

# BubBowl: 電気分解を利用したカップ型泡ディスプレイ

石井 綾郁\* 椎尾 一郎\*

**概要.** 気体の泡を用いて液体中にデジタル情報表示を行う泡ディスプレイの手法が研究され、一部では実用化もされている。従来装置では表示のための気体を外部から供給する方式が一般的であり、可動部分が必要である。この方式では機構が大掛かりになり、高画素な表示を安価に実現することが困難である。そこで我々は、電気分解により発生する気体を画素として利用し、飲料表面に 10×10 画素のドットマトリクスパターンを生成するカップ型デバイス BubBowl を提案する。本方式は可動部分の無い電極だけで構成可能であり、既存のプリント基板技術や電子部品実装技術を利用することで、高密度で高解像度な泡ディスプレイを安価に実現できる可能性がある。また、提案デバイスは小型化・電池駆動が可能であるためコーヒーカップのような日用品に埋め込むことができ、コーヒーの液面に泡で情報提示するなど、日常生活に近い場面での使用が期待できる。

## 1 はじめに

水は人々の生活に不可欠な存在である。人々は日々カップに飲料を注ぎ、庭園の池や手水鉢など生活のあらゆる場面で水を貯め、水の存在と水面の変化を楽しんでいる。一方で、その水面に浮かぶ泡も、生活に欠かせない存在である。乳飲料やコーヒーには大気を取り込んで泡立ちやすい性質があり、ビール、炭酸水などの発泡性飲料は水溶性の炭酸ガスを内包するため、水面に泡を作り出す。飲料表面を覆う泡の表情とまるやかさは、有史以前から人々の食生活を豊かにしてきた。近年、これらの飲料表面の泡に静的な文字や画像を「印刷」しようとする試みがされている。ラテアートは、あわ立てたミルクにより液面に絵や模様が描かれたカプチーノコーヒーである。従来は職人が手作りしていたが、これを自動化し、スマートフォンなどから送信された画像をコーヒーの液面に印刷する装置が実用化されている<sup>1</sup>。また、ビールを注ぐと液面に泡で文字が浮かび上がる信楽焼ビアカップも開発されている<sup>2</sup>[17]。これらの製品は、印刷物のように静的な文字や画像を泡で表示する機能を持つものであり、刻々と変化する動的な情報を表示することはできなかった。

動的に変化する情報を泡により表示する研究も実施されている。Information Percolator[2] は、水を満たした透明パイプ群中を上昇する泡を用いたディスプレイである。このディスプレイは、外部から取り込んだ空気を電磁バルブで制御し、拡散器により白濁した泡を発生させて表示を行っている。しかし、この方式では機構が大掛かりになり、高画素表示を安価に実現することが困難である。

水そのものは水素と酸素の化合物である。したがって、これを電気分解すると水素と酸素の気体が発生する。我々はこの性質に着目し、電気分解により発生する気体を泡ディスプレイの画素として利用する手法を提案した [16]。図 1 に本研究で実装した泡ディスプレイ BubBowl を示す。これは、カップに注がれた飲料表面に、泡を用いて 10×10 画素のドットマトリクスパターンを生成するカップ型デバイスである。本方式は電気分解を利用するため、外部から気体を供給する必要がなく、電磁バルブやコンプレッサのような可動部分が不要である。また、プリント基板や高密度端子などの既存の電子回路実装技術を利用できるので、高密度、高画素な実装が容易であると期待できる。このような特徴により、従来の泡ディスプレイと比較して、小型、低コスト、



図 1. BubBowl. 電解液を入れる前の状態である。マトリクス陰極群と共通陽極が容器内部に配置されている。

Copyright is held by the author(s).

