

電気分解を利用した泡ディスプレイ

石井 綾郁^{1,a)} 椎尾 一郎^{1,b)}

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。従来の泡ディスプレイでは、コンプレッサにより外部から取り込んだ空気をコンピュータと電磁バルブで制御し、泡の位置と量を調整して文字や図形を表示する方式が一般的である。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。そこで筆者らは、水などの液体の電気分解により発生する気体に着目し、これを利用した泡ディスプレイを提案する。電気分解により液体から気体が発生するため、本方式では表示のための気体を外部から供給する必要がない。また、可動部分の無い電極だけで構成可能である。さらに、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。本論文では、電気分解を利用した泡ディスプレイの最初の試作として、5×7画素ドットマトリクスディスプレイを作成し、動作を確認したので報告する。

1. はじめに

言うまでもなく、水は人の生活に欠かせない。人は日々カップに飲料を注ぐ。また、庭園の池、生け花の水盤、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、コーヒー、抹茶には大気を取り込んで泡立ちやすい性質がある。ビールのような発泡性アルコール飲料や炭酸水などは、水に溶け込みやすい炭酸ガスを内包し、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、そ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。ラテアートまたはデザインカプチーノは、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ものであるが、これを自動化し、スマートフォンなどから送られた画像をカプチーノの液面に印刷する装置が実用化されている^{*1}。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^{*2}[7]。釉薬のかかった部分と素焼きのまま残した部分をカップの底部に作り込みビールを注ぐと、素焼きの粗い表面からより多くの泡が発生する。これを利用すると、ビー

ルの液面に素焼きのパターンに一致する泡パターンが現れる。この現象を利用し、お祝いのメッセージを表示する製品である。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、刻々と変化する実時間の情報を動的に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[1] 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。上昇する泡を用いたアンビエントな情報表示は、その情報がユーザにとって不要な際には装飾として背景に溶け込むので、煩わしさが無い利点がある。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。

液体から発生する泡を利用すれば、コンプレッサなどの外部から空気を供給する機構を省略できる。前出の信楽焼ビアカップでは、ビールに溶解している炭酸ガスを利用して泡表示を行っている。ビールには1kgあたり2.75Lの炭酸ガスが含まれていて、常温常圧ではそのうちの2L程度が放出される[6]。一方で、水そのものは水素と酸素の化合物であり、これを電気分解することで水素と酸素の気体が発生する。1molすなわち18gの水を電気分解すると1molの水素と0.5molの酸素が発生し、合計1.5molの気体が発生する。1molの気体が常温常圧で22.4Lであることから、18gの水から33.6Lの気体が発生することになる。1kgの水からは約1,900Lの気体を得られるので、電気分解を用

¹ お茶の水女子大学大学院情報科学コース

a) ishii.ayaka@is.ocha.ac.jp

b) siio@is.ocha.ac.jp

^{*1} <http://www.coffeeriipples.com>

^{*2} <http://www.kdd1.com/391/moji-bi-ru105.html>

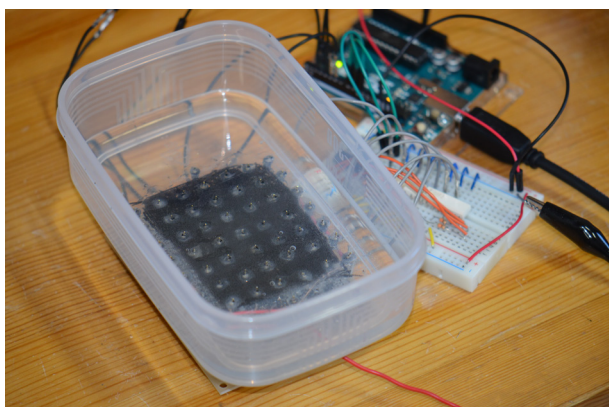


図 1 試作した泡ディスプレイ

いることで炭酸飲料よりも液体重量当たり約 900 倍の泡を生成できる。加えて、炭酸飲料から発生する泡は、大気圧に戻した直後にほとんどが気化してしまうので、長時間の動的情報表示には不向きである。大気圧に置いた後も、ある程度の時間絶え間なく発生し続けるものの、発生を中断させることは容易ではない。これに対して、電気分解では泡を大量に発生させることができる上に、電力供給を停止すれば容易に発生を止められる。したがって、表示が必要な時に、必要な量だけ泡を生成することができる。

