

卒業論文

超指向性スピーカーの音響特性と
超指向性音に対するエゾシカの反応調査

北海道科学大学 工学部

情報工学科

2-16-0-009

2-16-3-059

2-16-3-090

指導教員 松崎 博季

2020年(令和2年)2月

目次

第1章 緒言	1
第2章 音による鹿と車両の衝突対策について	3
2.1 音に着目した鹿対策	3
2.2 車両と鹿の衝突回避を目的とした鹿避け	3
第3章 パラメトリック・スピーカー	5
3.1 まえがき	5
3.2 超音波とは	5
3.3 超指向性音とは	5
3.4 パラメトリック・スピーカーの仕組み	6
第4章 本研究で使用した超指向性スピーカー	7
4.1 まえがき	7
4.2 使用した超指向性スピーカー	7
第5章 超指向性スピーカーの音響特性の確認	9
5.1 概要	9
5.2 実験で再生する音声	9
5.3 実験方法	9
5.4 結果と考察	10
第6章 超指向性音に対するエゾシカの反応	12
6.1 概要	12
6.2 実験で再生する音声	12
6.3 実験方法	13
6.4 結果および考察	13
第7章 超指向性スピーカーの性能調査	19
7.1 概要	19

7.2	使用したスピーカー	19
7.3	実験で再生する音声	20
7.4	実験方法	20
7.5	結果と考察	21
第 8 章	超指向性スピーカーの作製	24
8.1	実験で使用したスピーカーの問題点	24
第 9 章	結論と今後の課題	28
	参考文献	29
付 録 A	変調方法	33
A.1	概要	33
A.2	変調	33
A.3	振幅変調	33
A.4	周波数変調	34
付 録 B	使用機器の仕様	35
B.1	秋月電子パラメトリック・スピーカー実験キット	35
B.2	秋月電子パラメトリック・スピーカー増設キット	36
B.3	Raspberry pi Zero WH	36
B.4	JustBoom Amp pHat for Raspberry pi Zero	37
B.5	Raspberry pi 3 Model B	38
B.6	JustBoom DAC HAT for the Raspberry pi	38
付 録 C	Gnuplot による音圧分布図の作成	39
C.1	Gnuplot	39
C.2	ソースコード	39
C.3	使用データ	40
付 録 D	スピーカーの製作過程	41
D.1	概要	41
D.2	筐体の設計	41
D.3	プリンターの制御	43
D.4	筐体の印刷	47

第1章 緒言

動物との衝突事故，通称ロードキルが全国的に発生している中，北海道では特にエゾシカが関わる車両事故が多発している．図 1.1 にエゾシカが関わる車両事故発生件数の推移 [1] を示す．

