

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24年 4月 1日現在

機関番号：12501

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22760094

研究課題名（和文）極細かつ高アスペクト比レーザ穴あけの研究

研究課題名（英文）A study on of the high-aspect-ratio hole drilling process
by the laser illumination

研究代表者

比田井 洋史 (Hidai Hirofumi)

千葉大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：60313334

研究成果の概要（和文）：申請者らが見いだした小径かつ深穴あけが可能となる条件を明らかにすることを目的としている。穴内部のビームのエネルギー分布を測定した結果、穴内部のビームプロファイルは深さに関係なく常に同様な傾向となり、そのプロファイルはガウス分布に類似していた。さらにプラズマの挙動を観察した結果、プラズマの発生はレーザ光照射から 20ns 後までで、その移動速度は 20km/s 以上だと明らかにした。

研究成果の概要（英文）：We have been reported that drilling a hole with the aspect ratio of >190 and the diameter of ~8 μ m in borosilicate glass was achieved by the fourth harmonics Nd:YVO4 laser illumination. In this project, I report the results of beam profile measurement in the hole to control the hole diameter and reveal the drilling process. Beam profiles that passed through holes were measured with a beam profiler and by knife edge scanning method. As a result, beam profile in the hole was constant regardless of the depth, and the intensity distribution was similar to a Gaussian distribution.

The laser plasma was observed with a high-speed camera. As a result, it is found that the generation duration of the laser plasma was 20ns. And, the laser plasma was restricted by the inside wall of the hole.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2011 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：特殊加工

1. 研究開始当初の背景

極細、高アスペクト比の穴加工は、例えば、エンジンの燃料噴射ノズルをはじめとして幅広いニーズがある。このような極細穴あけには、レーザ、ドリル、放電加工(EDM)、反応性イオンエッチング(RIE)といった加工法

が利用されている。しかし、直径 30 μ m 程度以下の極細、かつ高アスペクト比を達成しようとするとき、切りくずの排出が問題となり、レーザ、ドリル、EDM ではアスペクト比 20 以下、RIE でも 60 程度が限界である。

この中でレーザ光を利用した深穴あけは、

レーザー光を集光して照射するため加工の進展と共に加工穴の底にあわせて焦点の位置を送っていく必要がある。しかし、焦点から離れることで、レーザーのビーム径は太くなる。このため、焦点位置を送ることで穴入口の径よりもビーム径の方が大きくなり、金属をはじめとする不透明な材料では穴の入口でビームが妨害されてしまう、さらには生成したプラズマによりレーザー光が吸収されてしまうといった原因で穴底部へ十分なエネルギーを投入できなくなり、加工がとまってしまふ。

比較的小さなエネルギーで加工が進むエキシマレーザーを使ってポリマーを対象に穴あけした場合には、アスペクト比 100 を越える穴あけが報告されている。しかし、今まで半導体、金属、セラミックスなどを対象にした場合には、高アスペクト比の穴あけは、これまで困難であった。

申請者らは、高出力高繰り返し紫外線パルスレーザーを照射した時、ある条件でシリコン、ガラス、金属に高アスペクト比の極細穴あけが可能であることを見いだした。入り口付近にはテーパがかかっているもの、ある程度深くなると直径は一定となり、長さ 1.56mm の範囲に渡って $\phi 8.2 \pm 3.1 \mu\text{m}$ (アスペクト比 190)、0.78mm の範囲にわたって $\phi 6.3 \pm 1.0 \mu\text{m}$ (アスペクト比 100 以上) の穴が得られる。

2. 研究の目的

このような極細高アスペクト比の穴あけが可能となる条件を明らかにする。これまで、波長の影響、繰り返し周波数、ビームのプロファイル、プラズマの挙動などそれぞれの影響については多くの研究がなされている。しかし、本申請のような、高アスペクト比の穴あけが可能にした原因を統合的に検討できるようなモデルはない。そこで、各条件の影響について測定、解析した後、統合し、高アスペクト比の穴あけを可能とする条件を明らかにする。

