

金属への極細かつ高アスペクト比レーザー穴あけ法の研究

千葉大学大学院工学研究科 人工システム科学専攻
准教授 比田井洋史
(平成 22年度 一般研究開発助成 AF-2010205)

キーワード：レーザー，穴あけ，金属材料

1. はじめに

極細，高アスペクト比の穴加工は，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．例えば，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．

このような極細穴あけには，レーザー，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．しかし，極細，かつ高アスペクト比の両立は困難である．樹脂を対象とした場合では，エキシマレーザーにより直径数 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報告されていない．

この中で，著者らは高繰り返し UV レーザを用いることで高アスペクト比の極細穴加工を実現してきた⁷⁾．ホウ珪酸ガラスを対象とし， $\phi 8.2 \pm 3.1 \mu\text{m}$ でアスペクト比 190， $\phi 6.3 \pm 1.0 \mu\text{m}$ でアスペクト比 100 以上の穴あけの実現し，ビームプロファイルの影響などをについて検討してきた．同様の条件で照射することで，他の材料においても高アスペクト比の加工が期待できる．

そこで，本研究では，これまでガラスに対して極細かつ高アスペクト比の穴あけが実現できた加工条件を用い，他の材料への穴あけ加工を試みた．ノズルや貫通配線用途に穴あけ加工が必要とされている，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，さらに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．

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:YVO₄ レーザの第 4 高調波を用い，焦点距離 50mm のレンズで集光した．

本報で使用した材料は以下の通りである．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 (厚さ 1 mm，4 mm) シリコンウエハの 1 mm 厚以外の材料については，達成可能な穴の深さを評価するため，どの条件でも貫通しない十分な厚さを予備実験から求め，使用している．

2.2 実験手順

本研究で使用した材料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．穴の中心軸を含む平面を切断，研磨し観察できれば形状，内面の評価が全ての深さにおいて可能となる．ガラスの場合では直径 10 μm 以下，深さ 2 mm 以上の穴があいた．この形状の穴全体にわたって中心軸から $\pm 1 \mu\text{m}$ 以内の断面を観察しようとする時，許される傾きの誤差は $\pm 0.03^\circ$ となる．さらに，穴が若干曲がる場合もあり，所望の切断面を出すのは容易ではない．加えて不貫通穴だと切断面が穴の中心軸からずれることで，深さを誤認する可能性がある．そこで，図 2 に示すように，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．

具体的には，200 μm 間隔で穴あけを行い，試料をエポキシ樹脂 (丸本ストルアス (株)，エポフィックス) に包埋，真空脱泡した後，硬化させる．その後，粗研磨，仕上げ研磨を行い，所望の切断面を出した後，エポキシ樹脂を溶剤 (N-methylpyrrolidone) もしくは piranha 溶液 (30%過酸化水素水 : 濃硫酸 = 1 : 3) で除いた．

穴の位置における試料の除去量，すなわち観察している穴の深さ z (図 2 参照，以下同) については，研磨面を平面と仮定し，研磨面のある点における除去量 Z と，この点および穴の位置から研磨しなかった面までの距離 (それぞれ X, x) を測定し，その間を直線で補間することで各点における除去量 ($z = Zx/X$)，すなわち深さを算出した．研磨面の傾きと穴の間隔から，穴の断面は 45 μm 以下の間隔で観察していると計算される．

到達深さについては，穴が認められなくなった点における除去量としており，最大で 45 μm 程度，実際の深さよりも深く算出されている可能性がある．斜めに研磨している関係上，観察しているのは正確な穴の断面ではなく，若干傾いた面を観察している．研磨面の傾きから，観察面の法線と穴の中心軸とは最大で 12° 程度傾いている．このことから，穴の縦横比が 2.5%程度ひずむことになるが，無視している．

