

炭酸ガスレーザーによるアクリル樹脂の加工特性 —レーザー切断およびレーザー彫刻による微細加工—

北田 良二*

Processing Characteristics of Acrylic Resin using CO₂ Laser Machining — Laser Cutting and Microfabrication by Laser Engraving —

by
Ryoji KITADA *

要 旨

我々の生活において樹脂材料の適用範囲は幅広く、様々な分野で活用されている。例えば、医療や化学の分野においては、微細形状を加工したシリコンやアクリル樹脂が分析チップとして使用されており、低コスト化、大量生産に向けた対応が進んでいる。分析チップの製作においては、樹脂材料へ微細形状加工を行う様々な方法が提案されており、高効率な加工方法としてレーザー加工が注目されている。しかしながら、レーザー加工は発振器が高価であり、加工コストが高くなるといった課題もある。そこで、本研究では、比較的安価であり樹脂材料の加工に適した炭酸ガスレーザーを用いて、最も汎用的な樹脂材料の一つであるアクリル樹脂に対して微細加工を行い、その加工特性を評価した。

炭酸ガスレーザーを用いたアクリル樹脂の微細加工として、精密切断加工および微細形状加工に取り組んだ結果、切断溝幅0.5 mm以下のレーザー切断、□0.5 mm程度のパターン形状のレーザー彫刻が可能であることがわかった。本研究により、炭酸ガスレーザーを用いた樹脂材料に対する低コスト、高効率な微細加工の可能性を確認することができた。

Key Words : 炭酸ガスレーザー、レーザー切断、レーザー彫刻、アクリル樹脂、微細加工

1. はじめに

樹脂材料は我々の生活において必要不可欠な材料であり、その適用範囲は多岐にわたる。その加工方法としては、射出成形が主流となっており、大量生産と低コストを実現している。一方、樹脂材料の加工精度は製品や用途に依存するが、光学部品においては高精度加工が要求されている。また、医療や化学分野において使用

される分析チップには微細形状を加工したシリコンやアクリル樹脂が使用されており、低コストと大量生産に向けた開発が進んでいる。例えば、高効率な加工方法として、レーザー光により各種樹脂にマイクロ流路などの微細加工を行い、分析チップを製作する方法が提案されている^{1) - 4)}。しかしながら、レーザー発振器は高価であり、実用化には加工コストが課題となることがしばしばある。

現在、レーザー発振器の研究開発は急速に進んでおり、発振器の性能向上と低コスト化が実現

*崇城大学工学部機械工学科准教授

されて、加工コストの課題は解決されつつある。特に、炭酸ガスレーザーは、高出力発振が可能であり発振器のコストが比較的安価であることから、最も汎用的なレーザー発振器の一つとして市場に幅広く普及している。この炭酸ガスレーザーは、波長10.6 μm の赤外光を発振することから、樹脂材料やガラスなどの加工に適しており、既に幅広い産業分野で実用化されている。したがって、炭酸ガスレーザーによる樹脂材料の微細加工技術において、今後も更なる研究開発が期待されており、分析チップのマイクロ流路加工を含めて、その適用分野も幅広い。

本研究では、炭酸ガスレーザーを用いた高効率、低コストな高品位加工を目指して、アクリル樹脂の微細加工について、レーザー切断加工と彫刻加工の加工特性を詳細に評価した。レーザー光学系を変更して焦点距離の短い集光レンズを使用することでレーザースポット径を微細化して、その効果を検証した。また、微細形状加工として、レーザー彫刻加工による立体形状加工を試みて、その可能性を確認した。

2. 実験方法

2.1 炭酸ガスレーザー加工機

本研究では、パルス発振タイプの炭酸ガスレーザー発振器を搭載したレーザー加工機を使用した。その主な仕様を表1に示す。

レーザーヘッドがXY方向に駆動することで、ステージ上に設置した加工対象物にレーザー光を照射して、切断加工および彫刻加工をすることができる。レーザー光の焦点位置は、ステージがZ方向に昇降することで調整が可能であり、オートフォーカス機能を備えている。加工点における熱影響の軽減と加工屑を除去するために、レーザー加工時にはアシストガスを噴射させ

表1 炭酸ガスレーザー加工機の主な仕様

メーカー	Great Computer Corporation
機種名	Spirit GLS
レーザー発振器	炭酸ガスレーザー(パルス発振)
波長	10.6 μm
最大レーザー出力	100 W
最大レーザー走査速度	80 inch / sec

