

路面に図形を描画する微細光学部品の開発

- 作製した光学部品の形状評価 -

光科 中野雅青 志智 亘
工業技術研究所 照明音響科 柳原 亘 豊田敏裕

Development of micro-optical components for projecting symbols onto the road

- Shape evaluation of fabricated optical components -

NAKANO Masaharu, SHICHI Wataru, YANAGIHARA Wataru and TOYOTA Toshihiro

We have developed a micro-prism array (MPA) to project pictogram on the road surface using LEDs as a light source. The MPA consists of minute prisms with different elevations and azimuths of the inclined planes, and as such it is difficult to fabricate such a detailed shape by conventional cutting and injection molding. Therefore, an MPA was fabricated by stereolithography using a two-photon polymerization method. Then, the MPA produced by stereolithography was used as a master to make a mold by precision electroforming, and MPAs were replicated by thermal nanoimprinting. The shapes of the fabricated MPAs (master, mold, replica) were measured with a confocal microscope. It was confirmed by optical simulation that the angular error of the measured inclined plane was small enough so as not to affect the projected image.

Keywords: Micro Prism Array, stereolithography, electroforming, thermal nanoimprinting, road projection

LEDを光源にして路面に図形を描画するマイクロプリズムアレイ(MPA)を開発した。MPAは、微細なプリズム群で構成されており、プリズムごとに傾斜面の角度と向きが異なっている。このため、従来の切削加工や射出成形の方法では、このような微細形状を作製することが困難であった。そこで、2光子重合方式の光造形でMPAの原盤を作製した。そして、この原盤を用いて精密電気鋳造で金型を作製し、熱ナノインプリントによりレプリカを作製した。作製したMPA(原盤、金型、レプリカ)の形状を共焦点顕微鏡で測定した。実測した傾斜面の角度の成形誤差は、投影像に影響を与えない程度に十分小さいことを光学シミュレーションにより確認した。

キーワード：マイクロプリズムアレイ、光造形、精密電気鋳造、熱ナノインプリント、路面描画

1 はじめに

人とクルマのコミュニケーションを支援する次世代の車載照明機器に用いる、路面に図形を描画する光学部品のマイクロプリズムアレイ(以下、MPA)を開発した¹⁾。図1に示すように、開発したMPAは、プリズム底面の1辺が0.1mmで、高さが数十 μm の微細なプリズム群で構成されている。プリズムごとに傾斜面の角度と向きを変えて光の進行方向を制御し、遠方に図形を描画する。本方式は、投影光学系が光源とMPAだけの単純な構成で、投影レンズが不要なため光学系を小型化できる利点がある。また、投影距離の変化に対して、投影像のぼけやむらといった光学特性の変化が少ない点も優れている。

一方、従来の切削加工や射出成形の技術では、こ

のような微細光学部品を作製することが困難であった。そこで、我々は、微細な造形が可能なフェムト秒レーザーを用いた2光子重合方式の光造形技術に着目した²⁾。また、光造形で作製したMPAの原盤を複製する方法として、精密電気鋳造と熱ナノインプリントの有効性を検証した。本報告では、これらの技術を活用して作製したMPAの原盤と金型、及びレプリカについて、形状を評価した結果について示す。なお、微視的な表面性状の評価については、別報を参照されたい³⁾。

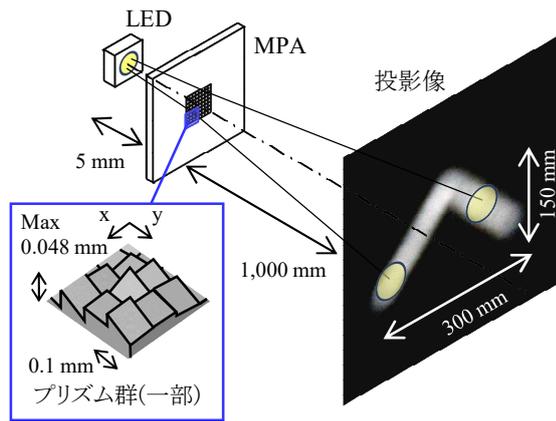


図1 MPAによる図形投影の概略図

2 方法

2.1 MPAの作製

1,000 mm先にブーメラン形状（縦150 mm×横300 mm）を投影するMPAを設計した^{4, 5)}。表1に作製したMPAの仕様を示す。

原盤のMPAは、2光子重合方式の光造形装置を用いて光硬化性樹脂で作製した。次に、この原盤を使い精密電気鋳造でニッケル製の金型を作製した。さらに、その金型をスタンパーにして、熱ナノインプリントでアクリル製のレプリカを3個複製した。光硬化性樹脂と各作製法の詳細は、別報を参照されたい¹⁾。