3. 研究の方法

3. 1. プロファイルの測定

通穴通過後におけるビームプロファイルの測定を行った。また、試料には Pyrex ガラスを用いた。実験装置の概略図を図 1 に示す。まず試料に対して表 1 に示した条件でレーザー光を照射し貫通穴を加工する。その後、試料を移動せずにレーザー光を低エネルギーで照射し試料下部でビームプロファイルを測定する。この時の光学系概略図を図 2(a) に示す。レーザー光による穴加工結果より穴径は 10・m 前後とビームプロファイルの空間分解能に比べて小さい。そこで、貫通穴通過後のレーザー光を焦点距離 $f=9.1\text{mm}$ (波長 266nm におい

て)のレンズでビームプロファイラーの受光面に拡大して結像した。プロファイラー受光面におけるビーム径は試料裏面の位置と比較して約 30 倍に拡大される。

さらにナイフエッジ掃引法によりビームプロファイルを推測し、プロファイラーにより測定した結果と比較した。光学系の概略図を図 2(b) に示す。ナイフエッジ掃引法とは同図に示したようにナイフエッジを試料下部に設置し、一部遮蔽されたレーザー光のエネルギーをパワーメーターにより測定する。そして、ナイフエッジをわずかに移動させエネルギーを測定する。この結果とガウス分布の場合とを比較しビームプロファイルを推定した。

3. 2. プラズマの観察

穴加工時に発生するプラズマを試料側面方向から観察した。プラズマの観察にはナックイメージテクノロジー社製高速度ビデオカメラ ULTRA Neo を使用した。穴加工条件は前節と同様とし、高速度ビデオカメラの撮影条件は露光時間 20ns、撮影速度 50Mfps とした。

4. 研究成果

4. 1. 1. ビームプロファイル測定

試料厚さ t を 0.3, 1.0, 1.7mm と変化させてビームプロファイルを測定した結果を図 3 に、試料裏面を光学顕微鏡により観察した結果を図 4 にそれぞれ示す。表 1 に示した条件で Pyrex ガラスに対して非貫通穴を加工し側面から観察した場合、深さ 0mm の位置では穴径 15・m, 1.0mm では 14・m, 1.7mm では 9.7・m 程度 1) となった。また、図 4 より貫通穴の試料裏面における穴径ははっきりとしないがそれぞれ 0.3mm で 12・m, 1.0mm で 3.3・m, 1.7mm で 2.4・m であった。以上の結果より貫通穴の試料裏面における穴径と非貫通穴の深さが貫通穴を加工した試料の厚さに等しい位置における穴径が異なる。その理由として貫通することで大きく状況が変わったためだと考えられる。ビームプロファイルの測定結果でガウス回帰を行った場合のビーム径は試料厚さ 0.3mm で 217・m, 1.0mm で 127・m, 1.7mm で 130・m であった。これらの値を 30 で割ると試料裏面におけるビーム径となり、それぞれ順に 7.2・m, 4.2・m, 4.3・m となる。ビーム径と穴径が異なる理由として、ガウス分布は本来無限の広がりを持つが本実験ではレーザー光が穴を通過することでレーザー光の伝搬領域が制限されること、試料裏面での穴径が小さくなっていることの以上 2 つが考えられる。図 3 より、強度が高い中心部以外にもレーザー光が測定されている。これは図 4 からわかるように、試料の裏面にはクラックが多数発生しているため、または試料裏面からレーザー光が射出される際に起

きる回折によりレーザー光が散乱したためだと考えられる。

図3より、穴内部のビームプロファイルは深さの影響が小さく、どの位置でも傾向が一致しておりガウス分布に類似する。ガウス分布の粗度は試料厚さ0.3mm以外9%以下であった。0.3mmにおける粗度は約27%となった。これは上述したようにレーザー光が散乱しているためであり、プロファイル中心部のみに着目した場合はガウス分布に概ね一致していた。

4. 1. 2. ナイフエッジ掃引法

ナイフエッジ掃引法を行った結果を図5に示す。同図の縦軸はパワーメーターの測定値をナイフエッジ挿入前のエネルギーで除した値とし、横軸はビーム中心を原点としたナイフエッジ刃先の移動量とした。また、同図のガウス分布はビーム径14・μmの平行光でナイフエッジ掃引法を行った場合の計算値である。測定値は試料厚さt=1.0mmにおける実験結果である。これらの比較より、測定値はガウス分布に近いことがわかる。また、他の厚さの試料においても同様な傾向となった。よって、穴内部のビームプロファイルはガウス分布に類似すると確認できる。

