電気分解気泡による流水ティッカー表示と高画素階調表示

石井 綾郁 * 福島 真花 * 田中 波輝 * 的場 やすし * 池松 香 † 椎尾 一郎 *

概要． 筆者らは電気分解により発生する気泡を画素として用いる情報提示手法を提案している．本研究ではこれを拡張し，気泡表示の更新速度を高速化する手法と，気泡による高画素階調表示を実現する手法を提案する．先行研究では，日常的な情報提示装置への利用を想定していたが，泡は消えやすく儚い性質を持っており，インタラクティブなアートやエンターテインメント作品のための素材としても有望であると考える．そこで，提案手法の可能性を模索するため，2 点の気泡表示デバイスの開発を行った．1 点目は，流れる水面にティッカー状の泡表示を行う “UTAKATA” である．水路の底面に電極を直線状に配置し電気分解を行うことで，泡によるメッセージを水路の下流に向かって流しながら表示する．2 点目は，水盤に対面したユーザの顔を水面に泡で表示する鏡のようなディスプレイ “Bubble Mirror” である．これは，32×32 個の電極を用いて，8 段階のグレースケールの泡による顔画像を水面に表示する．

1 はじめに

水は我々の生活に不可欠であり，日々の生活を豊かにする．人々は古来より，河川の流れや池の水面にうつる景色を見て楽しんできた．一方で，水だけでなく，その表面に浮かぶ泡も興味深い存在である．鴨長明が方丈記で述べたように，流れる水やそれに浮かぶ泡はとどまることなく変化していくため，無常のメタファとして多くの文学作品に登場してきた．近年，水泡により文字や画像を表示する手法がいくつか提案されている．例えば，電気分解により発生する気泡を画素として用い，水面に情報表示を行うディスプレイが提案されている [6]．このディスプレイを用いることで，飲料表面に 10×10 のドットマトリクスパターンを動的に表示することが可能である．これらの研究では主に，日常的に使用される情報提示装置としての利用が想定されてきた．一方で，前述のとおり泡は儚い性質を持ち，作品の表現手法としてしばしば用いられる．そこで我々は，この泡がインタラクティブなアートやエンターテインメント作品のための素材としても有用であると考えた．

本研究では従来の電気分解気泡表示の課題解決，すなわち，低い表示応答速度を克服し，高画素化・階調表示を実現する目的で，2 種類の気泡表示手法を提案する．そして，この手法を用いて，アート作品等への応用を模索する 2 点の気泡表示デバイスを開発する．電気分解気泡を利用した情報表示装置自体は既に提案されているが，本研究ではこれまで検討されなかった流水表面への表示や高画素グレースケール表示などの技術課題に取り組んだ．本研究の貢献は，これらの表示手法の提案・実装を通して技術課題を解決し，その表示特性を評価したことである．本研究は TEI2021 にて登壇発表予定である [5]．

2 技術課題と提案手法

電気分解気泡表示の先行研究 [6] では，泡による画素を数秒で生成可能であったが，画素が自然に消えるまでに 1 分以上の時間が必要であった．よって，ディスプレイの応答速度は低く，アニメーションやスクロールなどの表現が困難であった．また先行研究では，電極への通電時間の調節によりグレースケールの泡ディスプレイが実現可能であると示唆されているものの，高画素な階調表示は未実装であった．そこで本研究では，低い表示応答速度を克服し，高画素化・階調表示を実現する目的で，2 種類の泡表示システムを提案する．

1 点目は，水路を流れる水面にティッカー状の泡表示を行う “UTAKATA” である（図 1）．UTAKATA では，先行研究での表示手法の応答速度を改善するために，流水路を採用した．水路の底面に 7 個の電極を直線状に配置し電気分解を行うことで，泡によるテキストメッセージを水路の下流に向かって流しながら表示できる．

2 点目は，カメラ撮影した来訪者の顔を，グレースケールの泡で表示する鏡のようなディスプレイ “Bubble Mirror” である（図 4）．液体が入った水盤状の装置を覗くと，その水面に顔画像が表示される．Bubble Mirror は，電気分解気泡により高解像度（1024 ピクセル）のグレースケール（8 段階）表示を実現する初めての試みである．

3 関連研究

3.1 泡を画素として用いる表示

泡を画素として用いる情報提示手法として，水中を上昇する気泡を用いるディスプレイ [3] やシャボン玉自体を画素として用いるディスプレイ [4] が提

Copyright is held by the author(s).

