

圧子押し込みによるレンズアレイ型の精密創成

千葉工業大学 工学部 機械工学科
教授 瀧野 日出雄
(平成 28 年度 一般研究開発助成 AF-2016010)

キーワード： 金型, 圧痕, レンズアレイ

1. 研究の目的と意義

近年, カメラやプロジェクターなどの光学機器の高精度化, 高機能化のために, その光学系にレンズアレイが組み込まれるようになってきた[1, 2]. レンズアレイとは, 小径~微小径のレンズ(要素レンズ)を多数配列した光学素子である. レンズアレイの製造は, 一般的には成形によって行われる. すなわち, 表面にレンズアレイの反転形状が形成された金型(以下, レンズアレイ型と称す)を用いて, プラスチック射出成形やガラスモールドなどの方法でレンズアレイは製造されている.

レンズアレイ製造において重要なのはレンズアレイ型の高精度加工である. レンズアレイ型の光学面は, 一般に切削または研削で形状加工したのち, 研磨によって平滑化することによって創成される. 形状加工のプロセスでは, 多数の要素を1つずつ加工していくため, 長い時間を要しており, 時間短縮が求められている.

レンズアレイ型の加工時間短縮のために, 機械加工に代わる方法として, 塑性加工を利用した形状加工法も提案されている. これらの方法は, 要素レンズ形状の圧子を繰り返し工作物に押し込むことで多数の圧痕を創成して, レンズアレイ型を製造しようとするものである. たとえば, 要素レンズの深さが数 μm と浅いレンズアレイ型が圧子押し込みで創成され, その型を用いて一眼レフカメラのファインダースクリーンが成形されている[3]. 一方, 深い要素レンズ(深さ数 $10\sim 100\mu\text{m}$ 程度)をこの方法で創成しようとした場合, 圧痕周辺が隆起してしまい, これが形状精度に影響する. そこで C. Forest らや小林らが提案したのは, エンドミルで要素レンズの概略形状を加工したあとに, 球状圧子で押し込みを行い, 精度向上を図るものである[4, 5]. また, 閻らが提案したのは, 要素レンズが間隔をあけて配置されたレンズアレイ型を対象に, 圧子押し込み後に, 圧痕周辺の隆起を切削で除去するものである[6]. このように, 深い要素レンズを圧子押し込みで創成する場合には, 圧痕周辺の隆起を防止あるいは除去するために, 機械加工を併用することが不可欠であった. したがって, 深い要素レンズを塑性加工だけで創成可能となれば, 工程が簡略化され, 製造コストが低減するものと期待できる.

そこで本研究では, 工作物に多孔質焼結材を用いることにより, 塑性加工のみで高精度の要素レンズを創成する方法を提案するものである. 本報では, その基礎特性を調べるために行った単一の要素レンズの押し込み実験と, 9 要素レンズアレイ型の創成実験, そして, 要素レンズの表面粗さの向上の検討結果について報告する.

2. 実験装置と実験方法

図1に, 試作した押し込み装置の模式図を示す. 本装置では, XY ステージの上に荷重測定用のロードセルを搭載し, その上に Z ステージを設置している. Z ステージ上のワークテーブルの上に工作物を設置する. また図示のように, 工作物の上部には圧子が配置してある. 圧子は超硬製の球体であり, ロッドの端面に取り付けてある. 圧子の直径は $\phi 1\text{mm}$ である.

本装置では, Z ステージを鉛直上方に移動させることによって, 圧痕を創成する. レンズアレイ型の創成は, XY ステージによる移動と, Z ステージによる押し込みを繰り返すことによって行う.

本研究では図1の装置を用い, 押し込み荷重や, 押し込み量を変えて要素レンズを創成した. 要素レンズの形状はレーザプローブ式表面形状測定装置(三鷹光器製, NH-3)で測定した.

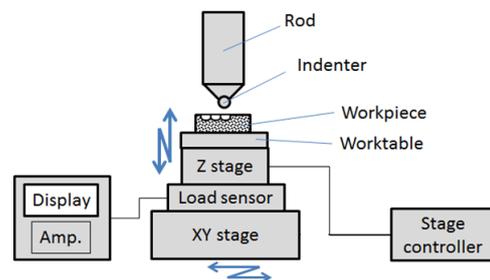


図1 試作した圧子押し込み装置の模式図

3. アルミニウム溶製材の押し込み実験

溶製材の純アルミニウム製平板を工作物として用いて押し込み実験を行った. 図2に実験結果の一例として, 押し込み荷重 $10\sim 70\text{N}$ における圧痕の形状を示す. 同図のように, 荷重を増すに従って圧痕の深さは

