DUVレーザによる微細加工技術開発

三菱重工工作機械(株)

近年、電子部品やプリント回路基板等の小型化、高機能化が進展しており、穴加工を代表とした超精密加工の更なる微細化、高品質化のニーズが高まっている。そのようなニーズに対応可能な手法として、短パルス、短波長のレーザを用いた加工方法が注目されている。ピコ秒のような短パルスレーザを用いると熱影響を抑制した高品質、高精度なアブレーション加工が可能である。また、短波長のレーザを用いるとレーザ集光径を小さくすることができるため、より微細な加工が可能である。現在、微細加工用短パルスレーザとして、YAGレーザ(波長1064nm)をはじめとして、YAG第二高調波(波長532nm)であるグリーンレーザ、及びYAG第三高調波(波長355nm)であるUVレーザなどが広く普及している。一方で、第四高調波(波長266nm)である深紫外(DUV:Deep Ultra Violet)レーザは、その取扱いの難しさから普及が進んでいない。

三菱重工工作機械(株)では既に、ピコ秒グリーンレーザを搭載した微細レーザ加工機"ABLASER"を市場投入しているが[1]、加工穴の更なる微細化、高品質化を目的として、ピコ秒DUVレーザを採用した光学系と加工技術を開発した。本稿ではDUVレーザの基本的な加工特性を明らかにするとともに、**図1**に示すDUVレーザを適用した微細レーザ加工機"ABLASER-DUV"による超微細加工事例を紹介する。

DUVレーザ光学系の特徴と加工特性

・DUVレーザ集光光学系の特徴

微細レーザ加工では、加工対象物の表面にレーザ光を集光して照射し、その光エネルギーの作用によって照射面の材料除去を行う。このとき、照射するレーザ光の集光径が小さいほど、加工の微細度を向上できる。集光径を小さくするには、短波長レーザを使用す

図1 微細レーザ加工機"ABLASER-DUV"外観。

る、集光前のビーム径を太くする、焦点距離を短縮する手段が考えられる。ところが、レーザ光波長が紫外領域になるとガラス材料に対する吸収率が高くなるため、レンズなど光学素子への負担を軽減する必要がある。一方、残りの手段では集光角度が大きくなるため加工穴の出入口径差が付きやすく、また焦点深度も浅くなるため、得られる加工穴形状に限界がある。今回開発した集光光学系は、レーザ光源にDUVレーザを採用するため、事前に光学素子に使用するガラスのDUVレーザ光に対する耐性試験を行い、最適なガラス材料を選択するとともに、レーザ照射密度を適切に設定することでレンズの耐久性を確保した。さらに焦点距離とレンズ形状を最適化することで、微小な集光径としながらも集光角度を極小に抑え、長焦点深度を実現した。

・種々の材料に対するDUVレーザ光の加工レート調査

種々の材料に対するDUVレーザ光及びグリーンレーザ光(波長515nm)の加工レートを求め、その特性を比較、評価した。単結晶シリコンカーバイド(SiC)ウエハ、ホウケイ酸ガラス及びステンレスに対して、集光させたレーザ光を1パルスだけ照射し、形成された加工穴の最大深さを計測した。パルスエネルギーを変更しながら加工・計測を実施することで、各材料の加工レートを求めた。試験結果を**図2**に示す。グラフの縦軸は加工深さ、横軸は、照射したレーザ光のエネルギー密度である。レーザ光のエネルギー分布は照射範囲内で均一でないため、ビーム中心近傍のエネルギー密度を参照している。

グリーンレーザと比較すると、加工した全ての材料でDUVレーザ光による加工レートのほうが大きい結果となった。バンドギャップが大きいSiCに対しても、DUVレーザ光では他のレーザに比べて高い加工レートを確認できた。一般的に、短パルスレーザによりアブレーションを誘起させる場合、レーザ光の光エネルギーが被加工材のバンドギャップより大きくなければならない。光エネルギーはレーザ波長に反比例するため、DUVレーザの光エネルギーはグリーンレーザに比べて約2倍大きく、SiCのバンドギャップを上回る。そのため、DUVレーザではSiCのアブレーションを十分に誘起できる。また、ホウケイ酸ガラスに対しても高い加工レートを示したことから、光エネルギーの高さが加工に大きく寄与し

