

光学ガラスのレーザ微細塑性加工に関する研究

埼玉大学 大学院理工学研究科

助教授 池野順一

(平成 12 年度研究開発助成 AF-2000003)

キーワード：レーザ加工、塑性加工、マイクロレンズ

1. 研究の目的と背景

現在、ガラスは光学部品に欠かすことのできない重要な材料である。とくにマイクロデバイスや光通信の分野では、ガラス部品の局部に精密微細加工を施す要求が出され、その要求も年々厳しいものになってきている。今後、この要求に答えるには成形後のガラスに対して、自由度の高い精密微細加工を実現することが不可欠である。

本研究者は、今までにレーザ光を照射してガラス基板上の微粒子を空中に浮上させるレーザトラッピングの研究を行ってきた。この実験中、ある条件下でガラス基板上にYAGレーザを集光させると、基板が μm サイズから数 mm サイズの範囲で凸に膨らむ現象を発見した。これにより、レーザ照射によるガラスの膨張現象と塑性加工を組み合わせれば、ガラス局部にマイクロレンズなどの微小光学部品やマイクロデバイスなどの3次元微小構造物、微細マーキングや機能を有する微細表面模様などが容易に創成できるのではないかと考えた。従来の成形加工のようにガラス全体を加熱する必要がないため、ガラス全体に歪みを残さず安定した自由度の高い超精密微細加工が実現できるものと期待される。

本研究ではガラス表面局部に超精密微細加工を施すため、膨張係数の温度依存性を利用した新しいレーザ精密微細塑性加工法を提案した。本研究の主目的は、この新レーザ塑性加工法の実現である。具体的には以下の3項目の実現を目指して実験を行った。

- ① μm サイズの球面形状凸部を高精度に形成し、ガラス基板上に多数のマイクロレンズを製造すること。
- ② 凸部を2次元に展開し、線状の凸部マーキング、さらに凸部を多段に形成し3次元構造物を構築する。

③ 凸部はレーザ照射時に軟化しているため、刻印技術や充填型技術を複合して様々な形状の高精度微細塑性加工を試みる。

2. 実験装置・試料

実験装置の概略を図1に示す。実験に用いたレーザは、CW Nd:YAG レーザ($\lambda=1.06\mu\text{m}$)である。レーザ光は、ビームエキスパンダで拡張された後、ビーム走査部の2枚のガルバノミラーによってステージ上のXY方向に走査可能である。なお、レーザ光は対物レンズ(N.A.=0.3)によって集光され、ステージ上のガラス試料に垂直に照射される。試料には、青色ガラス(ブル-ミテ'イ74'ク 日本板硝子製)を使用した。この光学特性は波長 $1.06\mu\text{m}$ に対して、吸収率が比較的高く48%であった。

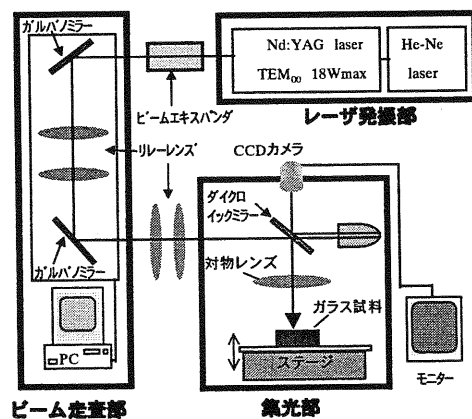


図1. 実験装置の概略

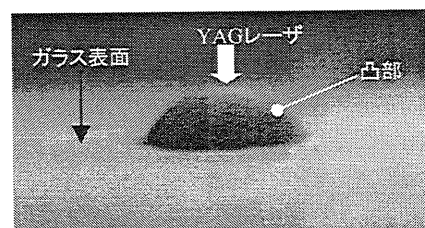


図2. 創成された凸部の様子(3.2W,30s)

