深紫外（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ことで、熱影響のないアブレーション加工が可能であり、高精度かつ高品質な加工が実現できる。さらに、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（Deep Ultra Violetの頭文字をとり、DUV）レーザは、その取扱いの難しさから普及が進んでおらず、微細加工システムとしての実績は少ない[1]。しかし、短波長であることから、照射位置でのレーザ集光径を小さくすることができるため穴加工の更なる微細化が期待でき、加えて、種々の材料に対する高い吸収率と高い光エネルギーを有することから、従来では加工困難であった材料にも適用が期待できる。

三菱重工工作機械では既に、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[2]、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。本稿ではピコ秒DUVレーザの基本的な加工特性を明らかにするとともに、DUVレーザを適用したABLASERでの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

微細レーザ加工においては、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材料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、レーザ光に短波長域の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、ポリエチレンテレフタレート（PET）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

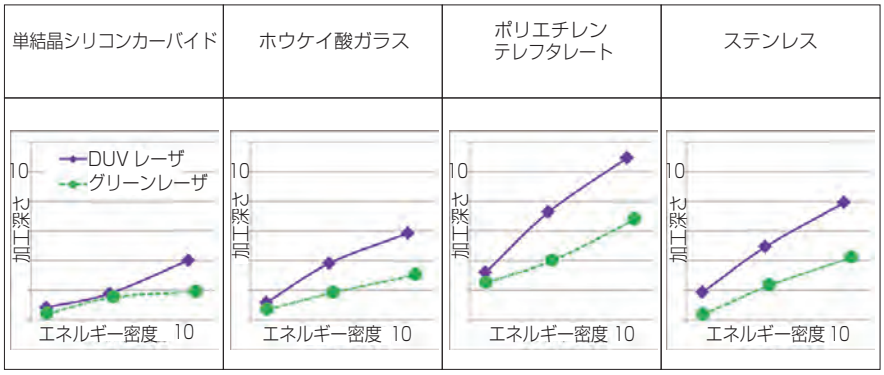


図1　DUV及びグリーンレーザ光のエネルギー密度に対する各材料の加工深さ
縦軸および横軸には正規化した数値を使用、全グラフで尺度は統一。

図2　微細レーザ加工機"ABLASER"外観図。

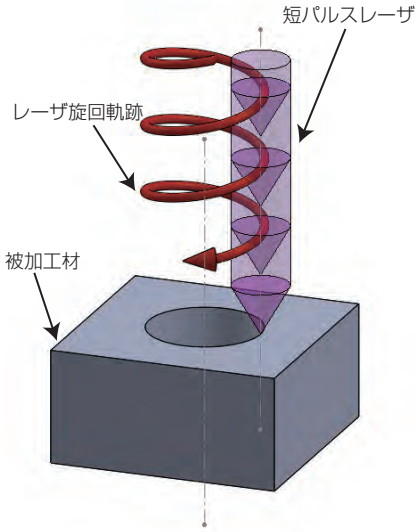


図3　ヘリカルドリリング加工方法
ヘリカルドリリング加工は、レーザビームを任意の旋回直径に調整して高速度で回転させながらパルスレーザを照射。

た加工穴の深さを計測した。加工後の穴断面形状はクレータ状になるため、穴中心の最大深さを計測している。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1**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、密度算出時はビーム中心付近のエネルギーの値を使用している。

DUVとグリーンレーザ光の加工レートを比較したところ、加工した全ての材料でDUVレーザ光の加工レートのほうが大きい結果となった。特に、グリーンレーザ光では加工レートが低く、微細加工が困難であるSiC及びホウケイ酸ガラスに対しても、DUVレーザ光では十分な加工レートを確認でき、高品質な加工が期待できる。

以上の結果より、数種の材料においてグリーンレーザ光に対するDUVレーザ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。

DUVレーザを適用したABLASERによる加工事例紹介

・微細レーザ加工機"ABLASER"の概要

当社では既にピコ秒グリーンレーザ光を採用した微細レーザ加工機"ABLASER"を市場投入している。ABLASERの外観を**図2**に示す。ABLASERでは高品質な加工穴を得るため、**図3**に示す、レーザ光の軌道を高精度に旋回させることができるヘリカルドリリング加工方式を採用している。また、独自に開発した光学ヘッドにより、**図4**に示すように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。さらに、主要構造物にグラナイトを使用し、精密位置決

