

# RippleSpike: スパイク表現と波紋表現を組み合わせたアンビエントディスプレイの試作と評価

野間 直生<sup>1,a)</sup> 塚田 浩二<sup>1</sup>

**概要:** 液体ディスプレイには周辺環境への親和性が高いことや、液体の質感を活用できるといった特徴がある。本研究では、液体の中でも磁力によって容易に制御が可能な磁性流体に着目した。磁性流体とは、強磁性の粉末を分散させたコロイド溶液であり、強力な磁力を印加することでスパイク状に隆起する。このスパイク表現はメディアアートなどで広く活用されており、強い存在感を持つ。そこで本研究では、磁性流体にオイルを混合させることで、棘のようなテクスチャを抑制し、なだらかな半球表現や余韻表現を作成する。また、スパイク表現・なだらかな半球表現・余韻表現が、アンビエント・ディスプレイに活用できると考える。本稿では、スパイク表現となだらかな波紋表現を組み合わせたアンビエント・ディスプレイ「RippleSpike」を提案・試作し、表現事例や応用例を示す。さらに、性能評価とユーザ評価を通して、システムの応答性や表現力を調査する。

## RippleSpike: Prototyping and Evaluation of Ambient Display integrating Spike and Ripple Expressions

NAOKI NOMA<sup>1,a)</sup> KOJI TSUKADA<sup>1</sup>

### 1. はじめに

近年、液体を用いた情報表現手法が盛んに提案されている。例えば、バブルディスプレイ [1] は気泡を利用し、水の時計 [2] は水滴の間隔を調整することで情報提示を行う。こうした液体ディスプレイには周辺環境への親和性が高いことや、液体の質感を活用できるといった特徴がある。

特徴的な表現を行える素材として、磁性流体が知られている [3]。磁性流体とは、強磁性粒子、溶媒、界面活性剤から成り立つコロイド溶液である。強磁性粒子が磁力に反応することで、磁石などに引き寄せられスパイク現象が発生する。すなわち、平面状に配置した磁性流体に対して垂直に磁場を印加したとき、棘のような隆起を生成する (図 1 左)。隆起の密度や数、大きさは電磁石の磁力や位置に応じて変化する。

我々は、磁性流体にオイルを混合させ、制御方法を工夫

することで、スパイク現象に加えて、なだらかな半球や余韻を表現する手法を提案する (図 1 右)。さらに、これらの表現手法を組み合わせることで、特徴的な表現力と周辺環境との親和性を備えたアンビエントディスプレイ「RippleSpike」を構築する。



図 1: 磁性流体に磁力を印加している様子

### 2. 関連研究

本研究の関連研究を「アンビエント・ディスプレイ」、「液体を用いた表現手法」、「磁性流体を用いたデバイス」の 3 つの視点から紹介する。

<sup>1</sup> 公立はこだて未来大学  
Future University Hakodate  
<sup>a)</sup> g2122051@fun.ac.jp



図 2: 本提案で作成可能な表現例

## 2.1 アンビエント・ディスプレイ

Tangible Bits[4]では、実世界でのインタフェースの1つとして、周辺視野などの人間の知覚の周辺に設置する Ambient media を提案している。生活空間におけるインタフェースは、Foreground(明示的な) media と Background(暗黙的な) media の2種類に分類している。Foreground media とは例えば一般的な液晶ディスプレイ等を指す。多くの情報を一度に提示することができる一方で、ユーザはメディアを注視し続ける必要がある。Background media は、例えば光や風等を指す。一度に提示できる一方で、ユーザがメディアを注視し続ける必要がなため、認知負荷が少ないという特徴がある。Ambient media は Background media の一種である。Ambient media は、人間が常に周辺環境から様々な情報を得ていることに着目し、音や光、空気の流れなどを利用することで、ユーザが注意を向けていなくても情報を気軽に受け取ることができる。Winseskiら[5]は、アンビエント・ディスプレイとして AmbientRoom と Pinwheels を提案している。AmbientRoom は壁への投影や環境音、光の揺れなどを Ambient media として用いている。Pinwheels は、株価等の多様なデジタル情報を風車の回転速度を用いて表現する手法である。本研究では、磁性流体の表現能力を拡張し、アンビエント・ディスプレイとして活用することを目指す。

## 2.2 液体を用いた表現手法

Coworo[6]は、攪拌によって液体表面が隆起する液体に着目したメディアアートである。電子制御によって、任意の位置、高さで隆起を発生させることができる。BubBowl[7]は、電気分解により発生する泡を画素とすることで、水面をドットマトリクスディスプレイのように活用できる。具体的には、インスタントコーヒー、コーンスターチ、炭酸水素ナトリウムを混ぜた黒い電解液を用いて、動的に変化する表現事例を提示している。また、Bubble Mirror[8]は、BubBowlの応用研究であり、水面を覗き込むと顔が画像が表示されるデバイスを提案している。この手法では、画素となる泡の生成に時間がかかるという制約がある。石井ら[9]は、呈色反応を利用した化学反応による情報提示手