1mol の 1 価イオンを電気分解により析出させるのに必要な電気量はファラデー定数として知られていて、 $9.6 \times 10^4 \text{C/mol}$ である。水の電気分解で発生する水素に着目すると、 $9.6 \times 10^4 \text{A}$ の電流を流せば毎秒 0.5mol すなわち毎秒 11.2L の水素が発生することになる。泡ディスプレイのために毎秒 1mm^3 程度の気体が必要であると仮定すると、これに必要な電流は 8.6mA である。これはコンピュータ制御された電子回路で容易に制御できる電流量である。以上から、電気分解により発生する泡を使用した表示装置は、コンピュータ制御が容易で、実現可能であると考えられる。また、電極だけで構成できるため、コンプレッサや電磁バルブなどの可動部分が不要である。さらには、プリント基板や金メッキされた高密度端子などの既存の電子回路実装技術を応用できるので、高密度、高解像度なディスプレイの実現が容易であると期待できる。

本論文では、電気分解を利用した泡ディスプレイの最初のプロトタイプとして、 5×7 画素ドットマトリクスディスプレイを作成し、動作を確認したので報告する。

2. 泡ディスプレイ

2.1 概要

図 1 に試作した泡ディスプレイの外観を示す。14.5cm×9cm のプラスチック容器に、少量の重曹とインスタントコーヒー粉末を溶かした水を深さ 0.8cm 程度まで入れる。内部構造が明らかになるように、図はコーヒー粉末を入れる前の状態を示している。容器の底面には 5×7

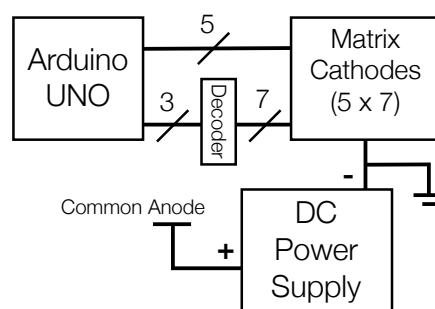


図 2 構成図。35 個の格子状陰極と共通陽極は液中に設置される。

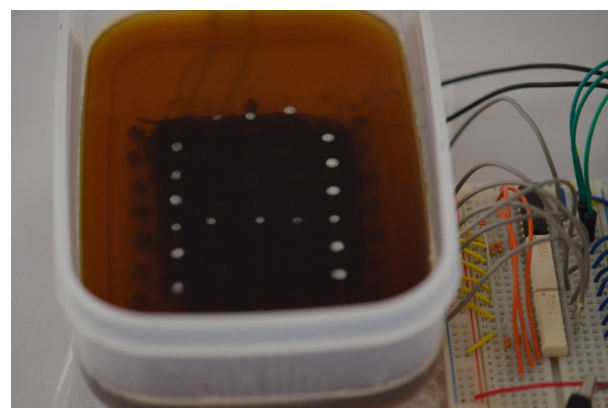


図 3 泡により“A”を表示した例

の格子状に配置された 35 個の表示用陰極電極が配置されている。また、表示用電極群の周囲には共通の陽極電極を配置している。図 2 に全体の構成図を示す。 5×7 の電極から構成されるマトリクス電極群に、マイクロコンピュータ Arduino UNO と安定化電源装置^{*3}が接続されている。Arduino からの制御で、35 個の陰極電極のうち、任意の複数電極が接地される。共通の陽極電極は、電源のプラス側出力に接続されている。

本システムを動作させることで特定の表示用陰極電極から水素が発生し、液内を上昇し水面に到達する。それぞれの電極から水面に達した微細な泡は、表面張力により集結し、直径 5mm 程度の白い微細泡群となる。この泡群と背景の褐色のコーヒーとの明度差によりドット表示を実現する。従来のドットマトリクスディスプレイで使用するドット文字を参考にして 5×7 のマトリクスパターンを作成し、ドット文字を表示するように Arduino にプログラムした。これにより任意の英数字を 1 文字表示できる。本システムでの表示例を図 3 に示す。

2.2 電極材料

電気分解とは、外部から電流を供給することで化合物を単体に分解することである。電解液に 2 種類の電極を入れ電極間に電圧をかけると、陽極では酸化反応が、陰極では還元反応が起きる。電気分解に用いる電極や電解液の種類

