Review 3. レーザ光でしかできないマイクロ加工

H. Hidai

レーザ照射による小径深穴あけと穴内面への成膜

比田井　洋史 *

1.　はじめに

小径かつ深穴加工は，多くのニーズがあり，対象となる材質にも様々なものがある．具体的にはエンジンの燃料噴射ノズルでは耐熱性に優れるクロムモリブデン鋼[1]や高速度鋼[2]，化繊製造用ノズルでは耐食性に優れるステンレス鋼[3]，微小流路の作製では，透明性や耐食性に優れるガラス[4]，冷間成形や引抜き金型では超硬合金[5]，半導体用の貫通配線（TSV：Through-silicon via）ではシリコンウエハが挙げられる．

このような小径深穴あけには，レーザ，ドリル，放電加工，反応性イオンエッチング等の加工法が利用されている．樹脂を対象とした場合では，エキシマレーザにより直径数 10 μm，アスペクト比 600 の穴あけ[6]が報告されているが，金属，半導体などを対象とした場合では，50 を超えるような高アスペクト比の加工は容易ではない．

この中で，著者らは高繰り返し UV レーザを用いることで小径かつ深穴加工を実現してきた[7]．ホウ珪酸ガラスを対象とした場合ではφ8.2 ± 3.1μm でアスペクト比 190，φ6.3 ± 1.0 μm でアスペクト比 100 以上の穴あけの実現した．

本稿では他の材料として，高速度鋼，ステンレス鋼，超硬合金，またその他広く利用されている材料として，アルミニウム合金，半導体への応用なども考えシリコンを被加工材とし，その深さや形状について評価を行った結果を述べる．このガラスの穴あけを行っている際に一度直径 20μm 程度の太く空いた穴が，さらにパルス照射することで直径 10μm 程度まで細くなる現象を見いだした．これは，より深いところから蒸発した材料が内面に厚く再堆積したものである．この内面への再堆積現象を利用し，異なった材料を重ねてレーザにより穴あけすることで，穴あけと同時に，上面の材料内面に下面の材料を堆積させ，穴あけと同時に内面への異種材料の成膜を行う手法を紹介する．

2.　実験方法

2.1 実験装置および被加工材料

実験装置を図 1 に，加工条件を表 1 に示す．光源には Nd:YVO_4 レーザの第 4 高調波を用い，レンズで集光した．光軸と直交する方向から観察できるようにカメラをセットし，反対側より照明光を導入することで，透過光像を機上にて観察した．

本報で使用した材料は以下の通りである．ホウ珪酸ガラス，超硬合金（住友電気工業（株），イゲタロイ，材種：A1，厚さ：1.2 mm），アルミニウム合金（A5052，厚さ 3 mm），高速度鋼（SKH51，厚さ 2 mm），ステンレス鋼（SUS304，厚さ 3 mm）．シリコンウエハである．

さらに，内面の成膜では，ガラス，シリコン，銅を重ねた試料を用いた．ホウ珪酸ガラス（厚さ 0.5 mm），シリコンウエハ（厚さ 100 μm），塩ビフィルム（厚さ 30 μm，銅とシリコンが接合するのを防ぐ），銅板（厚さ 2mm）を重ね，ジグで固定した試料を用いた．この模式図を図 2 に示す．

2.2 実験手順

本研究で使用した材料はガラス以外は不透明であるため穴の形状などの評価には試料を切断し，観察する必要がある．そこで，同じ条件で多くの穴を 1 列あけ，その後，試料を斜めに研磨し，各深さにおける断面を観察することで，深さ，形状を評価した．詳細については文献 8 をご覧頂きたい．内面の成膜では，クロスセクションポリッシャにより穴の中心軸を通るように切断し，観察した．

3.　実験結果および考察

3.1　ガラスへの穴あけ

パルスエネルギー100 μJ，繰り返し周波数 10 kHz，焦点距離 30 mm の集光レンズを用いて厚さ約 2 mm のホウ珪酸ガラスにレーザ照射したところ，5000 パルス以上の照射で貫通が確認できた．5000 パルス照射後にあいた穴を観察した結果を図 3 に示す．同図(a)が穴側面より観察した穴の全体図で，図の上部よりレーザ光を照射している．同図(b)は同図(a)の形状をプロットしたものである．

