

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 -

光科 志智 亘 中野雅晴
工業技術研究所 照明音響科 豊田敏裕

Design of lighting system for pictogram projection using micro-prism array

- Evaluation of projected images using optical simulation techniques -

SHICHI Wataru, NAKANO Masaharu and TOYOTA Toshihiro

Micro-prism arrays (MPA) are optical elements consisting of a two-dimensional array of micro-prisms that can project a pictogram image simply by passing light through it. In this report for the efficient design of an MPA, the effects of design parameters such as the number of prisms, light source distance, light source size and prism tilt angle on the nonuniformity of brightness and blurred contours of the projection image were elucidated by using optical simulation techniques. As a result, the following three guidelines were obtained for designing an MPA that can project a good pictogram image. (1) Increase the number of prisms. (2) Increase the light source distance. (3) Reduce the tilt angle of the prisms to 30 degrees or less. By using these findings, it is possible to efficiently design an MPA that projects a good pictogram image.

Keywords: micro-prism arrays, pictogram projection, optical design, optical simulation, projection performance

マイクロプリズムアレイ (MPA) は微細なプリズム群を2次元アレイ状に配置した光学素子であり、光を通すだけで図形を投影できる。本報告では、設計の効率化を図るため、光学シミュレーション技術を用いてプリズム数、光源距離、光源の大きさ、プリズムの傾斜角といった設計パラメータが、投影像の明るさむらや輪郭のぼけに与える影響を明らかにした。その結果、良好な投影像を得るための以下の三つの設計指針①プリズム数を多くする、②光源距離を長くする、③プリズムの傾斜角を 30° 以下にする、が得られた。これらの知見を用いることで、良好な投影像が得られるMPAを効率的に設計することが可能になった。

キーワード: マイクロプリズムアレイ、図形投影照明、光学設計、光学シミュレーション、投影性能

1 はじめに

近年、自動車メーカーやヘッドランプメーカーでは、自動車の安全性の向上を目的として、路面へ絵文字や記号などの図形を投影し、自動車から歩行者に対して注意を喚起する路面投影の開発が進められている^{1,2)}。またセンサーや表示装置を取付けたスマート街路灯から、路面に情報を描画する実証実験もなされている*。これらの照明は取り付けるスペースに制約があるため、コンパクトな照明装置が望ましい。

マイクロプリズムアレイ (以下、MPA) は微細なプリズム群を2次元アレイ状に配置した光学素子であ

る。MPAは、プリズム群の傾斜面の傾きと向きを個別に設定することにより、光を通すだけでスクリーンや壁面といった投影面に図形を投影することができる (図1)。従って、MPAと光源だけの単純でコンパクトな構成で図形を投影する照明が実現でき、車載照明やスマート街路灯の候補として期待できる。

しかしながら、MPAは非常に微細な構造を精度良く作製する技術が必要なため、その製造方法はまだ確立されていない。また、MPAの形状を設計する手法はあるものの、良好な投影像を得るために必要な設計パラメータに関する知見はまだ十分に蓄積さ

* 裾野市: 4社と連携した道路照明灯の実証実験。

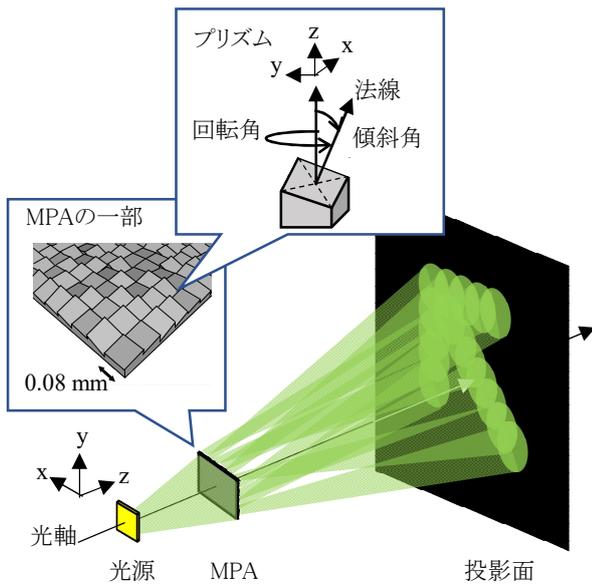


図1 図形を投影するMPAの光学系

れていない。我々はこれまでに、光学シミュレーション技術を用いて、設計パラメータを変えたMPAの投影像を予測し、投影像の明るさむらや輪郭のぼけを評価してきた^{3,4)}。