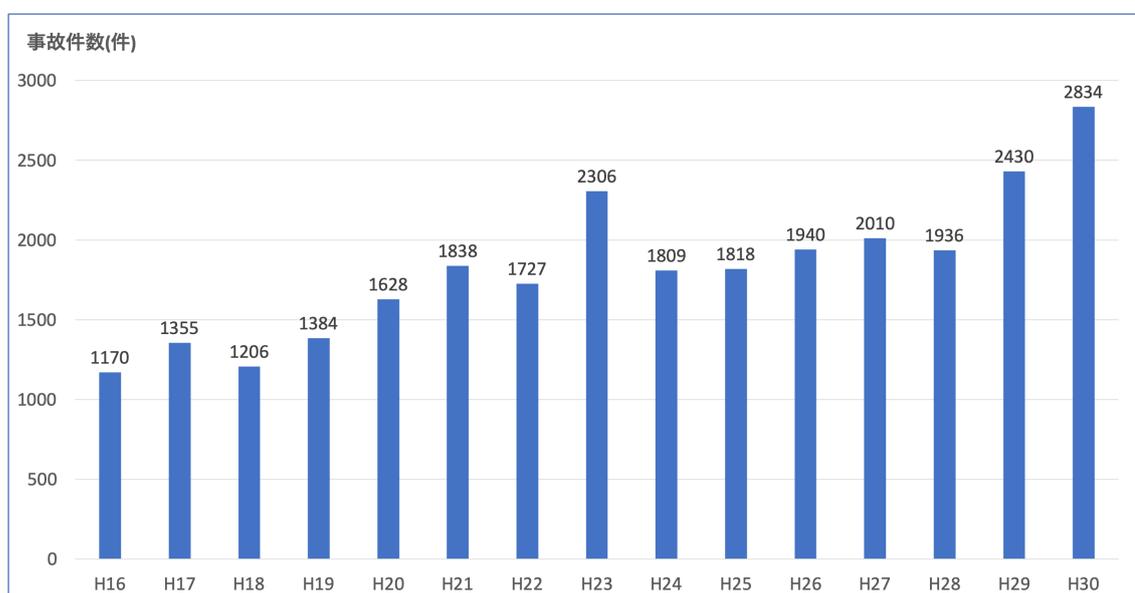


図 1.1: エゾシカが関係する車両事故発生状況 [1]

図 1.1 から，エゾシカが関わる車両事故は年々増加傾向にあり深刻な問題となっていることが分かる．エゾシカの体重は成獣の雄で 103kg～151kg，成獣の雌で 68～100kg [2] もあるため，衝突すれば車両の損壊は避けられない．動物との衝突事故は「物損事故と同等の扱い」とされるため [3]，車両保険に入っていないければ車両の損害は補償されない．また，衝突のはずみで他の物や人に当たってしまった場合，その責任はドライバーに発生する．

エゾシカと車両の衝突を未然に防ぐ方法の一つに，走行中の車両から音を発してエゾシカに聞かせ，注意を促し，エゾシカが車道に飛び出すことを防止するというものがある．音には鹿の警戒声，あるいは警戒声がある周波数成分に近い 2k～4kHz の帯域の純音などが用いられることが多い [4-7]．これらの音の一部が衝突回避に有効であると示唆する結果が示されているが，スピーカーのそばでの音量が 70～100dB に達するため，車両走行中にこ

これらの音を常時発した場合、騒音となる可能性がある。常時音を発しながらも騒音になりにくい音として、指向性の鋭い超指向性音が考えられる。超指向性音は音の届く範囲が極めて狭く、走行中の車両から常時発せられても受聴者に音が聞こえるのは一瞬となり、騒音となりにくいと考えられる。

本研究では、超音波の指向性を利用して超指向性音を発する超指向性スピーカーの音響特性、並びに飼育下にあるエゾシカの超指向性音に対する反応を確認する実験を行なった結果について報告する。

第2章 音による鹿と車両の衝突対策について

2.1 音に着目した鹿対策

鹿が関係する被害は車両事故だけにとどまらず，農作物の被害も挙げられる．その対策として，柵や電気柵などが用いられてきた他に，音も多く使われてきた．風流な音を奏でる「シシオドシ」は本来「鹿威し」と書かれ，音で鹿を追い払う農具である．現在ではシシオドシではなく，犬や狼の鳴き声または銃声などを大きな音で再生する機械（拡声器など）が使われている．

2.2 車両と鹿の衝突回避を目的とした鹿避け

現在，鹿による事故対策の一つとして挙げられるのが鹿避け笛である．実際に発売されている鹿避け笛を図 2.1 に示す．



図 2.1: 鹿避け笛 [8]

一般的に販売されている鹿避け笛は、時速 50km 以上の速度で走る車の前方部分に取り付けることによって、走行風を取り込み音が鳴る。発する音は超音波とされており、個人差はあるが人間にはほとんど聞こえない 16Hz~20kHz の動物のみが感じられる音波と示されている。その音により路肩に潜む鹿に注意を促し、鹿が車道に飛び出すことを防止するために使用される警笛である。

電氣的に音を発するスピーカータイプの製品も存在する。このタイプの製品は車両の走行状態に左右される事なく音を発する事ができる。AAA communications LLC 社製の Portable Deer Alert [9] は 3.5~5.5kHz の断続音を発し、その有効範囲は 1500ft (約 457m) とされている。XP3 社製の THE HORNET [10] は 4.8 ± 0.5 kHz の正弦波と 1.8kHz ~ 2.1kHz の音を発し、その有効範囲は 700ft (約 213m) とされる。図 2.2 に示す T.M.WORKS 社の鹿ソニック [11] は日本製としては初と考えられる鹿避け対策品である。本製品は 20kHz から 30kHz の高周波音 (超音波) 35 パターンをランダムに照射し、その照射距離は 50m~70m とされている。