\* お茶の水女子大学

<sup>1</sup> <http://www.coffeeriipples.com>

<sup>2</sup> <http://www.kdd1.com/391/moji-bi-ru105.html>

低ノイズ、低消費電力であり、電池駆動も可能である。したがって日用品に組み込むことも可能であり、生活に密接した場面での泡ディスプレイの利用が期待できる。例えば、天気予報や株価のような日常的な情報を、コーヒーなどの飲料表面に泡で表示することができる。提案デバイスの特徴を活かし、日常生活に溶け込みつつ多様な表現が可能な、泡によるアンビエントディスプレイの実現を目指す。

## 2 関連研究

泡そのものを画素として用いる泡ディスプレイの研究がいくつか存在する。Information Percolator[2]は、水を満たした透明パイプ群中を上昇する泡を用いた2Dディスプレイである。このシステムはアンビエントディスプレイ [15, 4, 1]として設計されており、適切かつ望ましい時にのみユーザの注意を惹きつける。具体的には、システムが直接使用されていないときに「背景に溶け込む」ことを可能にするため、システム自体が装飾的なオブジェクトになるように設計されている。我々の泡ディスプレイは小型化が容易であり、カップのような日用品に埋め込むことが可能である。したがって、提案デバイスにより、日常生活の背景により自然に溶け込むアンビエントディスプレイの実現が可能であると期待できる。松村らは、水中の気泡を用いたインタラクティブアートを提案している [18]。この研究では、Information Percolatorと同様の手法で気泡による平面的な模様の表現を行う Water Canvas with Earsと、泡による立体的な造形を表現する Liquid Sculptureを提案している。両作品とも、泡という視覚情報だけでなく、聴覚情報である音響を表現要素として用いている。また、鑑賞者の入力により作品が反応して動作するような、インタラクティブな機能を実現している。このような気泡を利用したアート作品においても、電気分解により気泡を発生させる本手法を取り入れることで、従来より高画素、高解像度な表示が可能になり、人と泡とのインタラクションの可能性を広げられると期待している。Volumetric Bubble Display[7]は、高解像度表示が可能な泡ディスプレイである。この研究では、フェムト秒レーザーパルスをグリセリンのような高粘度溶液に照射することでマイクロバブルを生成し、これを用いた3Dディスプレイを実現している。このシステムは機械的・電氣的部品を含まず光学的に泡を生成可能であるが、用いる液体が高粘度であるためディスプレイの応答速度が遅い問題がある。提案デバイスの応答速度も数秒から数十秒程度であり、一般的なディスプレイに比べると低速であるが、粘度の低い電解液を用いることで応答時間の短縮が可能である。Shaboned Display[3]は、シャボン玉自体を画素として利用した10×10画素の2Dディスプレイである。石鹼水に浸されたスポンジ製のノズルをソレノイドにより

変形させ、石鹼膜を生成する。そして、ノズルに接続されているエアポンプから空気を送り込むことでシャボン玉を生成する。

既存の泡ディスプレイの多くは、各画素・列ごとに機械的な可動部分を要する。例えば、Information Percolatorには列ごとに電磁バルブや拡散器が、Shaboned Displayには画素ごとに変形機構やエアポンプが必要である。画素数が増えると必要な可動部品の数も増加し、ディスプレイは大掛かりで高価になってしまう。一方で、我々の提案デバイスは小型で電池駆動が可能であり、コーヒーカップのような日用品に埋め込むことができる。さらに、電極だけで構成でき可動部分が不要なため、安価に画素数を増やすことが可能である。

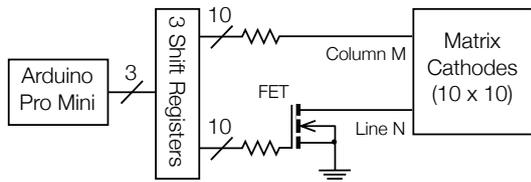
H<sub>2</sub> Bubble Display<sup>3</sup>は、透明な水槽の底面に設置された8×8対の電極を用いて電気分解を行い、発生した気体を鑑賞するアート作品である。この作品では、電極で発生した泡が音楽と同期して煙のように上昇するものの、泡を画素として用いた情報表示機能は無い。我々は、コーヒーのような着色された液体の表面に形成される円形の微細泡群に焦点を当て、それらをドット文字の画素として利用する。また、カップの底面に小型のアクティブマトリクス回路を実装し、飲料表面に情報提示することを可能にしている。

