

レーザー加工技術

サイバーレーザー(株)
住吉 哲実

1 はじめに

レーザー加工技術はレーザー技術黎明期から光エネルギー応用の最重要技術の一つであった。物質と光の相互作用の探求を目的として様々なレーザーが創出、発展してきた経緯から、現在、あらゆる産業分野でレーザー加工が導入されていることは不思議なことではない。その特長は非接触加工、高精細加工、難加工物質の加工など、機械加工ではできない加工を可能にする点にある。従来の機械加工技術による微細加工において加工サイズが極限に達しており、加工対象一つあたりにかかるコストが高くなっているという背景がある。たとえば、極小バイト(刃)による穴あけでは、バイトの交換が頻繁で、コストと時間がかかっている。そのような加工ではレーザー加工の非接触加工特性が極めて魅力的である。

レーザー加工は、金属の切断、溶接、穴あけの分野で比較的早くから実用化された。レーザー装置としては炭酸ガスレーザーとランプ励起Nd：YAGレーザーが使われた。これらのレーザーが選定され開発が進められた理由としては、本加工に必要なパワーレベル(kW)を実現できるレーザーであったことによる。レーザー加工では、加工対象物と光の相互作用が目的の加工を達成するかが重要である。上記、溶接、切断などの例では加工に十分なパワーが得られることが必要であり、実際それが開発によって達成されている。

最近、レーザー加工で注目を集めているのが、ナノ微細加工であり、アブレーションと称する現象を利用する。

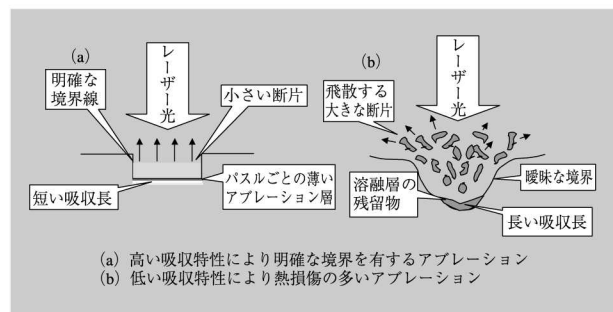


図1 アブレーション加工特性

その加工の様子を模式的に図1に示した。図1(a)は吸収係数が大きく、同(b)はそれが小さい場合である。材質はポリマー、セラミックスなどをイメージしている。一般的に、紫外レーザーの多くが図1(a)、赤外レーザーが同(b)に相当すると考えられている。

1980年代に紫外波長域のエキシマレーザーによる微細な材料加工研究により、この分野の研究は加速された。紫外波長域の材料の吸収特性が利用され、現在の穴あけやカッティング、材料表面への機能性付与などに応用されている。材料の機能面に着目すると、穴あけやカッティングにおいて、加工境界面の熱損傷が問題となる。熱損傷とは材料が変質、変性するレベルの熱が流入することにより機能、物性が損なわれることを示す。

本稿では、アブレーション加工における物質と光の相互作用について概説し、加工におけるレーザーパラメータの選定と装置選定について読者の一助になることを目的とする。「アブレーション」という単語の定義は確立されていないが、ここでは加工面の熱損傷量の少ないレ

ーザー加工を指すことにする。

第2章では、アブレーションのメカニズムについて解説し、第3章では吸収特性とレーザー波長の選定について述べる。第4章では紫外レーザー装置について実際入手可能な高効率波長変換光を紹介する。第5章では金属のアブレーション特性について説明しており、熱変性層を回避することが困難なことを示した。第6章では、サイバーレーザーが保有するレーザー装置を搭載したレーザー加工機「レーザーステーション」によるソリューションビジネスを紹介する。第7章で本稿をまとめている。

サイバーレーザー（株）では、固体レーザーを基本波とする紫外レーザー、赤外レーザー、フェムト秒レーザーを製品として販売しているが、それぞれのレーザーをレーザー加工における顧客ニーズに合わせて開発している。特にフェムト秒レーザーの多光子吸収特性を利用した微細加工では、これまでレーザー加工不能であった材料について加工を可能にする新技術であり、多くの加工分野でその発展が期待されている。フェムト秒レーザー加工については次回、掲載する予定である。また、バイオメディカル分野におけるレーザー加工技術についても別途掲載する予定である。