本報告ではこれまでの光学シミュレーション技術を用いたMPAの設計に関する評価の結果をまとめ、設計パラメータが投影像に与える影響を明らかにし、良好な投影像が得られるMPAを効率的に設計するための指針について述べる。

2 方法

2.1 MPAの設計と光学シミュレーションによる投影像の予測

はじめにMPAの設計手法について述べる。本研究では、MPAの設計に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) を用いた。本ソフトウェアは、投影したい図形の二値画像、プリズムのサイズ、プリズム数、光源とMPA間の距離(以下、光源距離)、MPAから投影面までの距離を設計パラメータとして入力することで、各プリズムのスポット光が図形を形成するように、それらの傾斜角と回転角を自動的に最適化する。ここで、傾斜角は各プリズムにおける傾斜面の法線とプリズム中心から光軸に平行な軸(z軸)の正方向とのなす角度、回転角は右手系でz軸回りの水平軸(x軸)正方向からの角度である(図1)。本研究では、設計したMPAの投影像を、

同ソフトウェアの光学シミュレーション機能を用いて予測し、その明るさむらと輪郭のぼけを評価した。評価に用いた光学系を図2に示す。投影する図形は、解析が容易な一辺が200 mmの正方形とした。そして、それをMPAから1,000 mm離れた壁面に投影する。MPAは、それを構成するプリズム数及び光源距離と光源の大きさを変化させて設計した(図2)。プリズムのサイズは0.08 mm角とした。MPAの屈折率は光造形で作製する^{5,6)}ことを念頭に、光造形材料(OrmoComp[®])の波長554 nmでの値1.518⁷⁾とした。

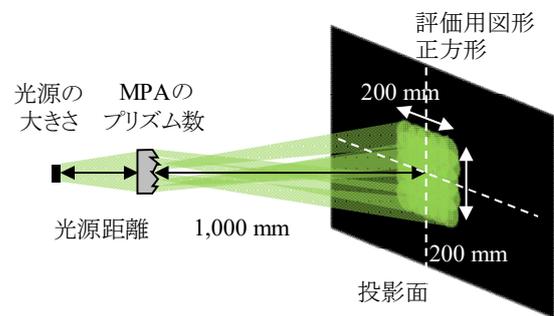


図2 光学シミュレーションに用いた光学系

2.2 投影像の輪郭のぼけと明るさむらの評価

今回実施した光学シミュレーションで得られた投影像の輪郭のぼけは、図3(ア)で示したように投影像の中心を通る水平方向断面における相対光強度の空間分布において、輪郭領域の最大値の10%になる位置と90%になる位置の幅で定義した(図3(イ))。従って、ぼけが目立つ投影像は輪郭のぼけ幅が大きく、輪郭が明瞭な投影像はぼけ幅が小さい。また、投影像の明るさむらは、輪郭部の明るさが単調に減少する領域を除いて面積が最大となる矩形領域(図4の赤線で囲った部分)の照度均斉度⁸⁾を求めた。照度均斉度は評価領域の照度の最小値を平均値で割った値である。従って明るさむらの少ない投影像は照度均斉度の値が大きくなり、明るさむらの目立つ投影像は値が小さくなる。

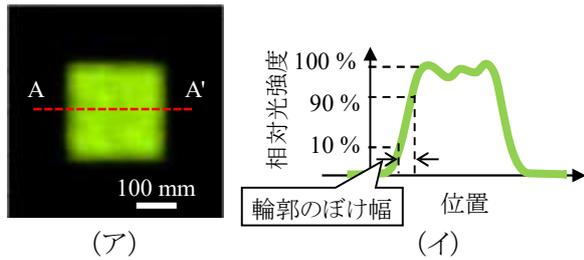


図3 輪郭のぼけ幅の解析の概略図

(ア)は光学シミュレーションで得られた投影像、
(イ)は(ア)で示したA-A'断面の概念図。

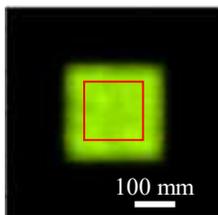


図4 明るさむらの解析領域

2.3 微細なプリズムが投影するスポット光における光強度の計算

MPAは、各プリズムが個別にスポット光を投影するため、各プリズムは微小な開口と見なせる。本研究で設計したMPAを構成するプリズムのサイズは0.08 mm角のため、微小開口による回折の影響を考慮する必要がある。しかし、傾斜面を持つプリズムの回折による影響は、今回実施した光学シミュレーションでは再現されない。そこで、傾斜面を持つプリズムが投影するスポット光における光強度の空間分布を、回折理論⁹⁾を用いた数値計算により求めた。

