

水素微小気泡を用いた水中ディスプレイの電極構造

秋廣 誠*・佐野 司*

Electrode Structure in Underwater Display with Hydrogen Micro Bubble

Makoto Akihiro* and Tsukasa Sano*

抄 録

筆者らは、流体力学の実験で用いられる水素気泡法の特徴に着目し、微小気泡群により2次元画像を表示するシステムの技術基盤を構築している。水中の気泡を利用したメディア芸術や3D表示システムはすでに多くが提案されているが、いずれも装置然としており、柔軟な実装を実現できるものは無い。筆者らは、水素気泡法が本質的に備える単純さを損なうことなく、2次元の画像情報を表示できるシステムの考案を提出している。本稿では、本システムの実現に不可欠な要素のなかでも、カソード（陰極）の配列の構成と、生成される気泡群の拡散との関係について議論し、実験装置を用いて気泡を観察した。観察を踏まえ、本考案の有効性と、カソード配列の課題点について確認した。

キーワード：Media Art, Fluid Dynamics, Hydrogen Micro-Bubble Method, Underwater Display

1. はじめに

筆者らは、流体力学の実験で用いられる水素気泡法の原理を用いた、水中に情報を表示するシステムの技術基盤を構築しており、その考案を提出している¹⁾。水中の気泡を利用したメディア芸術や3D表示システムはすでに多くが提案されているが、仕組みが大がかりであるか、あるいは装置然としている。本研究構想では、水素気泡法が本質的に備える単純さを損なうことなく、情報を表示できるシステムを目指している。

本稿では、関連研究と本考案の違いを述べながら、本研究の位置付けを議論する。次い

で、本システムの実現に不可欠な要素について、予備実験等で得られた知見を踏まえて、気泡の振る舞いを中心に議論する。さらに、実験装置によって気泡を観察することで、気泡による画像が視認できる条件等を検討する。最後に本システムの表現メディアとしての有用性や制約について議論する。

2. 関連研究

気泡や流体を用いた様々な情報表示方法が提案されている。これらをメディア芸術系と3D表示デバイス系に分けて述べ、それらを踏まえた上で、本研究に関して述べる。

* 筑波学院大学経営情報学部、Tsukuba Gakuin University

2. 1. メディア芸術

現代のメディア芸術の分野において、日常的なモチーフや自然現象を契機とした表現が様々に実践されている。その中でも、水を利用する提案として、鈴木らは、複数の垂直方向の水路に気泡を積極的に浮上させ2D像を生成させる作品を発表している²⁾。現象そのものを鑑賞する研究としては、関根らが、オイルの熱対流の分布を積極的に制御して、特異な視覚表現を実現している³⁾。

2. 2. 3D ディスプレイ

一方で、VR・MRを含むICTの発展と平行して、例えば3D ディスプレイにおける焦点調整と運動視差の課題の解決手段として、水に注目する動向がある。例えばNakayamaらは、周期的に減圧する水槽内へのレーザー照射による、3D映像生成技術を開発している⁴⁾。Kumagaiらは、静置したグリセリンにレーザーを照射して3D像を生成させている⁵⁾。いずれもアニメーションに必要な描画のリフレッシュ動作を念頭においており、3Dを表示させる各ピクセルにはレーザーでアクセスさせるという高度な技術が要求される。しかし、これらに類する研究の必然として「装置化」の傾向があることを指摘できる。たとえば、鈴木による作品では、水槽内の液体の種類には制約が無い一方で、気泡をそれ自身の浮力で所定の経路上を上昇させる為に、専用に設計された水路が必要である。Nakayamaら、並びにKumagaiらの研究では、水槽下部にレーザー発振器や偏向機器、圧力制御装置などの機器が必要であるのみならず、表示部である水槽内の成分構成はクリティカルであり、水槽と装置は密接に関係しなければならない。

2. 3. 本研究構想の志向

本研究構想は、表示の高品質化や安定性よりも、環境の特性に応じた柔軟な実装を

志向する。すなわち、水素気泡表示システムを「仕組み」として具現化することを志向し、多様な形相を持つ「水」にイメージ表示の環境を求める。また、気泡が水中で躍動したり、霧散したりする視覚的な意外性を有したまま、情報を表示できるようにする。

3. 水素気泡によるディスプレイ

本考案は、水素気泡法を応用したものである。本章では、水素気泡法のあらましと、本研究の表示法の主要な要素について述べる。

3. 1. 水素気泡法

水素気泡法⁶⁾は、流体力学の実験等で用いられる可視化法であり、液体の流れの追跡に用いられる手法である。流れを追跡し観測する為に流体に添加される物質や現象をトレーサと呼ぶ。線香の煙からアルミ粉末、プラズマまで、用途に応じて様々な物や現象がトレーサに成り得る。水素気泡法は、電気分解で発生する微小水素気泡が、浮力の影響を受けにくく、液体中の流れに沿い、なおかつ光を反射する、という性質をトレーサとして利用するポピュラーな流体可視化法であり、電極形状や気泡発生のタイミングをアレンジできる、という汎用性を備える。その一例を図1に示した。

3. 2. 回流法と掃引法

水素気泡法は、水と電極を相対的に運動させ、気泡を電極から分離させることを原理とする。本考案での表示方式は、相対運動の方法で2通りに大別できる。まず、(1)流れの中に、電極を静置させる場合であり、河川等への実装を想定するものである。実験レベルでは回流式水槽などが必要である。2つめは(2)静置された水の中に、レール等で電極を掃引する場合であり、池や水族館の水槽への実装を想定するものである。また、電極