図 2.2: 鹿ソニック

第3章 パラメトリック・スピーカー

3.1 まえがき

本章では、超音波および超音波を利用した超指向性音について説明した後、パラメトリック・スピーカーの仕組みについて記述する。

3.2 超音波とは

超音波とは一般に 20kHz を超える「人間の耳には聞こえない音」とされている。人は 300Hz ~ 4kHz の周波数を声として発し、可聴音はそれより幅広く、20Hz ~ 20kHz の周波数と言われている。超音波は気体、液体、個体などの媒体中を伝搬するが、真空中では伝わらない。減衰しやすい性質を持っており、周波数が高くなるほど短い距離にしか届かない。この性質は媒体によっても変化する。また、周波数が高くなるほど指向性が鋭くなるため、可聴音よりも音の伝わる範囲が狭くなる性質を持つ [12]。

3.3 超指向性音とは

超指向性音とは、極めて狭い（指向性が鋭い）範囲にのみ届く音の事である。超指向性音を作り出す方法としては、平面波を発する平面スピーカーを使用する方法と、3.2 節で述べた超音波の指向性を利用して、可聴音で振幅変調（AM）された強力な超音波の自己復調を利用する方法である。この方式はパラメトリック・スピーカーと呼ばれる。各スピーカーに、音の大きさやタイミング、周波数など、それぞれ異なる指示を与えて一斉に出力することによって、ある方向には音が強く聞こえ、ある方向には弱く聞こえるなど、音をコントロールする事ができる [13]。

3.4 パラメトリック・スピーカーの仕組み

パラメトリック・スピーカーとは、超音波をキャリア波として利用することで可聴音を特定の領域のみに伝達可能な音響再生デバイスである。超音波をキャリア波とする振幅変調波を放射することで超指向性を実現し、大音圧で放射された振幅変調波は空気の非線形性により可聴音に自己復調される。復調されたことによって音を聞き取ることが出来る。実用化されているパラメトリック・スピーカーは、超音波を密に並べた構造のスピーカーであるため超音波発振子の数により音量が変化する。また、図 3.1 に示したように超指向性スピーカーからの再生音は壁などに反射すると、反射音は再生音と同様に鋭い指向性を有し、その音像は反射位置に定位する特徴を持つ [15]。

なお本研究で用いたパラメトリック・スピーカー実験キット [14] では、超音波搬送波は超音波発振子で発信され、低周波音声で超音波搬送を周波数変調 (FM) して送出している。この超音波発振子は入力された信号の周波数が 40kHz の時に最も振幅が大きくなり、40kHz から離れるほど振幅が小さくなる特性を持っている。そのため超音波発振子から放射される信号は周波数によって振幅の大きさが変化する [16]。すなわち AM されるので、FM した場合でも上記で述べたように空気の非線形性により可聴音に自己復調される (変調方法については付録 A を参照)。

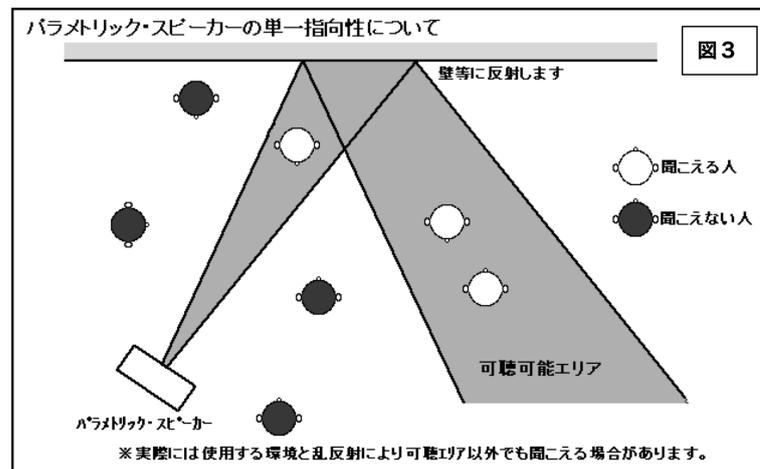


図 3.1: スピーカーの単一指向性について [14]

第4章 本研究で使用した超指向性スピーカー

4.1 まえがき

本章では、実験で使用した超指向性スピーカーについて記述する。

4.2 使用した超指向性スピーカー

超指向性音の生成には秋月電子通商が販売する有限会社トライステート製のパラメトリック・スピーカー実験キット [14]，および超音波発振子を増設する専用の増設キット [17] を用いた。このキットでは，入力音声信号の FM および増幅処理が電子回路で行われ，処理後の信号が 50 個の超音波発振子（SPL Limited 製 UT1007-Z325R，中心周波数 $40\text{kHz} \pm 1\text{kHz}$ ）群を通して放射される。本研究では，これらのキットを利用した以下の 2 つの超指向性スピーカーを用いた。

