

# 微細加工で使用されるピコ秒レーザー

マグナス・ベンソン、ダーク・ミュラー、バーナード・クリムト

ユーザーに高精度、高スピード、低ランニングコストを提供する。

ピコ秒レーザーは様々な微細加工において長いパルス幅を持ったレーザーに比べ重要な利点を持つことが知られている。重要な利点とは様々な材料加工において熱影響域がないことで、可視光や近赤外線光が透過してしまう材料に対しても同様の利点を持つ。初期のピコ秒レーザーは信頼性に乏しく、ランニングコストも高く、また使用される製造環境に特別な条件を必要としていたが、産業用途として十分な能力を持つ新しい産業用ピコ秒レーザーがリリースされた。ここでは材料加工におけるナノ秒レーザーとピコ秒レーザーの主な相違点を探り、現在入手できるピコ秒レーザーの基本アーキテクチャーを再吟味し、今日の産業用途としてどのように成功しているかを紹介する。

## ピコ秒対ナノ秒

微細加工が目指すゴールは材料に対して非接触で熱損傷を回避し、穴や溝といったミクロンサイズの加工を行うことで、言い換えれば、熱影響域(HAZ)を最小限に抑え精密にきれいな加工を行うことである。

レーザーが材料に精密な穴あけ、スクライビング、切断するには2つの基本的なメカニズムがある。これまでほとんどのアプリケーションで赤外線及び可視光Qスイッチレーザーが使用され、数十ナノ秒のパルス幅による光熱作用を用いて材料に加工を行なっている(図1上)。ここでは集光されたビームが空間的な強力な熱源として作用している。ターゲットとなる材料は急激に熱せられ、実際

には酸化してしまい、すなわち、本質的には蒸発してしまうということである。

この方法の利点は、材料の比較的大きな部分を急速に取り除くことを可能にし、特にQスイッチレーザー数kHzの繰り返し周波数が典型的に動作する。更に、ナノ秒レーザー技術は確立されており信頼性が高く、ランニングコストも魅力的である。しかし、厳しい要求ではHAZの領域サイズやデブリの多さ、コーティングの層間剥離などが問題となる。

レーザーの材料除去の2つ目のメカニズムは、アブレーションである。(図1下)。レーザーフォトンが直接ターゲット材料の結合を壊し原子化する。相対的に低い温度で可能なプロセスであり、HAZも少ない。デブリも無く加工後の処理も最小で非常にクリーンな加工である。

UV光はフォトンエネルギーが高く多くの材料でアブレーション加工が可能である。したがってUV光Qスイッチレーザーはアブレーションで材料の除去を行える。しかし、ピコ秒もしくはそれより短いパルス幅を使用することでもアブレーション加工が可能になる。極短パルスは瞬間的にとても高いピークパワー(MW以上)を持ち、これにより多光子吸収が発生、材料の電子を励起させ直接原子結合を分解する(図2)。さらに、熱拡散レートよりパルス幅が短いので、熱影響が広がらずHAZ領域が発生する前に加工を終える。

極短パルスレーザーはHAZを作らない以外にもさらに高バンドギャップ材料(例:ガラスや特殊ポリマー)を含む様々な材料に加工できるという大きな利点がある。これらの材料は光吸収が低く、現在市販されているレーザーでの加工が難しいが、材料を透過してしまう波長のレーザーであっても、非線形吸収を誘導することで加工が行え"波長に依存しない"のである。

現在、ピコ秒レーザーはIRからUVまでのラインナップがある。中でもUVピコ秒レーザーは最も精密で熱影響の少ない加工が可能である。なぜならUVピコ秒レーザーは他の波長に比べ最も小さいスポットサイズで加工が行えるからである。一方で、IR及び可視光のピコ秒レーザーは一般的にUVに比べ高い出力があり、より高いスループットを実現する。

