

シャボン膜の表面張力波を利用した音の可視化と音高認識

中野 航基^{1,a)} 澤田 秀之^{1,b)}

受付日 2020年12月24日, 採録日 2021年7月7日

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。本稿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理論的考察をもとに、音の可視化実験から得られた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高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。

キーワード: 表面張力波, 可視化, 音楽, 画像認識, 音響解析

Sound Visualization and Scale Recognition Using Capillary Waves of Soap Film

KOKI NAKANO^{1,a)} HIDEYUKI SAWADA^{1,b)}

Received: December 24, 2020, Accepted: July 7, 2021

Abstract: When a soap film is irradiated with sound waves, capillary waves are generated. We propose a new method for visualizing sound waves using this phenomenon for visually understanding and enjoying music. In this study, based on the theoretical analysis of capillary waves, we observe different patterns that appear on a soap film. In addition, we implement an algorithm that automatically recognizes the frequency of the sound waves by using an image processing technique. Experiments are conducted to verify the effectiveness of the proposed algorithm.

Keywords: capillary wave, visualization, music, image recognition, acoustic analysis

1. 研究背景

音は生活空間にあふれており、外界情報の獲得において重要な役割を果たしている。人間は視覚的に音をとらえることができず、聴覚によって音を知覚している。しかし、我々のほとんどはふだん音楽に用いる音高を、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。たとえば、空気中を伝播する音の波を空間内に見ることができれば、その粗密さに着目することで、音高をより感覚的に、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

て、我々は空気中における音波の可視化を目指し、シャボン玉の中に、その可能性を見出した。

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確認した。そこで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理論的考察をもとに、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高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。プロジェクトから照射した画像や映像をシャボン膜に投影する方法により、シャボン膜による音の可視化の際の視認性向上と、音高認識の認識率を上げることに成功した。本稿の最後に、提案手法の応用と可能性について議論する。

¹ 早稲田大学大学院先進理工学研究所
Graduate School of Advanced Science and Engineering,
Waseda University, Shinjuku, Tokyo 169-8555, Japan

a) almach@ruri.waseda.jp

b) sawada@waseda.jp

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。アリストテレスは、人間の五感には、それぞれの感覚に相互的な作用があると考え、これを視覚と聴覚の関係に適用し、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]。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、音をとまなう振動を加えると砂が移動し特徴的な模様が生じるといふ実験である (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、これらの研究は空気中を伝播する音の可視化には適さない。研究対象



図 1 ニュートン・サークル
Fig. 1 Newton circle.

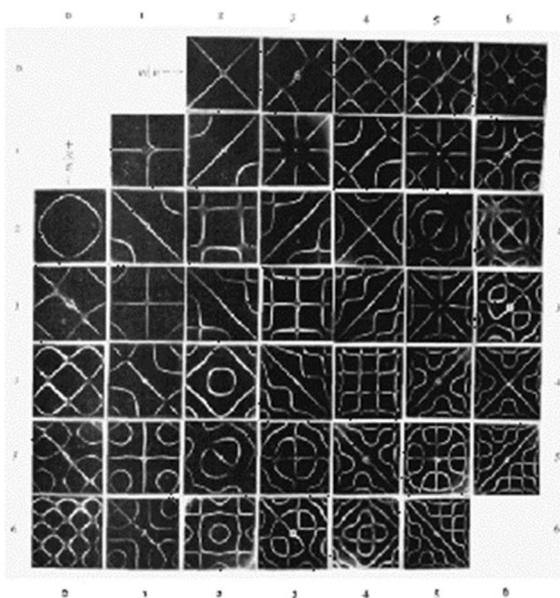


図 2 クラドニ図形 (Waller の実験結果)
Fig. 2 Chladni figure (Experimental results of Waller).

としての音の可視化は多岐にわたり、ほか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、Gaulon らの研究がある [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、波に着目して音高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、1 枚の画像からも音高を特定でき、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。

また近年には、音を聴覚以外の感覚で伝えるという試みが多くある。たとえば落合らと日本フィルハーモニー交響楽団のプロジェクトの一環として「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、さらに音高を認識させることも可能であると考えている。

シャボン膜に画像や映像を投影する先行研究として、Ochiai らの colloidal display がある [15]。超音波をシャボン膜に照射することで、微細な波を励起してプロジェクタからの光源を乱反射させることで、映像投影を可能にする。我々の研究では、超音波等の技術を利用しなくてもシャボン膜に画像や映像を投影できる方法を示し、音の可視化に利用する手法を提案する。

3. 表面張力波の原理

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とき、表面張力が主な復元力となる場合に発生する波である。本研究の提案手法において

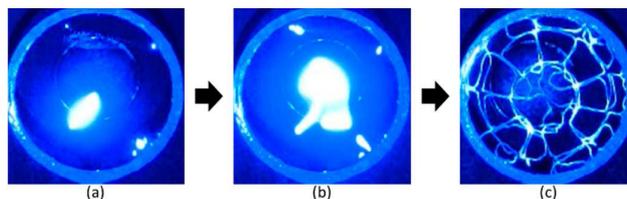


図 3 シャボン膜に発生する表面張力波
Fig. 3 Surface tension wave generated in soap film.

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]。 γ 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]。

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

ここで k は perturbation wavenumber である。この式と、 $k = 2\pi/\lambda$ および $V_{AS} = f\lambda$ により、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、

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

となる。したがって、波長 λ は次の式で表せる [10]。

$$\lambda = \sqrt{\frac{2\gamma}{\rho e + \frac{\rho_a \lambda}{\pi}}} \frac{1}{f} \quad (4)$$

ここで、 f は照射する音波の周波数である。

一方、実験から求めた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 30 mN/m で安

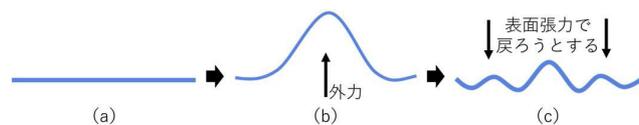


図 4 表面張力波の発生イメージ

Fig. 4 Schematic figure of the generation of surface tension wave.