2 アブレーションのメカニズム

加工対象にレーザーを照射すると、吸収特性に従ってレーザーエネルギーが蓄積される。紫外領域であれば電子エネルギーに、赤外領域であれば振動エネルギーにそれぞれ吸収される（図2）。この蓄えられたエネルギー

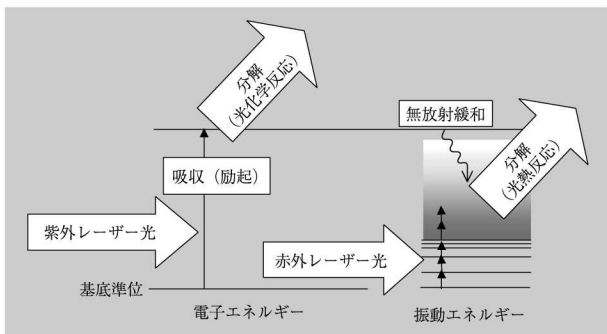


図2 加工におけるエネルギー状態変化

は光化学反応と光熱反応のいずれか、または両方で物質の相変化を誘起する。光化学反応とは吸収した電子エネルギーが直接原子間の結合を切断する反応を指す。一方、光熱反応は分子または格子の振動エネルギーが励起されることによって「熱」の発生とともに物質が固体から液体、気体へと変化することを指す。

加工（境界）面の物性を加工前と後で同等にする技術の開発が重要であるが、基本的には、レーザー照射領域から拡散する熱を最小化することが重要である。この拡散する熱は境界近傍領域で、意図しない材料の熔融・化学反応・固化を生じさせ、物性を変えてしまう。

紫外レーザーによるアブレーションについて典型値をあげる。紫外レーザービームが物質に吸収される場合、たとえば、吸収係数が $1 \times 10^5 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$ であったとすると、材料の表層 $0.1 \mu\text{m}$ オーダーの深さで照射エネルギーのほとんどが吸収される。フルエンス（照射エネルギー密度） 1 J/cm^2 の場合、単位体積あたりに吸収されるエネルギーは 100 kJ/cm^3 であり、この値はほとんどの材料の生成エネルギー（原子レベルまで分解するのに必要なエネルギー）を超えているので、この吸収エネルギー密度を超える条件がそろえば、ほとんどの材料の加工が可能になるといえる。

それでは、順番にレーザー照射時の物理過程を追ってみることにする。

2.1 吸収過程

レーザー光はBeerの法則に従い吸収される。レーザー強度を $I \text{ (W/cm}^2\text{)}$ 、吸収係数 $\alpha \text{ (cm}^{-1}\text{)}$ 、深さ方向を $z \text{ (cm)}$ とすると $I = \exp(-\alpha \cdot z)$ の減衰率であらわされる。吸収係数は厳密にはレーザー強度の関数であり、 I が大きくなると減少する。パルス時間内にアブレーションが開始される場合、吸収長（吸収係数の逆数）を超えて深い穴あけが可能となる。

2.2 プラズマの発生

光強度を大きくしていくと、材料表面にプラズマの発生が見られる。プラズマの発生がレーザー照射時間内に生じると、プラズマによる光の遮光効果が発生し、レーザー光が材料にとどかなくなり、アブレーションの効率

が低下することが知られている。このプラズマ遮蔽はパルス幅 20 ns のパルスレーザー照射においても発生する。プラズマの発生以前に高強度レーザーパルスが材料に到達させるためには、ピコ秒以下のパルス幅が必要である。

2.3 緩和過程

電子エネルギー励起された材料は特定の時間のあとにそのエネルギーを放出して基底エネルギー状態に戻ろうとする。その際にエネルギーの形態が分子の振動・回転エネルギーに変化する。レーザーアブレーションの研究が盛んになり始めた 1980 年代は紫外レーザーによるレーザーアブレーションは光化学反応が支配的と考えられていた。光化学反応とは熱の発生を介在しない技術であり、電子エネルギー励起により原子またはイオン間結合の解離が生じる反応を言う。具体的には、ポリマー材料のアブレーション加工で、分子の骨子となる C-C 結合エネルギーを上回るエキシマレーザーで照射することによりこの結合がきれて、「境界面がはっきりした加工穴」が形成できると考えられていた。しかし、緩和過程は確率的に発生し、それにともない熱=振動・回転エネルギーへの形態変化がおこることから、たとえば、紫外レーザーを照射したとしても、光化学反応と光熱反応が同時に生じているというのが、現在の見方である。

