

ナノからピコ、そしてフェムトへ： 最適なレーザー微細加工結果を得るパルス幅

ラジェシュ・パテル、ジム・ボヴァツェック、ハーマン・チュイ

品質、スループット、コストに大きな影響を与えるパルス幅の選択

すべての加工プロセスの目的は、できる限り短時間かつ最も経済的な方法で高品質の結果を得ることにある。レーザー加工は、切断、ミールリング、穴あけといった従来の機械加工と比べて、局所的かつ高品質で精密な加工が可能である。レーザーを正しく選択すれば、歩留まりとスループットに優れた、経済的なプロセスを実現することもできる。

レーザーを多用する業界のひとつに、携帯端末製造がある。より小型で、高速で、軽量で、低価格の携帯端末を製造したいという需要に、レーザー微細加工プロセスは応えることができる。医療機器製造、クリーンエネルギー、自動車、航空宇宙といったその他の業界でも、程度の差はあれレーザー加工が導入されている。

複数のレーザーパラメータが加工結果に影響を与えるが、パルス幅の選択は、プロセスの精度、スループット、品質、コストに影響を与える重要な項目のひとつである。パルス幅がナノ秒からフェムト秒範囲のパルス波レーザーが、さまざま

な材料の精密微細加工に一般的に使用される。本稿では、微細加工に一般的に使用されるナノ秒、ピコ秒、フェムト秒レーザーのスループット、品質、コストの間のトレードオフについて解説する。

ナノ秒のパルス幅

平均出力が同じである場合に、ナノ秒レーザーは、溶融によって材料の大部分が除去されるために、ピコ秒やフェムト秒レーザーよりも材料除去率が高く、したがってスループットが高いというのは実証済みの事実である。レーザーパルスによって熱せられた材料は、室温から融解温度に達し、蒸発と溶融材料の排出によって最終的に除去される。

しかし、除去された溶融材料が加工箇所のエッジに付着して再凝固することが多く、それによって加工の精度と品質は低下する。材料に残る余熱によって、加工箇所周辺に熱影響部(HAZ: Heat Affected Zone)と呼ばれる領域が生成される。また、排出された溶融材

料の一部が加工箇所周辺に飛散することによっても、加工の品質が低下する。

このような悪影響は、緑色または紫外域(UV: ultraviolet)の波長でパルス幅の短いナノ秒レーザーを使用することにより、コストはいくらか追加されるが抑えることができる。特にUVナノ秒レーザーは、ほとんどの材料で浸透深度が浅いため、HAZを大幅に縮小することができる。またUVナノ秒レーザーには、焦点スポット径が小さく、焦点深度が大きいため、小さな形状の加工に必要なメリットもある。

UVナノ秒レーザーは、能力とコストの最近の進歩にともない、精密微細加工における普及が加速化している。たとえば、米スペクトラ・フィジックス社(Spectra-Physics)のUVレーザーである「Talon」と「Explorer」は、UVレーザー業界におけるコストパフォーマンスの飛躍的な向上を先導しており、ワットあたりコストを3年間で3分の1未満にまで低下させた。その結果、これらのレーザー