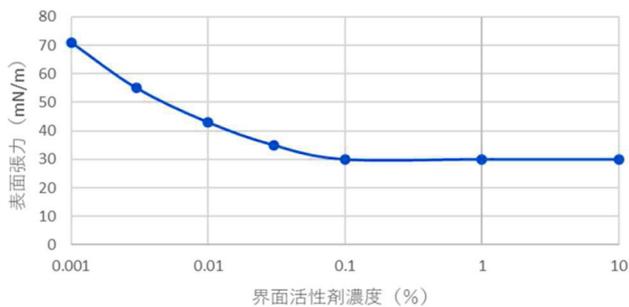


図 5 溶液の界面活性剤濃度と表面張力の関係

Fig. 5 Relation between surfactant concentration and surface tension.

定することが分かる。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となる。

4. シャボン膜に発生する表面張力波の可視化システム

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 (3D プリンタで作成)
- 音波を照射するスピーカ (Behringer BEHRITONE C50A)
- 単色光源を照射するプロジェクタ (EPSON EB-S62)
- シャボン膜を撮影するカメラ (Canon SX710HS)

本手法では、スピーカ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。シャボン膜の形成に使用する円形の枠は 3D プリンタを用いて作成し、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から単色光を照射する。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。また、 d は 1 cm、 R は 2.5 cm とした。なお、次章 5.1 節~5.6 節の実験で照射する音波は、正弦波とした。

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、図 7 に示すような最小の半径に着

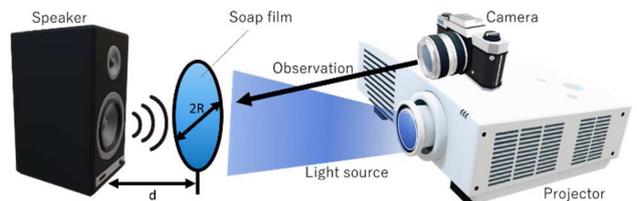


図 6 本研究の実験装置
Fig. 6 Experimental setup.

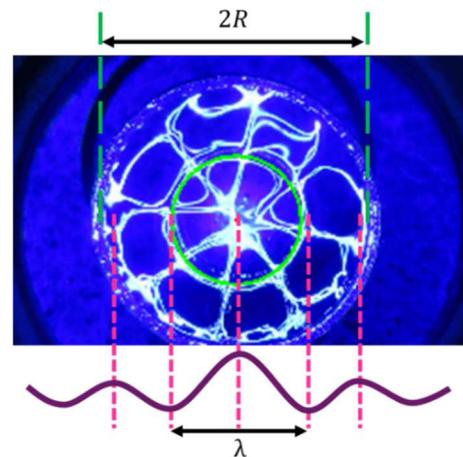


図 7 本研究における波長の定義

Fig. 7 Definition of the wave length of surface tension wave.

目する。これは視認性が良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、円状の波のうち、半径が最小の波の直径が、表面張力波の波長 λ となる。

5. 波紋の特性に関する実験

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。それにともない、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。

5.1 シャボン膜の表面張力と波紋

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 200 ml に対し、界面活性剤濃度 37% の食器用洗剤をそれぞれ 1 ml, 20 ml, 50 ml, 200 ml 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。音高周波数 C2 (65.4 Hz) と C3 (131 Hz) の音波を照射し、他のパラメータは固定し実験を行った。

溶液中に含まれる洗剤の量およ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分かる。また、図 5 から分かるように、水の中に食器用洗剤をわずか 1 ml 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変化しない。したがって、3.1 節でも示したように、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

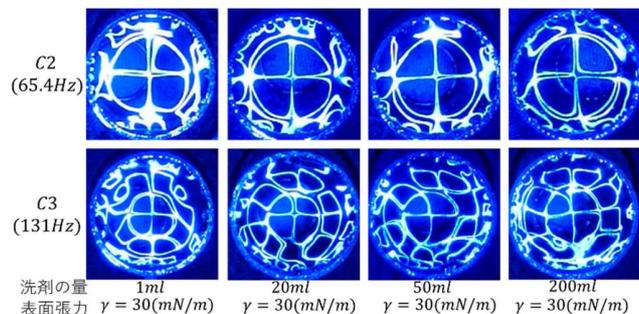


図 8 表面張力と波の関係

Fig. 8 Relation between surface tension and the generated surface tension wave.

膜を形成する溶液において十分に安定しているため、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。

5.2 シャボン溶液の粘度と波紋

次に、シャボン溶液の粘度が波の特性にどう影響するのかを調べる。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 200 ml に対し界面活性剤濃度 37% の食器用洗剤を 20 ml 加えたシャボン液に、洗濯糊を加えない場合と、それぞれ 10 ml, 50 ml, 100 ml, 150 ml 加えた場合の波を観測した。音源には C2 と C3 の音高周波数を使用し、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分かる。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分かる。この結果は式 (4) 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。

5.3 音波の振幅と波紋

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のかを調べる。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。音高周波数 C2 と C3 の音波を照射し、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。

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分かる。この結果は、式 (4) 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分かった。

5.4 シャボン膜の大きさや波紋

本実験では、シャボン膜の面積が波紋にどのような影響

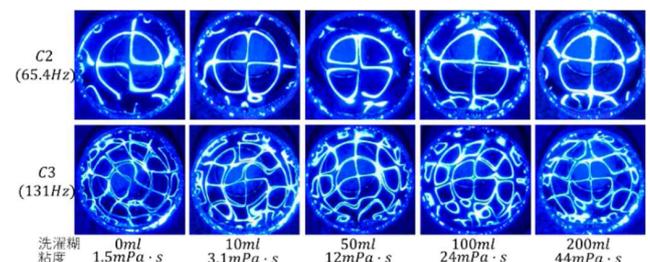


図 9 粘度と波の関係

Fig. 9 Relation between surfactant viscosity and the generated surface tension wave.