3. レーザ微細加工

レーザをガラス表面に照射することで、どのような変化が生じるか調査した。その結果、ある条件でガラス表面が凸に膨らみ、レーザ照射を中止してもその凸部形状が維持されることを見出した。そこで、この凸部創成による微細加工の可能性を調査した。

3・1 凸部形状創成

青色ガラスにレーザ照射出力 1.9W 未満で照射した場合、ガラス表面に何ら変化は見られなかった。しかし、1.9W 以上で照射すると、ガラス表面に半球状の凸部が創成されることが分かった。図 2 に創成された凸部の様子を示す。これは、ガラス表面近傍が急激に加熱され転移温度以上になったためと考えられる。そこで、凸部形状創成に関する基礎特性を調査した。図 3(a) にレーザ照射時間と凸部直径の関係を示す。照射出力を上げることによってより大きな凸部直径が得られた。また、時間経過とともに成長の速度は低下していくことが分かった。図 3(b) にレーザ照射時間と凸部高さの関係を示す。この図から、出力が大きくなるほど凸部は高くなり、最大 50~60 μm になることが分かった。凸部高さは、照射開始直後に急激に成長し、その後はゆっくりと成長する。また、照射出力が大きい場合、凸部高さが成長途中で小さくなることもある。これは、凸部直径の増大によりガラス表面の張力が広範囲で低下したため、凸部高さを維持できずなだらかになってしまったものと考えられる。

3・2 多段凸部の形成

1 回の照射において、照射条件を経時変化させることで、凸部形成に変化が生じるのではないかと考えた。

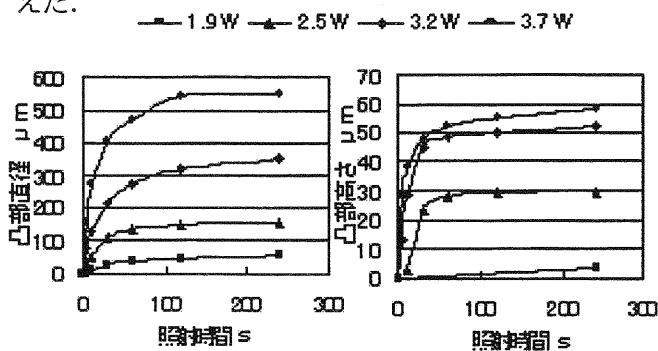


図 3 レーザ照射時間と凸部の大きさの関係

照射条件を 3.7W, 60s (1 段目形成) \rightarrow 0.2W, 10s (徐冷) \rightarrow 3.7W, 2s (2 段目形成) \rightarrow 0.2W, 10s (徐冷) \rightarrow 3.7W, 1s (3 段目形成) と変化させた時に形成された凸部の様子を図 4 に示す。これにより、3 段の凸部が形成されることが分かった。このことは、凸部創成による 3 次元微細加工が可能であることを示している。

3・3 凸部による微細加工例

ガルバノミラーを用いれば複数、もしくは連続した凸部からなる微細加工が可能になると考えた。まず、複数の凸部からなるマーキングの例を図 5 に示す。次に、レーザを円形に走査して、連続した凸部形成を試みた。その結果、図 6 に示すように、同心円状の凸部微細パターンが形成できた。これらより、凸部形成によるマーキングなどの微細加工が可能であることを確認した。

