



サーモクロミック材料とレーザー熱投影を用いた 造形後に色と模様を制御可能な 3D プリント手法の基礎検討

梅津友翔¹⁾, 平木剛史²⁾

1) 筑波大学 情報学群 情報メディア創成学類 (〒 305-8550 茨城県つくば市春日 1-2, umetsu@pml.slis.tsukuba.ac.jp)

2) 筑波大学 図書館情報メディア系 (〒 305-8550 茨城県つくば市春日 1-2, hiraki@slis.tsukuba.ac.jp)

概要: 3D プリンタによる造形は、ほとんどの場合で非可逆であり、造形後に印刷物の構造や色を変更することはできない。そのため、色や造形などデザインの変更が必要になった際には再度造形し直す必要があり、材料と造形時間の点で不都合があった。本研究では、温度によって色が変化する双安定性サーモクロミックインクを用いた造形手法とレーザーによる選択的加熱により、造形後に色や模様を制御可能な造形手法を提案する。紫外線硬化樹脂にサーモクロミックインクを混合して造形し、レーザーを照射して選択的に加熱することで構造物の表面の模様を制御できることを確認した。

キーワード: デジタルファブリケーション, 3D プリンタ, サーモクロミックインク

1. はじめに

3D プリンタによる造形技術はデザインの試作や製品の製造などに利用されており、アイデアをすぐ形にすることができ制作時間の削減や必要分だけ生産することができる等のメリットがある。しかし、一度造形した構造物に対して色や構造の変更が必要になった場合は再度造形する他なく、材料と造形時間の点で非効率である。

そこで、この課題を解決するために造形後に構造物の色を制御可能な造形手法の研究が提案されている。ColorMod [1]、Photo-Chromeleon [2]、ChromoUpdate [3] は特定の波長の光で発色・消色するフォトクロミックインクを利用し、UV LED や UV プロジェクタを用いて意図した画素を消色させて模様を制御した。Shader Printer [4] は、温度により発色・消色するサーモクロミックインクを物体に塗布し、レーザーで選択的加熱を行い模様を制御する手法を提案した。堀ら [5] は、紫外線硬化樹脂にサーモクロミックインクを混合し、表面にボクセルを敷き詰めた構造で造形し、高温に加熱した 3D プリンタのノズルを近づけて任意のボクセルを加熱し消色させた。しかし、これらの手法では自然光での消色や構造の自由度の低さや解像度、制御にかかる時間などに課題があった。

そこで本研究では、紫外線硬化樹脂に双安定性サーモクロミックインクを混合したものを材料に 3D プリンタで造形し、造形物表面をレーザーで選択的に加熱することで造形物の表面の色と模様を制御する手法を提案する。紫外線硬化樹脂にインクを混合し、光造形で 3D プリントすることにより、色と模様を制御可能な構造物を作製できる。サーモクロミックインクはパイロット社の蛍光ペン「フリクションライト」に含まれるインク（以下、フリクションインクと呼称）を使用する。フリクションインクは発色温度が -10°C 前後、消色温度が 60°C 以上であり、かつこの温度領域

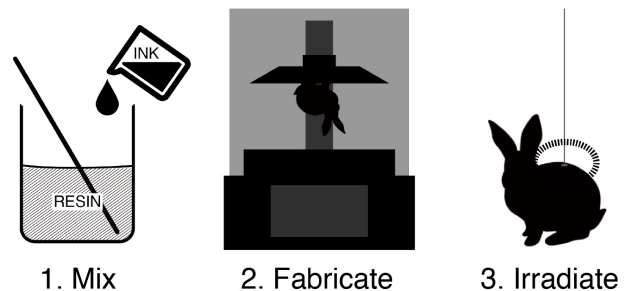


図 1: 本研究で提案する造形フロー

で双安定性を持つため、日常の環境下において意図しない要因により発色や消色を起こすことがない。また、造形物の表面をレーザーを用いて選択的に加熱することで、高い解像度での模様の制御を実現する。

本稿では、フリクションインクを混合した紫外線硬化樹脂を材料として造形する手法と、造形物にレーザーを照射して加熱しフリクションインクを消色させる条件を検討し、また消色と発色の可逆性を確認する。図 1 に本研究で提案する造形手法の流れを示す。具体的には、紫外線硬化樹脂にフリクションインクを混合して光造形式の 3D プリンタにより造形を行い、加熱することで色を制御できる構造物を作成する。そして、作成した構造物に対してレーザーにより選択的加熱を行い、表面の模様を制御する手法を検討する。

2. 提案手法

紫外線硬化樹脂にフリクションインクを混合し、光造形式の 3D プリンタにより造形物を作成する。その後、造形物の消色したい箇所に対してレーザーを照射し加熱することで、目的の模様を得る。