の掃引構造が必要である。本研究構想では、(1)を想定した実験を「回流法」と、(2)を「掃引法」と呼称する(図2)。

3.3. 掃引と気泡の大きさ

水中に没した陰極の表面からは、電気分解により水素の気泡が生じる。気泡を流体の可視化に用いるときは、電極が流れを乱さないように、一定のテンションをかけた細線を電極として用いる。細線表面に生じた気泡は流れによって直ちに離脱し、下流に進む。気泡に照明を当てて観察することで、流れを可視化する。細線表面の気泡の離脱と密集の度合は、流れの速さ、電流、線径によって変化する。離脱が速やかに行われないと、隣接する微小気泡同士が合体しながら離脱することになり、気泡の径は大きくなる。気泡が大きい

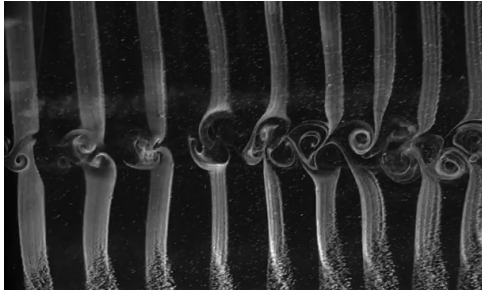


図1 円筒型の支柱背後に生じた渦を水素気泡法で可視化した様子(筆者による実験)

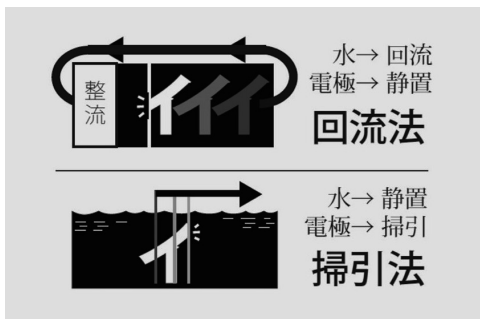


図2 水と電極の相対的な運動により、表示方式を2種類に大別できる

と浮上速度が大きくなり、流体可視化の機能は損なわれる。一方、気泡の径が小さいと、照明を強くする必要がある。水素気泡法では、線径は0.01mm~0.2mm程度が用いら

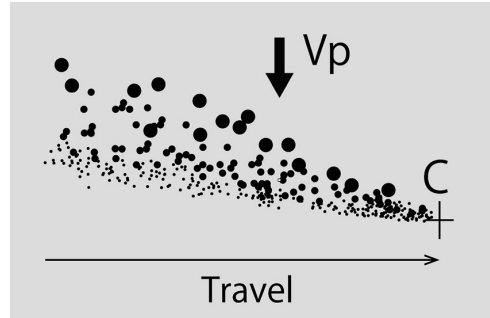


図3 低速での掃引による太目のカソードから離脱する水素気泡の様子のスケッチ

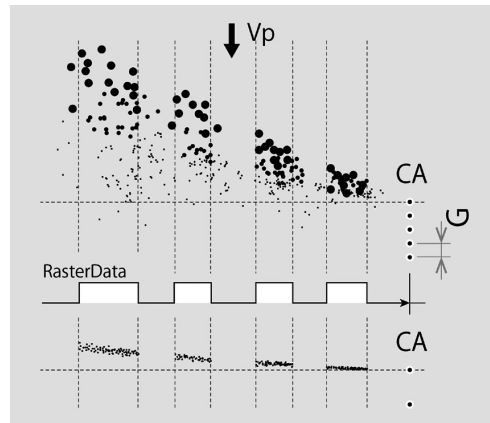


図4 断続するカソード電圧による気泡のスケッチ



図5 電極表面での気泡の成長を抑制するような条件で掃引した際の気泡の様子

れるようである。図3は、水素気泡法の適用範囲としては低速な掃引において(30mm/s程度)、比較的太い線径($\Phi 0.3\text{mm}$)のカソードから離脱する気泡の側面からの観察結果を、写真等をもとに筆者がスケッチしたものである。同じ条件において陰極電圧を増やすか、水中の塩分濃度を増やすなどすると、気泡はさらに成長するようになった。図4の上部は、線径 $\Phi 0.3\text{mm}$ 電線をG(1mm程度)の間隔で5本ならべCAとし、一番上の電極のみをカソードとして電圧をかけて、さらに電圧は、図中央のRasterDataのような断続的な波形であるときの気泡の様子を、写真等をもとにスケッチしたものである。このとき気泡シートはRasterDataに応じて縞模様として生じることが期待される。しかし微小な気泡は水中で拡散して、気泡の中にはカソードの高さよりも下がるものも観察された。一方成長した気泡は微小気泡よりも乱れの影響が少ないエリアに浮上していると推察される。図4の下部は、2本の電線(線径 $\Phi 0.3\text{mm}$)を10mm程度の間隔を開けて平行に張り、上側の電線をカソードとして1%の塩水中を250mm/s程度で掃引して得られた気泡の様子を、写真等をもとにスケッチしたものであり、図5は、同じ条件で手で掃引した際の写真である。

