

第1章 レーザークリーニングの現状

1.1 レーザーの種類と特徴

1.1.1 レーザーとは

レーザー (Laser) とは Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation の頭字語で、すなわち誘導放出による光の増幅放射を現したいわゆる造語であり、アルベルト・アインシュタインの論文「放射の量子論について」を基礎原理とし、1960年代から急速に開発され進歩し、CD プレイヤー、DVD プレイヤーを代表として、広く適用されるようになった。

また、レーザーは、コヒーレンス性 (可干渉性)、単色性、指向性、集光性・高輝度 (高エネルギー密度) の特徴を持つ。

1.1.2 誘導放出による光の増幅

レーザーとして光を放出するためには媒質が重要である。産業界での代表例としては、炭酸ガス、Nd-YAG (ネオジウムをドーピングしたイットリウム、アルミニウム、ガーネット)、半導体にドーピングされたガリウム・ヒ素などがある。誘導放出の原理としては、媒質が外部からエネルギーを与えられると電子が励起 (エネルギー順位が上がる=ポンピング) し、元の状態に戻るときにエネルギーを放出、さらに波長の揃ったエネルギーを放出するのであるが、さらに誘導放出を加速させるには反射鏡などを利用したいわゆる共振器 (Cavity) 構造が必要である。

1.1.3 レーザーの発振方法と特徴

レーザー発振方法には大きく分けて、連続発振 (CW とも表記する) とパルス発振の 2 つの種類に分けられる。連続発振はレーザー光線を連続的に出力するため、レーザー発振に伴う発熱量を抜熱する必要があるが、装置そのものが大きくなる、大きな熱交換機器が必要となるといった特徴があるが、パルス発振の場合、ON/OFF 周期をもって発振するため装置そのものが小さく、熱交換機能も小さくて済む場合が多い。したがって、連続発振機器は大出力レーザーが存在するが、パルス発振機器の場合、低出力レーザーが多く、大出力レーザーはあまり存在しない。

1.1.4 レーザーの種類と特徴

レーザー発振器は媒質によって多種存在するが、産業界で主に使用されているレーザーの媒質を大分類すると、気体、固体、半導体、に分けられる。気体の場合、炭酸ガスレーザー、エキシマレーザー、ヘリウムネオンレーザーなどが代表例、固体の場合、Nd-YAG レーザー、ディスクレーザー、ファイバーレーザーなどが代表例となる。

炭酸ガスレーザーはいち早く産業界に導入され製造現場で広く使用されるようになり、なおかつ高輝度な機器も開発されている。一方、Nd-YAG レーザーは機器の特徴から高輝度化しにくいものの、パルス発振を利用して精密な溶接などができることから、炭酸ガスレーザーに遅れながらも製造現場へ導入されるようになった。

早期から産業界へ多く導入された代表的な 2 つのレーザー (炭酸ガスレーザー/Nd-YAG レーザー) には“発振波長”、“光の伝送方法”、“発振方法”などにおいて大きな特徴差がある。

それぞれの差を表 1.1.1 に表す。

表 1.1.1 炭酸ガスレーザーと Nd-YAG レーザーの特徴差

レーザー種類	代表的な発振波長	光の伝送方法	代表的な発振方法
炭酸ガスレーザー	10600nm	ミラー伝送	連続発振 (CW)
Nd-YAG レーザー	1064nm	光ファイバー伝送	パルス発振

また、レーザーを製造現場で使用する場合、対象素材の持つ吸収特性があり、素材によってレーザーを使い分ける必要がある。また、連続発振のレーザー光を素材に当てた場合、熱影響などの副作用も発生するため、パルスで照射し副作用を抑えるなどの検討も実施する必要がある。製造現場への装置導入においては、光の伝送方法によっては設置が容易、困難な差も発生することがあり、特徴によって使い分けも必要となる。

レーザー開発の後期になると、半導体レーザーやディスクレーザー、ファイバーレーザーなどが革新的な進化を遂げ、現在では前述する炭酸ガスレーザーや Nd-YAG レーザーから置き換えられる状況となっている。それぞれ、半導体レーザーは光を作り出すための電気から光へ変換する、いわゆる変換効率が高く、Nd-YAG レーザーでは加工しにくかった樹脂などでも適用、また、ビーム品質は悪いものの、それを利用して、部分焼き入れ、焼き戻し、樹脂接合、シントリングなどへの応用もなされている。一方、ディスクレーザーは Nd-YAG レーザーが正常進化したレーザーで非常に高ビーム品質、容易なビームスイッチング、高効率なレーザーとして製造現場で広く利用されている。ファイバーレーザーは高輝度レーザーの部類では最も新しい技術を利用したレーザーで、高ビーム品質、高輝度化（国内で採用されている最大出力：100kW）などのこれまでのレーザーにない特徴を兼ね備えている。また、ここまで述べたレーザーの中でも、多様化するアプリケーションに対応できる広い応用力を持っており、連続発振タイプから超短パルス発振タイプまで応用できる。