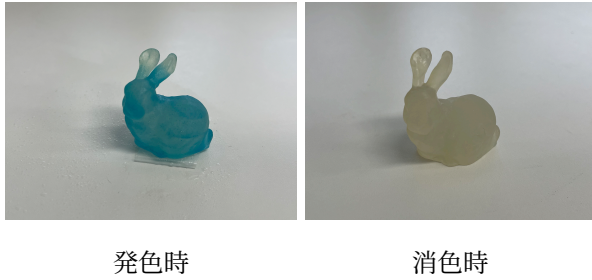


図 2: 消色時と発色時の様子

2.1 サーマクロミックインクを混合した紫外線硬化樹脂を用いた光造形

双安定性サーマクロミックインクの特徴を備えた立体構造物を 3D プリンタで造形する。まず、紫外線硬化樹脂 (Colored UV resin (clear), ANYCUBIC) (以下、本稿では「UV レジン」と称する) とフリクションインクを質量比 10:1 で混合した。これを材料として光造形式の 3D プリンタ (Photon mono, ANYCUBIC) で造形した。作製した構造物をイソプロピルアルコールで洗浄し、二次硬化装置 (Form Cure, formlabs) を用いて 70 °C で 15 分間紫外光を照射して二次硬化を行った。また、二次硬化に伴う加熱でフリクションインクが消色するため、二次硬化が完了した造形物を冷却スプレー (セーフティークールチェック, ホーザン) により冷却し、発色させる。図 2 に発色時と消色時の様子を示す。

2.2 レーザーを用いた選択的加熱による模様の制御

フリクションインクを混合して造形した板状の構造物を対象に、レーザーで選択的に加熱して消色させることで、意図した模様を再現する。意図した模様を描くようにレーザーを走査するために、画像編集ソフト (InkScape, The Inkscape Team) に模様の画像を取り込み、制御用のコードである G-Code を生成する。これをスマートフォンアプリ (LP2, LaserPecker) を用いて家庭用レーザー加工機 (LaserPecker Pro, LaserPecker) へ転送し、造形物にレーザーを照射し意図した箇所を加熱し消色させる。図 3 にレーザー照射の様



図 3: レーザーによる選択的加熱の実験環境

子を示す。

3. 評価

3.1 適切な加熱条件の検討

本稿ではレーザーを用いて造形物の加熱を行うが、レーザーによる加熱はエネルギーが大きく、条件次第では紫外線硬化樹脂そのものが変質してしまう懸念がある。そこで、レーザーによる適切な加熱条件を明らかにするため実験を行った。

本実験では、フリクションインクを混合していない状態の紫外線硬化樹脂を硬化させたものに対して家庭用レーザー加工機 (LaserPecker Pro, LaserPecker) を用いてレーザーを照射した。造形した 20 mm 四方、厚さ 5 mm の板を対象とし、レーザーは軌道が 10 mm 四方の正方形の辺を描くように照射した。また、分光放射計 (SR-3AR, Topcon) により、レーザー照射面上の中央と照射対象箇所上の 2 点の計 3 点について加熱前後の色度を計測した。また、LaserPecker Pro ではレーザーのエネルギーが調整できないためレーザーの速度により加熱を制御することとした。レーザーの移動速度をそれぞれ 6 mm/s, 9 mm/s, 12 mm/s, 15 mm/s に設定して照射した。

図 4 にレーザー照射前後の様子と図 5 に照射前後での色度の変化を示す。レーザーの移動速度が 6 mm/s の条件においてはレーザーの軌跡に沿った変色が起きていることが確認された。9 mm/s 以上の速度においては造形物の変色は確認されなかった。この実験から、レーザーを 9 mm/s 以上の速度で走査する場合において UV レジンを材料とする構造物が変色しないことを確認した。