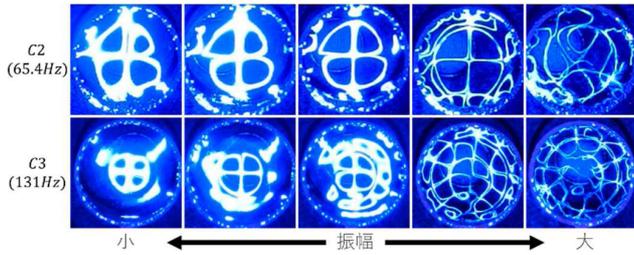


図 10 音波の振幅と波の関係

Fig. 10 Relation between the amplitude of radiated sound wave and the generated surface tension wave.

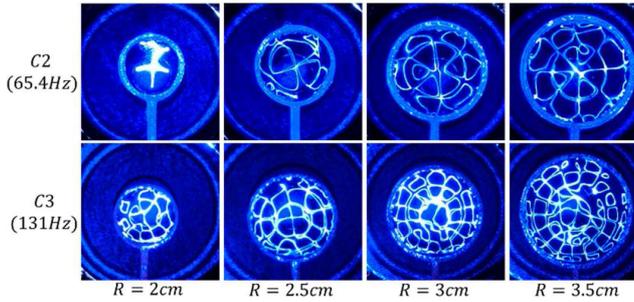


図 11 膜の大きさと波の関係

Fig. 11 Relation between soap film size and the generated surface tension wave.

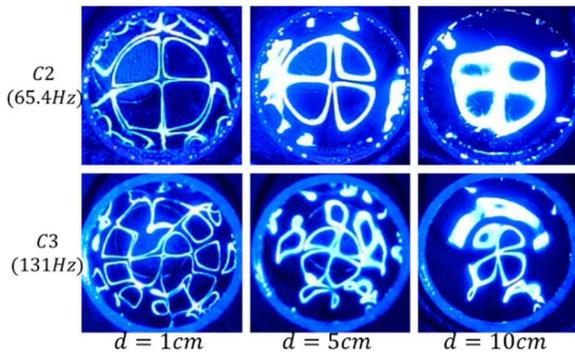


図 12 音源からの距離と波の関係

Fig. 12 Relation between the distance of sound source and the generated surface tension wave.

を及ぼすのかを調べた。シャボン膜を形成させる円形の枠の半径 R のみを変化させて実験を行った。半径 2cm, 2.5cm, 3cm, 3.5cm の 4 種類の枠を 3D プリントで作成した。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 R は波の波長 λ に影響しないことが分かった。この結果でも式 (4) との整合性を確認できた。

5.5 音源からの距離と波紋

シャボン膜と音源との距離 d が、波紋にどのような影響を及ぼすのか調べた。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 節の結果と同様に、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

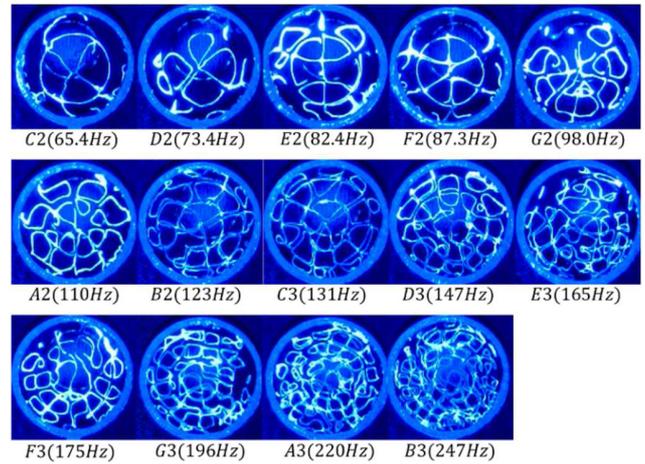


図 13 音高周波数と波の関係

Fig. 13 Relation between the frequency of radiated sound wave and the generated surface tension wave.

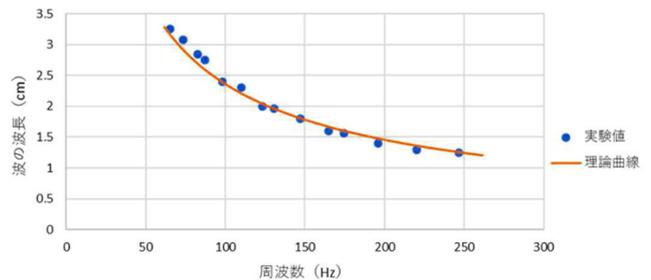


図 14 波の波長の理論値と実験値の比較

Fig. 14 Comparison of theoretical values of wave size with the experimental values.

ないことが分かる。この結果でも式 (4) との整合性を確認できた。

5.6 音高周波数と波紋

本実験では、照射する音波の周波数とシャボン膜の波紋の間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すべて固定し、実験を行った。この実験で得られた音高周波数に対する波紋の画像を図 13 に示す。また、式 (4) 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。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分かる。なお、理論値は表面張力を $\lambda = 30$ (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 $\rho = 1,000 \text{ kg/m}^3$ 、 $\rho_a = 1.293 \text{ kg/m}^3$ としている。この結果から、シャボン膜上に現れる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分かる。周波数が高くなるほど波の波長は短くなる。

5.7 音波の波形と波紋

次に照射する音波の波形が、シャボン膜上の波紋にどう影響するのかを調べる。他のパラメータを固定し、照射する音波を正弦波、矩形波、三角波、のこぎり波と変化させ、

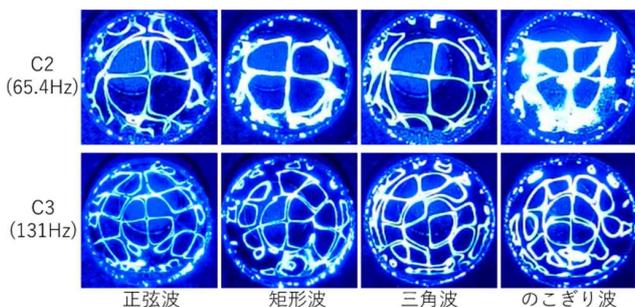


図 15 音波の波形と波の関係

Fig. 15 Relation between different sound waves and the generated surface tension waves.