3. 4. 掃引型ディスプレイ

この節では掃引型ディスプレイの考案を説明する。図6は、掃引型の概略を示した図で

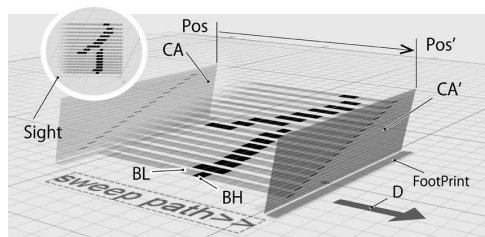


図6 掃引型ディスプレイの概略

ある。カソード配列は、水素気泡を同時に、且つ個別に複数発生させるために、階段状に配列されている。CAはカソード(陰極)と電線を含む平面であり、水中に没している。CAはレールなどの案内により水中を直線移動できる。移動方向はDで示した。鑑賞者は図の上部から下部を見下ろすように観察する。ある時点でCAは図中のPosに位置している。CAがPosからPos'に移動する過程で、カソードは個々に所要のタイミングでシート状の水素気泡群を発生する。気泡の径は十分に微小であることが期待される。図では便宜のため、気泡が発生していない箇所はグレーで、発生している箇所は黒で示しているが、実際は黒の箇所のみ気泡が発生し、照明により白い点の集合のように見える。図では気泡の集合がカタカナの「イ」の字を構成するところを示している。

CAすなわち気泡発生部の詳細を図7を用いて説明する。CAではLaneの数だけ被覆電線を横断させ、導体の一部を露出させた箇所では電気分解を発生させ、気泡を生じさせる。図中のCanvas_Wは、すべてのLaneが成す幅であって、水中での描画の幅となる。Gは電線間のギャップ長であり、電極間の電氣的耐圧などの要因から決定される。Breadthは $G \cdot (\text{Lane数} - 1)$ である。PはLaneあたりの気泡シートの幅である。a、bは、気泡発生部の詳細であり、aは被覆部(絶縁部)、bは被覆を剥離した導通部、すなわち水素気泡が発生する箇所である。

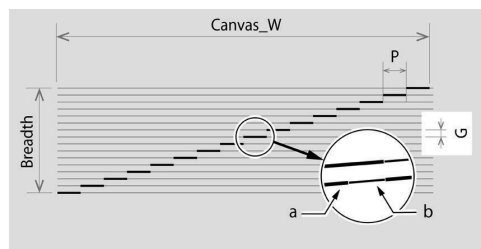


図7 カソード配列(気泡発生部)の概略

3. 5. カソードのチルト角 θt

この節では気泡発生部と鉛直線が成す角度 θt (チルト角) の作用について考察する。

まず θt の概要を説明する。図8は、CAを含む気泡発生部である。まず、 Vp は鑑賞者の視線方向である。 Vd は水面に対する鉛直線である。さて、水中に気泡シートで情報を表示するために、描画気泡シート全体を升目で分割する必要がある。そのために、まず掃引方向に沿って Lane[0, 1, ,] を設ける。図では16の Lane を備えたカソード配列が階段状に並んでいる様子を示している。Lane を担当するカソードは、図中の C[0, 1, ,] である。CA は D の方向に掃引される。C に電気を供給するために、電線が Lane の数だけ CA の面において櫛のように横断している。CA は Vd に対して θt だけ傾いて設置されている。図中の FootPrint は、天頂からの CA の水槽底面への投影であり、観察者からは見かけ上、CA の面が FootPrint の面に見える。

続いて θt が気泡の拡散に与える影響について考察する。先述の3.1項での観察により、カソードの前後には淀み点があり、流れの背後には乱れが生じると推察される。乱れがあるならば、 θt は気泡による描画の経時的印象に影響すると考えられる。抵抗を減らすには線径を細く、G を広く設定する必要がある、またカソード電圧や速度も関係すると推

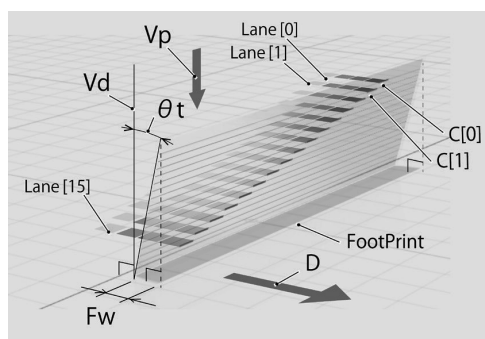


図8 カソード配列と鉛直線が成す角 θt

察する。 θt が小さいとき、水中の気泡シートは、他 Lane の電線等からは十分離れることができ、電線によって擾乱されにくくなる一方で、CA が掃引方向に対して作る流れの抵抗が、CA の前方、後方に圧力差を生じさせ、CA 背後に擾乱を生じさせるであろう。また、CA の掃引方向の長さは、鑑賞者からは、図中の Fw に圧縮しているように見え、「水中に忽然と像が出現する」という印象を強く持たせることになるであろう。 θt が 90° 近くの場合は、発生したばかりの気泡シートに、後方から他の Lane の電線が突入してくることになる。一方で CA が掃引方向に対して作る流れの抵抗は小さいので、CA 後方の流れの乱れは少ないと考えられる。

4. 検証方法

本ディスプレイの主要な構成要素について、実験により検証する。気泡による図像が視認できる諸条件を明らかにし、主としてカソード配列と垂線が成す角 θt の影響を検証する。