表1 設計したMPAの仕様

プリズムサイズ（1個）	
・底面	0.1 mm×0.1 mm
・高さ（Max）	0.048 mm
プリズム数（縦×横）	20個×20個
傾斜角度	0.7°～14.9°
光源-MPA間距離	5 mm

2.2 MPAの形状評価方法

作製したMPAの三次元形状は、共焦点顕微鏡OPTELICS HYBRID L7（レーザーテック（株））を使い非接触で測定した。また、測定した三次元形状において直交する2方向（図1のxy方向）の断面プロファイルデータから、各プリズムの傾きをそれぞれ回帰分析し、傾斜面の角度と向き（法線の仰角と方位角）を算出した。このうち、傾斜角度について成形誤差を評価した。評価に用いた断面プロファイルは、プリズム中央部の50 μm幅において断面形状を平均化して求めた。

2.3 傾斜角度の成形誤差を考慮した投影像予測

光造形で作製した原盤について、傾斜面の角度と向きを測定し、実測値を使ったMPAの三次元形状モデルを作成した。この形状モデルを光線追跡ソフトウェアAnsys Zemax OpticStudio（Ansys Inc.）に取り込み、傾斜角度の誤差を含んだMPAの投影像を予測した。光源は、直径0.4 mmの円形白色光源で、発光面の光強度分布は一様とした。

3 結果および考察

3.1 光造形で作製したMPAの形状評価

（1）外観形状

図2に、光造形で作製した原盤の共焦点顕微鏡像を示す。形状の異なる400個の微細なプリズムが、同様な品質で作製できることを確認した。製作した原盤の一部の三次元形状と断面プロファイルを図3に示す。原盤の傾斜面には、積層造形に起因する目立った段差は確認されなかった。一方、エッジ部では丸みが生じた。丸みのある部分では、設計どおりに光の進行方向を制御できないため、不要な背景光が発生する。このため、丸みを可能な限り少なくする必要がある。

（2）原盤傾斜角度の誤差

図4に、光造形で作製した原盤の各プリズムにおける傾斜角度の成形誤差（設計値との差）を評価した結果を示す。傾斜角度の誤差は、その角度の大きさに依存せず、平均値0.34°、標準偏差0.49°の正規分布に従う傾向であった。光造形で作製した同じ形状の5個の原盤について、傾斜面の角度誤差を比較した結果、同様な傾向であった（表2）。