穴の入り口は直径 20 μm 程度であり，この直径の大きい部分は約 300 μm の深さまで続いている．その後，細くなり深さ 650 μm 付近で約 7.5 μm まで細くなる．その後深さ 850 μm – 1100 μm 付近では太さは約 10 μm でほとんど一定となる．深さ 1100 μm – 1350 μm の付近で徐々に細くなった後，1350 μm – 2040 μm の範囲でほとんど一定となった．

表面からの深さ 480 μm – 2040 μm の範囲ではφ 8.2±3.1 μm，深さ 1360 μm - 2040 μm の範囲ではφ 6.3±1.0 μm であった．

3.2　穴の形状変化

レーザ光を 500 パルス照射し，カメラで撮影した後，さらに 500 パルス照射し，再度撮影することを繰り返し，穴の形状変化を撮影した．

* 千葉大学大学院工学研究科　准教授

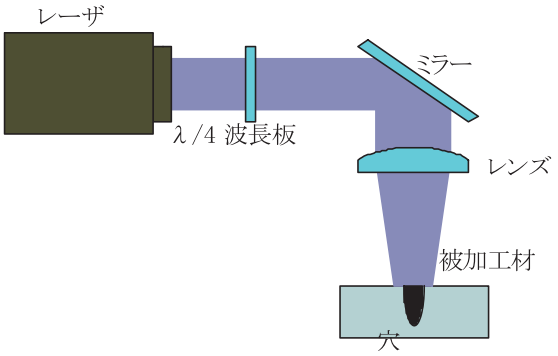

図 1　実験装置模式図

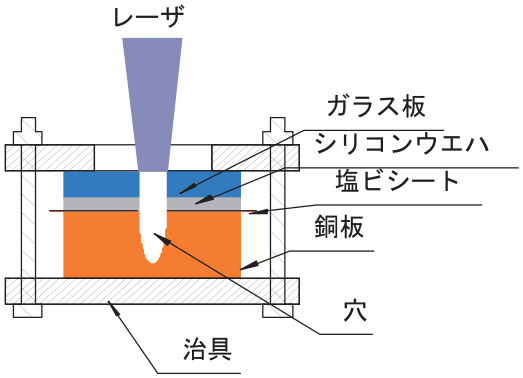

図 2　内面成膜のための実験装置模式図

表 1　照射条件

レーザ	Nd:YVO_4 レーザ（4 倍波）
波長	266 nm
パワー	100 μJ
繰り返し周波数	1 kHz，5 kHz，10 kHz，15 kHz
パルス幅	8 ns
ビームモード	TEM00
M^2	< 1.2
被加工材	ホウ珪酸ガラス（コーニング 7740） シリコン，ステンレス鋼（SUS304），アルミニウム合金（A5052），高速度鋼（SKH51），超硬合金
集光レンズ	
焦点距離	30mm，50 mm

結果の一例を図 4 に示す．穴の先端付近での形状を評価するために，先端部分を拡大して撮影している．図 4 は深さ 700μm 程度のあたりを観察している．図 4 より 1500 パルス照射後では，直径 20 μm 程度のほぼ一定の太さの穴が得られていることが分かる．先端部分 100 μm 程度の範囲では，テーパ状になり細くなっている．さらにこの穴の先端部分周囲には周囲とは色の違う変質部が観察される．この変質部は熱影響層やクラックなどと考えられる．さらに 500 パルス照射

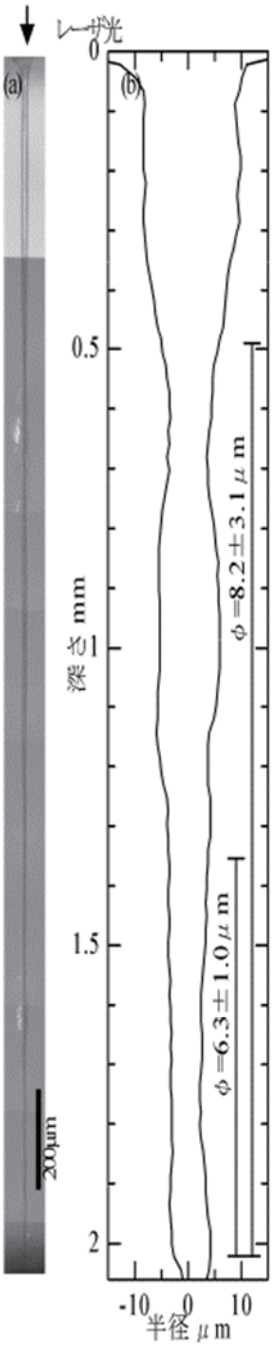

図 3　ガラスにあけた穴の一例

（トータル 2000 パルス）することで，穴が深くなっていると同時に，すでに得られた穴の部分は細くなっている．図 4(a)，(b)の四角で囲んだ部分の拡大図を(c)，(d)に示す．数 μm 程度細くなっており，矢印で示すように，(d)では(c)ですでにあった変質部の内側にもう一層変質部が認められる．このことから，パルス照射を進めることで内面により深いところから蒸発したガラスが再堆積したものと考えられる．

