

RayLeight: レイリー散乱を用いたマトリクスディスプレイの提案

袴田 結女^{1,a)} 沖 真帆¹ 塚田 浩二¹

概要: 近年、結露や泡などの自然現象を活用した情報提示手法の研究が盛んに行われている。自然現象を用いることで、我々の日常生活に溶け込んださりげない情報提示を可能にする。そこで、本研究では構造色に着目した情報提示手法を提案する。構造色とは、光の波長程度の微細構造による光の干渉、回折、散乱などにより生じる色のことである。構造色には、見る角度によって色が変化したり、鮮やかな発色をするという特徴がある。本研究では、青空や夕焼けを生むレイリー散乱という現象に着目する。アクリルエマルジョンが溶け込んだ溶液と、光源を組み合わせることで、レイリー散乱を応用したディスプレイを制作する。本システムにより、日常生活に馴染んだ、印象的な情報提示を目指す。本論文では、提案システムの概要、実装、及び基礎的な評価実験の結果と考察等を示す。

RayLeight: Proposal of matrix display using Rayleigh scattering

YUME HAKAMADA^{1,a)} MAHO OKI¹ TSUKADA KOJI¹

1. はじめに

近年、結露や泡などの自然現象を活用したディスプレイの研究が盛んに行われている。身近な自然現象を用いることで、我々の日常生活に溶け込んだ情報提示を行うことができる。このような自然現象を利用した情報提示手法として、本提案では構造色に着目した。

構造色とは、光の波長程度の微細構造による光の干渉、回折、散乱などにより生じる色のことである [6]。構造色は、我々にとって身近な自然現象である。薄膜干渉により生じるシャボン玉の虹色や、多層膜干渉により生じる魚類の光沢、微粒子による光の散乱で生じる空の色の变化など、我々の日常生活の多くに構造による発色が関わっている。また、構造色は、見る角度によって色が変わったり、極めて鮮やかな発色をするという特徴を持つ。

本研究では、構造色を、身近な素材とデジタル工作技術で手軽に再現する。また、「身近な自然現象を用いることで、日常生活に溶け込ませる」ことと、「構造色の特徴を活

かし、印象的な情報提示を可能にする」ことを両立させたディスプレイを提案する。

2. 関連研究

本章では、本研究に関連する研究事例として、「自然現象を活用したディスプレイ」、「構造色に関する研究」の2つの観点から説明する。

2.1 自然現象を活用したディスプレイの研究

自然現象を利用したディスプレイの研究は、多数行われている。

辻本ら [9] は、結露を利用したディスプレイとして、Ketsuro-Graffiti を提案している。ペルチェ素子を用いてディスプレイを冷却し、結露の発生や消滅を制御することで、情報を提示している。結露を用いることで、ディスプレイに触れて情報を消すような、日常生活に溶け込んだインタラクションを可能にする。

BubBowl[3] は、電気分解により発生する泡を利用したディスプレイである。水を電気分解することで発生する気体の泡を利用し、液面上に文字や図を表示することができ

¹ 公立はこだて未来大学
Future University Hakodate

a) b1018013@fun.ac.jp

る。装置が小型なため、カップに装着し、コーヒーなどの飲料に情報を表示することができる。

UTAKATA[5]は、泡によるテキストメッセージを、流水面に流しながら表示するディスプレイである。水路の底面に電極を設置し、電気分解により生じる泡を利用している。

石井ら[4]は、電気分解により生成するイオンを利用し、湿潤面上にカラーパターンを表示する手法を提案した。電気分解により生成させた特定のイオンに反応する呈色指示薬を用い、カラーパターンを表示させている。食材に含まれる色素を用いることで、パンナコッタなどの湿潤面を持つ食品にも情報を表示することができる。

Hirayamaら[8]は、シャボン膜を素材とした Shaboned display を提案した。シャボン膜に自由に触れられ、壊すことを入力ツールとして利用した、インタラクティブな立体ディスプレイである。シャボン膜特有の親しみやすさや美しさ、壊れやすさを活かしている。