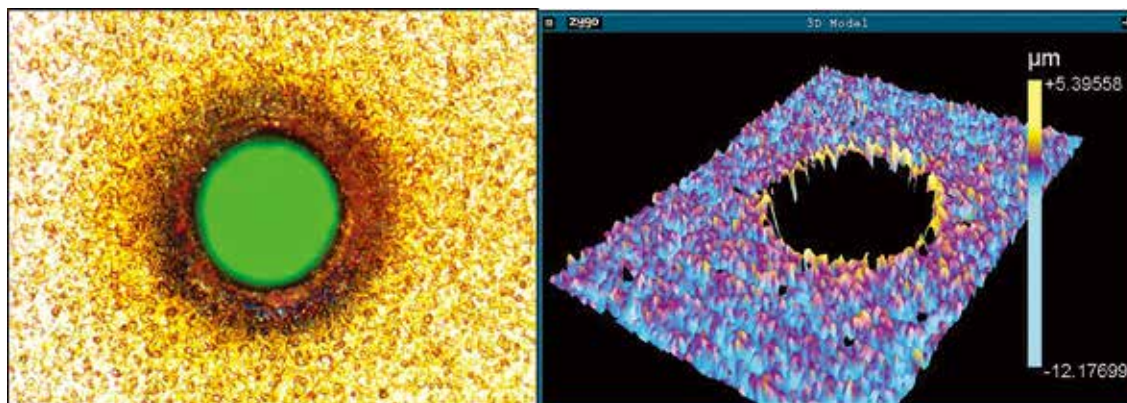


図1 銅/ポリイミド/銅のFPCB薄膜に穴あけされた直径80 μ mのスルーピアホール。エッジ周りの凹凸の高さは平均で2 μ m未満となっている。

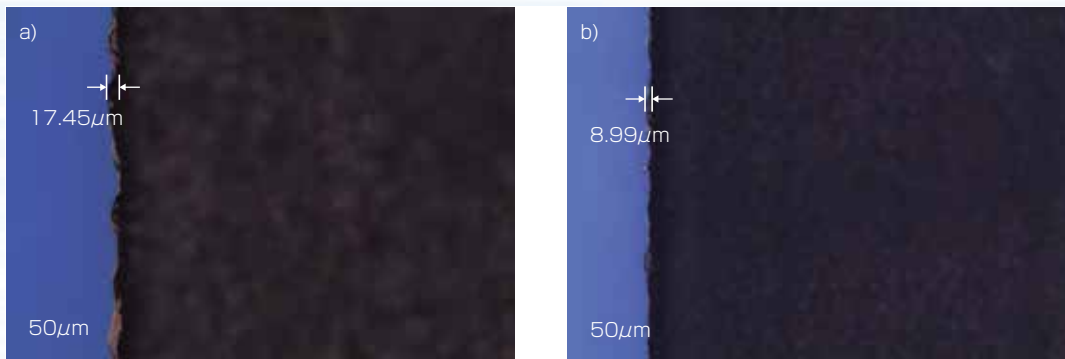


図2 UVナノ秒レーザー(a)と緑色ピコ秒レーザー(b)を使用してスクライプ加工したゴリラガラス。

は現在、UVマーキング、薄膜のパターニング、PC基板切断、ビアの穴あけなどの用途に広く使用されており、高いスループットで精細な形状を生成している。図1は、銅/ポリイミド/銅のフレキシブルプリント回路基板(FPCB: Flexible Printed Circuit Board)の薄膜に、Talon UVレーザーを使用して生成した直径80 μm のスルービアホールを示している。エッジ周りの凹凸の高さは平均で2 μm 未満と非常に小さい。

それとは異なる用途向けに、スペクトラ・フィジックス社は、60Wを超えるUVナノ秒短パルスを高周波数で出力する、UVハイブリッドファイバレーザー「Quasar」を提供している。フレキシブルでプログラマブルなパルスの特長とする。このような機能によって、UVナノ秒レーザーの使用可能なパラメータ範囲を飛躍的に押し広げ、半導体、セラミックス、サファイア、ガラス、電池箔、その他携帯端末に使用される材料の高品質で高スループットの加工を可能にした。将来的にUVナノ秒レーザーは、ワットあたりコストを引き下げながらさらに能力を高め、量産製造における利用を拡大していくと思われる。

ナノ秒レーザー加工とピコ秒レーザー加工の比較

ナノ秒レーザーとピコ秒レーザーの比較

については、初期の研究⁽¹⁾によって、レーザーパルス幅をナノ秒からピコ秒にすると、ステンレス鋼の溶融量が減少することが示されている。他の多数の研究からは、ピコ秒レーザーを微細加工に使用すると、加工品質(HAZの幅、デブリの形成、レーザー加工したエッジ周辺の溶融材料の蓄積と飛散で定義される)が向上することが示されている。また、材料除去しきい値(材料除去に必要な単位面積当たりのエネルギー[単位: mJ/cm^2]で測定される最小フルエンスとして定義される)は、ピコ秒レーザーパルスの方がナノ秒パルスよりもはるかに低い。