* お茶の水女子大学
† ヤフー株式会社

図 1. **UTAKATA** による表示例.（左）「**WISS**」（右）記号「○×△□」.

案されている．これらの装置では，気体の供給や制御のために画素・列ごとにエアポンプや電磁バルブなどの可動部分が必要である．よって，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．この問題を解決するために，電気分解を利用した泡ディスプレイが提案されている [6]．このディスプレイでは，微細な気泡によるドットを数秒で生成できるものの，気泡ドットが自然に消えるまでに 1 分以上の時間が必要であった．本研究で提案する UTAKATA では，流水を利用したティッカー状の表示機構を導入することで，応答速度の改善を行った．また，先行研究 [6] において，電極への通電時間を調節することでグレースケール表示が可能であると報告されているが，詳細な実装および調査は行われていない．本研究で提案する Bubble Mirror は，カメラ撮影した顔画像を 8 段階のグレースケールの泡で表示し，その上，従来の約 10 倍の 1,024 画素表示を可能にした．

高解像度の泡ディスプレイを実現するため，フェムト秒レーザ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生成するマイクロバブルを利用する手法が提案されている [7]．これにより機械的・電気的な部品を使わず光学的に 3D 画素を生成できるが，大型の装置を必要とする．また，高粘度溶液中に泡を生成するため応答速度は低い．我々の提案手法は媒体に低粘度の溶液を使用するため，[7] の手法と比較し応答速度が速い．電気分解により発生する泡を用いたアート作品 [1] が提案されている．この作品では，電極で発生した泡が音楽と同期し煙のように上昇するものの，泡を画素として用い情報表示する機能はない．我々は，電気分解により水面に形成される円形の微細泡群に焦点を当て，これをドット文字の画素として利用する．

3.2 儚さを持つインタフェースやアート作品

泡により表示された情報は脆く消えやすいため，ユーザの注意を引きつける．このように，限られた時間しか持続しない事象を利用したインタフェースを「エフェメラルユーザインタフェース」（EUI）と呼ぶ [2]．EUI を実現するために，落水・流水・泡のように，形状が持続しない素材が用いられる．Bit.Fall [10] は落水を使用した EUI の例である．滝のように水滴を落とし，その水滴自体を画素として用いてメッセージを表示する．水滴は地面に向かって落下するので，情報は約 1 秒間しか持続しない．チューブ内を移動する水滴を画素として用いるディスプレイも実装されている [9]．チューブの一部を縦に複数並べ，各チューブ内に水滴を注入し，その位置を制御することで文字を表示する．チューブが乱雑に配置されている部分では無秩序に流れていた水滴ビットが，チューブが揃えられた表示領域に近づくにつれ徐々に文字を形成し，消失する．このような一時的なメッセージ表示はユーザの注意を引きつけ，興味深い体験を創出する．泡も EUI によく使われる素材である．浮遊するシャボン玉に投影を行い空中ディスプレイとして利用する手法が提案されている [8, 12]．シャボン玉を指で触り破裂させることで，投影される映像が変化したり，効果音や香りの提示を行う．また，シャボン玉自体をタンジブルな入力のために利用する手法も提案されている [13]．石鹸水の入った容器の上にシャボン玉を置き，その位置を指で移動させ入力を行う．このように，水や泡は流れ，破裂し，消失することで儚さを体現するため，EUI のための素材や表現媒体として有用である．我々も水と泡の儚さに着目し，これを利用して独自の体験を提供することを目指す．

