

シャボン膜の表面張力波を利用した音の可視化表現

中野航基^{1,a)} 澤田秀之^{1,b)}

概要: シャボン膜に音波を照射すると、表面張力波が発生する。本論文ではこの現象を利用した音波の可視化と、音楽を視覚的に理解し楽しむための新しい手法を提案する。本稿では、シャボン膜上に生じる表面張力波の論理的考察をもとに、実験データと理論値とを比較、考察する。また、シャボン膜を撮影した映像から、膜に照射された音波の音階周波数を自動的に認識するアルゴリズムを実装し、実験により有効性の検証を行う。更にコンピュータ・エンターテインメントやサウンドアート、音楽解析への応用と展望を述べる。

1. 研究背景

音は外界空間にあふれており、外界情報の獲得において重要である。人間は視覚的に音を捉えることができず、聴覚でのみ音を知覚している。しかし、我々のほとんどは普段音楽に用いる音階周波数を、聴覚的な情報のみでは瞬時に、かつ正確に認識することはできない。もし音を視覚的な情報と結びつけることができれば、音に対する理解をより深めることができる。例えば、絶対音感を持つ者は、音に色を感じる共感覚を身に着けている場合がある。色と音階を結びつけることで、音の周波数に対する理解をより強固にしている。同じように、空気中を伝播する音の波を、その空気中に見ることができれば、その粗密さに着目することで、音階をより感覚的に、かつ正確に認識することができるだろう。このような願望を動機とし、我々は空気中における音波の可視化を目指した。

我々はシャボン玉の中に、その可能性を見出す。シャボン膜に音波を照射すると、表面張力波と呼ばれる特徴的な波が出現することを見出した。我々はこの現象を利用することにより、空気中を伝播する音波を視覚情報化して表現する新しい手法を提案する。本稿では、シャボン膜上に生じる表面張力波の論理的考察をもとに、実験データと理論値とを比較、考察する。また、シャボン膜を撮影した画像や映像から、膜に照射された音波の音階周波数を自動的に認識するアルゴリズムを実装し、実験により有効性の検証を行う。更にコンピュータ・エンターテインメントやサウンドアート、音楽解析への応用と展望を述べる。

2. 関連研究

古代から音の可視化を目的として多くの試みがなされてきた。我々人間の感覚にはそれぞれ相互的な作用があるとアリストテレスは考えた。匂いに色を感じたり、形に味を感じたりする、所謂、共感覚である。これが視覚と聴覚

の間にもあると考えられた。つまり音に色を感じる、というものである。アリストテレスは、ピタゴラスが定義した7つの音階に対してそれぞれ色を割り当てた[2]。それからしばらくして、アイザック・ニュートンはAからGの音階に対して色を定義し、これは後にニュートン・サークル(図1)[3]と呼ばれるようになった。

音の可視化としては、18世紀に確立されたクラドニの実験が有名である。金属板の上に砂粒を撒き、音を伴う振動を加えると砂が移動し特徴的な模様が浮かび上がるという実験である(図2)[1,6,7]。板状の砂は振動していない点に集まり、これが振動の節を表す。この音波の周波数に対応する特徴的な模様はクラドニ図形と呼ばれ、現代でも多くのアーティストがこれに影響を受けた作品を発表している。ナイジェル・スタンフォードの作品にもこの現象が利用されている[8]。しかしながら、我々が恒常的に知覚しているのは空気を媒質とする振動であり、これまでの研究は空気中における音の可視化には適さない。研究対象としての音の可視化は多岐にわたり、他にも音源探査や声紋認識のための研究等があるが、我々は空気中を伝播する音波の可視化を目標とした研究を進めている。

一方、シャボン膜と音に関連する研究として、ガウロンの研究がある[10]。音楽と連動してチューブの中に張ったシャボン膜の渦や色が美しく変化する。我々は色や渦ではなく、波に着目して音階の視認に関する研究を行う。

映像から音波の周波数等を特定する研究として、MITとマイクロソフト、Adobeの研究者チームが開発した、ビジュアルマイクロフォンがある[19]。任意の物体を撮影した高画素数・高フレームレートの映像から、細かい振動を解析してその空間に存在したであろう音を復元する。シャボン膜を用いた我々の研究では、一枚の画像からも音階を特定でき、低画素数のカメラを用いても問題がない点が強みである。

また、現代にも音を聴覚以外の感覚で伝えるという試みは多くある。例えば落合陽一と日本フィルのプロジェクト

1 早稲田大学 先進理工学研究所

a almach@ruri.waseda.jp

b sawada@waseda.jp

の一環として「耳で聴かない音楽会」がある[18]. 楽器を演奏する映像と、体に身に着けるデバイスの色や振動を連動させることによって、聴覚に障がいのある方にも音楽を楽しんでもらうという試みである. 我々の研究では、音を聞くことができない人でも、音を見ることで音楽を楽しみ理解することができ、更に音階を認識させることも可能であると考えている.