ピコ秒レーザーの方が、パルス幅が短いためにピーク出力が高く、格段に低いパルスあたりエネルギーで材料除去が行えることは明らかである。しかし、実用的な観点からは、ほとんどの切断または穴あけ処理が、材料除去しきい値よりもはるかに高いフルエンスで実行され、また、平均出力が同じならばナノ秒レーザーの方がピコ秒レーザーよりもスループットが高い。高い品質がプロセスの重要な要件である場合は、ナノ秒レーザーよりもピコ秒レーザーを使用する必要がある。

ピコ秒レーザーを選択した場合は、続いてスループット要件を満たす適切な出力レベルを選択しなければならない。図2は、類似のプロセス条件下でUVナノ秒レーザーと緑色ピコ秒レーザーを使用して、厚さ0.7mmのゴリラガラ

ス(Gorilla Glass)をスクライプ加工した様子を示している。どちらのレーザーも、同じ平均出力(30W)とパルス繰り返し周波数(1MHz)で動作させた。スクライプ深度は、UVナノ秒レーザーで最大70 μm だったのに対し、緑色ピコ秒レーザーでは最大40 μm だった。しかしエッジチッピングは、UVナノ秒レーザーを使用したガラスで最大18 μm だったのに対し、緑色ピコ秒レーザーでは最大9 μm だった。

ピコ秒レーザーとナノ秒レーザーでは、品質は前者の方が高く、スループットは後者の方が高いことがわかったが、これに加えてコストも検討する必要がある。一般的にはピコ秒レーザーのほうが、初期コストと所有コストの両方ではるかにコストがかかる。スペクトラ・フィジックス社の「IceFyre」は、繰り返し周波数が広い範囲で調整可能で、プログラマブルなバーストモード機能を備えた、信頼性の高い産業用ピコ秒レーザーである。プロセスの柔軟性、信頼性、コストパフォーマンス、サイズ制約を理由にこれまでは不可能だった微細加工において、進歩をもたらし、新たな用途を切り拓いている。

ピコ秒レーザー加工とフェムト秒レーザー加工の比較

パルス幅をさらに短くして、ピコ秒とフェムト秒のどちらのレーザーパルス幅を

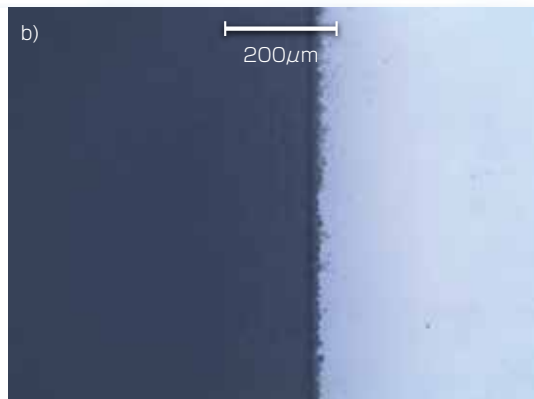
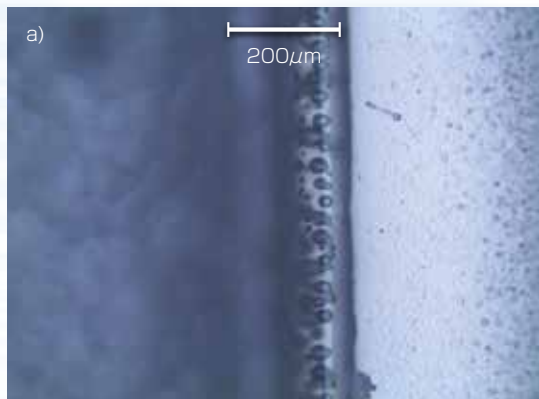