3 結果

3.1 光学シミュレーションによる投影像の予測結果

図5に今回実施した光学シミュレーションで得られた投影像のうち、輪郭のぼけが目立つものと、明るさのむらが目立つものを示す。図より設計パラメータが異なると投影像の質が大きく異なることがわかる。

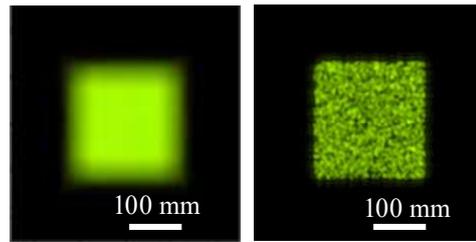


図5 設計パラメータが異なるMPAの投影像

(ア)はプリズム数：150個×150個、投影距離：5 mm、光源の大きさ：0.4 mm角の面光源。
(イ)はプリズム数：50個×50個、投影距離：20 mm、光源の大きさ：無限に小さい点光源。

3.2 投影像の輪郭のぼけと明るさむら

図6に、今回実施した光学シミュレーションで得られた投影像の輪郭のぼけ幅と光源距離の関係を示す。図より、光源の大きさが0.4 mm角の面光源(以下、面光源)の場合は、プリズム数の違いによらず、光源距離が長くなるほど輪郭のぼけ幅が狭くなり、光源距離が5 mmと20 mmでは、輪郭のぼけ幅が2倍程度異なることがわかる。一方、点光源の場合、光源距離及びプリズム数の違いによる輪郭のぼけ幅の違いは僅かであることがわかる。また、それらの輪郭のぼけ幅は約8 mmであった。

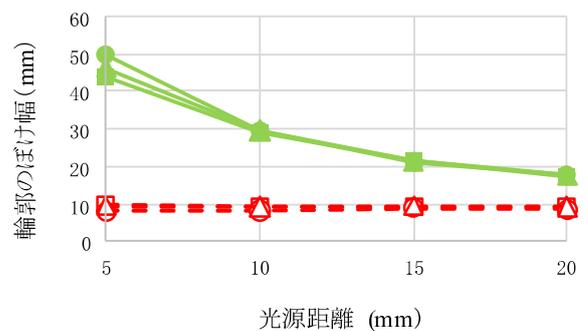


図6 輪郭のぼけ幅と光源距離の関係

●、▲及び■はそれぞれ、プリズム数が50個×50個、100個×100個及び150個×150個、光源の大きさはすべて0.4 mm角の面光源の結果。
○、△及び□はそれぞれ、プリズム数が50個×50個、100個×100個及び150個×150個、光源の大きさがすべて無限に小さい点光源の結果。

図7に、今回実施した光学シミュレーションで得られた投影像の照度均斉度と光源距離の関係を示す。図より、光源距離の変化に対して、点光源と面光源のどちらも照度均斉度の変化は僅かである。一方、点光源は面光源に比べ、プリズム数が少なくなると値が大幅に減少していることがわかる。これは、点光源が面光源より個々のプリズムが投影するスポット光のサイズが小さいため、図5（イ）で示したように投影する正方形の大きさに対してスポット光の数が不足しているためと考えられる。

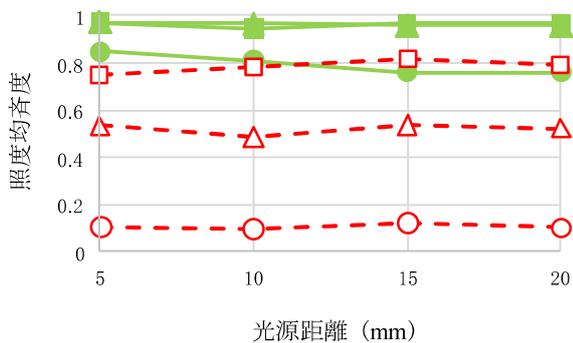


図7 照度均斉度と光源距離の関係

●、▲及び■はそれぞれ、プリズム数が50個×50個、100個×100個及び150個×150個、光源の大きさはすべて0.4mm角の面光源の結果。
○、△及び□はそれぞれ、プリズム数が50個×50個、100個×100個及び150個×150個、光源の大きさがすべて無限に小さい点光源の結果。