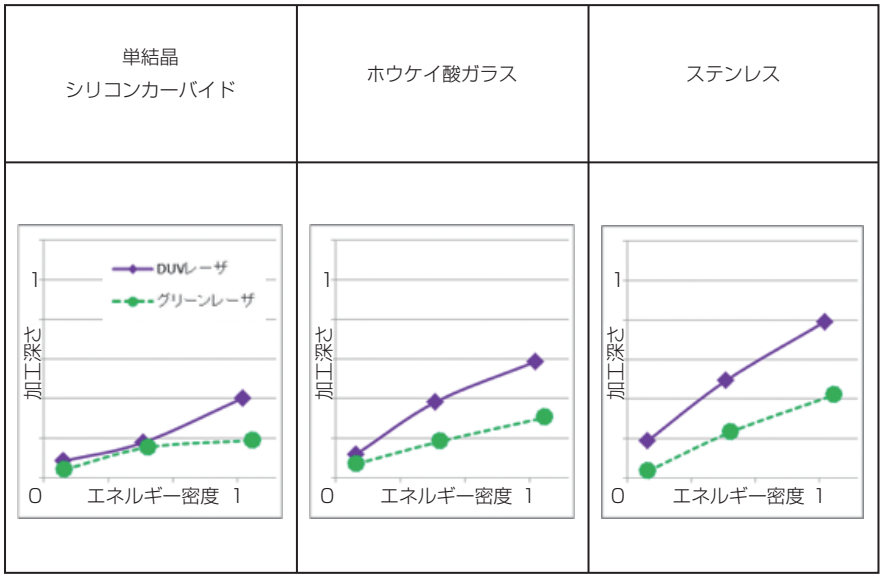


図2　DUV及びグリーンレーザ光のエネルギー密度に対する加工深さ。
縦軸および横軸には正規化した数値を使用、全グラフで尺度は統一。

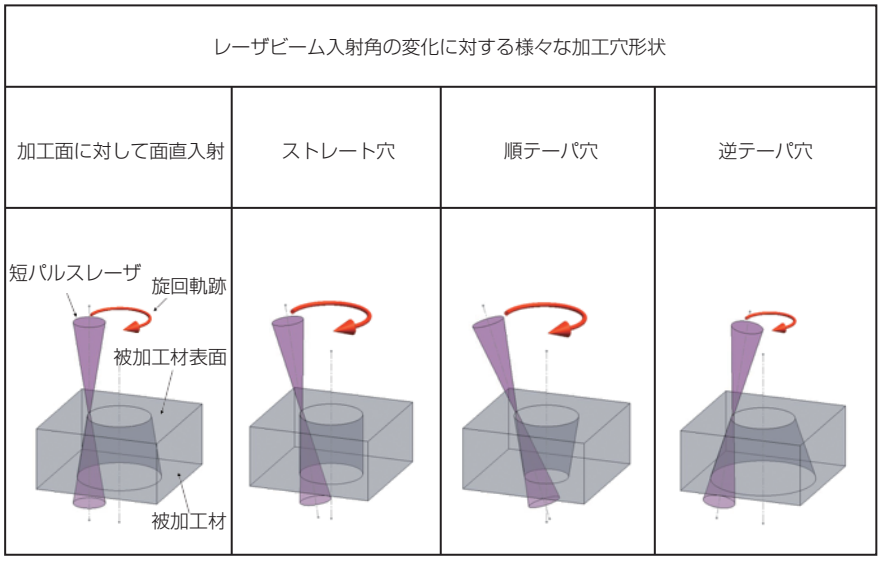


図3　ヘリカルドリリング加工法及びレーザ入射角の制御。
レーザビームを任意の旋回直径に調整し高速で回転させながら加工を実施。更に、レーザビームの入射角を制御することで、ストレート穴、順テーパ穴、逆テーパ穴のように任意の穴形状に加工可能。