2.2 構造色に関する研究

構造色を再現したり、応用する研究は、ナノテクノロジーの分野から、広い分野に応用されている。

Saitoら[1]は、モルフォ蝶の翅の構造を応用し、光を広範囲に広げる採光窓のガラスのデザインを提案した。ガラスを通過する光は直進するため、室内を明るく照らすには、光を散乱させたり、光の経路を曲げる必要がある。しかし、光を散乱させると弱くなり、逆に経路を曲げると虹色になるという課題があった。モルフォ蝶の翅には微細構造があり、青色の波長のみを強く反射し、経路を曲げても虹色に光らないという特徴がある。そこで、窓ガラスに微細構造をつけることで、上記の課題を解決した。

Amyら[2]は、透明な液滴に着色することなく、虹色の構造色を生成する手法を提案している。半球の液滴に光を照射し、その光の屈折の仕方を観察しモデル化することで、ある条件下で発色する構造色を予測できるようにした。

Yangら[10]は、圧力を検知して色が変化する、無機ナノシート構造色ゲルを開発した。ナノシートがフィルム表面に規則的に並んだ構造をしている。強い圧力を検知すると青、弱い圧力を検知すると、緑やオレンジに発色する。300nmの薄さでありながら、フルカラーで発色し、柔軟性や耐久性に優れた新素材である。

2.3 本研究の特徴

本研究では、構造色を用いることで、日常生活に溶け込みつつ、鮮やかさのある情報提示を行う。また、構造色を再現する研究には専門的な機材が必要である。本研究では、身近な素材とデジタル工作技術で、手軽に構造色の再現を行う。

3. 予備実験

3.1 UV プリンタを用いた微細構造の再現実験

1章で述べたように、構造色は光の波長程度、すなわち数百 nm サイズの微細構造が必要である。このような微細構造を作成するため、UV プリンタ^{*1}を使用し、デジタル工作技術でどの程度の微細構造まで作成できるのか予備実験を行った。UV プリンタは、Roland DG 社の VersaUV LEF-12i (以下、VersaUV) を使用した。その結果、VersaUV で印刷できる最小の線の太さは 0.1pt (およそ 0.035mm) であることが判明した。これより、手で微細構造を加工・再現することは困難であると判断し、構造色を発色する身近な素材を利用することにした。

3.2 溶液の検証

本研究では、構造色の中でも、空の青さや夕焼けを生む現象であるレイリー散乱に着目した。レイリー散乱を再現する素材の一例として、アクリルエマルジョンが知られている [7]。アクリルエマルジョンの粒子径が、レイリー散乱を再現するのに適しているためである。そこで、入手が容易であり、アクリルエマルジョンが含まれている、フローリングワックスを素材として採用した。使用したフローリングワックスは、リンレイ社のオールである。

まず、水とフローリングワックスの割合による発色の変化を実験し、複数の配合を調査した。水 500ml に対し、フローリングワックスを 1ml ずつ加え、それぞれ下から白色 LED で照らし、どのように変化するか検証した (図 1)。フローリングワックスが 1ml, 2ml のとき、青の発色が強く見られた。また、溶液上部に薄くオレンジが見られた。フローリングワックスが 3ml のとき、薄く青からオレンジのグラデーションが見られた。フローリングワックスを 4ml 以上加えると、白く発色し、青やオレンジは見られなかった。また、下からの光が容器上部まで届かなくなり、段々と暗くなっていった。

次に、フローリングワックスを封入する枠を VersaUV で印刷した。この枠に溶液を封入し、同じ形状のアクリル板で蓋をした。枠の高さは、1.05mm である。この枠に、水 100ml に対しフローリングワックス 1ml を加えた溶液を封入し、スマートフォン画面の光で照らすと、発色が見られなかった (図 2 左)。そこで、フローリングワックスの原液を封入すると、濃いオレンジの発色が見られた (図 2 右)。このことから、容器あたりの溶液の濃度が発色に大きく関係することがわかった。また、図 2 の実験では、図 1 のような青色の発色が見られなかったため、溶液の高さが関係するのではないかと仮説を立てた。

