

# UV プリントを用いたレンズ造形手法の提案

杉山 圭<sup>1,a)</sup> 塚田 浩二<sup>1</sup>

**概要：**レンズは、身近なものから精密機器まで幅広く利用されている。近年、デジタル工作機械の普及により、個人レベルでのものづくりの幅が広がっているが、レンズを作ることは一般に困難である。本研究では、FabLab などを中心に普及しつつある UV プリントに着目し、多様なレンズ造形手法を提案する。具体的には、UV プリントを用いて透明インクを積層して形状を作り、その上に光沢の印刷を施すことで積層跡を埋め、なめらかな表面のレンズを造形する。本論文では、レンズ造形手法の提案、印刷データ制作ツールの実装、及び造形したレンズの一例について述べる。

## 1. はじめに

レンズは、眼鏡やカメラ、照明器具などの身近なものから、レンズアレイとして精密機器にまで、光学素子として幅広く利用されている。近年、3D プリントなどのデジタル工作機械の普及によって個人レベルで可能なものづくりの幅が広がっているが、デジタル工作機械を用いても個人レベルでレンズを作ることは困難である。例えば、3D プリントを用いてカメラを制作した例はいくつかあるが、それらに用いられるレンズは、3D プリントで出力した後に専用の器具を使って研磨する必要があったり [1]、既存のカメラ用レンズを用いている [2]。

そこで、個人レベルで実現可能なレンズ造形手法として、UV プリントと呼ばれるデジタル工作機械に着目した。UV プリントは、Fablab などの施設を中心に普及しつつある、紫外線硬化インクを用いたインクジェットプリンタある。多様な素材表面に印刷可能なことから、ノベルティグッズの作成等に広く利用されている。一方、透明インクを印刷することも可能であり、インクを重ねて質感表現を行うこともできる。

本研究では、これらの UV プリントの特徴に着目し、透明インクを重ねて印刷することで多様なレンズを造形する手法を提案する。

### 1.1 UV プリントの特徴

本研究では、Roland DG 社の UV プリント VersaUV LEF-12i[3] を用いた。VersaUV LEF-12i には、以下のような特徴がある。

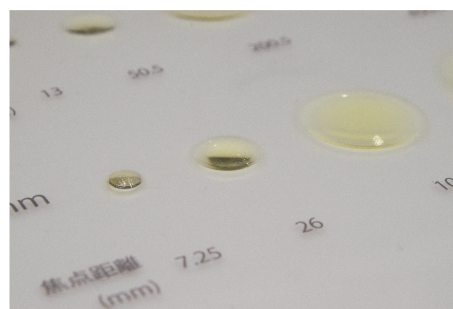


図 1 提案手法で造形したレンズの一例

- アクリルや金属、布など多様な素材に印刷できる。
- CMYK インクに加えて、白と無色透明のインクが使える。
- 無色透明のインクでは、マット仕上げと光沢仕上げの2種類の質感で印刷できる。
- 重ねて印刷することでインクを盛り上げる厚盛印刷ができる。
- 2mm 以内の凹凸や高低差のある面に印刷できる。

こうした特徴から、透明インクを積層してレンズの形状を作り、その上に光沢仕上げで印刷し積層跡を埋めることでなめらかな面のレンズが造形できると考えた。

## 2. 関連研究

本章では、本研究の関連研究について、「UV 硬化樹脂を用いたレンズ造形」「デジタル工作機械を用いたレンズ造形」「UV プリントを用いた質感表現」の3つの領域から紹介する。

### 2.1 UV 硬化樹脂を用いたレンズ造形

UV 硬化樹脂を用いてマイクロレンズアレイを造形する

<sup>1</sup> 公立はこだて未来大学

<sup>a)</sup> g2118018@fun.ac.jp

手法が提案されている。Chung ら [4] は、マイクロレンズアレイを作るインクジェット印刷方法を実証した。UV 硬化樹脂の液滴によってレンズを造形し、液滴の量などからレンズの曲率を制御した。秋山ら [5] は、超精密切削加工で制作した金型に UV 硬化樹脂を注入し、マイクロレンズアレイを制作した。また、樹脂の硬化時に加圧することで形状や表面粗さの精度が高まることを確認した。