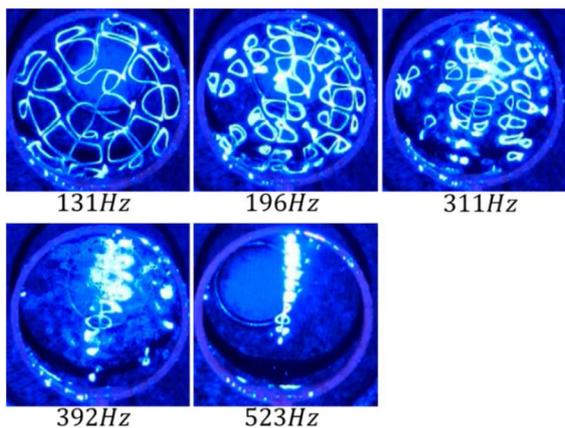


図 16 音波の周波数と波の振幅の関係

Fig. 16 Relation between the frequencies of radiated sound waves and the amplitudes.

発生した波紋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、波紋の波長は変化しないことが分かる。

一方で、正弦波の音波を照射した結果と比較して、矩形波やのこぎり波の音波を照射した場合の波紋は、時間的に形状が不安定に変化することも分かった。これは、これらの音波には基本周波数以外の高周波成分が多く含まれるため、表面張力波が安定して形成できていないためと考えられる。

5.8 音波の周波数と波紋の振幅

照射する音波の周波数によって、波の振幅にどう影響がおこるかを調べる。他のパラメータを固定し、各周波数において、音圧を 90 dB 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、高い周波数域では、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分かる。

この結果を受け、複数の音高の音波を同時に照射するどのような波が現れるのか調べた。音高周波数がそれぞれ C2 と C3, C2 と C4, および C3 と C4 の音波を同時に照射した際に出現する波を観察した結果を図 17 に示す。上段はそれぞれの音波を単独で照射した場合の波紋、中段は 2 種類の音高周波数の音波を同じ音圧で照射した場合の波

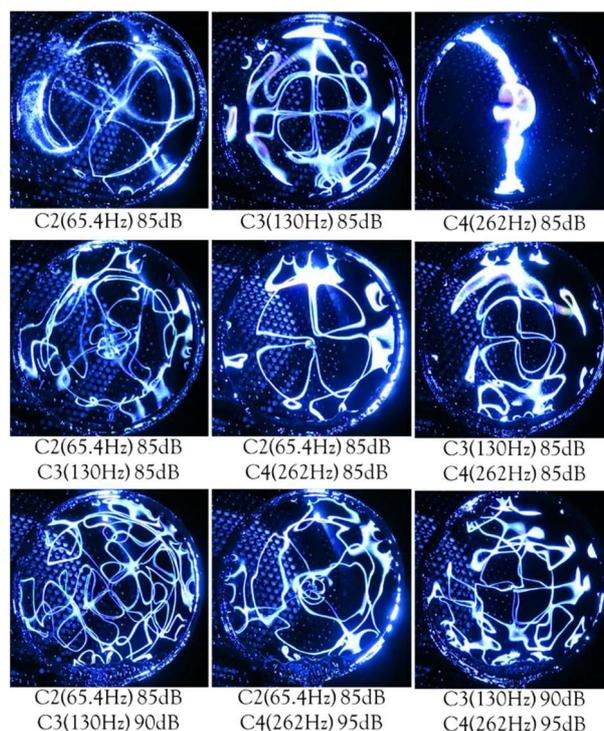


図 17 複数の周波数を同時に照射した際の波

Fig. 17 Surface tension waves generated by radiating sound waves with plural frequencies.

紋、下段は低い周波数よりも高い周波数の音波の音圧を大きくして、同時に照射した場合の波紋である。この結果から、複数の周波数の音波を同時に照射すると、それぞれが同じ音圧でも低い周波数の音波によって励起された波の方がより表出しやすいことが分かる。

6. 映像投影が可能なシャボン膜スクリーンの提案

シャボン膜にプロジェクタから画像や映像を投影しても、通常は図 3 のように光源を鏡面反射するため、像は写らない。そこで我々は、超音波等の特殊な装置を用いることなく、映像を投影する方法を提案する。

通常のシャボン膜を形成する溶液には、水と界面活性剤、グリセリンの混合溶液を用いるが、これに可視光線の波長 (350-750 nm) よりも大きい粒子を混入させる。これにより、可視領域の波長を持つ光を反射するシャボン膜を作成することができる。本研究では、直径 0.1 μm ~ 10 μm の脂肪球を、溶液 100 ml あたり 3.9 g 混入して分散させたコロイド溶液を作成した。これに界面活性剤 8 g とグリセリンを 10 ml 混ぜることで、プロジェクタの映像を明瞭に投影することが可能なシャボン膜が作製できる。このシャボン溶液は、可視光を反射するために白濁しているが、シャボン膜では薄膜のため透明に見える。

この溶液を用いて作成したシャボン膜スクリーンにプロジェクタから映像を投影した結果を図 18 に示す。比較と



図 18 シャボン膜スクリーンへの画像投影

Fig. 18 Image projection to our soap film screen.

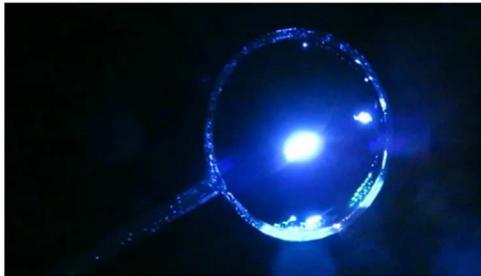


図 19 通常のシャボン膜への画像投影

Fig. 19 Image projection to usual soap film.

