



スネアドラムにおける特有の雑音現象 : 整数次倍音に着目して

青柳, 慧

(Citation)

課題研究優秀論文集, 2025:263-298

(Issue Date)

2026-01

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/0100499446>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100499446>



2025 年度 卒業研究最終論文

スネアドラムにおける特有の雑音現象
—整数次倍音に着目して—

神戸大学附属中等教育学校 12 回生

6 年 2 組 01 番

青柳 慧

(指導教員 竹村 実成)

2025年度 卒業研究最終論文

スネアドラムにおける特有の雑音現象—整数次倍音に着目して—

神戸大学附属中等教育学校 12 回生 6 年 2 組 01 番 青柳 慧

(指導教員 竹村 実成)

要旨

本研究はスネアドラムで生じる独特な雑音がどのような条件下で発生するのか、物理的な観点から考察したものである。スネアドラムは、膜鳴楽器に分類される打楽器で、さまざまな分野に用いられる楽器であり、とても重要な楽器である。しかしその一方で、ドラムを演奏していない時でも、周囲の環境によって特有の雑音が生じることが知られており、この発生音はドラム裏に取り付けられた「スナッピー」に起因する可能性が高いとされるが、細かいメカニズムは分かっていない。そこで、本研究では、意図しない音の抑制のために音の発生する仕組みや条件を明らかにすることを目的とした。本研究では「スナッピー」が発生音に与える影響の大きさを知るために、スネアドラムの共鳴の仕組みや、特有の音に対する反応、膜の材質・張力による違いの観点から 4 つの実験・調査を行った。スネアドラムの雑音の原因を調べる実験では、スネアドラムの膜が周囲の音に共振して振動しスナッピーと接触することによって雑音が生じ、その膜の振動は非常に小さいものであることが分かった。また、様々な音に対する膜の反応に対してフーリエ変換や単回帰分析を行うことで、スネアドラムの周りの音の周波数が低いときにスネアドラムの雑音が大きくなり、高周波数のときも、特定の周波数で雑音が大きくなるということが明らかとなった。さらに、3D プリンタで作成した模型を用いて膜の材質・張力による違いを調べたところ、スネアヘッドにかかる張力によって雑音の大きさは変化しないということが分かった。加えて、有限要素法を用いてスネアドラムのヘッドをシミュレートしたところ、ヘッドの中心部はあまり振動しておらず、比較的低い周波数帯に固有振動数が計算されたという結果を得た。これらのことから、スネアドラムの雑音は、膜が周囲の低周波や特定の高周波の音に共振して振動したスナッピーと下の膜が接触することで生じ、張力はその大きさにあまり影響しないことがわかった。

Characteristic Noise Phenomena in Snare Drums: Focusing on the Harmonics

Kei Aoyagi

Abstract

This study investigates the particular noise that snare drums often make when they are not being hit to reduce it. In general, it is caused by vibration of the snare wire that resonates with the surrounding sound. This study examines its mechanism through a control experiment. The result revealed that the mechanism behind snare drum noise is that the bottom head resonates with the surrounding sound and contacts the snare wire. Moreover, this study examined which frequencies of ambient sounds make the snare drum noise. The method is that the speaker close to the snare drum played sine waves, and recorded all the sounds around the snare drum. The harmonics of the fundamental frequency of each sine wave appear in the data as revealed by spectrum analysis. The presence of harmonics indicates components of the snare drum noise. Then this study focuses on the harmonics. The result indicates that the low-frequency sounds are easy to lead to the snare drum noise. In conclusion, the mechanism of snare drum noise is that the bottom head resonates with the surrounding sound and makes contact with the snare wire, and it becomes louder when the ambient sound is lower.

Keywords: snare drum noise, mechanism, snare wire, harmonics, spectrum analysis

目次

要旨	1
第 1 章 スネアドラムについて	1
第 2 章 スネアドラムの雑音について	3
第 3 章 スネアドラムの雑音が鳴るメカニズムについての調査	5
第 4 章 スネアドラムの雑音についての調査	7
第 5 章 スネアドラム模型の作成・スネアヘッド機能の検証	12
第 6 章 スネアヘッドの性質と共鳴の関係についての調査	15
第 7 章 有限要素解析による調査	19
第 8 章 結論	23
謝辞	24
付録 A 調査で使⽤したプログラムのソースコード	25
参考文献	32

第1章 スネアドラムについて

第1節 スネアドラムの歴史

スネアドラムの起源は、12世紀頃南フランスとスペインの北部で出現した、テイバーという非常に小さい、円形で胴の浅い太鼓だとされている。この太鼓にはスネアがついていることが多く、まさしく現在われわれが用いている小太鼓〔スネアドラム〕の前身であるといえる。(網代・岡田,1984) 最初は小さな縦笛といっしょにひとりの奏者によって演奏される習慣であったが、14世紀ごろには太鼓だけ独立して打たれるようになった。太鼓の大きさも15世紀のあいだにだんだん大きくなって16世紀には軍隊に採用され、スイスの鼓笛隊によって普及した。そして軍隊の楽器として欠くことができないものとなった。その当時この楽器に対して、英語の「ドラム」という言葉が初めて使用されるようになった。小太鼓〔スネアドラム〕は18世紀の作曲家たちによってようやくオーケストラのなかに用いられるようになった。それ以降、大太鼓との棲み分けも進み、だんだん小さくなって音も高くなっていった。そして胴の材質に金属も使われるようになった。19世紀のCornelius Ward氏のドラムロッド(皮を張るためのねじ棒、テンションボルトとも言う)を用いてスネアドラムの皮を貼る方法を考案し、音質も向上して、小太鼓はオーケストラのなかで確固たる地位を占めるようになった。かくして、小太鼓はオーケストラに、吹奏楽に、室内楽に、その他幅広く用いられ今日に至っている。(網代ら,1984)

第2節 スネアドラムの特徴

スネアドラムは小太鼓ともいわれる膜鳴楽器である(Philip Wilkinson,2015)。スネアヘッドに貼られているスナッピー(響き線・スネアワイヤとも呼ばれる)という部品により、他の太鼓と比べた時、音が華やかで、音程が複雑で明確でないと感じられる(Philip Wilkinson,2015)。また、スネアドラムはオーケストラや吹奏楽、室内楽、その他幅広い音楽のジャンルに用いられている(網代ら,1984)。

第3節 スネアドラムの構造

スネアドラムの構造は、網代らの書籍によって次のように述べられている。

円筒形の胴の両面に皮(ヘッド)を貼り、裏皮(裏皮)にはスネア=響き線(響き線)〔スナッピー



図 1-1 スネアドラムを下から見た図
(赤丸で囲まれている部品がスナッピー)

一] がついている。一般には胴の深さより直径のほうが大きい。胴は金属製のものと木製のものがある。ヘッドに張力をあたえる方法には、上下のカウンター・フープ(押しわく)をドラム・ロッドを用いて張るのと、紐でY字形に張るのと2つの方法がある。現在では特殊なものを除いては、ドラムロッドを用いている。大きさは、深さ5インチ×直径14インチ(13cm×36cm)、6.5インチ×14インチ(17cm×36cm)、8インチ×15インチ(20cm×38cm)がもっとも多く用いられ、特殊のものとしては3インチ×13インチ(8cm×33cm)、5.5インチ×10インチ(13cm×25cm)、12インチ×15インチ(30cm×38cm)などがある。小太鼓はスネア・ドラムともいわれ、スネアが裏皮についているのが特徴で、表皮(おもてがわ)をばちで打つと、裏皮を振動させてスネアにあたり、小太鼓特有の音をだす。スネアは、スネア・ストレーナーという装置によって着脱(ON,OFF)が自由である。……ヘッド(膜面)は元来は子牛の皮を用いていたが、現在ではほとんど化学合成のヘッドを用いている。

本研究では、表皮をバターヘッド、裏皮をスネアヘッドと呼び、スナッピーの呼称はスネアワイヤー・響き線・スナッピー等があるが、本論文ではスナッピーに統一する。

第2章 スネアドラムの雑音について

第1節 スネアドラムの雑音とは

スネアドラムの音が鳴る原理は、「上方のヘッド（バター,batter）を叩いたとき、スネアヘッドはスネアとぶつかりながら振動する」ということであるとわかっている（Fletcher&Rossing, 2021）。また、スネアドラムは上方のヘッドを叩いていないときでも音が鳴るときがあり、俗説では、それは他の楽器の音に共鳴して音が鳴っていると考えられているが、詳細なメカニズムは明らかではない。

第2節 膜鳴楽器の音響的特徴

太鼓の面の固有振動数は、膜の半径、張力、密度によって求められる（西尾&井,1999）。西尾ら（西尾&井,1999, p161）は次のようにまとめている。

音響工学の基礎理論によれば、膜の半径 a 、張力 T 、密度 σ 、から次の基本周波数が定められる。

$$f_0 = 0.383 \frac{1}{a} \sqrt{\frac{T}{\sigma}} [Hz]$$

膜にはこれ以外にも節となる同心円の数と、節となる直径の数によって無数の共振モードがあり、基本周波数10との比で表したこの共振周波数は表1のようになる。振動理論では、膜の高次の振動に膜の振動変位が常にゼロとなる部分があり、これには節線及び同心円の2種類がある。この節線の数と、同心円の数を組み合わせてモードと呼んでいる。例えば共振の基準になる最も低いものはモード(0, 1)である。図1はいくつかのモードに対する同心円と節直径を示したものである。

表 2-1 共振周波数の基本周波数との比 出典：(西尾・井, 1999)