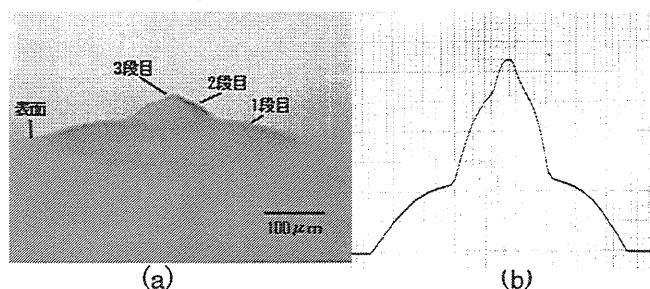


図 4 3 段凸部の様子

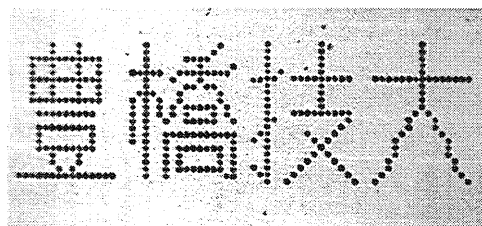


図 5 複数の凸部によるマーキング例

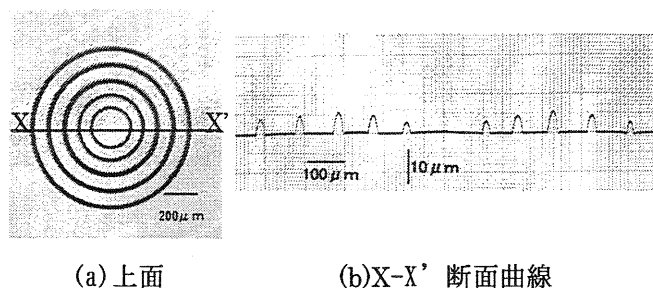


図 6 連続凸部からなる同心円状の微細パターン

4. レーザ微細転写加工

レーザー照射時には凸部が柔らかいことに着目し、塑性加工を試みた。

4.1 実験装置

実験装置の概略を図7に示す。レーザー微細転写加工装置は、試料を加熱するCW Nd:YAG レーザ($\lambda = 1.06 \mu\text{m}$)と、転写加工を行うハンマーで構成されている。ハンマーは、タイマーを有する電磁石で駆動しており、叩いて試料を押しつける時間が制御可能である。また、0N~0.2Nまでの範囲で押し付けが可能である。ハンマー先端部および試料には、青色ガラス(日本板硝子製 プルミテアムダーク)を使用した。

4.2 転写加工

青色ガラスにレーザーを1.5秒間照射し凸部創成直後、その凸部にハンマーを打ち付けた。その結果を図8(a)に示す。この時の荷重は約0.1N、押し付け時間は0.5秒である。これにより、凸部上面が平らになっており塑性加工されたことが分かる。

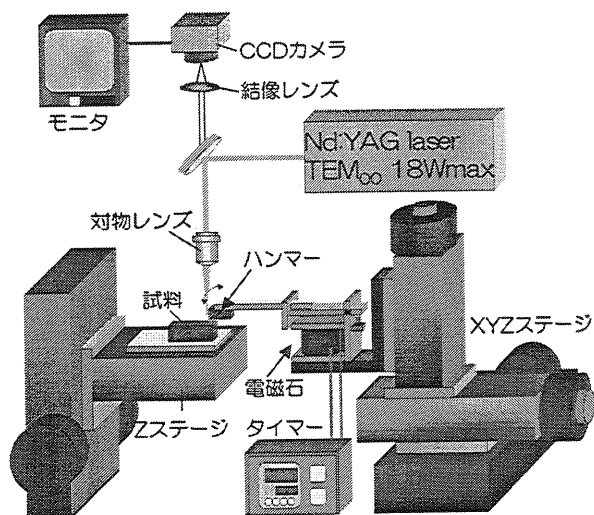
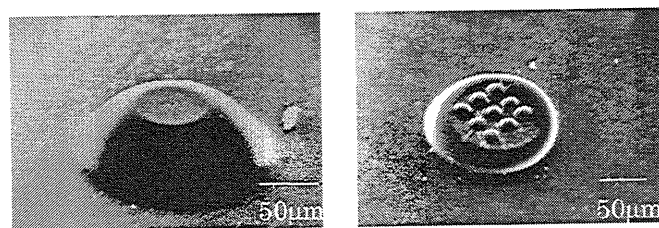


