

シャボン膜凍結式全周囲スクリーンの提案

橋本 侑樹* 西村 晶太郎* 寺澤 真一郎* 大塚 真柊* 佐藤 俊樹*

概要. シャボン玉は美しく、そして儂いものとして親しまれており、幅広い分野で注目されてきた素材である。近年はシャボン膜をプロジェクタのスクリーンとして用いる研究が行われている。本研究では、新たにシャボン膜を凍結させ不透明度を高めることでスクリーン化を試みる。特に、膜が完全に凍結するまでの過程で膜上に氷の欠片が発生し対流する「スノーグローブ現象」を用いた、新しい映像表現の可能性にも着目した。また、シャボン膜は「平面形状」以外にも空気を入れて膨らませることで、「半球（ドーム）形状」のような超広角プロジェクションを用いた全周囲映像投影に適した形状に変形させることも可能である。本稿では実際にシャボン膜を生成、凍結させ、さらにスノーグローブ現象を発現させることが可能なプロトタイプの実装を行い、その性能を評価し、今後の展望等について述べた。

1 はじめに

シャボン玉は美しくも儂い存在として古くから親しまれてきた存在であり、芸術・文学・音楽などの様々な表現で用いられてきた。一方、科学の分野でもその性質が様々な角度から分析され、応用が行われてきた [1]。Human-Computer Interaction (HCI) 分野においてもシャボン膜の持つ独特の性質は注目され、ディスプレイとして応用する試みが行われてきた。シャボン膜は約 $1\mu\text{m}$ 程の薄い膜であるため、壊れやすく、また透明であるため映像投影に適した素材であるとは言い難いが、シャボン膜に振動を与えることで膜を不透明化させ、映像投影が可能な美しいスクリーンを実現する試み [2] やシャボン玉に煙を閉じ込めることで不透明化し、映像投影を可能にする研究 [3] 等の、シャボン玉ならではの特性に着目したディスプレイ化の試みが行われてきた。

しかし、スクリーンとしてのシャボン膜の持つ面白さはこれだけではない。本研究が新たに着目するのは、シャボン膜の「凍結」である。シャボン膜は本来透過率が高く映像投影には不向きであるが、膜を低温で凍結させることで不透明度が上昇する。この凍結状態のシャボン膜が、映像を美しく拡散するスクリーンになり得るのではないかと考えた。

また、本研究ではシャボン膜の「凍結過程」で観測できる「スノーグローブ現象 (図 1)」にも着目する。この現象は、シャボン膜上に生じた氷の欠片 (以下「氷片」と呼ぶ) が膜上を対流する凍結過程独特の美しい現象であり、スクリーン化により映像投影技術とこの美しい自然現象を組み合わせた新しい表現の可能性にも着目した。

本稿では、シャボン膜ならではの美しさや儂さ、また後述するスクリーンとしての面白い性質を活か

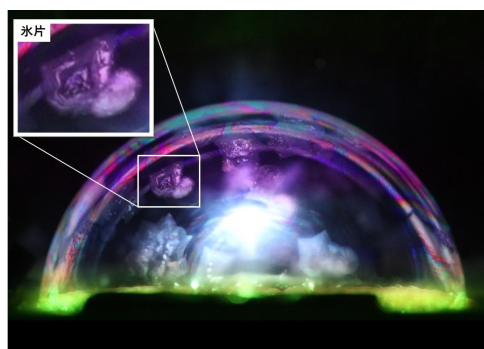


図 1. スノーグローブ現象の氷片

しながら、「凍結」という従来とは異なるアプローチでシャボン膜をスクリーン化する試みについて述べる。

2 提案と目的

本研究の目的は、シャボン膜を低温環境下において「凍結」させることで膜の不透明度を上昇させ、シャボン膜上への映像投影を可能にする新しい「シャボン膜凍結式スクリーン」を実現することである。また、その凍結過程にも着目した新しい映像表現の可能性を示すことである。