		同心円の数					
節線の数	0	1.00	2.30	3.60	4.90	6.21	7.51
	1	1.59	2.92	4.28	5.45	6.85	8.16
	2	2.14	3.50	4.83	6.15	7.47	8.78
	3	2.65	4.06	5.41	6.75	8.07	9.39
	4	3.15	4.60	5.98	7.32	8.66	9.99
	5	3.65	5.13	6.53	7.89	9.24	10.57

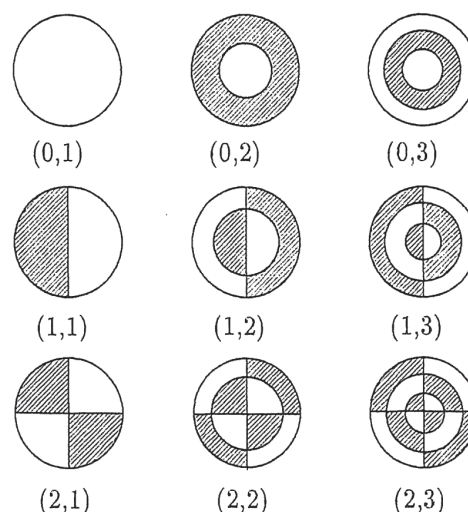


図 2-1 モードに対する同心円と節直径 出典：(西尾・井, 1999)

一方で、スネアドラムは膜の密度が均一ではない。スネアドラムのスナッピーをなくした構造と類似し、同じように膜の密度が不均一な「トム・トム」では、ヘッドの中心部分の厚いパッチや手締めによるチューニングにより意にそぐわず張力が不均一となる場合がありえる（鮫島・荒木, 2019）とされている。このことはスネアドラムにおいても共通する話であると考えられる。また、このように張力が不均一であるドラムに対しては、実測や有限要素法（FEM）によって有周波数の変化の

抽出や振動態の可視化が行われている報告(鮫島・荒木, 2019)に基づき、本研究では、Pythonを用いた有限要素法によるシミュレーションと実際のスネアドラムやスネアドラムの模型を用いた実験の2つの手法によって固有振動数を明らかにする方針とした。

第3節 本研究の目的

スネアドラムの雑音を減らすため、本研究は実験や調査によって、スネアドラムの雑音が大きくなる条件並びに小さくなる条件を調べ、音の発生する仕組みや条件を明らかにすることを目的とした。

第4節 本研究での定義

本研究ではスネアドラムの雑音を、「奏者がスネアドラムを演奏していないときに、周りで流れている音に共振したスネアヘッドとスナッピーがぶつかることで生じる音」と定義した。また第4章、第5章、第6章において、本研究では、純音(sin波)をスネアドラムの周りで再生した際に、再生音には含まれていない周波成分、特にスナッピーとヘッドの衝突という非線形な現象によって発生する、再生したsin波の周波数の整数次倍音を、スネアドラム特有の「雑音」と定義して分析した。

また、「1倍音比」は、再生した純音(1倍音)の大きさに対して、共振によって生まれた雑音成分(2倍音、3倍音…)がどの程度の割合を占めるかを示す指標である。したがって、この値が小さいほど、元の音に対する雑音の割合が大きいことを意味する。

第5節 本論文の構成

本論文は、要旨では本研究の概要を述べ、第1章ではスネアドラムについて書籍等を参照して紹介した。第2章では、スネアドラムにおける特有の雑音現象を紹介し、先行研究・この研究の目的・定義・構成を述べた。第3章では、スネアドラムの共鳴のメカニズムを実験とともに論じ、第4章ではスネアドラムの共鳴について実験を行い、高速フーリエ変換による周波数解析を行って考察した。そして第6章では模型を用いてスネアヘッドの張力と雑音の大きさの関係について議論し、第7章ではスネアドラムのヘッドの振動について有限要素解析を行って考察した。第8章では本研究の結論と展望をまとめ、最後に謝辞、付録、参考文献を示した。

第3章 スネアドラムの雑音が鳴るメカニズムについての調査

第1節 本調査の概要

本調査では、スネアドラムの雑音が鳴るメカニズムを知るために、スネアドラムの部品がもつ様々な条件を変化させ、雑音の有無を調査する対照実験によってスネアドラムの雑音が起こる条件を明らかにした。

第2節 調査目的

俗説で「スネアドラムの雑音が鳴るのは、ある音に対してスネアヘッドが共振し、その振動したスネアヘッドとスナッピーがぶつかるからである」とよく言われているが、それに対する先行研究は見当たらなかった。そこで本調査では、スネアドラムの雑音が鳴るメカニズムについて、この俗説の真偽を確かめる。

第3節 調査方法

第1項 スネアドラムの雑音のメカニズムを調べる対照実験

図 3-1 のように、スタンドに設置したスネアドラムに対し、表 3-1 のようにスネアドラムのヘッドのミュートの有無とストレイナーのオン・オフについて条件を変えた。ミュートは、耐震ジェルを貼り付けることで振動を制限した。その時、ホワイトノイズをスピーカーで再生し、その時の雑音の有無について調べた。使用したホワイトノイズは、Python を用いて生成了(ソースコードは付録 A に記載)。

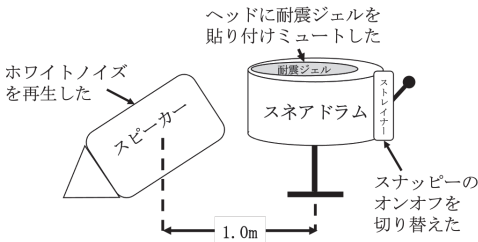


図 3-1 第3章で行った実験の様子

表 3-1 実験の条件

	上の膜の振動	下の膜の振動	スナッピー
条件a	可	可	オン
条件b	非	可	オン
条件c	可	非	オン
条件d	非	非	オン
条件e	可	可	オフ
条件f	非	可	オフ
条件g	可	非	オフ
条件h	非	非	オフ

第2項 スネアドラムの雑音の大きさを調べる実験

YouTube の実験動画を参考にし、バターヘッドを外したスネアドラムのスネアヘッドの上に直径 6.5mm ほどの発泡スチロールの粒を載せ、Python で生成了ホワイトノイズをスピーカーで再生し、その音に共振しているとき、2つのヘッドがどのように振動しているのかどうかをビーズの揺れで視覚的に確かめた。(北村俊樹,2023)[5]

第4節 調査結果

第1項 スネアドラムの雑音のメカニズムを調べる対照実験の結果

各条件のもとで、実験結果は表3-2のようになった。

雑音が発生する条件aと条件bは「下の膜の振動：可」かつ「スナッピー：オン」である。一方で、どちらか的一方がかけた条件cや条件eでは雑音は発生していない。このことから、「スネアヘッド（下の膜）が振動すること」と「スナッピーがオンであること」の2つが、雑音発生のための必要条件であり、両者が揃うことが十分条件である。

表 3-2 実験の結果

	条件a	条件b	条件c	条件d
共鳴	○	○	×	×
	条件e	条件f	条件g	条件h
共鳴	×	×	×	×

第1項 スネアドラムの雑音の大きさを調べる実験の結果

雑音が鳴っていた時も、ビーズの揺れが確認できなかった。しかし、手で触れると振動を確認することはできた。

第5節 考察

調査結果より、「スネアヘッドとスナッピーが接触すること」が、雑音が発生するための十分条件であることがわかった。また、ある音に対してスネアヘッドが共振し、スナッピーにぶつかることによってスネアドラムの雑音が鳴ると言えると考えた。

また、2つ目の実験では、発泡スチロールの粒が揺れず、スネアヘッドの揺れは目では確認できなかった。しかし、対照実験より、雑音が鳴っているとき、スネアヘッドが揺れているのは確かだとわかるため、2つ目の実験の結果から、「雑音が鳴っている時、スネアヘッドは振動しているが、目視で確認できるほど大きい振動ではない」と言える。

第4章 スネアドラムの雑音についての調査

第1節 本調査の概要

本調査では、スネアドラムの近くのスピーカーから異なる周波数の sin 波の音を流し、その時の雑音の大きさと性質の変化について調べた。「スネアドラムの周りで流れている音が低いほうが雑音は大きくなる」という仮説を立てて実験をした。

第2節 調査目的

本調査では、スネアドラムを共振させ、雑音を起こさせる音について、どのような条件の音のときに雑音が大きくなるのかを調べた。

第3節 調査方法

図 4-1 のように、スネアドラムをスタンドに載せ、地面からの高さを 1m に合わせた。スネアスタンドから 1m 離れたところにスピーカーを置き、sin 波を再生した。また、スネアドラムのバターヘッドの中央に、ヘッド面から 3cm 離れたところに面に対して垂直になるようにダイナミックマイクロフォンを設定し、オーディオインターフェースを介して音声を PC に録音した。このとき、実験中はオーディオインターフェースのメモリを動かさず、マイクの入力信号の大きさを変えないようにした。

このとき、Python で生成した(ソースコードは付録 B に記載)、周波数が 100Hz-10kHz の範囲で sin 波をギターアンプで再生し、その時の共鳴音についてマイクロフォンで録音した。また比較するためスネアがないときの、sin 波を流した音も録音した。

そして、これらの録音した wav ファイルを音楽オーディオ解析ソフトの Sonic Visualiser を用いて、波形の観察と高速フーリエ変換のスペクトル解析によって分析・考察した。また、「スネアドラムの周りで流れている音が低いほうが雑音は大きくなる」という仮説が正しいか、回帰分析を行い相関関係を調べた。

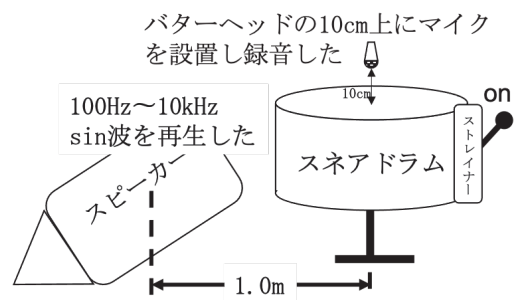


図 4-1 第4章で行った実験の様子

第4節 調査結果

第1項 スネアドラムがあるとき

得られた音声データを、解析ソフトを用いて波形を可視化し、観察した。その結果、実験環境にスネアドラムがあるとき、録音したデータの波形の平均の音量レベルは図4-2のように変化した。

