



S. Nakamura

## 裏当て液を利用した新規手法による貫通孔形成技術の確立とその形成加工品の開発

中村 奨\*

### 1. まえがき

レーザー加工応用技術は、CO<sub>2</sub>レーザーでの切断・孔あけ・溶接から YAG レーザーでのより精密な切断・孔あけ・溶接・マーキング、さらには紫外レーザーによる薄膜除去や高分子材料加工と応用分野が広がっている。ここで赤外光である CO<sub>2</sub>レーザーにより樹脂素材に対して孔あけ加工を行った場合には、貫通孔周囲に熱影響による盛りあがりあるいは噴出物が付着して高品質の孔加工ができず、また孔ピッチを狭くしすぎた場合には隣接する孔同士が繋がってしまうなどの問題が発生し、高密度の孔加工ができなかった。

現在は、YAG レーザーの第3高調波や第4高調波などの紫外光源を用いた加工プロセスの実用化が進み、紫外領域での波長のレーザーを用いて、高分子材料の構成分子内の化学結合を光子エネルギーにより切断し、レーザー照射部分を一瞬のうちに分解飛散させるアブレーション現象を用いた孔あけ加工技術が進んでいる。このアブレーション現象を利用した加工は、周辺部への熱拡散量が少ないため熱影響の少ない精密加工が可能になるとともに、後加工や仕上げ加工が不要になるなどのメリットが多く、その利用は急速に広がっている。

加工対象物に貫通孔を形成する加工においては、レーザー光の特性から、形成される貫通孔は入射面側から出射面側に向かってすぼまっていくテーパ状となる。そしてこのテーパ孔では、高開口率を得ることはできない。なぜならば、入射面側での孔と孔の重なりを避けるため、孔直径以下の貫通孔同士の軸間（貫通孔の中心軸の間）にはできないからである。そのため高開口率のシートを得るためには、ストレートな貫通孔、つまりは入射面側と出射面側との直径が等しい貫通孔を形成する必要がある。しかしながらストレート孔を得るためには、ビームローテータと呼ばれる回転光学系を導入する必要があり、装置価格の点から広範囲に普及するまでには至っていない。

筆者らは、加工対象物の裏面（レーザービームが突き抜ける面）に高分子物質のコロイド溶液、高分子物質の溶液、または、ポリオールを接触させた状態でレーザー光を照射することにより、貫通孔の形状をコントロール可能なことを見出し、特許を取得している<sup>1)</sup>。この技術を使用すれば高額なビームローテータを使用することもなく、極めて簡

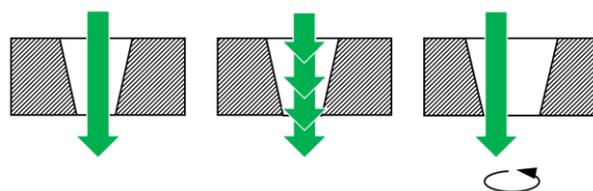
便な方法でストレート孔、さらには逆テーパ孔を形成することが可能となる。

本研究では、これまでナノ秒パルスレーザーで培ってきた貫通孔形成技術をピコ秒パルスレーザーにも適用し、ストレート孔を安定して得る技術を確立するとともに、高精度フィルター、微細孔ノズル、リチウムイオンキャパシタ用集電体などの形成加工品の開発を行うことを目的としている。

### 2. 実験方法

本研究に使用したレーザーは、Photonics Industries International 社製のピコ秒パルス YVO<sub>4</sub> レーザー、RGH-532 である。レーザーの出射口における最大出力は、繰返し周波数 100 kHz において 9 W である。基本波長は 1,064 nm の赤外光であるが、非線形光学素子によって波長を第2高調波、532 nm に変換している。パルス幅は 15 ps 未満である。

レーザーによる貫通孔の形成には図1に示す3種類の手法がある。1パルスのレーザー照射で孔をあけるシングルパルス加工、同一箇所を複数回のレーザー照射を行うことで孔をあけるパーカッション加工、そして円周に沿ってレーザービームを走査して円形に切り抜くトレパニング加工である。本研究では、直径 10 μm 程度の貫通孔を電解銅箔に形成したいという要求があるので、パーカッション加工を採用した。