た。本研究において、アシストガスには圧縮空気をを使用して、流量は55 L/min一定とした。アシストガスノズルは、穴径 ϕ 7 mmのものを使用した。切断加工および彫刻加工ともに、焦点位置は加工対象物表面に固定して、ノズル先端から加工物表面の間隔であるノズル高さは16 mm一定とした。加工時に発生するアウトガスは、集塵機によって吸引してレーザー加工機外部へフィルターを通して排気した。

2.2 アクリル樹脂

本研究では加工品質が優れるアクリルキャスト材を実験試料として使用した。表2にアクリルキャスト材の光学的物性値および熱的物性値を示す(板厚3 mmの場合)。

実験に使用した株式会社カナセ製のカナセライトLXはレーザー加工に特化したアクリル板材であり、切断加工および彫刻加工における加工品質に優れている。本研究では、板厚は5.0 mmに統一して、レーザー加工実験を実施した。

2.3 レーザー加工パラメータ

本研究に使用した炭酸ガスレーザー加工機は、主にレーザー出力、レーザー走査速度、レーザーパルス数をパラメータとしてレーザー加工(切断および彫刻)を行う。レーザー出力およびレーザー走査速度は、表1における最大出力、最大速度に対するパーセントをそれぞれ設定して制御する。レーザーパルス数は、切断加工の場合はPPI(Pulse Per Inch)、彫刻加工の場合はDPI(Dot Per Inch)の値を設定してレーザーパルスの照射回数

表2 アクリル樹脂の物性値

メーカー	株式会社 カナセ
名称	カナセライト LX
型式	# 1300
比重	1.19
全光線透過率	93 %
屈折率	1.49
荷重たわみ温度	110 $^{\circ}\text{C}$
比熱	1.47 kJ/kg $\cdot^{\circ}\text{C}$
線膨張率	7×10^{-5} cm/cm $\cdot^{\circ}\text{C}$
熱伝導率	0.21 W/m $\cdot^{\circ}\text{C}$
最高連続使用温度	85 $^{\circ}\text{C}$
加熱成形温度範囲	135 ~ 180 $^{\circ}\text{C}$

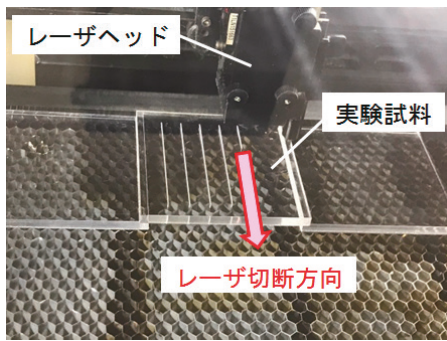


図1 レーザ切断加工実験の様子

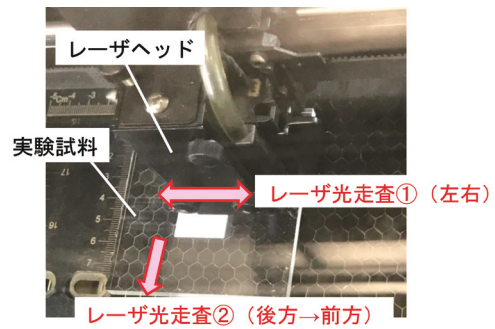


図3 レーザ彫刻加工実験の様子

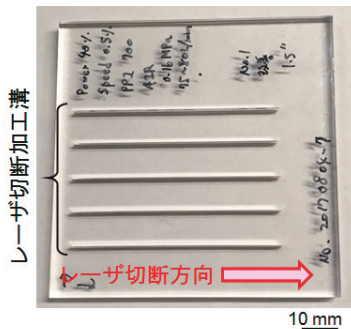


図2 レーザ切断加工試料

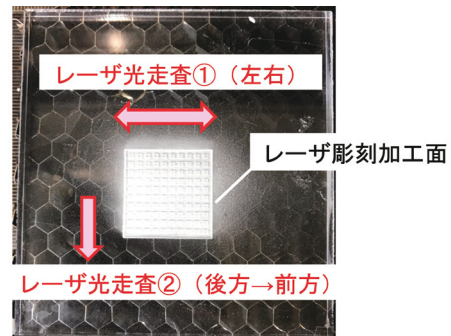


図4 レーザ彫刻加工試料

を制御する。PPIは切断長さ1 inchあたりのパルス数を意味し、DPIは彫刻エリアの1 inch幅あたりのパルス数をそれぞれ意味する。

光学系においては、レンズ焦点距離の異なるレンズを使用することでレーザースポット径を変化させた。本研究では、焦点距離2 inchおよび1.5 inchのレンズを使用して、焦点位置におけるレーザースポット径(理論値)は、それぞれ0.102 mmおよび0.077 mmである。

