

極細穴加工における穴内面でのレーザ光の反射がビームプロファイルにおよぼす影響

千葉大学工学部機械工学科○高屋敷 和弘, 千葉大学工学研究院◎比田井 洋史, 松坂 壮太, 千葉 明, 森田 昇

要旨

穴内面におけるレーザ光の反射は高アスペクト比の微細レーザ穴あけを実現させる要因の一つと考えられる。本研究では貫通穴通過直後のビームプロファイルの測定を行うことで、微細穴内部でのビームの伝搬状態を明らかにすることを試みた。まず、加工孔径と試料裏面におけるビーム径の関係を明らかにした。また、試料板厚によるビームプロファイルの変化を観察した。

1. 緒言

近年、高アスペクト比の極細穴はシリコン基板の貫通配線やガラス内部の流路形成、エンジンの燃料噴射ノズルなど様々な分野で多くの需要がある。極細穴の加工法の一つにレーザを用いたものがある。先行研究では、穴内面でのレーザ光の多重反射が、穴底部へレーザ光を効率的に伝搬させる効果があることが示唆されている¹⁾。穴内面での反射はレーザの減衰やビームプロファイルに影響を与えると考えられ、穴内部でのレーザの伝搬状態の解明は高アスペクト比の穴加工を実現するために有益だと考えられる。

そこで本研究では穴内部でのレーザの伝搬を貫通穴通過直後のビームプロファイルから明らかにすることを目的とし、貫通穴通過直後および通過後のビームプロファイルの測定を行った。

2. 加工出力によるビームプロファイルの変化

2.1 実験装置

図1に実験系の概要図を示す。本実験ではホウ珪酸ガラスにZ軸方向からレーザ照射している。レーザを用いてガラスへの穴あけを行い、その後、レーザの出力を下げ、ガラスの穴を通過したレーザをプロファイラを用いて観察する。表1に本実験のレーザ加工条件を示す。焦点レンズは焦点距離 $f=50\text{ mm}$ のものを使用した。また、試料には $1.0\text{ mm}\times 2.0\text{ mm}$ 、板厚 0.3 mm 、 0.5 mm 、 0.7 mm 、 1.0 mm のホウ珪酸ガラスを用いた。ビームプロファイルには、Coherent社製の Beam View Analyzerを用いた。

2.2 実験方法

図2に試料周辺の概略図を示す。まず、試料の $1.0\text{ mm}\times 2.0\text{ mm}$ 面に出力 1.0 W 、 1.2 W 、 1.5 W で穴あけ加工を行う。ここで、レーザを照射した面を試料表面とする。また、レーザの光軸をZ軸と定め、 $Z=0\text{ mm}$ を試料表面とする。貫通穴を加工後、試料を移動せずに試料裏面 ($Z=t\text{ mm}$; 試料板厚) より CCD カメラを用いて試料裏面に加工された貫通穴に焦点を合わせる。その後、CCD カメラをプロファイラに取り換えることで貫通穴通過直後のビームプロファイル測定を行う。その後、試料を移動せずにプロファイラをZ軸方向に移動させ、 $Z=0\text{ mm}$ から $Z=0.20\text{ mm}$ の範囲を 0.05 mm 毎にビームプロファイルを測定する。

2.3 実験結果

図3に板厚 0.3 mm の試料に本実験で用いた条件と同じ加工を行った貫通穴の断面図を示す。図4に板厚 0.3 mm の試料に出力を変化させ加工した穴周りのプロファイル結果および光学顕微鏡を用いて観察した穴周りの透過像を示す。図3より、試料表面や裏面では穴径が大きくなっているが、試料内側 $Z=0.05\text{ mm}$ から $Z=0.25\text{ mm}$ の範囲では平均 $20\text{ }\mu\text{m}$ の穴径であった。穴試料裏面では割れが生じており穴の直径はそれぞれ約 $15\text{ }\mu\text{m}$ 、約 $25\text{ }\mu\text{m}$ 、約 $45\text{ }\mu\text{m}$ である。レーザ径はビーム強度の最大値を基準として、ピーク強度値から $1/e^2(13.5\%)$ のビーム強度となるレーザが含まれる面積を算出し、同じ面積となる円の直径をレーザ径と定義する。しかし、プロファイル結果はピクセル単位で出力されているため基準となる長さが存在しない。本実験では、貫通穴通過直後における穴裏面の面積が等しいものと仮定して、試料裏面における光学顕微鏡での観察結果とプロファイル結果から面積の比を求め、プロファイル結果の基準長さに適用した。図5に貫通穴通過直後および通過後のレーザ径を示す。