増加しており、本実験条件では荷重と中心部の深さはほぼ比例関係にあることがわかる。また、外周部には盛り上がりが生じており、盛り上がりの高さは荷重とともに増加していることがわかる。要素レンズの外周部の盛り上がりは、要素レンズを多数個加工してレンズアレイ型とする場合に形状誤差となる。そこで、盛り上がりの抑制を次章のように検討した。

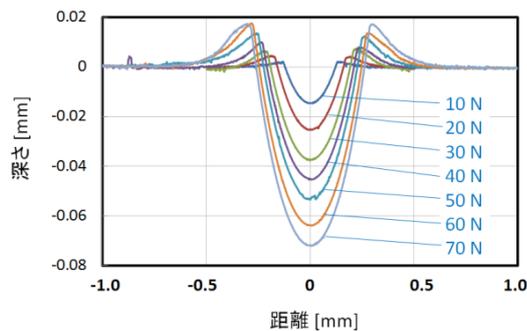


図2 純アルミニウム溶製材を用いた場合における押し込み荷重と圧痕形状

4. 多孔質焼結材の押し込み実験

図2に示したように、溶製材である純アルミニウム平板を工作物として用いると圧痕の外周に盛り上がりが生じることがわかった。この盛り上がりは、押し込みによって流動した材料が表面側に排出されたことが原因と考えられる。そこで、多孔質材料ではこのような材料の表面への流動が抑制できるのではないかと考え、ポーラスに焼結された金属を工作物に用いて以下の実験を行った。

平均粒径 $15\mu\text{m}$ のアルミニウム粉末を用いて、気孔率9%のアルミニウム焼結体の円板を製作した。この焼結体の片面を#2000の研磨紙で研磨し、この研磨面に対して荷重10~70Nで押し込み実験を行った。図3には圧痕の断面形状の測定結果を重ね書きして示す。同図に示すように、圧痕外周には盛り上がりが見られず良好な結果が得られている。図4は、一例として、押し込み荷重70Nの場合について、圧痕形状の頂点に圧子形状の頂点が一致するように重ね書きしたものである。同図から、圧子の外側において、わずかであるが工作物の表面に沈み込みがみられる。

そこで、圧子形状と圧痕形状と差分を求めることにより、圧子形状の転写性を評価した。本稿では、圧子形状を基準とした圧痕形状を形状誤差と呼ぶことにする。図5には例として、押し込み荷重10, 40, 70Nについての形状誤差を示す。同図において、外側において各曲線が急激に低下しているのは、図4に見られる圧子の外側における工作物表面の沈み込みに対応

している。外側の沈み込みを除けば、 $1\sim 2\mu\text{m}$ 程度の精度で圧子形状が転写できていることがわかる。この形状誤差は、押し込み荷重の除荷後に圧痕部が弾性回復したことや、圧子の弾性変形によるものと考えられる。なお、圧子形状の補正により、所望の要素レンズ形状を得ることも可能と考えられる。

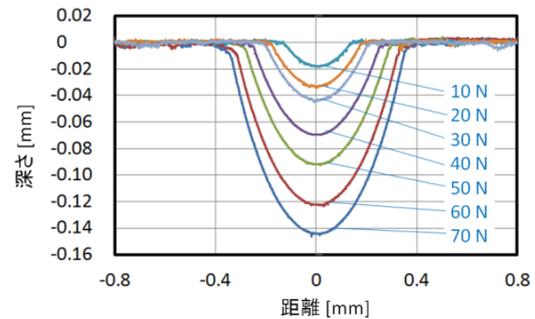


図3 アルミニウム焼結材を用いた場合の押し込み荷重と圧痕形状

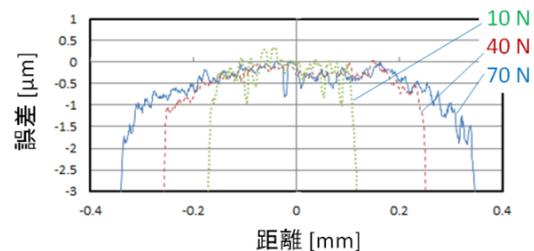


図4 アルミニウム焼結材の圧痕形状と圧子形状の比較。押し込み荷重70N

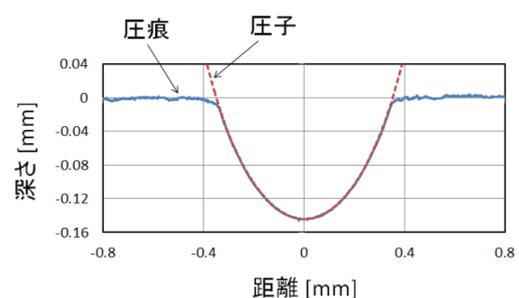


図5 アルミニウム焼結材に形成された圧痕の形状誤差

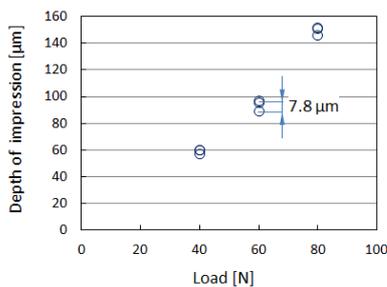
5. 押し込み量制御による安定性向上

次に、押し込み量が所定の値になるようにして圧痕を創成する方法を考案した。この方法は以下のようなものである。すなわち、圧子とワークとが非接触の状態からZステージを上昇させ、圧子とワークとが電気