2.4 レーザ切断加工

アクリル樹脂板材の切断特性を評価するために、レーザー出力、パルス数(PPI)、レーザー走査速度を変化させて切断実験を行った。切断加工におけるレーザー光の走査回数は1回である。レーザー切断実験の様子およびレーザー切断試料をそれぞれ図1、図2に示す。大きさ□80 mm、板厚5.0 mmのアクリル樹脂に対して、同一レーザー加工条件にて5本の切断溝を形成して、その切断溝性状を顕微鏡で観察した。また、切断溝幅についても顕微鏡にて測定し、レーザー加工条件との相関を調査した。切断溝幅は、5本の切断溝を評価して、

その平均値、最大値、最小値を評価した。

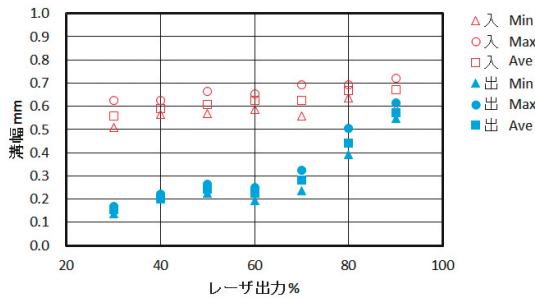
2.5 レーザ彫刻加工

アクリル樹脂板材の彫刻特性を評価するために、パルス数(DPI)、レーザー走査速度を変化させて、表面除去加工である彫刻加工の実験を行った(レーザー出力は30%に固定)。彫刻加工の実験の様子を図3に、彫刻加工試料を図4にそれぞれ示す。大きさ□80 mm、板厚5.0 mmのアクリル樹脂に対して彫刻加工を行い、そのレーザー加工表面の状態を顕微鏡にて観察した。

3. 実験結果

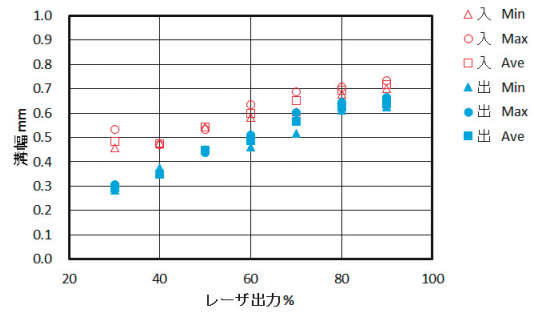
3.1 切断加工特性

レーザー切断溝幅を測定した結果を図5、図6、図7にそれぞれ示す。図5はレーザー出力を変化させた場合のレーザー切断溝幅の変化を示した結果である。レーザー出力が大きくなるにしたがって、切断溝幅が広がる傾向であることがわかる。レーザー入射側は緩やかな増加傾向であるのに対して、レーザー出口側は大きく増加してい



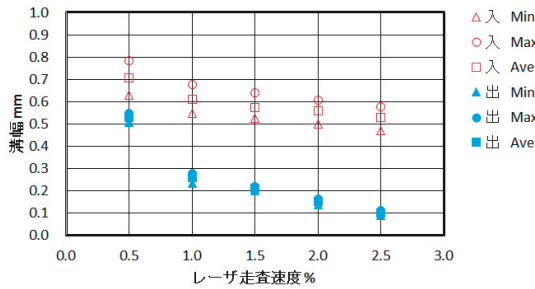
レーザー走査速度：1.0%，レーザーパルス数：1000 PPI，レンズ焦点距離：2 inch

図5 レーザ出力に対する切断溝幅の変化



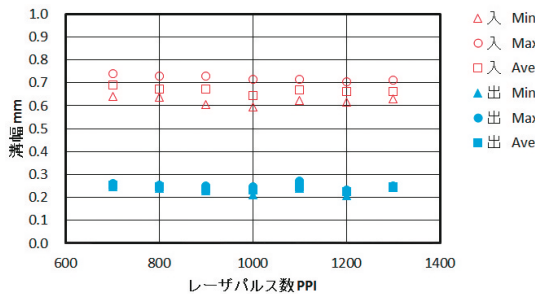
レーザー走査速度：0.5%，レーザーパルス数：700 PPI，レンズ焦点距離：2 inch