*1 紫外線で硬化するインクを用いて、様々な素材上にイメージやテクスチャを印刷できるデジタル工作機器。

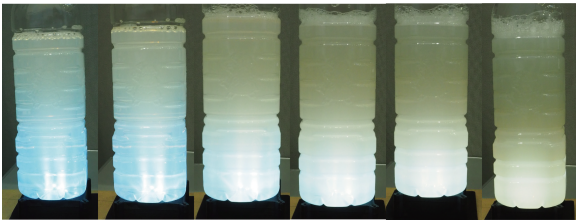


図 1: 水 500ml に対し、フローリングワックスを 1ml, 2ml, 3ml, 4ml, 5ml, 10ml 加えた溶液を下から照らした。

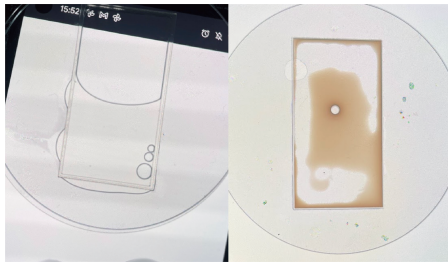


図 2: 1%溶液 (左), フローリングワックスの原液 (右)。

3.3 光源の検証

前項で行った検証は、白色 LED を光源とした。次に、光源の違いによる発色の変化について検証した。本実験では、スマートフォン (iPhone12 mini) の LED ライトと、M5StickC 用のフルカラー LED マトリクス (M5StickC NeoFlash Hat) の 2 種類の光源を用意し、比較した。水 100ml にフローリングワックス 1ml を入れよく混ぜた溶液をペットボトルに入れ、下から光で照らす。その結果が図 3 である。スマートフォンの LED ライトではオレンジが、M5StickC 用の LED マトリクスでは青が強く発色することがわかった。これより、光源自身のわずかな色の違いが、発色に大きく影響することがわかった。本研究では、発色に影響の少ない、白色 LED を使用する。



図 3: スマートフォンの LED ライトで照らしたもの (左), LED マトリクスで照らしたもの (右)。

3.4 溶液の照らし方の検証

本項では、溶液を下から照らした場合と横から照らした場合の、発色の変化について検証した。水 500ml に対しフローリングワックスを 5ml 入れ、よく混ぜた溶液をペットボトルに入れ、LED で照らす。本実験では、光源に白色 LED (OSPW5111A-Z3, 色温度: 85000~10000K) を使用した。結果を図 4 に示す。下から照らしたとき、白か

らオレンジのグラデーションが見られた。横から照らしたとき、青からオレンジのグラデーションが見られた。これより、照らす方向を変えることで、溶液の発色が変わることがわかった。



図 4: 1%溶液を下から照らしたもの (左), 横から照らしたもの (右)。

4. 提案

4.1 システム概要

これらの予備実験を踏まえ、本研究では、水とフローリングワックスの溶液を使用したディスプレイを提案する。本システムは、「構造色を発色する素材の部品化」と「ディスプレイの実装」の 2 段階に分けられる。

4.2 構造色を発色する素材の部品化

水とフローリングワックスの溶液をディスプレイの部品として扱えるように、UV プリンタや 3D プリンタで作成したケースに溶液を注入することで、取り回しが容易で配置の自由度が高い形に加工する (図 5)。また、構造色を引き出す他の素材についても同様に調査し、多様な構造色の部品化を目指す。

4.3 ディスプレイの実装

「ディスプレイの設計」では、素材を部品化したものを使用し、ディスプレイの実装を行う。実装方法として、2 通り想定している。1 つ目は、部品を LED / 液晶ディスプレイ等の光源に直接配置する方法である (図 6 左)。この実装方法の場合、コンパクトで可搬性の高い特徴を持つ。2 つ目は、部品を光源に取り付けて投影する方法である (図 6 右)。この実装方法の場合、広範囲に像を投影するため、空間演出として使用することができる。

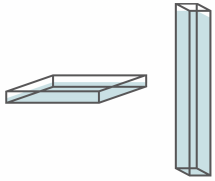


図 5: 部品化の例.

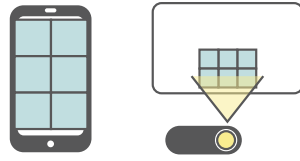


図 6: 光源への配置例.