2.4 エネルギーの消費

レーザー照射によって材料に与えられたエネルギーは、①材料の分解、②分解生成物の並進エネルギー、③熱への形態変化によって加工境界における材料の変質(熱損傷)、散逸(エネルギー損失)などに分配される。

- ① 材料分解では、材料を構成する個々のイオンにまで分解するレベルから、断片化された固まりまである。後者ではエネルギー密度が低い場合であったり、材料固有の特性が反映している。従って、分解過程における消費エネルギーは同じ材料でも分解の程度に応じて増減する。
- ② 分解生成物は分解時に余剰したエネルギーを並進エネルギーに変えて照射部位から爆発的に自由空間へと放出される。

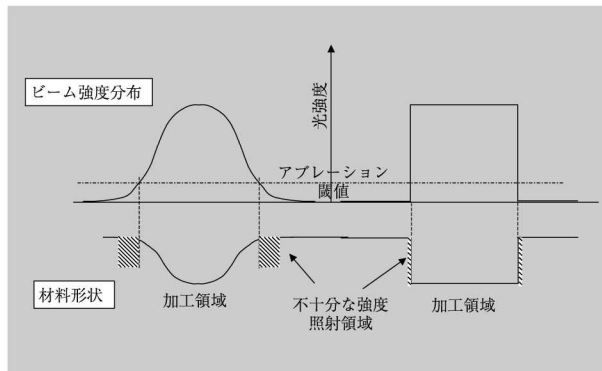


図3 ビームプロファイル

- ③ 分解に寄与せず照射部周囲に熱拡散するエネルギー成分があり、加工境界面をぼやけさせる要因にもなっている。熱損傷層ともいう。熔融状態を作り、再固化によって材料本来の特性を失うことがある。

実用上問題になるのが、①液滴化した飛散物が材料表面に付着することと③不十分なエネルギー注入による熔融層の形成である。前者は材料表面に強固に付着することが多く、容易に取り除くことが出来ない。後者では、熔融、固化の過程で材料特性が変化することが多く、たとえばシリコン基板の切断では結晶からアモルファスに変化するなどして、加工面近傍は加工マージンとして使用できないことになる。

これらの問題点を解決する方法としては、レーザー照射部位の明確化と吸収特性の改善である。レーザービームの空間強度分布がステップ関数的であれば、アブレーション閾値以下の部分が極小化し、不十分なレーザー光強度による変性層の形成量が減る(図3)。また、吸収特性が良ければ、ビーム内に強度の低い部分があったとしてもアブレーション可能になるので、さらに熱変性層が少なくなる。レーザーの照射時間、材料の分解特性も加工後の表面特性を決める重要なファクターになる。

以下に具体的なアブレーション加工の例を挙げる。

3 吸収特性によるレーザーの選定

ポリマー材料のアブレーションにおける吸収係数の重要性は 1980 年の河村ら (1) の研究に見ることができる。

ターゲット材料はフォトレジストの基材になるポリメタクリレート (PMMA) である。PMMA は KrF レーザー 248nm よりも ArF レーザー 193nm で強い吸収 ($1.2 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$) があるので、ArF レーザーで精細なアブレーション加工が可能である。しかし、河村らは当時、より実用的であった KrF エキシマレーザーで PMMA をアブレーションするために、波長 248nm を強く吸収する光増感剤を入れることで、材料の吸収係数を高め、良好なアブレーション加工ができたことを報告している。

一般に加工対象材料の波長特性に合わせてレーザーの波長を変える必要があるが、適した波長で動作効率の良いレーザー装置がなかったり、あったとしても目的とする加工に対して装置コストが高い場合は、このような材料に対する化学的・光学的装飾というものが有効な手段となる。増感剤を入れることはこの ArF レーザーと同等の加工性能を KrF レーザーで実現できるというものである。