- 増設キットの超音波発振子群のみを用い，音声の再生および増幅には小型コンピューターの Raspberry Pi Zero とその OS の Volumio2，さらに増幅回路の JustBoom Amp and DAC Zero pHAT for Raspberry Pi Zero を用いた，図 4.1 に示す超音波発振子が 50 個のスピーカー（以降，SW と略記）。
- 実験キットに増設キットを用いた，図 4.2 に示す超音波発振子を 2 倍の 100 個にしたスピーカー（以降，HW と略記）。

両スピーカー共に 3D プリンターで作成された筐体に上記の機器が収納されている。HW で音声を再生する際には，上記で述べたように電子回路が導入されているためハードウェアと有線接続する必要がある。SW には入力信号を変調する回路がないため，あらかじめ変調された音声信号を使用する必要がある。Volumio2 には，Raspberry Pi を Wi-Fi のアクセスポイント化する機能があるため，Wi-Fi 接続可能な外部端末から Raspberry Pi 上の音声ファイルを遠隔から操作が可能である（各機器の仕様については付録 B を参照）。

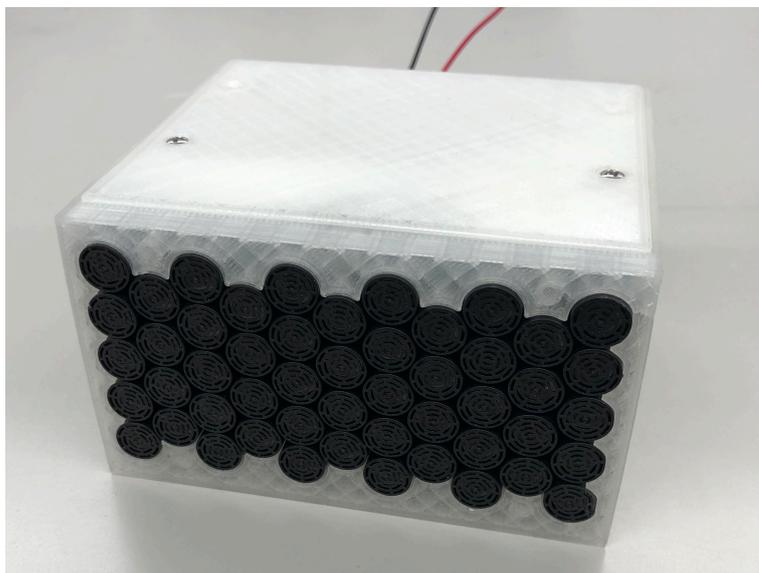


図 4.1: 超音波発振子 50 個の超指向性スピーカー

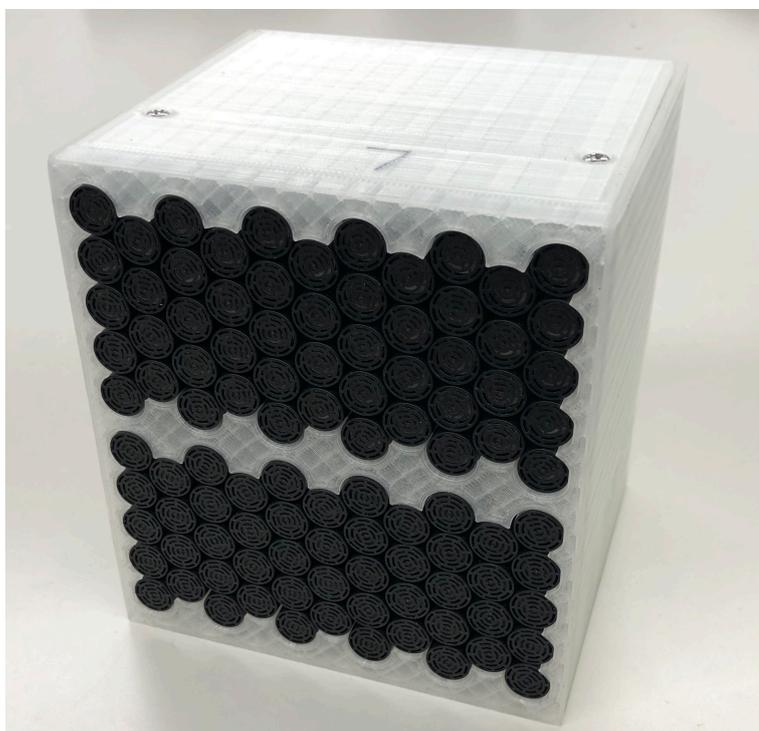


図 4.2: 超音波発振子 100 個の超指向性スピーカー

第5章 超指向性スピーカーの音響特性の確認

5.1 概要

本章では超指向性スピーカーが発する超指向性音の周波数特性，並びに全高調波歪+ノイズを調べた結果について報告する。

5.2 実験で再生する音声

実験用の音声信号には 500Hz および 1~10kHz まで 1kHz おきの正弦波を用いた。これらの音声ファイルの振幅はいずれも最大とした。HW から発せられる音が聴感上，割れたと感じる前後の PC (MacBook Pro) で設定可能な三つの音量（小さい方から HW1, HW2, HW3 とする）の信号を PC で再生しそのヘッドフォン出力から HW に入力した。SW においては，搬送波としての 40kHz の正弦波を上記の音声信号で 0.2 から 2.0 まで 0.2 毎の変調指数 (mi) により FM した音声ファイル，および AM した音声ファイルを Raspberry Pi に転送し，Volumio 2 で音量を最大にして再生した。