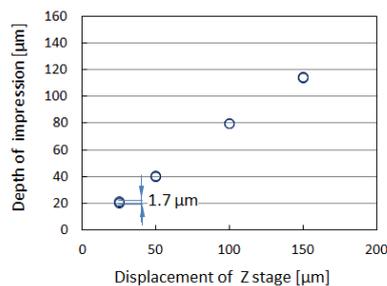
的に導通した位置を押し込み開始点とした。この押し込み開始点から、Z ステージを所定量上昇させることで圧痕を創成した。なお、電気的な導通は、ワークと圧子との間の電気抵抗をテスターで測定することで検出するようにした。

押し込み量を制御した場合と、押し込み荷重を制御した場合について、それぞれ3個の圧痕を創成し、押し込み深さの安定性を比較した。

図6(a)は、押し込み荷重を所定値とした実験結果である。各押し込み荷重に対して圧痕の深さをプロットしてある。図6(b)は、押し込み量を所定値とした実験結果で、Z ステージの移動量（押し込み量）に対して圧痕の深さをプロットしてある。両図から、押し込み荷重を所定値とした場合、圧痕深さのばらつきは最大で7.8 μm 生じていることがわかる。一方、押し込み量を所定値とした場合、圧痕深さのばらつきは最大で1.7 μm である。すなわち、押し込み量を所定値とすると、圧痕深さのばらつきが低減できることがわかる。このように、押し込み荷重を所定値にするとばらつきが大きくなるのは、ワークの気孔率が場所によって異なることなどが原因と考えられる。なお、図6(b)において、押し込み量と圧痕深さが一致しないのは、除荷後に圧痕部に弾性回復が生じたことや、圧子や装置の弾性変形などが考えられる。押し込み量と創成された圧痕の深さとは、比例関係にあることから、押し込み量を補正することによって、所望の深さの圧痕が創成できると期待される。



(a) 押し込み荷重制御法



(b) 押し込み量制御法

図6 押し込み荷重制御法と押し込み荷重制御法の圧痕深さ安定性の比較

6. レンズアレイ型の創成

5章に述べたように押し込み量を制御することにより、高い押し込み深さ安定性が得られることがわかった。そこで、この方法により、気孔率9%の多孔質焼結材を用いて、9要素を有するレンズアレイ型を創成した。

図7に一例として要素間ピッチを500 μm として創成されたレンズアレイ型の顕微鏡写真を示す。また、図8に中心の3要素の断面測定例を示す。すべての要素レンズの深さ測定をした結果、深さのばらつきは4 μm と良好な結果が得られた。

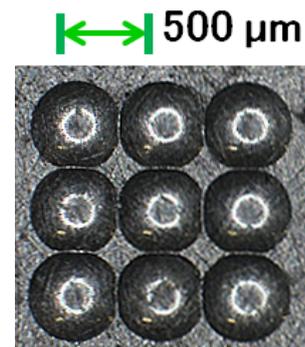


図7 創成された9要素レンズアレイ型の顕微鏡写真

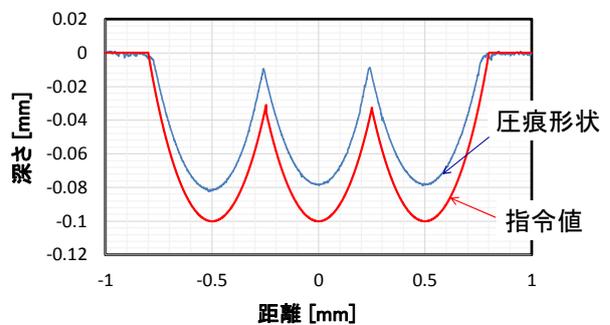


図8 中心3要素の断面形状測定結果

7. 表面粗さの検討

つぎに、圧痕の表面粗さについて検討を行った。表面粗さの測定にも、前記のレーザプローブ式表面形状測定装置を用いた。

図9は、押し込み荷重を変化させて創成した圧痕の表面粗さを測定した結果を示す。押し込み荷重0Nのプロット点は、押し込み前の表面粗さである。同図に示すように、押し込み荷重の増加に従って、表面粗さが向上する傾向にあることがわかる。これは、圧子による押圧によって、表面の凸部が押しつぶされて平坦化されたためと考えられる。