^{*3} SKY TOPPOWER STP3005 30V/5A/150W

により起こる反応が変化する。

電気分解の陽極に金、白金、炭素以外の素材を使用すると、陽極が金属イオンになり電解液中に溶け出してしまふ。また、水の電気分解のように陽極から酸素が発生する場合、炭素電極は二酸化炭素に変化し劣化してしまふ。このため、陽極の材料としては金もしくは白金が望ましい。一方で、陰極は溶出しないため、使用する金属材料の選択肢が多くなる。

今回の試作では陽極、陰極の双方に、既存の電子部品として入手が容易な金メッキピンヘッダ部品^{*4}を使用した。しかし、泡ディスプレイを長時間使用していると、陽極に緑青が発生していた。ピンヘッダの金メッキの下地が銅であるため、これが露出し酸化したと考えられる。また露出した際に、一部がイオン化し溶出している可能性もある。今回使用したタイプのコネクタ電子部品には耐久性を上げるためにコバルトやニッケルを0.3%程度含有する硬質金メッキ^{*5}が施される。この状態で電気分解を行ったことで金メッキが劣化し、下地の銅が露出してしまったと考えられる。将来的には溶出の可能性がない純金メッキのピンヘッダや、金箔のような金単体を陽極として用いたいと考えている。

2.3 電解液

本ディスプレイは日常空間に置かれた水面を対象とし、可能な限り表示媒体が飲食可能なディスプレイにしたいと考えている。そこで、安全な水溶液を電解液として用いることにした。

安全な水溶液であっても、液中に酸化されやすいハロゲン化物イオンがある場合、ハロゲンの単体が陽極から発生する。例えば消毒のために塩素が含まれる水道水では、電気分解により有毒な塩素ガスが発生する。このため水道水は本研究の目指す泡ディスプレイに不向きである。ハロゲン化物イオンが含まれていないときは、陽極からは無害な酸素が発生する。一方、銅、水銀、銀、白金、金などの、水素イオンよりイオン化傾向の小さい金属の陽イオンが溶液に含まれていないとき、陰極から水素が発生する。

注意して電解液を選択すれば、無害な水素と酸素のみを発生させることができる。本ディスプレイでは、電解液に不純物をほとんど含まない精製水を用いた。しかし精製水自体は絶縁体であり電気をほとんど流さないため、電解質を加える必要がある。そこで、炭酸水素ナトリウム（重曹）を精製水に加え、電解液とした。重曹は食品添加物でもあるので飲食しても安全である。本研究では、濃度0.8%の炭酸水素ナトリウム溶液を用いている。

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、泡ディスプレイの

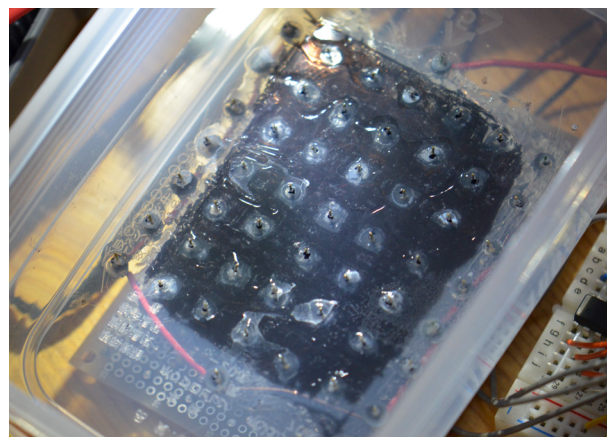


図 4 中央に 5×7 の陰極を、周囲に共通の陽極を配置。

画素を構成する泡が見えにくい問題があった。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を溶液 100g あたり約 2g 入れて着色した。これにより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。

2.4 マトリクス電極

一般的な平板ディスプレイの配線と同様に、ディスプレイ面横方向に配線するライン配線と、縦方向に配線するカラム配線を用いたマトリクス配線を行うことにした。これによりライン配線数とカラム配線数の積の画素を制御できる。