## 2.2 デジタル工作機械を用いたレンズ造形

森田ら [6] は、レーザー熱処理に用いる集光レンズを簡易的に制作するための手法として、CNC フライスでアクリル板を切削しシリコンオイルの塗布によって表面の粗さを低減することでレンズを制作した。そして、シリコンオイルを塗布していないものと比べて透過率が高まったことを確認した。3D プリントメーカーの Formlabs[7] は、光造形 3D プリントで出力したレンズを研磨することで表面をなめらかにし、透明度を高める手法を提案している。

## 2.3 UV プリントを用いた質感表現

原ら [8] は、樹脂製品の表面に見られる「しぼ」と呼ばれる凹凸テクスチャを、UV プリントを用いてインクを積層することで再現した。杉山ら [9] は、UV プリントを用いて制作した透明な凹凸テクスチャを照らし、その質感を任意の紙媒体に透過させることで紙媒体の質感拡張を目指した。

## 2.4 本研究の特徴

本研究では、形状や大きさを手軽に設計可能で、出力後の加工が不要な UV プリントによるレンズ造形手法を提案する。

## 3. 提案

本章では、本研究のレンズ造形のコンセプトとレンズ造形手法について述べる。

### 3.1 レンズ造形のコンセプト

本研究のコンセプトは以下の 3 点である。

- (1) 多様な形状／大きさのレンズの造形
- (2) 出力後の加工が不要な造形
- (3) 汎用的な設計ツールの提供

一点目については、レンズの直径／厚さ／焦点距離などを自由に設計可能とする。さらに、複数のレンズを並べる等、柔軟なレイアウトを許容する。

二点目については、UV プリントの光沢仕上げ印刷を用いることでレンズ表面をなめらかにし、出力後の研磨等の加工を不要とする。そのため、レンズを同一面上に複数並べたような、複雑で研磨が困難な形状のレンズも造形可能

である。また、レンズを UV プリントのみで造形可能なため、パーソナルファブ리케이션に応用しやすいといった特徴がある。

三点目については、前述したレンズのパラメータ設定やレイアウトが容易な、汎用的なデータ設計／出力ツールを実装する。

### 3.2 レンズ造形手法

ここでは、本研究でレンズを造形する手順について説明する。本稿では、汎用性とレンズ形状の導きやすさを考慮して、球面平凸レンズと球面平凹レンズを対象とする。また、一般的な UV プリントの利用方法に倣って、薄手のアクリル（例：1mm）の上にレンズを造形する。

まず、レンズの形状を定める。球面レンズの形状は、レンズの直径と曲率半径によって定まる（図 2）。曲率半径  $r$  は、片面が平面の球面レンズの焦点距離の近似式（式 (1)）を用いて、レンズの焦点距離  $f$  と、レンズ材質の屈折率  $n$  から求められる。

$$f = \frac{r}{n-1} \quad (1)$$

また、照明の拡散等、精密に焦点距離や屈折率を定める必要がない用途の場合、レンズの形状は直径／厚さによっても定めることができる（図 2）、よって、レンズの直径／焦点距離／材質の屈折率の 3 つ、もしくはレンズの直径／厚さの 2 つのパラメータによって、レンズ形状が定まる。

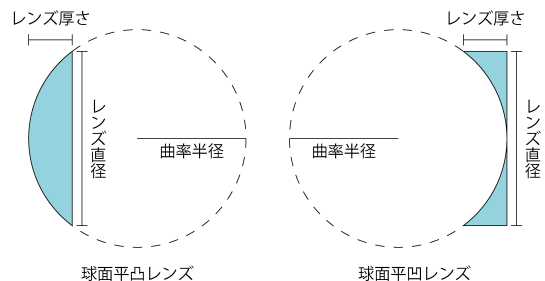


図 2 球面レンズの形状

次に、レンズの形状から積層する層の形状を求める。1 層の厚さを印刷 1 回でのインクの厚さとし、図 3 のように、レンズの断面の形状に沿って層に分割する。

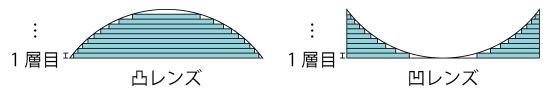


図 3 積層した断面の形状

次に、この層を下から透明インクで繰り返し印刷することで、レンズの形状を造形する。（図 4）。前述したように透明インクの印刷設定には光沢仕上げとマット仕上げがあるが、この過程では印刷の精度が高いマット仕上げを利用