第2項 スネアドラムがないとき

得られた音声データを、分析ソフトを用いて波形を可視化し、観察した。その結果、実験環境にスネアドラムがないとき、録音したデータの平均の音量レベルは図4-3のように変化した。

第5節 考察

第1項 録音した音声についての考察

スネアドラムがあるときの、再生した sin 波の周波数と音量レベル(dB)の平均の相関関係について調べた。相関係数は-0.53 より、やや負の相関があることがわかった。また、sin 波の周波数と音量レベル(dB)の平均について Excel を用いて単回帰分析をすると以下のような結果になった。

$$y = -1.98 \times 10^{-5}x + 0.248$$

$$R^2 = 0.286$$

$$x \text{ の } p \text{ 値: } 2.62 \times 10^{-9}$$

よって、決定係数 (R^2) より、回帰式の精度が良くない事がわかる。

また、有意水準 1%とすると、p 値<0.01 より、再生した sin 波の周波数は有意な説明変数であると言える。p 値より再生した sin 波の周波数は録音したデータの平均の音量レベルを説明するのに有意な説明変数であることから、周波数は録音した音声データの音量レベルと関係性がある事がわかる。

また、4 kHz, 6 kHz, 8 kHz という特定の周波数のときでは音量が何らかの理由で大きくなる事がわかった。

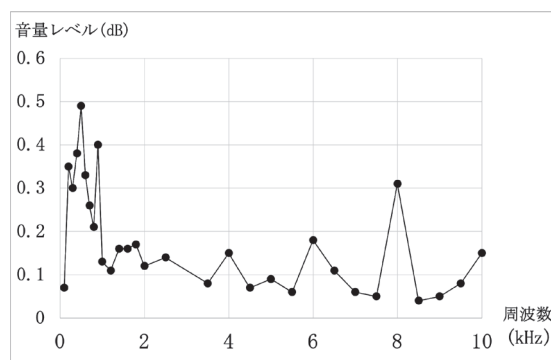


図 4-2 スネアドラムがあるときの周波数と波形の音量レベル

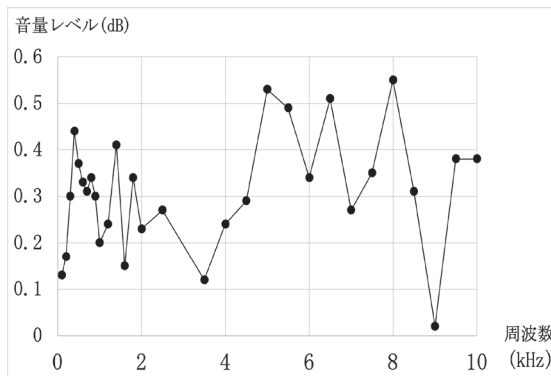


図 4-3 スネアドラムがないときの sin 波と音量レベル

第2項 再生した sin 波の周波数の倍音の成分に関する考察

得られた音声データを、SonicVisualiser を用いてスペクトル解析をして観察をした。またこのとき、ナイキストの法則(Grenander Ulf,1959)より、サンプリングレートが 44.1kHz で録音したので 22kHz より大きい周波数を分析しなかった。

スペクトル解析の結果、すべての周波数において、その周波数の整数次倍音が突出していることがわかった。これは、流した sin 波の周波数の整数次倍音は、流した sin 波が純音なことから雑音であると言えると考えた。

流した sin 波と 1 倍音, 2 倍音, 3 倍音, 4 倍音の大きさの関係をまとめたものが図 4-4 である。図より再生した sin 波の周波数が高くなればなるほど整数次倍音の成分が少なくなる傾向があることがわかる。これにより、再生した sin 波の周波数が高くなればなるほど雑音は小さくなると言えると考えた。

また、表 3-1 は、再生した sin 波の周波数 f と各整数次倍音の大きさの相関係数をまとめたものである。これより、1 倍音の大きさは再生した sin 波の周波数とやや負の相関があり、2 倍音, 3 倍音, 4 倍音は強い負の相関があることがわかる。よって、再生した sin 波の周波数が高くなればなるほど少しずつ録音したデータ（流した音声と雑音の 2 つが含まれている音）の平均の音量レベルが大きくなることがわかった。

また、1 倍音, 2 倍音, 3 倍音, 4 倍音のそれぞれの倍音において、再生した sin 波の周波数を x 軸にとり、倍音の大きさを y 軸に取ったとき、再生した sin 波の周波数と倍音の大きさについて Excel を用いて単回帰分析した。回帰分析の結果は以下の通りである。（ p_x : x の p 値）

$$\begin{aligned} 1 \text{ 倍音} : y &= -9.04 \times 10^{-4}x - 23.0 & R^2 &= 0.407 & p_x &= 2.54 \times 10^{-2} \\ 2 \text{ 倍音} : y &= -6.49 \times 10^{-3}x - 49.0 & R^2 &= 0.937 & p_x &= 6.98 \times 10^{-2} \\ 3 \text{ 倍音} : y &= -8.25 \times 10^{-3}x - 53.2 & R^2 &= 0.932 & p_x &= 3.89 \times 10^{-2} \\ 4 \text{ 倍音} : y &= -1.09 \times 10^{-2}x - 58.2 & R^2 &= 0.905 & p_x &= 2.01 \times 10^{-2} \end{aligned}$$

決定係数（ R^2 ）より、それぞれの回帰式について 1 倍音は精度が良くなく、2 倍音・3 倍音・4 倍音は精度が良いと言える。 p_x より、有意水準を 1%とすると、2 倍音・3 倍音・4 倍音の大きさについては x の p 値 < 0.01 より再生した sin 波の周波数は有意な説明変数であるといえるが、1 倍音は x の p 値 > 0.01 より、再生した正弦波の周波数は有意な説明変

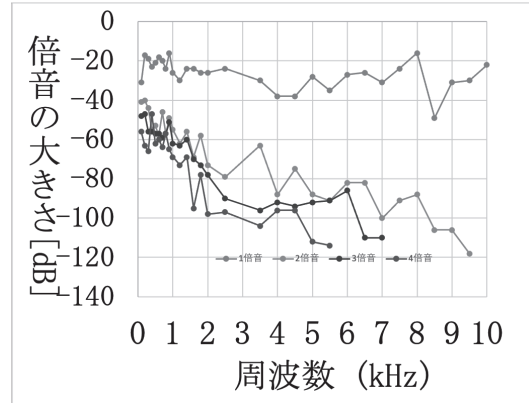


図 4-4 流した sin 波と整数次倍音の大きさの
表 4-1 周波数と各整数次倍音の大きさの相関係数

	1倍音	2倍音	3倍音	4倍音
相関係数	-0.41	-0.94	-0.93	-0.90

数ではないと言える。

第3項 各倍音の1倍音比に関する考察

実験で得られた音声データの音声の大きさを、sin 波の周波数ごとに2倍音・3倍音・4倍音における1倍音との比を1倍音比と呼び、図にまとめたものが図3-5である。このとき、音声データの大きさ[dB]はすべてのデータにおいて負の数となったため、比が小さいほど音の大きさが大きく1倍音と近く、比が大きいほど音が小さく1倍音と遠い。

表3-2は各倍音の1倍音比と再生したsin波の周波数の相関関係である。これより、2倍音・3倍音は1倍音比が再生したsin波の周波数とやや正の相関があり、4倍音はほとんど相関がないことがわかる。

また、再生したsin波の周波数と各倍音の1倍音比について単回帰分析を行った。回帰分析の結果は以下の通りである。(p_x: xのp値)

2倍音： $y = 1.49 \times 10^{-4}x + 2.25$ $R^2 = 0.589$ $x_p = 7.71 \times 10^{-4}$
3倍音： $y = 1.28 \times 10^{-4}x + 2.56$ $R^2 = 0.503$ $x_p = 1.23 \times 10^{-2}$
4倍音： $y = 8.01 \times 10^{-5}x + 2.99$ $R^2 = 0.198$ $x_p = 0.390$

決定係数(R²値)より、それぞれの回帰式について2倍音・3倍音は精度が良く、4倍音は精度が悪いと言える。またx_pより、有意水準を1%とすると、2倍音の比率についてはxのp値<0.01より再生したsin波の周波数は有意な説明変数であるといえるが、3倍音・4倍音はxのp値>0.01より、再生した正弦波の周波数は有意な説明変数ではないと言える。

これらのことから、スネアドラムは周りの音の周波数が低いほど雑音が大きくなり、周波数が高くなるに連れ雑音が小さくなる。その傾向は1倍音、2倍音、3倍音、4倍音の順で強く見られる事がわかった。

第4項 実験のデータの測定誤差についての考察

図3-5の回帰分析のp値の値より、スネアドラムが無いとき、再生したsin波の周波数は音量レベルと関係があまりないことがわかった。しかし、再生したsin波の振幅はすべて同じなため、理論上では音量レベルの大きさはすべての周波数で等しいはずである。よ