5. 実装

5.1 セル

まず、部品化する形状について検討した。角形で配置しやすく、液体を封入しやすい形状のため、 $12.5 \times 12.5 \times 45\text{mm}$ のポリスチレン製ディスポセル (以下、セル) を採用した (図 7)。セルに溶液を入れ、蓋をすることで部品化する。蓋は 5mm のアクリル板を加工して作成し、接着剤で接着する。接着剤は、アクリサンデー株式会社のアクリサンデー接着剤を使用した。

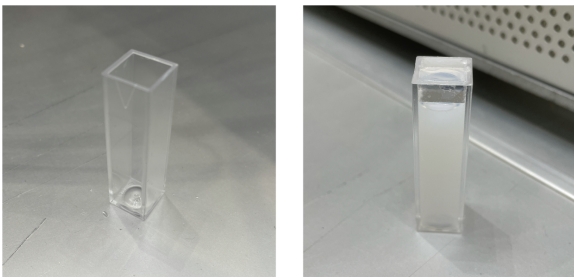


図 7: 部品化に使用するディスポセル (左)、溶液を入れ蓋をした状態 (右)。

5.2 ケース

セルを複数並べる際に、安定して配置できるケースを 3D プリンターで作成した (図 8)。底面と側面に LED を差し込むための穴があいている (図 9)。セルは最大 4×4 で配置することができ、仕切りを調整することで、任意のサイズに変更できる (図 10)。

5.3 デバイス構成

本デバイスの外観を図 11 に示す。

LED の点灯・消灯の制御には、Arduino Uno を使用した。現在、白色 LED (OSP W5111A-Z3, 色温度: $8500 \sim 10000\text{K}$) を 8 つ配線している。LED の制御はシリアル通信を用い、PC 上で行う。

5.4 LED 点灯例

本項では、実際にケースにセルを配置し LED を点灯したときの見え方について、「 2×2 に配置した場合」と「 4×2 に配置した場合」の 2 つ紹介する。

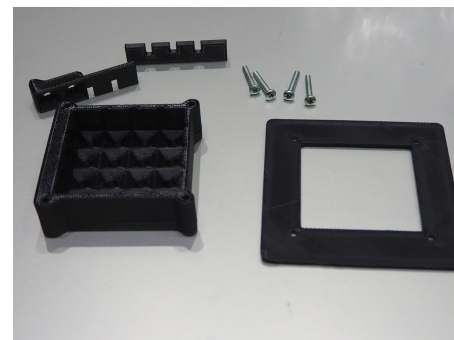
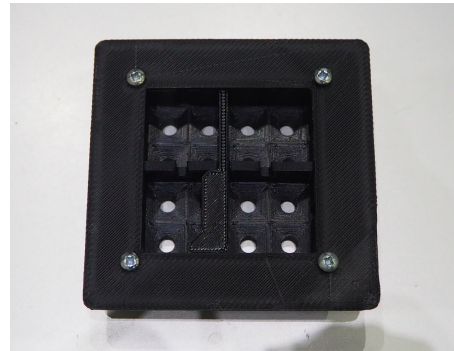


図 8: 作成したケース (上)、解体した状態 (下)。

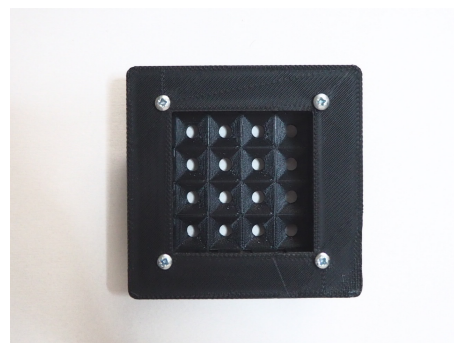
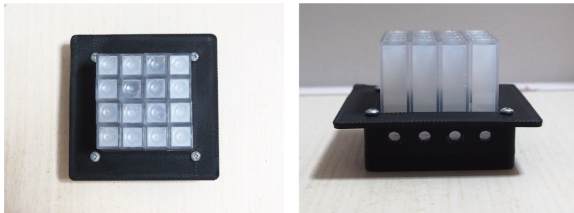
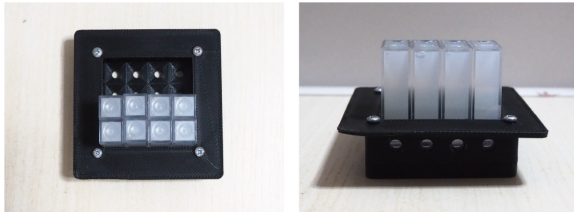


