

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

照明音響科 豊田敏裕 柳原 亘
光科 志智 亘 中野雅晴

Fabrication of micro-prism arrays using thermal nanoimprint

TOYOTA Toshihiro, YANAGIHARA Wataru, SHICHI Wataru and NAKANO Masaharu

Automotive lighting devices, such as headlamps and rear combination lamps, have advanced functionalities, but it is required that the sizes of functional modules be further reduced. Communication lighting is a potential novel functionality for automotive lighting devices that has been extensively studied. In communication lighting, communication between humans and vehicles is enhanced by vehicles projecting pictograms onto the road. In this study, optical elements called microprism arrays (MPAs), which constitute numerous small prism arrays, were fabricated as a technology for the realization and commercialization of communication lighting.

The process for the molding of the microprism array involves thermal nanoimprinting, in which structures are printed onto replicas via the pressing of preheated resins and die stampers. The stampers were fabricated using ultra-precision electroforming. The masters required for stamper fabrication were constructed using two-photon polymerization using a femtosecond pulsed laser.

Thanks to this, transparent masters that can be used as optical elements were also successfully realized. These processes yielded replicates with high shape accuracy. Furthermore, this study demonstrated that these replicas can serve as optical elements for projecting pictograms that resemble the intended optical design.

Keywords: Micro-prism array, MPA, Thermal nanoimprint, Electroforming, Micro fabrication

車載照明製品は多機能化が進み、個々の機能に対応するモジュールにはさらなる小型化が求められている。本研究では、路面にピクトグラムを投影することで、人とクルマがコミュニケーションを図る「コミュニケーションライティング」を実現する製品化技術として、微細なプリズムで構成される光学素子、マイクロプリズムアレイの成形に取り組んだ。

マイクロプリズムアレイは熱ナノインプリントプロセスにより成形した。熱ナノインプリントプロセスは、熱で軟化させた樹脂とスタンパーと呼ばれる金型をプレスすることで形状を転写してレプリカを成形する技術である。スタンパーは精密電気鋳造により成形した。また、スタンパーの成形に必要な原盤は、光学素子としても機能するよう、フェムト秒パルスレーザーを用いる二光子重合法により透明なフォトリソを用いて造形した。その結果、成形されたレプリカは、形状精度が高く、設計と同等のピクトグラムを投影できることを確認した。

キーワード：マイクロプリズムアレイ、MPA、熱ナノインプリント、電気鋳造、微細成形

1 はじめに

車載照明製品はCASEに対応する多機能化が進んでいる。ヘッドランプやウィンカーの機能に加え、LiDARやミリ波レーダーなどのセンサーや付加価値を持たせた照明機能など多岐にわたる。なかでも、日本でも令和8年頃から解禁の見込みとなっている「コミュニケーションライティング（路面投影）」は、関連法規（UN/ECE No. 149 No. 48等）の整備も

進んでおり、ヘッドランプの新しい機能として注目を集めている。

コミュニケーションライティングは、路面にピクトグラムを投影することで人とクルマがコミュニケーションを図ることを支援する照明機能である。図1に示すような、法規で定められたピクトグラム（図形）をヘッドランプやリアランプから路面に投影して歩行者や運転手に情報を伝える役割を果た

す。

コミュニケーションライティングはレンズとマスクを用いた投影光学系による方法や、デジタルマイクロミラー素子を用いたプロジェクター方式等が検討されているが、あまねく人々がその恩恵を享受するには性能とコストが両立した製品開発も必要不可欠である。

そこで本研究では、照明光学系の原理でピクトグラムを投影可能で、小型化と品質の両立が可能と考えられる、マイクロプリズムアレイ（図2）の成形に取り組んだ。

マイクロプリズムアレイは一辺が1 mmにも満たない微小なプリズム群で構成される光学素子で、屈折の原理で方向を制御された光を重ね合わせてピクトグラムを投影できる。微細構造を有するマイクロプリズムアレイは、射出成形のような従来の成形方法では成形が困難であると考えられる。そこで本研究では、スマートフォン用のマクロレンズアレイの成形等で実績のある、熱ナノインプリントプロセスを成形方法として採用した。また、本研究は、オープンイノベーションにより、有用な技術を効果的に組み合わせることで、短期間にMPAの成形技術確立することも目的とした。したがって、本研究で利用した