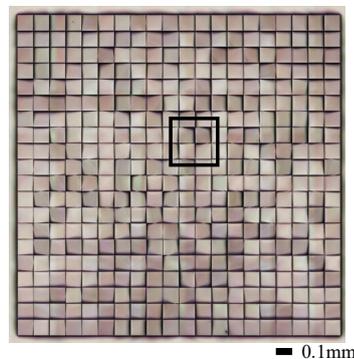


図2 光造形で作製した原盤の顕微鏡像

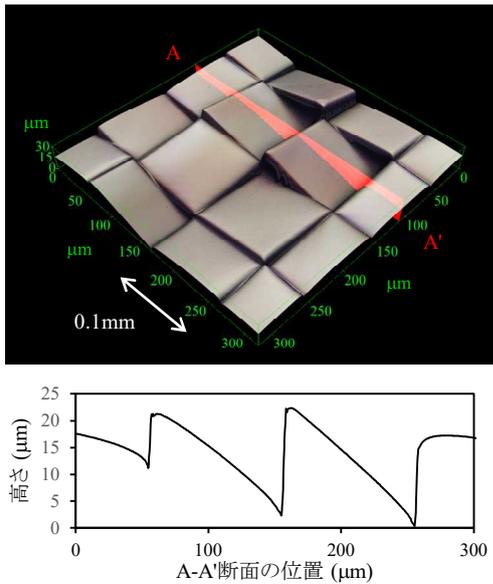


図3 光造形で作製した原盤の形状

図2の黒枠で囲まれた部分の三次元形状とA-A'断面のプロファイル。

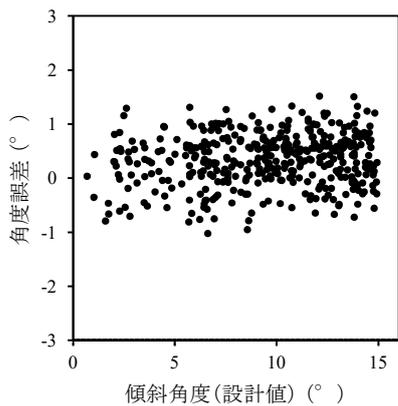


図4 原盤の各プリズムにおける傾斜角度誤差

表2 傾斜角度の原盤間誤差

試料	平均 (°)	標準偏差 (°)
A	0.34	0.49
B	0.32	0.46
C	0.24	0.44
D	0.24	0.46
E	0.24	0.40

3.2 傾斜角度の成形誤差が投影像に与える影響

図5に、光造形により生じた傾斜角度の誤差が投影像に与える影響をシミュレーションにより予測した結果を示す。両者を比較しても顕著な差異は見られず、今回の光造形で発生した角度誤差は、投影像に影響を与えないことが確認された。

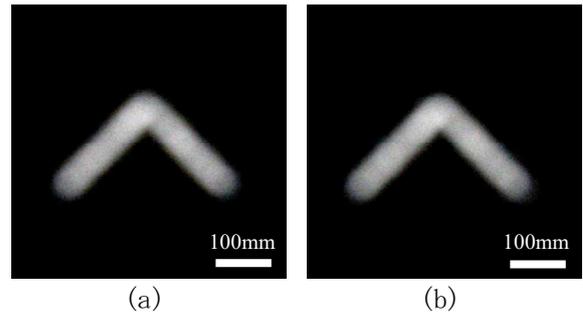


図5 傾斜角誤差が投影像に与える影響

(a)が設計値どおり作製した場合の、(b)が光造形で作製した原盤における傾斜面の角度と向きの実測値を使って予測した場合の投影像

3.3 精密電気鋳造で作製した金型の形状評価

(1) 外観形状

精密電気鋳造で作製した金型の外観形状を評価した。図6に、図3で示した原盤と同じ部分の形状測定結果を示す。傾斜面における高さ方向の形状誤差（金型と原盤との差）は、共焦点顕微鏡の測定精度と同等の $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 程度であった。なお、プリズム間の境界部では、測定ノイズが多いため評価から除外した。

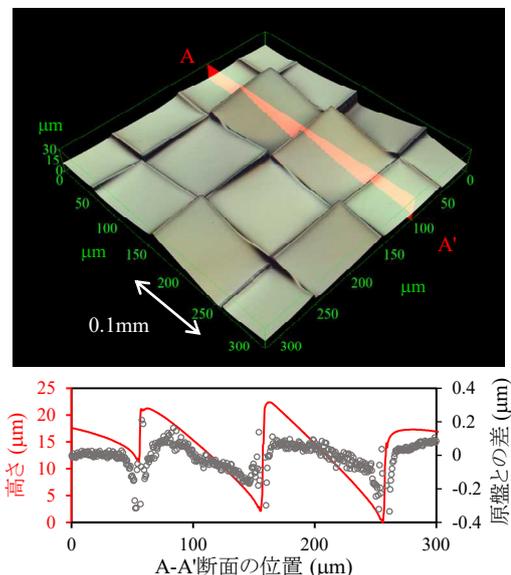


図6 精密電気鋳造で作製したMPA金型の形状

断面プロファイルは、原盤と比較するため、形状を反転して表記した。赤線はMPAの高さ、黒点は原盤との高さの差である。

(2) 金型傾斜角度の誤差

図7に、金型の各傾斜面における傾斜角度の誤差（金型と原盤との差）を評価した結果を示す。傾斜面の角度誤差は、その角度の大小に依存せず、平均値 0.15° 、標準偏差 0.30° の正規分布に従う傾向であった。これらの結果から、精密電気鋳造によりMPAの反転型を高精度に作製できることが確認された。