3.3 傾斜面を持つ微細なプリズムの投影像

図8に、2.3の数値計算で得られた異なる傾斜角と回転角を持つプリズムが投影するスポット光の、相対光強度の空間分布を示す。図よりスポット光の大きさは傾斜角 0° 、回転角 0° が最小であり、傾斜角が 30° を超えるとプリズムの回転角と同じ方向に長く引き延ばされた形状になることがわかる。最小のスポット光の縦方向と横方向の半値幅は約8mmであった。この値はMPAで投影できる最小形状の幅の目安となる。また、相対光強度の空間分布は、中心が最大で、中心から裾を引く分布になっている。この特徴は、MPAの投影像に明るさむらを生じさせ、輪郭をぼけさせる要因となる。このようなことから、傾斜角は 30° 以下に抑えることが望ましい。

4 考察

図9に、検討した設計パラメータの変化に対する輪郭のぼけと明るさむらの傾向をまとめた。図の横軸は輪郭のぼけ具合、縦軸は明るさむらの程度である。この図において、輪郭のぼけが小さく明るさむらが目立たない領域が良好な投影像の条件といえる。従って、良好な投影像を得るには、プリズム数を多くし、光源距離を長くするなどの設定が有効である。一方、光源の大きさについては、大きくすると明るさむらは目立ちにくくなるが輪郭のぼけが大きくなり、小さくすると輪郭のぼけは小さくなる