当初の試作では、単純なパッシブマトリクス方式による画素制御を試みた。すなわち陽極と陰極の対で1画素を構成し、陽極をカラム配線に、陰極をライン配線に接続した。これにより、1ラインずつ時分割して電気分解を行う。例えばNライン目の表示を行う際には、ライン配線のNラインのみを安定化電源装置のマイナス端子に接続し、同時に、泡を発生させたい箇所のカラム配線を電源のプラス端子に接続する。電気分解用電流のon/offにはフォトカプラを用い、これをArduinoで制御するようプログラムした。しかし、この方式では、ラインまたはカラムを共有する他の画素に深刻なクロストークが発生した。溶液を通じて電流が流れるため、交点以外の画素であっても、電源に接続している側の電極から泡が発生したのである。パッシブマトリクス方式のクロストークは、重曹の濃度を調整し、画素間に絶縁壁を設置するなどすればある程度は抑えられると考え実行したが、十分な改善はみられなかった。

そこで本研究では、クロストークを根本的に解消できるアクティブマトリクス方式を採用した。アクティブマトリクス方式は、ライン配線とカラム配線の交点にFETなどによるスイッチング素子を設置し、ライン・カラム線が活性化されたときにのみ画素を表示する手法である。画素ごとに素子が必要になるためパッシブマトリクス方式と比較し高コストであるが、現在の平板ディスプレイでは一般的

^{*4} ダイセン電子工業 PH-S24

^{*5} <http://www.eptec.co.jp/technology/06.php>

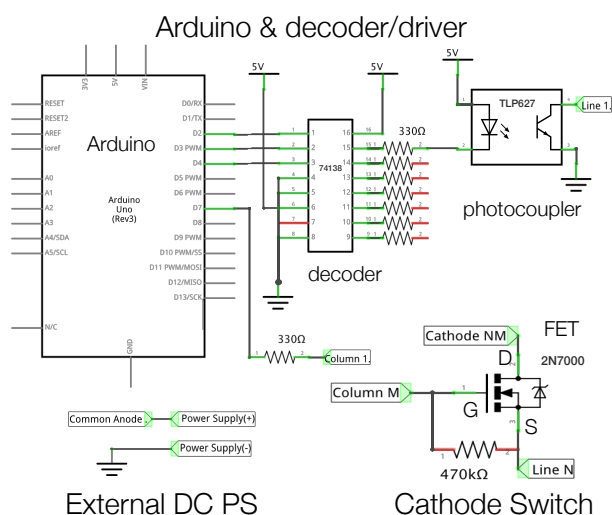


図 5 制御回路図. Line 1 と Column 1 の配線, および Line N と Column M の交点での配線を示す.

な手法である。

図4に容器底部で電気分解を行う電極部分を示す。アクティブマトリクスにすることで複雑になる回路を少しでも簡素化するために、画素用の電極は陰極のみとした。そこで、容器底部中央に5×7個の陰極をマトリクス状に配置した。試作電極は、プリント基板上のマトリクス配線に接続される。電極間隔は一般的なピンヘッダ部品のピッチ(2.54mm)の整数倍、今回の試作では4倍の10.2mmとした。一方、35個の画素用陰極の周囲には相互に配線接続された16個の電極を配置し、これを共用の陽極とした。画素用陰極と共用陽極との間で電気分解が行われるので、共用陽極からも気体(酸素)が発生する。しかし、図3に示すように、共用陽極からの気体は表示品質にほとんど影響しなかった。陽極が16箇所分散していることと、陽極から発生する酸素の量は陰極から発生する水素の量の1/2であることなどにより、酸素気体の泡が目立たなかったためと考えられる。

2.5 制御回路

泡ディスプレイを実現するために、Arduino, ドライバ回路, アクティブマトリクス回路による制御回路を作成した. また図2に示したように, 市販の直流安定化電源装置を用意し, 電気分解のための電流を供給した. アクティブマトリクス回路を簡素化するために, 制御回路と電気分解用電源の接地は共通とした. 電気分解用電源のプラス出力端子は, 液中の共通陽極に直接接続される. また, 制御回路により, 泡を発生させる対象の画素電極のみが接地に接続される.