上記の実験から、押し込み前の表面粗さを向上させておくことによって、さらに平滑な面を得ることができるのではないかと考えて、次の実験を行った。

まず、ワーク表面をアルミナ砥粒などで研磨した結果、表面粗さを Ra0.5 μm から Ra0.02 μm に向上させることができた。このワークに対して、荷重 60N で押し込み実験を行った結果を図 10 に示す。同図に示すように、押し込みによって表面粗さは Ra0.13 μm まで増加してしまっただ。この原因を調べるために、圧子の表面粗さを測定したところ、Ra0.13 μm であった。すなわち、圧子の表面粗さがワーク表面に転写されることによって表面粗さが増加したものと考えられる。このことから、平滑な圧子を用いることにより、より平滑な圧痕面が得られるものと考えられる。

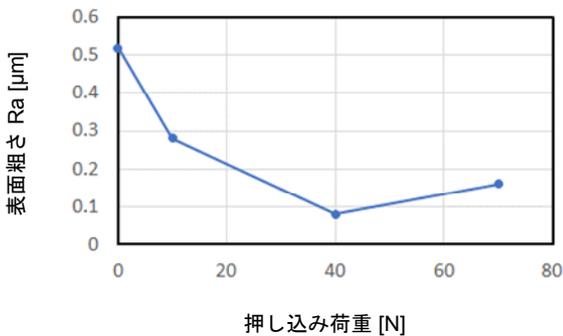


図 9 押し込み荷重と表面粗さの関係

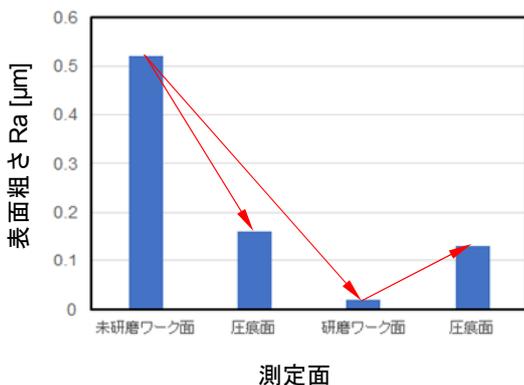


図 10 研磨ワーク面の圧痕の表面粗さ

8. 結論

本研究では、圧子の押し込みによるレンズアレイ型の創成法において、工作物に多孔質焼結材を用いる方法を提案した。得られた主要な結果は以下のとおりである。

- ・多孔質焼結材の利用により、圧痕外周の盛り上がり抑制ができる。
 - ・単一レンズは、その最外周を除けば、1~2 μm 程度の形状精度で創成できる。
 - ・押し込み量制御法を提案した。この方法では、押し込み荷重制御法と比較して、高い深さ安定性が得られる。
 - ・9要素からなる深さ80 μm のレンズアレイ型が、深さばらつき4 μm 、すなわち5%で創成できた。
 - ・ワークが粗面の場合、圧子の押し込みによって表面粗さが向上した。一方、平滑面に対しては、表面粗さが増加した。これは圧子の表面粗さが圧痕表面に転写された結果であると考えられる。平滑な圧子を用いることにより、平滑な圧痕が得られるものと期待される。
- なお、多孔質の焼結材は金型材料としては強度不足の可能性もある。強度不足の場合には、圧痕が形成された焼結材を母材とし、Ni電鍍などで複製を行うことで、硬質の金型を製造可能と考えられる[3]。

謝辞

本研究は、公益財団法人天田財団による一般研究開発助成(AF-2016010)で実施されました。同財団に深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 瀧野日出雄：光学部品の製造技術（前編）－球面・非球面加工技術の基礎と現状－，電気加工学会誌，47，115（2013）69-76.
- [2] 瀧野日出雄：光学部品の製造技術（後編）－さまざまな光学部品の製造方法－，電気加工学会誌，47，116（2013）137-144.
- [3] 中山尚行：微細パターンモールド金型の超精密加工技術，日本機械学会生産加工・工作機械部門ニュースレター，26（2003）pp. 2-3.
- [4] C. R. Forest, M s. A. Saez, and I. W. Hunter: Microforging technique for rapid, low-cost fabrication of lens array molds, Appl. Opt. 46, 36（2007）pp. 8668-8673.
- [5] 小林康記，坂本治久，岩原 誠，清水伸二：塑性加工によるマイクロレンズアレイ用金型の加工シミュレーション，2011年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集，（2011）pp. 281-282.
- [6] 閻 紀旺，堀越章弘，厨川常元：微小押し込みと超精密切削との複合プロセスによる微細形状の大量積創成－（第1報）基礎実験，2009年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，（2009）pp. 63-64.