本研究の提案するシャボン膜凍結式スクリーンは、プロジェクタスクリーンとして次のようなユニークな性質を持っていると考える。まず、シャボン膜の凍結過程は膜の周囲の温度条件に大きく依存するため、膜の全体が完全に凍結するまでの過程は様々で、必ずしも膜の全体が均一に、もしくは一瞬で凍結するとは限らない。つまり多くの場合、その凍結過程は、同一膜上に「凍結している部分」と「そうでない部分」が混在する過程を経て、徐々に凍結していく過程をたどる。この性質は、改めてプロジェクタ

スクリーンの性質として考えてみると、同一の膜上に「映像を映し出す不透明部分」と、「映像を透過させ、膜の外（例えば周囲の壁等）に映像を映し出す透明部分」を同時かつ動的に存在させる、面白い性質であるとも捉えられる。さらに、このシャボン膜の凍結過程においては、温度等が関係する特定の条件を満たすことで、「スノーグローブ現象 [4]」と呼ばれる美しい現象が観測可能である。この現象は、凍結過程にあるシャボン膜上に小さな氷片が生じシャボン膜上を動き回る視覚的に美しい現象であり、第7章で詳しく述べるように、映像投影との組み合わせで新しい映像表現への応用の可能性も考えられる。

加えて、平面的なスクリーンとしての「膜形状」に限らず、空気を送り込んで膜を膨らませていくことで、「半球状」、さらには「球状」などの非平面的な形状への変化も可能な形状の可変性にも注目したい。これは超広角投影技術と組み合わせることで、形状・大きさ可変の全周囲投影用の半球・球体スクリーンとしての応用可能性も持つと考える。

本稿では以下に、次のようなことを述べる。

1つ目に、上記の平面および全周囲映像の投影が可能な2種類の非平面形状シャボン膜スクリーンの生成とスノーグローブ現象の発現を含むシャボン膜の凍結、および映像投影が可能なディスプレイシステムの要件についてまとめ、最初のプロトタイプ制作について述べる。

2つ目に、実装した試作機および凍結させたシャボン膜のスクリーンとしての最初の性能評価として、実装したシステムを用いたシャボン膜の凍結成功率、凍結するまでに要する時間、また凍結膜の不透明度について調べた実験について述べる。

3つ目に、実装したプロトタイプの改善点や今後の拡張案について述べ、凍結式シャボン膜スクリーンやスノーグローブ現象と映像投影との組み合わせの可能性について考察する。

3 関連研究

薄く透明であるシャボン玉やシャボン膜はそのままの状態ではディスプレイやプロジェクタのスクリーンとして用いることは困難であるが、これまでも様々な解決手法が提案されてきた。例えば、シャボン玉の中に不透明度を高めるための煙や霧を閉じ込めることで、外からの映像投影を可能にする手法が提案されている [3] [5]。この手法の場合、シャボン玉に対して外からの映像投影が可能になる点に加え、映像が投影された状態のシャボン玉が割れた瞬間にも、空間中に解放された煙に映像が映る美しい映像表現が可能になる利点がある。

次に、複数のシャボン玉を2次元的に配置し、各シャボン玉の大きさを制御することでディスプレイの画素として用いる試み [6] や、液体中に発生させた泡沫を液体の表面 [7] や底部 [8] に2次元的に並

べ、文字や模様を形作る試みもある。

透明なシャボン膜のスクリーン化に着目した研究としては、シャボン膜に超音波を当て、膜を振動させることにより反射特性を変化させ、映像投影を可能にする試みもある [2]。またシャボン膜に超音波を当てて振動させる手法は立体的に形作った泡の集合体に対しても用いられており [9]、泡への映像投影の視認性を向上させている。さらにこの手法では、泡にヘリウムガスを含ませ、形作った形状を空中に浮かせる試みも行われている。

このようにシャボン玉（膜）や泡をディスプレイやスクリーンとして用いる試みが複数なされてきており、どの試みも様々な角度から注目したシャボン膜ならではの美しさや面白さをうまく活かしたものであるといえる。本研究では、「シャボン膜の凍結」というこれまでにない方向性で、凍結過程を含めたシャボン膜の新しい側面の美しさのプロジェクタスクリーンとしての応用可能性に着目したものである。