泡ディスプレイ以外にも、物理的な素材そのものの画素として用いる実体ディスプレイが提案されている。Mosaic Textile[14]は布を画素として使い、Dewy[9]とKetsuro-Graffiti[12]は結露を、MOSS-xels[5]は苔を、Tangible Drops[10]は液体金属を用いている。Udayanらは水滴とのインタラクションを提案した [13]。また、実体ディスプレイとのインタラクションも先行研究において提案されている。これらの研究では、画素として使用する素材の特性を活かした情報とのインタラクションを可能にしている。Shaboned Displayでは、シャボン玉を指で破裂させることによる直感的な操作が可能である。また、Ketsuro-Graffitiでは、ユーザが指で結露に触れることによる情報との自然なインタラクションを可能にしている。これらの研究と同様に、提案手法においても、泡の特性を活かした直感的なインタラクションが可能であると考えている。例えば、ユーザがカップ内の泡を吹き消したり飲んだりすることで、表示する情報の更新を行うようなインタラクションが可能であろう。

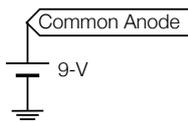
映像投影のためのスクリーンとしてシャボン玉を使用する例もいくつか存在する [6, 8, 11]。これらの研究では、空中に浮遊しているシャボン玉にプロジェクションを行うことによる空中ディスプレイを実現している。また、シャボン玉に触れて破裂させたり、近くで手を動かしたりすることによる、人と

<sup>3</sup> <http://cargo.jonathanbobrow.com/Bubble-Display>

(a) Circuit diagram



(b) Anode



(c) Cathode

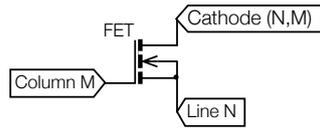


図 2. 回路図.  $N$  行  $M$  列の配線を示す ( $N = 1 \sim 10$ ,  $M = 1 \sim 10$ )

表示のインタラクションが可能である。我々は、泡の塊を画素として利用しているが、泡を投影のためのスクリーンとして用いプロジェクションを行うことで、より多様な表現が可能になると考えている。本デバイスが電気分解により生成する泡は非常に小さく、液面に白い微細泡群を形成するため、投影のためのスクリーンに適している。

### 3 BubBowl

図 1 に BubBowl の外観を示す。容器底面に、 $10 \times 10$  のマトリクス陰極群が  $6.35\text{mm}$  の間隔で配置されている。マトリクス陰極全体のサイズは  $57.2 \times 57.2\text{mm}$  である。一方、共通の陽極が容器内壁を囲うように配置されている。陰極には既存のピンヘッド部品を用い、陽極には電気分解による溶出を防ぐために純金箔を用いた。純金箔は、金箔専用の接着剤を利用して容器内壁に貼り付けた。

#### 3.1 マトリクス回路

図 2 (a) に泡ディスプレイの回路図を示す。100 個の電極がアクティブマトリクス回路に接続され、Arduino Pro Mini からの制御で任意の複数電極が接地される。これにより、接地された電極が陰極として機能する。Arduino の出力端子数を節約するために、10 カラム 10 ラインの配線に 3 個のシフトレジスタを接続した。Arduino からの制御で、カラム配線には TTL レベルの High もしくは Low の電圧がかかる。一方で、ライン配線は順次接地される。後述するように、ライン配線には電気分解のための電流が流れる。さまざまな電流・電圧条件に対応する目的で、ドライブ能力に余裕のある MOSFET を介して接地と接続した。今回の試作では電気分解用の電源に 006P 型 9V 乾電池を用いた。また Arduino 等の制御回路用電源にスマートフォン用モバイルバッテリー (リチウムイオン電池) を用いることで、デ