シングルパルス パーカッション トレパニング

図1 レーザーによる孔あけ方法

発振器より出射したレーザー光はビームステアリングでその方向を変え、ビームエキスパンダでビーム径を拡大したのち、ガルバノスキャナシステムに導光し、焦点距離 58.5 mm のテレセントリック fθ レンズで試料表面に垂直

\*長岡工業高等専門学校電気電子システム工学科 教授

に照射した。集光点でのビーム径はバーンパターンより 20  $\mu\text{m}$  と評価した。本加工光学系では、加工対象物表面で得られる最大パルスエネルギーは、繰返し周波数 100 kHz において 50  $\mu\text{J}$  であった。

被加工材には市販の厚さ 12  $\mu\text{m}$  の電解銅箔を使用した。電解銅箔は一般的に、光沢面と粗化面を有している。本研究では光沢面をレーザー光の入射面側に使用し、粗化面を出射面側とした。

レーザー照射に際して、本研究では裏当て加工を採用した。裏当て加工とは、レーザー光が突き抜ける被加工材裏面に液体を配置する方法である。裏当て加工の際に使用する試料設置台を図 2 に示す。この場合、裏当て液が被加工材の裏面と隙間なく接していることが重要である。これまでの研究により、裏当て液として効力を発揮するものに、高分子物質のコロイド溶液、高分子物質の溶液、またはポリオールが有効であることを見出している<sup>1,2)</sup>。

加工効率の向上、すなわち単位時間当たりの孔あけ数を向上させるために、本研究では、レーザー光を複数本に分岐することのできる回折光学素子の導入を試みた。今回はレーザー光を 9 分岐可能な回折光学素子を導入した。これにより、同時に 9 点で貫通孔を形成することが可能となる。

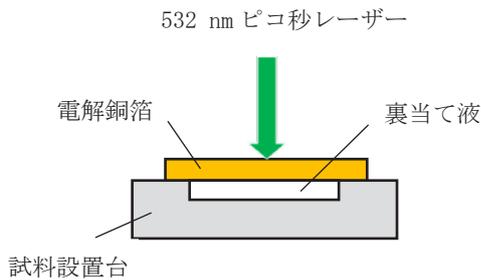


図 2 裏当て加工の際の試料設置台

### 3. 実験結果と考察

図 3 に電解銅箔に形成した貫通孔の顕微鏡写真を示す。この場合、裏当て液は使用しておらず、電解銅箔の裏面は

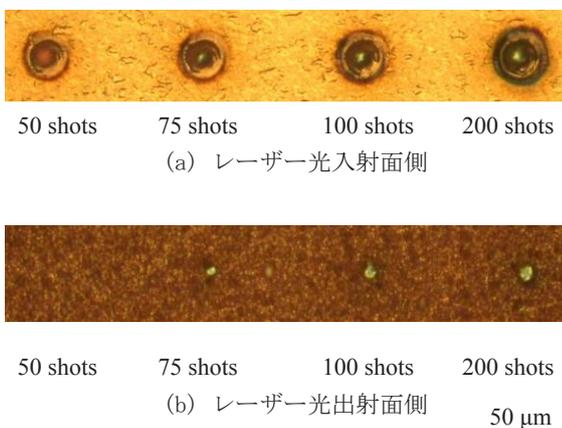


図 3 電解銅箔に形成した貫通孔

空気にさらされている状態である。レーザー 1 パルス当たりのエネルギーは、銅箔表面で 8.5  $\mu\text{J}$  に設定した。エネルギー密度に換算すると 2.7  $\text{J}/\text{cm}^2$  となる。パルス繰返し数は 100 kHz とし、レーザーを 1 孔当たり 50 ショットから 200 ショットまで照射した場合の結果である。50 ショットでぎりぎり貫通しており、75 ショットまで増加させると貫通していることが明確にわかる。またレーザーショット数が増加すると、孔の入り口に焼けが観察され、ピコ秒パルスレーザーといえども蓄熱の影響があることがわかる。

図 4 は、レーザーを 1 孔当たり 1,000 ショットまで照射した場合のレーザーショット数と貫通孔入口径の関係を示している。図 5 は、1 孔当たりのレーザーショット数と貫通孔出口径の関係をプロットした結果である。ここでは図 3 の場合と同様に裏当て液は使用していない。図 4 に示すように、入口径は 200 ショットまでは増加傾向を示すが、それ以上のショット数に対してはほとんど変化しない。出口径はショット数の増加とともに増加していくが、500 ショット以降は頭打ちの傾向を示す。