4 投影システムの設計

提案するシャボン膜凍結式スクリーンを有するディスプレイシステムに必要な機能について、シャボン膜の「生成」・「凍結」・「投影」機構の3つに分けてそれぞれの設計の指針を述べる。

4.1 シャボン膜の生成に関する機構の設計

まず、シャボン膜は乾燥等の影響で壊れやすく長時間の維持が困難であると考え、シャボン膜スクリーンは実際に映像投影を行う直前にユーザ（もしくはシステム側）が簡単な操作で生成することとした。

なお、凍結前のシャボン膜は透明に近いが、膜を透過する映像は若干であるが膜の模様が映り込む、また映像がゆがむ等の視覚的な影響を受ける。しかしシャボン膜が存在しない状態が初期状態であればこれらの影響はなくなり、プロジェクタ映像はシャボン膜スクリーンの位置よりさらに前方にある別のスクリーンへの投影も可能になる。

次に、スクリーンとして用いるシャボン膜は、ユーザ/システム側が「膜を膨らませる」ことで、平面から半球形状まで自由に形状を変えられることとした。また、この操作は凍結前に行うこととし、ユーザはボタン等の簡単な操作で無段階に膨らみ加減を調整できることが望ましいと考えた。このシャボン膜の生成が完了すれば、すぐ凍結のための冷却処理を開始する。なお、半球形状からさらに膨らませることで球に近い形状までの変形が可能であると考えられるが、凍結時に膜の耐久性が低下することが予想されたため、今回の実装では半球形状までの変形に留めることにした。

4.2 シャボン膜の凍結に関する機構の設計

Ahmadi らの報告 [4] によると、地面に接地した状態の球状のシャボン玉において、次の2種類の異なる凍結現象が報告されている。

1つ目の凍結は、冷たい基部上にシャボン玉を置いたときに、接地部分から頂点部分の方向に向かって徐々に凍結していく凍結過程である。この凍結過程は、下部から徐々に凍結していくことからボトムアップ凍結と呼ばれている。

2つ目の凍結は、シャボン玉の接地部分の温度がシャボン玉の融点よりも低く、かつ接地部分から頂点部分に向けた対流が膜上に起こっている場合に観測できる現象である。この現象では、接地部分で凍結した氷片が対流により削られ、対流に乗って膜上を上昇していく。このとき、氷片は次第に大きく成長しながら互にくっつきあい、全体が成長した氷片に覆いつくされるように凍結していく過程となる。これがスノーグロブ現象である。

以上をまとめると、スノーグロブ現象が発現する後者の凍結パターンを再現するためには、シャボン膜スクリーンの接地部分が十分に冷却される必要があり、特に上部の方がより低温になるような凍結条件を再現する必要があると考える。

4.3 シャボン膜への投影に関する機構の設計

本研究で実現するシャボン膜スクリーンは空気で膨らませることで平面から半球形状まで変化する。特に半球形状や、将来的に球形状まで膨らませた場合の投影も可能にする拡張案を考えると、複数台のプロジェクタを用いずともシャボン膜スクリーン全体への投影が可能になるシャボン膜内部(下部)からの画角が180度に近い超広角投影が望ましいと考える。

5 実装

次に、以上の設計をもとに実際に制作したプロトタイプの実装手法について述べる。

5.1 シャボン膜の生成

システム全体のハードウェア構成は、「シャボン膜生成機構」、「シャボン膜冷却機構」および「全周囲投影システム」の大きく分けて3つのユニットから構成されている(図2)。

まずシャボン膜生成機構(図3)は、シャボン液に浸して張り詰めた状態の紐を(1)、銅パイプを曲げて制作した円形(直径10cm)の「シャボン膜基部」全体に擦りつけることで(2)、平面的な初期状態のシャボン膜を生成する(3)。この紐の両端は2本のスライドレール上に固定されており(図4)、ユーザは紐を引っ張ることができ、いつでも容易にシャボン膜を張れるようになっている。