制御回路の回路図を図5に示す。図の上部では、Arduinoとこれに接続したデコーダ、ドライバ回路を示す。ここではカラム配線、ライン配線のうち1本のみを示し、残りの配線は省略している。カラム配線は交点のFETをスイッ

チングするためにのみ使用されるので負荷が小さい。そこで、5本のカラム配線は、Arduinoのデジタル出力端子に保護抵抗を介して直結した。一方、ライン線は順次活性化する必要がある。そこで、Arduinoの出力端子数を節約するために3 to 8デコーダを使用した。今後は、多段に配線したシフトレジスタをライン、カラムの制御に用いることを検討している。これによりArduinoとの接続端子数を削減し、高画素の泡ディスプレイに対応できると考えている。

制御回路と電気分解用電源の接地が共通であるため、ライン配線には電気分解のための電流が流れる。そこでライン配線はドライブ能力に余裕のあるスイッチング素子を介して接地と接続した。現在はパッシブマトリクス試作の際に使用したフォトカプラ*6を流用しているが、より安価なFETを用いたドライバ回路に置き換える予定である。

図5下部に、NラインMカラムにある1画素の陰極電極をスイッチングする回路を示す。ライン線は接地もしくは絶縁状態になり、カラム線にはTTLレベルのHighもしくはLowの電圧がかかる。ライン線が接地に接続され、カラム線がHighになると、交点のMOS FET^{*7}のゲート(図中の“G”)～ソース(図中の“S”)間に電圧が発生し、ドレイン(図中の“D”)～ソース(図中の“S”)間が導通する。ドレイン側には画素を構成する電極が接続されているので、これがソース側のライン線に接続することで接地し、電気分解の陰極として機能する。ゲート～ソース間は470k Ω の安定化抵抗で接続されている。

2.6 制御プログラム

マトリクス回路をダイナミックに走査し、泡で文字を表示するプログラムを Arduino に組み込んだ。このプログラムは最初に、表示を行う画素陰極のライン線のみを接地に接続し、それ以外のライン線をハイインピーダンス状態にする。次に、泡を出す対象のカラム線を High に、それ以外のカラム線を Low に設定し、表示したいパターンを出力する。この状態を 30ms 保持し、その後、次のライン線の表示を行う。マトリクス電極は 7 ラインあるので、210ms で電極全体に対する表示処理が終了する。以上の処理を繰り返し実施することで、1 文字の描画が行われる。

3. 性能評価

本システムで電気分解を行い、発生する水素ガスで A の文字を表示した様子を図 3 に示す。このとき、安定化電源装置から 6V を印加し、流れた電流は 0.4mA であった。1 章で述べた計算から全体で毎秒約 0.05mm³ の水素が発生したと考えられる。A の文字は 18 画素の電極で構成されるので、1 画素あたり毎秒 0.003mm³ の気体で表示している。