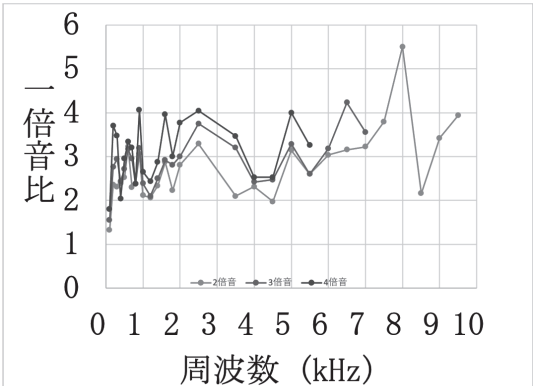


図 4-5 sin 波の周波数ごとの2倍音・3倍音・4倍音における1倍音比の関係

表 4-2 各倍音の1倍音比と周波数の相関関係

	2倍音	3倍音	4倍音
相関係数	0.59	0.50	0.20

って、何かしらの原因によって周波数によって音量レベルに差ができたのだと考えた。考えうる原因として挙げられるのは部屋の音響特性とスピーカーやその他機材の音響特性とマイクの近接効果の3つである。部屋の音響特性については、部屋の壁の反射・吸収と大きく関係があると考えた。

部屋の音響特性については、部屋の音響特性によって反響しやすい周波数帯があり、反響しやすい周波数の音は反響した音が録音されるためマイクで録音した音の平均レベルが大きくなり、反響しにくい周波数の音は再生した音がマイクに録音されないの、マイクで録音した音の平均レベルは小さくなるのではないかと考えた。

また、マイクの近接効果とは、音源に近づけたときに低音が強調されることであり、本実験で用いたマイク(SM58)のメーカーSHUREのWebサイト(SHURE マイクロホン・ガイドブック あなたのマイク選び・使い方に役立つ,2016)[5]にはSM58にも近接効果があることが書かれている。よってマイクの近接効果によって低音域が大きく録音されたと可能性があると考えた。

最後に、スピーカーやその他機材の音響特性についてだが、スピーカーやその他機材の音響特性は、特定の周波数だけが大きくなったり小さくなったりするのではなく、音域ごとに大きさが変わることが一般的である。たとえば、中音域が強調されたり、高音域と低音域が強調されたりする。しかし、図3-5より、音域帯に関わらず音の平均レベルは上下しているため、スピーカーやその他機材の音響特性が与える影響は考慮しなくて良いほどであると考えた。

第 5 章 スネアドラム模型の作成・スネアヘッド機能の検証

第 1 節 本調査の概要

本予備調査では、フープからスネアヘッドにかかる力の大きさや、スネアヘッドの素材などの、スネアヘッドがもつ様々な性質が、スネアヘッドの雑音にどのように影響するのかをスネアドラムの簡易的な模型を作って実験を行うため、実験装置や模型などの実験系が正しく機能するかを調べるために行った。本予備調査では、最初に作成した模型でのスネアヘッドの振動が非常に微小な振動であることがわかった。

第 2 節 調査目的

本予備調査では、フープからスネアヘッドにかかる力の大きさや、スネアヘッドの素材などの、スネアヘッドがもつ様々な性質が、スネアヘッドの雑音にどのように影響するのかをスネアドラムの簡易的な模型を作って実験を行うため、実験装置や模型などの実験系が正しく機能するかを調べるために行った。

第 3 節 調査方法

3DCAD ソフトでスネアヘッド周辺を再現する模型を設計した。設計した模型を 3D プリンターで出力し、模型を制作した。その模型にヘッドとなる食品用ラップを挟み、ドラムのスネアドラムの代わりとした。スネアヘッドの模型をスネアの胴の模型に乗せ、上から手で重さを加えた。この際、振動がデータとして記録

できるかを調べたかったので、振動に適切な重さを加えた。このとき、スピーカーから 300 Hz の sin 波を再生し、マイクで録音した。また、比較のためスネアドラムの模型を設置せずに、同じマイクの位置で再生した sin 波を録音した。

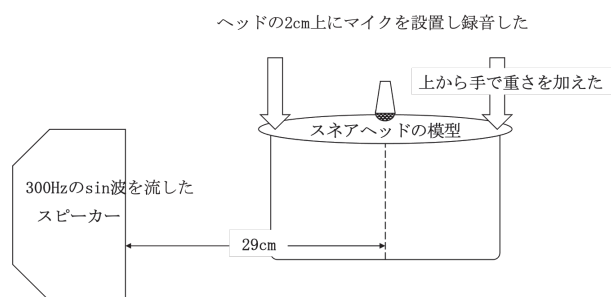


図 5-1 第 5 章で行った予備実験の様子

第 4 節 調査結果

手で振動を感知することができた。模型を置く所によってその振動の大きさは変化し、80cm のところで最大となった。スネアの膜に重さを加えた際、段々とラップがずれ、張力が保たれなくなった。

第 5 節 考察

マイクで録音した音声をスペクトル解析した。模型があるときは図 5-2、ないときは図 5-3 である。また第 3 章で行った、スネアドラムがあるときに 100Hz の sin 波を再生し、録音した音声をスペクトル解析したものが図 5-4 である。図 5-4 に見られる縦線は極値となった周波数を示すものである。図 5-2 には図 5-4 で見られる、再生した sin 波の周波数の倍音成分が突出して見られないので、共振によって鳴る雑音の成分はマイクで拾えていないと考えた。その時、手で振動を感知することはできたので、共振が音として聞こえるほど大きいものではなかったと考えた。これは、第 2 章の実験によってわかった、雑音が大きい物になる条件のうちの一つである「スナッピーと面が触れる」という条件が満たされていないからだと考えた。またスナッピーがないという理由以外にも、共振が確認できなかったのはスネアドラムの模型にラップが重さを加えると徐々に枠から外れ、張力を維持できなかったことも原因の一つであると考えた。

この予備実験を受け、ラップがずれないようにするため、模型を設計し直した。その時に録音した音声をスペクトル解析した結果が図 5-5 である(再生した sin 波の周波数は 130Hz)。また、設計し直した模型を用いて再度実験を行ったところ、スナッピーがあるスネアドラムほど大きいものではないが、スペクトル解析を行ったところ、倍音を確認できたので、スナッピーを再現した模型は作成しなかった。

また、本予備実験で、模型を置く所によってその振動の大きさは変化し 80cm のところで最大となった原因は、再生した sin 波の周波数が 300Hz であり、実験したときの室温が 23.6℃であったことから、

$$v = 331.5 + 0.6 \times 23.6 = 345.66$$

$v = f\lambda$ より

$$\lambda = 1.11522$$

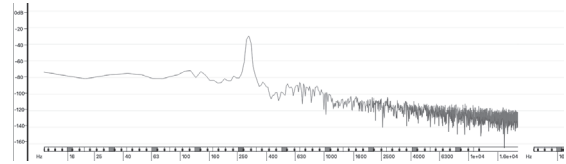


図 5-2 模型があるときの録音した音声をスペクトル解析した結果

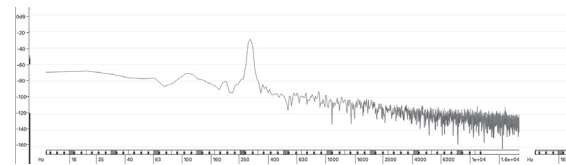


図 5-3 模型がないときの録音した音声をスペクトル解析した結果

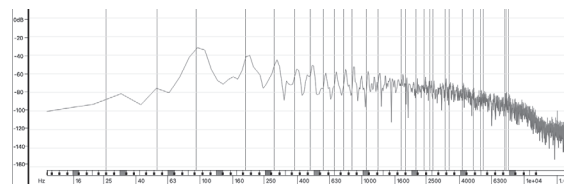


図 5-4 スネアドラムに 100Hz の sin 波を流し、録音した音声をスペクトル解析した結果

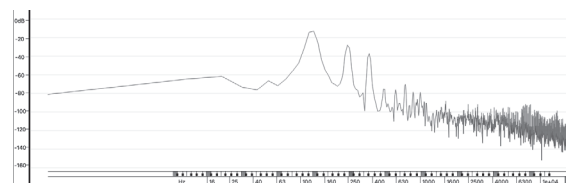


図 5-5 改良した模型があるときの録音した音声をスペクトル解析した結果

より、sin 波の腹の場所はスピーカーから $\frac{\lambda}{4}, \frac{3}{4}\lambda \dots$ の点であるから、2 つ目の腹である $\frac{3}{4}\lambda$ の点に近かったからのではないかと考察した。

第 6 章 スネアヘッドの性質と共鳴の関係についての調査

第 1 節 本調査の概要

本調査では、フープからスネアヘッドにかかる力の大きさや、スネアヘッドの素材などの、スネアヘッドがもつ様々な性質が、スネアヘッドの共鳴にどのように影響するのかをスネアドラムの簡易的な模型を作って実験を行った。

第 2 節 調査目的

本調査は、フープからスネアヘッドにかかる力の大きさや、スネアヘッドの素材などの、スネアヘッドがもつ様々な性質が、スネアヘッドの共鳴にどのように影響するのかをしらべるために行った。これにより、スネアヘッドが共鳴しづらく、雑音が鳴りにくいヘッドの状態を知り、スネアヘッドの雑音を減らせるのではないかと考えた。

第 3 節 調査方法

前章で作成した改良型の模型を用い、模型にヘッドとなる食品用ラップを挟み、ドラムのスネアドラムの代わりとした。スネアヘッドの模型をスネアの胴の模型に乗せ、10g-300gのおもりを吊るした。このとき、スピーカーから 130Hz の sin 波を再生し、ヘッドの 2cm 上に設置したマイクで録音した。