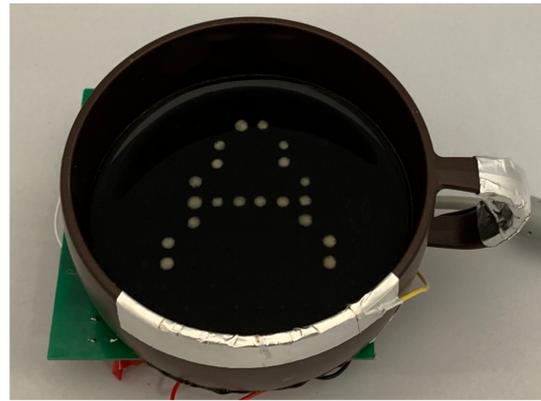


図 3. 泡ディスプレイによる表示の例: 「A」

バイス全体をワイヤレス動作させることができる。図 2 (b) に示すように、電気分解用 9V 電池の正極は共通陽極と接続している。また、負極は Arduino の接地に接続し、制御回路用電源と電気分解用電源の接地を共通にした。図 2 (c) に、 $N$  ライン  $M$  カラムの交点にある 1 画素の画素用電極をスイッチングする回路を示す。マトリクスの各交点には MOSFET と画素用電極が配置されている。画素用電極は FET のドレインに接続し、カラム配線はゲートに、ライン配線はソースに接続している。カラム配線に High の電圧が印加され、なおかつライン配線が接地されると、ゲート～ソース間に電圧が発生しドレイン～ソース間が導通する。その結果、画素用電極が接地され電気分解の陰極として機能し、画素用電極 (陰極) から水素が発生する。同時に共通陽極からは酸素が発生する。

#### 3.2 電解液

初期実験のために、炭酸水素ナトリウム (重曹) を精製水に加えた溶液 (濃度  $0.4\%$ ) を電解液として使用した。このとき電気分解によって発生するガスは水素と酸素のみであり、吸入しても安全である。本デバイスを稼働させると、特定の陰極から水素が発生し、水面に円形の白い微細泡群として現れる。この泡群を 1 画素としてドット表示を実現する。しかし、炭酸水素ナトリウム溶液は無色透明であるので、水面から容器底部の電極構造が見えてしまい、泡によるドット表示が観察しづらいという問題があった。そこで、泡を目立たせてコントラストを上げるために、インスタントコーヒー粉末 ( $16\text{g/L}$ ) を溶液に入れて着色した。その結果、図 3 に示すように白い泡が見えやすくなり、泡ディスプレイとしての性能が向上した。このとき、液体の水位は  $1.5\text{cm}$  であった。また、泡の拡散を防いで表示品質を向上させるために、少量のコーンスターチを加え、溶液の粘性を上げた。安定した表示を実現するために必要なコーンスターチは  $1.8\text{g/L}$  程度であり、このときの溶液の

表 1. 応答速度 (秒)

|                   | 粘性なし | 粘性あり |
|-------------------|------|------|
| Cornstarch (g/L)  | 0    | 1.8  |
| Black To Gray (s) | 6    | 6    |
| White To Gray (s) | 12   | ≥ 60 |

動粘度は  $1.1\text{mm}^2/\text{s}$  であった。本デバイスでは、画素電極である陰極から水素が発生するほか、共通陽極から酸素が発生する。共通陽極には金箔を用いており、容器内壁に広範囲に配置している。よって、酸素気泡は内壁に薄く形成されるのみであり、水素気泡によるドット表示品質に影響を及ぼさなかった。容器内に存在する全ての物質（水素、酸素、水、炭酸水素ナトリウム、インスタントコーヒー、コーンスターチ）は人間にとって無害である。