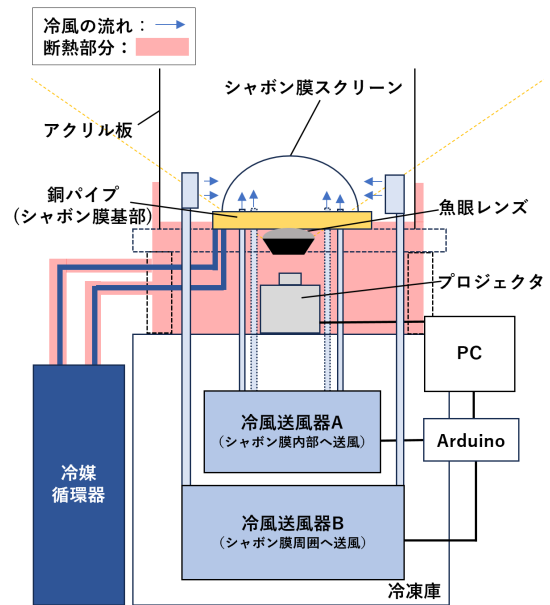


図2. システム構成

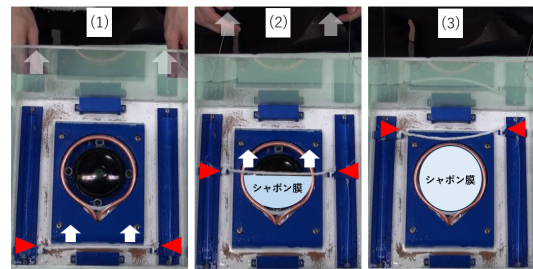


図3. シャボン膜生成機構

次に、シャボン膜を膨らませる場合、シャボン膜内部へ開口する送風口(A)から市販の冷凍庫(MAXZEN製 JF200ML01)を改造して制作した冷風送風機Aから断熱パイプを通して-10度に冷却した空気を少量ずつ送り込む(この段階ではシャボン膜はまだ凍らない)。シャボン膜の形状は、この時送り込む冷却空気の量(電磁弁開放時間)に応じて、平面(初期状態)から半球形状(約7秒間開放)まで無段階に変化させることが可能である。今回の実装では、この空気量のコントロールはユーザが手動(ボタン操作)で行うようになっている。

なお、今回の実装で用いたシャボン液は、質量比で80%の水、10%のポリビニルアルコール(PVA)を、そして10%の市販の食器用洗剤用いて調合した。これは一般的なシャボン液と同様の水および洗剤に加え、シャボン膜の強度を高める素材としてPVAを加えて作成したものである。なお、シャボン玉の強度を上げるための様々な手法が存在するが[10][11][12]、加えすぎると逆に強度が低下したり、凝固点降下が起こり凍りにくくなったりする問題があり、



図 4. シャボン膜基部および送風口の位置関係

現時点では材料やその割合についてはまだ試行錯誤が必要な状態である。

5.2 シャボン膜の冷却

シャボン膜の生成が完了すると、即座にシャボン膜冷却機構を稼働させ、シャボン膜を凍結させる冷却プロセスを開始する。今回の実装では、入手および管理が困難で危険性が高い液化窒素や液化炭酸等を用いた冷却手法は用いない、次の2種類の異なる冷却手法を組み合わせて実装した。まずシャボン膜スクリーンの接地部を冷却するために、シャボン膜基部にある膜が接地する冷却パイプに冷媒循環装置(三商製 SCA-12)を用いて-2度に冷却した不凍液(エチレングリコール)を循環させた。同時に、シャボン膜上部の空間を冷却するために、冷風送風機 A から-10度の冷却空気の送風を行った。

なお、冷風送風機のダクトと冷媒循環器から冷却パイプに至る配管はグラスウール断熱材で覆い、またレンズおよびプロジェクタ部の周囲も発泡素材で覆うことで断熱処理を施した。また今回の実装においては、冷却空気をシャボン膜周囲に滞留させるために、スクリーンの周囲を高さ21cmの薄いアクリル板で囲むこととした。しかし、将来的にはシャボン膜に直接手で触れるなどの対話を可能にするために、開口部と外気間に風の流れを作り外気の侵入を防ぐエアカーテン機構を取り入れる等の冷却効率の改善を行いたい。