本研究で提案する表示手法に近いユーザ体験を提供すると考えられるアート作品は，Bit.Flow [9] と Wooden Mirror [11] である．Bit.flow は UTAKATA と同じく，水を流すことで情報を提示するティッカー状のディスプレイである．先述したように，チューブの中を流れる水滴を画素として用い，メッセージを表示する．Wooden Mirror は，木片自体を画素として使用したディスプレイである．Bubble Mirror と同様に，デバイスと対面する人の顔画像を約 30×30 画素で表示する．Wooden Mirror は木片の角度を制御することでグレースケール表示を実現するが，我々は可動部分のない電極への通電時間を制御することでグレースケール表示を行う．

4 実装

4.1 UTAKATA

本節では，流水を用いたティッカー方式泡ディスプレイ UTAKATA について報告する．図 1 に動作

図 2. (a) 電解液を入れる前の状態の UTAKATA. (b) 水回路の断面図．内箱の中では下流に向かって（右から左へ）水が流れ，外箱の中では上流に向かって水が流れる．赤い矢印は流れの方向を示す．

図 3. N 行目の配線を示す回路図．(N = 1~7)

例を示す．図 2(a) は，電解液を入れていない状態の装置の外観である．装置はアクリル製の内箱と外箱で構成され，内箱には表示のための浅い水路が設置されている．水路の上流部の底面に 7 個の電極（陰極）が直線上に配置されており，任意の複数電極に通電することで水面に泡による画素列を生成することがでる．これが下流に向かって流れることで，縦 7 画素のティッカーディスプレイを実現できる．本実装における主な技術的課題は，流れる水の表面に泡によるドットを生成し，流路上に歪みの少ないドット表示を実現することである．

4.1.1 流水の制御

図 1 に示すように，内箱が外箱の中に設置されており，中にインスタントコーヒーが入っている．内箱は厚さ 5 mm のアクリル板で作成され，大きさは約 35 cm × 21 cm × 6 cm である．内箱は 2 cm の脚を使用し外箱よりも高い位置に設置した．

水流を発生させるために，内箱に水を供給し排出する必要がある（図 2(b)）．水を供給するために給水ポンプを外箱に設置し，ポンプにつながるチューブを内箱の上流側に配置した．ポンプより送り込まれる水は，内箱上流部の貯水部に貯められる．このとき，ポンプの影響による乱流を緩和するために，貯水部と水路との間（陰極から 6 cm 上流の位置）に厚さ 1 cm のスポンジを配置した．

内箱の排水部には，アクリル板による堰，スリット，およびメッシュを設置した．泡表示を歪ませないために，水面付近の流れを均一に近づける必要がある．単純な堰の構造の場合，排水部では水面付近の水のみが流れるのに対し，上流部では水面だけでなく水深の深い部分でも流れが起きる．よって，上流部では水面流速が遅いのに対し排水部では流速が速くなり，この結果，下流部で流れが加速して泡表示が歪んでしまう．そこで，水底付近の流れと水面付近の流れとを分離するため，2.5 cm の脚を持つテーブルを設置し水路の底面を堰と同じ高さまで上げた．これにより，表示領域の水流を均一に近づけた．また，堰上部に微小な凹凸があると，特定の部分から集中して排水され，表示が歪む原因となる．そこで，堰の上に整流効果のあるスリット（幅 10mm，4 mm 間隔）と粗いメッシュ（約 4 mm）を配置し，堰を乗り越える際の水面の流れを均一に近づけた．

4.1.2 泡生成機構

電気分解気泡による表示を実現するため，内箱の上流部に共通陽極と画素表示用電極（陰極）を設置した．共通陽極には 15 cm×6.2 cm の銅板を用い，内箱の底面に設置した．画素表示用陰極には金メッキピンヘッダ部品を 7 個使用し，水路の入り口に一列に 7.6 mm 間隔で配置した．電解液は，先行研究 [6] と同様に炭酸水素ナトリウム (0.4 % w/v) とコーンスターチ (0.25 % w/v) を添加したインスタントコーヒー (1.5 % w/v のコーヒー粉を使用) を用いた．泡による画素を流れる水面上で拡散することなく保持するために，コーンスターチの量を先行研究より増量し，粘度を 15mPa·s とした．