当研究室ではこれまでナノ秒紫外レーザーを用いて微細孔あけ加工の研究を行ってきた。その過程で裏当て液を

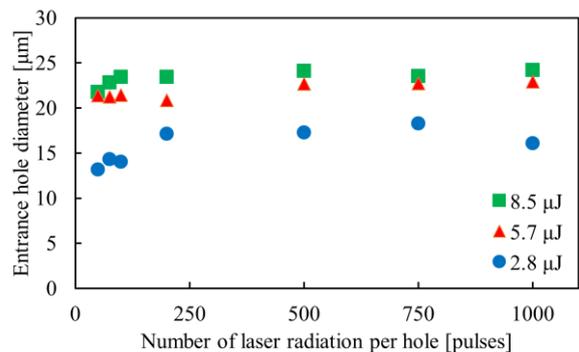


図 4 レーザーショット数と貫通孔入口径の関係

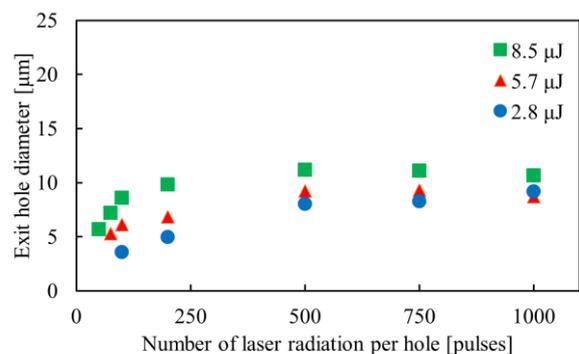


図 5 レーザーショット数と貫通孔出口径の関係

使用することにより、貫通孔の形状をコントロール可能なことを見出した。たとえば、PETシートやマシナブルセラミックの孔加工においては、裏当て液としてPVA水溶液を使用することによりストレート孔や逆テーパ孔の形成が可能であることを示した<sup>2,3)</sup>。

本研究では、ピコ秒パルスレーザーによる加工においても、裏当て液の効果が発揮されるのかどうかを検討課題のひとつである。図6は、電解銅箔のレーザー光出射面側に水を接触させてレーザー照射を行った場合の結果である。厚み2mm程度の水を電解銅箔裏面に接触させたこと以外は、図3とまったく同じ照射条件で加工している。この図を見て分かる通り、貫通孔の入口輪郭は裏当て液なしの場合に比べて極めて明瞭となっており、またショット数の増加による孔周囲の焼けも観察されない。

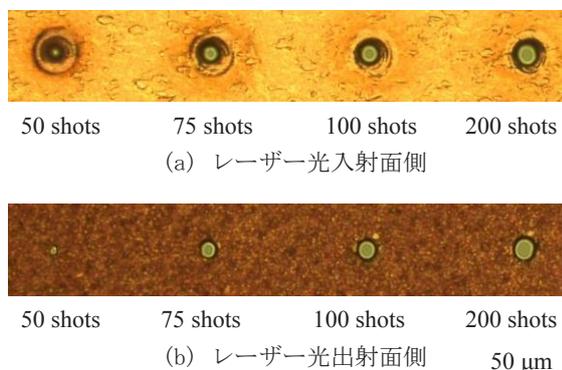


図6 裏当て加工による電解銅箔への貫通孔形成

図7は、裏当て液を使用した場合の1孔当たりのレーザーショット数と貫通孔入口径の関係を示している。ショット数の増加に伴い入口径はわずかに増加傾向を示すが、200ショット以降ではほとんど変化しない。この傾向は、裏当て液を使用していない図4の結果と同様である。図8は、裏当て液を使用した場合の1孔当たりのレーザーショット数と貫通孔出口径の関係をプロットした結果である。この図に示される通り、ショット数の増加とともに出口径は増加していくことがわかる。裏当て液を使用していない図5の場合には、ショット数が500を超えると出口径は頭打ちの傾向を示したが、裏当て液を使用した場合には、高パルス数の照射条件下においても出口径は増加傾向を示している。