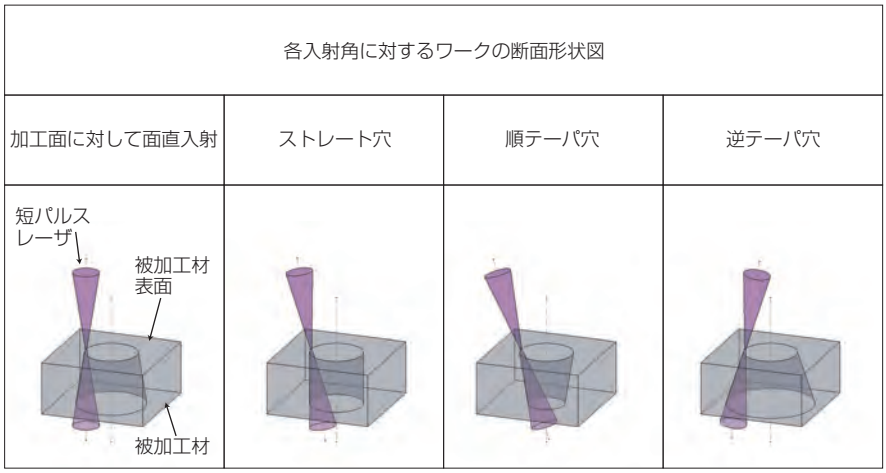


図4　ABLASERによるレーザ入射角の制御
レーザビームの入射角を制御することで、ストレート穴、順テーパ穴、逆テーパ穴のように任意の断面形状に加工可能。

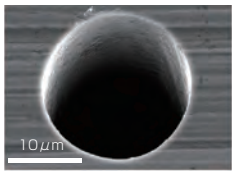
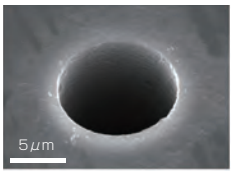
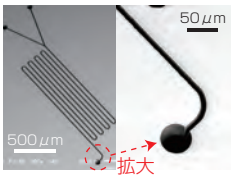
材質	ステンレス（SUS304）	単結晶シリコンカーバイド	ホウケイ酸ガラス
SEM 画像			
穴直径 / 溝幅	20μm	10μm	10μm
材料厚さ / 溝深さ	0.2mm	0.1mm	0.01mm

図5　DUVレーザによる各種材質の貫通穴及び溝加工SEM画像。

めスケールと組み合わせることで、従来のレーザ加工機を超える位置決め精度（±0.001mm以下）を達成している。加えて、五軸制御装置を搭載することで曲面や複雑形状の加工も可能である。

以上のような高精密・高品質なレーザ加工が可能であるABLASERに、DUVレーザ光学系を搭載することで、微細度をさらに向上させた加工システムを構築し、加工を実施した。

・微細穴加工事例の紹介

前述の1パルス照射試験結果から得られた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5**に示す。いずれの加工穴も真円度は良好であった。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、アブレーションにより熱影響の少ない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。今後は他の誘電体や半導体、金属材料に対しても、加工条件を最適化し、穴加工や切断、溝加工を実施してDUVレーザの適用優位性について解明していく。

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、これら光学系を三菱重工工作機械が製作販売する微細レーザ加工機“ABLASER”に搭載し、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) 池田直昭らほか、微細加工用全固体紫外レーザ加工機Meister 1000DF、三菱重工技報 Vol.39 No.6（2002-11）p344-347

(2) 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

LFWJ

LaserFocusWorld JAPAN

オンライン・雑誌広告

お申込受付中

1965年の創刊以来、フォトニクス・オプトエレクトロニクス・レーザ業界を牽引してきた米Laser Focus World誌の日本版、Laser Focus World Japan。
材料加工、医療、バイオ、通信、画像処理など、アプリケーションがますます多岐にわたり、日々新しい技術が誕生するこの業界のテクノロジー・リーダーである日本の技術者のために、グローバルな情報を日本語でお届けしています。

2017年特集（予定）

1月号
中赤外イメージング、VCSELなど
3月号
マーケットレビュー&フォーキャストなど
5月号
ファイバレーザ、ライダ用レーザなど
7月号
赤外センサ、中赤外レーザなど
9月号
新世代レーザ、最新ディテクタなど
11月号
可視光レーザダイオード、UVレーザなど

広告に関するお問合せ・お申込み

株式会社イーエクスプレス
〒141-0022 東京都品川区東五反田1-10-7
アイオス五反田606
tel: 03-6721-9890 fax: 03-6721-9891
email: lfwj@lfw-japan.jp