4. 1. 予備実験

電極サポートの構造と、電極間のギャップ長 (G) を主として検討するための予備実験を実施した。ギャップ長は、狭ければカソード間の絶縁が破れ、流れに対する抵抗も増え、広ければ Breadth が大きくなり、表示エリアの効率が悪くなるばかりか、カソード配列の全体構造も大きくなる。実験では、長さが Canvas_W = 120mm、直径0.18mm のポリエステル被覆の銅線を2本平行に配置してカソード配列として用いた。部分的に被覆を剥離させプラチナメッキを施した。-30V を断続的に印加しながら200mm/s で掃引し、縞模様の気泡の発生の様子を観察した。

観察の結果、カソード線の両端にかかる張力が弱いときには、電極の流れ後方の微小渦

による振動が観察された。そこで電極サポートは適度な張力を発生させる構造を考案した。ギャップ長は、先述の3.3項では1mmで流れの乱れを観察したことから十分広く確保したいが、電気的絶縁のマーヅン、および水槽のサイズを勘案した結果、1.5mmに設定した。

4. 2. 装置の構成

本節では掃引型の実験装置の構成を説明する。図9はシステム構成を示す図である。Fluid (流体：水) が満たされた水槽は静置する。Vpは観測者の視点である。CA(カソード配列)はSupport (電極サポート) によってCR (往復キャリッジ) に固定されており、Fluidに没しながらRailに沿って掃引できるように構成する。RailにはB/W PATTERNを長さP (BW) のピッチで印刷し、ENC (直動エンコーダ) がRail上の位置、すなわち水槽中の掃引位置を取得する。CAとAnode (陽極) の電気分解によって生じた水素気泡は、水槽側面に設置したL (照明) によって照明され、鑑賞者からは気泡が光の粒

のように見える。Anodeの素材はステンレスである。

システム中の信号処理の流れを図10の概略図を用いて説明する。まずモーターとベルトによってCAを掃引する。Sweep Speedをパラメータとしてマイコンによりモーターを制御する。掃引位置をSensorsで取得し、EncoderがTrgパルスに変換してScanControllerに送る。ScanControllerは描画の元となるRasterData (後述) を保存している。Trgパルスを受信する都度、RasterDataの一部をシリアル信号 (SPI信号) としてShift Registerに送信し、適宜、Latch信号によりパラレル信号に変換し、Multi-channel Cathode Driverに一括で送信される。DC Supplyは任意の直流電圧 (Applied Voltage) を発生し、Multi-channel Cathode Driverに常時マイナスの電気 (カソード電位) を供給する。同Driverは、Cathode Arrayに所要のタイミングでマイナスの電気を配信する。