5.3 スノーグローブ現象の再現

スノーグローブ現象の発現条件として重要なのは、シャボン膜の接地部分で氷の結晶が生成されていることである [4]。シャボン膜ではマランゴニ対流と呼ばれる液体中の温度勾配によって表面張力が変化し、それに伴い液体内部で対流が発生する現象が起きている。スノーグローブ現象ではシャボン液が凍り、結晶になる際に生じる熱によりシャボン膜内で

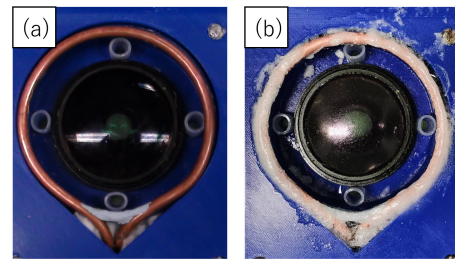


図 5. (a) シャボン膜基部と (b) 付着した霜

温度勾配が生まれ、マランゴニ対流が発生する。

シャボン膜の接地部分で生成された氷の結晶がマランゴニ対流によって液状部に流され、大きな氷片となる。このようにして、スノーグローブ現象は発現する。このことから、シャボン膜の接地部分である銅パイプは、全く何も付着していない状態でシャボン膜を生成すると、ボトムアップ凍結が起こりやすくなるを考える。実際に、事前に銅パイプにシャボン液を塗布し、銅パイプ表面に結晶(霜)を付着(図5)させてからシャボン膜を生成すると、スノーグローブ現象が発現する際に、より多くの細かな氷片が膜上を舞う様子が観察された。

5.4 超広角映像投影

全周囲映像投影システムは、約180度の画角を持つ小型の広角レンズ(Opteka製 0.3X UltraFish-eye)と広角レンズを通してフォーカスが合うように調整した小型プロジェクタ(UO製 SmartBeam-Laser, 輝度100ルーメン)から構成されている。広角レンズはスクリーンの膜面(平面時)から1cm下方に中心(光軸)を一致させた同心円状に配置し、プロジェクタはレンズ下面から13cmの距離に、広角レンズ後玉の直径と投影画像の短辺の長さが一致する角度で配置した。これにより、凍結状態のシャボン膜スクリーンの内側から、シャボン膜の全周囲に対しての映像投影を可能にした。

また投影画像は、事前に推定しておいた広角レンズを通したプロジェクタの内部・外部パラメータ、およびレンズの歪み係数を用いて、Fisheyeカメラモデルを実装したUnity内のシェーダプログラムにより、リアルタイムにレンダリングできるようにした。

なお、将来的に半球形状からさらに膜を膨らませた場合の球に近い形状のスクリーンに投影するためには、現在のレンズ位置を、膜を膨らませながら、膜面より上の部分にせり出させて配置する必要があると考える。

6 性能評価

今回作成したプロトタイプの性能を評価するために、2つの実験を行った。

6.1 凍結成功率と凍結に要する時間およびスノーグローブ現象の発現率

今回提案するシャボン膜の凍結によるスクリーンを生成する実験を行った。膨らませない平面形状、約3秒間送風を行うドーム形状(中間)、約7秒間送風を行う半球形状を形成したのちに凍結させた。凍結はそれぞれの形状ごとに30回行い、シャボン膜周辺の温度が5度を超えた場合、実験を一度停止し、0度まで冷却を行った後に実験を再開した。このとき、シャボン膜を生成したタイミングから膜全体が完全に凍結していることを視認するまでの時間(凍結時間)を測定した。なお、実験時の室温湿度は平面形状の時は21.3度、51%、ドーム形状の時は20.5度、49%、半球形状の時は20.3度、52%であった。また、ドーム形状、半球形状のシャボン膜についてはシャボン膜の接地位置からの高さを測定した。また、凍結終了時のシャボン膜周辺の温度をアクリル板の内側に設置した温度計から読み取った。