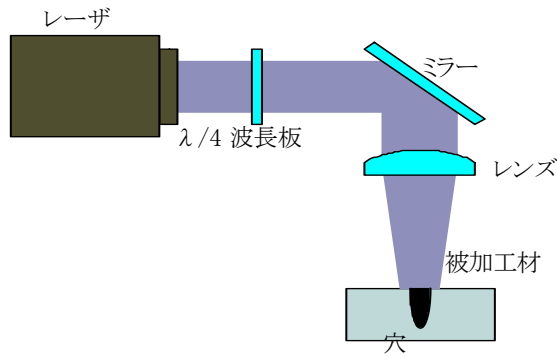


図1 実験装置模式図

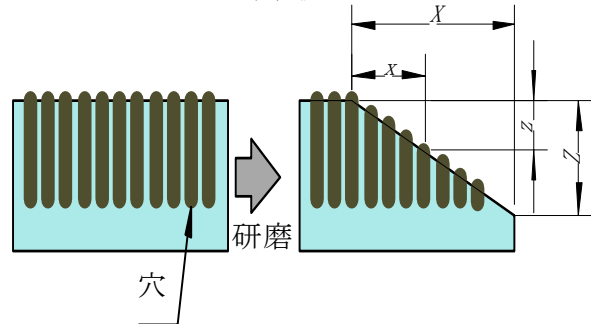


図2 穴の評価

照射後の穴の形状は、微分干渉顕微鏡(オリンパス(株), BH2-M-NIC)を用いて評価した。

3. 実験結果および考察

3.1 繰り返し周波数の影響

ガラスへの加工での結果より、熱の蓄積効果が穴の深さに大きく影響していることが明らかになっている。金属はガラスに比べ熱伝導率が大いため、最適な繰り返し周波数が異なる可能性が考えられる。そこで、まず繰り返し周波数を変化させて加工穴の深さを測定した。その結果を図3に示す。いずれの材質でも10 kHzにおいて最も深くなっており、ガラスの場合と同様であった。

いずれの試料、条件においても、穴が認められなくなった除去量が逆転する(例えば除去量1000 μmで穴が認められるのに、除去量970 μmで認められないなど)ことはなかった。穴の断面は45 μm以下の間隔で観察していることから、穴の深さについては、45 μm以内の範囲に再現していると考えられる。これは後述する複数の穴があく場合においても、同様であった。

穴深さの周波数依存性について検討する。1 kHz から10 kHzについては、熱の蓄積の効果により加工閾値の低下がおき、繰り返し周波数が大きくなるに従って深さが深くなっていると考えられる。熱伝導率に優れたシリコンやアルミニウム合金では他の材料と異なり1kHzから5kHzへの変化量に比べて、5kHzから10kHzへの変化量が小さくなり、傾向が異なっている。

レーザ加工では融点、沸点、光吸収率など、他に多くの性質が穴の深さに影響するため、これらの差異の解明には、穴

表1 照射条件

レーザ	Nd:YVO4 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
M2	< 1.2
被加工材 (厚さ)	シリコン (1 mm, 4 mm), ステンレス鋼 (SUS304, 3mm), アルミニウム合金 (A5052 3mm), 高速度鋼 (SKH51 2mm), 超硬合金 (1.2mm)
集光レンズ	
焦点距離	50 mm

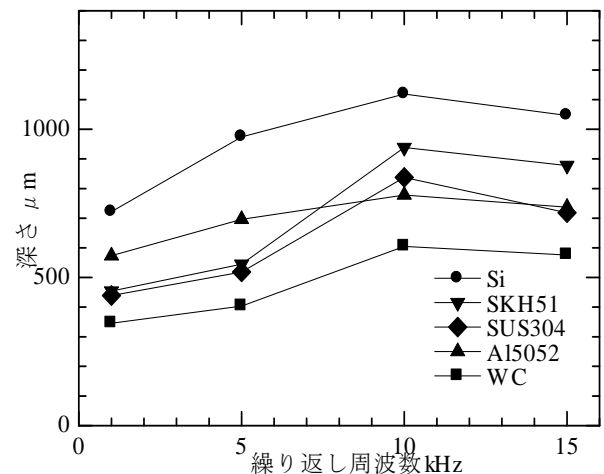


図3 繰り返し周波数による穴深さへの影響 超硬合金 (■), アルミニウム合金 (A 5052, ▲), ステンレス鋼 (SUS304 ◆), 高速度鋼 (SKH 51 ▼), シリコン(●). 焦点距離: 50m

あけのモデル化を行い、それぞれの材料での妥当性の検討などが必要となる。

3.2 穴の形状

最も深い穴があいた繰り返し周波数10 kHzであけた穴の形状を観察した。代表的な結果を図4に示す。ほとんどの場合で、直径数 μmの穴が確認できる。材質によっては同図(h), (l)で観察されるように穴が1つではなく複数の穴が観察される場合があった。このような複数の穴はアルミニウム合金、認められなかったが、超硬合金、ステンレス鋼、高速度鋼、シリコンウエハでは観察された。この複数の穴があく原因、材料の性質との関係については、明らかになっていない。