法を提案している。電極と電解液の構成を変えることで、「湿式」「液体式」「スタンプ式」の3種類の情報提示が可能である。TangibleDrops[10]は、水酸化ナトリウム中に浮かべた液状のガリウムを画素として用いるディスプレイである。任意の位置に液状のガリウムを移動させることで、視覚・触覚フィードバックを実現している。本研究では、なだらかな半球とスパイク表現、および高速に振幅する波紋表現等を組み合わせた多様な液体表現の構築を目指す。

## 2.3 磁性体を用いた表現手法

AstralBody[11]はテーブル上に広げた砂鉄を磁石を用いて制御することで、生き物の動きを再現したメディアアートである。磁石とテーブルの角度や距離を可変にしたり、鑑賞者との距離をセンシングすることでより生き物らしい動きの作成を行っている。Millefiori[12]は磁性流体の「ラビリンス不安定性」を利用したメディアアートである。ラビリンス不安定性とは、狭い空間に磁性流体を密閉することで複雑なパターンが生まれる現象である。さらに、水彩絵の具と磁性流体の混合液を用いることで色彩豊かな表現を行なっている。本研究では、磁性流体にオイルを混合したり、制御方法を工夫することで、スパイク現象に加えて、なだらかな半球や余韻を表現する手法を提案する。

中野ら[13][14]はスライム状の磁性体を作成し、永久磁石で操作する手法を提案している。磁石を操作することで、磁性体の移動/伸縮、合成/分離などの動作が可能である。Slime Robot[15]は粘弾性のある液体状のロボットである。成分として、ポリビニルアルコール、永久磁石、ホウ砂を用いている。さらに、液体が導電性であることを活用し、電子回路を修復する事例を提案している。本研究では、なだらかな表現やスパイク表現を組み合わせたアンビエント・ディスプレイの開発を目指す。

## 3. 提案

### 3.1 コンセプト

本研究では、磁性流体にオイルを混合することで、磁性流体の表現を拡張し、スパイク現象に加えて、なだらかな半球や余韻を表現する。また、作成した表現を用いて、ア

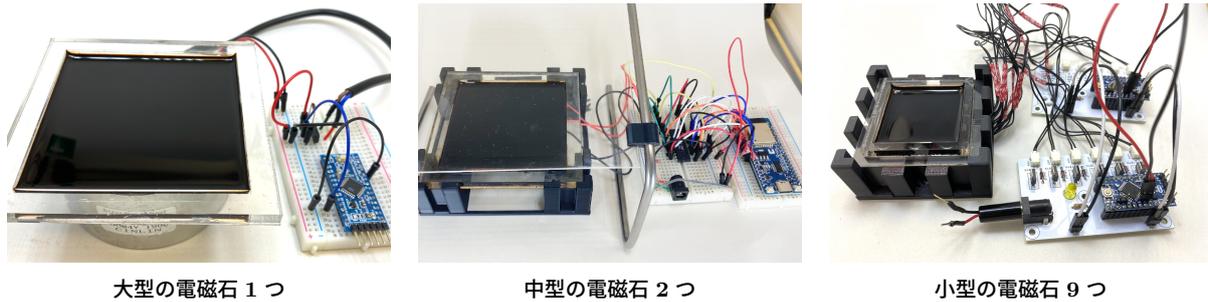


図 3: プロトタイプ

ンビエント・ディスプレイ「RippleSpike」を提案する (図 2).

RippleSpike のコンセプトは、大きく以下の 2 点である。

- (1) スパイク表現となだらかな半球表現の融合
- (2) 生活空間での利用

一点目は、スパイク現象に加えて、なだらかな半球や余韻を表現することである。こうした表現を行うためには、磁性流体の粘度を下げることで、スパイク状の隆起を抑えたり、応答性を高める必要がある。二点目は、システムを生活空間で長期的に利用するために、システム構成をシンプルにしたり、磁性流体の漏れや揮発を防ぐ必要がある。

### 3.2 システム構成

生活空間での利用を見据えて、図 7 のように設置や運用が容易なシンプルなデバイス構成を取る。

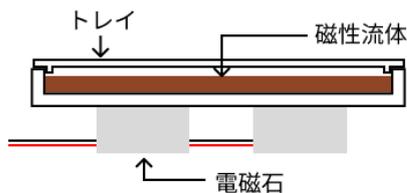


図 4: 基本のデバイス構成

#### 格納部

磁性流体は直接接触することができず、また布などに付着すると微小な粒子が沈着してしまうため、密閉する必要がある。そこで、格納部となるトレイと液漏れ対策を施した蓋を製作する。