4. 2. プラズマの観察

試料表面で発生したプラズマ(照射回数10パルス)、穴内部で発生し外部へ噴出するプラズマ(同250パルス)、穴内部のみに存在するプラズマ(同2000パルス)の観察結果を図6に示す。同図はレーザー光を照射した瞬間を0nsとした。同図(a)より、プラズマの底が上部へ移動していた。よって、プラズマの発生はレーザー光照射後20nsの時点で終了していることがわかる。同図(b)より、穴内部に存在するプラズマと外部に放出されたプラズマの両方が確認でき、40nsに着目した場合それらのプラズマが分離していた。これは上述したようにプラズマはレーザー光照射後40nsの時点で発生していないため、穴内部のプラズマは外部へ押し出されることがないためである。同図(c)より、20ns間で475・μm拡散しているため、拡散速度は約24km/sだった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計2件)

- ①藤井真人, 比田井洋史, 松坂壮太, 森田昇: レーザ光による高アスペクト比小径穴あけのメカニズムの解明, 2012年度精密工学会春期大会学術講演論文集, (2012) 21-22.
- ②藤井真人, 比田井洋史, 松坂壮太, 森田昇: 高アスペクト比穴加工時に発生するレーザープラズマの研究, 2011年度精密工学会秋期大会学術講演論文集, (2011) 621-622.

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称: スルーホール電極の形成方法
 発明者: 中壽賀章, 江南俊夫, 比田井洋史, 伊東翔, 長澤正道, 立川茂
 権利者: 千葉大学,
 種類: 特許
 番号: 特願2010-217333
 出願年月日: 2010年9月28日
 国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<http://www.em.eng.chiba-u.jp/~hidai/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

比田井 洋史 (Hidai, Hirofumi)

千葉大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 60313334

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

表 1 Experimental conditions

Energy	100μJ/pulse
Repetition rate	10kHz
Pulse number	5000
Pulse width	8ns
Focal distance	50mm