図1 ニュートン・サークル

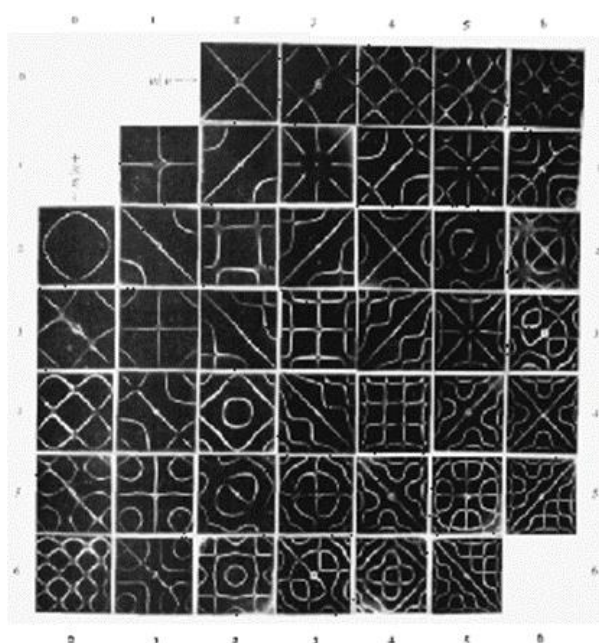


図2 クラドニ図形(Wallerの実験結果)

3. 原理

3.1 表面張力波

シャボン膜に単色光源を照射すると、図3(a)のように、光源を鏡面のように反射する. ところが、シャボン膜に音

波を照射すると図3(c)のように特徴的な波紋が発生することを見出した. これは音波によって励起された表面張力波であると考えられる. 表面張力波は図4のように、水面が外力を受けて変形した時、表面張力が主な復元力となる場合に発生する波である. 本研究での実験においては、音波に起因する空気の振動が外力となり、シャボン膜上に発生した波が膜の境界と中心で反射されることにより、円形の定常波が発生する. これは *antisymmetric waves* であると考えられ、流体力学的変動の速度 V_{AS} は、

$$V_{AS} = \sqrt{\frac{2\gamma}{\rho e}} \quad (1)$$

と表せる[20]. λ は溶液の表面張力、 e は膜の厚さ、 ρ は溶液の密度である. 周囲の空気の影響を考慮すると、空気密度 ρ_a に比例する項が現れ、速度 V_{AS} は以下の式となる[14].

$$V_{AS} = \sqrt{\frac{2\gamma}{\rho e + \frac{\rho_a \lambda}{\pi}}} \quad (2)$$

この式より、シャボン膜に照射された音波の周波数と、膜上に発生する表面張力波の波長 λ との関係は、次の式で表せる[10].

$$\lambda = \sqrt{\frac{2\gamma}{\rho e + \frac{\rho_a \lambda}{\pi}}} \frac{1}{f} \quad (3)$$

ここで、 f は照射する音波の周波数である.

一方、シャボン溶液の界面活性剤濃度と表面張力の関係を図5に示す. この図から、界面活性剤の濃度を上げるとシャボン膜の表面張力は極めて安定することがわかる. 加えて膜の厚さや溶液と空気の密度も大きな変化がないことを考慮すると、シャボン膜上の表面張力波の波長は主に、照射される音波の周波数に依存することがわかる.

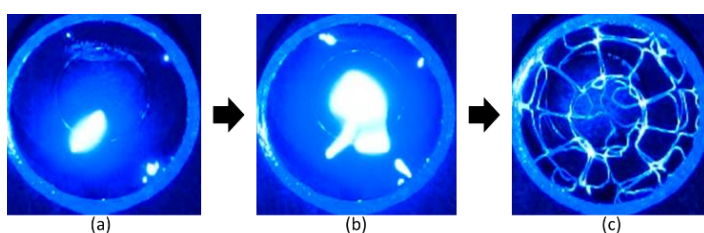


図3 シャボン膜に発生する表面張力波

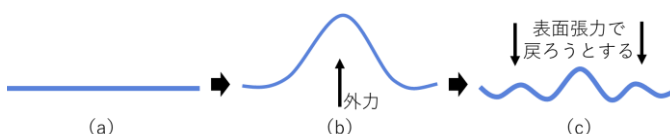


図4 表面張力波の発生イメージ

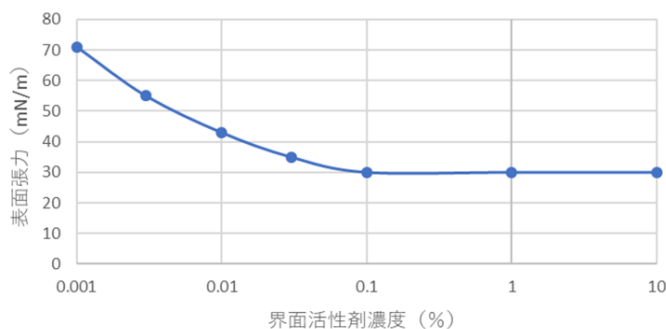


図5 溶液の界面活性剤濃度と表面張力の関係

4. 設計

本研究における実験装置の設計を図6に示す。本システムは主に下記の4点から構成される。

- ・シャボン膜を保持する枠
- ・音波を照射するスピーカー
- ・単色光源を照射するプロジェクター
- ・シャボン膜を撮影するカメラ

本手法では、スピーカーから音波をシャボン膜に照射し、膜の表面に現れる波を観察する。シャボン膜に使用する円形の枠は3Dプリンターを用いて作成し、素材はABS樹脂とした。また、波紋の視認性を高めるため、膜にはプロジェクターから単色光源を照射する。本実験で使用したパラメータは、音波の振幅 A 、周波数 f 、シャボン膜と音源の距離 d 、枠の半径 R である。特筆しない限り、 d は1cm、 R は2.5cmとした。

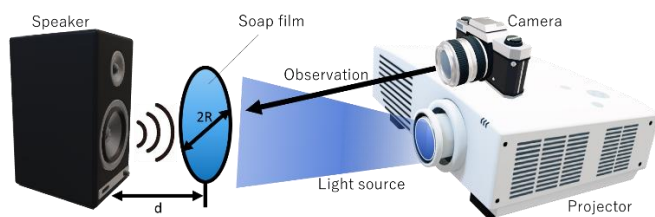


図6 本研究の実験装置

本研究ではシャボン膜上に発生した円状の表面張力波を撮影し、観察する際、特に図7に示すような最小の半径に着目する。これは視認性がよく比較が容易なためである。また、シャボン膜上にはこの図の下部に示すような波が発生していると考えられており、円状の波の内、半径が最小の波の直径が、表面張力波の波長 λ となる。