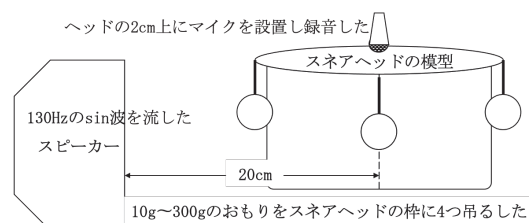


図 6-1 第 6 章の実験の様子

第 4 節 調査結果

得られた音声データを、解析ソフトを用いて波形を可視化し、観察した。その結果、録音したデータの波形の平均の音量レベルは図 6-2 のように変化した。

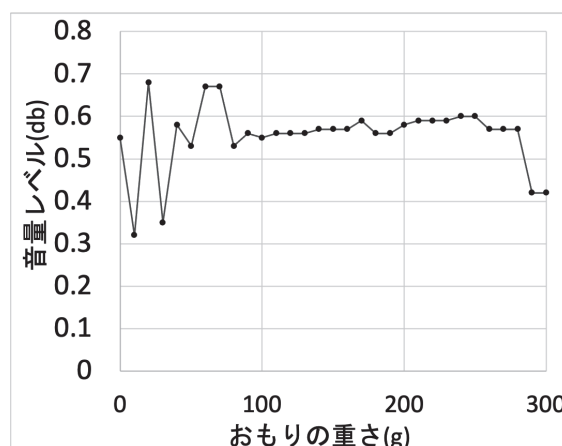


図 6-2 おもりの重さと波形の音量レベルの関係

第5節 考察

第1項 録音した音声についての考察

おもりの重さと音量(dB)の相関関係について調べた。相関係数は 0.037 より、ほとんど相関がない事がわかった。また、図 5-2 に対して単回帰分析を行った。結果は以下の通りである。

$$\begin{aligned}y &= 3.19 \times 10^{-5} + 0.550 \\R^2 &= 1.33 \times 10^{-3} \\p_x &= 0.845\end{aligned}$$

よって決定係数(R^2 値)より、回帰式の精度が良くないことがわかる。また有意水準を 1%とすると、 $p_x > 0.01$ より、おもりの重さは有意な説明変数でないと言える。よって、これらのことから、録音した音声の大きさはおもりの重さによって変化しなく、おもりの重さと録音した音声データの音量レベルに関係はないということが言えると考察した。

また、実験で録音した音声データを、解析ソフトウェアでFFTによりスペクトル解析を行った。またこのとき、ナイキストの法則(Grenander Ulf,1959)よりサンプリングレートが 44.1 kHz で録音したので 22 kHz より大きい周波数を分析しなかった。

スペクトル解析の結果、第3章の実験と同様に、すべてのおもりの重さにおいて、再生した sin 波の周波数の整数次倍音が突出していることがわかった。これは、流した sin 波の周波数の整数次倍音は、流した sin 波は純音であることから共鳴した音であると言えると考えた。

第2項 共鳴音の中の倍音に関する考察

おもりの重さと 1・2・3・4 倍音の大きさの関係をまとめたものが図 5-3 である。図より、おもりの重さと整数次倍音の大きさに、あまり関係がない傾向が読み取れる。

また、表 5-1 は、おもりの重さと各倍音の整数次倍音の大きさの相関係数をまとめたものである。これより、1 倍音はほとんど相関がなく、2 倍音と 3 倍音はやや負の相関があり、4 倍音は弱い正の相関があることがわかる。

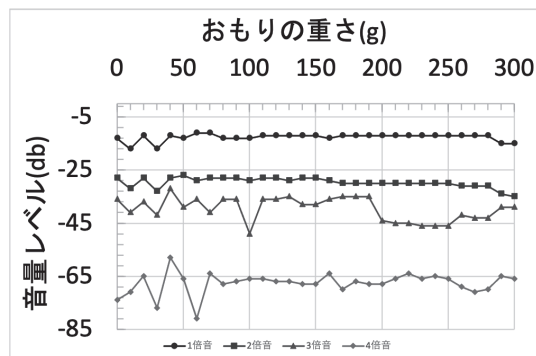


図 6-3 おもりの重さと整数次倍音の大きさの関係

また、1 倍音、2 倍音、3 倍音、4 倍音のそれぞれの倍音において、再生した sin 波の周波数を x 軸にとり、倍音の大きさを y 軸に取ったとき、再生した sin 波の周波数と倍音の大きさについて Excel を用いて単回帰分析した。回帰分析の結果は以下の通りである。(p_x: x の p 値)

表 6-1 おもりの重さと各倍音の整数次倍音の大きさの相関係数

	1倍音	2倍音	3倍音	4倍音
相関係数	0.172	-0.552	-0.419	0.205

1 倍音 : $y = 2.74 \times 10^{-3} - 13.1, R^2 = 2.96 \times 10^{-2}, p_x = 0.355$

2 倍音 : $y = -1.15 \times 10^{-2} - 28.0, R^2 = 0.305, p_x = 1.29 \times 10^{-3}$

3 倍音 : $y = -2.02 \times 10^{-2} - 36.6, R^2 = 0.176, p_x = 1.89 \times 10^{-2}$

4 倍音 : $y = 9.35 \times 10^{-3} - 69.1, R^2 = 4.20 \times 10^{-2}, p_x = 0.269$

決定係数(R^2 値)より、それぞれの整数次倍音の回帰式の精度が良くないと言える。p_xより、有意水準を 1% とすると、p 値<0.01 より 2 倍音、3 倍音についてはおもりの重さが倍音の大きさについての有意な説明変数であると言えるが、1 倍音、4 倍音については p 値>0.01 よりおもりの重さは倍音の大きさについての有意な説明変数でないと言える。これらのことから、おもりの重さは 2 倍音、3 倍音の大きさには関係するが 1 倍音、4 倍音の大きさには関係しないと言える。おもりの重さと関係する 2 倍音・3 倍音の回帰式の x の係数はそれぞれ -1.15×10^{-2} ・ -2.02×10^{-2} であり、非常に小さいため、関係はしているが、その変化量は非常に小さいので、おもりの重さによって変化はしていないといえると考察した。

第 3 項 おもりの重さと各倍音の一倍音比の関係に関する考察

実験で得られた音声データの音声の各倍音の大きさについて、2 倍音・3 倍音・4 倍音における 1 倍音との比を 1 倍音比と呼び、それを図にまとめたものが図 5-4 である。倍音の大きさ[dB]はすべてのデータにおいて負の数となったため、比が小さいほど音の大きさが大きく 1 倍音と近く、比が大きいほど音が小さく 1 倍音と遠い。

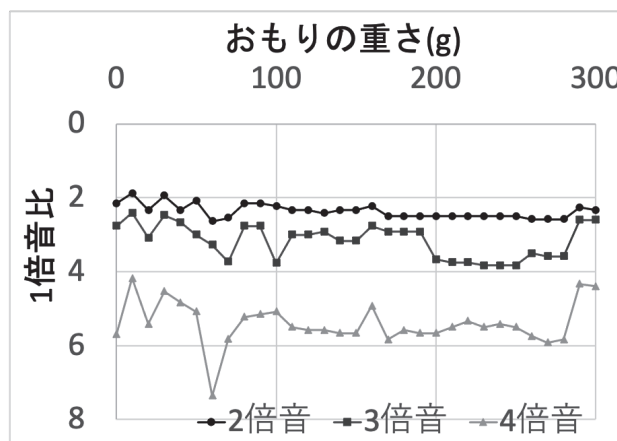


図 6-4 おもりの重さと各倍音の 1 倍音比の関係

表 5-2 はおもりの重さと各倍音の 1 倍音比の相関係数についてまとめたものである。

これより 2 倍音と 3 倍音の 1 倍音比はおもりの重さと正の相関があり、4 倍音は相関がない事がわかる。また、おもりの重さと各倍音の 1 倍音比について単回帰分析を行った。回帰分析の結果は以下の通りである。(p_x : x の p 値)

表 6-2 おもりの重さと各倍音の 1 倍音比の相関係数

	2倍音	3倍音	4倍音
相関係数	0.604	0.436	0.0327

2 倍音 : $y = 1.27 \times 10^{-3}x + 2.17, R^2 = 0.364, x_p = 3.25 \times 10^{-4}$

3 倍音 : $y = 2.20 \times 10^{-3}x + 2.83, R^2 = 0.190, x_p = 1.43 \times 10^{-2}$

4 倍音 : $y = 2.13 \times 10^{-4}x + 5.37, R^2 = 1.07 \times 10^{-3}, x_p = 0.861$

決定係数 (R^2 値) より、すべての回帰式について、精度が良くない事がわかる。また、 x_p より、有意水準を 1% とすると、2 倍音は p 値 < 0.01 よりおもりの重さは 1 倍音比の有意な説明変数といえるが、3 倍音と 4 倍音についてはおもりの重さは 1 倍音比の有意な説明変数ではないと言える。これらのことから、おもりの重さと 2 倍音の 1 倍音比は関係があり、おもりの重さと 3 倍音・4 倍音の 1 倍音比は関係がないと言えると考えした。また、関係している 2 倍音も、回帰式の x の係数が 1.27×10^{-3} で非常に小さく、関係はしているが、おもりの重さによってほぼ変化していないと判断できると考えた。

よって、これらのことより、おもりの重さすなわちスネアヘッドにかかる張力は雑音の大きさに関係しないと考察した。一方で、西尾らの研究では膜の固有振動数は、膜の半径 a ・張力 T ・密度 σ を用いて次の基本周波数が定められる (西尾雅明・井研治, 1999) とされ、式は以下のように表される。

$$f_0 = 0.383 \frac{1}{a} \sqrt{\frac{T}{\sigma}} [\text{Hz}]$$

この式によれば、膜の固有振動数は張力 T の平方根に比例するため、張力を変えれば共振しやすい周波数は変化すると考えられる。今回の実験では入力周波数を 130Hz に固定したため、張力の変化に伴い共振のピーク周波数が 130Hz からずれた結果、観測される雑音の大きさ (130Hz に対する応答) に明確な相関が見られなかった可能性がある。