して、水を用いて作成した通常のシャボン膜に同じ画像を投影した結果を図 19 に示す。通常のシャボン膜にはプロジェクタの映像が映っていないが、シャボン膜スクリーンには明瞭に画像が投影されていることが分かる。

プロジェクタからコンテンツを照射し液面に表示する関連研究として、Matoba らの AquaTop Display がある [24]。白濁した水を用意し、上方からコンテンツを照射する。我々のシャボン膜スクリーンの利点としては、表示されたコンテンツが透けて見えるため、ディスプレイの背面からもコンテンツを見ることができるとい点がある。また、シャボン膜を形成する枠を容易に 3D プリンタで作製でき、サイズも自在に変えることで映像照射の表現の自由度も高いと考えている。

7. 音高周波数の自動認識

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高周波数を自動的に認識するアルゴリズムを実装した。

7.1 画像処理アルゴリズム

音高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 20 に示すように、入力画像を二値化、平滑化した後に、ハフ変換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うち、最も半径の小さい円に着目した。図 20 (c) のように、波紋における最小の円のみを検出することが可能である。前章で述べたように、照射された音波

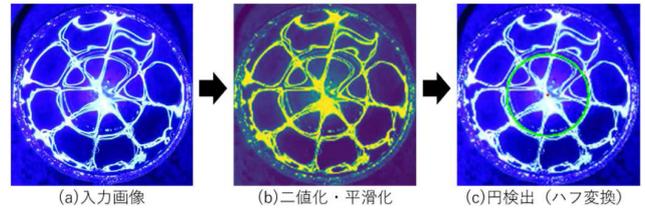


図 20 円検出のアルゴリズム

Fig. 20 Circle detection algorithm.

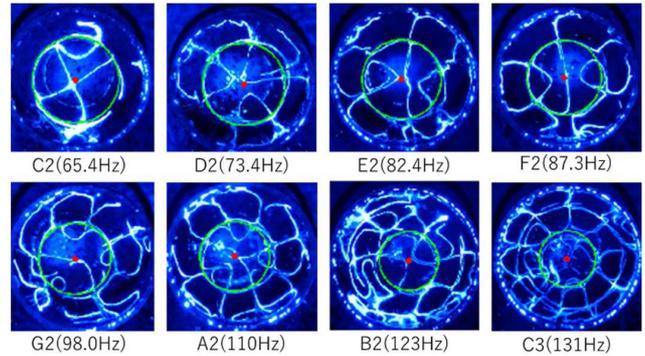


図 21 音高周波数と円の検出

Fig. 21 Detection of circles in soap film and the frequencies of radiated sounds.

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高周波数を自動認識する。

また、音波を照射中のシャボン膜を撮影した画像から、どの音高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。ハフ変換により検出された円の半径に対し、式 (4) 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高における半径の推定範囲を照らし合わせることで、自動的に音高を認識する。今回のアルゴリズムでは、C2 (65.4 Hz) から C4 (262 Hz) までの 2 オクターブの範囲において、それぞれの音高周波数における半径の推定範囲を設定した。また、認識された音高を画像の端に組み込むように設定した。

なお、本実験における一連の画像処理はオフラインで行い、ノート PC (インテル® Core™ i7-4710MQ, メモリ 8 GB, 動作周波数 2.50 GHz) を使用した際の 1 フレーム分の画像の音高認識にかかる処理時間は、平均して 55 ミリ秒であった。

7.2 画像からの周波数認識

音波照射中のシャボン膜の画像に対し、音高周波数認識に必要な円検出の実験を行った。65.4 Hz から 131 Hz までの各音高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 21 に示す。どの音高でも、円状の表面張力波のうち、最小半径の円を正確に検出できていることが分かる。また、周波数が高くなるにつれて、検出される円の半径も小さくなることが分

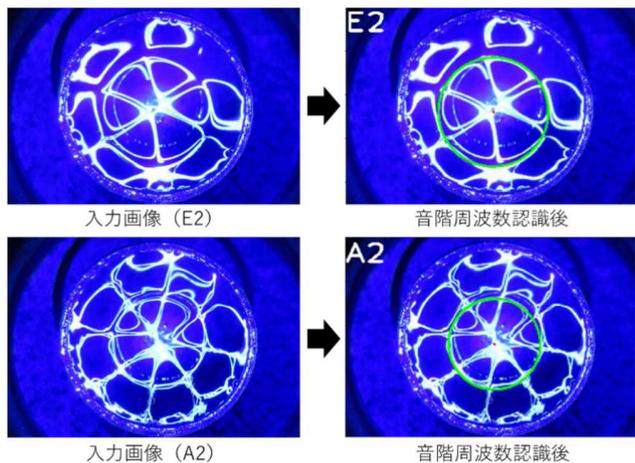


図 22 画像からの音高周波数自動認識

Fig. 22 Automatic recognition of acoustic frequencies from images.

表 1 照射した音波の音高と認識率の関係

Table 1 Relation between radiated sound waves and the recognized pitches.

| | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|------|-----|------|-----|
| 音高 | E1 | F1 | G1 | A1 | B1 | C2 | D2 |
| 認識率 | 90% | 80% | 80% | 80% | 90% | 90% | 80% |
| 音高 | E2 | F2 | G2 | A2 | B2 | C3 | D3 |
| 認識率 | 90% | 80% | 70% | 100% | 90% | 100% | 80% |
| 音高 | E3 | F3 | G3 | A3 | B3 | C4 | D4 |
| 認識率 | 80% | 80% | 70% | 80% | 70% | 70% | 70% |
| 音高 | E4 | F4 | G4 | A4 | B4 | C5 | D5 |
| 認識率 | 60% | 60% | 70% | 60% | 40% | 30% | 30% |

かる。

図 22 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、1 枚の画像から、シャボン膜に照射されている音波の音高を認識することができる。

画像からの音高周波数認識アルゴリズムを用いて、各音高を照射したシャボン膜の画像から音高周波数認識を行い、認識率を導出した。E1 (41.2Hz) から D5 (587Hz) の各音高を照射したシャボン膜の画像 10 枚に対して音高周波数認識を行った際の認識率を表 1 に示す。E1 から A4 (440Hz) までの比較的低い周波数域では、60%以上の認識率が得られた。しかし第 3 音階の周波数域から認識率が低下していき、B4 (493Hz) 以上の音高では 50%を下回った。これは、照射する音波の周波数が高くなるにつれ表面張力波の波長が短くなり、中心の円が小さくなるため、円の誤検出が多くなるからであると考えられる。