赤外レーザーによるアブレーションにおいても材料の分子振動エネルギーに共鳴吸収させる手法をとることにより、アブレーションに必要なエネルギー密度を材料に与えることができる。一例としてエチレン-4フッ化エチレン共重合体材料 (ETFE) について紹介する。

ポリマー材料の中でも4フッ化エチレン (PTFE: テフロン) は難加工性材料の一つである。分子鎖が $(\text{CF}_2-\text{CF}_2)-$ のシンプルな結合を持っているので、紫外領域では真空紫外レーザーである F_2 レーザー (157 nm) によってようやく良好なアブレーションができる。赤外波長 9~11 μm で発振線を選択可能な CO_2 レーザーもこの PTFE には大きな吸収はなくアブレーションを試みると、照射表面に材料固有の凹凸が残る加工しかできない。しかし、材料の分子配列に $(\text{CH}_2-\text{CH}_2)-$ のエチレン構造を重合した ETFE にすることにより図4に示すように、 CO_2 レーザーの発振波長領域内に大きな吸収を形成することができる。9.6 μm における吸収係数は 8000 cm^{-1} に達している。図5に発振線を選択した CO_2 レーザー (9.6 μm) でアブレーション加工した (a) PTFE と (b) ETFE の表面を SEM 観察した結果を示した。照射条件はフルエンス 20 J/cm^2 であった。

加工の精細度という点では、集光スポット径が波長に

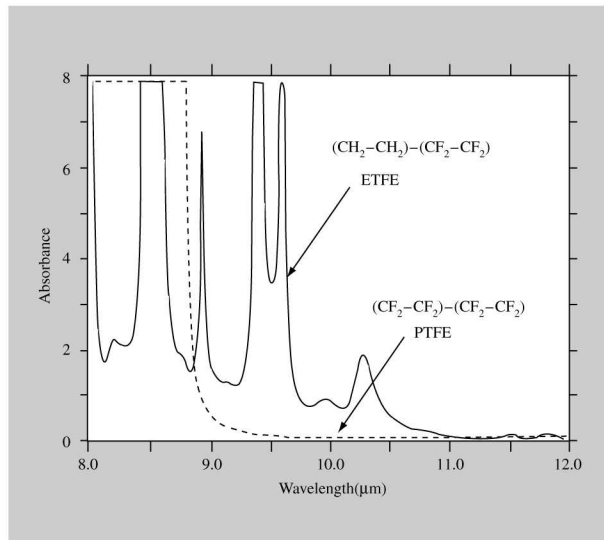


図4 吸収特性の分子鎖構造依存性

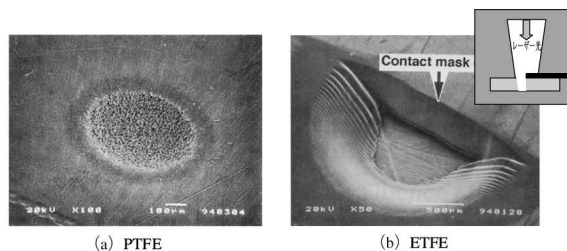


図5 PTFEとETFEのアブレーション結果

比例するため赤外レーザーは紫外レーザーには及ばない。しかしながら、加工サイズ・精度の要求条件を見極めて、紫外から赤外まで、適切な波長を検討すれば良いと考える。アブレーションに必要な条件は基本的には単位体積あたりの吸収エネルギーを如何に大きく与えるかであって、そこには赤外、紫外という区別は必要がない。

4 Nd:YAG レーザー波長変換光によるアブレーション

本シリーズの第2回、第3回で、産業应用到したレーザー装置としてLD励起固体レーザーおよびその波長変換光を紹介した。現在の高出力紫外光開発の主目的はアブレーション加工である。また、バイオメディカル領域では、赤外波長域でのオプティカルパラメトリック発