5. 波の特性に関する実験結果と考察

本研究では音波をシャボン膜に照射した際に現れる表面張力波を利用して音の可視化を図る。それに伴い、表面張

力波の波長に関する理論式と実験データに整合性があるのかを比較・考察する必要がある。また、どのような要素が、表面張力波の波形や振幅、その他の特性に影響を及ぼすのかを調べる。以下、これらに関する実験結果と考察を述べる。

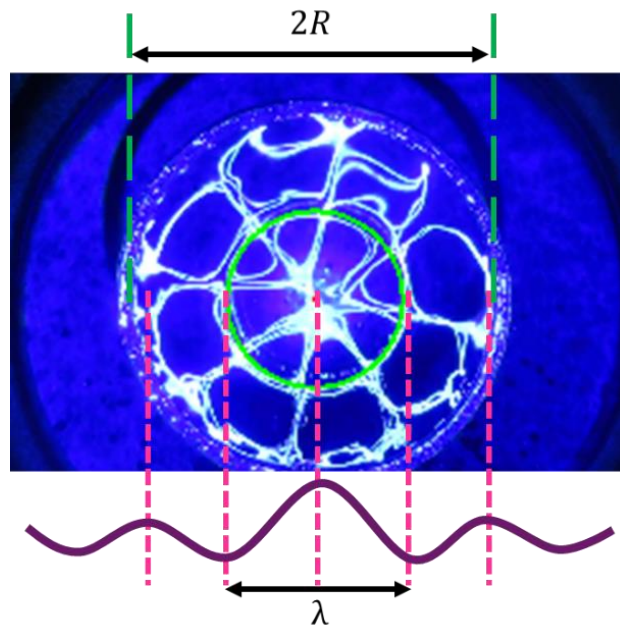


図7 本研究における波長の定義

5.1 表面張力と波

まず初めに、膜に使用するシャボン液における洗剤の濃度や表面張力の大きさが波紋にどのように影響するのかを調べる。

本研究では水と食器用洗剤を混ぜ合わせて作成したシャボン液を使用した。本実験では、溶液に含まれる洗剤の量を調整し、波の特性の変化を観察する。また、洗剤の量を変化させることにより、溶液の界面活性剤濃度も変化する。

水200mlに対し、界面活性剤濃度37%の食器用洗剤をそれぞれ1ml, 20ml, 50ml, 200ml加えて混ぜ合わせた溶液を用意し、波の観察を行った。またそれぞれの溶液の表面張力を実測した。音階周波数C2(65.4Hz)とC3(131Hz)の音波を照射し、他のパラメータは固定し実験を行った。

溶液に含まれる洗剤の量及び溶液の表面張力と波の関係を図8に示す。

この結果から、洗剤の濃度が変化しても、音波の周波数が変わらない限り、波の波長は変化しないことがわかる。また、図5からもわかるように、水の中に食器用洗剤をわずか1ml入れるだけで、溶液の表面張力は、水の約半分である30(mN/m)まで低下し、以降、界面活性剤の濃度を上げてても変化しない。従って、3.1でも示したように、表面張力波の波長に影響する溶液の表面張力は、シャボン膜を形

成する溶液において極めて安定しているため、洗剤や界面活性剤の濃度を変化させても、波の波長に大きな影響はないといえる。また、溶液がシャボン膜を形成できるのは、そもそも溶液の表面張力が低いためであるので、高い表面張力の溶液で実験した結果を観察することはできなかった。

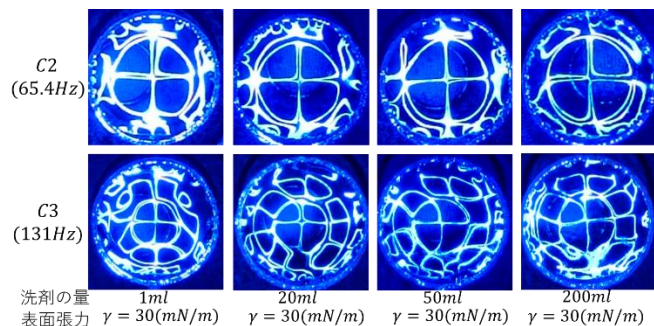


図8 洗剤の量と波の関係

5.2 粘度と波

次に、シャボン溶液の粘度が波の特性にどう影響するかを調べる。シャボン溶液に洗濯糊を加えることで液の粘度を高めることができることを利用した。本実験では水 200ml に対し界面活性剤濃度 37%の食器用洗剤を 20ml 加えたシャボン液に洗濯糊を加えない場合とそれぞれ 10ml, 50ml, 100ml, 150ml 加えた場合の波を観測した。音源には C2 と C3 の音階周波数を使用し、他のパラメータは固定した。膜の粘度と波紋の関係を図9に示す。シャボン膜の粘度が変化しても、円状の波の直径は変化しないことがわかる。この結果から、溶液の粘度は波の波長に影響を及ぼさないことがわかる。この結果は式(1)の性質と合致している。

また、粘度を上げることで、シャボン膜の保持可能時間を延ばすことができるという利点がある。更に、図9からもわかるように、洗濯糊の濃度を上げると、シャボン膜に光沢感が増し、波の視認性が上がる。これらのことから、インタラクションなどに活用できると考える。