500 パルス照射毎の形状をプロットしたものを図 5 に示す．表面 50 μm から 1400μm 程度の範囲では，一度太く空いた穴がさらにレーザを照射することで，細くなっていることが分かる．この太さの変化は直径で最大 10μm 程度であり，表面 50 μm から深さ 700 μm 程度までは比較的大きく，700 μm か

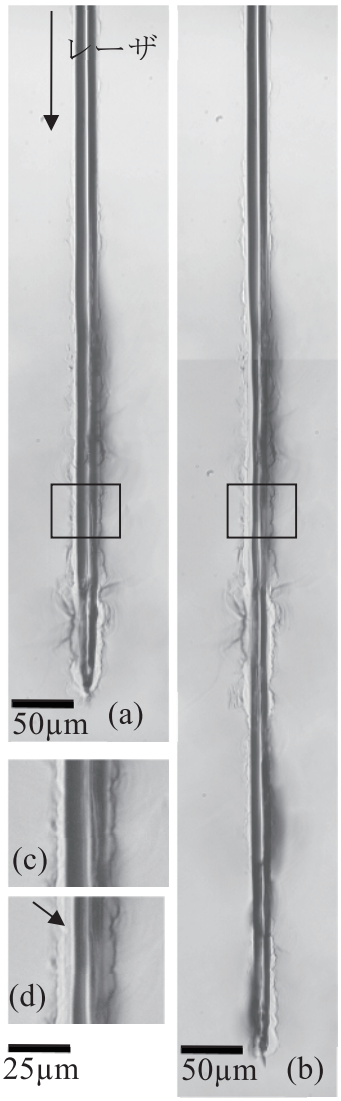

図 4　穴の形状　(a) 1500 パルス，(b) 2000 パルス (c)，(d) はそれぞれ，(a)，(b) の四角で囲まれた部分の拡大図，パルスエネルギー：100 μJ.

ら 1400 μm の範囲では 5μm 以下程度と比較的小さいことがわかる．深さ 1400 μm よりも深い位置では特に太さの変化は認められない．

3.3　ガラス以外の材料への応用

ガラス以外の材料へ同様の条件で穴あけし，深穴加工を試みた．穴断面は必ずしも綺麗な円ではなく，楕円になっている箇所も認められた．穴の縦，横方向の長さを測定したが，差は最大で 25%程度であった．また特に方向性は認められなかった．このため，この楕円になるのは偏光やビームプロファイルなどによる影響とは考えられない．穴の 2 方向の幅の平均を穴径と定義し，プロットした結果を図 6 に示す．穴の先端部分において複数の穴が認められる部分があり，穴径を定義できないため，枝分かれがおきる直前の大きさで，白抜きで表記してある．いずれの材料も表面近傍では半径 15 μm