図3 ピコ秒レーザー(a)とフェムト秒レーザー(b)によるPLLAの切断エッジ。

微細加工に選択するかは、被加工物の材質、品質要件、コストの検討に依存する。フェムト秒レーザーの方がピコ秒レーザーよりも高い品質が得られる可能性があるが、コストが高くなることは重要な検討事項である。ピコ秒レーザーでもフェムト秒レーザーでもピーク出力は高いので、材料除去しきい値フルエンスは低い。材料除去しきい値フルエンスは、フェムト秒レーザーパルスの方がピコ秒パルスよりも低い。しかし、実際の加工プロセスのほとんどが実行される、しきい値よりも高いフルエンスレベルでは、材料除去率は材料に依存する。

パルス幅を10psから900fsに減らすと、ステンレス鋼の材料除去率は増加するが、窒化アルミニウムの除去率は減少することを示す研究結果が発表されている⁽²⁾。生分解性ステントや、有機EL(OLED:Organic LED)ディスプレイの薄膜の製造に使われるポリ-L-乳酸(PLLA:Poly-L-Lactic Acid)など、熱の影響を受けやすいポリマーを加工する場合は、溶融や熱損傷を避けるために、フェムト秒レーザーパルスを使用する必要がある。

図3aは、10psレーザーを使用して溶融してしまったPLLAのエッジ、図3bは、400fsのスペクトラ・フィジックス社製「Spirit」レーザーを使用した場合のクリーンなエッジを示したものである。

この図からも、材料の性質や、求められるプロセス品質要件から、ピコ秒レーザーでは対応できない特定の種類の材料加工には、フェムト秒レーザーが必要であることがわかる。ナノ秒レーザーやピコ秒レーザーと同様に、フェムト秒レーザーも時間とともにコストパフォーマンスは改善されていくと思われる。

まとめ

すべての材料に対して望ましい加工が達成可能なレーザーパルス幅というのは存在せず、パルス幅の選択が、プロセスの品質、スループット、コストに大きな影響を与える。加工材料と、求められる品質、スループット、コスト要件に応じてレーザーを選択する必要がある。一般的にナノ秒レーザーは、ピコ秒レーザーやフェムト秒レーザーよりも経済的でスループットが高く、まずまずの品質が得られる選択肢で、特にUVナノ秒レーザーには、多くの用途に

対して高い品質とスループットを達成する「スイートスポット」がある。

しかし、薄い金属板、透明な材料、熱の影響を受けやすい材料については、ピコ秒レーザーやフェムト秒レーザーの方が高い加工品質が得られるため、最高レベルの加工品質が必要な微細加工では、ピコ秒レーザーやフェムト秒レーザーの方が望ましい。新しいクラスの産業用高出力ピコ秒レーザーおよびフェムト秒レーザーは、さらに高いスループットと品質を、これまでよりも低いワットあたりコストで達成する。

今後については、ナノ秒、ピコ秒、フェムト秒の各レーザーでコストパフォーマンスが引き続き向上していくことが見込まれる。この向上にともない、精密製造においてレーザーはさらに急速に普及し、3種類すべてのパルス幅が、加工品質、スループット、コスト面でのそれぞれ独自のメリットを武器に、それぞれ特定の材料と用途で使用されるようになるだろう。

注記

Explorer, Quasar, Spectra-Physics, Spirit, Talonはスペクトラ・フィジックス社の登録商標、IceFyreはスペクトラ・フィジックス社の商標。

参考文献

- (1) B. N. Chichkov et al, Appl. Phys. A, 63, 109-115 (1996).
- (2) "Same quality at a third of the machining time," Commun.: Laser Technik J., 12, 22-26 (Jun. 11, 2015).

著者紹介

ラジェッシュ・パテル(RAJESH PATEL)、ジム・ボヴァツェック(JIM BOVATSEK)、ハーマン・チュイ(HERMAN CHUI)は、米スペクトラ・フィジックス社(Spectra-Physics)所属。
e-mail: raj.patel@spectra-physics.com URL: www.spectra-physics.com