### 3.3 性能評価

本デバイスは、底面が直径約 9cm の円形である容器内に実装した。画素間隔は  $6.35\text{mm}$  であるので表示画素密度は 4 dpi となる。さらに高密度な表示の可能性を確認するために、2 画素の電極を用いた実験を行ったところ、コーンスターチ量  $1.8\text{g/L}$ 、水位 8cm のインスタントコーヒー表面で、 $2.54\text{mm}$  間隔の電極 (10 dpi) からの泡が識別可能であった。

提案手法では気泡の生成開始・停止により画素の表示・非表示を行うため、液晶ディスプレイのような一般的なディスプレイと比較すると、応答速度は低速である。ディスプレイの応答時間を評価するために、1 個の電極のみを通电させた。このとき、電解液の水位は容器底面より約  $1.5\text{cm}$  であり、電極には  $0.65\text{mA}$  の電流が流れた。発生した泡の様子はビデオカメラで記録し、画像編集ソフトウェアを用いて泡の明度を測定した。応答速度を評価するために、一般的な表示装置で使用される手法を採用した。すなわち、泡が発生していない状態（非表示）の水面の明度を 0% とし、泡が十分に発生している状態（表示）の明度を 100% とした場合、非表示状態の 0% 明度から 80% 明度に至る時間 (BTG: Black To Gray)、および表示状態の 100% 明度から 40% 明度に至る時間 (WTG: White To Gray) をそれぞれ秒単位で測定した。この結果を表 1 に示す。ここでは前述した炭酸水素ナトリウムを加えたインスタントコーヒー（粘性なし）と、これに  $1.8\text{g/L}$  のコーンスターチを加えた液体（粘性あり）に対して応答速度を測定した。この結果が示すように、コーンスターチを加えることで BTG は変化しないものの、WTG 応答速度は低下する。粘性が高いと、泡の自然消失に時間がかかるためである。粘性の高い液体では泡表示が安定するものの、応答速度は損なわれるため、使用状況に合わせて液体を選択し、必要に応じて適

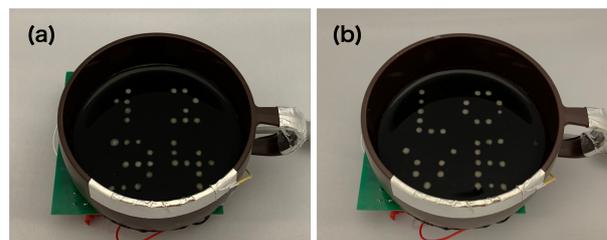


図 4. アンビエントディスプレイとしての応用例: (a) デジタル時計 12:34; (b) メッセージ表示「LOVE」

切に粘性調整する必要がある。また、ユーザが水面に息を吹きかける、もしくは電動ファンにより水面に風を当てることで、即座に泡を除去することも可能であるため、人間とのインタラクションを工夫することで応答速度を改善できると考えている。

## 4 応用例

本章では、提案手法の利点を活かしたさまざまな応用例について説明する。

### 4.1 アンビエントディスプレイ

生活空間に生け花の水盤を置いたり、ミニチュアの池や泉を飾ったりする人がいる。提案デバイスは小型で低ノイズ・低コストなため、これらの装飾物に情報提示機能を組み込むことが可能である。このように、提案デバイスを用いて装飾物の水面に泡で情報提示を行うことで、生活空間内でのアンビエントディスプレイを安価に実現することが可能である。使用例として、水面での泡によるアンビエントな時計表示が挙げられる (図 4 (a))。また、英数字 4 文字程度の任意のメッセージを表示することも可能である (図 4 (b))。