#### 電磁石アレイ

格納部の下部には電磁石アレイを設置する。電磁石アレイは筐体に固定されており、安定して格納部を支えつつ、交換もできるように工夫する。様々なサイズ/数の電磁石アレイを用意することで、多様な表現を検討する。

#### センシング

インタラクティブなアンビエントディスプレイを構築するために、複数のセンサを取り付ける。具体的には、会話を検出するマイク、人の存在を検出する距離センサ等を検討する。さらに、センサの脱着が容易で拡張性のある構造を目指す。

## 4. 実装

本章では、RippleSpike のプロトタイプについて説明する。プロトタイプは大きく、「磁性流体の格納部」「電磁石アレイ」「制御基板」を中心に構成される。なお、磁性流体に、シグマハイケミカル DS-50 を、ミネラルオイルに、ジョンソン ベビーオイルを利用した。以下、オイルの混合と、プロトタイプ各部の詳細を示す。図 3 は作成した 3 種類のプロトタイプである。それぞれ、電磁石アレイの筐体に格納トレイ (蓋無し) を設置している。プロトタイプを用いて、混合液の動作確認と表現の模索を行った。

### 4.1 オイルの混合

なだらかな半球や余韻を表現するために、本研究では磁性流体にミネラルオイルを混合する。ミネラルオイルの、「粘度が低い」「揮発しにくい」「劣化しにくい」といった特性に着目する。磁性流体にはシグマハイケミカルの DS-50 を、ミネラルオイルにはジョンソンのベビーオイルを用いた。図 1 はそれぞれ、磁性流体のみと混合液に下部から永久磁石を用いて磁力を印加している様子である。オイルを混合することで、図 1 右のように、スパイクを抑制する効果や、応答性能が向上する傾向があった。さらに、磁性流体の揮発を防止する効果も見られた。

### 4.2 磁性流体の格納部

磁性流体はシャーレのような薄型のトレイに格納する。プロトタイプでは、100mm × 100mm のケースと 50mm × 50mm のトレイを作成した。磁性流体の動きを観察しやすいように、トレイは透明の亚克力板をレーザーカッターで加工し、液体が漏れないよう慎重に接着した。また、

磁性流体は人体に有害であるため、直接触れたり、液漏れしたりする状況を避ける必要がある。そこで、磁性流体の格納トレイにはパッキンを付けた透明の蓋を取り付けた。パッキンはエラストックレジンを用いて光造形式の3Dプリンタで自作し、蓋の内側のガイドに沿って接着した。図5に、パッキンの3Dモデルと格納トレイの構造とを示す。蓋を上部から被せるだけで、簡易的に密閉可能な構造とした。また、蓋の開閉方向にパッキンの摩擦が生じないように工夫した。

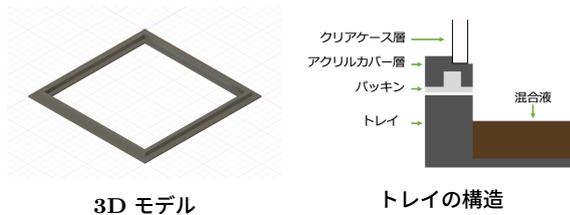


図 5: パッキン付きの天板

### 4.3 電磁石アレイ

多様な表現を試行するために、図6に示す3種類の電磁石アレイを用意した。筐体のサイズを揃えるために、大型の電磁石(直径80mm, 磁力55mT)は1つ, 中型の電磁石(直径26mm, 磁力29mT)は2つ, 小型の電磁石(直径8mm, 磁力23mT)は9つを同時に制御可能な設計とした。磁力はそれぞれ24Vを印加したとき, ガウスメーターで計測した実測値である。それぞれの電磁石に合わせて筐体を設計し, 格納トレイを固定できるように配慮した。

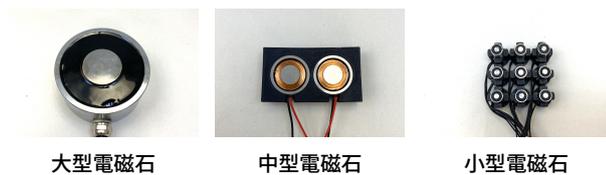


図 6: 用意した電磁石と配置

### 4.4 制御基板

電磁石を制御するための制御回路と基板について述べる。図8左のように電磁石毎に1つのFET(K4017)を利用しており, マイコン(Arduino pro mini)から制御する。