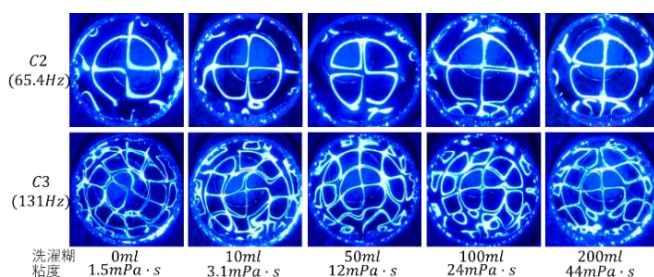


図9 粘度と波の関係

5.3 音波の振幅と波

本実験では音波の振幅が波の特性にどのような影響を及ぼすかを調べる。音源から照射する音波の振幅 A を変化

させ、波を観察する。音階周波数 C2 と C3 音波を照射し、音波の振幅 A 以外のパラメータは固定した。音の振幅と波紋の関係を図10に示す。振幅が小さいと周辺部の波紋が不鮮明になり、振幅が大きいと波紋が乱れやすくなるが、一方、波の波長 λ に着目すると、振幅を変えても変化しないことがわかる。この結果は、式(1)に従うものであり、以上より、音波の振幅は波の外見を変化させるが、波長には影響しないことがわかった。

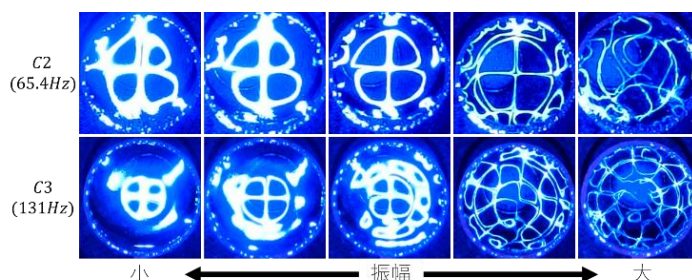


図10 音波の振幅と波の関係

5.4 膜の大きさと波

本実験ではシャボン膜の面積が波紋にどのような影響を及ぼすかを調べた。シャボン膜の半径 R のみを変化させ実験を行った。シャボン膜に使用する膜は、半径 2cm, 半径 2.5cm, 半径 3cm, 半径 3.5cm の4種類を用意した。膜の大きさと波紋の関係を図11に示す。本実験より膜の大きさは波の波長 λ に影響しないことがわかった。この結果でも式(1)との整合性を確認できた。

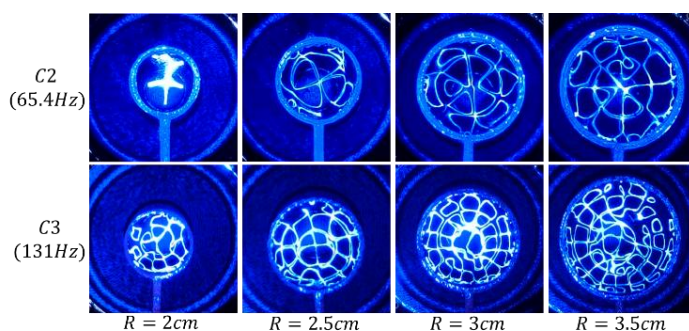


図11 膜の大きさと波の関係

5.5 音源からの距離と波

シャボン膜と音源との距離 d が、波にどのような影響を及ぼすかを調べた。他のパラメータを固定し、音源からの距離 d のみを変化させて観察した波を図12に示す。音源から離れるほど、照射される音波の振幅は小さくなるため、5.4の結果と同様に、周辺部の波紋は曖昧になる。その一方で、音源からの距離を変えても、波の波長は変わらないことがわかる。この結果でも式(1)との整合性を確認できた。

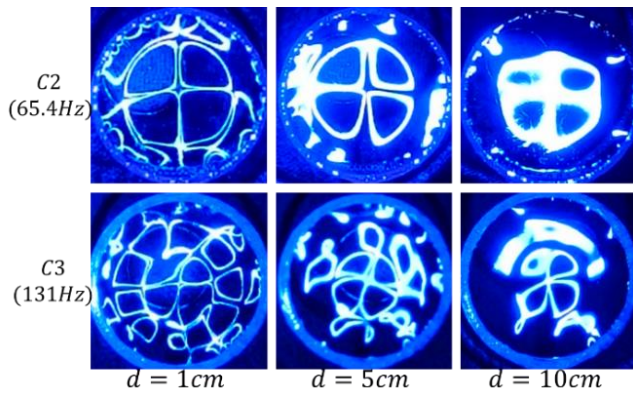


図 12 音源からの距離と波の関係

5.6 音階周波数と波

本実験では照射する音波の周波数とシャボン膜の波紋にどのような関係があるのかを調べる．音波の周波数以外のパラメータは全て固定し実験を行った．この実験で得られた音階周波数と波の関係を図 13 に示す．また、式(1)に示す理論値と、実測した波長を比較したものを図 14 に示す．ここで、理論値は表面張力を $\lambda = 30(\text{mN/m})$ ，膜の厚さを $e = 1\mu\text{m}$ ，空気と溶液の密度をそれぞれ $\rho = 1000\text{ kg/m}^3$ ， $\rho_a = 1.293\text{ kg/m}^3$ とした．この結果から、表面張力波の波長は、照射する音波の周波数に依存することがわかる．周