5.3 実験方法

音響測定を北海道科学大学 E 棟 E401 講義室 (260 名収容) で実施した。音声録音にはショットガンマイク ZOOM SGH-6 を装着したハンディレコーダー ZOOM H6 を使用した。スピーカーとレコーダーをそれぞれ床面から約 1.5m の位置になるように三脚に取り付けた。スピーカーとレコーダー間の距離を約 9m とした。録音音声ファイル形式は，標本化周波数が 48 kHz，量子化ビット数が 16 のリニア PCM の WAV である。再生する音声ファイルを変えながら，同様の実験を繰り返した。スピーカーの種類を変えた場合でも実験方法は変わらない。

5.4 結果と考察

各録音音声ファイルから Wavespectra [18] (Flaptop 窓, 4096 点 FFT) を使用して求めた振幅および全高調波歪+ノイズ (THD+N) をそれぞれ図 5.1 および図 5.2 に示す. スピーカーや変調方法によらず 3kHz 未満および 9kHz 以上で振幅が低い. HW を除いてそれらの周波数帯域で THD+N の値が大きくこれらの帯域においては, 入力された周波数以外の音が発生, すなわち歪んで聞こえてしまう可能性が高くなる. FM の m_i が大きくなるに従って振幅および THD+N は大きくなる傾向があるが, m_i が 1.0 を超えると振幅は小さく, また THD+N は急激に大きくなる. 以上より, FM の場合, m_i の設定値は同程度の音量であれば歪みが少ない 1.0 が適していると考えられる. AM の振幅は m_i が 1.0 の FM よりも 2kHz 以下では大きくそれ以上はほぼ同じか小さい. THD+N は 9kHz 以上を除けば全体的に小さい傾向にある. HW においては入力信号が大きいほど, その振幅は大きい, THD+N が特に 4kHz 以下で非常に大きくなってしまっている. 歪むことを考えると入力信号の音量は HW1 が適切と考えられる. なお, HW は SW よりも超音波発振子の数が 2 倍になっているため, SW よりも振幅が大きい. 以降の実験において, SW では m_i が 1 の FM を使用する.