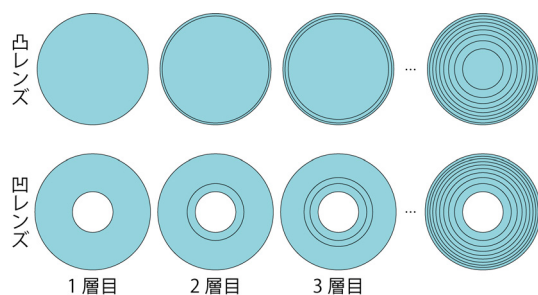


図 4 各層の印刷手順

する。

レンズ形状はここで完成するが、この時点では積層跡が目立つ問題がある（図 5）。そこで、最後にレンズ全体に透明インクを光沢仕上げで印刷し、積層跡を埋めることで表面をなめらかなレンズとする。その際、1 回では積層跡が十分に埋まらないため、2 回繰り返すこととした。

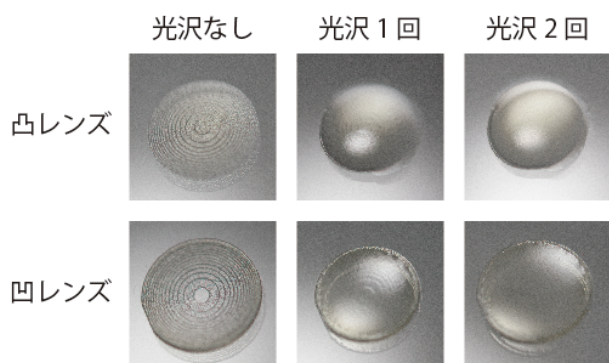


図 5 光沢仕上げ印刷の回数によるレンズ表面の変化

## 4. 実装

本章では、印刷データ制作ツールの実装と、提案手法を用いて制作したレンズの造形例を示す。

### 4.1 印刷データ制作ツール

ここでは、提案手法によるレンズ造形のための印刷データを制作するツールの実装について述べる。本研究で利用する UV プリンター（Roland VersaUV LEF-12i）の印刷データ制作には Adobe Illustrator が推奨されているため、Adobe Illustrator のスクリプトを用いて実装した。

まず、造形したいレンズのパラメータを入力する（図 6）。UI で入力できるパラメータは、大きく分けて設計したいレンズに関する「レンズの設定」と、プリンタやインクに関する「プリンタの設定」の 2 種類がある。「レンズの設定」では、(1) レンズの種類（凸／凹）、(2) レンズの直径、(3) レンズの焦点距離または厚さ が入力でき、「プリンタの設定」では、(4) 印刷 1 回でのインクの厚さ、(5) 印刷可能な厚さ、(6) インクの屈折率 が入力できる。なお、「プリンタの設定」のパラメータは変更することが少ない



図 6 スクリプトのパラメータ入力画面

ため、概ね規定値のままで利用できる。

これらのパラメータを入力すると、3.2 で述べた方法で各層の形状が求められ、層ごとに個別のレイヤーに描画される（図 7）。スクリプトの動作はこれで終了する。また、描画された形状を複製したり、再度スクリプトを実行して他のパラメータのレンズを描画することで、複数のレンズを並べて配置することも可能である（図 8）。なお、レンズの配置は現時点では手動で行っている。illustrator 自体が優れたレイアウト機能を持つため、配置は容易であるが、今後はレイアウト用のスクリプトの実装も検討している。