### 4.2 飲用可能なディスプレイ

本方式はシンプルな機構のため小型化が可能であり、マグカップやボウルの底に埋め込むことで、飲料表面に情報提示を行うことが可能である。性能評価の章では、炭酸水素ナトリウムとコーンスターチを加えたインスタントコーヒーを電解液として使用した<sup>4</sup>。この電解液に含まれている物質は人体に無害であり、電気分解をしても有毒ガスを発生しない<sup>5</sup>。以上より、電解液中に飲用に危険なものは含まれない。電解液として、上述したコーヒー以外にも、紅茶、ココア、牛乳などの飲み物を安全に使用できる。図 5 (a) は電解液としてカフェオレ（牛乳とインスタントコーヒーの混合物）を用いた泡ディスプレイの例である。電流の流れを促進するために、このカフェオレには 0.4% の濃度の炭酸水素ナトリウムが含まれている。フルーツジュースやレモンティーなどの酸

<sup>4</sup> この電解液を試飲したところ、無添加のコーヒーとほとんど違いを感じなかった。

<sup>5</sup> 溶液が塩分を含む場合、電気分解により塩素が発生する。

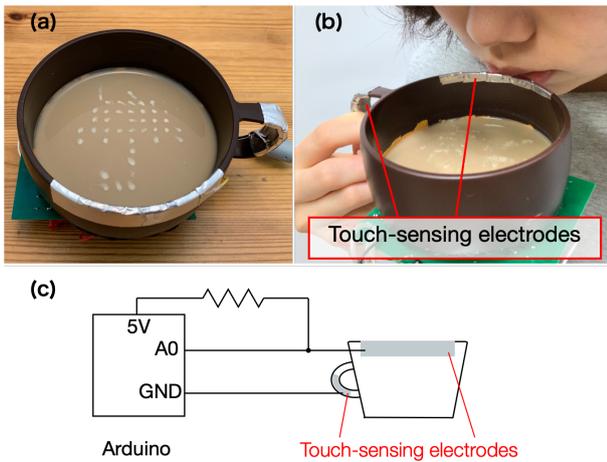


図 5. (a) カフェオレを用いた泡ディスプレイ。液面に天気予報（雨）を表示している; (b) 指と口の接触をセンシングすることで、飲用行為を検出する; (c) 飲用行動検出のための回路図

味のある飲料には、それ自体に導電性があり炭酸水素ナトリウムを加える必要がない。そのため素材のままでも表示媒体として使用できる。我々は 100% オレンジジュースとグレープジュースで実験を行い、泡により鮮明な表示が得られたことを確認した。

本デバイスは飲料に電圧を印加するため、稼働中に飲料を飲むと感電する恐れがある。ユーザの飲用行動を検出したら即座に電圧印加を停止するような安全回路を追加することで、この危険性を排除できる。そこで飲用行動を検出するために、カップの外側と縁にタッチセンシングのための電極を取り付けた (図 5 (b))。ユーザが飲料を飲もうとすると、取り付けられた電極に指と口が同時に接触する。図 5 (c) に飲用行動検出のための回路図を示す。ユーザの指と口がそれぞれの電極に接触すると Arduino のアナログ入力ピンに印加されている電圧が減少する。これにより飲用行動を検出し、電気分解を停止する。

### 4.3 フードプリンティング

調理する前の生地の状態が液体またはペースト状である食材が存在する。これらの食材の生地でも電気分解を行い、泡を発生させながら調理することで、食材上に泡で情報を印刷することが安価に実現できる。図 6 に泡でメッセージ「LOVE」が表示されたグレープゼリーを示す。100% グレープジュースにアガーを混ぜ、冷蔵庫で冷やしながらか電気分解を行うことで作成した。人体に無害な電解液を使用しているため、このゼリーは食べることができる。ゼリーだけでなく、クレープやホットケーキの生地でも電気分解を行うことで、泡でメッセージが書かれた焼き菓子を作ることができると考えている。