レーザー加工の効率を上げるためには、応答性の良いガルバノスキャナーの使用、繰り返し周波数の高い発振器の使用、高速駆動が可能なXYステージの使用が重要である。近年の微細孔加工市場の成長現場においては、数~10数倍の加工速度の向上が要求されるようになってきた。これに応える形で、ガルバノスキャナーの応答性は年々向上し、また発振器の繰り返し周波数も数MHzにまで引き上げられてきた。それに対してXYステージの駆動速度には限りがあり、試料搬送速度の向上の妨げとなっている。この制約

のもとで加工速度を上げるために、発振器から出るレーザー光をビームスプリッターで複数本に分岐し、複数のガルバノスキャナーで加工するシステムが考案されているが、この場合、光路が長くそして入り組んだものとなり、日々のメンテナンスが煩雑となる欠点がある。

この代替技術として、発振器から出るレーザー光を複数本に分岐する回折光学素子の利用が考えられる。一般のレンズでは屈折現象を利用して光の進行方向を変えるのに対して、回折光学素子は回折現象を利用して光の進行方向を変えるものである。通常の光路上に回折光学素子を配置することにより、レーザー光は設計値に応じた数に分岐され、ガルバノスキャナーに入射する。この光学系ではビームスプリッターにより光を分岐する場合とは異なり、1台のガルバノスキャナーを使用するのみでよく、その光学系は極めてシンプルなものとなる。

本研究では、古河電子(株)に回折光学素子の設計・製作を依頼し、裏当て加工と組み合わせた同時多孔加工を試みた。図9に本研究で使用した回折光学素子を示す。回折光学素子は石英ガラスからできており、その表面に数10~数100μm単位のノコギリ歯状の断面構造が形成されている。本研究ではレーザーの最大出力を考慮して、ビームの分岐数を9分岐とした。焦点位置での孔の分岐間隔は、開口率10%を得ることを目標に27μmに設定した。

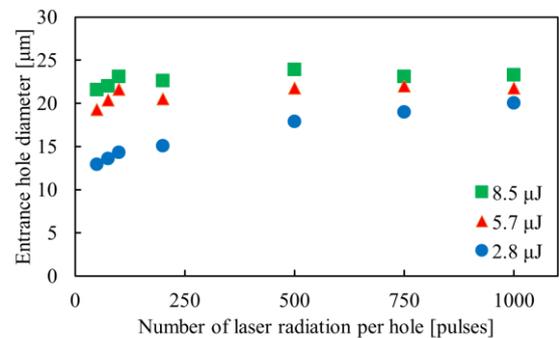


図7 裏当て加工におけるレーザーショット数と貫通孔入口径の関係

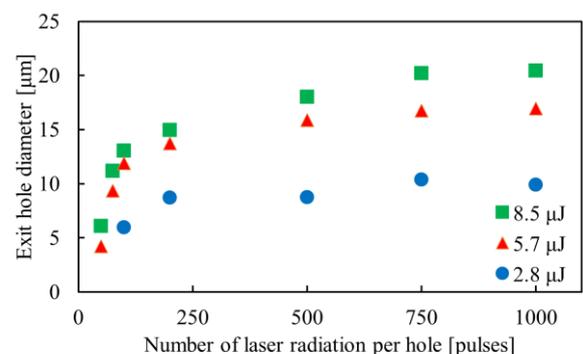


図8 裏当て加工におけるレーザーショット数と貫通孔出口径の関係

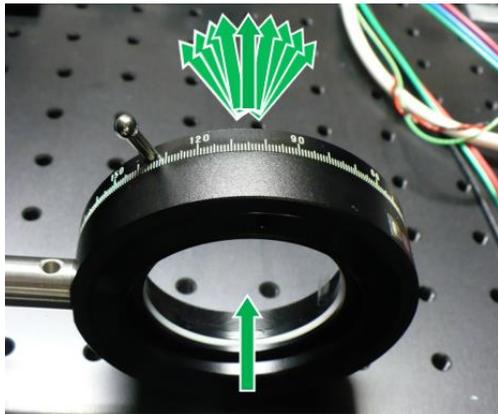


図9 分岐数9の回折光学素子

レーザー光を9分岐することが可能な回折光学素子をガルバノスキャナーの前に配置して、同時9孔加工を行った結果を図10に示す。この場合、裏当て液は使用せずに1孔当たりレーザーを100ショット照射している。これは発振器からレーザーを100ショット出射させることにより、それが回折光学素子によって9分岐され、電解銅箔表面において9孔同時に100ショットのレーザー光が照射されることを意味している。図に示されているように、エネルギーのばらつきも少なく、9孔が均一に開口されていることがわかる。この場合、1分岐(1孔)当たりのパルスエネルギーは5.3 μJである。しかしながら、貫通孔の形状はすり鉢状であり、きれいに孔があいているとは言いがたい。