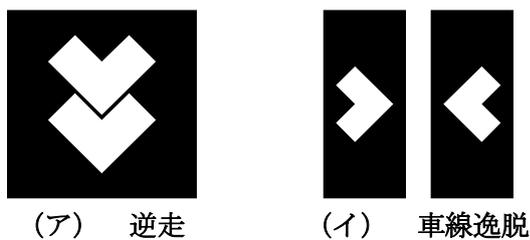


図1 コミュニケーションライティングで採用予定のピクトグラムの一例

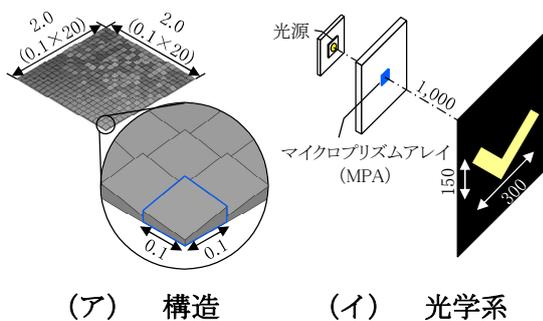


図2 マイクロプリズムアレイの概要
図中の単位はmm。マイクロプリズムの傾斜角は、投影したいピクトグラムに合わせて最適化されている。

個々の技術には、関係機関の保有技術やノウハウが含まれるため、成形条件に関わる具体的な数値や手続きには言及しない。

2 方法

2.1 成形方法の概要

本研究では、熱ナノインプリントプロセスによりMPAを成形した。熱ナノインプリントプロセスは軟化させた樹脂にスタンパーの形状を転写して成形品（レプリカ）を得る方法である。スタンパーは、実際に成形したい形状が反転したもので、精密電気鋳造により成形した。さらに、スタンパーの成形に必要な原盤は光造形により作製した。なお、スタンパー成形結果については発表済み^{1) 2)}であるが、全体を俯瞰するために、全ての手順を時系列に沿って述べる。

2.2 成形対象のMPAモデル

図2に示す通り、一辺が0.1 mmのマイクロプリズムを20個×20個配列したMPAを用いて、MPAから1,000 mm先の幅300 mm、高さ150 mmの範囲にVマークを投影するMPAモデルを成形の対象とした。当該モデルは、マイクロプリズムアレイ設計ソフトウェア VirtualLab Fusion（LightTrans International GmbH製）を用いて、各々のマイクロプリズムの傾斜角と傾斜の方位を最適化することで設計した。マイクロプリズムの最大傾斜角は15°で、プリズムの高さは約0.04 mmに相当する傾斜であった。設計されたMPAモデルでは、図3に示すような投影像が得られると予測される。設計方法や想定される投影品質に関する詳細は別稿^{3) 4)}を参照されたい。



図3 照明シミュレーションにより予測された投影像

2.3 原盤の造形方法及び評価方法

(1) 造形方法

原盤は実際に成形したい形状に相当し、フェムト秒パルスレーザーを用いる二光子重合法^{5) 6)}による光造形装置 LithoProf3D-GSII (Heidelberg Instruments Mikrotechnik GmbH 製) を用いて造形した。造形装置の仕様を表1に示す。原盤の材質には、光学特性に優れ、微細形状の造形に適しているフォトリソマール OrmoComp (Microresist Technology GmbH 製) を選択した。フォトリソマールの仕様を表2に示す。当該装置は、独立した直交3軸の走査機構を備えている。X軸(横方向)とZ軸(高さ方向)による走査とY軸(奥行き方向)とZ軸(高さ方向)による走査を交互に繰り返す井桁構造により、25 mm 四方、厚さ4 mmの光学ガラス基板の中央にMPAを積層造形した。なお、ガラス基板とMPAの密着性を向上させるため、ガラス基板にはあらかじめプラズマ処理を施した。MPAの造形に最適な造形パラメーターは、事前の予備試験により決定(表3)し、MPAを構成するマイクロプリズムを1つずつ、計400個(20個×20個)造形した。造形は、当該技術を確立した、ドイツ・Fraunhofer Institute for Silicate Research ISCの研究者が担当した。