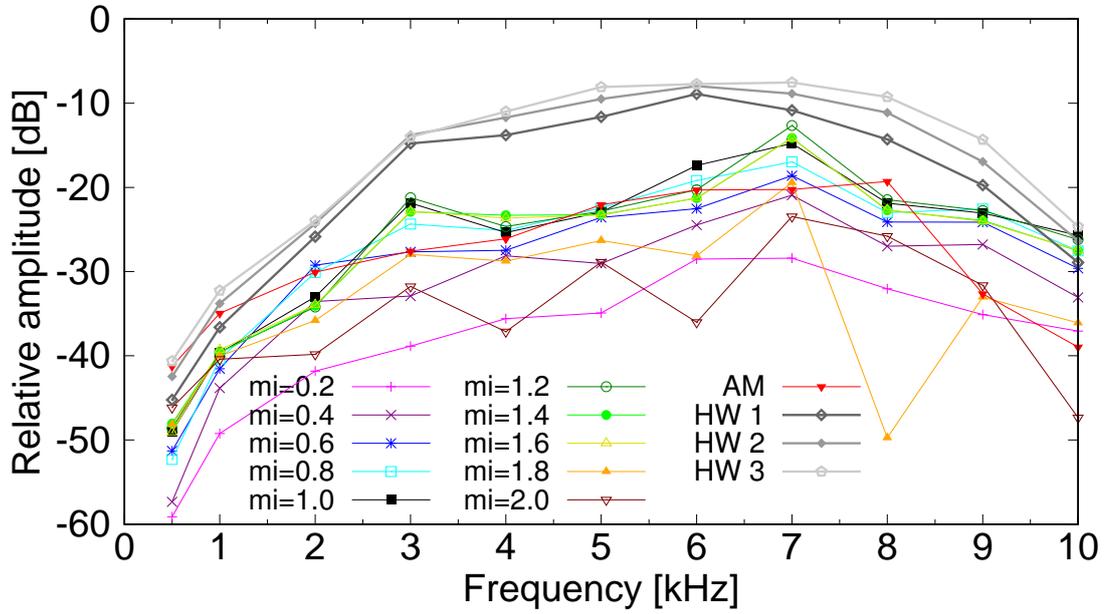


図 5.1: 各音声信号の周波数の振幅

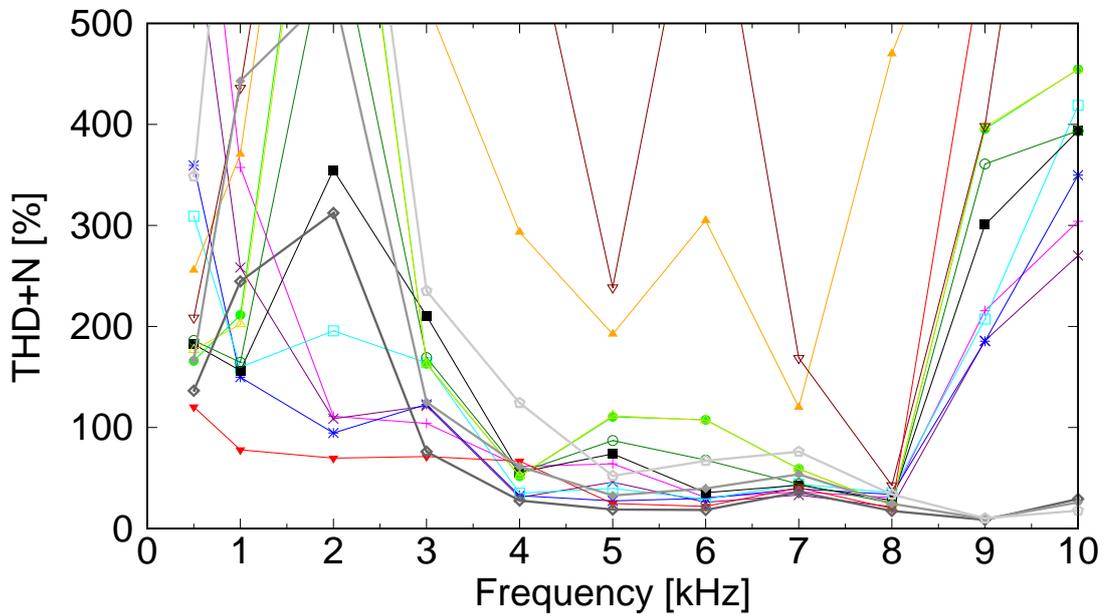


図 5.2: 各音声信号の全高調波歪+ノイズ (THD+N)

第6章 超指向性音に対するエゾシカの反応

6.1 概要

超指向性スピーカーから発せられた超指向性音に対するエゾシカの反応の様子を確認する実験を2019年9月18日～20日の期間に、北海道西興部村鹿牧場 [19] で実施した。この鹿牧場は高さ2～3mのフェンスで囲まれた約7haの草地や沢から成り、30頭以上のエゾシカが放牧されている。給餌場所が2箇所設けられており、訪問者も自由に餌を与えることができるようになっている。