図11は、Multi-channel Cathode Driverのうちの、1Lane分の回路を示す。

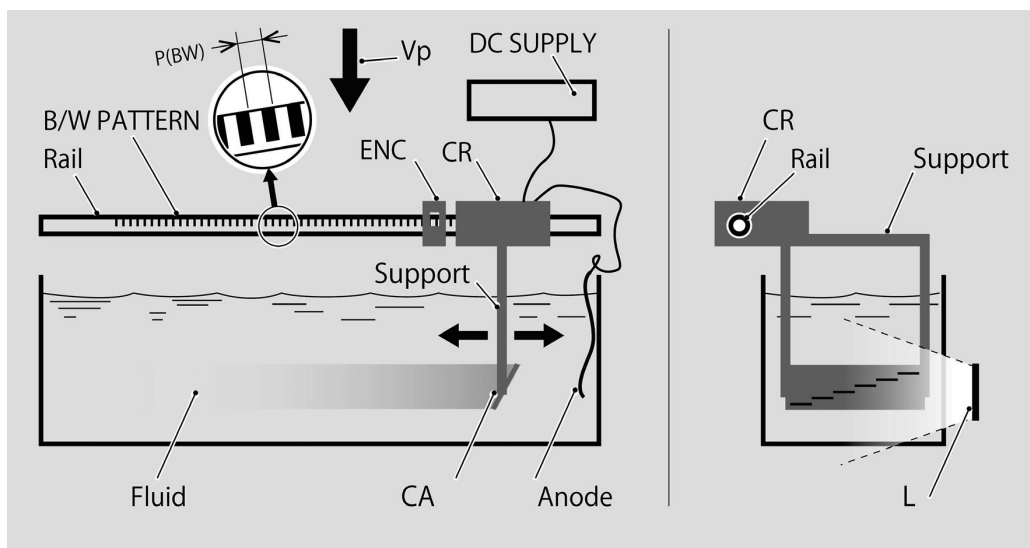


図9 実験装置のシステム構成

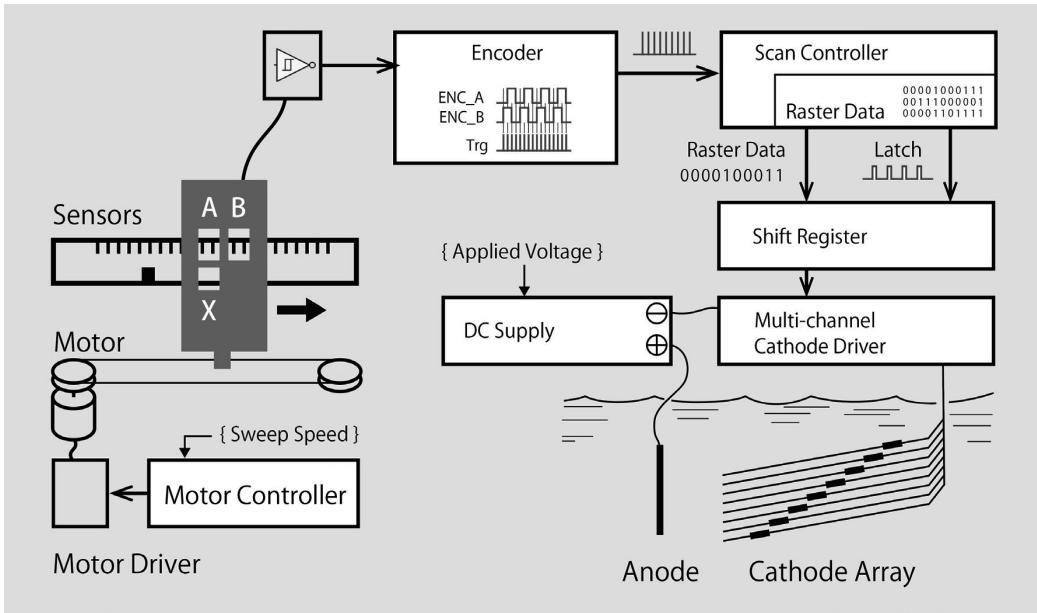


図 10 実験装置の信号処理等の概略図

図12は、気泡シート列の描画元データである RasterData の概念図である。RasterData は Scan Controller の内部で扱われるデータであり、 $\$_PicRow$ の数だけ要素を含む $\$_PicLane$ の配列、すなわち 2次元配列である。要素は気泡の ON/OFF の信号に相当する符号や値 ($\$_Val$) を格納する。CA が掃引中であるとき、掃引アドレスに相当する $\$_PicRow$ がポイントする $\$_Val$ が、各 Lane に

配信される。

図13は、水中における気泡列の諸元を示す。RasterData をもとに描画される気泡のエリアは、 $Canvas_W$ と $Canvas_R$ が成すエリアである。図中の BubbleCell は、水中への描画エリアの升目の単位であり、 $P(L)$ と $P(R)$ が成すエリアである。FootPrint と $Canvas_R$ の間にはマージンを設けることもできる。FootPrint を狭く設定すれ

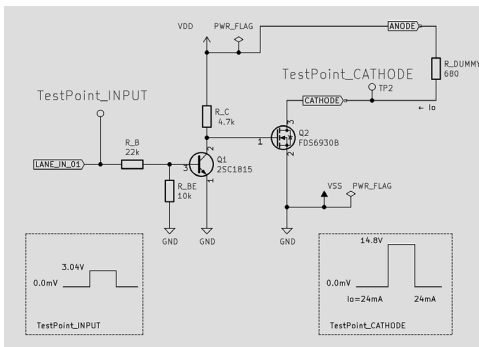


図 11 カソードのドライブ回路 (1Lane 分)

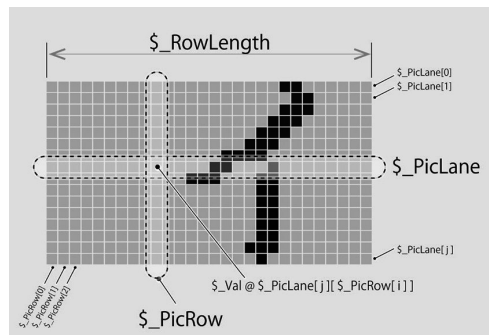


図 12 RasterData の概念図

ば、鑑賞者からは CA 内の気泡の発生の列 (BubbleRow) が狭く見え、気泡が「忽然と出現する」かのように見える、といった効果が期待できるであろう。

Latch 信号の発生タイミングは Trig をもとに生成される。Trig は B/W PATTERN の 4 倍の頻度でパルスが発生する。すなわち、水中において Trig 発生に相当する長さは、P(BW) の 1/4 である。Row 方向においては P(BW) を細かくすることで、BubbleCell の幅を細かく制御できる。RasterData の配列が、正方形の BubbleCell の出力を想定するものであれば、分周比 $\$div$ を新たに設定し ($\$div = P(L)/P(BW)/4$)、分周比の数だけ $\$val$ を出力させればよい。 θ が 90° に近づくと、Lane 毎の気泡発生のタイミングは想定よりずれることになる。ずれを修正するには $G \cdot \sin \theta$ に相当するだけ発生タイミングをシフトすればよい。図14は、往復キャリッジ、Scan Controller、Support、CA の実際の様子である。Scan Controller には Espressif System 社製のマイコン ESP-WROOM32を用いた。

4. 3. 実験

実験では、カソード配列の角度 θ を 2 通

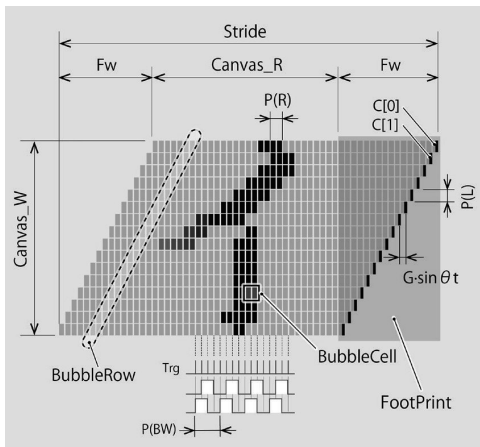


図 13 気泡列の緒元

り設定し、筆者が気泡の挙動を観察しながら、それぞれの条件で、なるべく描画像が長く保持され、かつ描画像から文字が判読しやすいような Sweep Speed 並びに Applied Voltage を探索した。 θ が 7° での実験はセッ