*6 東芝 TLP627-4

*7 On Semiconductor 2N7000

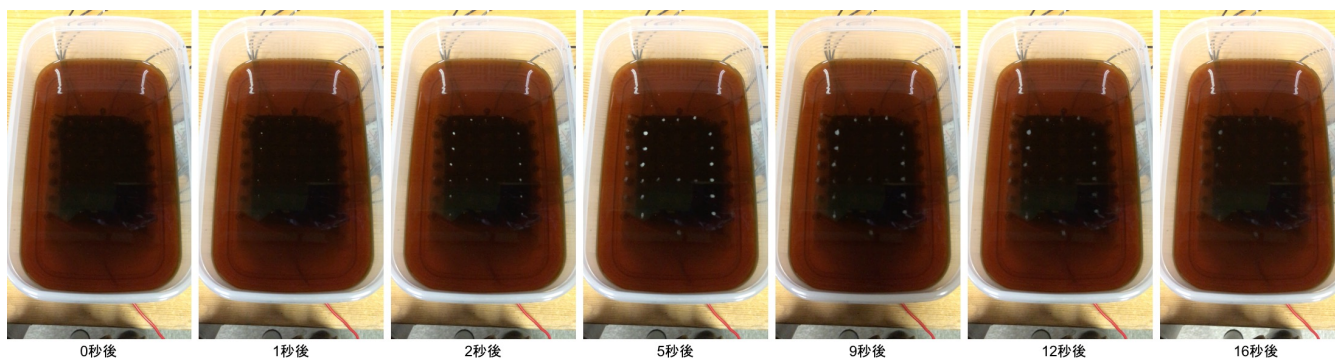


図 6 表示開始と停止の様子。電流供給を 0 秒に開始，7 秒に停止した。

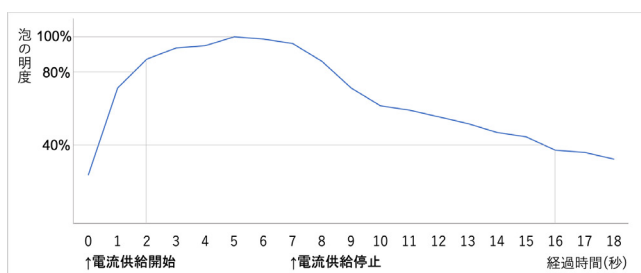


図 7 最大明度を 100%に正規化した泡の明度変化。

図 3 で示されるように、現状の泡ディスプレイの各画素には明るさのムラがある。表示用陰極の汚れ、溶液に接している面積のばらつき、共通陽極までの距離の違いなどが原因として考えられる。このような状況が各電極で均等になるよう設計・調整することで画素明度のばらつきを改善できるであろう。また、画素明度のムラをあらかじめ測定し、電極ごとに通電時間を調整することで、均等な明るさが得られるとも考えている。

本システムは、泡の生成と停止で表示開始・停止するため、通常の表示装置と比較して表示応答速度は低速である。6V を印加する条件で、電流の供給を始めてから停止し、泡が消えゆくまでのディスプレイの様子を図 6 に示す。また、電流の供給を始めてからの経過時間と泡の明度との関係を図 7 に示す。このとき、電流の供給を停止したのは供給を始めてから 7 秒後である。表示の明るさを測定するために、泡ディスプレイの写真を PowerPoint に取り込み、泡部分をカラーピッカーで取得し、HSB 色空間の明度を測定した。全 18 画素のうちもっとも明度が高かった 2 行 1 列目の泡を測定対象とし、表示が安定した状態の明度を 100% に正規化した。非表示の状態から最高値の 80% の明度になれば明瞭に表示されていると考え、文字が表示されるのは電力供給してから約 2 秒後である。また、同様に最高値の 40% の明度になれば文字が消失したと見なすと、文字が消失するのは電力供給を停止してから約 9 秒後である。

応答速度やコントラストなどのディスプレイとしての性能は、供給する電流値や、電解液および着色剤の濃度など

により変化すると考えられる。今後、これらの値を変化させ、提案システムを改良していきたい。

4. 今後の展開

本方式により、従来の泡ディスプレイの研究例で示されているような泡によるアンビエントディスプレイが、さらに簡素で実用的な機構で可能になる。例えば、水槽や水盤などに泡で情報を表示することで、公共の場や家庭におけるアンビエントな情報提示が可能である。湯のみやマグカップの底に電極マトリクスを入れることで、コーヒーのような飲み物に天気予報、メッセージ、株価などの情報を表示できる。センサと組み合わせることも可能である。例えば、マグカップに温度センサを取り付けることで、コーヒーの温度をインタラクティブに水面で表示することができよう。

また、液体を水面から固化していく仕組みを取り入れれば、泡による 3D オブジェクトの生成も可能だと考えている。ゼリーや寒天の素を入れた電解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、3D オブジェクトを作成できよう。同様に電解液を表面から氷結させることで、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。氷の造形物を出力できる 3D プリンタが提案されているが [11]、我々の手法を用いれば氷の中に泡で 3D オブジェクトを生成でき、表現の可能性が広がるであろう。さらに、人体に無害な電解液を選べば、作成したオブジェクトを食べることもできる。上述したゼリー、寒天に加えて、例えばクレープ、ホットケーキの生地で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可能であろう。

今回のプロトタイプでは表示方法を 2 値のドット表示としたが、通電時間を制御することでグレースケール表示も可能であると考えている。さらに画素数を上げることで、人が認識可能な画像表示も可能であろう。Daniel Rozin の Wooden Mirror^{*8}では、30×30 画素程度で画像表示を行い、対面した人の顔をインタラクティブに表示している。これ

^{*8} <http://www.smoothware.com/danny/woodenmirror.html>

と同様に、本方式を利用して水盤の中に 30×30 程度のマトリクス電極を作り電気分解を行うことで、覗き込んだ人の顔を表示するインタラクティブアートが作成できると考えている。