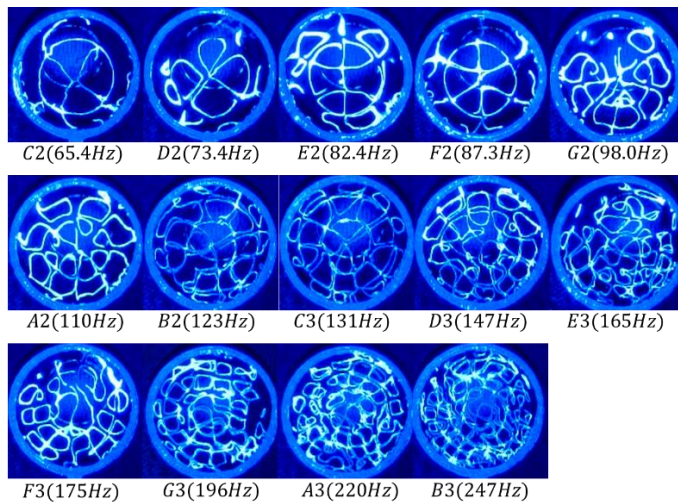


図 13 音階周波数と波の関係

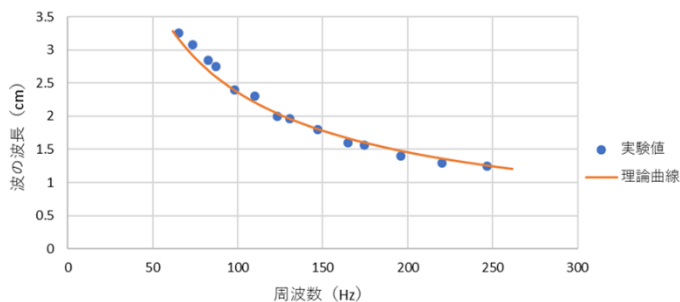


図 14 波の波長の理論値と実験値の比較

波数が高くなるほど波の波長は短くなる．また、図 14 から、実験により観察された波のデータは理論値とよく一致していることがわかる．

5.7 音波の波形と波

次に照射する音波の波形が、波にどう影響するのかを調べる．他のパラメータを固定し、照射する音波の波形を変化させて発生した波を観察した結果を図 15 に示す．音波の波形を変化させても、波の波長は変化しないことがわかる．一方で、矩形波やのこぎり波の音波を照射された際に発生する波に顕著にみられるように、照射する音波の波形の特性に従って、波紋の形にも特徴が現れることがわかる．

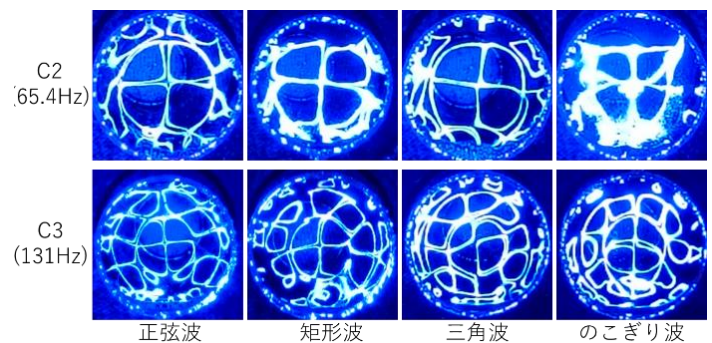


図 15 音波の波形と波の関係

5.8 音波の周波数と波の振幅

照射する音波の周波数によって、波の振幅に影響がないか調べる．他のパラメータを固定し、各周波数において、音圧を 90dB に固定し、発生する波を観察した結果を図 16 に示す．この結果から、高周波数帯域では同じ音圧の音波を当てても、発生する波の振幅が小さく、波が現れにくいことがわかる．

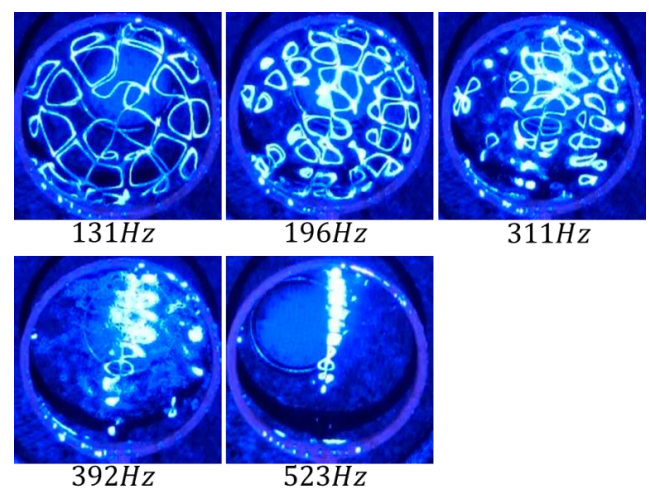


図 16 音波の周波数と波の振幅の関係

6. 音階周波数の自動認識

シャボン膜を撮影した画像や映像から、膜に照射された音波の音階周波数を自動的に認識するアルゴリズムを実装した。

6.1 基本的なアルゴリズム

音階周波数の認識にはシャボン膜上に発生する同心円状の定常波を利用した。画像処理にはコンピュータ・ビジョン向けのライブラリである OpenCV を用いた。図 17(b) のように入力画像を二値化、平滑化した後に、ハフ変換の関数を用いて円検出を行う。本稿では、シャボン膜上に発生する円状の定常波の内、最も半径の小さい円に着目した。パラメータやハフ変換の範囲を適切に表示することにより、図 17(c) のように波における最小の円のみを検出することができる。前項で述べたように、照射された音波の周波数が高いほど、表面張力波の波長が短くなり、円の半径は小さくなる。これを利用してシャボン膜の画像や映像から音階周波数を自動認識する。