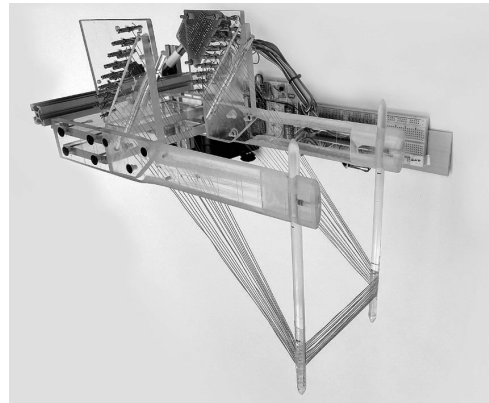


図 14 往復キャリッジとカソード配列等

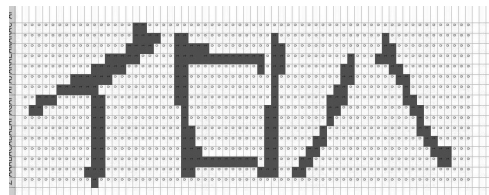


図 15 実験に用いた RasterData

表 1 セッション共通のパラメータ

項目	値	備考
G	1.5mm	カソード間のギャップ長
P (R)	4 ~ 5mm	カソードの露出長さ
P (BW)	3mm	
Fluid	食塩+水道水 1% (重量比)	
水温	20℃	
カソードの線径	0.18mm	材質:銅/被覆:ポリエステル/接液部:プラチナ

表 2 パラメータの設定可能範囲

パラメータ名	設定可能な範囲
Sweep Speed	30 mm/s ~ 290 mm/s
Applied Voltage	-4V ~ -29V
θ	$7^\circ \sim 90^\circ$
水深	20mm ~ 130mm