基板はEagleで独自に設計した。1枚の基板に6つのFETを備えており, 最大6個の電磁石を制御できる。図8右は実際に作成した基板である。電磁石の接続部にJST製のNSHコネクタを用いた基板と, 3.5mmのオーディオプラグを用いた基板の2種類を作成した。小型・中型の電磁石にはJSTコネクタを用いた基板を使用し, 大型の電磁石には3.5mmのオーディオプラグを用いた基板を使用した。コネクタやプラグを用いることで, 手軽に交換できるよ

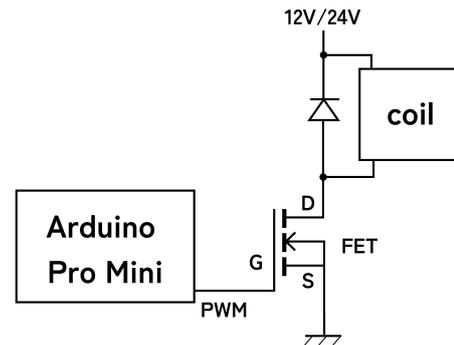


図 7: 電磁石制御の回路図

に設計した。また, 電磁石の動作状態を示すLEDも設置した。さらに, 基板同士をI<sup>2</sup>Cを介して接続できるように設計しており, n枚の基板を連結することで, n×6個の電磁石を同時に制御できる。同様の方法で, センサを制御する基板も拡張できる仕様とした。



JST コネクタ (NSH)      オーディオプラグ (3.5mm)

図 8: 基板の外観

## 5. 表現事例と応用例

### 5.1 表現事例

本節では, さまざまな半球や波紋表現の表現事例を紹介する。さまざまな半球, スパイク, 余韻の3種類の表現を作成することができる(図2)。3種類の表現を組み合わせることで多様な表現を行うことができる。

#### 5.1.1 状態遷移

最初に, さまざまな半球/スパイク表現/余韻の状態遷移について説明する(図9)。磁力を印加していない初期の状態(PWM値: 0%)から, 一定の磁力を印加(PWM値: 30%)することでさまざまな半球が生成される。より強い磁力(PWM値: 100%)を印加することで, 初期の状態からスパイクに遷移する。さまざまな半球/スパイクから, 瞬時に磁力の印加を止める(PWM値: 0%)ことで, 余韻が生成されてから初期状態に戻る。

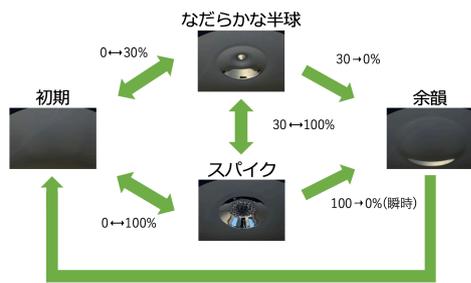


図 9: 磁力の変化による遷移図

### 5.1.2 PWM 値と表現例

PWM の出力値 (割合) を時間経過に合わせて制御することで, (1)2 値制御, (2) 連続制御, (3) 振幅制御の 3 種類の表現事例を作成した. 筐体には, 中型の電磁石と磁性流体 75%/ミネラルオイル 25%の混合液を用いている. この混合率の混合液では, スパイク表現は PWM 値 100%であっても, スパイク表現は見られない.

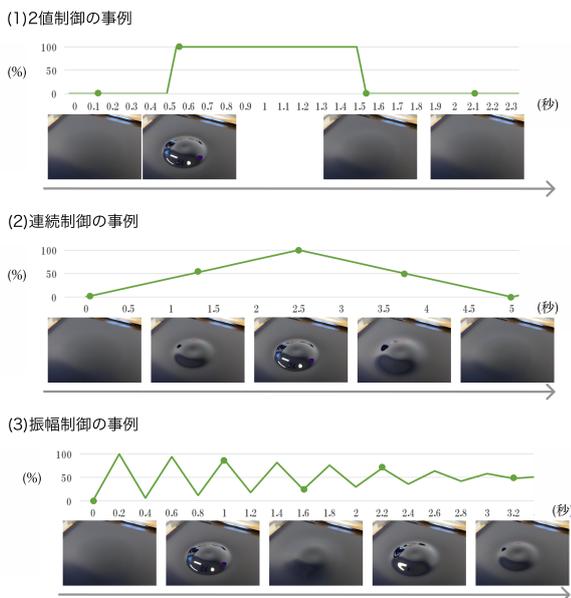


図 10: 表現事例

(1) は, PWM 値で 0%/100%の 2 値制御の事例である (図 10(1)). 100%にした直後 (0.5 秒) で半球が生じており, 0%にした直後 (1.5 秒) にはゆっくり波が引く余韻の表現が見られた.