表1 光造形装置の仕様

ハッチ方向とは造形(走査)方向を指す。

最少造形サイズ	100 nm (ハッチ方向)
	270 nm (積層方向)
解像度	250 nm 以下
最大造形体積	W100 mm×D100 mm×H50 mm
造形速度	200 mm/s
パルス間隔	250 fs 以下
波長	522±3 nm

表2 フォトリソマールの仕様

光重合波長	300 ~ 410 nm
体積収縮率	5 ~ 7 %
屈折率(重合後)	1.520 @ 589 nm
アッベ数	47
解像度	100 nm

表3 原盤の成形パラメーター

ハッチ距離とは、成形ピッチを指す。

ハッチ距離	約 500 nm
積層厚	約 200 nm
造形速度	約 100 mm/sec

(2) 評価方法

ハイブリッドレーザー顕微鏡 OPTELICS HYBRID L7 (レーザーテック(株)製) を用いて、原盤のマイクロプリズムの傾斜面を点群データとして測定し、その点群データから回帰して求めた傾斜角と傾斜角の設計値を照合した。

また、あらかじめ作製した投影装置(写真1)を用いて、スクリーンに投影したピクトグラムの輝度分布を二次元色彩輝度計 CA-2000A (コニカミノルタ(株)製) を用いて測定した。

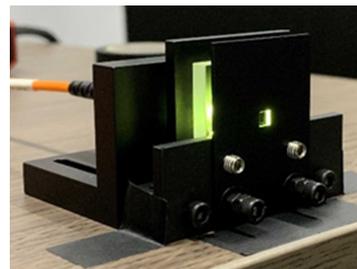


写真1 ピクトグラム投影装置

発光面が直径0.4 mmのLEDファイバー光源の光をMPAの背面から入光させ、約0.2 mm四方の矩形開口を通してピクトグラムを投影する。

2.4 スタンパーの成形方法及び評価方法

(1) 成形方法

精密電気鋳造(図4)によりニッケル製のスタンパーを成形した。精密電気鋳造では、ニッケル板を陽極に、導電膜処理された原盤を陰極に接続し、それらをニッケルめっきに浸漬し、電流を印加することでNiめっき液中のNiイオンを介して電流が流れ、陰極(原盤)の表面にNi層が形成される。十分な厚さのNi層が形成されたら、原盤からNi層を剥離することでスタンパーが完成する。成形は精密電気鋳造技術を開発したTOWA(株)(京都府)の技術者が担当した。

(2) 評価方法

原盤と同じ方法で、マイクロプリズムアレイの傾斜面に対応するスタンパー表面の形状から回帰し

て求めた傾斜角と、同様の方法で求めた原盤のそれを照合した。

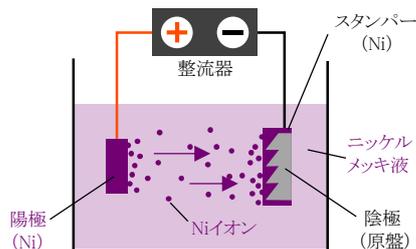


図4 精密電気鋳造の基本原理

電気めっきの原理により原盤上にニッケル層が形成され、原盤とは反転した形状を成形できる。

2.5 レプリカの成形方法及び評価方法

(1) 成形方法

熱ナノインプリントプロセス（図5）によりアクリル製のMPAを成形した。熱ナノインプリントプロセスは、加熱して柔らかくした樹脂とスタンパーをプレスすることでスタンパー上の形状が転写され、レプリカと呼ばれる成形品が得られる。成形条件の導出とスタンパーの洗浄を兼ねたテスト成形を数回繰り返した後、レプリカを成形した。成形は当該プロセスに熟練したTOWA(株)（京都府）の技術者が担当した。