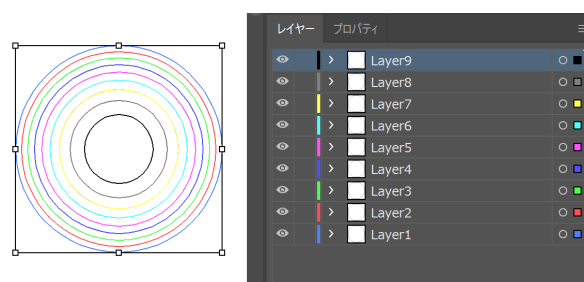


図 7 スクリプトで描画された形状とレイヤー。下部の層ほど下のレイヤーに描画される。

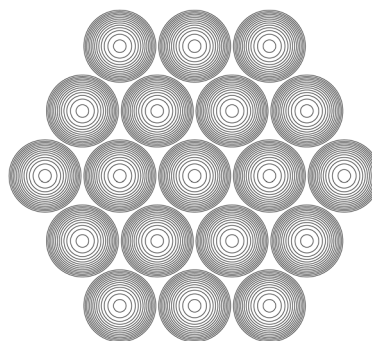


図 8 複数のレンズを並べた例

そして、各層の形状を透明インク印刷用の特色に指定し、レイヤーごとに個別の EPS 形式のファイルとして書き出すことで各層の印刷データが出来上がる。このデータ群を



UV プリンターの印刷ソフト Roland Versa Works Dual で下のレイヤーから順に印刷することでレンズを造形できる。

## 4.2 レンズ造形例

ここでは、提案手法を用いたレンズの造形例について説明する。なお、いずれもアクリル板の上に造形し、屈折率はアクリル板／インクともに 1.5 と仮定した。

### 4.2.1 球面平凸レンズ

球面平凸レンズを直径 5, 10, 20, 30, 40mm, 厚さ各 0.5, 1.0, 1.5, 2.0mm の計 20 種類制作した (図 9)。積層回数は厚さ 0.5mm から順に、14 回, 28 回, 42 回, 57 回であった。直径／厚さは設計通りの大きさに出力された。一部のレンズには印刷中のゴミの混入が見られ、特に直径 30mm 以上のレンズに多く見られた (図 11)。全体的に少し黄ばみが生じており、分厚くなるレンズ中央部に向けて黄ばみの度合いが強くなっていった。また、厚いレンズほど黄ばみの度合いが強かった。黄ばみについては、今回多数のレンズを一度に出力したことが一因であると考えられるため、議論の章で詳しく述べる。レンズに映る像の形状をわかりやすくするために、格子状の線をレンズを通して見た様子の一例を図 10 に示す。なお、格子の間隔は 3mm で、レンズとの距離は 20mm である。