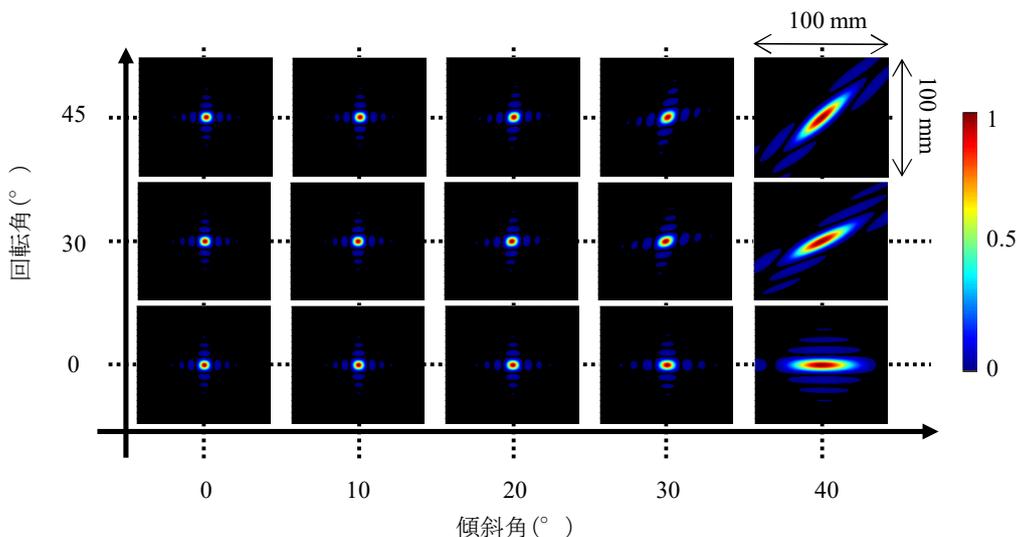


図8 異なる傾斜角と回転角を持つプリズムが投影するスポット光の相対光強度空間分布

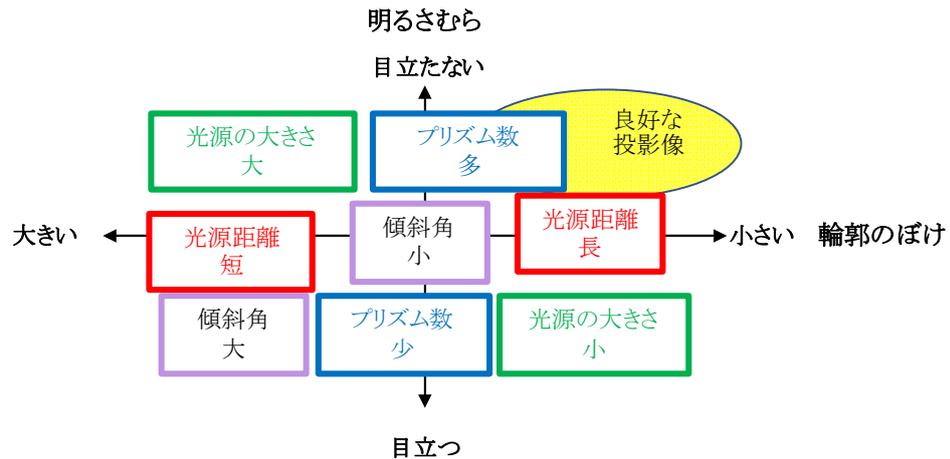


図9 設計パラメータと投影像質の関係

が明るさむらが目立ちやすくなるという二律背反の関係になっている。プリズムの傾斜角は、小さくすることで輪郭のぼけが小さく、明るさのむらが目立たない投影像を得られる。ただし、輪郭のぼけは傾斜角 0° のプリズムが投影するスポット光のそれより小さくすることはできない。また、傾斜角が 30° 以上のプリズムで構成されるMPAは、輪郭のぼけが大きくなる。

これらの結果から、例えばLEDのような発光面が大きい光源を使用する場合、良好な投影像を得るためには、光源距離を長くし、プリズムの傾斜角を 30° 以下に抑えるといった設計指針が得られた。

5 まとめ

MPAを用いた図形を投影する照明の設計において、設計パラメータが投影像の輪郭のぼけと明るさむらに与える影響を明らかにするため、設計パラメータを変えたMPAの投影像を光学シミュレーションで評価した。さらに、傾斜面を持つ微細なプリズムが投影するスポット光における光強度の空間分布を、回折理論を用いた数値計算により求めた。これらの結果から、明瞭な輪郭と明るさの均一性が良好な投影像を得るための以下の設計指針を得た。

- ①プリズム数を多くする。
- ②光源距離を長くする。
- ③プリズムの傾斜角を 30° 以下にする。

ただし、光源の大きさについては、このパラメータ単独で輪郭のぼけと明るさむらを、同時に良好にすることができない。従って、それらの向上を図るた

めには、その他の設計パラメータを目的の仕様に応じて調整する必要がある。

これらの知見を踏まえて、「V」字を投影するMPAを設計し、光造形、精密電気鋳造及び熱ナノインプリントを用いたMPAの成形技術を実証した。光造形で作製したMPAおよび熱ナノインプリントで成形したMPAの投影像は、光学シミュレーションで得られたものと同様であった。詳細は別稿¹⁰⁻¹²⁾を参照されたい。これらの結果は、MPAの成形技術として上記手法が有効であることを示している。

今後はMPAの社会実装に向けて、傾斜した面へ図形を投影するなど、現実の状況を踏まえたMPAの設計を検討する。

参考文献

- 1) 加藤洋子 他：ターンシグナル路面描画の注意喚起効果に関する研究. 照明学会誌, 107, 13-14 (2023).
- 2) 柴田 裕一 他：ターンシグナル路面描画の注意喚起効果に関する研究, 自動車技術会論文集, 52 (4), 775-781 (2021).
- 3) 志智亘：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, 15, 128-129 (2022).
- 4) 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,

- 1219-1226 (2023).
- 5) 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, 16, 46-48 (2023).
 - 6) Toyota, T. et al.: A development of micro-prism arrays for image projection using principle of lighting optics: feasibility study of the implementation. Proceedings of the 30th Session of the CIE, 1237-1243 (2023).
 - 7) GISSIBL, T. et al.: Measurements of Photoresist for Three-Dimensional Direct Laser Writing. Opt. Mater. Express, 7, 2293-2298 (2017).
 - 8) CIE S 017:2020 International Lighting Vocabulary 2nd Edition : Illuminance uniformity.
 - 9) HECHT, E.: Fraunhofer Diffraction, In "Optics", 2nd ed. 401-434 (1987).
 - 10) 豊田敏裕 他：熱ナノインプリントプロセス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書, 17 (2024) .
 - 11) 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) .
 - 12) 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) .