図8 レーザ入熱を抑制したレーザー出力に対する切断溝幅の変化



レーザー出力：70%，レーザーパルス数：1000 PPI，レンズ焦点距離：2 inch

図6 レーザ走査速度に対する切断溝幅の変化



レーザー出力：70%，レーザー走査速度：1.0%，レンズ焦点距離：2 inch

図7 レーザパルス数に対する切断溝幅の変化

く。その結果、レーザー出力が大きい場合には、レーザー入射側と出口側の切断溝幅の差が小さくなり、ストレート断面になっていると推測される。図6はレーザー走査速度を変化させた場合のレーザー切断溝幅の変化を示した結果である。レーザー走査速度を速くするにしたがって切断溝幅は小さくなる傾向であり、レーザー出力を増加させた場合と逆の傾向であることがわかる。レーザー走査速度が遅い場合には、入射側と出口側の切断溝幅の差が小さくストレート断面になっていると推測される。つまり、レーザー出力が大きい場合とレーザー走査速度が遅い場合には、単位長さあたりのレーザー入熱量が増えるた

め、図5および図6のような傾向になったと考えられる。一方、図7はレーザーパルス数を変化させた場合のレーザー切断溝幅の変化を示した結果である。パルス数を変化させても切断溝幅に大きな変化はなく、入射側と出口側の差は約0.4 mmで一定である。パルス数のみを変化させてもレーザー切断に必要なレーザー入熱量は一定であるため切断溝幅に影響を及ぼさなかったものと考えられる。

次に過度なレーザー入熱を避けるために、レーザーパルス数を700 PPIに固定してレーザー出力を変化させてレーザー切断実験を行った切断溝幅の測定結果を図8に示す（レーザー走査速度は0.5%に固定）。全体的に溝幅のばらつきが小さくなっており、安定した切断ができていることが確認される。さらに、レーザー出力30%を除いて、レーザー入射側と出口側の溝幅の差は0.1 mm程度まで改善されている。レーザー出力を高くするにしたがって溝幅は大きくなる傾向であり、出力が80%と90%のときに入射側と出口側の差は最も小さくなる。これらの結果から、レーザー加工条件によってレーザー加工品質を改善できることがわかった。

図9に代表的なレーザー切断加工溝性状をマイクロスコープにより評価した結果を示す。レーザー出力40%、レーザー走査速度0.5%、レーザーパルス数700 PPIの加工条件では、レーザー出力70%、レーザー走査速度1.0%、レーザーパルス数1000 PPIの加工条件と比較して、レーザー入射側と出口側においてストレートな切断溝形状が得られている。また、レーザー切断溝幅については、レーザー入射側および出口側ともに溝幅が細くな

レーザー切断加工条件	レーザー入射側	レーザー出口側
レーザー出力: 70 % レーザー走査速度: 1.0 % レーザーパルス数: 1000 PPI レンズ焦点距離: 2inch	切断方向 → 平均溝幅 0.624 mm	← 0.282 mm
レーザー出力: 40 % レーザー走査速度: 0.5 % レーザーパルス数: 700 PPI レンズ焦点距離: 2inch	0.470 mm	0.354 mm

図9 レーザ切断加工溝の状態

レンズ焦点距離	レーザー入射側	レーザー出口側
2 inch (スポット径: 0.102 mm)	切断方向 → 平均溝幅 0.624 mm	← 0.282 mm
1.5 inch (スポット径: 0.077 mm)	0.372 mm	0.248 mm

レーザー出力: 70 %, レーザ走査速度: 1.0 %, レーザパルス数: 1000 PPI
図10 短焦点距離レンズを使用した場合のレーザー切断加工溝の状態

り微細化されている。更に、入射側と出口側の差は小さくなっている。これらの結果から、レーザー出力を低くして入熱量を減らし、パルス数と切断速度を低くすることでレーザー切断加工品質を大幅に改善できることがわかった。