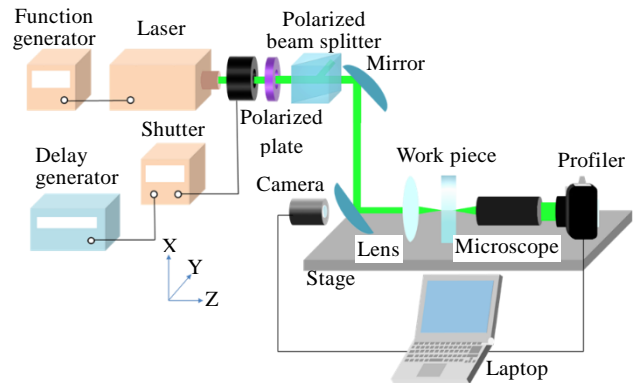


Fig. 1 Schematic drawing of experimental setup

Table 1 The Laser processing conditions

Wave length	266 nm
Power	1.0/1.2/1.5W (10 kHz, lens out)
Repetition rate	10 kHz
Beam diameter	$700\text{ }\mu\text{m}$
Focal length	50 mm
Focus position	Surface of sample

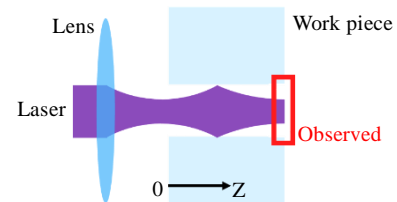


Fig. 2 Schematic drawing of experimental setup

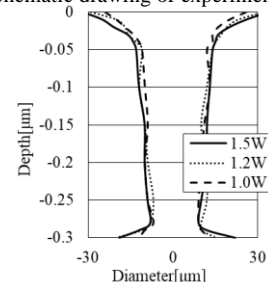


Fig. 3 Hole diameter of sample ($t=0.3\text{ mm}$)

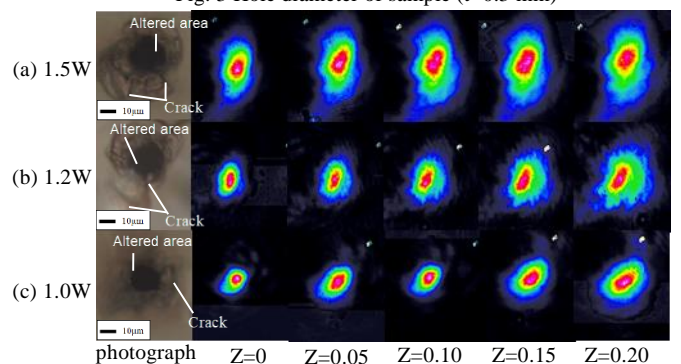


Fig. 4 Beam profiles and photographs ($t=0.3\text{ mm}$) [mm]

図5より、貫通穴通過直後のレーザー径は1.5 Wでは16.3 μm 、1.2 Wでは14.7 μm 、1.0 Wでは13.0 μm である。

2.4 考察

図3より、穴試料裏面における加工穴の直径は出力1.5 Wでは約45 μm 、出力1.2 Wでは約25 μm 、出力1.0 Wでは約45 μm であった。ここで、本実験と同条件における焦点位置でのレーザー径であるスポット径 d_0 を求めると24.2 μm となり、図3と比較するとスポット径より小さな径の穴が加工されている。これは、レーザーが穴内面において反射しているためと考えられている。図4、図5より、試料内側での平均穴径の変化は約2 μm であったが、貫通穴通過直後のレーザー径は約5 μm 異なっている。これは、穴裏面における試料の欠けがビームプロファイルに影響を与えているためであると考えられる。図5より、試料裏面におけるレーザー径と試料裏面から0.20 mmの地点におけるレーザー径の比を取り比較をすると、1.5 Wでは1.4倍、1.2 Wでは1.6倍、1.0 Wでは1.8倍に拡大している。レーザーは回折角度が大きいと拡散しやすくなるため、穴径が小さいレーザーは大きく回折をしていることが考えられる。穴径 a mmにおける円形開口による回折強度 $I(\theta)$ とすると、 $I(\theta)$ は次の式で表される²⁾。

$$I(\theta) = I(0) \left[\frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right]^2 \quad (2.1)$$

ここで、 J_1 をベッセル関数、 $I(0)$ を $\theta=0$ における回折強度とする。また、ピーク強度値から $1/e^2$ (13.5%) の強度となる場所の角度を回折角度とする。出力1.0 Wにおける貫通穴から15 μm における拡散角度を同穴径の円形開口による回折角度と比較すると、それぞれ1.47°と0.81°となり拡散によるレーザーの拡散より大きくなっていることがわかる。

3. 試料板厚によるビームプロファイルの変化

3.1 実験結果

図6に試料板厚を変化させ、出力1.5 Wで加工した穴周りのプロファイル結果および光学顕微鏡を用いて観察した穴周りの透過像を、図7に貫通穴通過直後および通過後のレーザー径を、図8に貫通穴通過直後のレーザーの強度分布を示す。図8は測定結果と最小2乗法で正規分布に近似したものである。