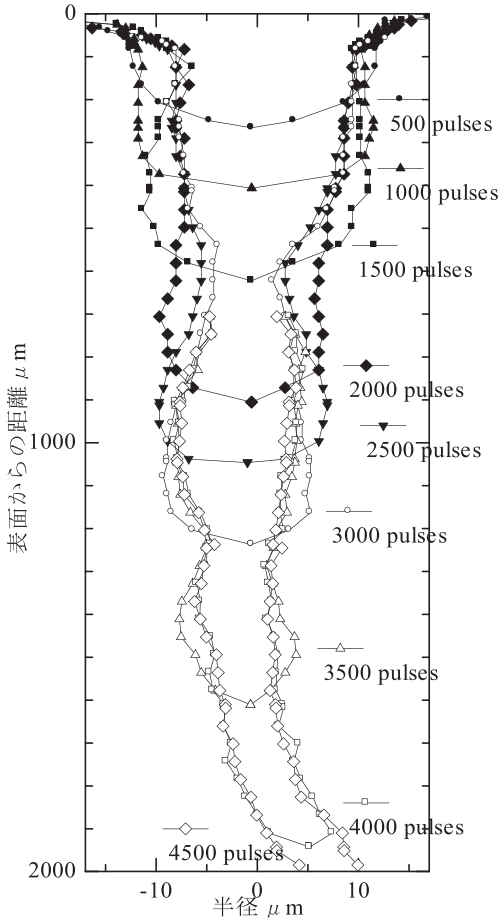

図 5　穴の形状変化，レンズ焦点距離：50㎜，パルスエネルギー：100 μJ，パルス数：10000 パルス

程度から徐々に細くなり，深さ 200 μm から 400 μm 程度で半径 5 μm 程度となる．その後，半径 3 μm 程度まで徐々に細くなり，試料によっては枝分かれし，最終的な深さは 600 μm 程度から 1400 μm 程度であった．それぞれの材料において直径が 10 μm よりも小さくかつ枝分かれがおきていない領域における，最も大きい直径と小さい直径との平均値，その範囲，および平均値と深さから求められるアスペクト比をまとめたものが**表 2** である．高速度鋼，シリコンウエハ，ステンレス鋼で 55 以上と高いアスペクト比が達成できている．アルミニウム合金と超硬合金ではアスペクト比が 26，17 と小さくなっている．

この違いについては，超硬合金では主成分であるタングステンカーバイトの融点が 3143 K と高いため，熱の蓄積の影響が出にくかったことが考えられる．熱物性の違い以外にも，穴内部に生成するプラズマの影響なども関係し，詳細な原因の解明は困難である．

3.4　内面への成膜 [9)]

3.2 節で述べた穴内部への再堆積現象を利用して，内部に異なる物質の成膜に利用することを検討した．表面近辺には再堆積層が認められないことがわかる．比較的再堆積層が厚

表 2　アスペクト比

材料	直径	深さ	アスペクト比
アルミニウム合金	7.7 ± 2.9 μm	570 – 780 μm	26
超硬合金	6.9 ± 3.1 μm	350 – 460 μm	17
高速度鋼	7.0 ± 3.0 μm	420 – 820 μm	56
シリコン	7.3 ± 2.7 μm	580 – 1050 μm	64
ステンレス鋼	7.2 ± 2.8 μm	360 – 760 μm	55

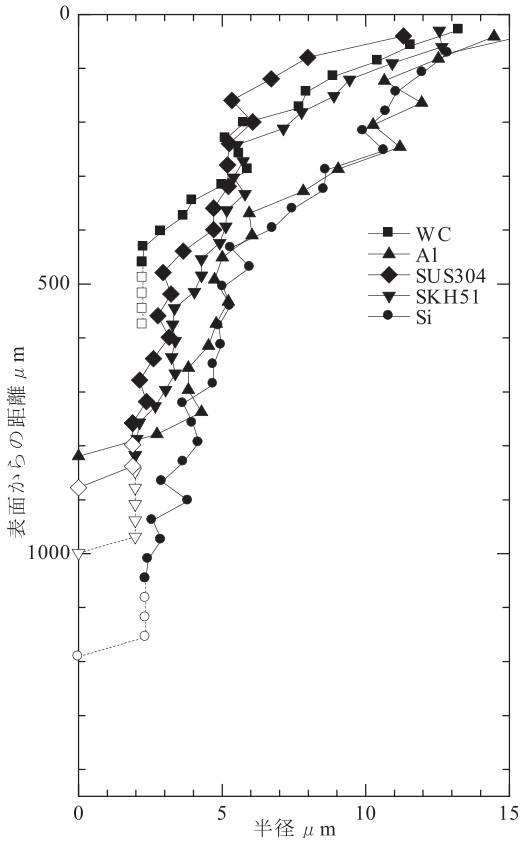

図 6　穴の形状　超硬合金(■)，アルミニウム合金（A 5052，▲），ステンレス鋼（SUS304 ◆），高速度鋼（SKH 51 ▼），シリコン(●)．白抜きは複数の穴が認められた場合．焦点距離：50mm，パルスエネルギー：100 μJ，パルス数：10000 パルス

い深さ 500 μm 程度の付近を利用することを考え，厚さ 500 μm のガラスの下に，シリコン，その下に銅を重ねてジグで固定し，シリコンの内面に銅の成膜を試みた．シリコンと銅が付着することがあるため，塩ビのシートを挟んだ．100 μJ，10kHz で 5000 パルス照射した．その後，シリコンを取り出し，表面（レーザ入射側）裏面（レーザが抜けてくる側）の観察，切断研磨することでの断面の観察，導電性の確認などを行った．