次に、レンズ焦点距離を変更することによるレーザースポット径の大きさが切断加工性状に及ぼす影響を確認した。レーザー出力、レーザー走査速度、レーザーパルス数を固定して、焦点距離2 inchおよび1.5 inchのレンズを使用してレーザー切断加工を実施した切断溝状態を図10に示す。焦点距離1.5 inchのレーザー入射側の溝幅が細くなっており、レーザースポット径が小さくなった効果が得られている。一方、レーザー出口側の溝幅においては、焦点距離2 inchと1.5 inchに大きな差は見られていない。焦点距離1.5 inchのレンズは焦点距離が短いため厚み方向に対してはレーザー光が広がりやすく、出口側溝幅が大きくなった結果であると考えられる。

以上の結果より、レーザー切断において良好な切断性状を得ることができた。これは、炭酸ガスレーザーの赤外光（波長10.6 μm）はアクリル

レーザー走査速度	レーザーパルス数	
	500 DPI	1500 DPI
40 %	① ②	
80 %		

レーザー出力: 30 %, レンズ焦点距離: 2 inch, 彫刻回数: 1回

図11 レーザ彫刻加工表面の状態

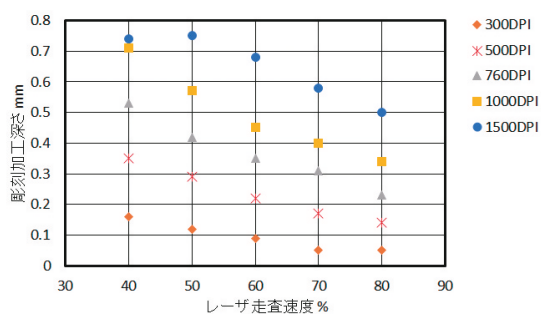
樹脂に対して吸収率が高く、熱可塑性樹脂であるためにレーザー加工熱で溶融再凝固して平滑面が得られやすい結果であると考えられる。

3.2 彫刻加工特性

次に、表面除去加工であるレーザー彫刻加工について加工面性状の評価を実施した。レーザー加工条件により、彫刻加工の深さおよび表面性状（凹凸の状態、表面粗さ）が変化するため、本研究では彫刻深さと表面粗さに大きく影響すると考えられるレーザーパルス数とレーザー走査速度を変化させて彫刻加工特性の評価を行った（レーザー出力は30%に固定）。彫刻加工の形状は、□20 mmの表面除去加工とした。

レーザー彫刻加工表面をマイクロスコープにて観察した代表的な結果を図11に示す。彫刻回数は1回であり、1層のみ表面を除去加工している。レーザー走査速度とパルス数を変化させた結果、レーザー走査速度が速く、レーザーパルス数が大きい場合に、レーザー走査痕とレーザーパルス痕が目立たない滑らかなレーザー彫刻面が得られることが明らかとなった。レーザーパルス数が小さい場合は、単位面積当たりのレーザーパルス数が少なくなることから、粗い加工面になるものと考えられる。一方、レーザー走査速度が遅い場合は、単位面積当たりのレーザー入熱量が大きくなり、深く加工されてしまうためレーザー走査痕が発生しやすいものと考えられる。

次に、彫刻加工深さについて評価した結果を図12に示す。図11と同様に彫刻回数は1回で



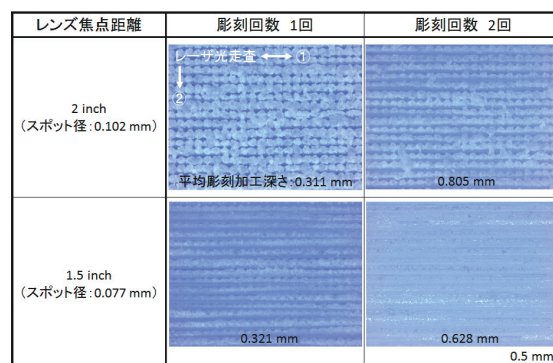
レーザ出力：30%，レンズ焦点距離：2 inch，彫刻回数：1回

図12 レーザ彫刻加工深さの変化

あり、1層のみ表面を除去加工している。彫刻加工深さはダイヤルゲージにて実測した。同一加工条件にて、3回の彫刻加工を行い、それぞれの加工深さの平均値を求めた。図12の結果より、レーザ走査速度が遅いほど、彫刻深さは比例的に大きくなるのがわかる。また、レーザパルス数が高いほど、彫刻深さが比例的に大きくなる。これらの結果は、単位面積当たりのレーザ照射回数が増えるほど加工エネルギー量が増えて、彫刻深さが深くなったものと考えられる。ただし、レーザパルス数が1500 DPIの場合において、レーザ走査速度が50%と40%では彫刻深さに変化がなく、加工量が飽和状態にある。この結果から、一度に除去加工できる除去量には限界があり、必要以上の加工エネルギーを与えても加工が進行しないものと考えられる。