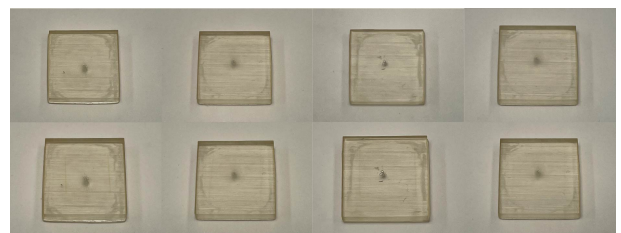


図 4: 上段はレーザー照射前、下段はレーザー照射後
左から移動速度 6 mm/s, 9 mm/s, 12 mm/s, 15 mm/s
で照射

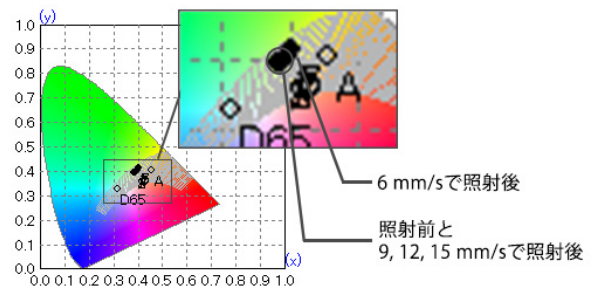


図 5: 照射前後での色度の変化

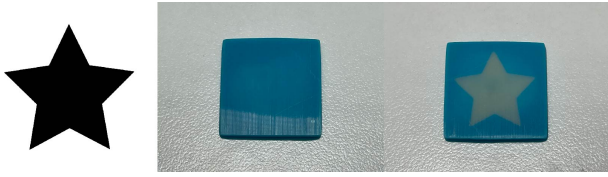


図 6: レーザーでの加熱による模様の変化

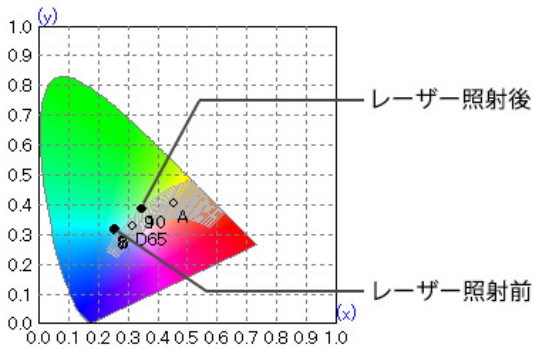


図 7: 模様の変化による色度の変化

3.2 発色・消色の評価

造形物の発色と消色を評価するために分光放射輝度計を用いて色度を計測する実験を行った。本実験では、造形した構造物を十分冷却した状態を基準とし、レーザーを照射した後とその色度を比較した。実験条件として、フリクションインク（ブルー）を混合した紫外線硬化樹脂で 20 mm 四方、厚さ 5 mm の板を造形し、軌道が 10 mm 四方の正方形の辺を描くように移動速度 12 mm/s でレーザーを照射した。板の表面のうち中心部とレーザーの軌跡上の二点の計 3 点をサンプル点とし、室内照明下で分光放射計（SR-3AR, Topcon）を用いて 256 階調の CIE RGB 表色系での計測値を記録した。

レーザーによる加熱での消色の様子を図 6 に示す。レーザーを照射し加熱した箇所が透明になり、意図した模様が表現されていることが確認できる。また、レーザー照射前後の色度を記録した色度図（図 7）より、レーザー照射前後で測定箇所の色度の変化が確認できる。これらより、レーザー照射による加熱で表面の発色と消色を制御可能なことが確認できた。

4. まとめ

本稿では、双安定性サーモクロミックインクを紫外線硬化樹脂に混合して構造物を造形し、レーザーにより選択的に加熱することで、造形後に色と模様を制御可能な 3D プ

リント手法を提案した。サーモクロミックインクを混ぜ込んだ紫外線硬化樹脂を材料として光造形により立体構造物を造形した。そして、レーザー照射による紫外線硬化樹脂への影響とフリクションインクの消色を評価し、レーザーの加熱条件を検討した。この手法で造形した構造物に対してレーザーの選択的な加熱により消色を制御することが可能であることを確認した。

今後は、レーザーの制御方式の改善することで、立体構造物に対してより高い精度での模様を制御を目指す。

謝辞 本研究は、JSPS 科研費 JP21H05798、JST ERATO 川原万有情報網プロジェクト (JPMJER1501)、中山隼雄科学技術文化財団の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Parinya Punpongsanon, Xin Wen, David Kim, and Stefanie Mueller. Colormod: Demonstration of recoloring 3d printed objects using photochromic inks. In *Extended Abstracts of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '18, p. 1–4, 2018.
- [2] Yuhua Jin, Isabel Qamar, Michael Wessely, Aradhana Adhikari, Katarina Bulovic, Parinya Punpongsanon, and Stefanie Mueller. Photo-chromeleon: Re-programmable multi-color textures using photochromic dyes. In *UIST '19: Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 2019.
- [3] Michael Wessely, Yuhua Jin, Cattalyya Nuenngsigkapiyan, Aleksei Kashapov, Isabel P. S. Qamar, Dzmityr Tsetserukou, and Stefanie Mueller. Chromoupdate: Fast design iteration of photochromic color textures using grayscale previews and local color updates. In *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–13, 2021.
- [4] Daniel Saakes, Masahiko Inami, Takeo Igarashi, Naoya Koizumi, and Ramesh Raskar. Shader printer. In *ACM SIGGRAPH 2012 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '12, p. 1, 2012.
- [5] 堀悠太郎, 平木剛史, プンポンサノンパリンヤ, 岩井大輔, 川原圭博, 佐藤宏介. 双安定性サーモクロミックインクの選択的加熱を用いた造形後に表面色・模様を制御可能な立体物造形手法. *インタラクション 2021 論文集*, *インタラクション 2021*, pp. 662–667, 2021.