SEM，EDX での観察結果を図 7 に示す．図 6(a)，(d)，(e)，(f)，(g)は反射電子像をとっているため，重い元素で構成される部分が白く観察される．図 7(a)～(e)が断面図で上側からレーザが照射されている．(b)，(c)は (a)の X 線マップでそれぞれ Cu-Kα，Si-Kα線像を示している．これらの図より直径 15 μm 程度の穴の内部に均一に銅が付着しており，下

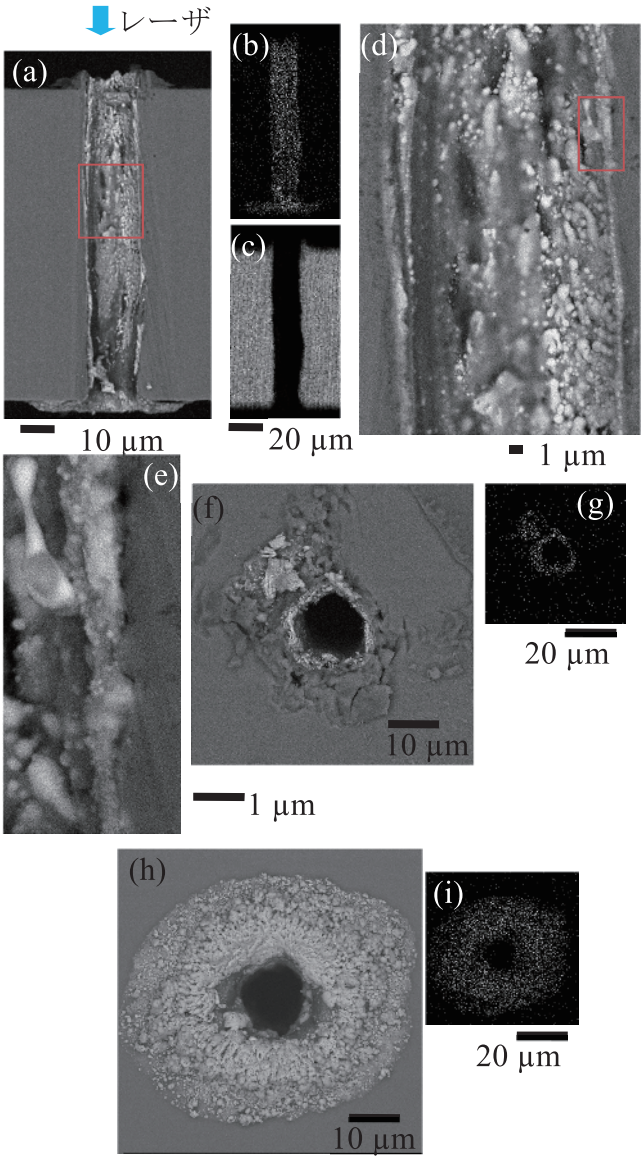

図 7　穴の形状　(a)-(e) 断面図，(f)，(g) 穴の入口，(h)，(i)穴の出口．(a)，(d)，(e)，(f)，(h) 二次電子像，(b)，(g)，(i) Cu-Kα線像 (c) Si-Kα線像，パルスエネルギー：100 μJ，パルス：5000 パルス．

地となるシリコンは穴の部分からは検出できない．図 7(d)，(e)はそれぞれ(a)，(d)の四角で囲った部分の拡大図である．内部には 1 μm 程度の銅の微粒子が付着していることが分かる．さらに穴の切断面付近の拡大図(e)からその厚さは数 100 nm 程度であることが分かる．

この穴径 15 μm 程度はガラスに穴あけした場合が 10μm 程度であった（図 4）のに比べて，太い，この原因としては，物性などの違いと共に，再堆積層が数 100 nm 程度とガラスの場合（数 μm）に比べ薄かったためだと考えられる．シリコンや銅に対して図 4 と同様な形状測定も行えるとより詳細な評価が可能であるが，透過光像で見ることは困難であること，穴径が 10 μm 程度と小さいことから切断研磨することで，内面の形状変化を観察することも難しく，解明できていない．