第 4 項 実験のデータの測定誤差についての考察

本調査では、おもりの数に制限があることと、おもりが床と干渉したため、一度おもりをすべて外してからより重いおもりに付け替えるという操作をしたので、そこでヘッドが緩み、張力が変わってしまった可能性があるのではないかと考えた。

第 7 章 有限要素解析による調査

第 1 節 本調査の概要

本調査では、(鮫島俊哉・荒木陽三,2019)で言及されていた有限要素法(FEM)を用いて、スネアドラムのヘッドが振動するときの固有振動数や振動モードを可視化した。有限要素法とは、解析対象となる領域を「要素」と呼ばれる単位に分割して解析を行う手法である(只野裕一,2021)。本研究では、ヘッドの張力が一定でなく、場所によって異なる状態における節や固有振動数についてシミュレーションで分析した。

第 2 節 調査目的

先行研究では、張力が一定であるドラムの基本周波数と振動モードについて述べられていたが、張力が一定ではないドラムについては調査方法として FEM が紹介されているだけに留まっていた。そこで本調査は、張力が一定でない実際のスネアドラムの固有振動数を計算するため、有限要素解析を行った。

第 3 節 調査方法

Python の scikit-fem というライブラリを用いて有限要素法(FEM)を用いた有限要素解析(FEA)を行った。

本調査では、スネアドラムのヘッドを図 7-1 のように分割し、それぞれに質量・張力・剛性を設定し、張力分布関数を計算し、色で振動する時の変位を表現した。

描画や計算には numpy, matplotlib, ipywidgets というライブラリを用いて、google colaboratory で実装した。実際のソースコードは付録 A に後述する。本調査では、スネアヘッドの条件として、半径：17.78cm (Fletcher, Neville Horner・Rossing, Thomas D. 楽器の物理,2021)また、スネアヘッドの主成分がポリエチレンテレフタレートであることから、弾性率：2.45 GPa, ポアソン比：0.4 密度：1.4kg/m³ (IFA,2024)とした。

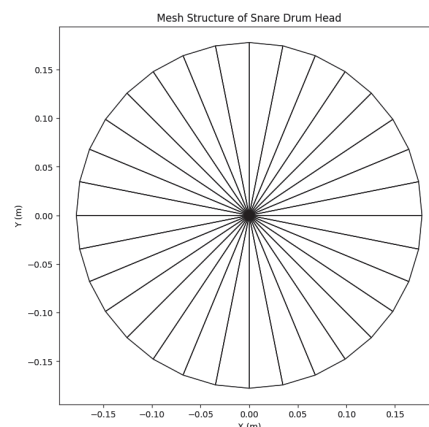


図 7-1 ドラムヘッドのメッシュ分割

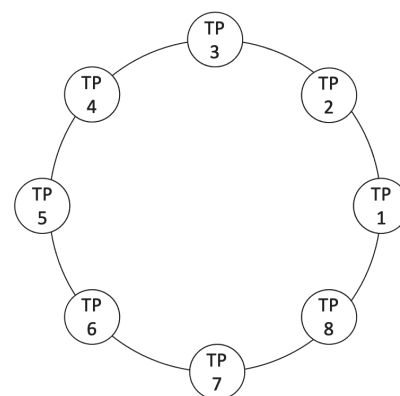


図 7-2 TP の呼称

また、スネアドラムのテンションボルトのように、ヘッドの張力を変える点を円周上に $\frac{\pi}{4}$ ごとに設定し、値を 10N-2000N まで 10 段階でそれぞれ

変化させた。これらの点をこの論文では TP(Tension Point)とし、図 7-2 のように命名する。このとき、TP の値を表 7-1 のように変化させた。

そして、FEA の結果の図の色が何を表すものであるかを視覚的にわかりやすくするため、カラーバーを Python でプログラムし出力した。実際のソースコードは付録 A に後述する。

その上、FEA の結果出力された図の中の振動モードを調べるために、Python を用いて、図の中の、HSV 色空間(H,S,V)が(20, 50, 50) から(85, 255, 255)の色 (図 7-3 に表されている) 範囲を、モードの中の節の範囲であると定義し、透明度 50%の黒でハイライトした。実際のソースコードは付録 A に後述する。

表 7-1 FEM のときの TP の条件

	TP1	TP2	TP3	TP4	TP5	TP6	TP7	TP8
条件A	1k	1k	1K	1k	1k	1k	1k	1k
条件B	10	1k	1K	1k	1k	1k	1k	1k
条件C	500	1k	1K	1k	1k	1k	1k	1k
条件D	2k	1k	1K	1k	1k	1k	1k	1k
条件E	0.9K	1k	1K	1k	1k	1k	1k	1k
条件F	2k	2k	2k	2k	2k	2k	2k	2k
条件G	500	500	500	500	500	500	500	500
条件H	10	500	500	500	500	500	500	500
条件I	1k	500	500	500	500	500	500	500
条件J	500	1k	1K	1k	500	1k	1k	1k
条件K	2K	1k	1K	1k	2K	1k	1k	1k

remarks: [N] 1, k=1,000
3D HSV Space Visualization

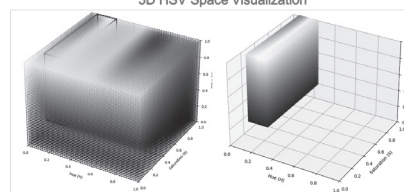


図 7-3 HSV 色空間 (20, 50, 50) から (85, 255, 255) の範囲 (この図は筆者が Python で出力)

第 4 節 調査結果

調査結果は以下の図 7-4 から図 7-14 のようになった。

なお、左からモード 1,2,3,4,5,6 と並んでおり、上の段が下の FEA、下がモードの範囲を強調したものである。

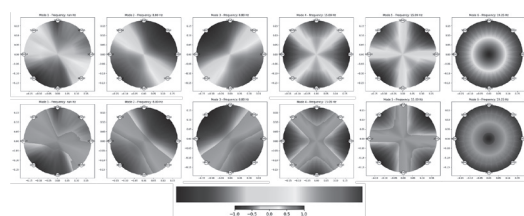


図 7-4 条件 A のときの FEA
(上:Original 下:Highlighted Mode)

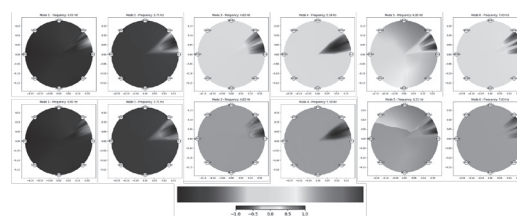


図 7-5 条件 B のときの FEA
(上:Original 下:Highlighted Mode)

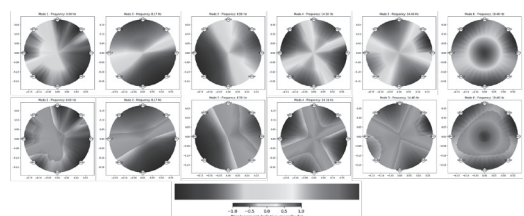


図 7-6 条件 C のときの FEA
(上:Original 下:Highlighted Mode)

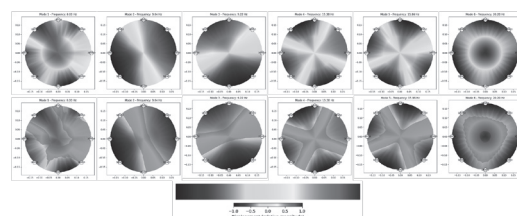


図 7-7 条件 D のときの FEA
(上:Original 下:Highlighted Mode)

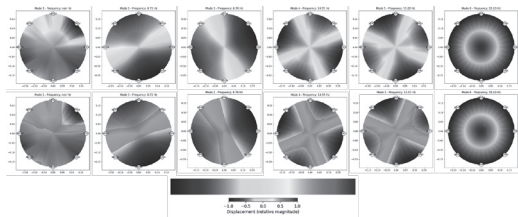


図 7-8 条件 E のときの FEA
(上:Original 下:Highlighted Mode)

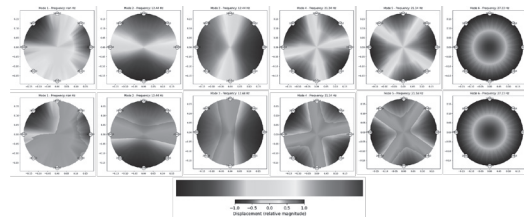


図 7-9 条件 F のときの FEA
(上:Original 下:Highlighted Mode)

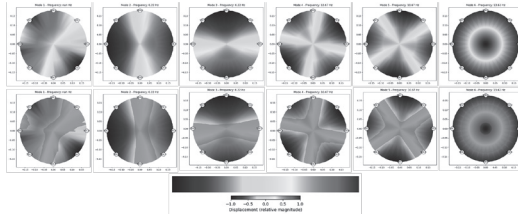


図 7-10 条件 G のときの FEA
(上:Original 下:Highlighted Mode)

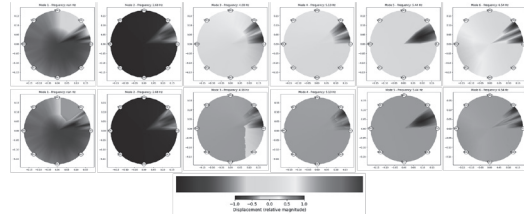


図 7-11 条件 H のときの FEA
(上:Original 下:Highlighted Mode)

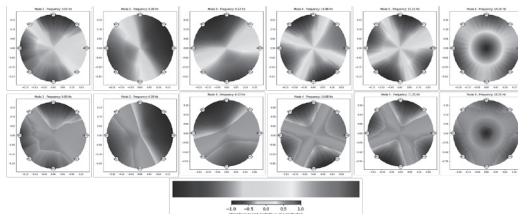


図 7-12 条件 I のときの FEA
(上:Original 下:Highlighted Mode)