6.2 実験で再生する音声

9月18日および19日に使用した音声は以下の通りである。

- 40kHzの正弦波
- 鹿が警戒した際に発する独特な警戒声 [20]
- 枯れ草を踏む音 [21,22]
- 3.5kHzの正弦波の断続音 [7]
- 正弦波が0.3秒で100Hzから5kHzにリニアに変化するスイープ信号

9月20日に使用した音声は以下の通りである。

- ヒグマの鳴き声 [23]
- 雷の音 [24]

各音声は30秒以内で繰り返し再生されるようにした。熊の鳴き声および雷の音は2日目の実験が終わってから追加した音声ファイルである。19日の実験最中に雷が鳴った際に、エゾシカが1列になって走り回っていたことから雷の音を追加した。また、エゾシカの天敵と考えられるヒグマの鳴き声も加えた。

6.3 実験方法

北海道西興部村鹿牧場で実施した実験の手順は以下の通りである。

1. 鹿を集める場所を決め、ビデオカメラ2台（Panasonic HDC-TM300 および Canon EOS M100）とスピーカーを設置する。
2. 騒音計を利用し環境騒音を調べる。
3. スピーカーとスマートフォンを無線接続し、スマートフォンで Volumio2 の音量設定を最大の 100 にする。
4. 餌を利用してフェンス沿いにエゾシカを呼び寄せる。
5. エゾシカが集まり餌に夢中になったところで、ビデオカメラ2台で録画を開始する。
6. 実験者はエゾシカから見えないような状況にする。
7. ビデオカメラの撮影開始20秒後にスマートフォンから音声を再生する。
8. 音声の再生が終わり次第録画を止める。

エゾシカの警戒心を解くため、また音に対する慣れの防止のために実験と実験の間を20～30分空けながら、音声ファイルを変え同様の方法で実験を繰り返した。実験手順6で撮影開始20秒後に音声を再生するようにしたのは、録画された映像に超指向性音が記録されなかった時の音声再生開始時間が分からなくなることを防ぐため、また撮影者がエゾシカから見えない位置に移動する時間を確保するためである。ただし、エゾシカの群れの状態や来園者、天候などの要因により、実験は全て同じ条件では行われていない。

6.4 結果および考察

本研究では音声再生5秒前時点で通常行動 [6] にあるエゾシカが、音声再生5秒以内にスピーカーへの注目 [6] が確実と判断できない場合は無反応とすることにした。この判定方法に基づく、初日および二日目に使用した音声に対するエゾシカの反応の割合を表6.1に示す。カッコ内の左の数値は反応したと判定した。右の数値は判定対象となったエゾシカの頭数である。網掛けされたセルは、9月18日の場合はフェンス内の実験、9月19日の場合はHWを使用した実験であることを表す。

表 6.1: 初日と二日目の音声に対するエゾシカの反応

	9月18日			9月19日				
	1回目	2回目	3回目	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目
40kHz	0%(0/5)	0%(0/21)	0%(0/19)	0%(0/8)	0%(0/7)	0%(0/9)		
鹿の警戒声	40%(2/5)	36%(4/11)		0%(0/12)	0%(0/9)	33%(3/9)	10%(1/10)	84%(11/13)
枯れ草を踏む音	70%(7/10)	0%(0/17)	8%(2/25)	0%(0/12)	0%(0/8)	50%(2/4)		
3.5kHz	0%(0/13)	0%(0/20)		6%(1/15)	0%(0/2)			
100~5kHzのスweep音	0%(0/22)			11%(1/9)				

初日は晴天、環境騒音は33dBであった。SWを使い一定の場所からの撮影ではなく、様々な画角で撮影を行なった。鹿牧場に大量のジャガイモの提供があり、フェンス内にばら撒かれたので、フェンス内に入場して実験を行った。この際、スピーカーをエゾシカから最短約5mの距離に配置した。ただし、エゾシカから人が見えている状況で実験を行なった。図6.1は、フェンス内で実験を行なった際の様子である。40kHzの正弦波の連続音は、初回5頭、2回目21頭、3回目19頭とフェンス内外関係なく全て無反応であった。人にも聞こえない超音波であるためエゾシカにも聞こえていない可能性が高い。鹿の警戒声は、初回は5頭中2頭、2回目は11頭中4頭が反応を示した。音に対する慣れはなく安定した結果を得られた。枯れ草を踏む音は、初回は10頭中7頭反応を示した。2回目は17頭全て無反応、3回目は25頭中2頭反応した。フェンス内で行った2回目に全く反応が見られなかった理由としては、フェンス外で作業していた管理人の方にエゾシカの意識が向かっていたためであると考えられる。3回目は音に対して慣れが生じ反応が薄くなったと判断した。3.5kHzの正弦波の連続音、100Hz~5kHzのスweep音に対してエゾシカは無反応であった。この結果が得られた理由としては、音量が足りていなかった、もしくはエゾシカが警戒する音声では無かったと考えられる。