購入できる産業用極短パルスレーザーのタイプや構造にいくつかの種類はあ

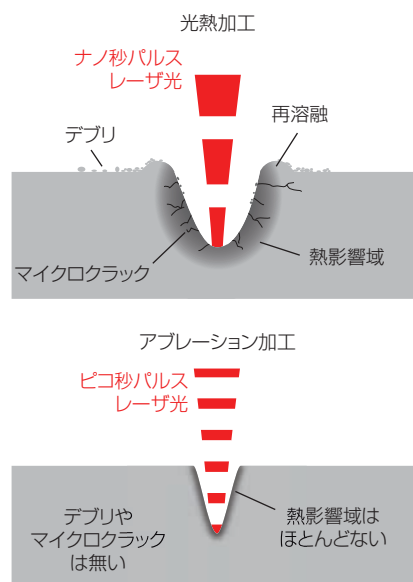


図1 光熱作用対アブレーション概念図

## ピコ秒レーザーの構造

購入できる産業用極短パルスレーザーのタイプや構造にいくつかの種類はあ

るものの、それらの基本的な構成は似ている。特にアブレーションに必要な10ピコ秒以下のパルス幅で発振させるためにモードロックオシレータが使用されている。しかし、ほとんどのモードロックオシレータは、数10MHzの繰り返し周波数で比較的低いエネルギー(数nJ)を持つパルスを出力する。既存のガルバノスキャナを使用するにあたって、この繰り返し周波数では高すぎるので、一部のパルスを選択するためのパルスピッカーが使用される。また最終的な出力を生成するためにアンプでこれらのパルスのエネルギーを増幅する。

市販されているほとんどのピコ秒レーザーは以下の構造に基づいている。

- ・ファイバレーザー+ファイバ/ロッドタイプアンプ
- ・ファイバレーザー+自由空間アンプ
- ・LD励起固体レーザー+自由空間アンプ

オールファイバ(発振器と増幅器)を使用したアプローチは比較的低コストであり堅牢であるという優位点を持つ。不利な点は、アンプにおける非線形および光散乱現象により、パルスエネルギー10μJ(パルス幅10ps時)が、増幅限界になってしまうことである。そのため、高い平均出力を得るために繰り返し周波数を上げることが必要になり、ガルバノスキャナのスピードでも個々のパルスのオーバーラップを十分にコントロールできない速度となり、困難をもたらす。例えば、50μm径の焦点と1MHzの繰り返し周波数を持つレーザーでは、50m/sのスキャナ速度がオーバーラップを避けるために要求される。このスピードを実現するのはごくわずかなスキャナだけである。この結果スループットが制限される。

ほとんどのアプリケーションにおいて、必要とされる高パルスエネルギーを得るために、ファイバレーザーは自由

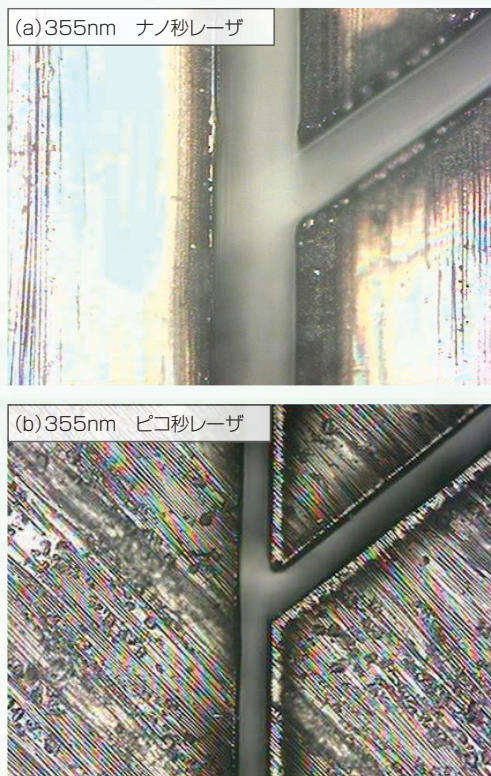


図2 (a)355nmナノ秒レーザーと(b)355nmピコ秒レーザーを使用し、CFRPに同じ加工を行った。短パルスレーザーの方が明らかに高いレベルで精細で熱影響の少ない加工となっているのがわかる。(出典: フォトマシニング社)