平面形状、ドーム形状、半球形状の凍結前および凍結後の様子を斜め上方向と水平方向から撮影した写真をまとめたものが図6である。また、各形状について成功率と凍結時間の平均を算出した。平面形状では、30回中23回凍結が成功し、成功率は76.7%であった。また、凍結時間の平均は45秒であった。ドーム形状では、30回中22回凍結が成功し、成功率は73.3%であった。また、凍結時間の平均は43秒であり、高さの平均は2.12cmであった。半球形状では、30回中11回凍結が成功し、成功率は36.7%であった。また、凍結時間の平均は63秒であり、高さの平均は4.99cmであった。なお、スノーグローブ現象についてだが、今回の実験ではどの形状においても氷片が少なからず接地面から延びる氷の結晶から離れた場所に見られた。つまりスノーグローブ現象はシャボン膜を生成することができれば発現することが確認できた。

この実験から3点が判明した。1つ目は氷片の数や大小に差はあれど、シャボン膜が生成でき、凍結する際にはスノーグローブ現象が発現していたことである。2つ目は凍結の際に大部分が凍結しスノーグローブ現象が発現しなくなった後は冷風が届きづらいレール側が凍結しにくいことである。3つ目は半球形状で失敗した際は、頂点付近では氷片がとどまらず、接地位置から成長した氷の結晶とつながり、頂点付近のみ凍結しない状態が見られたことである。2点目、3点目は冷風の発生場所に関する問題なので試作機の改良が必要となる。

6.2 凍結シャボン膜の不透明度の変化

シャボン膜が凍結した際の不透明度の変化を測定する実験を行った。5mm厚アクリル製の型を作り、シャボン液に浸すことで四角いシャボン膜を張った。この型を-15度の冷凍庫に60秒間入れ、シャボン

表 1. 計測した可視光透過率。

測定した物質	可視光透過率 (%)
凍結後のシャボン膜	80.9
凍結前のシャボン膜	99.8
アクリル板 (5mm 厚)	97.0
曇りアクリル板 (5mm 厚)	64.0

膜を凍結させた。凍結したシャボン膜に対し、可視光透過率測定器 (LS162 Transmission Meter) を用いることで可視光透過率を測定した。なお、比較のために凍結前のシャボン膜、アクリル板 (5mm 厚)、曇りアクリル板 (5mm 厚) の可視光透過率の測定も行った。また、凍結前後のシャボン膜に、黒背景に白文字で「Bubble」と表示した画像を投影し、その様子を水平方向から撮影した。

凍結前、凍結後のシャボン膜、アクリル板 (5mm 厚)、曇りアクリル板 (5mm 厚) の可視光透過率を表にしたものが表1である。この結果からシャボン膜の凍結によって透過度の低下が示された。

また、図7(a)は非凍結時の、(b)は凍結時のシャボン膜に投影を行ったときの様子である。実際に文字の視認性が向上していることが見て取れる。

以上の可視光透過率の変化と投影した際の実際の視認性の変化から、スクリーンとして扱うことができるような変化が起こっていると考えられる。

7 考察と展望

7.1 スノーグローブ現象の応用可能性について

スノーグローブ現象の氷片は、その位置や形状・サイズまでもが刻々と変化する、動的で視覚的にも美しい自然現象である。この現象は、同一のシャボン膜スクリーン上に「透明部分」と「不透明部分」を局所的に作り出し、シャボン膜上の氷片への投影と、膜を透過した先にある別のスクリーン(壁やかざした紙や手等)への投影の、2種類の異なる美しい多層映像表現を可能にする。

また、将来的にプロジェクタ部にハーフミラーを介した同軸カメラを接続すれば、スノーグローブ現象の氷片をカメラで追跡し、氷片に対しリアルタイムに色や映像・文字等を提示する等の動的な氷片の美しさを拡張する映像提示も可能になると考える。

また、カメラを用いて凍結過程をシャボン膜内側から撮影した全周囲映像をHMDを通してユーザに提示することで、大きなシャボン膜の中に入り、中から凍結過程を眺めるような新しいVR体験にも発展可能であると考えられる。