7.3 2 種類のシャボン膜を使った音高認識の比較

音波照射中のシャボン膜を撮影した映像から、膜に照射された音波の音高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 フレームごとに 6.2 節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、

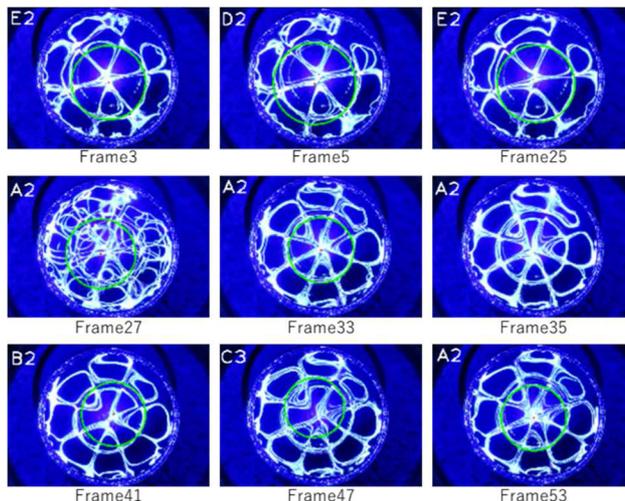


図 23 映像からの音高周波数自動認識

Fig. 23 Automatic recognition of acoustic frequencies from a movie.

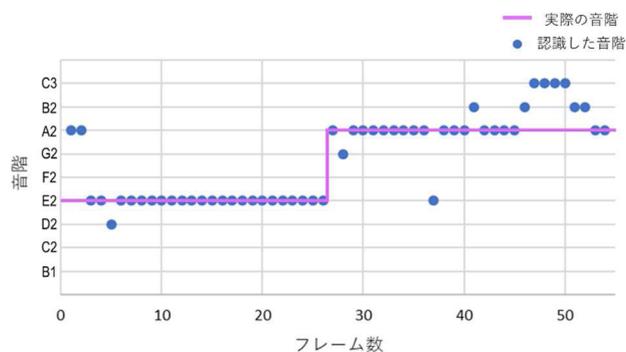


図 24 認識された音高とフレーム数の関係

Fig. 24 Relation between recognized frequencies and picture frames.

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分かった。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高を引用するようにしている。

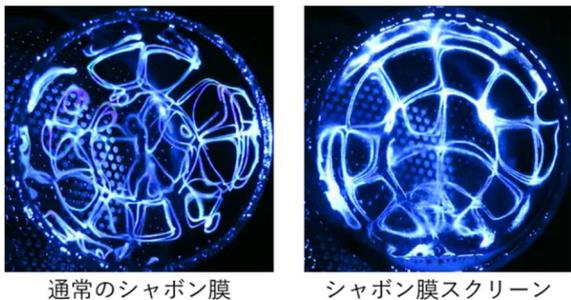
図 23 はこのアルゴリズムを用いて、全 54 フレームからなるおよそ 2 秒間の映像から、膜に照射された音波の音高周波数を認識した結果のうち、一部のフレームを引用したものである。この実験に使用した映像は、照射する音波の周波数を E2 (82.4Hz) から A2 (110Hz) に変えた瞬間を撮影したものであり、各フレームの左上の記号は認識された音高を表している。

また、図 24 にこの実験で実際に照射した音波の音高およびアルゴリズムが認識した音高と、フレーム数との関係を示す。認識率は 83.3%となった。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された。その一方で、音高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り、正しく認識できている。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高が引用されている。

また、同条件で音高の変化を E2 (82.4Hz) から C3 (130Hz), E2 から A3 (220Hz), E2 から A4 (440Hz) としたときの認識率は、それぞれ 85.2%, 76.8%, 61.4%であった。

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高を 60%以上の精度で推定で



通常のシャボン膜 シャボン膜スクリーン

図 25 通常のシャボン膜とシャボン膜スクリーン

Fig. 25 Pictures of usual soap film and our soap film screen.

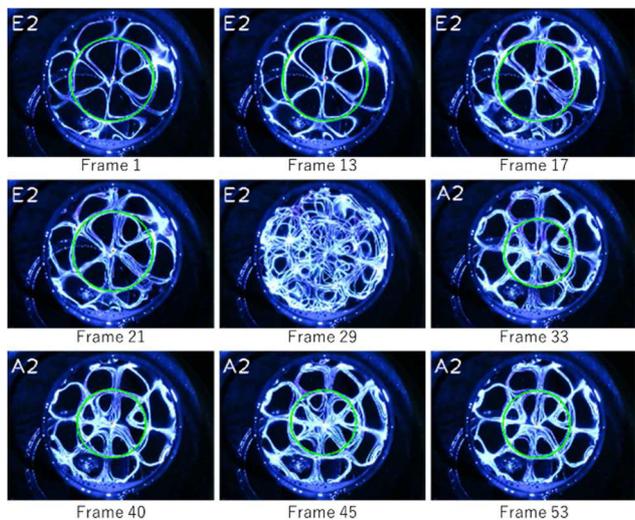


図 26 シャボン膜スクリーンを用いた音高認識

Fig. 26 Continuous frequency detection using soap film screen.

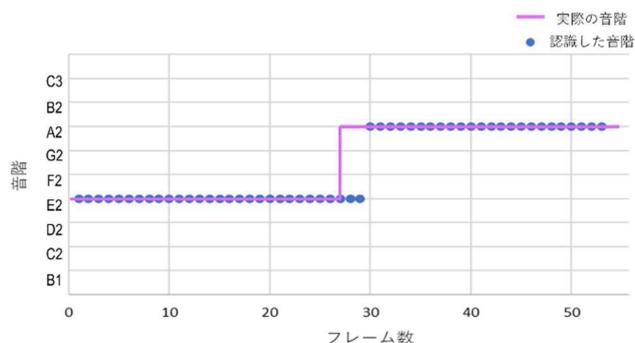


図 27 認識された音高とフレーム数の関係

Fig. 27 Relation between recognized frequencies and picture frames.