表1 アンプを1-3個に変化させた際の最大平均出力

	アンプ数	最大平均出力 (W)	
		1064nm	532nm
Rapid	1	10	4.3
HyperRapid 25	2	25	15
HyperRapid 75	3	75	50

空間アンプと組み合わせられる。例えば、このアプローチはコヒレントのレーザー『Talisker』で用いられている。ファイバのシードパルスが比較的低いエネルギーであるため、再生アンプが使用され、アンプを通過したパルスは大幅にエネルギーが増幅される。再生アンプはコンパクトで品質のよいビームを供給できる利点がある。この設計を使用し『Talisker』は最大パルスエネルギー180μJ(波長1064nm、繰り返し周波数200kHz)を実現している。

第3の方法はLD励起固体レーザーを使用する方法で、この方法はファイバのシード光より高いパルスエネルギー

を生成することができる。通常この方法では再生もしくはマルチパス構成の自由空間アンプを使用する。実際に2台以上の増幅ステージを用いてより高出力を得ている。2012年にコヒレント社が買収したルメラレーザー社の製品を例にとると、Nd:YVO4シードレーザーに続き1台以上のアンプが組み合わせられ、200μJ(波長1064nm)のパルスエネルギーを実現している。表1は、この柔軟なモジュラー構造において1個、2個または3個のアンプが使用されるときに達成できる最大平均出力をまとめたものである。

この製品ラインではいくつか他の優

位点も生むこともあり、トランジェントアンプが使用されている。特に再生アンプと比較し、トランジェントアンプはより高い繰り返し周波数を実現することができ、さらにそれを高い柔軟性をもって調整できる。(この場合は1ショットから2MHz。)

トランジェントアンプのもうひとつの非常に重要な利点は、バーストモードをサポートすることである。シングルパルスを撃つ代わりに連続したひと続きのパルス(典型的には最大10パルス)を撃つことができる。このひと続きの連続したパルスが、その後に増幅される。

バーストモードの利点は同じ平均出力でアブレーションレート(単位時間当たりの材料除去量)を高くさせることである。例えばシングルパルス時に比較し、5パルスを撃つと5倍から10倍アブレーションレートが向上した。(両方とも繰り返し周波数1MHz。)どちらのケースも平均出力は似通っている。増幅ゲインがいくつかのパルスに分散するのでパルスエネルギーはバーストモード時の方が低い。しかし、パルスが短い間隔で出力されても、アブレーションレートは直線的にパルスエネルギー一次第というわけではないようである。

アブレーションレートの正確なメカニズムは調査中であるが、いくつかの好ましい現象が確認されている。パルス間隔が20ns程度だと、材料が緩和されることなく過渡状態にとどまることが考えられる。これによりバースト内パルスが低いエネルギーであるにもかかわらず、より多くの材料を除去できる。

バーストモードは極短パルスの微細加工パラメータの能力を大幅に拡張し、可能性を広げる。鉄、タングステン、カーバイド、シリコンといった自由電子を持った材料に対して、最も効果的であることがわかった。反対にセ

ラミックやガラスなど誘電体にはほとんど優位点を示せなかった。

### 信頼性の高い産業用ピコ秒レーザー

多くの産業界のユーザーはコスト、信頼性、使いやすさの面で他のレーザーもしくはレーザー以外と競争できることがわかればピコ秒レーザー加工の優位性を採用するだけである。コヒレント社は上記の様なメリットを得られる設計と構造をいろいろな製品で採用している。

十分な空間がある設計を行い、個々のコンポーネントがどのような状況でも適切に動作する設計となっている。さらに、ミラーの反射率低下や金属の変形など経年変化、部品交換があってもレーザー出力が仕様を満たし保証されることが重要である。