5. 関連研究

水中の気泡を用い情報提示を行う研究が多数存在する。Information Percolator[1] は、水中の気泡を利用したアンビエントディスプレイである。Water Canvas や Liquid Sculpture は、水中の気泡を用いたインタラクティブアートである [10]。これらの研究では、水槽内に外部から空気を送り込み、水中を上昇する泡を用いて情報提示する。泡の生成と制御にコンプレッサや電磁バルブを用いているので、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。バブルディスプレイ [9] では、水中の気泡に映像を投影し、ユーザが気泡の動きや形状を制御することで、ユーザと映像とのインタラクションを実現している。この研究では、水中の気泡は映像を投影するためのスクリーンとして使われている。本研究では、気泡自体を画素として用いるディスプレイを提案した。

空気中で生成される泡を利用したディスプレイも提案されている。柏木らは、静電気でシャボン玉の動きを制御することで、シャボン玉による三次元ディスプレイの実現を試みた [8]。しかし、重力の影響によりシャボン玉が下方に曲がったり落下したりするなど、多くの課題が指摘されている。Hirayama らは、シャボン玉を飛散させるのではなく、マトリクス状に配置しその場で膨張・収縮させた Shaboned Display を提案している [2]。安定した情報提示が可能だが、シャボン玉の発生のためにエアポンプをアレイ状に並べる必要があり、高画素表示を安価に実現することが困難である。Bubble Cosmos[4]、SensaBubble[5]、Bubble Cloud[3] では、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提案している。シャボン玉へのプロジェクションを実現するために、シャボン玉の中に白い霧を入れたり、小さいシャボン玉の集合体を用いている。これらのシャボン玉を用いたディスプレイの研究では、シャボン玉に触れたり、近くで手を動かしたりすることによる、人と表示のインタラクションを提案している。我々の手法においても、泡に触れる、息を吹きかけるなどといった行動によるインタラクションが可能であろう。

6. まとめと今後の課題

本論文では、電気分解を利用した泡ディスプレイを提案し、最初のプロトタイプとして 5×7 画素ドットマトリクスディスプレイを開発した。また、開発したディスプレイを用いて英数字 1 文字の表示が可能であることを確認した。本方式は電極だけで構成できるため可動部分が不要であり、

既存の電子回路実装技術を応用できるので、高密度、高解像度な泡ディスプレイの実現が容易であると考えている。今後は、表面実装部品、高密度コネクタなどの既存の実装技術を利用することで、ディスプレイの画素数と解像度を向上させたい。また、グレースケール表示を実現することで、ディスプレイの表現の幅を拡張したい。さらには、ゼリーで泡を固定することによる食べられる 3D オブジェクトの作成や、インタラクティブアートへの展開も検討している。

参考文献

- [1] Heiner, J. M., Hudson, S. E. and Tanaka, K.: 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 (1999).
- [2] Hirayama, S. and Kakehi, Y.: Shaboned Display: An Interactive Substantial Display Using Soap Bubbles, In *Proceedings of SIGGRAPH 2010 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '10, pp. 21:1–21:1 (2010).
- [3] Kubo, Y., Tomita, H., Nakamae, S., Hoshi, T. and Ochiai, Y.: 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. 41:1–41:4 (2016).
- [4] Nakamura, M., Inaba, G., Tamaoki, J., Shiratori, K. and Hoshino, J.: 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 (2006).
- [5] Seah, S. A., Martinez Plasencia, D., Bennett, P. D., Karnik, A., Otrocol, V. S., Knibbe, J., Cockburn, A. and Subramanian, S.: 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 (2014).
- [6] 小武山温之, 中井孝雄: 発泡飲料製造法, 日本醸造協会雑誌, Vol. 58, No. 5, pp. 423–428 (1963).
- [7] 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, Vol. 43, No. 2, pp. 57–63 (2010).
- [8] 柏木 剛, 谷川智洋, 廣瀬通孝: 静電気を用いた実体型三次元ディスプレイに関する研究, 情報処理学会研究報告エンタテインメントコンピューティング (EC), Vol. 2006, No. 39 (2006-EC-004), pp. 23–30 (2006).
- [9] 佐川俊介, 小川剛史: バブルディスプレイ: 水中の気泡を用いたインタラクティブ映像システム, 情報処理学会論文誌デジタルコンテンツ (DCCON), Vol. 2, No. 1, pp. 16–23 (2014).
- [10] 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, Vol. 2, pp. 29–36 (2002).
- [11] 藤田大樹, 中野亜希人, 羽田久一: Elsa: 氷を素材とした 3D プリンターの開発, 研究報告デジタルコンテンツクリエーション (DCC), Vol. 17, No. 22, pp. 1–7 (2017).