きることが分かった。

次に 6 章で述べた、白濁液を使ったシャボン膜スクリーンを、音の可視化および音高認識に応用する。同一条件で音波を照射した、通常のシャボン膜とシャボン膜スクリーンを観察した結果を、図 25 に示す。通常のシャボン膜と比較して白濁液を用いて作成したシャボン膜スクリーンでは、良好に波紋が観測できることが分かる。

この結果を利用して、通常のシャボン膜とシャボン膜スクリーンとの間に、音波を照射した際の音高認識の精度に差があるか調べた。双方の膜に同条件で音響を照射し、音高認識を行った。

白濁液を使ったシャボン膜スクリーンから得られた映像から、一部のフレームを引用したものを図 26 に示す。また、照射した音響の音高および、アルゴリズムにより認識された音高を、フレームごとに図 27 に示した。認識率は 96.2%となり、最初のフレームから良好に音高を認識できている。音高が変わった直後に波紋が乱れたために正しい音高を認識できなかったフレーム 28 と 29 を除き、すべてのフレームで音高認識が可能であった。

また、同条件で音高の変化を E2 から C3, E2 から A3, E2 から A4 としたときの認識率は、それぞれ 94.4%, 90.9%, 70.2%であった。

この結果から、白濁液を使ったシャボン膜スクリーンを用いることで、提案手法による音高認識の精度が向上することが分かった。

8. 応用

8.1 ノイズを含む音波を照射した映像からの認識

さらに、ノイズを含む音波をシャボン膜に照射した映像から音高認識を試みた。この実験では、E3 (164.8Hz) の音響に SN 比 5 dB のホワイトノイズを加算し、シャボン膜に照射した。全 54 フレームの映像に対して認識を実行した。

図 28 に、出力映像から一部のフレームを引用した図を示す。また、実際に照射した音波の音高および、アルゴリズムが認識した音高と、フレーム数の関係を図 29 に示す。認識率は 96.3%であり、Frame1, Frame2 を除くすべてのフレームで、音高を正しく認識できた。

また、同条件で SN 比 0 dB, -10 dB, -15 dB, -20 dB のノイズを加算した場合の認識率はそれぞれ 94.6%, 92.9%,

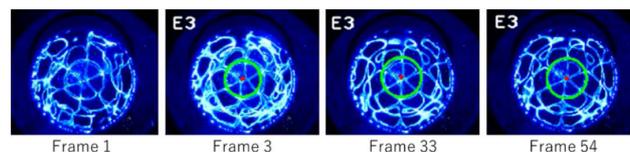


図 28 ノイズを含む音波を用いた自動音高認識

Fig. 28 Automatic pitch recognition from sound waves with noise.

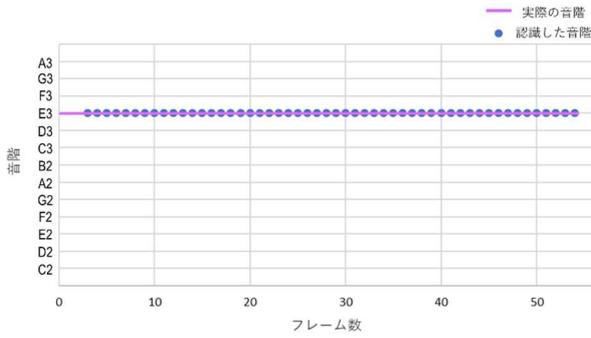


図 29 認識された音高とフレーム数の関係

Fig. 29 Relation between recognized frequencies and picture frames.

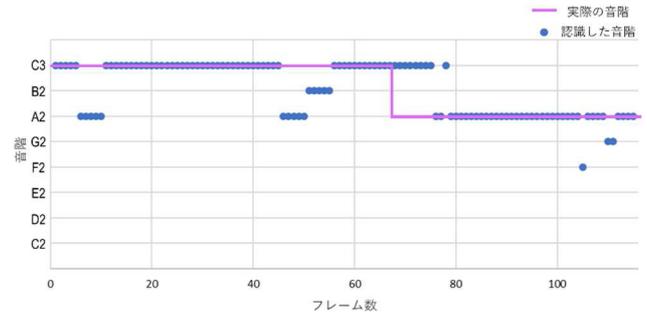


図 31 認識された音高とフレーム数の関係

Fig. 31 Relation between recognized frequencies and picture frames

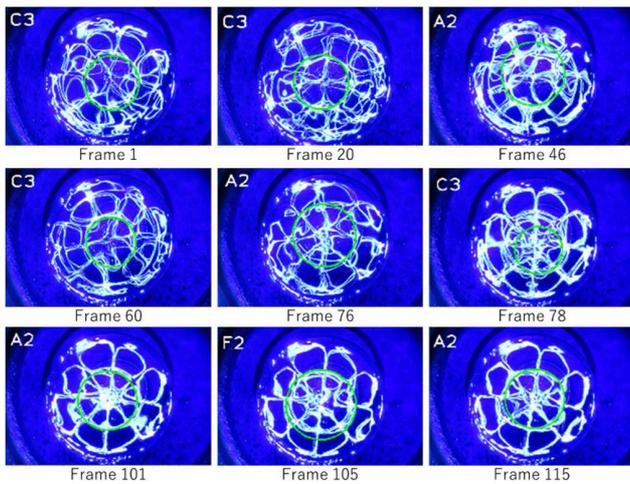


図 30 低周波数の音高のみの認識

Fig. 30 Detection of lower frequencies from sounds with two frequency components.