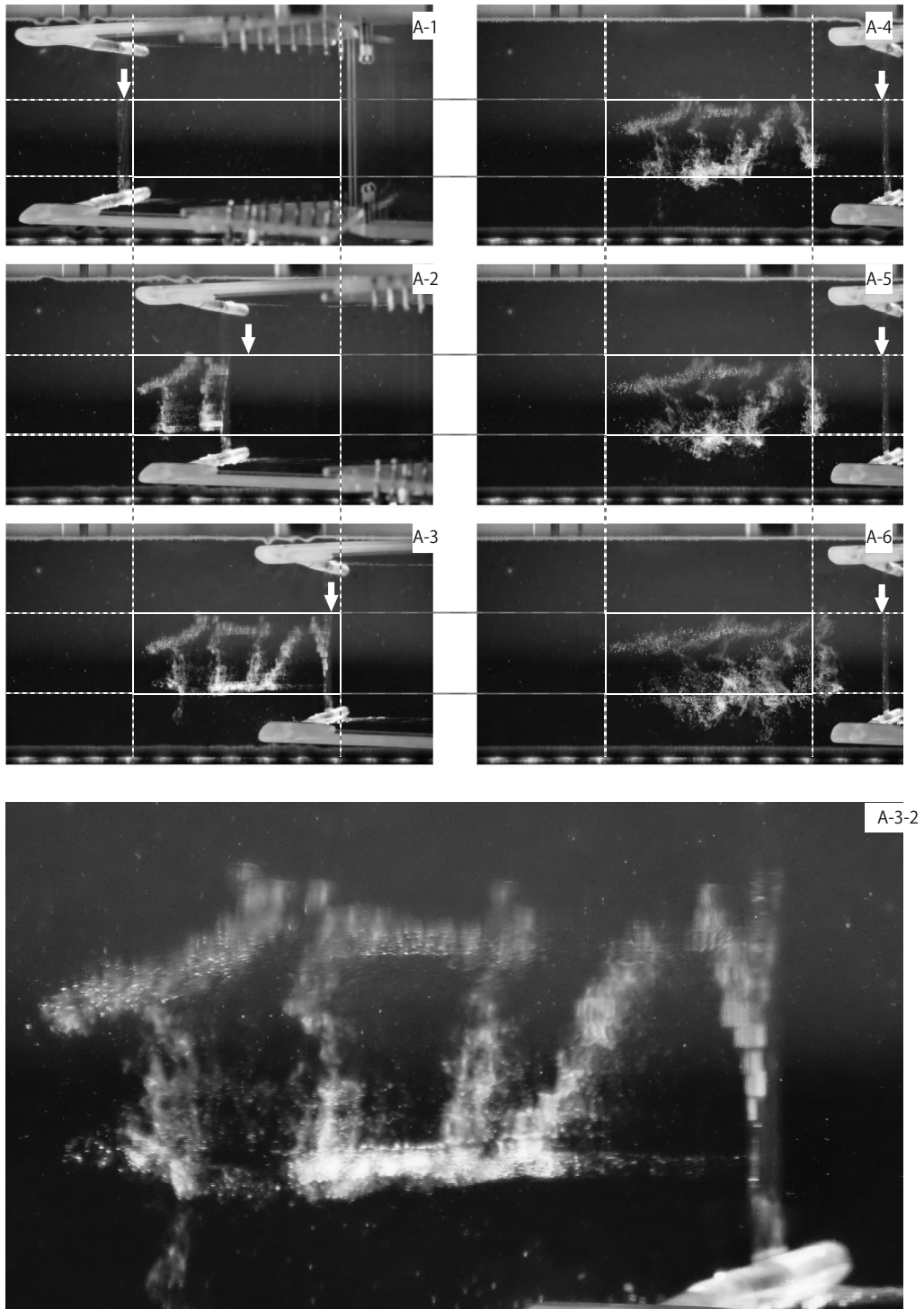


図 16 セッション A ($\theta t = 7^\circ$) による気泡の様子。A1 ~ A6は0.42 秒毎に撮影。

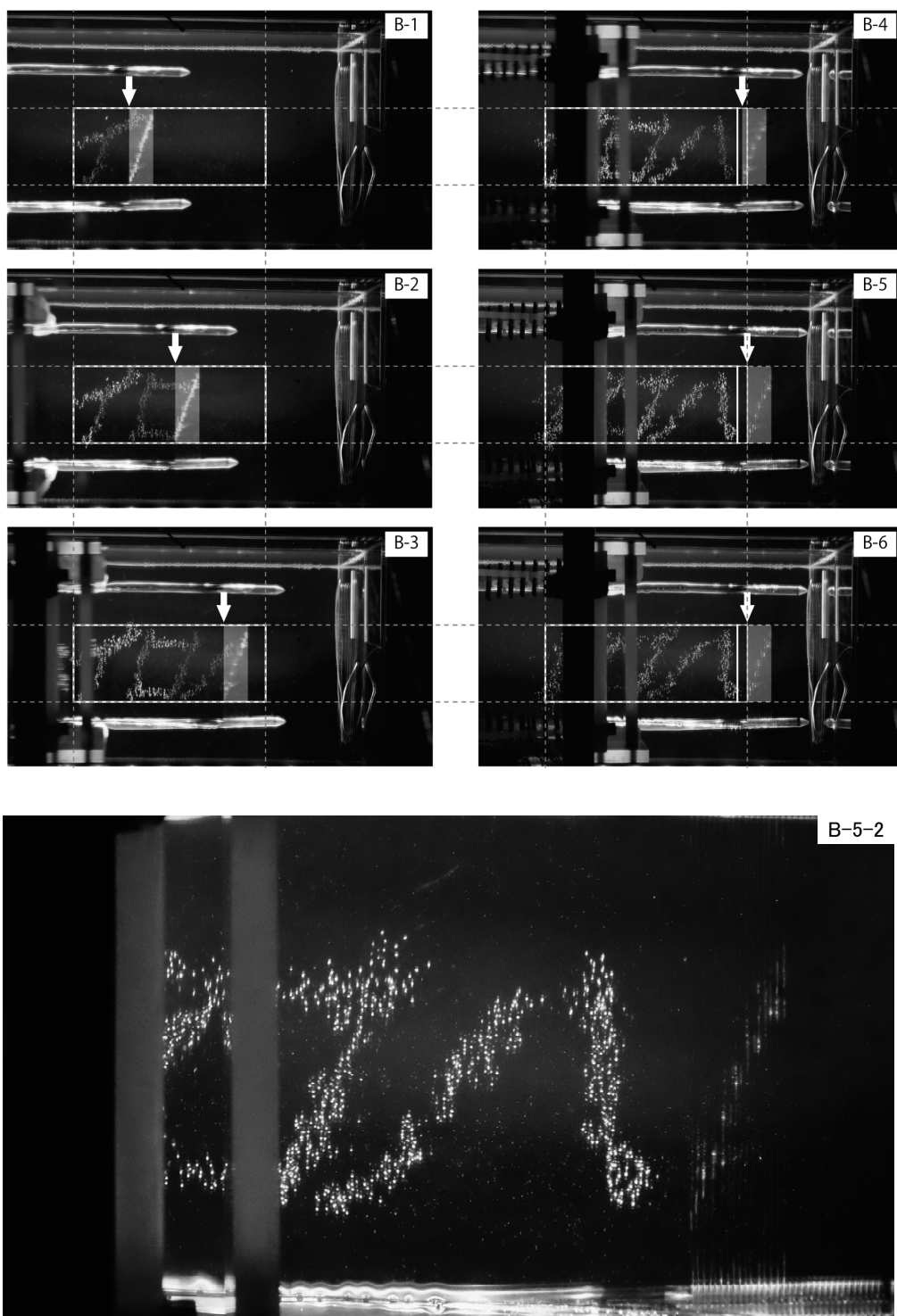


図 17 セッション B ($\theta t = 90^\circ$) による気泡の様子。B-1 ~ B-6は0.42 秒毎に撮影。

セッション A、 $\theta t=90^\circ$ ではセッション B と呼称する。

セッション A の狙いは、FootPrint を小さく抑えることで、気泡が「忽然と」出現する演出を期待することである。セッション B の狙いは、比較的遅く掃引して大き目の気泡を積極的に浮上させることで、CA 背後の乱れの領域から遠ざけ、気泡像の形状の保持を図ることである。

セッションの共通の Raster Data の配列を図15に示した。共通のパラメータは表1の通りである。設定可能なパラメータの範囲は表2に示したが、このうち水深は、水面に最も近いカソードと水面との距離である。