次にレーザー共振器内にコンタミが混入しない様にクリーンルームで組み立てを行い、さらにはコンタミが侵入しないよう筐体は密封されている。

機械設計にも注意を払い、アジャスタブルマウントの使用は必要最小限としている。加えて、全数100G以上の衝撃テストにも合格している。衝撃テストの結果、出力が変化するユニット

は不合格となり、原因が特定される。

最後にこれらのレーザーは温度安定動作を確保するため、チラーによって0.1℃で制御されている。さらにそれぞれのモジュールからの熱負荷を低減するため、励起用LDは電源筐体内にあり、ファイバによりレーザーヘッドに結合されている。

これらによりこのレーザーの信頼性は非常に高い。24時間無休運用において稼働率98%以上と客先より報告されている。

### 典型的なアプリケーション

図3はピコ秒レーザーが現在使用されている主要なアプリケーションをまとめており、波長、平均出力、繰り返し周波数の相関関係を示している。

ピコ秒レーザーの興味深い新たなアプリケーションは、スマートフォンのディスプレイで使用される薄いガラスの切断である。機械的に薄いガラスを切断する方法ではいくつかの後処理が必要となるが、レーザー加工ではこれが不要となり優位点となる。これまでCO<sub>2</sub>レーザーは薄いガラスの切断で使用されてきたが、強化ガラスの切断には使用

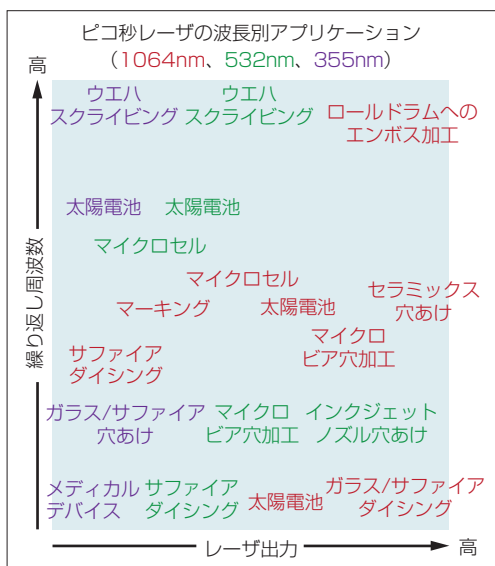


図3 ピコ秒レーザーが利用出来る主要なアプリケーションと波長、平均出力、繰り返し周波数の相関関係図

できず、非常に薄いガラスの切断にも向かない。極短パルスレーザーによるガラス切断の一例では、フィラメントカッティングと呼ばれる、層厚全体を通して線状の欠陥を作り、分離を可能にする手法がある。そのフィラメントカッティングは、厚さ50 $\mu$ mから3mm以上までに対して、またあらゆる種類の強化ガラスにも対応できるという利点を持っている。

ピコ秒レーザーは薄い金属の切断にも使用できることがわかった。例えば、医療、航空宇宙、ディスプレイ、マイクロエレクトロニクスなどの産業用レーザー微細加工サービス及び装置を提供するフォトマシニング社(米国ニューハンブシャー州パルハム)では、これらのレーザーを医療用インプラントの製造で使用している。これらの産業で使用されている典型的な材料は、ステンレス、ハステロイ、ニチノール、チタンである。フォトマシニング社のCEO、ロナルド・シェーファー氏は、「レーザーだけで後処理なしでかなり高いエッジ品質に到達した。ナノ秒レーザーでは加工エッジが溶融により品質が悪く、加工後に電解研磨工程を必要とする。これらの製品では通常25 $\mu$ m幅の加工をしており、焦点距離100mmのレンズと必要なスポット径を得るために355nmのレーザーを使用する。」と説明している。