図11は、図10と同一照射条件のもと、電解銅箔裏面に水を接触させて加工を行った場合の結果である。両図を見比べると明確にその違いがわかる。裏当て加工を施すことにより孔の輪郭は明瞭となり、また出口径が広がることによって、結果としてほぼストレートな貫通孔が形成されている。この場合、入射面側直径で11.6 μm、出射面側直径で11.2 μmの値を得ている。

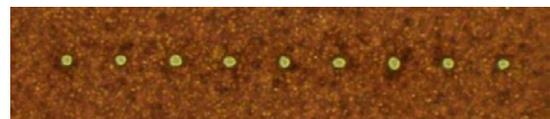
直径10 μm前後の貫通孔を多数有する銅箔の使用用途として、筆者らはリチウムイオンキャパシタの負極への適用を考えている。リチウムイオンキャパシタは、電気二重層キャパシタの正極と、リチウムイオン電池の負極とを組み合わせたハイブリッド構造の蓄電装置である。電気二重層キャパシタは、電極の表面にイオンが近づいてできる電気二重層をキャパシタとして利用するもので、極めて充放電が速いが、一方でエネルギー密度が低く少量の電気しか蓄えられない。そこで負極をリチウムイオン電池の電極に置き換えることで、エネルギー密度をリチウムイオン電池と同程度にまで高めたのが、リチウムイオンキャパシタである。このように優れた性質を備えるリチウムイオンキャパシタであるが、これまでは容量が稼ぎにくく、内部抵抗によるロスも大きかったので、瞬間的な電圧低下や停電から産業機器を守るための用途で実用化されてきただけであった。しかしながらここに来て、微細孔を多数有する革

新的な負極構造を採用することで、従来の弱点を克服した大容量で内部抵抗の低いリチウムイオンキャパシタが開発可能になってきた。筆者らは新潟県工業技術総合研究所、神奈川大学そして民間企業と共同して、新型のリチウムイオンキャパシタの開発に取り組んでいる。

当研究室における研究事例として、図12にナノ秒パルスレーザーでの裏当て加工を示す。波長266 nmのナノ秒パルスレーザーを使用し、トレパニング加工により厚さ0.5 mmのマシナブルセラミック、Photoveel II-sに貫通孔を形成した結果である。パルスエネルギーは200 μJ、ビーム走査速度は1 mm/s、周回数35回とした。焦点位置でのエネルギー密度は71 J/cm<sup>2</sup>となる。ここでは裏当て液として、市販のPVA糊を水で薄めた水溶液を使用し、マシナブルセラミックのレーザー光出射面側にその液を接触させてレーザー加工を行った。裏当て液を使用していない通常加工(a)の場合には、レーザー光入射面から出射面に向かってすぼまっていく典型的なレーザーによる貫通孔が形成されている。しかしながら裏当て液を使用した(b)の場合には、出口の少し広がったほぼストレートな貫通孔が形成されることがわかる。照射条件は、裏当て液なしと



(a) レーザー光入射面側

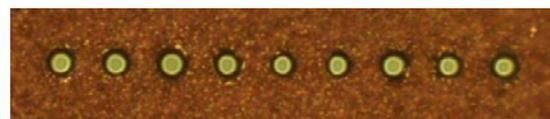


(b) レーザー光出射面側 50 μm

図10 回折光学素子を使用した9点同時多孔加工 (裏当て液なしの通常加工)