1.1.5 発振方式によるレーザータイプの違いと素材の反応

前述したように、レーザーにおける発振方式は様々なように感じられるが、実際には大きくわけて 2 種存在する。連続発振とパルス発振である。ただし、パルス発振には発振時間 (Pulse On time) が存在し、この発振時間が物質への影響も変化してくる。

連続発振機器の場合、ほとんどが、最大出力を刻んで発振するいわゆるチョッピングでパルス化できるが、最大出力は連続発振時の最大平均出力と同じであるため、大出力でパルス化したい場合、非常に大きなレーザーとなってしまう。

対して、パルス発振をベースとしたレーザーは、平均出力、およびエネルギー量こそ低いものの、最大出力は平均出力の 10 倍、100 倍、10000 倍もの高い出力を極短パルスで出力することができる機器も存在する。

連続発振とパルス発振のたまかな分類を図 1.1.1 に示す。

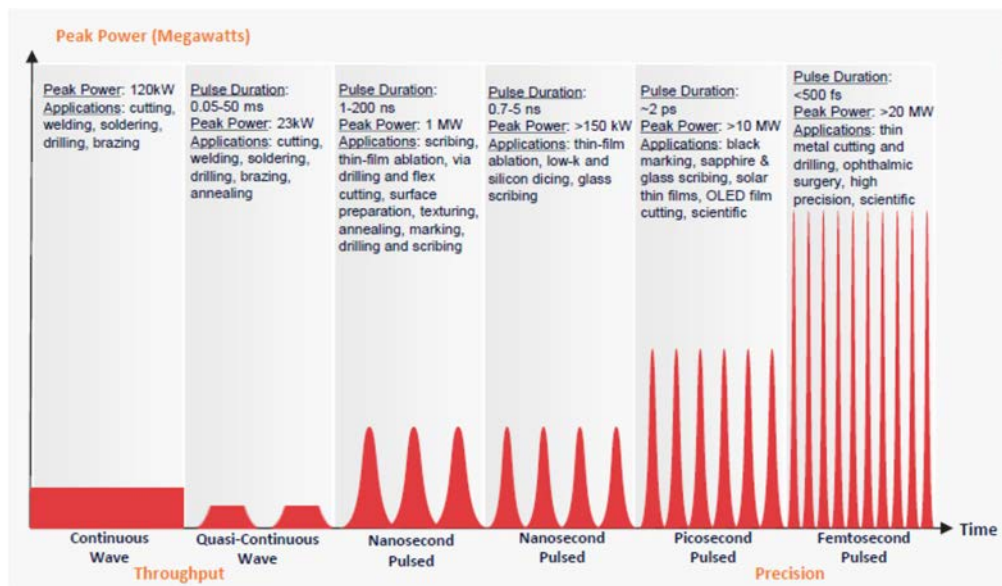


図 1.1.1 パルス幅と最大出力の分布図

(引用先：IPG Photonics Corporation Investor Guidebook 著者：James Hillier, Vice President of Investor Relations)

前述したとおり、連続発振タイプのレーザーでは発熱量も大きくなるため、水で冷やす構造となることが多く、大きな機器になってしまいがちだが、パルス幅が ns (ナノ秒) レベルの短パルスレーザーでは、平均出力 100W でも空冷のタイプのレーザー発振器も存在し、非常にコンパクト設計となっている。ただし、ps (ピコ秒) レベルを下回る超短パルスレーザーでは、水冷却を必要とするレーザー装置が主である。

パルス発振レーザーは主に ms, μ s, ns, ps と様々なパルス幅を出力するタイプが存在するが、加工結果についてもそれぞれに特徴があり、どのように加工するかによって選定が必要となる。加工におけるパルス幅 (図中では照射時間) とパワー密度の分布図を図 1.1.2 に示す。

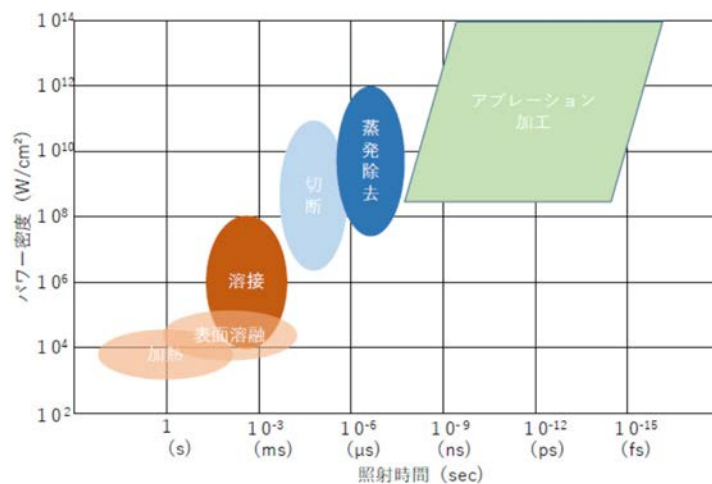


図 1.1.2 パルス幅とパワー密度における加工減少の分布図

レーザー装置の発振方法及びパルス条件を基に機器選定する場合は、加工対象物をどのように、どのレベルで加工したいかを前提条件とし、それに合わせたレーザー発振器のタイプを選ぶ必要がある。熱を加え溶接する場合にはパルス幅を長く照射することにより熔融凝固を起こし接合することができるが、例えば表面に付着した汚れや塗膜などに集中して除去し、母材への過度な入熱量も抑えるためには、nsレベルのパルス幅のレーザーを照射できる機器を選定することが考えられる。このような選定によって、母材への副作用もコントロールすることが可能となる。