また、スノーグローブ現象自体も、シャボン液の配合や温度環境等によって、その氷片の形状や成長過程、移動速度等も様々に変化する。今後は、美し

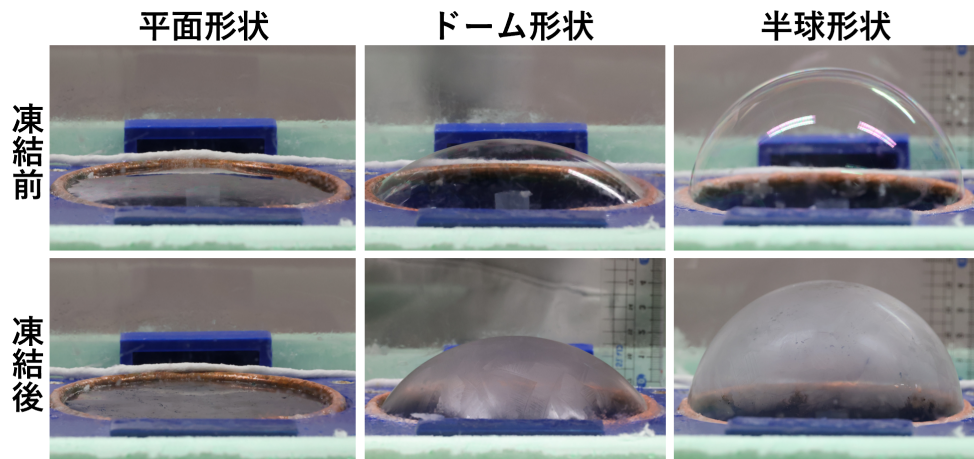


図 6. 水平方向から撮影した形状ごとのシャボン膜の凍結前後の様子

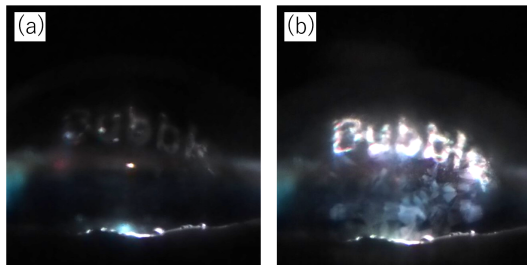


図 7. (a) 非凍結時, (b) 凍結時の文字画像の投影結果

い氷片を作り出すのに必要な様々な条件について検討し、これらをプログラマブルに作り出す冷却手法を探っていきたい。さらに、もしシャボン膜の周囲の温度変化の制御や、超音波・風等を用いて外部からシャボン膜上の対流や氷片の動きをコントロール可能になるのであれば、複数の氷片で模様や文字を形作ることも将来的には可能になるかもしれない。

7.2 インタラクション要素の可能性

今回の試作においては、凍結の過程で起こるスノーグローブ現象の再現に重きを置き、その凍結過程をユーザにゆっくり見せることに着目した実装になっていた。

一方で、試作機の冷却・断熱性能の向上により、今後より低い温度での急速なシャボン膜の冷凍が可能になれば、シャボン膜スクリーンを生成と同時に瞬時に完全凍結させ、必要な時に、瞬時に手元に生成できる「インスタントスクリーン」として活用する可能性もあると考える。これは、例えばプロジェクタのメニュー画面等を、遠くの画面ではなく、レンズ直前に生成したインスタントスクリーン等に一時的に映し出し、手元での操作を可能にする等の利用方法もあるのではないかと考える。

また、シャボン膜スクリーンは、手で直接触れる

ことで破壊することも容易で、不要になった場合に完全に除去することも可能である。さらに、凍結したシャボン膜は膜の一部を溶かした場合でも部分的に穴が開くだけで、全体が割れて完全に消えてしまうことはない。この性質を応用し、手で直接触れる、部分的に風を当てる等でスクリーンに穴を開けて、映像を膜の外に選択的に映し出すようなインタラクションも可能になると考える。

7.3 シャボン膜の形状の制約

実装した試作機では、直径 10cm のシャボン膜を半球形状より大きく膨らませた状態で凍結させることは困難であった。シャボン膜に直接当たる冷風はおよそ -10°C 程度に対し、シャボン膜周囲の温度は最低でも -1°C 程度であったことからシャボン膜が大きくなるほど膜全体に冷風が届かず、十分に冷やされない部分が生じてしまうことが原因だと考えている。今後は送風口の数や位置を改良し、より高い場所まで冷風を送ることができれば、シャボン膜の直径や高さをさらに大きくすることも可能になるのではないかと考えている。

