

- 1) 特開 H09-122939「レーザークリーニング方法および装置」大同特殊鋼(株)・住商機電貿易(株)
- 2) 特許 4043546「エラストマー材料で出来た製品の加硫金型の洗浄方法及びその洗浄装置」ピレリ・コオルディナメント・プネウマティチ・ソチエタ・ペル・アツィオーニ
- 3) 特開 H09-277272「タイヤ成形用金型の外金型クリーニング装置」大同特殊鋼(株)
- 4) 特開 2004-167744「金型洗浄方法及び洗浄装置」東洋ゴム工業(株)
- 5) 特開 H08-323774「加硫金型の清掃方法および装置」ユニローヤル・エングレベルト・ライフエン・ゲゼルシャフト・ミト・ベシユレンクテル・ハフツング

- 6) 特開 H11-099524「金型クリーニング装置」(株)富士インダストリーズ
- 7) 特許 4423465「レーザ加工方法及びレーザ加工装置」住友重機械工業(株)

3.7 その他のレーザークリーニングの検討例

3.1～3.6以外のレーザークリーニング事例をまとめる。マイクロエレクトロニクスや医療分野等での事例が含まれる。

半導体フォトリソグラフィ工程では、線幅の約 1/4 以上の径を有する粒子はマスクから除去されなければならないが、液体・気体噴流を用いる従来方法では、洗浄が困難である。従来法に代わり、高ピークパワーのレーザーパルス照射し、その衝撃で付着粒子を除去することが提案されている¹⁾。

基板処理表面に不活性ガスを側方から供給しつつ、KrF エキシマレーザー(35mJ/cm²)を照射することが効果的であるとの提案・権利化されている²⁾。

基板表面から付着物除去する技術としては、従来、有機溶剤を用いた超音波洗浄などのウェット・プロセスが採用されてきた。有機溶剤を使用せず、環境にも人体にも優しいドライプロセス技術として、レーザークリーニング技術は有望な技術である。エネルギー分布均一化された短波長パルスレーザー光を用いた、基板自動洗浄システムが提案・権利化されている³⁾。

HD や Si ウェハ等の平滑表面は、高い清浄度が要求され、従来より、溶剤・脱イオン水・超純水等で洗浄されてきた。洗浄すべき平滑面に対して、仰角 30° 以下でレーザークリーニングする方法が提案されている⁴⁾。

機密チャンバー内に配置した半導体に対して、ウィンドー越しに集光パルスレーザーを照射する。レーザー集光点は、半導体表面ではなく、表面直上とし、プラズマ衝撃波を利用したレーザー装置が提案されている⁵⁾。

半導体ウェハや I C チップ用検査プローブ針には、アルミや金等が不純物として付着するため、洗浄が必要である。プローブ針の変形・破損を防ぐため、パルスレーザーによる非接触洗浄方法が提案されている。エキシマレーザーのラインビーム照射が望ましいとされている⁶⁾。

電子部品製造のフォトリソグラフィ工程では、薬品による溶解や膨潤により、フォトレジストの剥離除去が行われている。大量の薬品と水が用いられることとなり、深刻な環境問題となりがねない。短パルスレーザー光をフォトレジストに照射し、レジストと基板界面で発生する熱衝撃剥離現象を利用することにより、薬品・水を大量に使用しないドライプロセス技術が提案・権利化されている⁷⁾。

レーザーによるパターン直接描画により、フォトリソグラフィ工程を廃し、製造工程を簡略化することが可能である。しかし、描画時に発生する加工飛散物が、電子基板表面に付着し、デブリとなる。レーザー描画加工ヘッドと基板表面間に液浸部を形成・循環させて、デブリを循環回収する技術が提案されている⁸⁾。

熱可塑性樹脂シート・フィルム成形加工用ロール表面には、経時的に無機物、有機物等が付着堆積し、製品フィルムの表面欠陥や、厚さ斑の原因になる。このため、従来は、薬剤を利用した化学的洗浄や、コロナ放電・紫外線を利用する方法も検討されてきた。ロール表面に、可視～赤

外波長域のレーザーを照射し、熱による効果で付着物を分解・昇華させる方法が提案・権利化されている⁹⁾。

研削・研磨砥石表面には、使用中に微粉化した加工材料が強固に付着する。従来はエアブロー等で除去が為されていたが、完全な除去は困難であった。砥石表面にレーザーを照射し、微粉化付着物と砥石のレーザー光吸収率差を利用して、付着物だけを蒸散させる方法が提案されている¹⁰⁾。

飲料ガラス壺等のリターナブル容器は、回収された後に、洗壺機で洗浄される。洗壺工程では、容器外表面に貼付されたラベルを剥離する必要があるが、洗壺機投入前に、ブラシ等により傷を付けて、ラベルが剥離し易くしていた。ラベルにレーザー照射し、ラベル表面コーティングを除去し、洗壺機の洗浄水をラベルの内部に浸透しやすくする方法が提案・権利化されている¹¹⁾。