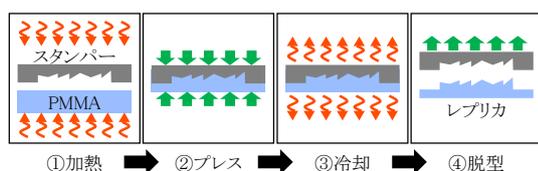


図5 熱ナノインプリントプロセスの原理

熱で軟化させた樹脂にスタンパーの形状を転写する。加熱温度などの成形条件が形状の転写精度に影響する。

(2) 評価方法

原盤及びスタンパーと同様の方法で、レプリカのマイクロプリズムの傾斜面の表面形状から回帰して求めた傾斜角とそれらの設計値を照合した。

また、ピクトグラムの輝度分布は、原盤の評価と同じ方法で測定した。

3 結果と考察

3.1 原盤の造形結果

造形に要した時間的コスト等を表4に示す。総体積は 0.11 mm^3 と非常に小さな形状であるが、総ハッチ距離は $1.4 \times 10^6 \text{ mm}$ 以上に達し、成形には16時間以上の時間を要した。写真2に、造形された原盤の外観及びその一部を拡大した顕微鏡写真を示す。0.1 mm四方のマイクロプリズムが規則的に配列されたMPAが成形されていることが確認できた。また、積層造形に由来する積層段差は視認できなかった。

図6に、傾斜角の設計値と造形した原盤の傾斜角の照合結果を示す。造形誤差は平均 0.34° 、標準偏差 0.4° と良好な結果を得た。

また、図7に示す通り、原盤を投影装置（写真1）に取付けてピクトグラムを投影した結果、予測（図3）と同様の投影像が得られることが分かった。

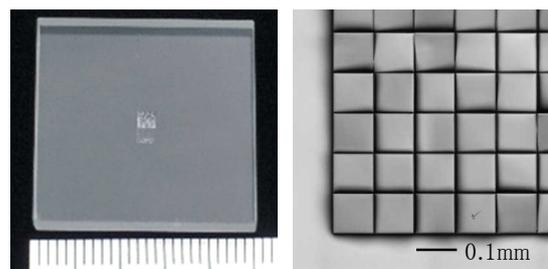
上記の結果から、原盤は所望のピクトグラムを投影するために必要十分な精度で造形されていることが分かった。なお、原盤の造形精度に関する評価の詳細は別稿を参照されたい⁷⁾。

一方、積層造形は造形方法に由来する微視的な段差が生じている可能性が高い。平滑面を必要とするマイクロプリズム面には好ましくない表面粗さやうねりがマイクロプリズム面に生じている可能性がある。原盤の表面性状を詳細に評価した結果は別稿⁸⁾にて報告している。

表4 原盤の造形コスト

400個のマイクロプリズムを1つずつ造形するのに要した総コスト。

体積	約 0.11 mm^3
造形時間	約16.5 h
総ハッチ距離	約 $1.4 \times 10^6 \text{ mm}$



(ア) 外観 (イ) 顕微鏡写

写真2 造形された原盤

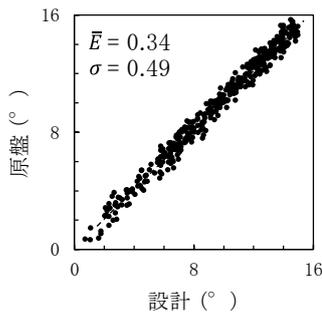


図6 原盤の傾斜角分布

傾斜角の設計値と、原盤の形状測定データ（点群データ）から回帰した傾斜角の比較。



図7 原盤による投影像

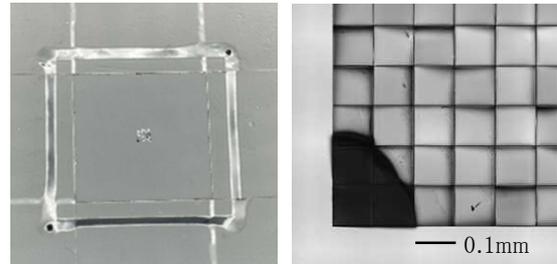
3.2 スタンパーの成形結果

スタンパーの成形には、原盤への導電膜形成などの前処理に約8時間、精密電気鋳造によるNi層形成に約14時間を要した。写真3に、成形されたスタンパーの外観及びその一部を拡大した顕微鏡写真を示す。凸形状である原盤から反転した形状が成形されたので、スタンパーは凹形状を呈している。規則的に配列された、MPAの構造が成形されていることが確認できたが、その一方で、顕微鏡写真の左下には黒い影が観察された。これは原盤がスタンパー状に残渣として付着した様子を捉えたものである。