図7 塑性加工装置の概略



(a) 平面転写加工例 (b) 創成平面の凸部

図8 転写加工された凸部

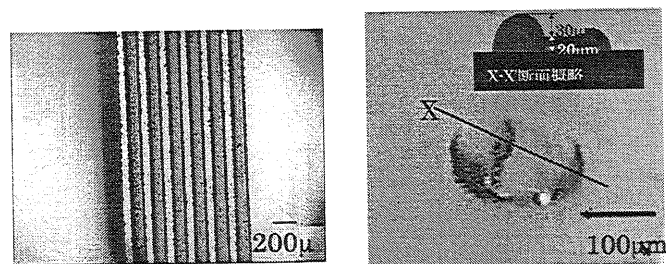
また、同図(b)に示すように、凸部の平面になった部分に再びレーザーを照射することで2段目の凸部を創成できることも分かった。このことは、重ねて加工が可能であることを示している。

次に、図9(a)に示すような矩形断面の直線溝を彫ったスライドガラスをハンマー先端部に取り付け、転写加工を試みた。その結果を同図(b)に示す。この図から、ハンマーで叩かれた凸部は溝部で高さ約30 μm の蒲鉾状凸部となり、その他では平面になっていることが分かった。

4.3 充填型加工

次に、型に材料を充填させ、型通りに形状創成可能な微細加工法の検討を行った。

図10に示すように、直径約200 μm の貫通穴を設けた厚さ0.1mmのカバーガラスを型とし、青色ガラス上に密着させた。この状態で、穴底の青色ガラスに上方よりレーザーを照射した。照射部には凸部が徐々に成長し、やがて型内面に接すると直径方向の成長は制限され、図11(b)のような型内面を転写した凸部が創成された。このことから、型に凸部を充填させていくような微細塑性加工も可能であることが分かった。



(a) ハンマー先端の溝入ガラス (b) 転写加工された凸部
図9 レーザ微細転写加工

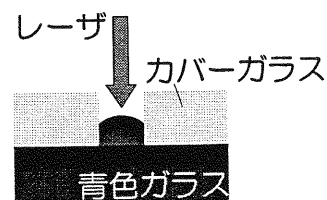
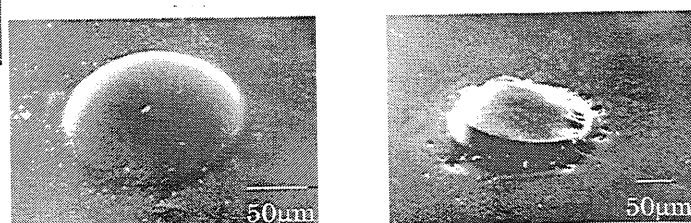


図10 充填型による凸部創成



- 84 - (a) 型を用いない凸 (b) 充填型を用いた凸
図11 レーザ充填型加工

5. 任意形状の平面を持つ凸部創成

5.1 加工原理

任意形状の凸部平面を創成するため、本報では次の加工法を試みた。すなわち、任意形状の凸部形状は、ガルバノミラーの走査軌跡で創成し、その凸部上面には耐熱性、レーザ透過性に優れた板を常時押し当てる。このような加工法が可能であれば、充填型やハンマーを用意せずとも任意形状の凸部平面が創成でき、レーザ三次元微細塑性加工の可能性が高まるものと期待される。そこで、微細塑性加工を施す青色ガラス上面に石英ガラスを密着させ、レーザ出力 4.2W のレーザ光を任意形状に走査した。これにより石英ガラスの自重で任意形状の凸部は平坦化され、所望の三次元構造物ができあがると考えた。

レーザ走査方法を図 12 に示す。(a)は円形に走査した例であり、走査半径を 20s の間に $5\mu\text{m}$ から $35\mu\text{m}$ まで連続的に変化させた。(b)は三角形に走査した例である。レーザ光は中央部を起点とし、図に示すように渦状に走査する。終点まで到達すると再び起点から走査し、これを 3.75Hz の繰り返し周波数で 5s 照射した。(c)は四角形に走査した例である。三角形の走査と同様に中央部を起点とし、レーザ光は、繰り返し周波数 2.34Hz で照射時間 7s 四角形の渦状に繰り返し走査した。