(2) は, PWM 値を 0~100%まで約 2.5 秒かけて連続的に上昇させ, その後同様に 100~0%まで下降させた事例である (図 10(2)).

(3) は, 振幅を徐々に小さくしながら, 連続的に繰り返した事例である (図 10(3)). 周期は約 0.4 秒で固定した. PWM 値に連動して, 半球が高速に振動しながら徐々に落ち着いていくような表現が観察できた.

また, 上記の表現とスパイク表現を組み合わせると, (4) 水

跳ね, (5) ツノの 2 種類の表現を作成した. 筐体には, 大型の電磁石と磁性流体 90%/ミネラルオイル 10%の混合液を用いた.

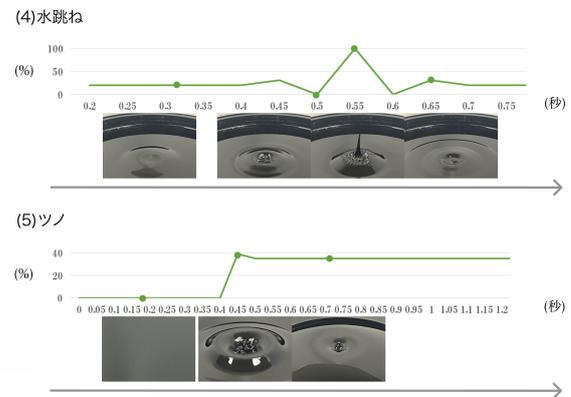


図 11: 表現事例の組み合わせ

(4) は, 水が跳ねている様子を参考に表現した事例である (図 11(4)). 約 0.1 秒の間に 25%の出力から 35%まで上昇させ, 0%まで出力を下げる. 次に, 同様に約 0.1 秒で 0%から 100%まで出力を上げ, 0%まで出力を低下させ, 最初と同様に 35%の出力を行った. 一瞬ではあるが, 混合液が飛び跳ねる様子が観察でき, スパイク/余韻共に刹那的な表現が見られた. 予備動作を付随させることで, より激しく混合液が動いたと考えられる.

(5) は, スパイクの数を磁力によって調整し, 一本のみスパイクを作成することで, ツノのように見せる事例である (図 11(5)). 0%の状態から, 約 0.1 秒で 40%の出力を行い, 38%まで出力を低下させた.

### 5.2 応用例

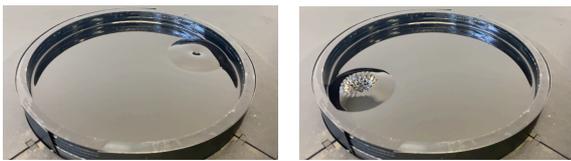
会議室やホール等に設置することを想定して, 直径 80mm の大型電磁石を 5 つ用いた大型筐体を実装した (図 12). 磁性流体の格納ケースの直径は 260mm であり, 数メートル程度離れた距離からも容易に挙動を観察することができる. また, マイクや距離センサを取り付け・交換可能な仕組みも備えている.



図 12: 大型筐体の外観

### 5.2.1 会話の可視化

複数人の会話に応じて表現が変化する事例を紹介する。会話の可視化では、大型筐体を用いる。指向性マイクを複数用いて、会話の音量と方向をセンシングし、なだらかな半球やスパイクを用いて表現する。図のように、手前側で静かな声で会話が行われている時は、静かに半球が生成と消失を繰り返す(図 13 左)。会話が白熱したり、感情的になることで、スパイクが出現し、白熱している様子を表現する(図 13 右)。筐体を中央に設置し、会議の様子を可視化することで、さりげなく発話量の調整や、会話の温度感の調整ができると考えている。



落ち着いた発話(右奥方向) 白熱した発話(左手前方向)

図 13: 会話の可視化の表現例

### 5.2.2 植物の可視化

植物の水分量を可視化する事例を紹介する。水分量の可視化では、卓上デバイスを用いる。鉢に設置した自作水分量センサを用いて、土壌の水分量のセンシングを行い、水分量に応じて RippleSpike で表現を行う。ここでは、大型の電磁石を用いた筐体を円柱状に改良した卓上筐体を利用している。卓上などユーザの周辺に配置することで、植物の状態をさりげなく伝える。

例えば、徐々に土壌の水分量が不足してくると、ツノが生成/消失を繰り返す、水が足りていないことをユーザに伝える(図 14 左)。水を与えるとスパイクの表現を用いて水が十分に足りている様子を伝える(図 14 右)。