穴の上面，下面の反射電子像 (f)，(h) と Cu-Kα線像 (g)，(i) を示す．穴の上面では直径 15 μm 程度の穴が観察され，穴の周囲には銅が観察できる．また穴の周囲には割れたような跡が観察される．一方，穴の底面では直径 15 μm 程度の穴が観察され，その周囲に銅が直径 60μm 程度の範囲に付着している．この面では塩ビを挟んであったため，塩ビが一部溶融して，そこに下から吹き出した銅が付着したものと考えられる．この銅は数 μm 程度の粒子からなっている．内面でも直径 1μm 程度の粒子が観察されるため，これらの粒子はレーザ照射によりさらに穴の深い部分の銅がアブレーションされ，穴の内部を移動中に冷却され，内面や下面に堆積したものだと考えられる．上面での割れたような跡は上面にのみ観察でき，内面などでは観察されないことから，穴あけ時に出来たのではなく，ガラスを剥離する際に生じたものと考えられる．

さらに，導電性を評価するため，ゴムシート上に，銅箔，さらに試料を載せた．その上にから，穴の部分にタングステンプローブを当てて，銅箔とプローブ間の抵抗を評価した．その結果，100Ω程度であり，導電性を有していることを確認した．シリコン自体では 2MΩを以上であった．大気中で照射していることもあり，酸化の影響による膜自体の抵抗の変化だけでなく，穴の入り口，出口部分での接触抵抗なども考慮する必要があり，抵抗の妥当性などについての検討は今後の課題である．

4. まとめ

本研究では UV レーザによる小径深穴あけについて，様々な材料に穴あけを試みた結果および穴あけと同時に内面への成膜する方法について紹介した．その結果以下のような結果を得た．アルミニウム合金，超硬合金，高速度鋼，シリコンウエハ，ステンレス鋼，いずれを対象とした場合も，繰り返し周波数 10 kHz で最も深い穴があいた． 穴の大きさを測定した結果，φ10 μm 以下で 1 つの穴のあいていた領域でのアスペクト比は高速度鋼，シリコンウエハ，ステンレス鋼で 55～65 程度であった．

さらに，異なる材料を重ね，まとめて穴あけすることで，下にある材料を上部の穴内面に付着する方法を提案した．実際に直径は 15 μm 程度の穴あけをシリコンに行い，その内部に銅を付着させ，導電性を確認した．直径 15 μm 以下の穴あけと同時に，内面への成膜を実現しており，貫通配線などとしての応用が期待される．さらに重ねる材料を様々に代えることで，導電性だけでなく，様々な物質を再堆積できると考えられ，重ねる材料の種類を増やすことでの多層膜の形成も期待できる．

謝　辞

本研究の実施に際し，財団法人天田金属加工機械技術振興財団（現公益財団法人天田財団）より一般研究開発助成を賜りました．厚く御礼申し上げます．

参考文献

1) 伊藤栄次，東條重樹：特許公開，153004，(2001)．

2) 朝岡純也，岩瀬厚司，田中章雄，森英視，奥村望：特許公開，3435，(2004)．

3) S. Kawai: The New Development and the Application of the Processing Techinique in the Spinnerettes, J. Jpn. Soc. Abrasive Technol., **52**, 10 (2008) 561.

4) D. J. Hwang, M. Kim, K. Hiromatsu, H. Jeon and C. P. Grigoropoulos: Three-dimensional Opto-fluidic Devices Fabricated by Ultrashort Laser Pulses for High Throughput Single Cell Detection and Processing, Appl. Phys. A **96**, 2 (2009) 385.

5) H. Engstrom, L. M. I. Bruguera, G. V. I. Salas: 特許公開，328540，(2006)．

6) V. N. Tokarev, J. Lopez, S. Lazare and F. Weisbuch: High-aspect-ratio Microdrilling of Polymers with UV Laser Ablation: Experiment with Analytical Model, Appl. Phys. A **76**, 3 (2003) 385.

7) 比田井洋史，伊東翔，戸倉和，長澤正道，立川茂，UV レーザによる高アスペクト比小径穴あけ加工（第 1 報）-ホウ珪酸ガラスへのアスペクト比 190 の穴あけ-，精密工学会誌，**76**，10 (2010) 1161-1165.

8) 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 5 報）－材料による影響－，精密工学会誌，**77**，12 (2011) 1135.

9) H. Hidai, S. Matsusaka, A. Chiba, N. Morita, Laser Drilling and Conducting Film Formation of Vias in Silicon, J. Electro. Mater., **44**, 12 (2015) 4928.