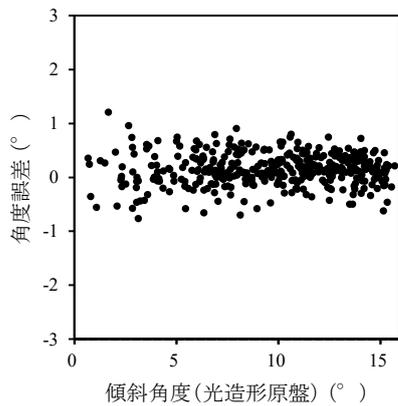


図7 金型の傾斜角度誤差

3.4 熱ナノインプリントで複製したレプリカの形状評価

(1) 外観形状

図8に、精密電気鋳造で作製した金型を使い、熱ナノインプリントで複製したレプリカの形状測定結果を示す。図8(a)に示したレプリカ全体の顕微鏡像からは、プリズム形状が大きく崩れるような欠陥は見られず、熱ナノインプリントで複雑な形状をもつプリズム群を転写できることを確認した。一方、図8(b)に示した断面プロファイルを見ると、レプリカは原盤に対して $2\ \mu\text{m}$ 程度収縮している。また、繰り返し作製したレプリカ間で、収縮の程度に違いは見られなかった。なお、プリズム間の境界部では、測定ノイズが多いため評価から除外した。

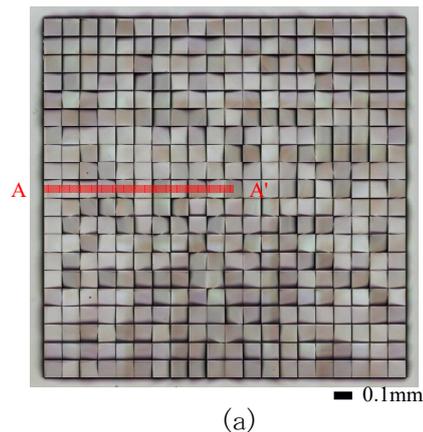
(2) レプリカ傾斜角度の誤差

図9に、ナノインプリントの1回目に作製したレプリカの傾斜角度の成形誤差（レプリカと原盤との差）を評価した結果を示す。誤差は、傾斜角度の大きさに依存しなかった。また、設計値との差を評価した結果については、別報を参照されたい¹⁾。

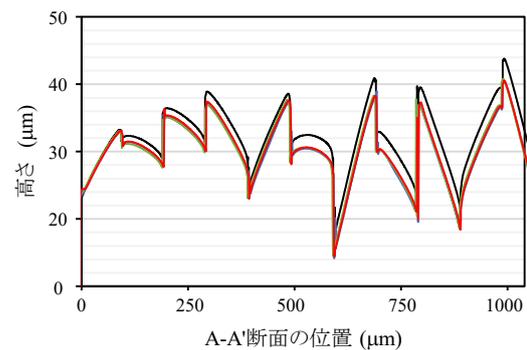
図10に、レプリカの各プリズムにおける傾斜角度の誤差をマッピングした結果を示す。誤差分布は一律ではなく、局所的に大きな箇所が確認された。

また、成形回数による違いが見られた。これは、樹脂の加熱及び冷却、脱型の方法に課題があると考えられる。表3に、3個のレプリカにおける傾斜角度誤差の統計値を示す。統計値では、成形回数による顕著な違いは見られなかった。

これらの結果から、精密電気鋳造により作製した金型と、熱ナノインプリントによりMPAを高精度に複製できることがわかった。



(a)



(b)

図8 ナノインプリントで複製したレプリカの形状

(a)レプリカの共焦点顕微鏡像、(b)A-A'断面プロファイル。黒線は原盤の、赤、緑、青線（重なって差が視認しづらい）は、それぞれ成形1、2、3回目のレプリカの断面プロファイル。