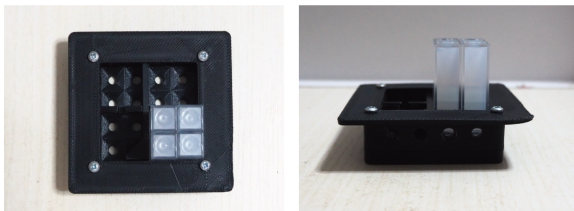
図 9: LED 光源の取り付け部。底面と側面の穴に差し込む。



(a) 4 × 4で配置した場合.



(b) 4 × 2で配置した場合.



(c) 2 × 2で配置した場合.

図 10: セルの配置例. 仕切りの位置を調整することで複数の配置ができる.

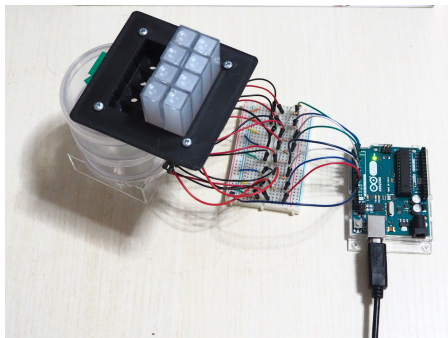
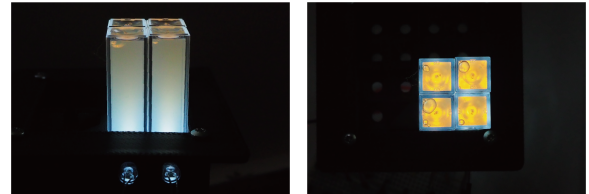


図 11: 制御回路を接続した様子.

5.4.1 2 × 2 にセルを配置した場合

図 12 は、2 × 2 にセルを配置し、底面 4 つと側面 2 つに差し込んだ LED を点灯した様子である。図 12(a) は、底面の LED のみ点灯した。横から見たとき、白からオレンジのグラデーションが視認できる。上から見たときは、強いオレンジの発色が見られる。図 12(b) は、側面の LED のみ点灯した。横から見たとき、青く発色している。上から見たときは、薄くオレンジが見られる。



(a) 底面の LED を点灯. 横から見た図 (左), 上から見た図 (右).



(b) 側面の LED を点灯. 横から見た図 (左), 上から見た図 (右).

図 12: 2 × 2 にセルを配置した場合

5.4.2 4 × 2 にセルを配置した場合

図 13 は、4 × 2 にセルを配置し、底面 8 つに差し込んだ LED を点灯した様子である。現状は制御できる LED の数が 8 つのため、底面から照らす場合のみ実装した。横から見たとき、白からオレンジのグラデーションが視認できる。上から見たときは、強いオレンジの発色が見られる。

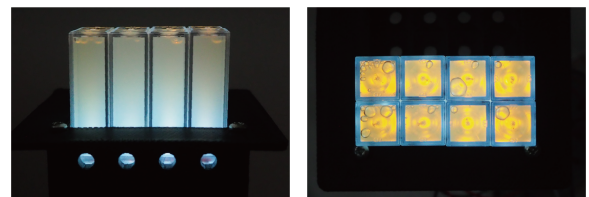


図 13: 4 × 2 にセルを配置し、底面の LED を点灯した。横から見た図 (左), 上から見た図 (右).