8 まとめ

本稿では、シャボン膜を凍結させることで不透明度を高め、凍結した様々な形状のシャボン膜の全周囲への映像投影を可能にする手法を提案した。また、凍結過程におけるスノーグローブ現象の再現にも着目し、これを可能にするシャボン膜の凍結および投影システムの最初のプロトタイプ的设计と実装について述べた。

また初期のプロトタイプを用いた基本的な凍結性能の評価として、凍結時間、凍結の成功率、凍結前後の不透明度の変化を調べる実験を行い、最後にスノーグローブ現象を発現させるシャボン膜スクリーンの応用可能性や今後の拡張案について述べた。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 21K11993 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Xi Yang and Eijiro Miyako. Soap bubble pollination. *iScience*, Vol. 23, No. 6, p. 101188, 2020.
- [2] Yoichi Ochiai, Alexis Oyama, Takayuki Hoshi, and Jun Rekimoto. Poppable display: A display that enables popping, breaking, and tearing interactions with people. In *2013 IEEE 2nd Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*, pp. 124–128, 2013.
- [3] Masahiro Nakamura, Go Inaba, Jun Tamaoki, Kazuhito Shiratori, and Junichi 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*, p. 47–es, New York, NY, USA, 2006. Association for Computing Machinery.
- [4] S. Farzad Ahmadi, Saurabh Nath, Christian M. Kingett, Pengtao Yue, and Jonathan B. Boreyko. How soap bubbles freeze. *Nature Communications*, Vol. 10, No. 1, p. 2531, Jun 2019.
- [5] Sue Ann Seah, Diego Martinez Plasencia, Peter D. Bennett, Abhijit Karnik, Vlad Stefan Otrocol, Jarrod Knibbe, Andy Cockburn, and Sriram Subramanian. Sensabubble: A chronosensory mid-air display of sight and smell. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '14*, p. 2863–2872, New York, NY, USA, 2014. Association for Computing Machinery.
- [6] Shiho Hirayama and Yasuaki Kakehi. Shaboned display: An interactive substantial display using soap bubbles. In *ACM SIGGRAPH 2010 Emerging Technologies, SIGGRAPH '10*, New York, NY, USA, 2010. Association for Computing Machinery.
- [7] Ayaka Ishii, Manaka Fukushima, Yasushi Matoba, and Itiro Siio. Utakata: Floating bubble display. In *Extended Abstracts of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '20*, p. 1–8, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.
- [8] Harpreet Sareen, Yibo Fu, Nour Boulahcen, and Yasuaki Kakehi. Bubbletex: Designing heterogeneous wettable areas for carbonation bubble patterns on surfaces. In *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '23*, New York, NY, USA, 2023. Association for Computing Machinery.
- [9] Yuki Kubo, Hirobumi Tomita, Shuta Nakamae, Takayuki Hoshi, and Yoichi 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*, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [10] Marina Pasquet, Laura Wallon, Pierre-Yves Fusier, Frédéric Restagno, and Emmanuelle Rio. An optimized recipe for making giant bubbles. *The European Physical Journal E*, Vol. 45, No. 12, p. 101, Dec 2022.
- [11] 笛田和希, 山本七彩, 横山遥, 手嶋日菜子, 五十川奈穂, 柴田航志, 中原涼花, 乗次優希奈, 宮川光林, 田中聖子, 平野貴士, 上野桃子, 藤戸文子, 高嶋綾香, 菅野憲一. 〈論文・報告〉割れないシャボン玉の開発と割れなくなるメカニズムの解明. かやのもり: 近畿大学産業理工学部研究報告, No. 24, pp. 15–20, 07 2016.
- [12] Stephen Frazier, Xinyi Jiang, and Justin C. Burton. How to make a giant bubble. *Phys. Rev. Fluids*, Vol. 5, p. 013304, Jan 2020.