1.2 レーザークリーニングの現状

これまで、自動車や航空機をはじめとする工業製品の洗浄技術として、有機溶剤や酸などの薬品による洗浄、水などを用いた高压洗浄、サンドブラストによる洗浄方法などが広く用いられてきた。しかしながら、近年、環境規制が厳しくなったことから、これらの洗浄方法で排出される二次廃棄物処理の課題を解決するため、廃材がほとんど出ないレーザークリーニング技術に注目が集まっている。

レーザークリーニングは、高いエネルギー密度のレーザー照射により固体あるいは液体の表面から構成物質が爆発的に昇華、蒸散されるレーザーアブレーションと呼ばれる現象を利用しており、主にパルスレーザーをスキャナでスキャンし、材料の最表面層に照射することで、表面のコーティング層、あるいはコンタミネーション層(何らかの汚染物質を含む層)を蒸発させる。同時に材料の表面にはマイクロプラズマが生成し、その衝撃波、熱膨張圧で目標物が破壊される。適正なレーザーパラメータを選択することで母材に損傷を与えることなく安全にコンタミ層のみを除去することができる。生成した飛散物はバキューム装置で吸引し、フィルターに吸着させることにより回収が可能である。母材に損傷を与えないためのレーザークリーニングの要件として、**図 1.2.1** に示すように表面層がレーザーアブレーションを起こすために必要なエネルギー密度を E_c 、母材そのもののアブレーションが起きるエネルギー密度を E_s とした場合、 $E_c < E_s$ の関係が成り立つ条件を選定する。

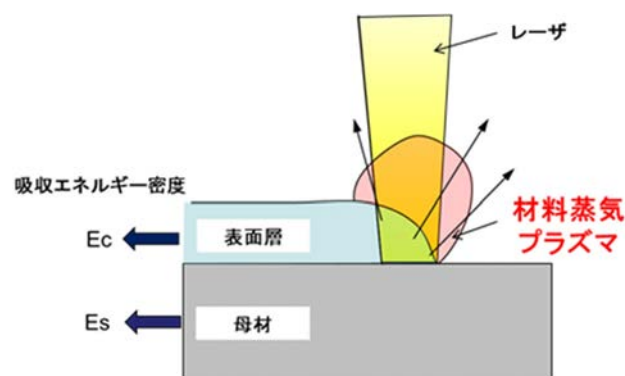


図 1.2.1 レーザークリーニング技術の基本原理

パルスレーザーによるレーザークリーニングは、**図 1.2.2** に示すようなレーザー照射ヘッドを用い、試験片へレーザー照射を行い、この照射位置を線状にスキャンし、レーザー照射ヘッドを動かすことにより表面層の除去を行う。

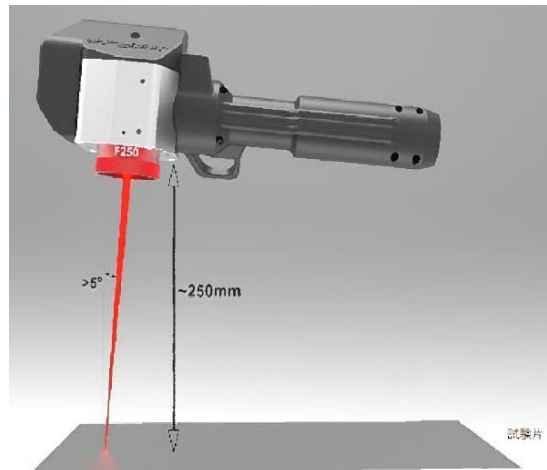


図 1.2.2 パルスレーザーによるレーザー照射の概念

近年，1.1.5 項に説明した通り，数多くのタイプのパルスレーザー発振器の開発が進んでおり，瞬間的に高いエネルギーを連続的に投入することが可能になっている．レーザークリーニングは主にこの技術を応用して，開発が進められている．これらのレーザー発振器を用いたレーザークリーニングの現在の適用例は，図 1.2.3 に示すように，多岐に渡っており，除去対象の表面材と母材の種類や，その接合状況などにより，適正な施工条件は異なる．そのため，正確に除去状況を把握するためには，それぞれの材料に対し，表面層残留の評価が必要である．評価には，表面の状態を目視で観察することや，粗さによる評価，SEM 観察および表面成分分析が用いられており，後述する試験においてもこれを応用して評価を行う．

1. 自動車
溶接前後処理, 金型クリーニング, 酸化膜除去, 塗装剥離
2. 航空機部品
塗装剥離
3. 電力
火力発電ボイラ等の検査・計測の前処理
4. 原子力
原子カプラントの低レベル除染
5. 半導体製造
ICパッケージ金型のクリーニング
6. インフラ関連
塗装剥離, 錆取り

図 1.2.3 レーザークリーニングの適用例