図 3 に UTAKATA の回路図を示す．7 個の画素表示用電極が MOSFET を介して Arduino UNO に接続されている．MOSFET のゲートは Arduino に，ソースはグラウンドに，ドレインは電極に接続されている．Arduino が複数の MOSFET を活性化すると，対応する電極が接地される．接地された電極は電気分解の陰極として機能し，その電極から水素が発生する．図 3 (b) に示すように，直流電源の正の出力を共通陽極に，負の出力を接地に接続した．

図 4. **Bubble Mirror.** (a) 水盤の底面にマトリクス陰極群と共通陽極が配置されている．(b) 水盤の中を覗きこむと，水面に顔画像が表示される．(c) グレースケール（8 段階）の泡による顔画像表示の例．

図 5. **Bubble Mirror** のシステム構成．

図 6. 回路図．右側に N 行 M 列の配線を示す（$N = 1 \sim 32$, $M = 1 \sim 32$）．

4.2 Bubble Mirror

本節では，Bubble Mirror について報告する．図 4 に概要と使用例を示す．電気分解を利用した泡ディスプレイの先行研究 [6] では，画素数の拡張可能性やグレースケール表示の可能性が示唆されている．本研究では，これらの特徴を活かし，電気分解気泡を利用した高解像度のグレースケール表示を初めて実現した．図 4(a) に示すように，水盤の底面に 32×32 の画素表示用電極を設置した．そして，覗き込んだ人の顔をカメラ撮影し（図 4(b)），その顔画像を電気分解により生成する 8 段階のグレースケールの泡で表示する機構を実装した（図 4(c)）．本実装では，1,000 画素以上の泡による表示が可能なディスプレイの製作と，グレースケール表示のための適切な電極制御などの技術的課題に取り組んだ．

4.2.1 システム構成とユーザ体験

図 5 に Bubble Mirror の全体構成を示す．本システムは，水盤，Arduino UNO，フットスイッチ，USB カメラ，Processing プログラムが動作する PC から構成される．水盤の中には，インスタントコーヒー粉で黒く色づけされた電解液が入っている．PC と USB 接続された Arduino は，電気分解の電流制御とフットスイッチの読み取りを行う．PC は Arduino からフットスイッチの状態を受信し，表示画像データを Arduino へ送信する．

体験者がシステムの前に立つと，フットスイッチが体験者の存在を検出する．体験者が水盤を覗き込むと，カメラにより顔が撮影され，泡の画素により水面に顔画像の静止画が表示される．水盤の周囲には，覗き込む人の顔を照明する LED テープを貼り付けた．LED の光を拡散させるために，LED テープの上に厚さ 3 mm のドーナツ型の白い半透明のアクリル板を設置した．

4.2.2 泡生成機構

図 4(a) に，電解液が入っていない状態の水盤の底部を示す．関連研究の節で説明した Wooden Mirror の画素数を参考に，32×32 のマトリクス電極（陰極）を表示のために使用した．そして，マトリクス陰極の周囲に共通陽極を配置した．マトリクス陰極全体のサイズは 16 cm×16 cm である．陰極には金メッキピンヘッダ部品を使用し，共通陽極には銅テープを用いた．電解液には，UTAKATA と同様に炭酸水素ナトリウム（0.4 % w/v）とコーンスターチ（0.2 % w/v）を添加したインスタントコーヒー（1.5 %のコーヒー粉を使用）を用いた．

図 6 に Bubble Mirror で使用した回路図を示す．任意の電極を接地させることで，その電極が陰極として機能し，水素の気泡を生成する．画素ごとのハードウェアは，先行研究 [6] のアクティブマトリクス回路と同様である．一方，先行研究で実装した 100 画素のバイナリ表示機構では，鮮明な顔画像を表示するには不十分である．そこで本実装では 1,024 画素に拡張し，これらをパルス密度変調（PDM）することでグレースケール表示を実現した．図 6 の左

図 7. 各グレースケールレベルにおける実際の泡とその直径.