図8に、原盤の傾斜角に対するスタンパーの傾斜角の照合結果を示す。成形誤差は平均 0.19° 、標準偏差 1.51° であった。精密電気鋳造の成形誤差は原盤の造形誤差より十分小さく、測定時のヒューマンエラーと同程度であると考えられる。このことから、レプリカの成形精度よりも原盤の造形精度がレプリカの形状精度に強く影響を与えることが推察される。一方で、スタンパーの成形誤差の標準偏差は、原盤の造形精度のその約4倍程度大きくなった。これは、スタンパー表面に付着した原盤由来の残渣による影響が考えられる。水酸化ナトリウムや水酸化カリウムなどの水酸化物による溶解や、

熱ナノインプリントの予備成形で残渣は除去することができる。

上記の結果から、精密電気鋳造により原盤の反転形状をスタンパーに成形できることが分かった。なお、スタンパーの成形精度に関する評価の詳細は別稿⁷⁾を参照されたい。



(ア) 外観 (イ) 顕微鏡写

写真3 成形されたスタンパー

原盤が反転した凹形状を呈している。顕微鏡写真の左下の黒い部分は、原盤が残存している箇所。

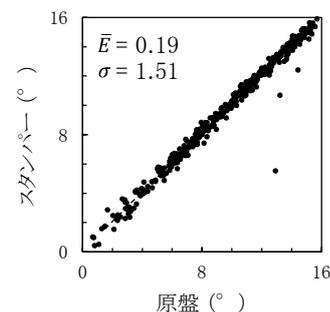


図8 スタンパーの傾斜角分布

原盤の形状測定データ（点群データ）から回帰した傾斜角と、スタンパーの形状測定データ（点群データ）から回帰した傾斜角の比較。

3.3 レプリカの成形結果

写真4に、成形されたレプリカの外観及びその一部を拡大した顕微鏡写真を示す。0.1mm四方のマイクロリズムが規則的に配列されたMPAが成形されていることが確認できた。

図9に、傾斜角の設計値と成形したレプリカの傾斜角の照合結果を示す。造形誤差は平均 0.27° 、標準偏差 0.62° と良好な結果を得た。この成形誤差は、原盤の造形誤差とほぼ同程度であり、精密電気鋳造はMPAの金型を成形する方法に適していることが分かった。

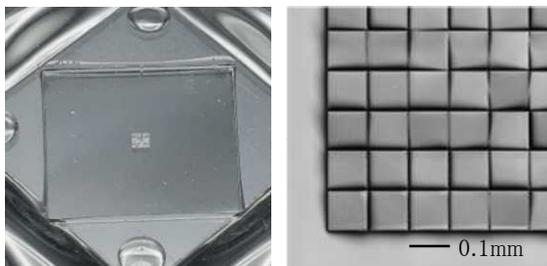
また、図10に示す通り、レプリカを投影装置（写

真1) に取付けてピクトグラムを投影した結果、予測(図3)と同様の投影像が得られることが分かった。

一方、投影したピクトグラムには矩形の枠が見られた。投影装置の前面に取付けられた開口は、MPAとの接触を防ぐために、MPAの外形(2 mm 四方)よりも若干大きく作った。その隙間から漏れた、光源からの直接光が原因である。さらに、熱ナノインプリントプロセスの都合上、レプリカを薄片化したことにより、レプリカと開口の相対的な位置関係が原盤のそれとは異なることや、成形時の熱収縮によりレプリカが原盤よりも小さくなっていることも要因と考えられる。