6. 評価実験

6.1 溶液の濃度実験

6.1.1 目的と手法

本実験では、フローリングワックスの濃度によって、発色がどのように変化するかを調査する。水 1000ml に対し、フローリングワックスを 1ml ずつ加え、10ml まで増やす。

各濃度ごとにセルに封入し、下から白色 LED で照らした。撮影には、ミラーレス一眼 OM-D E-M10 Mark III (OLYMPUS) を使用した。

6.1.2 結果と考察

実験結果を図 14 に示す。横から見た結果、フローリングワックスの量が少ないほど青の、量が多いほどオレンジの発色が見られた。また、上から見たとき、フローリングワックスの量が少ないほど白の、量が多いほどオレンジの発色が見られた。0.1%の溶液と 0.5%の溶液、1%の溶液を比較すると、上から見たときに、それぞれ白、黄、オレンジが見られる。また、横から見ると、青単色から、青とオレンジのグラデーションに徐々に変化している様子が見られる。以上のことより、溶液の濃度を変化させることで、表現できる色数が増え、幅広い表現ができるようになることを考える。



図 14: セルを下から照らしたもの。横から見た図 (上), 上から見た図 (下)。濃度は左から 0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.4%, 0.5%, 0.6%, 0.7%, 0.8%, 0.9%, 1%の溶液。(1/1000sec, F5, ISO1250)

6.2 光源の輝度実験

6.2.1 目的と手法

本実験では、光源の輝度の変化によって、発色や受ける印象がどのように変化するかを調査する。

1%の溶液を封入したセルを、白色 LED で照らした。底面の LED の輝度を変化させる実験と、側面の LED の輝度を変化させる実験の 2 通りを行った。LED は PDM 制御で輝度を調整し、0~255 までの 10 段階で実験を行った。

撮影には、ミラーレス一眼 OM-D E-M10 Mark III (OLYMPUS) を使用した。

6.2.2 結果と考察

結果を図 15 と図 16 に示す。

横から見たとき、底面の LED の輝度を変化させると、輝度が小さいとき、薄い青とオレンジが見られる (15)。それ以降は白とオレンジの発色が見られ、輝度が上がるにつれ、白く発光して見える。上から見たとき、輝度が小さい

ほどオレンジの発色が視認しやすく、輝度が上がるにつれ、白っぽく発光して見える。

横から見たとき、側面の LED の輝度を変化させると、輝度が小さいとき、青と薄いオレンジが見られる (16)。それ以降は次第にオレンジが薄くなり、全体的に青く見えるようになる。また、輝度が上がるにつれ、白く発光して見える。上から見たとき、輝度が小さいほど暗いオレンジが見られ、輝度が上がるにつれ、白っぽく発光して見える。

また、底面/側面どちらの LED を用いた場合も、LED の輝度を変化させることによって、側面から見たとき、グラデーションの境目の位置が変化することがわかった。輝度が上がるにつれ、グラデーションの境目が上昇して見える。

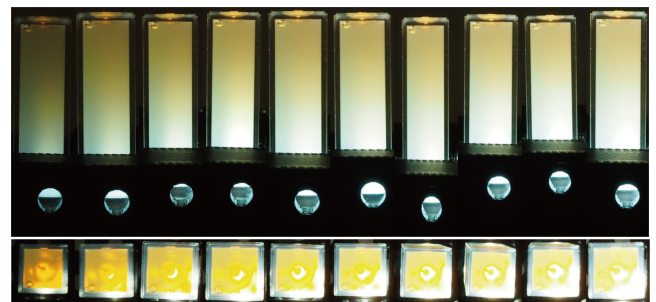


図 15: 底面の LED の輝度を 10 段階で変化させた。横から見た図 (上), 上から見た図 (下)。PWM 値は左から 25, 51, 76, 102, 127, 153, 178, 204, 229, 255。(1/25sec, F9, ISO1250)

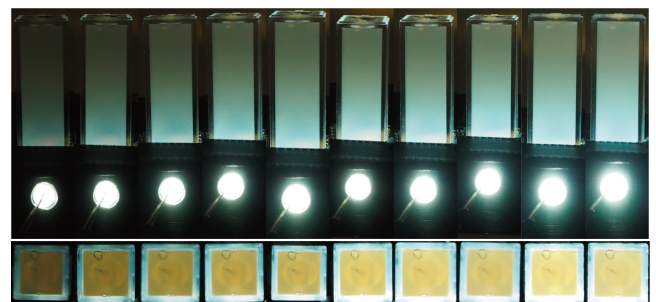


図 16: 側面の LED の輝度を 10 段階で変化させた。横から見た図 (上), 上から見た図 (下)。PWM 値は左から 25, 51, 76, 102, 127, 153, 178, 204, 229, 255。(1/25sec, F9, ISO1250)