側に示すように，Arduino の 3 個のデジタル出力端子に 8 個の 8 ビットシフトレジスタを接続し，32 カラム 32 ラインの配線に接続した．Arduino からの制御で MOSFET が活性化すると，各ライン配線は接地される．図 6 の右側に，N ライン M カラムの交点にある 1 画素の表示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は，MOSFET と表示用電極で構成されている．Arduino からの制御で，任意の複数のカラム配線には High または Low の電圧がかかり，32 本のうち 1 本のライン配線が接地する．すると，交点部分の MOSFET が活性化し，接地されたライン配線上の選択された表示用電極が接地する．この過程を 32 本の各ライン配線について繰り返すことで，任意の電極を接地させることができる．接地した電極は電気分解の陰極として機能するため，その電極から水素の気泡が発生し，泡による表示が実現できる．電気分解用の電流を供給するために，安定化直流電源の正の出力を共通陽極に，負の出力を接地に接続した．

Arduino プログラムは，それぞれのライン配線上の任意の複数電極に 10 ms の通電を行う．これを 32 本のライン配線全てに対し行うため，全ラインを走査するために全体で 320 ms の時間を要する．電気分解電流の PDM 制御により 8 段階のグレースケール表示を実現するため，320 ms の全ライン走査を 7 回繰り返すプログラムを作成した．この 7 回の走査において，グレースケールのレベル N(0∼7) に割り当てられた電極に対して N 回 (合計 N×10 ms) 通電するようプログラムした．したがって，1 画面の描画には 7 回の走査 (所要時間は 2.2 秒) が必要であり，本ディスプレイのリフレッシュレートは 0.45 Hz となる．図 7 に，陰極への通電を PDM 制御し，生成した泡を示す．図の上部の数字はリフレッシュサイクル中に各電極に印加した電流のパルス数を表す．

4.2.3 顔画像処理

PC 上の Processing プログラムが訪問者の顔を撮影し，その画像を 32×32 画素の 8 段階グレースケール画像に変換する．まず，本システムの前に設置されているフットスイッチの上に人が立つと，カメラが顔を撮影し，顔認識を行う．顔認識ライブラリには OpenCV for Processing を使用した．次に，カメラフレームの中心付近で検出された顔画像を 100 ms 以上の間隔で 5 枚保存する．保存した画像は 256 階調の 32×32 画素の画像に変換され，その中からブレのない最適な画像を選択する．ここでは，コントラストが最大となる画像（隣接画素間における，画素値の差の絶対値の合計が最大となる画像）を最適画像と判断した．最適画像の各画素値は降順ソートされたのち 8 区画に分けられ，各区画ごとに 8 段階のグレースケール値が割り当てられる．結果として，32×32 画素の 8 段階グレースケール画像が生成できる．この画像データを PC から Arduino に送信し，Arduino がこれに応じて PDM の調節をし各電極に通電することで，グレースケールの泡表示を実現する（図 8）.

図 8. (a) 顔認識で取得した顔画像．(b) 32×32 画素の網点画像（8 段階）(c) 実際の泡による表示.

5 表示特性と評価

5.1 UTAKATA

図 1 は四文字のアルファベットと四個の記号をそれぞれ表示した例である．このとき，20 V の電圧を印加し，各電極に流れた電流値は約 23 mA であった．また，表示領域の水位は約 4 mm であった．陰極の間隔が 7.6 mm であるため，垂直方向の表示画素密度は約 3 dpi であった．泡による画素は直径約 5 mm であり，中央の泡の流速は，陰極付近で約 1.3 cm/s であった．図 9 に，水流による泡文字の時系列変化を示す．本システムは 25 cm の表示領域幅（陰極から排水部までの長さ）を持つ．画素の直径が約 5 mm であることから，横幅 5 ドットの文字であれば，隣接する画素との間隔を 5 mm 以下に設定することで，最大 5 文字まで同時観察可能であった．