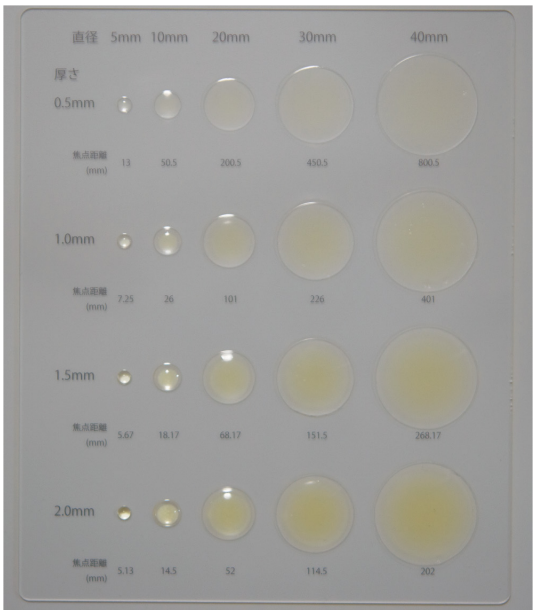


図 9 20 種類の球面平凸レンズ

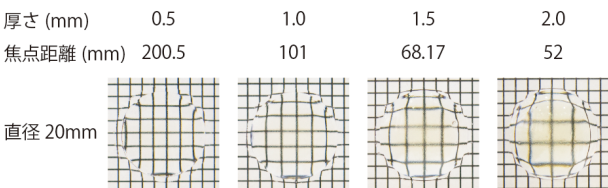


図 10 直径 20mm の凸レンズを通して見える像。一般的な凸レンズと同様に、焦点距離が短い程倍率が大きくなる。

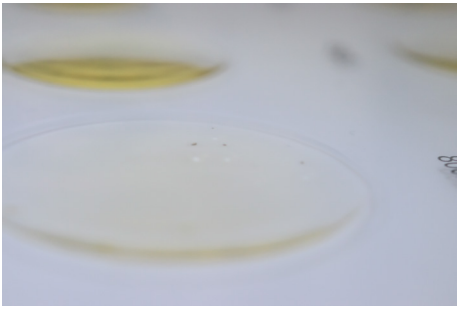


図 11 凸レンズへのゴミの混入事例

### 4.2.2 球面平凹レンズ

球面平凹レンズを、前述の球面平凸レンズと同様の直径／厚さで計 20 種類制作した (図 12)。積層回数は前述の球面平凸レンズと同じであった。直径／厚さは設計通りの大きさに出力された。前述の球面平凸レンズと同様に一部のレンズには印刷中のゴミの混入が見られた。また、直径 30mm 以上かつ厚さ 1.5mm 以上のレンズの一部の中央部にしわのようなものが見られ、正しく造形されなかった (図 14)。これは凹レンズが中央がくぼんだ形状であり、光沢仕上げ印刷の際に中央部にインクが流れて溜まってしまったことが原因と考えられる。また、全体的に少し黄ばみが生じており、分厚くなるレンズ外周部に向けて黄ばみの度合いが強くなっていった。また、厚いレンズほど黄ばみの度合いが強かった。黄ばみについては、今回多数のレンズを一度に出力したことが一因であると考えられるため、議論の章で詳しく述べる。前述の球面平凸レンズと同様の条件で格子状の線をレンズを通して見た様子の一例を図 13 に示す。

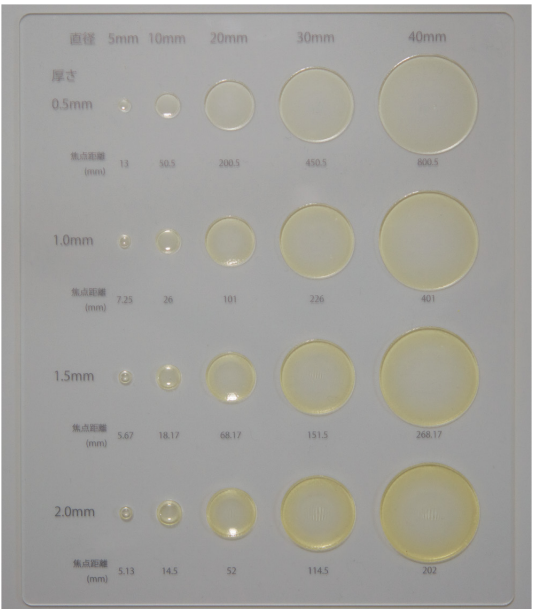


図 12 20 種類の球面平凹レンズ

### 4.2.3 複眼状の凸レンズ

直径 5mm, 高さ 0.5mm, 焦点距離 13mm の球面平凸レンズを複眼のように並べたレンズを制作した (図 15)。積

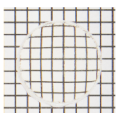
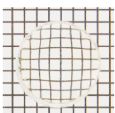
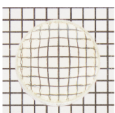
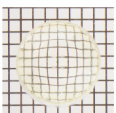
|           |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                   |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| 厚さ (mm)   | 0.5                                                                               | 1.0                                                                               | 1.5                                                                               | 2.0                                                                               |
| 焦点距離 (mm) | 200.5                                                                             | 101                                                                               | 68.17                                                                             | 52                                                                                |
| 直径 20mm   |  |  |  |  |

図 13 直径 20mm の凹レンズを通して見える像. 一般的な凹レンズと同様に, 焦点距離が短い程倍率が小さくなる.

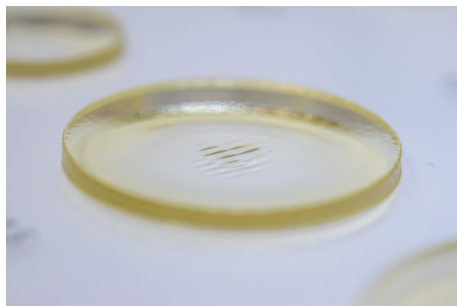


図 14 凹レンズ中央部にできたしわの事例

層回数は 14 回であった. このレンズを通して見える像を図 16 に示す.



図 15 複眼状の凸レンズ

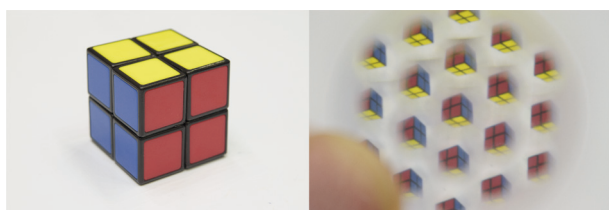


図 16 レンズを通さずに見た物体と  
その物体を複眼状の凸レンズを通して見た様子

## 5. 議論

本章では, 提案手法によって造形したレンズの精度と造形可能なレンズの制約, 応用例について述べる.