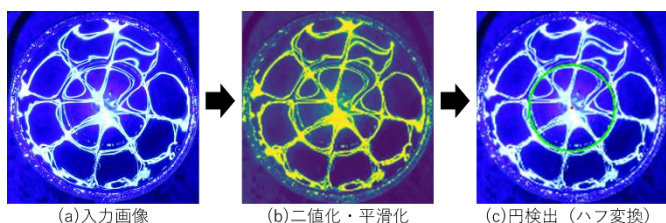


図 17 円検出のアルゴリズム

6.2 画像からの認識

音波照射中のシャボン膜の画像に、円検出を行った。65.4Hz から 131Hz までの各音階周波数の音波を照射したシャボン膜上に発生した表面張力波に対して、円検出を施したものを図 18 に示す。この図からわかるように、どの音階でも円状の表面張力波の内、最小半径の円を正確に検出している。また、周波数が大きくなるにつれて、検出される円の半径も小さくなるのがわかる。

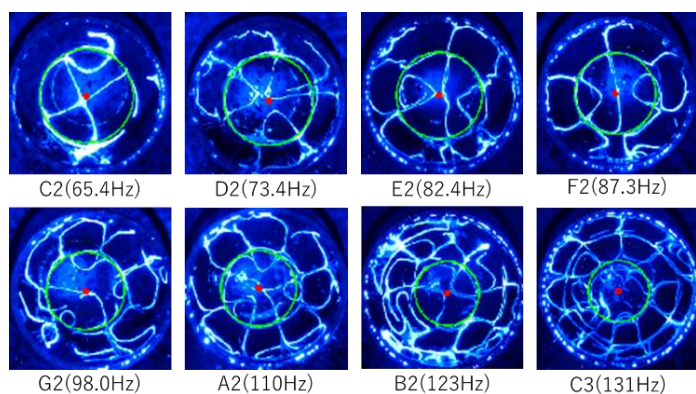


図 18 音階周波数と円の検出

また、音波を照射中のシャボン膜を撮影した画像から、どの音階周波数の音波が照射されているのかを認識するアルゴリズムを実装した。ハフ変換により実際に検出された円の半径に対し、式(1)より割り出される波長の理論値を考慮して設定したそれぞれの音階における半径の推定範囲を照らし合わせることで、自動的に音階を認識する。今回のアルゴリズムでは、C2 (65.4Hz) から C4 (262Hz) までの 2 オクターブの範囲において、それぞれの音階周波数における半径の推定範囲を設定した。また、認識された音階を画像の端に組み込むように設定した。図 19 に、例として E2 (82.4Hz)、A2 (110Hz) の音波を照射したシャボン膜の画像を、このアルゴリズムに入力した結果を示す。このように、一枚の画像から、シャボン膜に照射されていた音波の音階を認識させることができる。

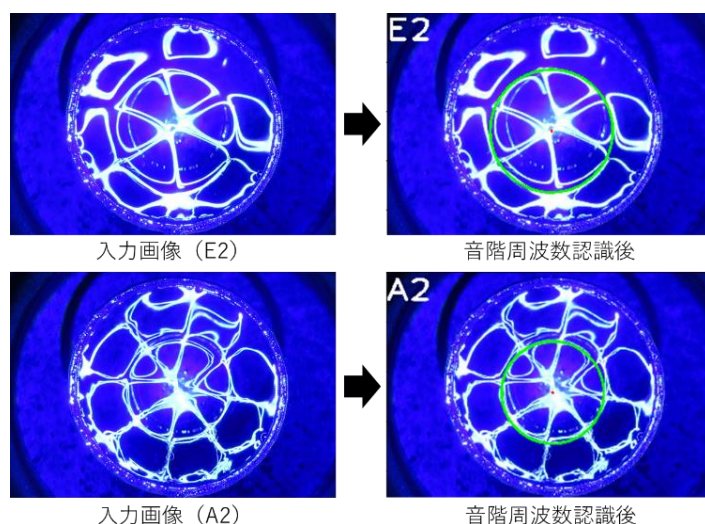


図 19 画像からの音階周波数自動認識

6.3 映像からの認識

音波照射中のシャボン膜を撮影した映像から、膜に照射されていた音波の音階周波数を認識するアルゴリズムを実装した。映像を入力として、1 フレーム毎に 6.2 で述べたような画像認識を行い、再び映像として出力する。ここで、円検出の精度を上げるために、画像処理対象のフレームと、その前後のフレームとの計 3 枚の画像に対し比較明合成処理を施すことにより、より安定して円検出を行えることがわかった。また、円が検出されなかったフレームに対しては、前のフレームで認識された音階を引用するようにしている。

図 20 はこのアルゴリズムを用いて、全 54 フレームから成るおよそ 2 秒間の映像から、膜に照射された音波の音階周波数を認識した結果の内、一部のフレームを引用したものである。この実験に使用した映像は、照射する音波の周波数を E2 (82.4Hz) から A2 (110Hz) に変えた瞬間を撮影したものであり、各フレームの左上の記号は認識された音

階を表している。

また、この実験で実際に照射した音波の音階及びアルゴリズムが認識した音階と、フレーム数との関係を図 21 に示す。

図 21 からわかるように、ほとんどのフレームでは、図 20 の Frame3, Frame25, Frame27, Frame33, Frame53 のように実際に照射されていた音波の周波数を正確に認識している。しかし、Frame5, Frame41, Frame53 のように円の誤検出が原因の誤認識も散見した。また、音階が変わった直後のフレームである Frame27 のように、多少乱れたフレームがあっても、アルゴリズムに組み込んだフレーム間の比較明合成処理によって、円検出の精度が上がっている。Frame35 のように、円が検出されなかったフレームでは、前のフレームで認識された音階が引用されている。