図 9. 泡文字「WISS」が流れながら表示されている．上から下に向かって，「W」,「WI」,「WIS」,「WISS」と表示されている．

5.2 Bubble Mirror

マトリクス陰極全体のサイズが約 16 cm×16 cm であるため，表示画素密度は 5 dpi であった．鮮明な表示を得るために必要な電解液の水位は約 1 cm であり，このとき印加した電圧値は 30 V であった．全体として約 300∼400 mA の電流が使用され，通常の使用では約 12 W の電力を消費する．

Bubble Mirror の Black-to-light-gray (BTG) 応答時間と White-to-dark-gray (WTG) 応答時間を測定した．先行研究 [6] と同様に，0 % gray to 80 % gray 時間を BTG 応答時間とし，100 % gray to 40 % gray 時間を WTG 応答時間とした．測定のために，Bubble Mirror にグレースケールレベル 7 の泡を 1 画素のみ表示し，これをビデオカメラで記録した．このとき，泡表示のために必要な電圧値は 30 V で，電流の平均値は 1.2 mA であった．結果としては，BTG 応答時間は約 4 秒，WTG 応答時間は 1 分以上必要であった．WTG 応答時間は長いものの，体験者の痕跡が残留することで，本システムのコンセプトを他の鑑賞者に伝える効果もあると考えている．WTG 時間がユーザ体験に影響を与えるようであれば，ディスプレイに電動ファンを取り付ける，体験者自身に水面に息を吹きかけて泡を消してもらう指示をするなどの手段を検討したい．

6 議論と今後の課題

本研究では，UTAKATA の装置の排水部にスリットとメッシュを配置した．しかし，スリット間の壁やスリット下端の凹凸が均一な流れを妨害している可能性がある．より歪みを軽減して表示品質を高めるため，排水部の設計を改善する予定である．

Bubble Mirror の動作を確認するため，著者ら 3 名（うち 1 名は UTAKATA 担当著者で Bubble Mirror は初体験）が使用体験した．この結果，泡による顔画像が自身の顔であると容易に認識できた（図 8）．また，予想以上に気泡の出現が速いことが確認され，BTG 応答時間が十分短いことを裏付けた．今後はより多くの人に体験してもらい，フィードバックをもとに装置の改善を行う．

参考文献

[1] J. Bobrow. H_2 Bubble Display. `http://cargo.jonathanbobrow.com/Bubble-Display`, 2012.

[2] T. Döring, A. Sylvester, and A. Schmidt. A Design Space for Ephemeral User Interfaces. In *Proc. of TEI '13*, pp. 75–82, 2013.

[3] J. M. Heiner, S. E. Hudson, and K. Tanaka. The Information Percolator: Ambient Information Display in a Decorative Object. In *Proc. of UIST '99*, pp. 141–148, 1999.

[4] S. Hirayama and Y. Kakehi. Shaboned Display: An Interactive Substantial Display Using Soap Bubbles. In *Proc. of SIGGRAPH '10*, pp. 1–1, 2010.

[5] A. Ishii, M. Fukushima, N. Tanaka, Y. Matoba, K. Ikematsu, and I. Siio. Electrolysis Bubble Display based Art Installations. In *Proc. of TEI '21*, to appear in February 2021.

[6] A. Ishii and I. Siio. BubBowl: Display Vessel Using Electrolysis Bubbles in Drinkable Beverages. In *Proc. of UIST '19*, pp. 619–623, 2019.

[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 *Proc. of ACE '06*, 2006.

[9] J. Popp. Bit.Flow. `https://vimeo.com/22390871`, 2011.

[10] J. Popp. Bit.Fall. `https://www.ludwigmuseum.hu/en/news/julius-popp-bitfall`, 2016.

[11] D. Rozin. Wooden Mirror. `http://www.smoothware.com/danny/woodenmirror.html`, 1999.

[12] 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 *Proc. of CHI '14*, pp. 2863–2872, 2014.

[13] A. Sylvester, T. Döring, and A. Schmidt. Liquids, Smoke, and Soap Bubbles: Reflections on Materials for Ephemeral User Interfaces. In *Proc. of TEI '10*, pp. 269–270, 2010.