振波長（2～10 μm）が重要である。特に生体の主成分である水の吸収に一致する波長3 μm帯の高出力レーザーの需要が期待される。

ここでは短波長光（高調波）の実用化状況を紹介する。現在、フレックス基板としてかかせないポリイミド（PI）の穴あけ加工には第3高調波の355 nmが用いられている。従来、PIの穴あけ加工では9.4 μm発振CO₂レーザーも用いられてきた。フォトンコスト（単位出力発生に必要な費用）が安いCO₂レーザーは加工サイズが大きい場合には魅力のあるレーザーである。しかし、加工穴径が50 μm以下の市場要求に対しては、波長の短い355 nm光が加工性能において優れている。

波長266 nm（第4高調波）では、さらにアブレーション可能な材料の範囲も拡大する。多くの材料では、紫外波長における吸収特性が波長に反比例して増大する傾向にあるためである。従来、エキシマレーザー（XeCl：

308 nm, KrF：248 nm）で実用化されている精密穴あけ加工、インクジェットプリンタのノズル穴あけ、ワイヤストリッピング、各種電子材料へのマーキングなどでNd：YAGレーザーの高調波が代替することになるであろう。

サイバーレーザーでは、これらの紫外レーザー製品をラインアップしており、表1にその仕様をまとめた。図6にSIVA 532の外観を示したが、特長としてはシステムとのマッチングを考え、フレキシブルパワー伝送用の光ファイバーを搭載している点があげられる。

5 金属のアブレーション

金属はポリマー材料、セラミック材料と違い、レーザーを選択的に吸収する量子化されたエネルギー構造を持たない。レーザーパルスのエネルギーを受け取るのは金属中の自由電子である。金属に光エネルギーを吸収させ、加工するためには金属固体内のプラズマ振動以上の周波数を持つ紫外領域の光を使うことが効果が高い。金属材料表面の自由電子にエネルギーを与えると、自由電子はすぐに金属イオンの形成する格子と非弾性衝突し、エネルギーが格子振動に移動する。この過程はピコ秒のスケールであり、光エネルギーがすぐさま金属材料の過熱に使われるモデルが成り立つ。

紫外レーザーを照射するとそのパルス幅の時間内に材料は加熱され、固体から液体、気体と相変化しながら加工が進む。この過程で高い熱拡散スピードでエネルギーが金属内部に散逸する。表面の気化に伴う冷却とその直下の層が気相という瞬間が生じ、内部から勢よくガス化した金属が噴出するので、表面の液層部分が吹き飛ばされることになる。このとき液滴化した金属が加工材料面に付着する。

ナノ秒パルスの紫外光を用いただけでは金属材料のアブレーションにおいて融解層のない良好な加工はできない。この点を打開する新レーザー装置としてフェムト秒レーザーに期待が高まっている。

半導体材料の加工においてもナノ秒パルスレーザーの使用では加工面の熱損傷については、ほぼ同じ結果となる。

表1 紫外レーザー仕様

製品名	SIVA532	SIVA355
波長	532 nm	355 nm
発生方式	第2高調波	第3高調波
平均出力	15 W (10 kHz)	5 W (8 kHz)
繰り返し	1-30 kHz	1-10 kHz
パルス幅	60-150 ns	40-80 ns
パルスエネルギー	1 mJ	0.6 mJ
パルス間安定性	3% rms	4% rms
平均出力安定性	±3%	±3.5%
ビーム径	1 mm	1 mm
ビーム品質	M ² <4	M ² <2
広がり角	<1 mrad	<1 mrad
サイズ	W230×D470×H125	
レーザーヘッド重量	16 kg	

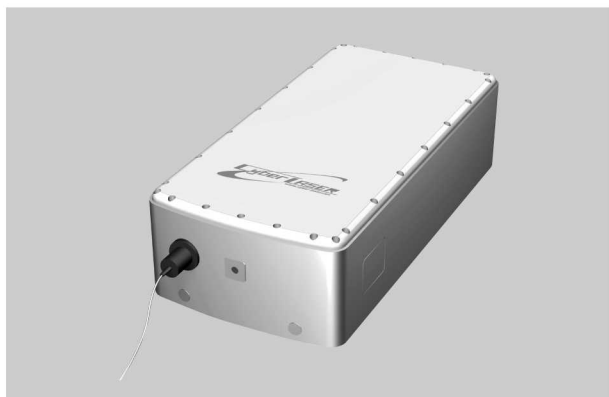


図6 SHG光源（SIVA532）

6 レーザー加工機

サイバーレーザー（株）では、お客様からいただいたレーザー加工における問題点を解消し、最適なレーザー装置を選定するためのツールとして、高速加工性能と微細加工性能を合わせ持ち、異なるレーザー装置6台を搭載可能なレーザーステーションなるレーザー加工機を開発し、保有している（図7）。