7. 議論

本研究では、水とフローリングワックスを混ぜた溶液と LED を組み合わせ、レイリー散乱を応用したディスプレイを実装した。また、評価実験により、溶液の濃度や LED の輝度を変えることで、表現できる色数が増えたり、側面から見たときのグラデーションの境目を変化することを確認

した。これらのことから、濃度の異なる溶液の組み合わせや、LEDの照射位置や輝度の制御により、一定の表現力を持つディスプレイを実現できると考えられる。現状、制御できるLEDの数は8つであり、情報提示を行うには不十分である。現在、4×4のセルの底面/側面のLEDをダイナミック制御する実装を進めており、視認性や表現力を検証しつつ、大きな解像度やサイズでの展開を検討したい。

8. 終わりに

本研究では、水とフローリングワックスを混ぜた溶液とLEDを組み合わせ、レイリー散乱を応用した情報提示手法を提案した。本手法では、身近な素材を加工し、3Dプリンタで製作したケースと組み合わせることで、構造色を発色するディスプレイを手軽に実装した。また、評価実験を行い、溶液の濃度によって発色が、光源の輝度によってグラデーションが変化することを確認した。

今後の展望として、ディスプレイの解像度を向上させ、様々な表現例/応用例を構築する。また、レイリー散乱以外の構造色や、フローリングワックス以外の素材についても追求し、表現力を高めていきたい。

謝辞

本研究の一部は、科研費20H04231の支援を受けた。

参考文献

- [1] Akira Saito, Kazuma Yamashita, Takuto Shibuya, Yuji Kuwahara: Daylight window based on the nano-disorder inspired by Morpho butterflies' coloration, *Journal of the Optical Society of America B*, Vol. 38, Issue. 5, pp. 1532-1537(2021).
- [2] Amy E. Goodling, Sara Nagelberg, Bryan Kaehr, Caleb H. Meredith, Seong Ik Cheon, Ashley P. Saunders, Mathias Kolle&Lauren D. Zarzar: Colouration by total internal reflection and interference at microscale concave interfaces, *Nature*, pp. 523-527(2019).
- [3] Ayaka Ishii, Itiro Sio: BubBowl: Display Vessel Using Electrolysis Bubbles in Drinkable Beverages, *UIST '19*, pp.619-623(2019).
- [4] 石井綾郁, 池松香, 椎尾一郎: 電解イオンディスプレイ, 第28回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ(WISS2020) 論文集, 6 pages.
- [5] 石井綾郁, 福島真花, 田中波輝, 的場やすし, 池松香, 椎尾一郎: 電気分解気泡による流水ティック表示と高画素階調表示, 第28回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ(WISS2020) 論文集, 6 pages.
- [6] 木下修一: 発色原理が異なる色一構造色一, *日本画像学会誌*, Vol. 50, No. 6, pp. 543-555(2011).
- [7] 馬目秀夫: 「青空と夕日の実験機」の制作, <http://www6.plala.or.jp/maamu/seisaku.pdf> (2001).
- [8] Shiho Hirayama, Yasuaki Kakehi: Shaboned display: an interactive substantial display using soap bubbles, *ACM SIGGRAPH 2010 Emerging Technologies*, No. 21(2010).
- [9] 辻本祐輝, 伊藤雄一, 尾上孝雄: Ketsuro-Graffiti: 結露を用いたインタラクティブディスプレイ, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 21, No. 3, pp. 513-520(2016).
- [10] Wenqi Yang, Shinya Yamamoto, Keiichiro Sueyoshi, Takumi Inadomi, Riki Kato, Nobuyoshi Miyamoto: Perovskite Nanosheet Hydrogels with Mechanochromic Structural Color, *Angewandte Chemie International Edition*, Vol. 60, Issue. 15, pp. 8466-8471(2021).