77.8%, 53.7%であった。

この結果から、音源にノイズが含まれていても、SN 比で -10 dB 程度までであれば、90%以上の精度で音高を認識できることが分かる。提案手法を利用して、ノイズの重畳した音源からの音高認識への応用ができると考えている。

8.2 複合音中の低周波音の音のみの認識

本研究の音楽における活用例をあげる。5.6 節や 5.8 節の結果を応用し、6.3 節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、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、発生した波紋を撮影した映像を自動音高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 30 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高、および自動認識された音高とフレーム数の関係を図 31 に示す。認識率は 76.5%であった。図 30 の Frame46 や Frame78, Frame105 は、円の誤検出が原因の誤認識が発生したフレ

ムで、それ以外は正しく認識されたフレームである。

9. 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、今後リアルタイム処理ができるようにアルゴリズムを改良することで、本研究のさらなる応用の可能性が見込める。たとえば、シャボン膜スクリーンと、音高認識を用いることで、音の可視化および音高認識と同時に、シャボン膜上に周波数を表示することも可能となる。音高を聴覚と同時に視覚的に認識することで、音の周波数に関する理解を深めることができると考える。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であろう。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。

本稿で提案したシャボン膜スクリーンは、シャボン膜に映像を投影する手法として新しいものであり、かつ音の可視化や音高認識以外にも数多くの応用方法があると考えている。今後は有効な応用の発見や新しいコンテンツの作成を考えていく。

また、シャボン膜の過渡的な性質を活かして、より豊かな感覚体験をもたらすインタフェースとしての可能性も探っていきたい。1つの例として、シャボン膜に指で触れると照射される音高が変わると同時に、投影される色や画像を変える等、多数の感覚を同時に刺激するインタラクティブコンテンツ等を考えている。

謝辞 本研究は、JSPS 科研費新学術領域研究「ソフトロボット学」JP18H05465 および JP18H05473 の助成を受けたものです。

参考文献

[1] Marvin, U.B.: Ernst Florens Friedrich Chladni (1756–1827) and the origins of modern meteorite research, *Meteoritics and Planetary Science*, Vol.31, No.5 (Sep.

1996).

[2] Aristotle: *Sense and sensibilia Complete Work of Aristotle, Vol 1, The Revised Oxford Translation*, Princeton University Press, Princeton, NJ (1984).

[3] Newton, I.: *Opticks, or a Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Light*, William Innys, London (1704).

[4] Braslau, A., Pershan, P.S., Swislow, G., Ocko, B.M. and Als-Nielsen, J.: Capillary waves on the surface of simple liquids measured by x-ray reflectivity, *Phys. Rev. A*, Vol.38, p.2457, Published 1 (Sep. 1988).

[5] available from <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, *Proc. Physical Society*, Vol.51, pp.452–455 (1939).

[7] Waller, M.D.: *Chladni figures – A study in symmetry*, G. Bell and Sons Ltd. (1961).

[8] available from <https://www.youtube.com/watch?v=Q3oItpVa9fs>.

[9] available from <http://tomellard.com/wp/2014/01/artistotle-and-newton-on-colour/>.

[10] Gaulon, C., Derec, C., Combriat, T., Marmottant, P. and Elias, F.: Sound and vision: visualization of music with a soap film, *Eur. J. Phys.*, Vol.38, p.045804 (2017).

[11] Elias, F., Hutzler, S. and Ferreira, M.S.: *Eur. J. Phys.*, Vol.28, p.755 (2007).

[12] Acharige, S.K., Elias, F. and Derec, C.: Soft Matter, Vol.10, p.8341 (2014).

[13] Joosten, J.G.H.: *J. Chem. Phys.*, Vol.80, p.2383 (1984).

[14] Afenchenko, V.O., Ezersky, A.B., Kiyashko, S.V., Rabinovich, M.I. and Weidman, P.D.: *Phys. Fluids*, Vol.10, p.390 (1998).

[15] Ochiai, Y., Oyama, A. and Toyoshima, K.: A colloidal display: Membrane screen that combines transparency, BRDF and 3D volume, *ACM SIGGRAPH 2012 Emerging Technologies (SIGGRAPH 2012)*, Article 2, p.1, ACM (2012).

[16] Ochiai, Y., Oyama, A., Hoshi, T. and Rekimoto, J.: Theory and Application of the Colloidal Display: Programmable Bubble Screen for Computer Entertainment, *Advances in Computer Entertainment* (2013).

[17] Lamb, H.: *Hydrodynamics*, 6th ed., Cambridge University Press, ISBN 978-052145868-9 (1994).

[18] available from <https://www.japanphil.or.jp/concert/23719>.

[19] Davis, A., Rubinstein, M., Wadhwa, N., Mysore, G.J., Durand, F., Freeman, W.T.: The Visual Microphone: Passive Recovery of Sound from Video, *SIGGRAPH* (2014).

[20] Taylor, G.I.: The dynamics of thin sheets of fluid. II. Waves on fluid sheets, *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, Vol.253, p.296 (1959).

[21] Couder, Y., Chomaz, J.-M. and Rabaud, M.: On the hydrodynamics of soap films, *Physica D*, Vol.37, p.384 (1989).

[22] Kwon, H., Jaiswal, S., Benford, S.D., Seah, S.A., Bennett, P., Koleva, B.N. and Schnädelbach, H.: FugaciousFilm: Exploring Attentive Interaction with Ephemeral Material, *ACM SIGCHI* (2015).

[23] Motaghian, M., van der Linden, E., Habibi, M., Shirsavar, R., Erfanfam, M., Sabouhi, M., Stone, H.A. and Bonn, D.: Rapid Spreading of a Droplet on a Thin Soap Film, *ACS Publications Langmuir* (2019).

[24] Matoba, Y., Takahashi, Y., Tokui, T., Phuong, S.,

Yamano, S. and Koike, H.: AquaTop Display: A True “Immersive” Water Display System, *SIGGRAPH* (2013).



中野 航基 (正会員)

2019年早稲田大学先進理工学部応用物理学科卒業。2021年早稲田大学大学院先進理工学研究科物理学及応用物理学専攻博士前期課程修了。表面張力波とその応用に関する研究に従事。現在、Dassault Systèmes 株式会社に

勤務。



澤田 秀之 (正会員)

1990年早稲田大学理工学部応用物理学科卒業。1992年同大学大学院博士前期課程修了。1998年同大学院博士後期課程修了。日本学術振興会特別研究員 DC1，早稲田大学助手，香川大学准教授，教授を経て，現在，早稲田大学理工学術院教授。計測制御工学，ロボティクス，信号処理，ヒューマンインタフェースの研究に従事。博士（工学）。電子情報通信学会，電気学会，計測自動制御学会，日本機械学会，IEEE 各会員。