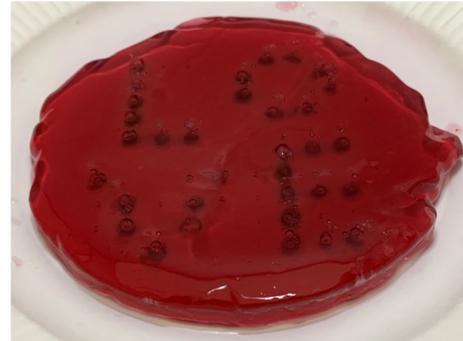


図 6. 泡によるメッセージ入りグレープゼリー

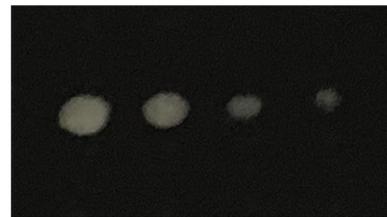


図 7. 4 段階グレースケール表示。右から順に 10, 20, 30, 40 秒接地した電極より発生した泡である。

また、電気分解をしつつ表面から電解液を固化させることで、泡による 3D オブジェクトが生成できるとも考えている。我々は、ゼリーの素を入れた溶液中に泡を発生させ、表面から底面に向かって順番に冷却し固化させることで、ゼリーの中に泡による 3D オブジェクトを作成することを検討している。同様に、表面から電解液を凍結させることで、氷の中に泡が閉じ込められた 3D オブジェクトも作成できると考えている。人体に無害な電解液を用いることで、これらの物体を食べることも可能である。

### 4.4 グレースケールディスプレイ

提案手法はバイナリ表示だけでなく、グレースケール表示も可能である。グレースケール表示は、画素表示用陰極の接地時間を調節することで実現できる。図 7 に、それぞれ異なる接地時間に設定した 4 つの陰極から発生した泡の様子を示す。それぞれの泡は、右から 10, 20, 30, 40 秒接地した電極から発生した。このとき、各電極に流れた電流値は 0.17mA であった。さらに、陰極の接地・非接地をパルス式に切り替えそのパルス幅を調整することで、スムーズなグレースケール表示が可能と考えている。Daniel Rozin の Wooden Mirror<sup>6</sup> は対面した人の顔を約 30×30 画素でインタラクティブに表示している。同様に、我々も画素数を 1000 画素程度に増やし、自然なグレースケール画像を表示することを予定している。

<sup>6</sup> <http://www.smoothware.com/danny/woodenmirror.html>

## 5 まとめと今後の課題

本研究では、電気分解により発生する気体を画素として利用し、飲料表面に10×10画素のドットマトリックスパターンを生成するカップ型デバイスBubBowlの提案を行った。また、BubBowlを用いた応用例についても報告した。

今後は、電解液の種類、印加電圧値、電極間の距離など、ディスプレイ構成に必要なパラメータの最適化を検討している。また、より多様な表現を実現するために、画素数や解像度、グレースケールレベルなどを増やすことを検討している。さらに、ゼリーを用いた泡による3Dオブジェクトや、インタラクティブディスプレイなどのアプリケーションを実装する予定である。提案デバイスの改善を通して、より自然に日常生活に溶け込みつつ、より多様な表現が可能なアンビエントディスプレイの実現を目指していきたい。