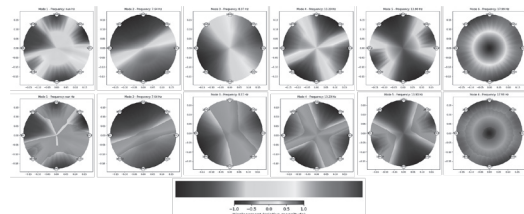


図 7-13 条件 J のときの FEA
(上:Original 下:Highlighted Mode)

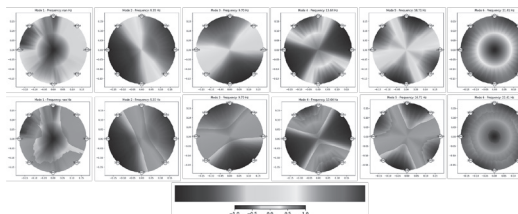


図 7-14 条件 K のときの FEA
(上:Original 下:Highlighted Mode)

第 5 節 考察

図 7-4 から図 7-14 より、張力が一定の時、スネアドラムはモードには十字形、帯型、円形円型、歪んでいる円型などの節が有ることがわかった。これらの節をまとめたものが表 7-2 である。これらのことより、モード 1 は TP の状態によって様々な形で見られることがわかった。また、条件 B や条件 H のように、1 つの TP を極端に緩めると、モード 1 やモード 2 では節が見られず、それ以降のモードでは、ほとんど振動しない事がわかる。それ以外の条件では、モード 2, モード 3, モード 4, モード 5 でそれぞれ同じ形の節を観察できた。

固有振動数をまとめたものが表 7-3 である。表 2-3 より、すべての条件でモード 1 の固有振動数は 0Hz だった。よってモード 0 は剛性運動をしているので考慮しない。条件 A, 条件 F, 条件 G のように、すべての TP での張力が等しい場合、モード 2 とモード 3, モード 4 とモード 5 の、2 つの組み合わせで固有振動数が同じ値を取り、張力が弱い時、固有振動数が小さくなり、張力が強い時には固有振動数が大きくなることがわかった。また、条件 B のように、1 つの TP だけ張力が極端に弱い時、モード 1、モード 2 ではヘッド全体が振動するが、それ以外のモードではほとんど振動しておらず、スネアヘッドの共振を止めるには 1 つのチューニングボルトを緩めればよいと思われる。しかし、スネアドラムやティンパニーなどの楽器は、チューニングが各テンションボルトで揃っていない時、うなりが発生し、楽器の音色を損なうので現実的ではない。そこで、モード 2, モード 3, モード 4, モード 5 について着目すると、すべてのモードについて、ヘッドの中心部に置いては振動が小さくなっている。よって、スナッピーを帯状のものではなく、ヘッドと同心円の、小さい円形のものにするとスネアドラムの雑音は小さくなるのではないかなと言える。

表 7-2 FEA でわかった節の形状の分類

	Mode1	Mode2	Mode3	Mode4	Mode5	Mode6
条件A	帯	帯	帯	十字	十字	円
条件B	なし	なし	全部	全部	半円	全部
条件C	扇	帯	帯	十字	十字	歪円
条件D	分類不能	帯	帯	十字	十字	歪円
条件E	分類不能	帯	帯	十字	十字	なし
条件F	分類不能	帯	帯	十字	十字	なし
条件G	分類不能	帯	帯	十字	十字	円
条件H	なし	なし	全部	全部	全部	全部
条件I	分類不能	帯	帯	十字	十字	歪円
条件J	分類不能	帯	帯	十字	十字	歪円
条件K	分類不能	帯	帯	十字	十字	歪円

表 7-3 各条件におけるそれぞれのモードがもつ固有振動数

固有振動数	Mode1	Mode2	Mode3	Mode4	Mode5	Mode6
条件A	0	8.80	8.80	15.09	15.09	19.25
条件B	0	2.71	4.62	5.58	6.32	7.03
条件C	0	8.17	8.56	14.16	14.46	18.48
条件D	0	9.04	9.22	15.38	15.86	20.20
条件E	0	8.71	8.76	14.95	15.02	19.13
条件F	0	12.44	12.44	21.34	21.34	27.23
条件G	0	6.22	6.22	10.67	10.67	13.62
条件H	0	2.68	4.08	5.10	5.44	6.54
条件I	0	6.39	6.52	10.88	11.21	14.29
条件J	0	7.64	8.37	13.29	13.90	17.99
条件K	0	9.35	9.70	15.64	16.71	21.41

第 8 章 結論

第 1 節 まとめ

第 3 章の 2 つの実験より、ある音に対してスネアヘッドが共振し、スナッピーぶつかることによってスネアドラムの雑音が鳴る事がわかった。そして、その時のスネアヘッドの振動は非常に小さいことがわかった。また、第 4 章の実験より、スネアドラムは周りで流れる音の周波数が低いほど共鳴しやすく、周波数が高くなるに連れ雑音が小さくなり、その傾向は、録音したデータの中の再生した sin 波の整数次倍音に着目すると 1 倍音、2 倍音、3 倍音、4 倍音の順で強く見られる事がわかった。また第 6 章での実験では、スネアヘッドにかかる張力によって雑音の大きさは変化しない事がわかった。また第 7 章の有限要素解析によるシミュレーションでは、いろんなチューニングボルトの条件のとき、多くのモードでスネアヘッドの中心部は振動が小さかったので、そこにスナッピーを設置すれば、雑音が少ないスネアドラムになるのではないかと考えた。また、比較的低い周波数帯（2Hz-30Hz 程度）に固有振動数が計算された。しかし、第 4 章の実験では 4kHz、6kHz、8kHz といった非常に高い周波数でも雑音のピークが観測された。この乖離は、FEA で計算された低次の振動モードだけでなく、より高次の複雑な振動モードや、スナッピー自体の振動特性、あるいはヘッドとスナッピーの衝突という非線形な現象そのものが高周波の雑音成分を生成している可能性を示唆している。

第 2 節 今後の展望

第 3 章では実験で再生した sin 波の周波数の種類が少なく、データの分析の際、再生した sin 波の周波数と雑音の大きさの関係を複雑な関数で表せることができた可能性があったが、sin 波の周波数の種類が少なかつたため相関関係を調べることと回帰分析をすることしかできなかった。よって、流した sin 波の周波数をもっと細かく変化させ、もっと多くのデータを収集することによって、もっと正確な分析をすることが今後の課題である。また、部屋の反響・マイクの近接効果を考慮し、もっと正確なデータを取ることによってより精度が高い分析をすることでできればより精度の良い分析ができるようになると考えた。第 5 章の実験では、おもりの数に制限があることと、おもりが床と干渉したため、一度おもりをすべて外してからより重いおもりに付け替えるという操作をした。そのときにヘッドが緩み、張力が変わってしまったのではないかと考えたため、おもりを外すことなく連続的に実験を行うとより正確におもりの重さと共鳴の大きさの関係を調べることができるのではないかと考えた。また本研究では周りで流れている音とスネアヘッドに着目したが、雑音のメカニズムのスナッピーにも着目して調査を行うと、雑音の小さくするためのスナッピーに関する条件を調べることができるのではないかと考えた。

謝辞

本研究の遂行にあたり、指導教員として終始ご指導を賜った神戸大学中等教育学校竹村実成先生に深謝いたします。並びに、実験設計・データ分析に伴い助言を頂いた同校林兵馬先生にも感謝いたします。また神戸大学附属中等教育学校吹奏楽部の皆様には、実験にあたり、機材を貸出していただきました。ここに感謝の意を表します。

付録 A 調査で使ったプログラムのソースコード

動作環境 : GoogleColaboratory, Python 3.10.12

第 1 節 第 2 章で行った FEM のソースコード

```
!pip install numpy scipy matplotlib meshio scikit-fem

####FEM のソースコード####
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from skfem import MeshTri, ElementTriP2, Basis, asm
from skfem.helpers import grad, dot
from scipy.sparse.linalg import eigsh
import ipywidgets as widgets
from IPython.display import display, clear_output

DRUM_RADIUS = 17.78
ELASTIC_MODULUS = 2.45e9
POISSON_RATIO = 0.4
DENSITY = 1400

def bending_stiffness(E, v, t):
    return E * t**3 / (12 * (1 - v**2))

def create_circular_mesh(radius=DRUM_RADIUS / 100, n_points=32):
    theta = np.linspace(0, 2 * np.pi, n_points, endpoint=False)
    vertices = np.stack([radius * np.cos(theta), radius * np.sin(theta)], axis=1)
    vertices = np.concatenate((vertices, [[0.0, 0.0]]))
    cells = np.array([[i, (i + 1) % n_points, n_points] for i in range(n_points)])
    return MeshTri(vertices.T, cells.T)

def visualize_modes(tensions, thickness=0.001):
    D = bending_stiffness(ELASTIC_MODULUS, POISSON_RATIO, thickness)

    mesh = create_circular_mesh()
    basis = Basis(mesh, ElementTriP2())

    def tension_distribution(x, y, tensions):
```

```

    angles = np.arctan2(y, x)
    angles[angles < 0] += 2 * np.pi
    segment = np.floor(angles / (np.pi / 4)) % 8
    return np.vectorize(lambda s: tensions[int(s)])(segment)

def stiffness(u, v, w):
    T = tension_distribution(w.x[0], w.x[1], tensions)
    membrane_term = dot(T * grad(u), grad(v))
    grad_u = grad(u)
    grad_v = grad(v)
    bending_term = D * dot(grad_u, grad_v)
    return membrane_term + bending_term

def mass(u, v, w):
    return DENSITY * u * v

A = asm(stiffness, basis)
M = asm(mass, basis)

n_modes = 6
eigvals, eigvecs = eigsh(A, k=n_modes, M=M, which='SM')
frequencies = np.sqrt(eigvals)

def visualize_modes(tensions, thickness=0.001):
    D = bending_stiffness(ELASTIC_MODULUS, POISSON_RATIO, thickness)

    mesh = create_circular_mesh()
    basis = Basis(mesh, ElementTriP2())

    def tension_distribution(x, y, tensions):
        angles = np.arctan2(y, x)
        angles[angles < 0] += 2 * np.pi
        # 6 分割
        # segment = np.floor(angles / (np.pi / 3)) % 6
        segment = np.floor(angles / (np.pi / 4)) % 8 # 8 分割
        return np.vectorize(lambda s: tensions[int(s)])(segment)

    def stiffness(u, v, w):
        T = tension_distribution(w.x[0], w.x[1], tensions)
        membrane_term = dot(T * grad(u), grad(v))