水が足りていない 水が足りている

図 14: 植物の状態可視化の表現例

## 6. 性能評価

本節では、主にオイルの混合率に応じた外観や応答性の変化について述べる。

### 6.1 オイルの混合による外観の変化

#### 6.1.1 目的と手法

本研究では、スパイク表現となだらかな半球表現の両立

を目指す。そこで、2種類の表現が両立可能なオイルの混合割合を調査した。大型の電磁石に 0mT~90mT の間で 10mT 毎に磁力を印加し、混合液の様子を観察した。混合液は表 1 の 6 種類の比率で用意した。磁力はガウスメーターを用いて最も磁力が強い位置を計測した。

表 1: 混合液の比率

混合液	磁性流体 (%)	オイル (%)
A	100	0
B	90	10
C	67	33
D	50	50
E	33	67
F	25	75

#### 6.1.2 結果と考察

実験結果のうち、特に差が見られた部分を図 15 に示す。混合液 A(100:0) では 50mT~90mT において、混合液 B(90:10) では 60mT~90mT においてスパイク現象が見られた。混合液 C(67:33) では 90mT でもスパイク現象が確認できなかった。これらのことから、オイルを混ぜることでスパイク現象がかなり抑制されることがわかった。また、混合液のオイルの割合を 10% にすることで、スパイクが発生せずになだらかな半球表現が行える磁力(≒ PWM 値)の範囲を広く取ることができ、多様な表現を制御しやすいと考えた。

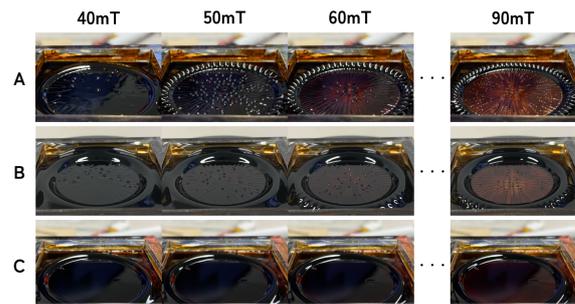


図 15: スパイク現象の変化

### 6.2 オイルの混合による反応速度の比較

#### 6.2.1 目的と手法

応答性の向上を定量的に確認するため、オイルの混合による反応速度の変化を調査した。8mm の電磁石を 9 つ用いて、2 秒間 100%/8 秒間 0% の 2 値制御を行った。2 値制御を行うことで、図のような生成/余韻/消失と遷移する様子が観察される(図 16)。

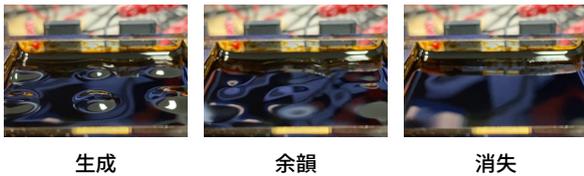


図 16: 反応速度調査の様子

磁力を 100%印加するとなだらかな半球の生成が始まる。生成の開始から半球が大きくなりきったところまでを「生成にかかった時間」とする。次に、磁力の印加を 100%の状態から 0%に急激に変化させることで、余韻の表現が見られる。余韻の開始から、水面が平らになるまでの時間を「消失にかかった時間」とする。

混合液の様子を斜め上から 30fps で撮影し、生成/消失にかかった時間を動画編集ソフト (final cut pro) を用いて目視で確認した。電磁石の出力と同時に LED を点灯させることで、磁力の印加/停止のタイミングを判別した。

### 6.2.2 結果と考察

表 2 は半球の生成/消失にかかった時間を示す。混合液 D(50:50) が最も生成に必要な時間が短く、割合が偏ることで生成が終わるまでの時間がやや長くなる傾向が見られた。消失では、混合液 A(100:0) が最も消失に必要な時間が長く、オイルの混合割合を増加させることで時間が短縮する傾向が見られた。オイルを混合させることで、生成/消失にかかる時間を調整できることがわかった。余韻の表現をより保ちつつ、なだらかな半球を維持するためには、B(90:10) の混合液が適していると考えられる。

表 2: 異なる混合液の半球の生成/消失にかかった時間

混合液 (磁性流体 (%), オイル (%))	生成 (s)	消失 (s)
A(100, 0)	1.55	6.29
B(90, 10)	1.56	5.50
C(67, 33)	1.16	3.49
D(50, 50)	1.04	1.17
E(33, 67)	1.52	1.00
F(25, 75)	1.49	0.56

## 7. 印象評価

### 7.1 目的と手法

多様な表現事例の印象を調査するために、印象評価実験を行った (図 17)。日常的な作業空間に大型筐体を設置している。被験者は、10 人 (22~24 歳) であった。