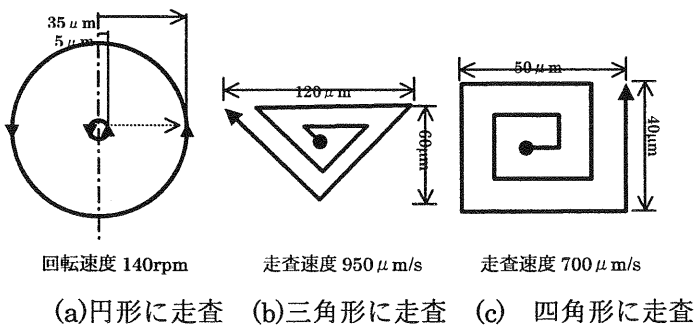


図 12 レーザ走査方法

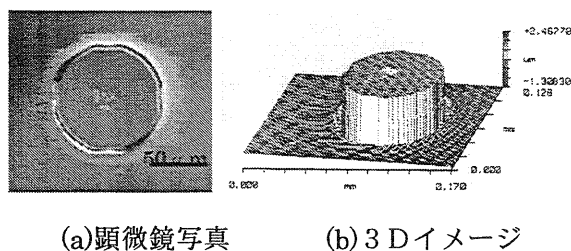


図 13 円形走査による凸平面の様子

5.2 実験結果

まず、レーザ光を円形に走査した結果を図 13 に示す。図中(a)は微分干渉顕微鏡で観察した結果である。(b)は非接触式表面粗さ計(New View 100:Zygo 社製)によって測定した 3D イメージである。実験時にガラスは照射範囲内で徐々に隆起し、その上面は石英ガラスの自重でならされ、高さ $4\mu\text{m}$ の円形凸部平面が創成できた。

次に、レーザ光を三角形に走査した結果、高さ約 $2\mu\text{m}$ の三角形凸部平面を創成できた。この様子を図 14 に示す。しかし、中央部が窪んでおり平面度は約 $0.2\mu\text{m}$ であった。これはレーザを等速で走査したために三角形の鋭角部分で投入熱量が多くなり、他の部分よりも大きく隆起してしまったものと考えられる。

次に、レーザ光を四角形に走査した結果、高さ約 $0.6\mu\text{m}$ の長方形凸部平面を創成できた。この様子を図 15 に示す。

6. 結び

以上、新たにガラスのレーザ微細塑性加工を提案し、その可能性を得た。今後はさらに形状制御に重点をおいて研究を継続していく予定である。

謝辞

本研究に対し、天田金属加工機械技術振興財団から研究開発助成を頂いた。ここに御礼申し上げますとともに、当財団の益々の発展をお祈り致します。

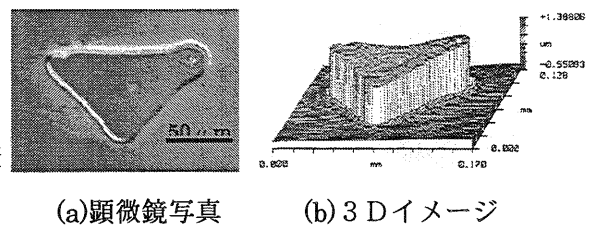


図 14 三角形走査による凸平面の様子

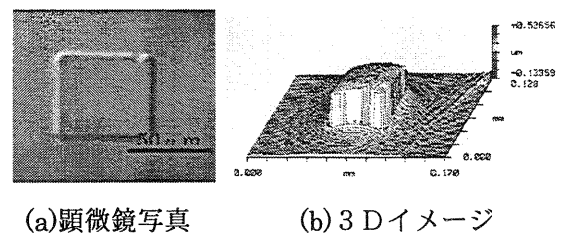


図 15 四角形走査による凸平面の様子