```

```

    bending_term = D * dot(grad(u), grad(v))
    return membrane_term + bending_term

def mass(u, v, w):
    return DENSITY * u * v

A = asm(stiffness, basis)
M = asm(mass, basis)

n_modes = 6
eigvals, eigvecs = eigsh(A, k=n_modes, M=M, which='SM')
frequencies = np.sqrt(eigvals)

print("固有振動数:", ", ".join(f"{f:.2f} Hz" for f in frequencies))
for i, mode in enumerate(eigvecs.T):
    fig, ax = plt.subplots(figsize=(6, 6))
    basis.plot(mode, ax=ax, shading='gouraud')

    theta = np.linspace(0, 2 * np.pi, 9)[::-1]
    radius = mesh.p.max(axis=1).max()
    x = radius * np.cos(theta)
    y = radius * np.sin(theta)
    ax.scatter(x, y, c='white', s=300, edgecolor='black', zorder=10)

    # 張力変更点を 6 点でプロット
    # theta = np.linspace(0, 2 * np.pi, 7)[::-1]
    # x = np.cos(theta)
    # y = np.sin(theta)
    # ax.scatter(x, y, c='white', s=300, edgecolor='black', zorder=10)

    for xi, yi, t in zip(x, y, tensions):
        ax.text(xi, yi, f"{t:.1f}", color="black", ha="center", va="center", fontsize=10,
                zorder=11)

    ax.set_title(f"Mode {i + 1} - Frequency: {frequencies[i]:.2f} Hz")
    ax.axis("equal")
    plt.show()

```

#8 点分のスライダー

```

sliders = [widgets.FloatSlider(value=1000.0, min=10.0, max=2000.0, step=10.0,
description=f"Tension {i+1} [N/m2]" for i in range(8)) # 8 点
button = widgets.Button(description="Calculate Modes")
# 6 点分のスライダー
# sliders = [widgets.FloatSlider(value=1.0, min=0.0, max=2.0, step=0.1, description=f"Tension
{i+1}") for i in range(6)]

def on_button_click(b):
    tensions = [slider.value for slider in sliders]
    clear_output(wait=True)
    display(*sliders, button)
    visualize_modes(tensions)

button.on_click(on_button_click)

display(*sliders, button)

####Code to generate color bar####
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

def plot_colorbar_with_gradient():
    data = np.linspace(-1, 1, 256).reshape(1, -1)

    fig, ax = plt.subplots(figsize=(8, 1))
    cax = ax.imshow(data, cmap="jet", aspect="auto")

    cbar = fig.colorbar(cax, orientation="horizontal", ax=ax)
    cbar.set_label("Displacement (relative magnitude)")

    ax.axis("off")

    plt.show()

plot_colorbar_with_gradient()
#####

####モードをハイライトするプログラム####

```

```

# ライブラリをインストール
!pip install opencv-python-headless numpy
####
import cv2
import numpy as np
from google.colab.patches import cv2_imshow
from google.colab import files
import zipfile
import os

def highlight_yellow_to_green_with_transparency(image_path, output_path, alpha=0.5):
    image = cv2.imread(image_path)
    if image is None:
        raise FileNotFoundError(f"Could not read the image: {image_path}")

    hsv = cv2.cvtColor(image, cv2.COLOR_BGR2HSV)

    lower_bound = np.array([20, 50, 50])
    upper_bound = np.array([85, 255, 255])

    mask = cv2.inRange(hsv, lower_bound, upper_bound)

    highlight_color = np.array([128, 128, 128], dtype=np.uint8)
    highlighted_image = image.copy()

    highlighted_image[mask > 0] = (
        (1 - alpha) * image[mask > 0] + alpha * highlight_color
    ).astype(np.uint8)

    cv2.imwrite(output_path, highlighted_image)

print("Upload your PNG files:")
uploaded_files = files.upload()

output_folder = "highlighted_images"
os.makedirs(output_folder, exist_ok=True)

for file_name in uploaded_files.keys():
    output_path = os.path.join(output_folder, f"highlighted_{file_name}")

```

```

highlight_yellow_to_green_with_transparency(file_name, output_path)

zip_filename = "highlighted_images.zip"
with zipfile.ZipFile(zip_filename, "w") as zipf:
    for root, _, files_in_dir in os.walk(output_folder):
        for file in files_in_dir:
            file_path = os.path.join(root, file)
            zipf.write(file_path, os.path.relpath(file_path, output_folder))

print("Download the ZIP file:")
files.download(zip_filename)

```

第2節 第二章の実験で用いたホワイトノイズを生成する際のソースコード

このコードを書くに当たって、Python のオフィシャル HP^{[4][5]}, numpy のオフィシャル HP^[6], Matplotlib^[7]のオフィシャル HP を参考にした。

```

!pip install numpy

import numpy as np
import wave

def generate_white_noise(duration, sampling_rate, amplitude=0.5):
    num_samples = int(duration * sampling_rate)
    white_noise = amplitude * np.random.uniform(-1.0, 1.0, num_samples)
    return white_noise

def save_wav_file(file_path, data, sampling_rate):
    with wave.open(file_path, 'w') as wav_file:
        wav_file.setnchannels(1)
        wav_file.setsampwidth(2)
        wav_file.setframerate(sampling_rate)
        wav_file.writeframes(data.tobytes())

duration = 30
sampling_rate = 44100

```

```
white_noise = generate_white_noise(duration, sampling_rate)
save_wav_file('white_noise.wav', white_noise, sampling_rate)
```

第 3 節 第三章の実験で用いた正弦波を生成するソースコード

このコードを書くに当たって、Python のオフィシャル HP^{[4][5]}, numpy のオフィシャル HP^[6], Matplotlib^[7]のオフィシャル HP を参考にした。

```
import numpy as np
import wave
import math

def generate_sine_wave(frequency, duration, sampling_rate, amplitude=0.5):
    num_samples = int(duration * sampling_rate)
    time = np.arange(num_samples) / float(sampling_rate)
    sine_wave = amplitude * np.sin(2 * np.pi * frequency * time)
    return sine_wave

def save_wav_file(file_path, data, sampling_rate):
    with wave.open(file_path, 'w') as wav_file:
        wav_file.setnchannels(1) # Mono audio
        wav_file.setsampwidth(2) # 16-bit audio
        wav_file.setframerate(sampling_rate)
        wav_file.writeframes(data.tobytes())

min_frequency = 100
max_frequency = 20000
frequency_step = 100
duration = 1
sampling_rate = 44100

for frequency in range(min_frequency, max_frequency + 1, frequency_step):
    sine_wave = generate_sine_wave(frequency, duration, sampling_rate)
    file_path = f'sine_wave_{frequency}Hz.wav'
    save_wav_file(file_path, sine_wave, sampling_rate)

!zip -r /content/download.zip /content #content
from google.colab import files
files.download("/content/download.zip")
```

参考文献

- 網代景介, 岡田知之, 『打楽器事典』 音楽之友社(1994)
- 伊藤健一, 『デシベルのはなし』 日刊工業新聞社(1990), 2p
- 北村俊樹, 太鼓の膜の固有振動
<https://www.youtube.com/watch?v=Nn0PwH39vzM> (2023.12.19 閲覧).
- Grenander Ulf, 『Probability and Statistics』, Almqvist & Wiksell, 1959, p.316
- 鮫島俊哉 & 荒木陽三 『膜鳴楽器の発音メカニズムの解明と応用』 日本音響学会誌, 75(2), 64-72 (2019)
- SHURE, マイクロホン・ガイドブック あなたのマイク選び・使い方に役立つ
<https://www.shure.com/ja-JP/go/micbook/sp/>(2024.1.1 閲覧)
- 只野裕一 『有限要素法の原理』 Bulletin of the JSTP, 4(37), 41-45 (2021)
- 戸川隼人, 『有限要素法へのガイド』, サイエンス社, 1993
- Python Software Foundation
<https://docs.python.org/3/library/wave.html> (2023.12.17 閲覧)
- Python Software Foundation
<https://docs.python.org/ja/3/library/struct.html> (2023.12.17 閲覧).
- Wilkinson Philip 『図説楽器の歴史—50の名器とアイテムで知る』 原書房 (2015)
- Fletcher, Neville Horner, Rossing, Thomas D 『楽器の物理学』 丸善出版 (2021)
- Matplotlib 開発チーム
https://matplotlib.org/3.5.3/api/_as_gen/matplotlib.pyplot.html (2023.12.17 閲覧).
- Numpy 運営委員会
<https://numpy.org/doc/stable/reference/generated/numpy.sin.html> (2023.12.17 閲覧).
- 西尾雅明, 井研治 『和太鼓の振動分析』 愛知工業大学研究報告.B, 34, 161-168 (1999) 学, 1999, p.161
- GESTIS 物質データベース
<https://gestis.dguv.de/data?name=530566>