この結果から、音波を照射したシャボン膜を撮影した映像から、照射された音波の音階周波数を特定できることがわかった。

7. 応用と展望

7.1 ノイズを含む音波を照射した映像からの認識

本研究の結果を応用して、ノイズを含む音波をシャボン膜に照射した映像からの、音階認識を試みた。この実験では、E3(164.8Hz)の音波をノイズと共にシャボン膜を照射した全 54 フレームの映像を入力とした。6.3 と同じ音階認識アルゴリズムを使用して、出力された映像から一部のフレームを引用した図を図 22 に示す。また、実際に照射した音波の音階及び、アルゴリズムが認識した音階と、フレーム数の関係を図 23 に示す。

Frame1, Frame2 を除く全てのフレームで、音階を正確に認識できた。この結果から、音源にノイズが含まれていても、音階を正しく認識できることがわかる。この結果を利用して音源からのノイズ除去等の応用ができると考えている。

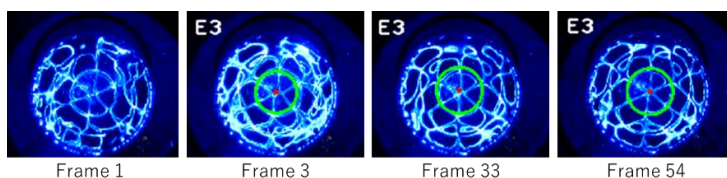


図 22 ノイズを含む音波を用いた自動音階認識

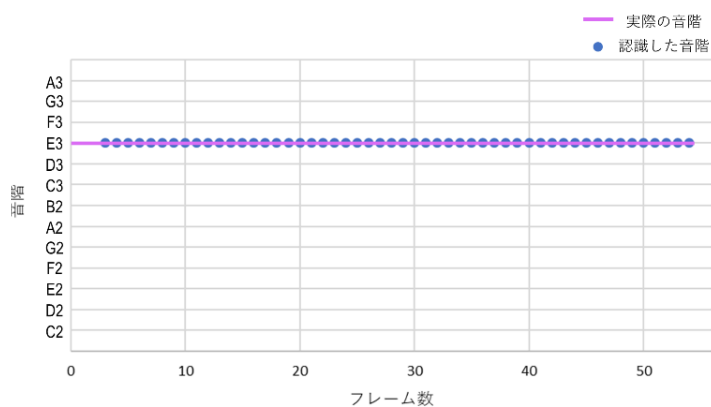


図 23 認識された音階とフレーム数の関係

7.2 低周波数の音のみの認識

本研究の音楽における活用例を挙げる。5.6 や 5.8 の結果を応用し、6.3 の手法を使うことで、照射された複数の周波数の音波から、低い周波数の音波だけを認識できないかと考え、実験を行った。

同じ音色で同じ音圧だが、異なる周波数帯域を持つ 2 種類の音から構成された曲を用意した。その音源をシャボン膜に照射し発生した波を撮影した映像を自動音階認識アルゴリズムに入力した。出力された映像から一部のフレームを引用したものを図 24 に示す。また、実際に照射した音源から、今回認識したい低い周波数の音階、及び自動認識さ

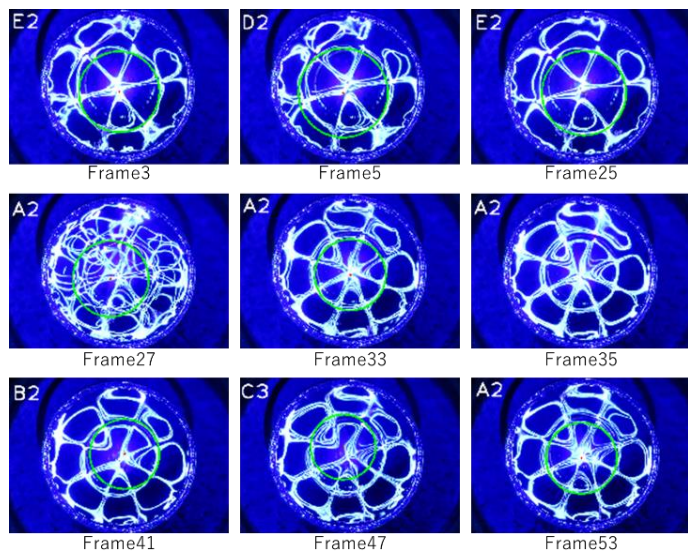


図 20 映像からの音階周波数自動認識

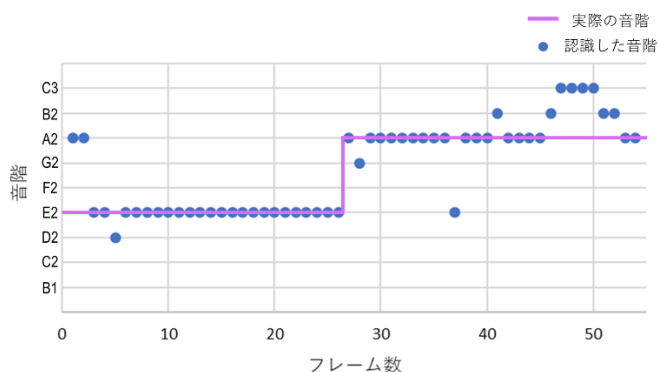


図 21 認識された音階とフレーム数の関係

れた音階とフレーム数の関係を図 25 に示す。Frame46 や Frame78, Frame105 のように、円の誤検出が原因の誤認識が散見されるが、多くはその他のフレームのように実際に照射した音波の音階を正確に認識している。