5. 実験結果と考察

実験結果のパラメータについては、セッション A を表3に、セッション B を表4にまとめた。Vp から気泡像全体を観察し、0.42秒ごとに写真撮影した。写真による気泡像の様子をそれぞれ図16、図17に示した。また、それぞれの図の下部において、セッションの特徴的な気泡像の拡大写真を示した。図中の細く白い枠線は、期待される Canvas の範囲を示している。図17の白い紗の四角は移動する FootPrint を示している。図中の白矢印は

表3 実験結果：セッション A

パラメータ名	値	備考
Sweep Speed	100 mm/s ~200 mm/s	30mm/sでは、描画像が判別できない。
Applied Voltage	-5V ~ -9V	
θt	7°	
CA水深	50mm	最も上部のカソードから水面まで

表4 実験結果：セッション B

パラメータ名	値	備考
Sweep Speed	100 mm/s	200 mm/sではスイープ直後から像が乱れる
Applied Voltage	-18V ~ -29V	-9Vでは気泡像が暗い。
θt	90°	
CA水深	130mm	最も上部のカソードから水面まで

CAのうちで最も下流にあるカソードの掃引位置を示している。

セッション A の実験での観察では、Sweep Speed が200mm/s 付近、かつ Applied Voltage が $-5V \sim -9V$ のときに気泡の留まり方が良好であった。SweepSeed が50mm/s より低速側では、Supplied Voltage の設定可能範囲のいずれの電圧においても、イ、ロ、ハのうちの1文字すらも視認できずに気泡は上昇あるいは霧散した。250mm/s より高速側では、いずれの Supplied Voltage においても気泡群が激しく拡散して、やはり1文字も視認が困難であった。100~200mm/s では、イ、ロ、ハの3文字を同時に視認できる時間が僅かに存在するが、その直後、掃引方向に、気泡像が全体的に崩壊するように拡散した。気泡の拡散という点では、200mm/s 付近で最小になった。Vp 方向以外の観察では、多少の傾きがあっても3文字を視認でき、「水中に文字が一瞬出現する」という印象を得た。

セッション B の実験では、まず気泡が十分に成長するように Supplied Voltage を $-18V$ に設定したうえで観察した。SweepSpeed が150mm/s 付近より高速側では気泡像の拡散が激しく、1文字すらも視認できなかった。50mm/s より低速側では、径の大きい気泡の拡散は少ないながらも、上昇の過程にある気泡の鉛直方向の分布が広いいためか、文字としての纏まりを感じにくい印象であった。100mm/s 付近では、径の大きい気泡が CA に引きずられることなく留まっているように見えた。気泡の引きずられ方という観点でセッション A に比較して観察すると、Canvas 領域での留まり方がしっかりしている印象であった。しかしながら、微小な気泡は Vp から見て CA の位置に相当する深さのレベルで大きく拡散しており、このことは3.5の項での考察を補強するものである。同様の条件で Supplied Voltage のみ $-29V$ 付近まで変化させたが、気泡の留まり方の印象に

変化は無かった。

これらの結果、本実験の諸元に基づけば、微小気泡を水中にしっかり留まらせ、十分長い時間にわたって描像の情報を鑑賞者に視認させ、徐々に気泡像が拡散する、というような条件を導き出すには至らなかった。しかしながら、図像の表示という目的そのものは、本考案の電極の構成方法で達成可能であり、水中への気泡の残留時間の改善のための検討は、カソード間のギャップ長、配置方法、線径の微細化に対して行えばよいことになる。また、残留時間が改善すれば、拡散や霧散に至るまでの猶予が生まれ、気泡像から得られる視覚的印象のコントロールの幅が生まれることになる。また、セッションBの結果は、水中への気泡の残留にこだわらない鑑賞方法への発展も考えられることを示唆している。

本実験により、水素気泡法を応用した電極構成による水中への図像の表示機能の有効性が確認された。このことにより、様々な実装方法が生み出されることが期待できる。

6. 終わりに

本稿では、水素気泡法を水中への情報表示システムへ適用する考案を説明した。システムの実現に必要な要素のうち、カソード配列が成す面の角度 θ t を主とした要因が気泡の動きに与える影響を検証するための実験装

置を構築した。観察結果を踏まえて、本考案の有効性を確認した。

謝辞

本研究の一部はJSPS科研費課題番号18K11604の助成を受けて実施された。ここに深謝の意を表する。

注釈

- 1) 秋廣 誠, 佐野 司, “水素気泡による水中へのイメージ表示手法の検討”, 日本図学会春季大会学術講演論文集, 2019.5, pp4-19
- 2) 流れの可視化学会(編), “流れの可視化ハンドブック”, 朝倉書店, 1986.10, p236
- 3) 鈴木太郎, “鈴木太郎作品集”, <http://suzukitaro.jp/>, 2020-9-1
- 4) 関根雅人, 田中浩也, “熱対流現象を利用した流体装飾インスタレーション”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 14巻, 2009, pp335-342
- 5) Takuma Uchida, Hitoshi Ozaki, Hiroshi Kawakami, Jippe Suzuki, Koichi Nakayama, “Experimental verification of conditions for a bubble-projection three-dimensional display”, Proc. SPIE 8648, Stereoscopic Displays and Applications XXIV, 86481G, 2013.3
- 6) Kota Kumagai, Satoshi Hasegawa, and Yoshio Hayasaki, “Volumetric bubble display” Optica 4, 2017, pp298-302