## 参考文献

- [1] A. Dahley, C. Wisneski, and H. Ishii. Water Lamp and Pinwheels: Ambient Projection of Digital Information into Architectural Space. In *CHI 98 Conference Summary on Human Factors in Computing Systems*, CHI '98, pp. 269–270, New York, NY, USA, 1998. ACM.
- [2] J. M. Heiner, S. E. Hudson, and K. Tanaka. The Information Percolator: Ambient Information Display in a Decorative Object. In *Proceedings of the 12th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '99, pp. 141–148, New York, NY, USA, 1999. ACM.
- [3] S. Hirayama and Y. Kakehi. Shaboned Display: An Interactive Substantial Display Using Soap Bubbles. In *ACM SIGGRAPH 2010 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '10, pp. 21:1–21:1, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [4] H. Ishii, C. Wisneski, S. Brave, A. Dahley, M. Gorbet, B. Ullmer, and P. Yarin. ambient-ROOM: Integrating Ambient Media with Architectural Space. In *CHI 98 Conference Summary on Human Factors in Computing Systems*, CHI '98, pp. 173–174, New York, NY, USA, 1998. ACM.
- [5] T. Kimura and Y. Kakehi. MOSS-xels: Slow Changing Pixels Using the Shape of Racomitrium Canescens. In *ACM SIGGRAPH 2014 Posters*, SIGGRAPH '14, pp. 20:1–20:1, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [6] Y. Kubo, H. Tomita, S. Nakamae, T. Hoshi, and Y. Ochiai. Bubble Cloud: Projection of an Image Onto a Bubble Cluster. In *Proceedings of the 13th International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology*, ACE '16, pp. 1–4, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [7] K. Kumagai, S. Hasegawa, and Y. Hayasaki. Volumetric bubble display. *Optica*, 4(3):298–302, 2017.
- [8] M. Nakamura, G. Inaba, J. Tamaoki, K. Shiratori, and J. Hoshino. Mounting and Application of Bubble Display System: Bubble Cosmos. In *Proceedings of the 2006 ACM SIGCHI International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology*, ACE '06, New York, NY, USA, 2006. ACM.
- [9] A. Parkes and D. Offenhuber. Dewy: A Condensation Display. In *ACM SIGGRAPH 2007 Posters*, SIGGRAPH '07, New York, NY, USA, 2007. ACM.
- [10] D. R. Sahoo, T. Neate, Y. Tokuda, J. Pearson, S. Robinson, S. Subramanian, and M. Jones. Tangible Drops: A Visio-Tactile Display Using Actuated Liquid-Metal Droplets. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, pp. 177:1–177:14, New York, NY, USA, 2018. ACM.
- [11] S. A. Seah, D. Martinez Plasencia, P. D. Bennett, A. Karnik, V. S. Otrocol, J. Knibbe, A. Cockburn, and S. Subramanian. SensaBubble: A Chrono-sensory Mid-air Display of Sight and Smell. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, pp. 2863–2872, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [12] Y. Tsujimoto, Y. Itoh, and T. Onoye. Ketsuro-Graffiti: An Interactive Display with Water Condensation. In *Proceedings of the 2016 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces*, ISS '16, pp. 49–55, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [13] U. Umapathi, P. Shin, K. Nakagaki, D. Leithinger, and H. Ishii. Programmable Droplets for Interaction. In *Extended Abstracts of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '18, pp. VS15:1–VS15:1, New York, NY, USA, 2018. ACM.
- [14] A. Wakita and M. Shibusaki. Mosaic Textile: Wearable Ambient Display with Non-emissive Color-changing Modules. In *Proceedings of the 2006 ACM SIGCHI International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology*, ACE '06, New York, NY, USA, 2006. ACM.
- [15] C. Wisneski, H. Ishii, A. Dahley, M. Gorbet, S. Brave, B. Ullmer, and P. Yarin. Ambient displays: Turning architectural space into an interface between people and digital information. In *Proceedings of Cooperative Buildings: Integrating Information, Organization, and Architecture*, CoBuild 1998, pp. 22–32, Berlin, Heidelberg, 1998. Springer.
- [16] 石井 綾郁, 椎尾 一郎. 電気分解を利用した泡ディスプレイ. 情報処理学会インタラクシオン 2019, pp. 215–220, 2019.
- [17] 大谷 貴美子. 視覚情報による「おいしさ」の研究. 日本調理科学会誌, 43(2):57–63, 2010.
- [18] 松村 誠一郎, 鈴木 太朗, 荒川 忠一, 伊藤 隆道. 気泡と音響を用いたインタラクティブアート: インタラクティブアートとインターフェイスの新たな可能性. 環境芸術, 2:29–36, 2002.