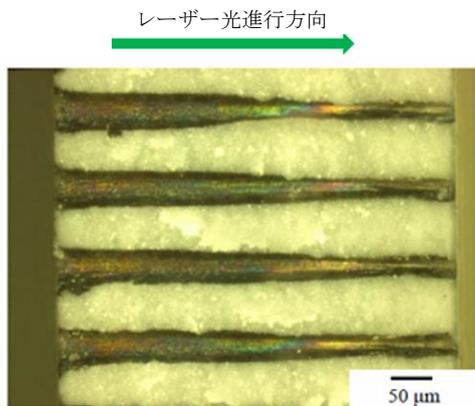
(a) レーザー光入射面側



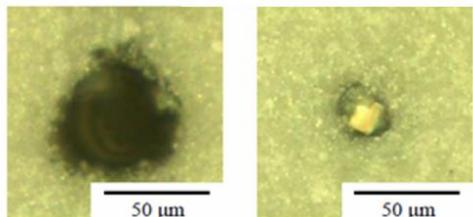
(b) レーザー光出射面側 50 μm

図11 裏当て加工と回折光学素子を組み合わせた9点同時多孔加工

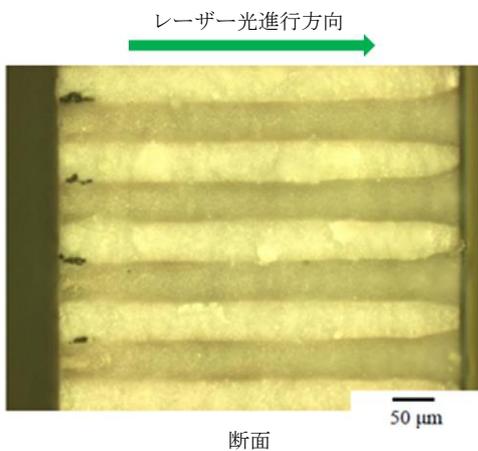
ありの違いのみであり，焦点位置，パルスエネルギー，ビーム走査速度等は同一である。



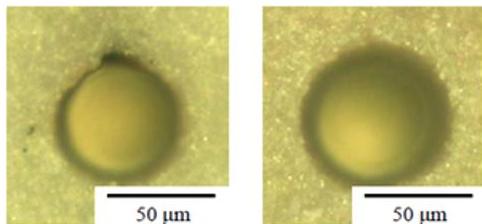
断面



入口 出口  
(a) 裏当て液なしの通常加工



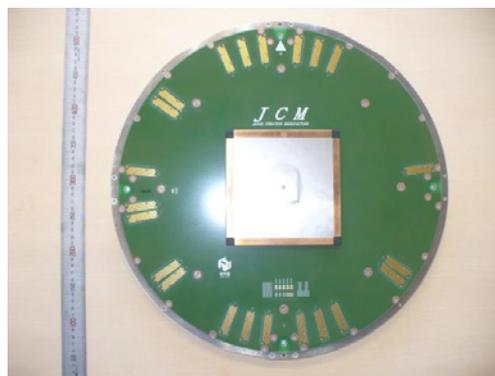
断面



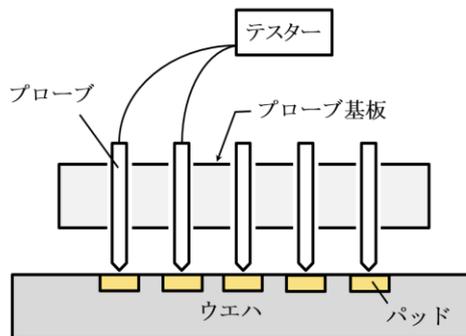
入口 出口  
(b) 裏当て液として PVA 水溶液を使用した加工

図 12 マシナブルセラミック Photoveel II-s に形成した貫通孔

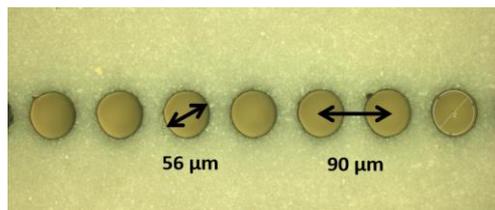
このストレートな貫通孔を有するマシナブルセラミックを使用して試作したプローブカードを図 13(a)に示す。プローブカードは，半導体製造工程の前工程で IC や LSI の良否を判定するウエハテストで使用される半導体検査用部品である。LSI などの半導体製造工程では，1 枚のウエハ上に多数の IC チップを製作し，これを切断してケースに組み込むが，ウエハ上に並んだ何百もの IC チップを