穴の大きさを測定した。図4でも示されるように穴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

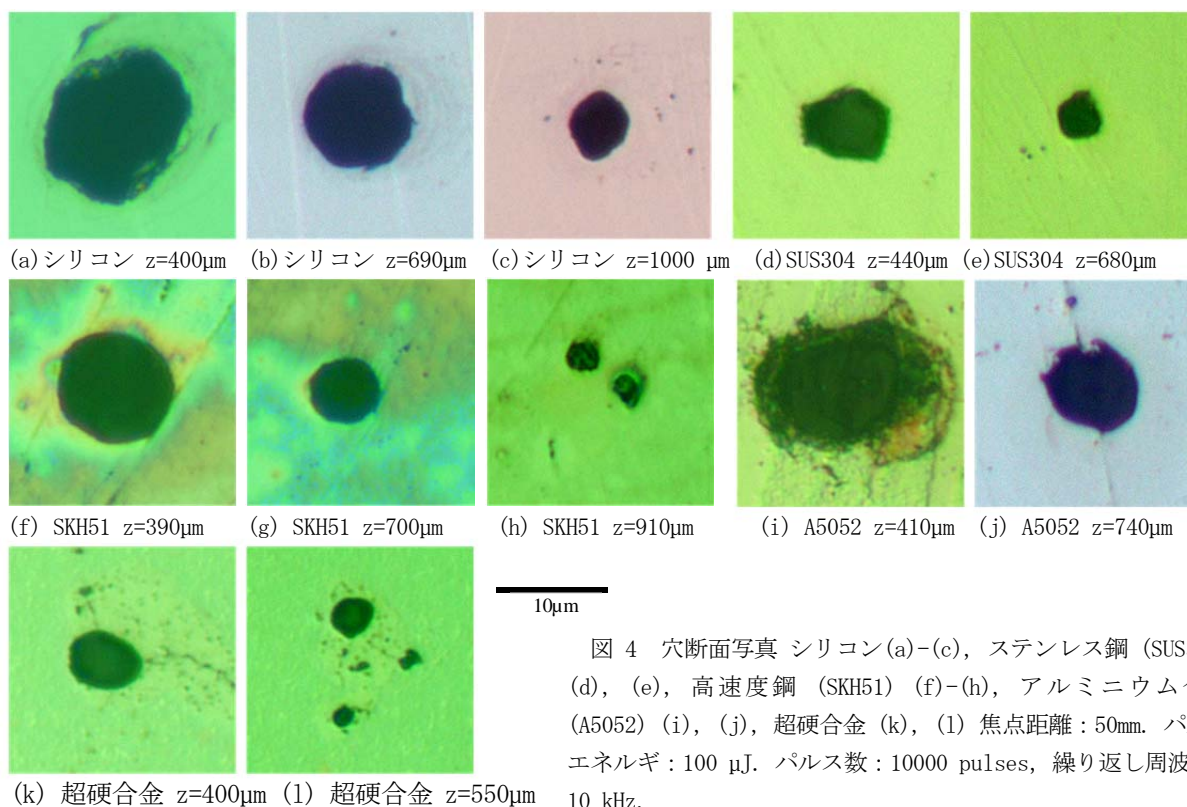


図 4 穴断面写真 シリコン(a)-(c), ステンレス鋼 (SUS304) (d), (e), 高速度鋼 (SKH51) (f)-(h), アルミニウム合金 (A5052) (i), (j), 超硬合金 (k), (l) 焦点距離: 50mm. パルスエネルギー: 100 μ J. パルス数: 10000 pulses, 繰り返し周波数: 10 kHz.

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 \pm 2.9 μ m	570 - 780 μ m	26
超硬合金	6.9 \pm 3.1 μ m	350 - 460 μ m	17
高速度鋼	7.0 \pm 3.0 μ m	420 - 820 μ m	56
シリコン	7.3 \pm 2.7 μ m	580 - 1050 μ m	64
ステンレス鋼	7.2 \pm 2.8 μ m	360 - 760 μ m	55

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5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は穴径を測定できないため、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 μ m程度から徐々に細くなり、深さ200 μ mから400 μ m程度で半径5 μ m程度となる。その後、半径3 μ m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 μ m程度から1400 μ m程度であった。それぞれの材料において直径が10 μ m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以上と従来報告されてきた穴あけと比べて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

の解明は今後の課題である。

3.3 穴の内面形状

さらに詳細に穴の内面を観察するために、穴の中心軸を通る平面で切断研磨を行い、穴の内面を観察した。不貫通穴では試料内部での穴の位置を確認できないため、穴の中心軸と切断面とを一致させることが困難である。そこで、厚さ1mmのシリコンウエハを用い、貫通穴をあけ、切断研磨の後、SEMで内面を観察した。その結果を図6に示す。図の入り口近辺(同図(a))ではほぼ平滑な面が得られているが、深くなる(同図(b))と凹凸が目立つようになった。同図(c)に拡大図を示す。溶融し穴の底から吹き上げられたような突起(矢印)が見られる。

