

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

長岡工業高等専門学校 電気電子システム工学科
教授 中村 奨
(平成 25 年度一般研究開発助成 AF-2013201)

キーワード：ピコ秒レーザー，貫通孔，裏当て加工

1. 研究の目的と背景

レーザー加工応用技術は、CO₂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 CO₂レーザーにより樹脂素材からなる物品の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上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が、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。

当研究室では、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¹⁾。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認するとともに、超高精度フィルター、微細孔ノズル、メタルマスクなどの形成加工品の開発を行うことを目的とした。

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 YVO₄ レーザー、RGH-532 である。出射口におけるレーザーの最大出力は、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 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ショット加工、同一箇所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することを考えているので、パーカッション加工を採用した。

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 μm と評価した。本加工光学系では、加工対象物表面で測定される最大パルスエネルギーは、繰返し周波数 100 kHz で 50 μJ であった。

被加工材には市販の厚さ 12 μm 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。

図 1 に裏当て加工の場合のレーザー照射部を示す。裏当

て加工とは、レーザー光が突き抜ける加工対象物裏面に液体を配置する方法である。この場合、裏当て液が加工対象物の裏面に隙間なく接触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。

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、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設計し導入した。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。

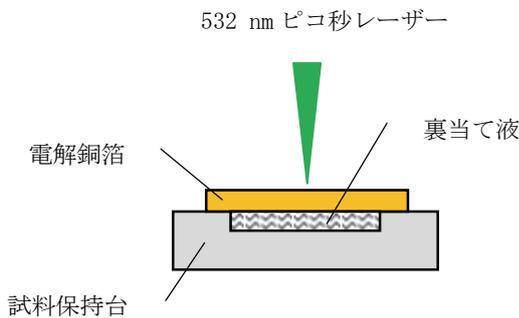


図1 裏当て加工の際のレーザー照射部

3. 実験結果と考察

図2に電解銅箔に貫通孔を形成した場合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、電解銅箔の裏面と試料保持台との間には隙間があいたままである。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 μJ とした。焦点位置でのエネルギー密度に換算すると2.7 J/cm^2 となる。パルス繰返し数は100 kHz固定とし、1孔当

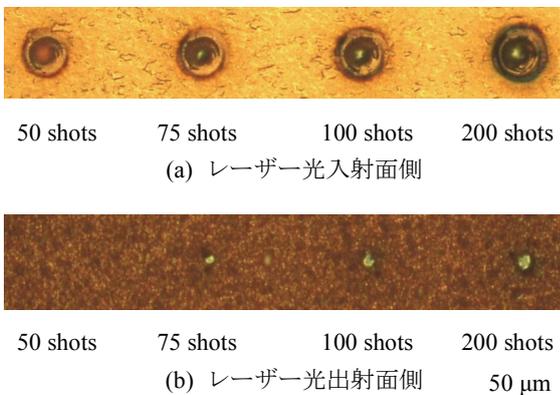


図2 電解銅箔に形成した貫通孔

たりのレーザーショット数を50ショットから200ショットまで増加させ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明確に貫通していることがわかる。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、ピコ秒レーザーといえども蓄熱の影響があることがわかる。

図3は、1孔当たりに照射するレーザーショット数を1000ショットまで増加させた場合のレーザーショット数と貫通孔入口径の関係をプロットした結果であり、図4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。ここでの加工においては、図2の場合と同様に裏当て液は使用していない。図3に示すように、入口径は200ショットまでは、ショット数の増加に伴い増加傾向を示すが、それ以上のショット数に対してはほとんど変化しない。図4に示す出口径は、500ショットまではショット数の増加とともに増加していくが、それ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