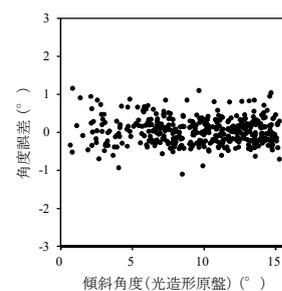


図9 レプリカMPAの傾斜角度誤差

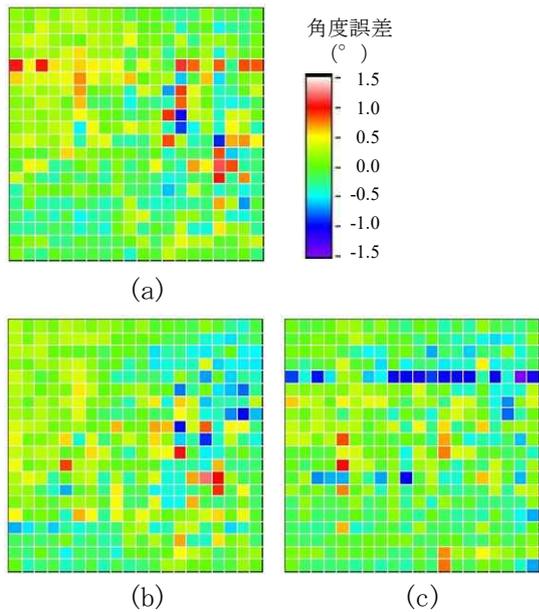


図 10 レプリカの傾斜角度誤差マップ

縦 20 個×横 20 個の各プリズムにおける傾斜角度の誤差。(a)成形 1 回目、(b)成形 2 回目、(c)成形 3 回目。

表 3 成形回数と傾斜角度の誤差

回数	平均 (°)	標準偏差 (°)
1	0.04	0.34
2	-0.02	0.34
3	-0.09	0.33

5 まとめ

路面に図形を描画する微細光学部品である MPA の作製方法について、作製した MPA の形状を評価し、その有効性を検証した。

- (1) 2 光子重合方式の光造形は、形状が異なる微細なプリズム群を均一な品質で作製できることがわかった。また、今回の光造形で発生した傾斜角度の成形誤差は、投影像に影響を与えない程度に十分小さいことが確認された。このことから、本光造形法は原盤作製に有効な方法であるといえる。
- (2) 精密電気鋳造は、光造形で作製した原盤の反転型を高精度に作製できる手段であることを確認できた。
- (3) 熱ナノインプリントは、精密電気鋳造で作製した金型と組み合わせて用いることで、光造形で作製した原盤を複製する技術として有

効であることがわかった。また、3 回の成形では、傾斜角度誤差の統計値に変化は見られなかった。

一方で、投影像の不要な背景光を減少させるためには、MPA におけるエッジ形状の丸みを改善させる必要がある。また、成形時に発生する収縮や、傾斜角度の誤差分布が MPA 全体で一様でないことは今後の課題である。

参考文献

- 1) 豊田敏裕 他：熱ナノインプリントによるマイクロプリズムアレイの成形. 静岡県工業技術研究所研究報告, 第 17 号, 1-7 (2024).
- 2) 丸尾昭二：3 次元マイクロ・ナノ光造形による機能構造体の開発. スマートプロセス学会誌, 3 (3), 175-181 (2014)
- 3) 柳原亘 他：マイクロプリズムアレイにおける熱ナノインプリントによる成形の評価－光干渉計を用いた表面粗さ測定－. 静岡県工業技術研究所研究報告, 第 17 号, 47-48 (2024).
- 4) 志智亘 他：図形を投影するマイクロプリズムアレイの設計. 静岡県工業技術研究所研究報告, 第 15 号, 128-129 (2022).
- 5) 志智亘 他：マイクロプリズムアレイによる図形投影照明の設計－光学シミュレーションによる投影像の評価－. 静岡県工業技術研究所研究報告書, 第 17 号, 90-95, (2024).