シリコンウエハにおいては内面の凹凸が大きく、内面でのビームの反射を妨げていることが、ガラスと比べて形成される穴が浅くなった原因の1つと考えられる。

4. まとめ

本研究ではUVレーザーによる高アスペクト比穴あけについて、様々な材料に穴あけを試み、その深さ、形状などを評価した。その結果以下のような結果を得た。

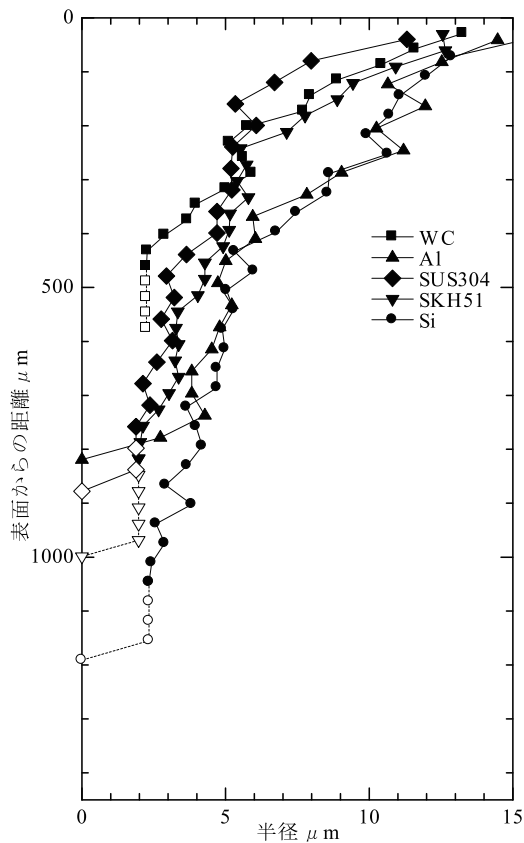


図5 穴の形状 超硬合金(■), アルミニウム合金(A 5052, ▲), ステンレス鋼(SUS304 ◆), 高速度鋼(SKH 51 ▼), シリコン(●). 白抜きは複数の穴が認められた場合. 焦点距離: 50mm, パルスエネルギー: 100 μJ, パルス数: 10000 パルス

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, $\phi 10 \mu\text{m}$ 以下で1つの穴のあっ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.

シリコンウエハにおいては内面に再堆積層は認められなかった.

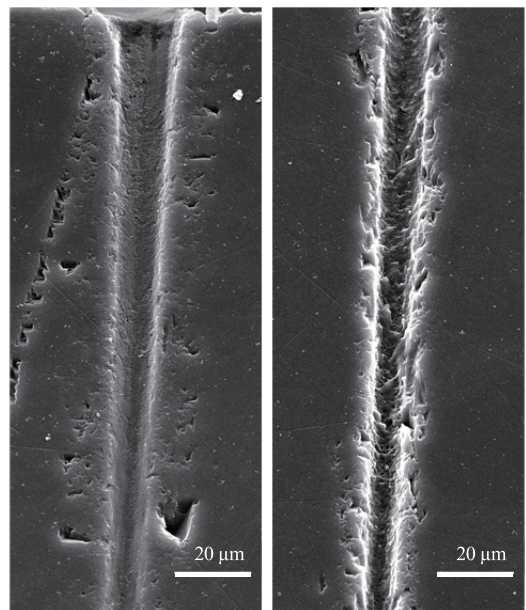
シリコンウエハの内面は溶融物が噴出したような凹凸が確認された.

謝 辞

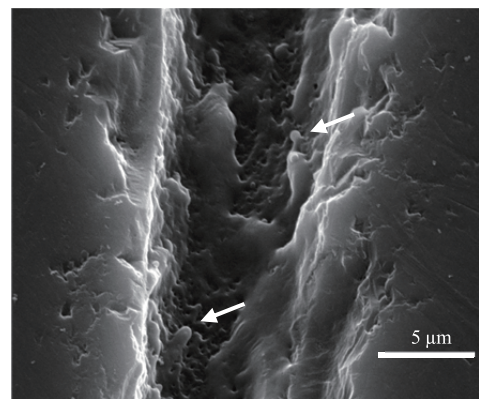
本研究の実施に際し, 公益財団法人天田財団より一般研究開発助成 (AF-2010205) を賜りました. 厚く御礼申し上げます.

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 Technique in the Spinnerettes, J. Jpn.



(a) $z = 0 \mu\text{m}$ (入り口近傍) (b) $z = 740 \mu\text{m}$



(c) (b)の拡大図 $z = 740 \mu\text{m}$

図6 断面のSEM像 (a)表面近傍, (b)表面から $740 \mu\text{m}$ 付近, 焦点距離: 50mm. パルスエネルギー: 100 μJ. パルス数: 10000 pulses, 繰り返し周波数: 10 kHz

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) H. Hidai, S. Itoh, H. Tokura, S. Nagawasa and S. Tachikawa: High-aspect-ratio Microdrilling with UV Laser Ablation. I - Drilling Holes with an Aspect-ratio of 190 in Borosilicate Glass- J. Jpn. Soc. Precis. Eng., **76**, 10 (2010) 1161.