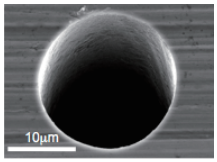
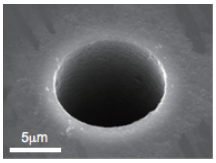
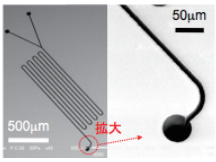
材料	ステンレス（SUS304）	単結晶シリコンカーバイド	ホウケイ酸ガラス
SEM 画像			
穴直径 / 溝幅	20μm	10μm	10μm
材料厚さ / 溝深さ	0.2mm	0.1mm	0.01mm

図4　DUV レーザによる貫通穴及び溝加工 SEM 画像。

ていると考える。

以上の結果より、DUV レーザ光の優位性を示すことができた。また、各材料に対し必要な加工深さを得るための最適な出射パルス数が推測でき、加工品質の向上と能率の最適化が可能である。

ABLASER-DUV による微細加工事例紹介

・ヘリカルドリリング加工法の概要

微細穴加工で広く用いられているパーカッション加工法では、レーザ光の軌道を制御することなく、同一の場所に短パルスレーザを照射する。そのため、レーザスポット形状が被加工材にそのまま転写されてしまい、高い形状精度を実現することが難しい。一方で、DUV レーザ光学系を搭載した微細レーザ加工機“ABLASER－DUV”では、ヘリカルドリリング加工法を採用している。**図3**に示すように、ヘリカルドリリング加工法ではレーザ光の軌道を高精度かつ高速に旋回させて加工を行う。そのため、真円度の良い高品質な穴加工が可能である。また、独自に開発した光学ヘッドにより、レーザ光旋回直径に加えて入射角の制御が可能であり、任意の加工穴直径及び断面形状を得ることができる（図3）。

・微細穴加工事例の紹介

上述の「種々の材料に対する DUV レーザ光の加工レート調査」で得られた DUV レーザの加工特性からレーザ照射条件を設定し、ステンレス材（SUS304、厚さ0.2mm）、単結晶 SiC ウエハ（厚さ0.1mm）に貫通穴加工、ホウケイ酸ガラス（厚さ0.7mm）に溝加工を実施した。加工結果を**図4**に示す。いずれの加工穴も真円度は良好であったことからヘリカルドリリング加工法により形状精度の高い加工が実現できたといえる。また、加工穴及び溝の内面は平滑であり、再溶融物もないことから、バンドギャップが大きい SiC やホウケイ酸ガラスに対しても、ステンレス材と同様に、熱影響を抑えたアブレーション加工を実現できたと言える。

以上より、DUV レーザ光の採用、集光光学系の最適化、精密なビーム軌道制御によって、従来では加工困難であった直径20μm 及び10μm、アスペクト比10の貫通穴と、幅及び深さ10μm の微細溝の高品質な加工を実現できた。

まとめ

レーザ微細加工の更なる微細化の要求に応えるため、短パルス DUV レーザを適用した光学系を開発し、様々な材料に対する加工特性を明らかにした。さらに、DUV レーザ及びヘリカルドリリング加工法を採用した微細レーザ加工機“ABLASER-DUV”により、加工穴直径最小10μm、アスペクト比最大10の超微細穴加工を実現した。今後も多岐にわたる産業分野における超精密加工の更なる微細化、高品質化要求に対し最適なソリューションを提供できるよう、技術開発を推進する。

参考文献

(1) 中川清隆らほか、微細レーザ加工機“ABLASER”を適用した微細穴加工技術の開発、三菱重工技報 Vol. 52 No. 3（2015) p. 25-29
URL: http://www.mhi.co.p/technology/review/abstractj-52-3-25.html

(2) 今宮悠治らほか、DUV レーザによる微細加工技術開発、三菱重工技報 Vol. 53 No. 4（2016) p.57-62
URL: http://www.mhi.co.jp/technology/review/abstractj-53-4-57.html

ウェブサイト

三菱重工工作機械株式会社　URL: http://www.mhi-machinetool.com/
＜微細レーザ加工機 ABLASER＞
URL: http://www.mhi-machinetool.com/products/detail/laser_micromachining_system-ablaser.html
＜微細レーザ加工機 ABLASER-DUV＞
URL: http://www.mhi-machinetool.com/products/detail/laser_micromachining_system-ablaser-duv.html

ILSJ