被験者は、6 種類の表現事例を繰り返し見ながら、スマートフォンでアンケートに回答した。アンケートは SD 法を利用し、8 項目の形容詞対に対して 7 段階尺度で回答を得た。表現事例としては、スパイクあり (2 値制御/連続制御)、スパイクなし (2 値制御/連続制御)、ツノ (2 値制

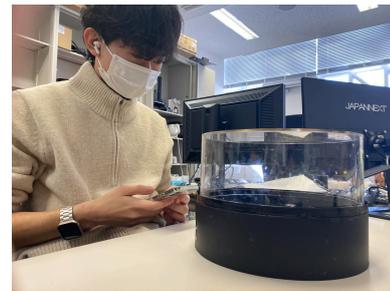


図 17: 印象評価実験の様子

御), 水跳ねの 6 種類を用意した (図 18)。各表現の提示順序は被験者毎にランダムに入れ替えた。

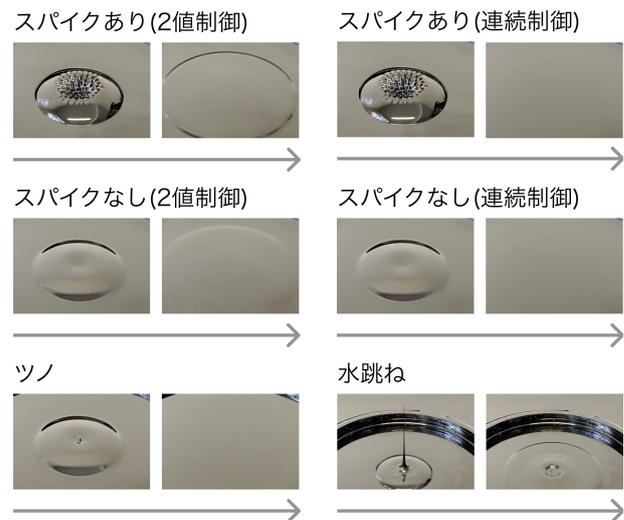


図 18: 印象評価実験で提示した表現の一覧

### 7.2 結果と考察

スパイクあり (2 値制御/連続制御)、スパイクなし (2 値制御/連続制御) の 4 種類の表現事例を対象とした結果と考察を示す (図 19)。

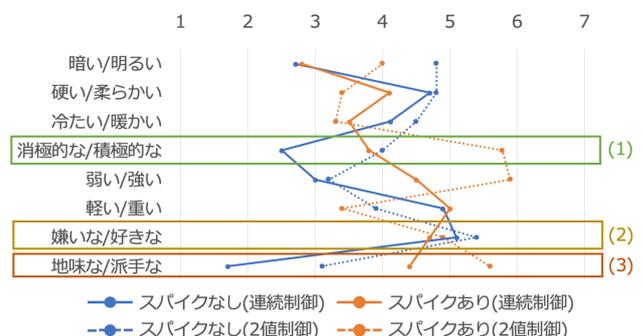


図 19: 印象評価の結果。(スパイクあり/なしと、2 値制御/連続制御)

消極的な/積極的な項目より、連続制御と 2 値制御では 2 値制御の方が積極的な印象となる (図 19(1))。地味な/派手な項目より、スパイクなしとスパイクありでは、スパイク

ありの方が派手な印象となる (図 19(2)). 全ての表現を通して、嫌いな印象となることはなかった (図 19(3)). 2 値制御/連続制御とスパイクあり/なしの比較から、制御の手法とスパイクの有無によって印象が変わることが分かった。

次に、発展的な表現であるツノと水跳ねをスパイクあり/なしと比較した結果を示す (図 20).

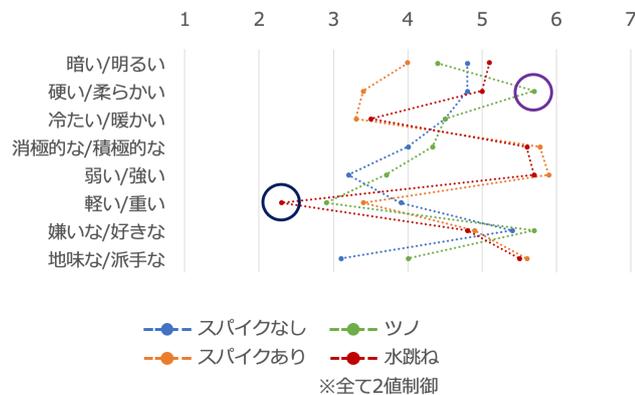


図 20: 印象評価実験の結果 (ツノ/水跳ねと、スパイクあり/なし)