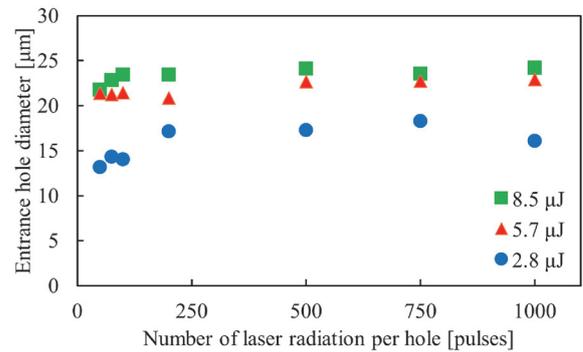


図3 レーザーショット数と貫通孔入口径の関係

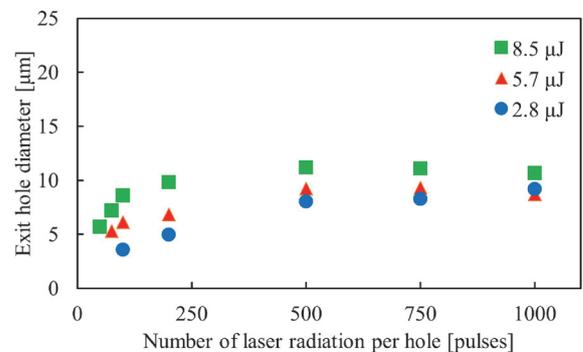
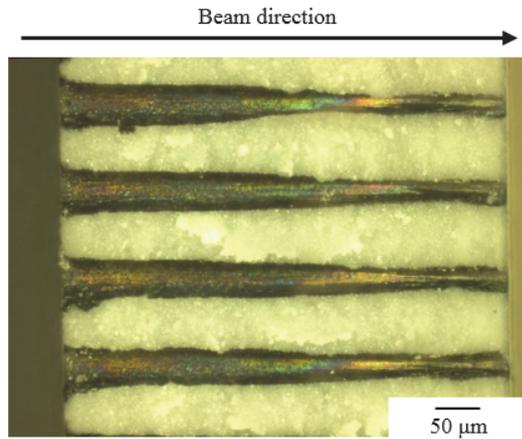


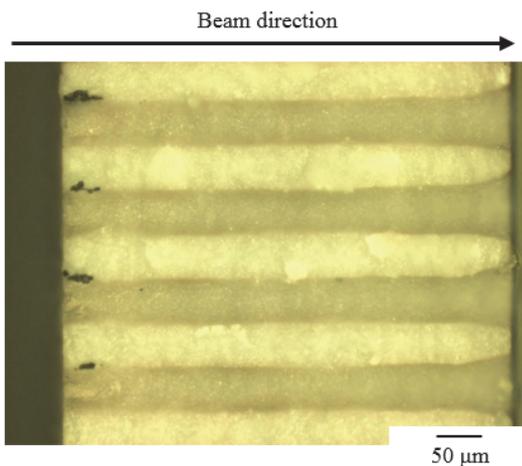
図4 レーザーショット数と貫通孔出口径の関係

ミックの孔加工においては、PVA 水溶液を裏当てに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^{2,3)}。

図 5 にマシナブルセラミックでの加工例を示す。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 1 mm/s、周回数 35 回までの結果である。焦点位置でのエネルギー密度は 71 J/cm^2 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マシナブルセラミックのレーザー光出射面側に接触させている。この図からわかる通り、裏当て液を使用していない通常加工の場合(a)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場合(b)では、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



(a) 裏当てなしの通常加工



(b) PVA 水溶液の裏当てあり

図 5 マシナブルセラミック Photoveel II-s に形成した貫通孔の断面

件は、裏当て液なしと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。

本研究では、ピコ秒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裏当て加工を行った場合の結果である。厚み 2 mm 程度の水を電解銅箔裏面に接触させたこと以外は、図 2 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、また孔周囲に焼けも観察されない。



50 shots 75 shots 100 shots 200 shots
(a) レーザー光入射面側



50 shots 75 shots 100 shots 200 shots
(b) レーザー光出射面側 50 μm

図 6 裏当て加工による電解銅箔の貫通孔形成

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プロットした結果である。レーザーショット 200 ショットまでは、ショット数の増加に伴い入口径も増加傾向を示すが、それ以降のショット数に対して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 3 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。図 4 に示す裏当て液を使用していない場合には、ショット数が 500 を超え

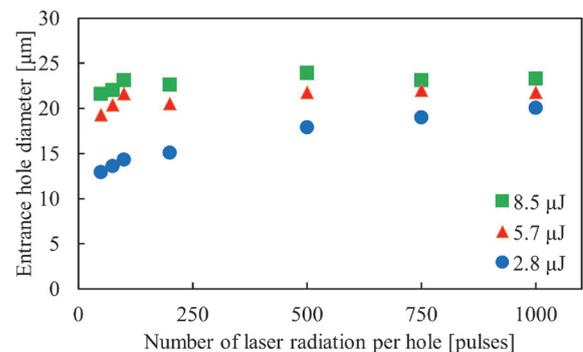


図 7 裏当て加工におけるレーザーショット数と貫通孔入口径の関係

ると頭打ちの傾向を示したが、裏当て液を使用した場合には、高パルスエネルギーの条件下においても出口孔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、