### 5.1 レンズの精度

レンズの精度の簡易的な調査として, 提案手法で造形した凸レンズの焦点距離を測定した. 疑似的な平行光源として約 20m 離れた天井の電球を光源とし, レンズを経由し

て机上のスクリーンに光を投影した. ここで, 各レンズを通した光が最も小さく収束した際のレンズ-スクリーン間の距離を計測した (図 17). レンズ形状から計算した焦点距離の理論値と, 実測値の誤差を表 1 に示す.



図 17 光が収束する様子

表 1 焦点距離の理論値と実測値の誤差  
直径(mm)

| 厚さ (mm) |          | 5       | 10      | 20     | 30     | 40     |
|---------|----------|---------|---------|--------|--------|--------|
| 0.5     | 理論値 (mm) | 13      | 50.5    | 200.5  | 450.5  | 800.5  |
|         | 実測値 (mm) | 13      | 52      | 206    | 460    | 765    |
|         | 誤差       | 0.00%   | 2.97%   | 2.74%  | 2.11%  | -4.43% |
| 1.0     | 理論値 (mm) | 7.25    | 26      | 101    | 226    | 401    |
|         | 実測値 (mm) | 6       | 25      | 98     | 242    | 458    |
|         | 誤差       | -17.24% | -3.85%  | -2.97% | 7.08%  | 14.21% |
| 1.5     | 理論値 (mm) | 5.67    | 18.17   | 68.17  | 151.5  | 268.17 |
|         | 実測値 (mm) | 5       | 16      | 70     | 151    | 262    |
|         | 誤差       | -11.82% | -11.94% | 2.68%  | -0.33% | -2.30% |
| 2.0     | 理論値 (mm) | 5.13    | 14.5    | 52     | 114.5  | 202    |
|         | 実測値 (mm) | 4       | 12      | 54     | 112    | 199    |
|         | 誤差       | -22.03% | -17.24% | 3.85%  | -2.18% | -1.49% |

厚さが 0.5mm のレンズでは, いずれの直径においても理論値と実測値の誤差は小さく, 5%未満であった. また, 直径 20mm 以上のレンズでも, 厚さ 1mm のものを除いて誤差は小さく, 5%未満であった. 一方, 厚さが大きく直径が小さいほど誤差が大きい傾向が見られた.

### 5.2 造形可能なレンズの制約

本研究で提案したレンズ造形手法の課題として, まず, レンズの厚さの制約がある. 本研究で利用する UV プリンター (VersaUV LEF-12i) で印刷可能な高低差は 2mm までであるため, レンズの厚さが 2mm を超える場合, 積層跡を埋めるための光沢仕上げ印刷ができない. また, 焦点距離を一定の値とした場合, 厚さが小さくなるほど直径も小さくなる. つまり, 厚さの制約によって, 直径が制限されてしまう. 厚さを 2mm 以下に抑える場合, 例えば焦点距離 10mm では直径は 8mm 以下, 焦点距離 50mm では直径は 19.6mm 以下, 焦点距離 100mm では 28mm 以下に制限される.

次に, 図 15 のように複数のレンズを並べる場合, レンズ同士の間隔を少しあける必要がある. レンズ同士の距離

が近すぎると、積層跡を埋める光沢仕上げ印刷をした際に、レンズ同士の境界も埋まってしまう。予備的な検証の結果、0.2mm 程度の間隔をあけることでこうした問題が発生しないことを確認した。

そして、レンズの黄ばみの問題がある。印刷の際の紫外線照射が多い、つまり積層の回数が多いほど、インクが黄ばむ傾向がある（図 18）。これは UV プリンタで扱うインクの性質によるものであり、完全な改善は難しいと考えるが、積層回数が少なければ問題は少ないため、今後詳細な調査と対策の検討を進める。なお、図 9 や図 12 では積層回数が少ないレンズにもやや黄ばみが生じているが、これは積層回数が多いレンズを一度に印刷したため、多くの紫外線を浴びたためだと考える。

|          |     |     |     |     |
|----------|-----|-----|-----|-----|
| 厚さ (mm)  | 0.5 | 1.0 | 1.5 | 2.0 |
| 積層回数 (回) | 14  | 28  | 42  | 57  |

凸レンズ  
直径 20mm

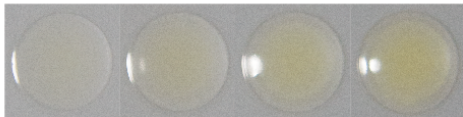


図 18 積層回数による黄ばみの変化

### 5.3 応用例

提案手法では、球面平凸レンズ及び球面平凹レンズを扱ったが、他の形状のレンズへの応用も考えられる。例えば、カマボコ状の細長い凸レンズが平面状に並んだレンチキュラーレンズへの応用が考えられる。試作したレンチキュラーレンズの外観と利用例を図 19 に示す。さらに、非球面レンズの造形も理論的には可能であるため、設計方法の検討を進めている。