3.2 考察

図6、図7より、穴径の大きな板厚0.5 mmと0.3 mmには穴裏面にレーザーによる変質域が多く、試料裏面が欠けていることがわかる。また、穴径の小さい板厚0.7 mmと1.0 mmにはひび割れが多いが、ビームプロファイルは円形に近い形状であった。よって、貫通穴通過直後のビームプロファイルはひび割れによる影響は少ないが、試料の変質や欠けの影響は大きく受けると考えられる。また、図8より貫通穴通過直後のレーザーは板厚に依らずガウス分布を持つことが分かった。一般に多重反射後のレーザーは矩形のフラットトップレーザーになることが知られている³⁾。これは、極細穴ではレーザーの伝搬が特殊なためであると考えられる。ガウシアンプロファイルは中心部のエネルギー強度が高いため加工性がよく、深穴加工に適している。よって、極細穴における高アスペクト比の穴あけを可能としている要因であると考えられる。

図7より、試料裏面におけるレーザー径と試料裏面から0.20 mmの地点におけるレーザー径の比を取り比較をすると、0.3 mmでは1.4倍、0.5 mmでは1.3倍、0.7 mmでは1.9倍、1.0 mmでは3.9倍に拡大していることがわかった。また、板厚1.0 mmにおける貫通穴の穴径10 μm における拡散角度を同穴径の円形開口による回折角度と比較すると、それぞれ1.90°と1.22°となり回折によるレーザーの拡散より大きくなっていることがわかる。

5. 結 言

本研究では次のような結果を得た。

1. 加工出力、試料板厚を変化させビームプロファイルを行った結果、小さな穴径を通過したレーザーは貫通穴通過後に大きく拡散することがわかった。
2. 貫通穴通過直後のビームプロファイルは、試料裏面の変質および

欠けの影響を大きく受けることがわかった。

3. 貫通穴通過直後のレーザーの強度分布は、板厚に依らずガウシアンビームであることが分かった。

6. 参考文献

- 1) 比田井洋史 伊東翔 戸倉和：UV レーザによる高アスペクト比小径穴あけ加工(第2報)—集光条件の影響—, 精密工学会誌 76, 11(2010)1266.
- 2) 中島洋(2011)：「Eccel できる工学設計」, アドコム・メディア株式会社
- 3) A.Haghighatzadeh：Flat-top beam profile generated using a fiber-bundle prism-coupled beam shaper, Opt. Comm., 284(2011)2817-2824

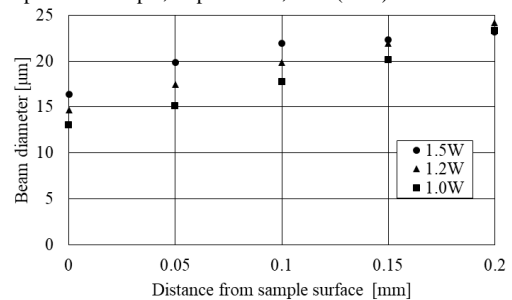


Fig. 5 Beam diameter of profiles ($t=0.3$ mm)

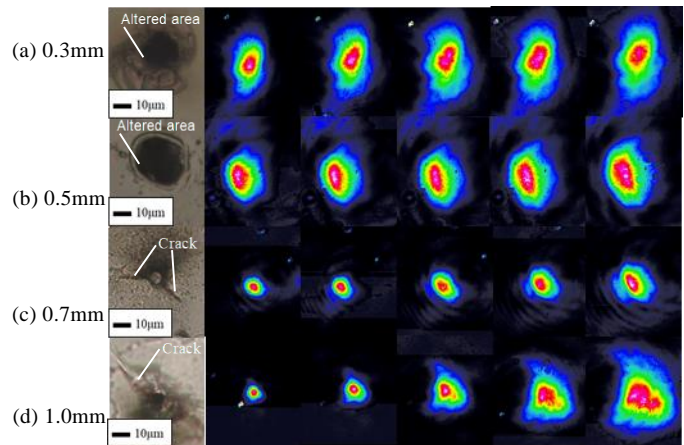


Fig. 6 Beam profiles and photographs (Power=1.5 W) [mm]

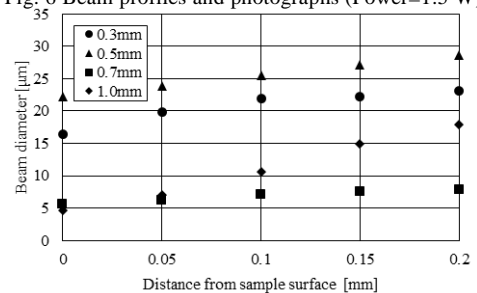


Fig. 7 Beam diameter of profiles (Power=1.5 W)

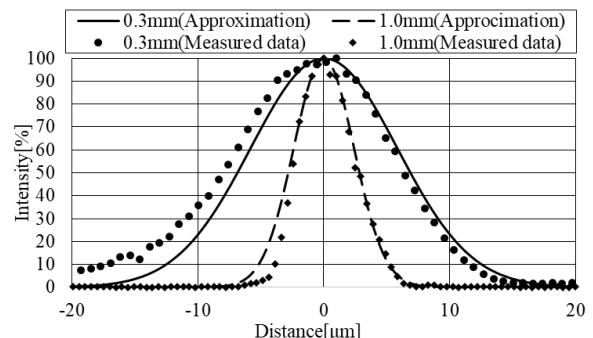


Fig. 8 Beam intensity (Power=1.5 W)