低濃度の PCB を絶縁油とするトランス等は、容器に付着した PCB を除去するが必要であり、化学洗浄や、蒸発分離が行われていた。レーザー照射により、PCB を電子的に励起させ、分解除去する方法が提案されている¹²⁾。

滅菌・除染工程において、レーザー光を補助的に利用する事例もある。医薬品製造の充填・加工工程では高潔度が必要であり、グローブボックス(チャンパ内に突出したグローブを介して医薬品への直接接触を回避して作業)が使用される。グローブの滅菌・除染が必要であり、ボックス内に過酸化水素ガスを充填して、グローブ表面に過酸化水素の凝縮膜を形成させている。確実な滅菌・除染を保証するため、グローブに近赤外レーザーを照射し、過酸化水素の凝縮膜形成に起因する透過率変化を監視する方法が提案・権利化されている¹³⁾。

参考文献

- 1) 特許 1963666 「微小粒子の除去処理装置」 IBM
- 2) 特許 2634245 「高エネルギー源からの照射による表面汚染物の除去方法および装置」 オーダーリー シー エンゲルスパーグ
- 3) 特許 3106040 「基板表面のドライ・クリーニング方法」 理化学研究所
- 4) 特開 2000-202385 「レーザー光による平滑面の洗浄方法」 成澤亨
- 5) 特開 2003-171757 「レーザを用いる乾式表面クリーニング装置」 アイエムティ(株)
- 6) 特開 H11-326461 「プローブ針のレーザクリーニング方法とその装置」 ユニーク テクノロジー インターナショナル プライベート リミテッド
- 7) 特許 3853690 「フォトレジスト剥離除去方法」 (公財)レーザー技術総合研究所・東洋精密工業(株)
- 8) 特開 2007-029973 「レーザ加工装置とその加工方法及びデブリ回収装置とその回収方法」 ソニー(株)
- 9) 特許 1856305 「成形用ロール表面の付着物除去方法」 ダイアホイルヘキスト(株)
- 10) 特開 S62-287970 「砥石のクリーニング方法」 松下電器産業(株)
- 11) 特許 3321917 「回収容器のラベル処理装置」 澁谷工業(株)

- 12) 特開 2006-239484「有機ハロゲン化物除去装置」三菱重工業(株)
- 13) 特許 4619228「隔絶可撓性部材の除染方法、及び該除染方法に用いられる隔絶可撓性部材の凝縮検知装置」(株)エアレックス

4章 結言

本来、「クリーニング(洗浄)」とは、部材に付着している「汚染物を除去」することを意味している。しかし、「レーザークリーニング」に関しては、「汚染物を除去」することに留まらず、「意図的に部材表面に付着させた物質の選択的除去による機能性の発現」も包含されていくものと考えられる。空間的・時間的に極めて正確かつ限定的・選択的に照射処理できるレーザークリーニング技術の登場が、洗浄(クリーニング)技術の既成概念を超えて、新たな概念・価値を創造することが期待される。

地球規模での環境問題への社会的関心の高まりもあり、廃液処理も不要で、作業者の安全衛生リスク低減にも繋がるレーザークリーニング技術は、非常に有用で重要な技術であるとの認識が強まっている。

「レーザークリーニング」のメカニズムを体系的に整理しようとする試み(第2章参照)も幾つか認められるが、残念ながら、関連する用語の定義も含めて、共通言語化・共通認識の構築に至っていない。

レーザークリーニング技術の産業応用を進める為には、環境・安全衛生面だけでなく、経済合理性も極めて重要な要素であるが、レーザークリーニングの経済的側面に関して、具体的な数値を元に公表された資料は極めて少ない。公表されている米軍での実施例(設備の維持メンテナンスを目的とした塗装剥離)によると、従来技術(化学的洗浄法やサンドブラスト法等)と比較して、29%~58%のコストダウン効果が得られたとされている¹⁾。

民生の領域でも、今後ますます、その利用拡大が進む筈である。このように重要な基盤技術となりつつある「レーザークリーニング」の技術体系としての確立と共通言語化は急務であると考えられる。

参考文献

- 1) K. Wolf, Laser Strip: A Portable Hand-Held Laser Stripping Device for Reducing VOC, Toxic and Particulate Emissions(2009)
<https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=86c17c9802f3ab45da17eaf8bbcaa59ace01aed7>

公益財団法人 光科学技術研究振興財団
委託研究報告書(令和5年度)

レーザー科学技術の将来に関する調査研究
－国内外最新のレーザーを用いた表面処理の動向と
将来に関する調査－2. 除去プロセス

令和6年3月

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番1
TEL: 053-484-2501 <https://www.gpi.ac.jp/>

(禁無断転載)