また、提案手法で造形したレンズの用途として、照明器具の光を制御したり、トイカメラのような簡易的なカメラのレンズへの応用も考えられる。また、UV プリンタは CMYK インクも扱えるため、色がついたレンズも制作することができる（図 20）。これを応用することで、照明の色を変えたり、カラーフィルタをかけたような写真の撮影もできると考えられる。さらに、複数の凸レンズ／凹レンズを重ね合わせることで、簡易的な複合レンズを構築できる可能性があるため、レンズの重ね合わせを調整可能な機構も検討している。

## 6. まとめと今後の展望

本研究では、UV プリンタを用いて透明インクを積層することで球面レンズを造形する手法を提案し、印刷データ制作ツールを実装した。さらに、レンズの直径／厚さ／焦点距離等のパラメータを変更し、任意の形状の球面平凸レンズ／球面平凹レンズを試作した。

今後は、評価実験を通してレンズの精度や性能を調査し

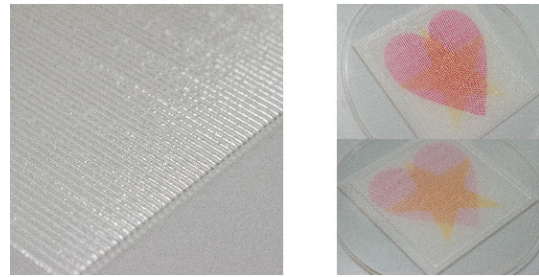


図 19 レンチキュラーレンズの外観と  
利用例（角度によって変化する絵柄）

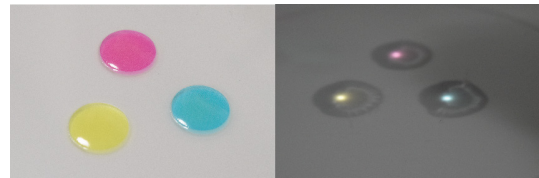


図 20 色がついたレンズと光を通した様子

たい。また、非球面レンズ、複数枚を重ね合わせたレンズ、色付きレンズ等の造形可能性を模索しつつ、多様な応用例を構築していきたい。

### 参考文献

- [1] Amos Dudley : SLO: 3D Printed Camera(online), 入手先 〈<https://amosdudley.com/weblog/SLO-Camera>〉(2018.12.15).
- [2] instructables : 3D Printed Camera : OpenReflex(online), 入手先 〈<https://www.instructables.com/id/3D-Printed-Camera-OpenReflex/>〉(2018.12.15).
- [3] Roland DG : VersaUV LEF-12i 概要 (online), 入手先 〈<https://www.rolanddg.co.jp/products/printers/versauv-lef-12i-flatbed-printer/>〉(2018.12.11).
- [4] Chung-Hao Tien, Chien-Hsiang Hung, and Tsung-Han Yu, Microlens Arrays by Direct-Writing Inkjet Print for LCD Backlighting Applications, Journal of display technology, Vol.5, No.5, pp.147-151, 2009.
- [5] 秋山 裕亮, 岡田 睦, 鈴木 浩文, 難波 義治, 三村 健, 古南 典正, UV 成形によるマイクロレンズアレイの精密成形, 2016 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.15-16, 2016.
- [6] 森田 翔, 渡辺 翔, 徳永 剛, 桑野 亮一, 切削と液体塗布によるレーザ熱加工用簡易アクリルレンズの作製と評価, 2015 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.711-712, 2015.
- [7] Formlabs : Printing Lenses on the Form 1+(online), 入手先 〈<https://formlabs.com/blog/lenses-3d-printed-formlabs/>〉(2018.12.15).
- [8] 原 精一郎, 王 宇晗, 笹島 和幸, UV 硬化型インクジェットプリンタによる表面テクスチャの作成に関する研究, 2013 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.201-202, 2013.
- [9] 杉山 圭, 沖 真帆, 塚田 浩二, 透紙: 紙媒体の質感を拡張する表現手法の提案と評価, エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2018 論文集, pp.255-259, 2018.