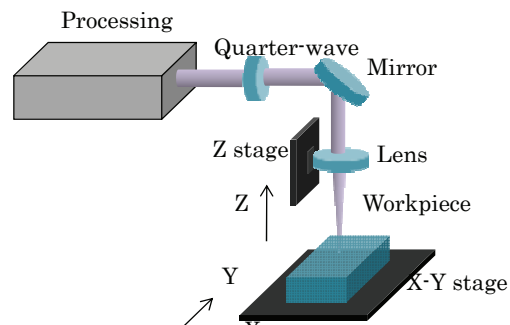


図. 1 Schematic drawing of experimental

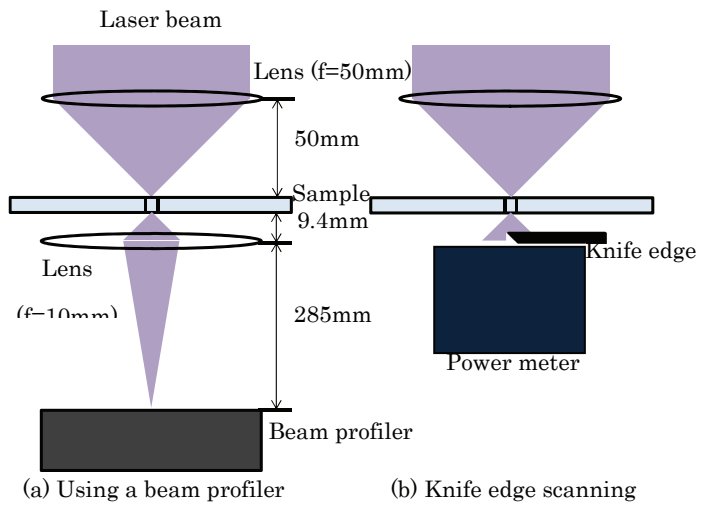


图 2 Schematic drawing of optics for beam profile

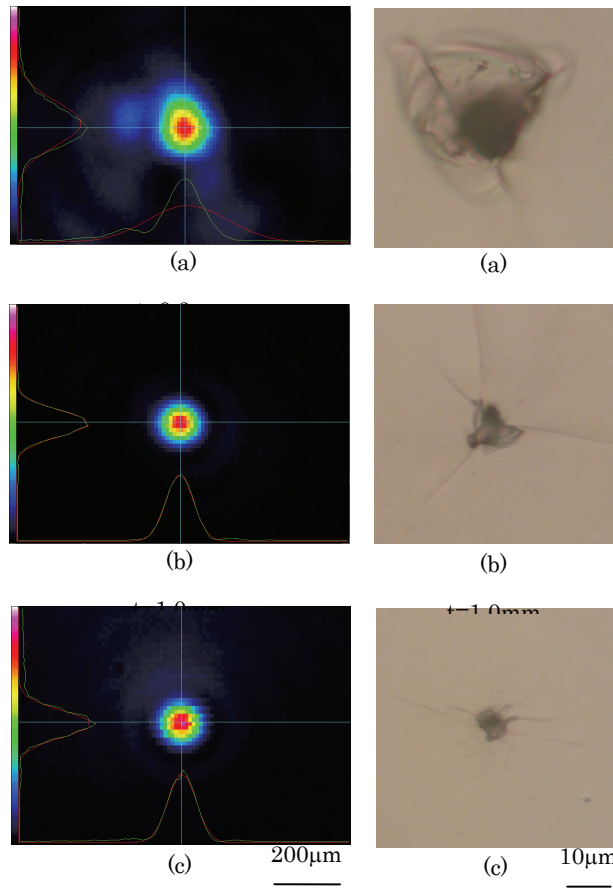


图 3 Beam profiles 图 4 Photographs of the holes

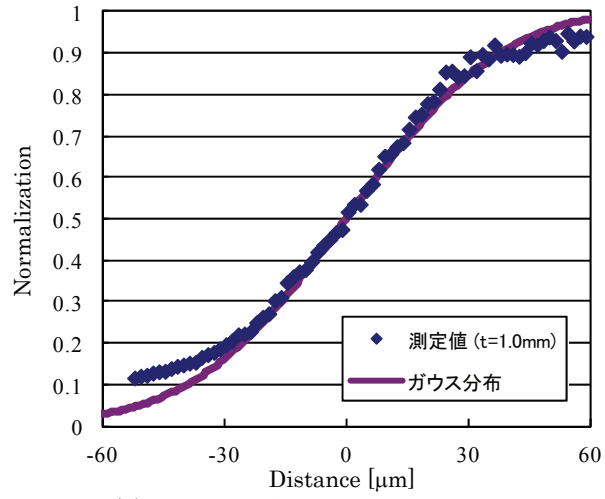


図 5 Results of knife edge scanning method

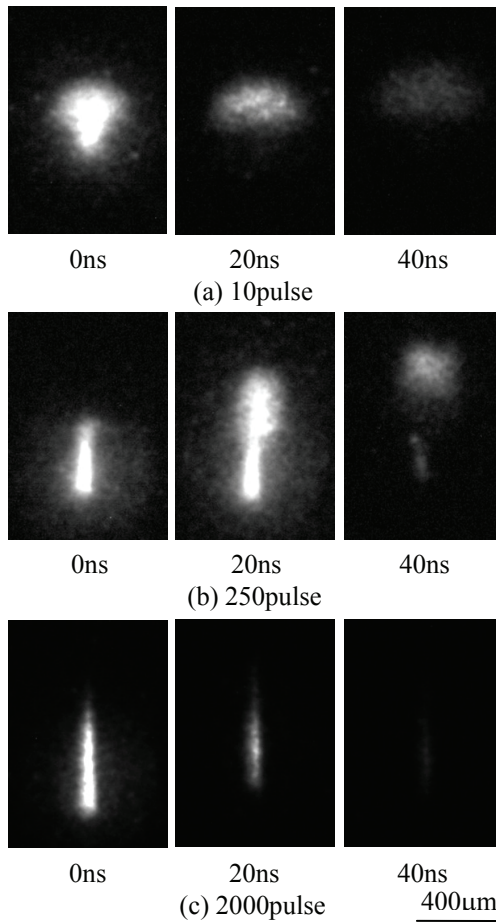


図 6 Photographs of the plasma