以上の結果より、レーザ彫刻加工においては、高パルス数で平滑な面質を得ることができ、レーザ走査速度によって加工深さを制御できることが明らかとなった。

図13は、レーザスポット径が彫刻加工に及ぼす影響を評価した結果である。レーザ彫刻加工条件を同じにして、レンズ焦点距離の異なる彫刻加工表面を顕微鏡で観察した結果を比較している。彫刻回数1回は1層のみ表面除去加工した結果であり、彫刻回数2回は1層除去加工した後に、重ねて更に1回レーザ彫刻加工をした結果である。レーザスポット径が小さい焦点距離1.5 inchのレンズを使用した彫刻加工表面のほうが、2 inchの場合と比較して平滑な面が得られていることがわかる。つま



レーザ出力：30%，レーザ走査速度：60%，レーザパルス数：1500 PPI

図13 短焦点距離レンズを使用した場合のレーザ彫刻加工表面の状態

り、レーザスポット径を小さくすることで、より精密な彫刻加工が可能であることが明らかとなった。

3.3 レーザ彫刻による微細形状加工

レーザ彫刻による微細形状加工やその加工精度向上は、レーザ加工による微細加工技術を様々な分野へ応用するために重要である。そこで、前項3.2の彫刻加工結果に基づいて、微細形状加工の可能性について確認した。

微細形状加工のテストパターンを図14に示す。微細構造体は立方体として、その立方体の周期構造のレーザ彫刻加工を行った。立方体のサイズは、□1.00 mm、□0.50 mm、□0.25 mmの3段階として、加工エリアは立方体サイズに依存して決定した。立方体上面も微細形状加工の一部とするため、立方体の高さは周囲よりも低くした。顕微鏡により拡大観察して、立方体の形状と加工寸法から、微細形状加工の可能性を評価した。レーザ加工条件については、前項3.2の彫刻加工の結果から、良好な彫刻加工結果が得られたレーザパルス数1500 DPI、レーザ走査速度60%、レーザ出力30%を採用した。なお、加工深さについては、微細構造体（立方体）に影響を及ぼさない非接触測定が必要となるため本研究においては評価対象外とした。

図15にテストパターン加工を行うレーザ彫刻加工プロセスを示す。まず始めに、表面全体を除去する（STEP 1の赤塗り潰し部分を除去加工）。次に、除去加工した表面に対して立方

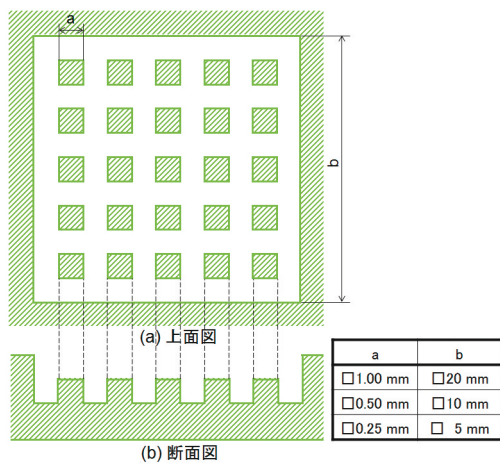


図 14 微細構造体テストパターン形状

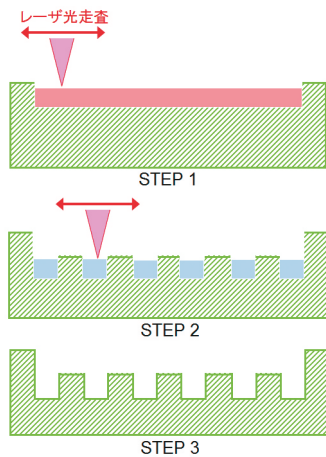


図 15 微細構造体レーザー彫刻加工プロセス

体を形成する (STEP 2の青塗り潰し部分を除去加工)。最終的に、図14のテストパターンの微細構造体を得る (STEP 3の形状)。

テストパターンの微細形状加工結果を図16に示す。□1.00 mmおよび□0.50 mmにおいて、微細構造体である立方体形状が綺麗に形成されていることがわかる。また、レンズ焦点距離2 inchと1.5 inchを比較すると、レーザースポット径が小さい1.5 inchの方が、立方体形状が綺麗であり目標とする加工寸法に近いことがわかる。この結果は前項3.2の彫刻加工の結果と一致している。以上の結果より、全面を彫り下げた後に立方体を形成するシンプルなレーザー彫刻加工プロセスにより、微細形状を綺麗に精度よく形成できることが明らかとなった。