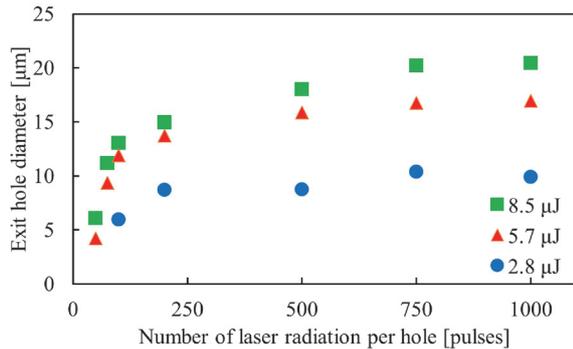


図 8 裏当て加工におけるレーザーショット数と貫通孔出口径の関係

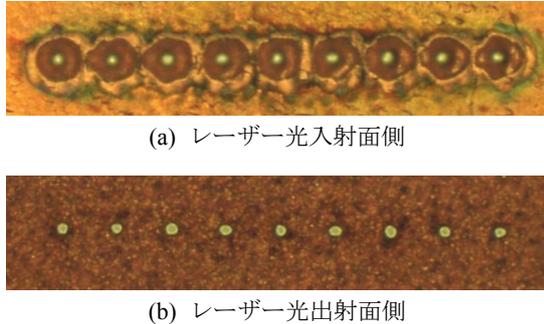


図9 回折光学素子を使用した9点同時多孔加工 (裏当て液なしの通常加工)

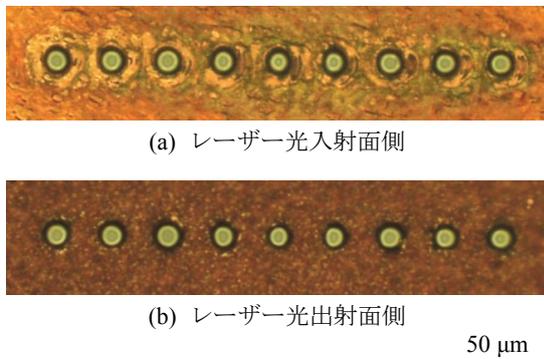


図10 裏当て加工と回折光学素子を組み合わせた9点同時多孔加工

また発振器の繰返し周波数も数 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、レーザービームの位置決め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。

発振器から出るレーザー光を複数本に分岐する光学素子として回折光学素子がある。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、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。ビームの分岐数は、レーザーの最大出力が9Wであることを考慮して、9分岐とした。この場合、分岐したビーム1本当たりの出力は1Wとなる。

図9は、9分岐の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孔加工を行った場合の結果である。この場合、裏当て液は使用せずに加工している。1孔あたりレーザー光を100ショット入射しているが、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入射することを意味している。1分岐あたりのパルスエネルギーは5.3 μJである。焦点位置での孔の分岐間隔は、開口率で10%を得ることを目標に、27 μmとなるように設計した。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孔均一に開口されていることがわかる。しかしながら、入射面側孔入口には焼けが観察される。

図10は、図9に示す照射条件のもと、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が、裏当て加工を施すことにより、孔の輪郭は明瞭となっている。また出口径が広がることによって、結果として、ストレートな貫通孔が形成されていることがわかる。この場合、入射面側直径で11.6 μm、射出面側直径で11.2 μmの値を得ている。

ここで裏当て加工のメカニズムについて考察する。図11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接触させて配置することによって、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。そして裏当て液は孔が貫通する

ことによって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、これによりストレートな貫通穴が形成されるものと現段階では考えている。

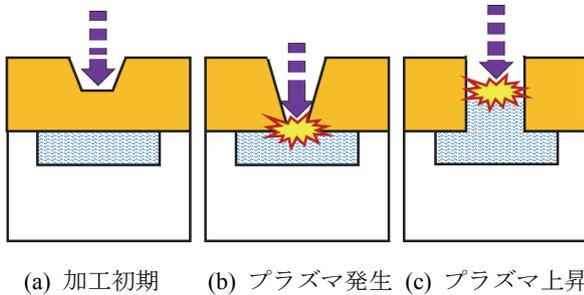


図 11 裏当て加工のメカニズム

4. 結論

ピコ秒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であることを確認するとともに、回折光学素子と組み合わせて、同時多孔加工が可能であることを示した。本研究で形成した電解銅箔のストレート孔は、超高精度フィルターや微細孔ノズルへの適用を試み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の平成 25 年度一般研究開発助成 AF-2013201 によって実施されました。ここに深く感謝の意を表します。

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: Journal of Laser Micro/Nanoengineering Vol. 9, No. 1, pp.73-78 (2014).
- 3) S. Nakamura, T. Miura and M. Tsuta: Journal of Laser Micro/Nanoengineering Vol. 10, No. 1, pp.101-105 (2015).