硬い/柔らかい項目より、ツノは 4 種類の表現の中で最も柔らかい印象となった。また、軽い/重い項目より、水跳ねは最も軽い印象となった。グラフ全体の印象として、水跳ねはスパイクありに近い印象となり、ツノはスパイクなしにやや近い印象となった。このように、水跳ねとツノの表現は磁性流体を用いた表現に柔らかさや硬さといった印象を付与できたと考えている。

## 8. まとめと展望

本研究では、磁性流体にオイルを混合させ、制御方法を工夫することで、スパイク現象に加えて、なだらかな半球や余韻を表現する手法を提案した。さらに、これらの表現手法を組み合わせることで、特徴的な表現力と周辺環境との親和性を備えたアンビエント・ディスプレイ「RippleSpike」を構築した。さらに、性能評価とユーザ評価を通して、システムの応答性や表現力を調査した。

今後の展望として、電磁石の角度や配置を調整し、電磁石から発生する磁力同士を干渉させることで、より複雑で多彩な表現を作成することができる可能性がある。例えば、本提案では磁場を垂直に印加しているが、水平に印加することで、楕円状の半球が生成される。

また、現状の亚克力を利用した天板は、光の反射によって視認性が損なわれてしまう。具体的な解決策として、低反射ガラスを使用することで、光の反射を防ぐことができると考える。

## 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] 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, Vol.2, No.1, pp.16-23, 2014.
- [2] 光 栄: JR 大阪 駅「水の時計」, <http://www.koeiaquatec.co.jp/works/detail/jrosakamizutokei.html>. 参照.2023/12/22.
- [3] 児玉 幸子, 宮島 靖: 音楽に同期する磁性流体彫刻, 日本バーチャリアリティ学会論文誌, Vol.12, No.3, pp.247-258, 2012.
- [4] Hiroshi Ishii, Brygg Ullmer: Tangible Bits: Towards Seamless Interfaces between People, Bits and Atoms, CHI 97. pp.22-27. 1997
- [5] Craig Wisneski, Hiroshi Ishii, Andrew Dahley, Matt Gorbet: AmbientDisplays: Turning Architectural Space into an Interface between People and Digital Information, CoBuild'98, pp.22-32, 1998.
- [6] Takuya Matsunobu, Yasuaki Kakehi: Coworo: a kinetic installation with shape-changing liquid, Tokyo University, <https://xlab.iii.u-tokyo.ac.jp/projects/coworo/>, 参照.2023-12-22.
- [7] Ayaka Ishii, Itiro Sio: BubBowl: Display Vessel Using Electrolysis Bubbles in Drinkable Beverages. , In Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '19). pp.619-623. 2019.
- [8] Ayaka Ishii, Namiki Tanaka, Itiro Sio: Bubble Mirror: An Interactive Face Image Display Using Electrolysis Bubbles, SIGGRAPH Asia 2020 Emerging Technologies, No.18, pp.1-2, 2020.
- [9] 石井 綾郁, 池松 香, 椎尾 一郎: 電気分解イオンによる湿潤面への情報提示, コンピュータソフトウェア, vol.39, No.1, pp.105-119, 2020.
- [10] Deepak Ranjan Sahoo, Timothy Neate, Yutaka Tokuda, Jennifer Person, Simon Robinson, Sriram Subramanian, Matt Jones: Tangible Drops: A Visio-Tactile Display Using Actuated Liquid-Metal Droplets, In Proceedings of CHI2018, No.177, pp.1-14, 2018.
- [11] 山本 景子, 長沼 大樹, 油井 俊哉, 原田 誠史, 福谷 和芳, 堀 修生, 福澤 貴之: Astral Body: 強磁性粉末を用いた動的なディスプレイによる生き物らしさの表現, 日本バーチャリアリティ学会論文誌, Vol.24, No.3, pp.313-323, 2012.
- [12] Fabian Oefner: Millefiori, <https://www.behance.net/gallery/4036035/Millefiori>, 参照.2023-12-22.
- [13] 脇田 玲, 中野 亜希人: Rheologic Interaction: 流動体プログラマブル・マターを用いたインタラクティブデザインの試み, 情報処理学会研究報告, HCI-140.NO.17, pp.1-5, 2010.
- [14] 中野 亜希人, 脇田 玲: 磁性ゲル形状ディスプレイの開発とインタラクティブ手法の検討, 情報処理学会論文誌, vol.54, No.4, pp.1528-1537, 2013.
- [15] Sun Mengmeng, Tian Chenyao, Mao Liyang, Meng Xi-anghe, Shen Xingjiaan, Hao Bo, Wang Xin, Xie Hui, Zhang Li: Reconfigurable Magnetic Slime Robot: Deformation, Adaptability, and Multifunction, Adv Funct Mate, pp.1-13, 2022.