立方体サイズa	焦点距離 2.0 inch	焦点距離 1.5 inch
□1.00 mm		
□0.50 mm		
□0.25 mm		

レーザー出力：30%，レーザー走査速度：60，レーザーパルス数：1500 DPI，レンズ焦点距離：2 inch

図 16 レーザー彫刻加工による微細構造体形状

4. おわりに

炭酸ガスレーザーによるアクリル樹脂の微細加工の可能性検討を行うため、切断加工、彫刻加工の基礎的な加工特性を評価した。また、微細形状加工として立方体のドットパターンの加工実験を行いその可能性を確認した。本研究により得られた主な結果は以下の通りである。

- (1) 切断加工においては、レーザー出力とレーザー走査速度がレーザー切断溝性状に大きく影響を及ぼす。レーザー入熱量が多い程、切断溝幅は広くなりレーザー入射側と出口側の切断溝幅の差は小さくなる。レーザー出力とレーザー走査速度により、レーザー入熱量を最適化することで、良好な切断溝性状を得ることが可能である。焦点距離の短い1.5 inchのレンズを使用することで、より精密な切断が可能となる。スポット径が小さくなることで微小エリアへエネルギーを集中することができ、精密切断に適すると考えられる。
- (2) 彫刻加工については、レーザーパルス数とレーザー走査速度により、表面粗さと加工深さを制御できる。レーザーパルス数が高い程、平滑な面が得られ、レーザー走査速度が遅い程、深彫りが可能となる。焦点距離が短くスポット径が小さい1.5 inchのレンズを使用することで、レーザー加工痕が細くなり、彫刻加工の表面粗さが小さくなる。

- (3) 炭酸ガスレーザーによるアクリル樹脂の微細形状加工として、 $\square 1.0\sim 0.5$ mm程度の立方体のドットパターンの加工が可能である。

本研究により、焦点距離の短い1.5 inchのレンズを使用することで、切断溝幅が細くなる、彫刻加工の表面粗さが小さくなる、微細構造体を加工できるといった結果を得ることができた。レーザースポット径を小さくすることで入熱エリアが小さくなり、炭酸ガスレーザーによるアクリル樹脂のレーザー加工において、精密加工の可能性を確認できた。

謝 辞

本研究報告は、2016年度および2017年度の卒業研究として実施した研究成果の一部である。本研究テーマについて、熱心に取り組み、数多くの実験データを評価してくれた2016年度卒業研究生の田上健志朗君に深く感謝する。また、追加検証実験を行い、実験データの収集に協力してくれた2017年度卒業研究生の小野慎之介君、戸田裕之君、桑田大地君に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 山田博之, 吉田善一, 寺田信幸, 萩原茂, 寺澤章裕: レーザによるフッ素樹脂への血球変形能観察用マイクロ流路の加工, 精密工学会誌, Vol. 73, No. 9 (2007), pp. 1035-1039.
- 2) M. I. Mohammed, M. P. Y. Desmulliez: The manufacturing of packaged capillary action microfluidic systems by means of CO₂ laser processing, *Microsystem Technologies*, Vol. 19, No. 6 (2013), pp. 809-818., DOI 10.1007/s00542-013-1792-1
- 3) Andrew W. Holle, Shih-Hui Chao, Mark R. Holl, Jeffrey M. Houkal, Deirdre R. Meldrum: Characterization of Program Controlled CO₂ Laser-Cut PDMS Channels for Lab-on-a-chip Applications, *Proceedings of the 3rd Annual IEEE Conference on Automation Science and Engineering*, MoRP-B01.2, (2007), pp. 621-627.,

DOI 10.1109/COASE.2007.4341853

- 4) C. K. Chung, Y. J. Syu, H. Y. Wang, C. C. Cheng, S. L. Lin, K. Z. Tu: Fabrication of flexible light guide plate using CO₂ laser LIGA-like technology, *Microsystem Technologies*, Vol. 19, No. 3 (2013), pp. 439-443., DOI 10.1007/s00542-012-1665-z