表2にこのレーザーステーションの仕様をまとめた。

加工における問題点の解決には、お客様からいただいた情報に加えて、サンプルの光学特性を明らかにする作業が必要になることが多い。得られたデータをもとに

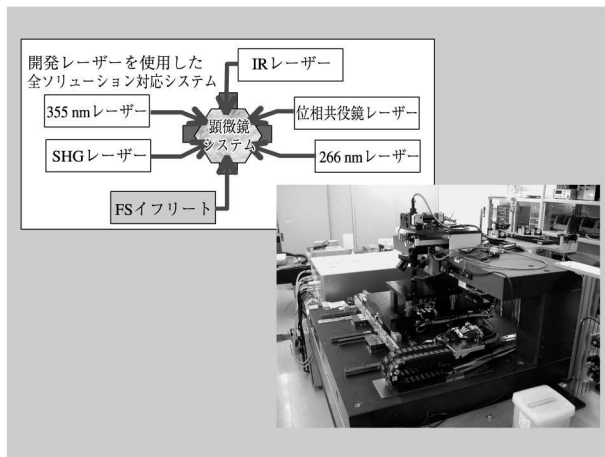


図7 レーザーステーション

表2 レーザーステーション仕様

レーザー1	フェムト秒レーザー-IFRIT (1W)
レーザー2	高出力THG (SIVA355) (5W)
レーザー3	高出力SHG (SIVA532) (15W)
レーザー4	位相共役ミラー搭載型SHG (10W)
レーザー5	高出力FHG (Amks 266) (1W)
レーザー6	高出力基本波 (70W)
ステージの種類	リニアステージ
ストローク	400mm
スピード	最大150mm/s
稼動軸	3軸
真直度	3um
レベル調整	平行度自動診断
光学系に搭載すみの機能	オートフォーカス
	結像光学系
	観察光学系
サンプルホルダー	真空チャック
ガス	デブリ除去用ノズル

のレーザー装置がもっともニーズに応えられるかを机上検討し、結果をフィードバックする。その後、実際にレーザーステーションによってレーザー加工を行い、お客様に様々な情報を提供する。一つのサンプルに対して、複数の光源で加工性能を確認できるため、効率よくソリューション追求が可能な環境といえる。

7 まとめ

レーザー加工の中でもアブレーション加工について概説した。材料の光吸収特性に応じて使用するレーザーの波長選択が重要であることを示した。また、材料に光学的な装飾（吸収体を混合する、構成分子を変えるなど）をすることによって、加工特性が向上できることを示した。本稿では、レーザーパルス幅の最適値や種々の材料のアブレーション特性について言及していないが、サイバーレーザー社はこれらの知見も併せ持ちつつ、材料加工におけるソリューションビジネスの展開をしており、その取り組みについて紹介させていただいた。レーザー加工技術は産業応用はもとより、バイオメディカル応用においてもますます重要な技術になってきており、弊社は幅広い社会のニーズに取り組んで新市場の創成に貢献する所存である。

参考文献

- 1) 河村，豊田，難波 レーザー研究 8,343(1980).

■ Laser Processing

■ Tetsumi Sumiyoshi



スミヨシ テツミ

所属：サイバーレーザー(株) 取締役 副社長

連絡先：〒212-0054 神奈川県川崎市幸区小倉308-10 KBIC 101

Tel.044-588-3854 Fax.044-580-3808

E-mail : sumiy@cyber-laser.com

経歴：1996年日本電気(株)入社，光エレクトロニクス研究所勤務。2000年2月サイバーレーザー(株)を創業し現職。ガスレーザー，LD励起固体レーザー，ファイバーレーザーの装置開発・応用研究に従事。特に中赤外波長光源の装置化研究に興味を持ち，その産業応用ならびにバイオメディカル応用の研究を推進している。博士（工学）。