上記の結果から、熱ナノインプリントプロセスは、MPAを成形する有用な成形方法の1つであることが明らかとなった。なお、レプリカの成形精度に関する評価の詳細は別稿⁷⁾を参照されたい。

なお、成形を繰り返すたびにスタンパーの離型性が悪化することもわかった。成形条件を事前に導出し、水酸化溶液でスタンパーを事前に洗浄しておけば、6枚程度のレプリカは成形可能であると推察される。



(ア) 外観 (イ) 顕微鏡写

写真4 成形されたレプリカ
原盤と同等の凸形状を呈している。

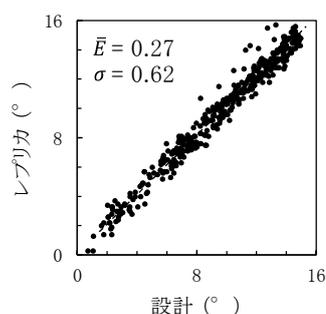


図9 レプリカの傾斜角分布

傾斜角の設計値と、レプリカの形状測定データ(点群データ)から回帰した傾斜角の比較。

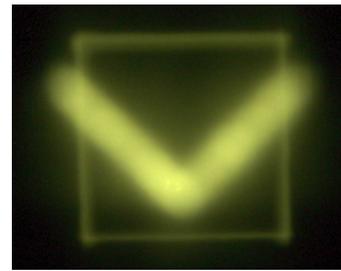


図10 レプリカによる投影像

矩形の枠状の像は開口とMPAの隙間からの漏れ光によって形成されたもの。

4 まとめ

本研究では、熱ナノインプリントプロセスが、ピクトグラムを投影可能な微細光学素子であるマイクロプリズムアレイに適した成形方法の1つであることを実証した。併せて、本研究は、オープンイノベーションを前提とし、最新の加工技術を効果的に組み合わせることで微細光学部品を高精度に成形可能な技術を短期間に確立できることも示した。

現在は、複数のレプリカを一度に成形可能なスタンパーを1つの原盤から成形する実証に挑戦している。

また、投影されたピクトグラムの質の評価も進めており、結果がまとまり次第報告を予定している。

謝辞

原盤の造形にあたり、ドイツ・Fraunhofer Institute for Silicate Research ISC (FISC)には多大な協力をいただいた。併せて、FISCとの調整には、ハイデルベルグ・インストルメンツ株式会社齋藤氏の多大なご尽力を賜った。スタンパー及びレプリカの成形は、TOWA株式会社(京都府)に御協力いただいた。

参考文献

- 1) 豊田敏裕 他：ピクトグラムを投影可能なマイクロプリズムアレイの開発—投影能力と金型作製の実証—。静岡県工業技術研究所研究報告書, 16, 46-48 (2023)。
- 2) Toyota T. et al.: A Development of Micro-Prism Arrays achieving image projection by principle of lighting: Feasibility study of the implementation, Proceedings of the 30th Session of the CIE, 1, 1237-1243 (2023)。
- 3) Shichi W. et al.: A development of Micro-

- Prism Arrays achieving image projection by principle of lighting: optical design and numerical estimation of lighting performance. Proceedings of the 30th Session of the CIE, 1, 1219-1226 (2023).
- 4) 志智亘 他：マイクロプリズムアレイにより図形を投影する照明の設計－効率的な開発に向けた光学シミュレーションを用いた投影像の評価－. 静岡県工業技術研究所研究報告書, 17, (2024)
 - 5) Steenhusen S. et al.: Two-photon polymerization of hybrid polymers for applications in micro-optics, Proceeding of SPIE 9353, 93530K (2015).
 - 6) 丸尾昭二：3次元デジタルマイクロファブリケーション. 情報処理学会研究報告, 2013 (7), 1-4 (2013).
 - 7) 中野雅晴 他：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－. 静岡県工業技術研究所研究報告書, 17, (2024).
 - 8) 柳原亘 他：マイクロプリズムアレイの開発－表面性状測定による成形性の評価－. 静岡県工業技術研究所研究報告書, 17, (2024).