この結果を利用して、音源からベースの音のみを認識する楽曲解析等に応用することができると考えている。

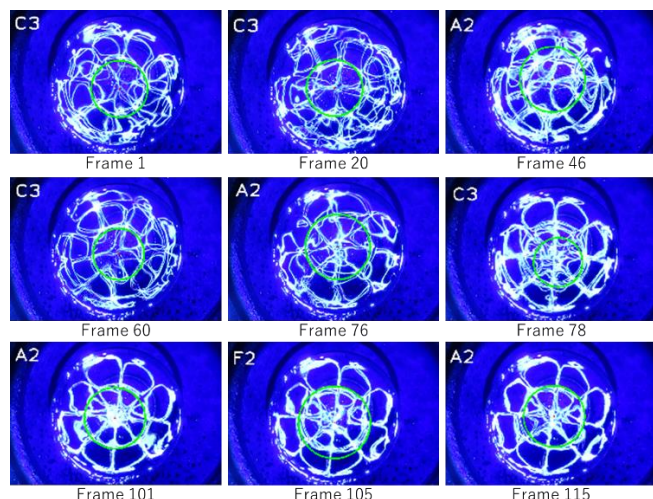


図 24 低周波数の音階のみの認識

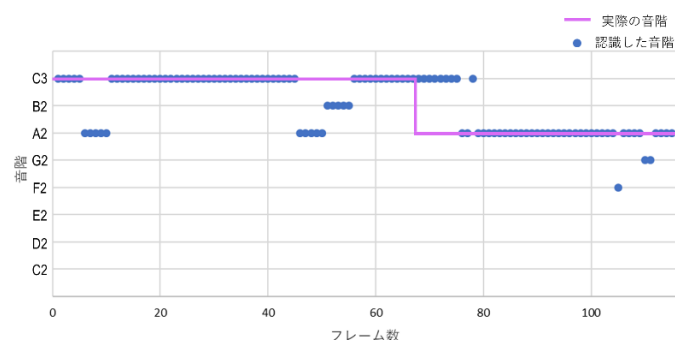


図 25 認識された音階とフレーム数の関係

7.3 結論と展望

本稿では、シャボン膜を用いた音の可視化について実装と考察を行い、その性質を利用した応用例を紹介した。本研究における音の可視化表現は、音楽解析や、メディア・アート、コンピュータ・エンターテインメントに活用できると考えている。また、音を理解するための教育としての、新しい視覚的な側面からのアプローチにもなるだろうと考える。聴覚に障害がある方にも音楽を楽しんでもらうことができるかもしれない。

今後はよりインタラクティブな表現ができるように、音階検出の精度を高め、リアルタイムで処理ができるようにアルゴリズムを改良していきたい。

参考文献

- [1] Ursula B. Marvin : Ernst Florens Friedrich Chladni (1756-1827) and the origins of modern meteorite research, *Meteoritics and Planetary science*: Vol. 31, No.5, September 1996
- [2] Aristotle 1984 *Sense and sensibilia Complete Work of Aristotle*, Vol 1: The Revised Oxford Translation (Princeton, NJ: Princeton University Press)
- [3] Newton I 1704 *Opticks, or a Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Light* (London: William Innys)
- [4] A. Braslau, P. S. Pershan, G. Swislow, B. M. Ocko, and J. Als-Nielsen : Capillary waves on the surface of simple liquids measured by x-ray reflectivity, *Phys. Rev. A* 38, 2457 - Published 1 September 1988
- [5] <http://nalab.mind.meiji.ac.jp/~mk/lab0/2013/theme/node13.html>
- [6] Waller, M. D.: Vibrations of free square plates: part I. normal vibrating modes, *Proceedings of the Physical Society*, Vol. Vol. 51, pp. 452-455 (1939)
- [7] Waller, M. D.: Chladni figures -- a study in symmetry, G. Bell and Sons Ltd. (1961).
- [8] <https://www.youtube.com/watch?v=Q3oItpVa9fs>
- [9] <http://tomellard.com/wp/2014/01/artistotle-and-newton-on-colour/>
- [10] C.Gaulon, C.Derec, T.Combriat, P.Marmottant, F.Elias, "Sound and vision: visualization of music with a soap film" *Eur. J. Phys.* 38 (2017) 045804 (18pp)
- [11] Elias F, Hutzler S and Ferreira M S 2007 *Eur. J. Phys.* 28 755
- [12] Kosgodagan Acharige S, Elias F and Derec C 2014 *Soft Matter* 10 8341
- [13] Joosten J G H 1984 *J. Chem. Phys.* 80 2383
- [14] Afenchenko V O, Ezersky A B, Kiyashko S V, Rabinovich M I and Weidman P D 1998 *Phys. Fluids* 10 390
- [15] Ochiai Y, Oyama A., Toyoshima, K.: A colloidal display: Membrane screen that combines transparency, BRDF and 3D volume. In: *ACM SIGGRAPH 2012 Emerging Technologies (SIGGRAPH 2012)*, Article 2, 1 page. ACM, New York (2012)
- [16] Yoichi Ochiai, Alexis Oyama, Takayuki Hoshi, Jun Rekimoto: *Theory and Application of the Colloidal Display: Programmable Bubble Screen for Computer Entertainment. Advances in Computer Entertainment* (2013)
- [17] Lamb, H.: *Hydrodynamics*, 6th edn. Cambridge University Press ISBN 978-052145868-9 (1994)
- [18] <https://www.japanphil.or.jp/concert/23719>
- [19] Abe Davis, Michael Rubinstein, Neal Wadhwa, Gautham J. Mysore, Fredo Durand William T. Freeman, MIT CSAIL, Microsoft Research, Adobe Research : *The Visual Microphone: Passive Recovery of Sound from Video : SIGGRAPH* (2014)
- [20] G. I. Taylor, "The dynamics of thin sheets of fluid. II. Waves on fluid sheets," *Proc. R. Soc. London, Ser. A* A253, 296 ~ (1959)