フォトマシニング社がピコ秒レーザーをうまく使用しているもうひとつの分野はcarbon fiber reinforced polymer (CFRP)から作られる小さく複雑な構造部品である。同氏によると「これらの複合材はファイバを編んで作られており、これらの材料を切断すると、内部ストレスが解放されるためその形状が変化する。そしてプロセスに熱を伝えると問題が発生する。ナノ秒レーザーでは我々が望む十分な結果を得ることができない」とい

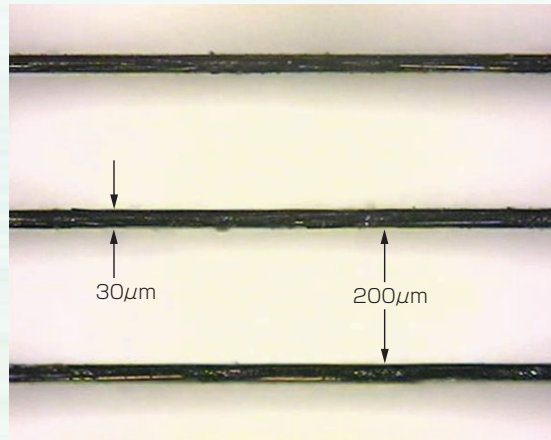


図4 355nmピコ秒レーザーでCFRPに30 $\mu$ m幅溝加工を施した例。(出典:フォトマシニング社)

表2 ピコ秒レーザーによる各種加工とスループットおよびコスト

材質	内容	要求出力	スループット	コスト
セラミック(t=1mm)	100 $\mu$ m 穴加工	50W@1064nm	1 穴/sec	360 穴/\$
PCB基板	$\phi$ 70 $\mu$ m×深さ70 $\mu$ m穴	25W@532nm	1000 穴/sec	360,000 穴/\$
Si基板(t=200 $\mu$ m)	$\phi$ 150 $\mu$ m 穴	50W@1064nm	5 穴/sec	1500 穴/\$
太陽電池パネル	Si基板上のSiO <sub>2</sub> またはSiN層の除去	15W@532nm	200,000 穴/sec	70M 穴/\$
ガラス基板上のITO膜	幅50 $\mu$ m, 深さ200nm	50W@1064nm	>5m/sec	1500m/\$
ガラス基板上の金属膜	幅200nm 金属膜除去	40W@1064nm	15cm <sup>2</sup> /sec	4500cm <sup>2</sup> /\$

う。分析機器における特有のアプリケーションはフォトマシニング社の200 $\mu$ m厚のCFRPに施された幅30 $\mu$ mの加工である(図4)。フォトマシニング社は波長355nmのピコ秒レーザーを使用し1インチ径の部品全長にわたりこれらの加工をひずみ無く施す。

コストの観点から見ると、ピコ秒レーザーによる加工は多くのアプリケーションで後処理を省略し、また他のレーザーやレーザー以外のテクノロジーに比較して、高い稼働率を持っているので十分競争力がある。消耗部品は比較的低く、ランニングコストは購入価格の減価償却がほとんどである。表2ではピ

コ秒レーザーで達成できる様々な加工におけるコストをまとめた。

結論として、ピコ秒レーザー技術は産業使用においてリーズナブルなコスト、信頼性、運用性を持っている製品と言える。ナノ秒レーザー及びサブナノ秒レーザーとともに、ピコ秒レーザーは、精密性、材料適合性、スループット、ランニングコストの観点から特別に幅広い能力のポートフォリオをユーザーに提供する。全体のパラメータをカバーするレーザーを考え、レーザー微細加工経験者とパートナーを組むことによって新しいレーザーアプリケーションの最良の開発が成し遂げられるはずだ。

著者紹介

マグナス・ベンソンはコヒレント社戦略マーケティングディレクター、ダーク・ミュラーはコヒレント社ルメラレーザーテクノロジープロダクトラインマネージメントディレクター、バーナード・クリムトはコヒレント社ルメラレーザーテクノロジービジネス・デベロップメント長。