(a) 試作したプローブカード



(b) プローブカードの原理



(c) プローブ基板に形成した貫通孔

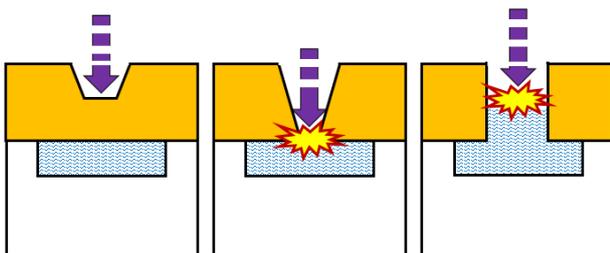


(d) プローブピン

図 13 半導体検査用プローブカード

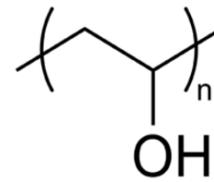
数ミリ角のチップごとに切断する前に、製作された IC チップが良品であるか不良品であるかを判定するウエハテストが行われる。ウエハテストは、図 13(b)に示すようにウエハ上に製作された IC, LSI などのチップのボンディングパッド上にプローブの先端部分を当てて電気的特性の測定を行い、IC チップの良品、不良品の選別を行うものである。プローブカードには、プローブピンが適切なクリアランスで通り抜けるストレート形状の貫通孔を形成する必要がある。図 13(c)にマシナブルセラミックスに形成したストレートな貫通孔を、図 13(d)には貫通孔に挿入した直径 50  $\mu\text{m}$  のプローブピンの顕微鏡写真を示す。

ここで裏当て加工のメカニズムについて考察する。図 14 に加工中のメカニズムを模式的に示す。加工対象物の裏面に裏当て液を隙間なく接触させることによって、加工物を突き抜けたレーザー光は裏当て液と反応し、レーザー誘起プラズマを生成する。そして孔が貫通することによって、裏当て液は毛細管現象によって加工物の裏面から表面に向かって上昇する。その際、レーザー誘起プラズマも裏当て液とともに裏面から表面に向かって移動し、このプラズマ移動によってストレートな貫通孔が形成されるものと考えている。特に PVA 水溶液を裏当て液とした場合には水酸基 (-OH) の存在に注目している。PVA 水溶液はポリビニルアルコールを含むポリマー溶液である。ポリビニルアルコールは、図 15 に示すように分子内に水酸基を有する。水酸基は UV レーザー光と反応して OH ラジカルを生成すると考えられている<sup>4)</sup>。OH ラジカルは不対電子を持っているため、近くの有機物及び無機物と非常に急激に反応し酸化させる。現段階ではこの反応性の高い OH ラジカルにより出射面側の孔形状が拡大されるのではないかと推測している。この推測を裏付けるためには、加工中のプラズマ発光を分析する必要があるが、これは今後の研究課題である。



(a) 加工初期 (b) プラズマ発生 (c) プラズマ上昇

図 14 裏当て加工のメカニズム



Polyvinyl Alcohol

図 15 ポリビニルアルコールの構図式

#### 4. 結論

ピコ秒パルスレーザーにおいても裏当て加工により、ストレート孔の形成が可能なことを確認した。また回折光学素子と組み合わせて、同時多孔加工が可能なことを示した。本研究で形成した微細孔を有する電解銅箔を負極基材としたリチウムイオンキャパシタは、現在その性能評価を行っているところである。

#### 謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団からの一般研究開発助成により実施した研究に基づいていることを付記するとともに、同財団に感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 中村奨, 板垣薫: “貫通孔形成方法, 及び, 貫通孔形成加工品”, 特許番号 5432547 号 (2013).
- 2) S.Nakamura, K.Itagaki and N.Soma: “Through hole forming method using pulse UV laser”, Journal of Laser Micro/Nanoengineering Vol.9, No.1, pp.73-78 (2014).
- 3) S.Nakamura, T.Miura and M.Tsuta: “Straight Through Hole Drilling in Machinable Ceramics”, Journal of Laser Micro/Nanoengineering Vol.10, No.1, pp.101-105 (2015).
- 4) B.R.Locke, M.Sato, P.Sunka, M.R.Hoffmann and J.S. Chang: “Electrohydraulic discharge and nonthermal plasma for water treatment”, Ind. Eng. Chem. Res., Vol.45, pp.882-905 (2006).