2日目は雨天、環境騒音は46dBであった。初日と同じ音声ファイルを使用してフェンス外のみで実験を行なった。撮影方法は確立し一定の場所からの撮影を行なった。図6.2は、フェンス外で実験を行なった際の様子である。鹿の警戒声においては、初回12頭、2回目9頭と無反応であった。3回目は9頭中3頭、4回目は10頭中1頭が反応を示した。図6.3に示すように5回目は13頭中11頭の反応が見られ、約80m離れた位置にいた個体も反応し、うち1頭は逃走するような行動をとった。5回目に反応を大きく示した理由は、SWでは風が原因で生じる環境騒音により超指向性音が打ち消されてしまっていたためだと考えられる。HWであれば環境騒音の影響を大きく受けづらい。試行回数が多かった鹿の警戒声に対して音慣れする事はなかった。エゾシカに効果的な音声だと判断できる。枯れ草を踏む音においても、初回12頭、2回目8頭と反応がなかったが、3回目に4頭中2頭が反応した。3回目に反応があった理由は鹿の警戒声の実験時と同じだ。100Hz~5kHzのスweep音に

は9頭中1頭が反応した。SWで再生した音声に反応を示すエゾシカは少ない。時間の関係上、HWのスピーカーで実験を行う事ができなかった。エゾシカに効果的である音声と判断するには追加で実験する必要がある。3.5kHzの正弦波の連続音、40kHzの正弦波の連続音は、スピーカの種類を変えても反応が乏しかったため、エゾシカが警戒する音声では無いと判断した。

3日目は晴天、環境騒音は40dBであった。最終日は実験に使える時間が短く試行回数に限られてしまうため、2日目の実験終了後に追加したヒグマの鳴き声と雷の音のみでフェンス外から実験を行なった。前日の結果を踏まえ初めからHWのスピーカーを用いた。本実験の2回目は時間の関係から1回目から10分程度後に実施された。ヒグマの鳴き声においては、図6.4に示すように初回に18頭中10頭が反応を示したが、2回目は15頭全てが無反応だった。2回目に全く反応を示さなかった要因として、実験間の時間間隔が短くエゾシカが音に慣れてしまっていた、あるいは給餌開始直後の実験だったため、餌を食べることにエゾシカの意識が集中してしまっていたことが考えられる。この要因を明らかにするために、今後さらに実験を行いたいと考える。雷の音においては、図6.5に示すように初回は20頭中13頭、2回目は17頭中4が反応を示した。音に慣れてしまったために反応が薄くなったと考えられる。

本実験により鹿の警戒声とヒグマの鳴き声、雷の音の3種類は効果が見込めると判明した。ただし、上記の検証結果は全て、我々独自の基準を設けて作成したものである。音声が続いている30秒間で反応を示している個体でカウントする場合、データは変動する。あくまでも飼育下のエゾシカの反応であるため、音声に対する野生のエゾシカの反応は違う可能性が高い。実際に運用する際、鹿の反応が遅ければ衝突回避の役割を果たさない、という側面も考慮して更なる実験が必要である。



図 6.1: フェンス内での実験の様子



図 6.2: フェンス外での実験の様子



図 6.3: 19日の5回目の鹿の警戒声に反応したエゾシカの様子



図 6.4: 20日の初回のヒグマの鳴き声に反応したエゾシカの様子



図 6.5: 20日の初回の雷の音に反応したエゾシカの様子

第7章 超指向性スピーカーの性能調査

7.1 概要

超指向性音に対するエゾシカの反応調査において、SW では環境騒音によってエゾシカを反応させるのに十分な音量が得られない結果となった。そこで超指向性スピーカーの音の到達範囲を確認する実験を行った。

7.2 使用したスピーカー

実験で使用したスピーカーを図 7.1 に示す。

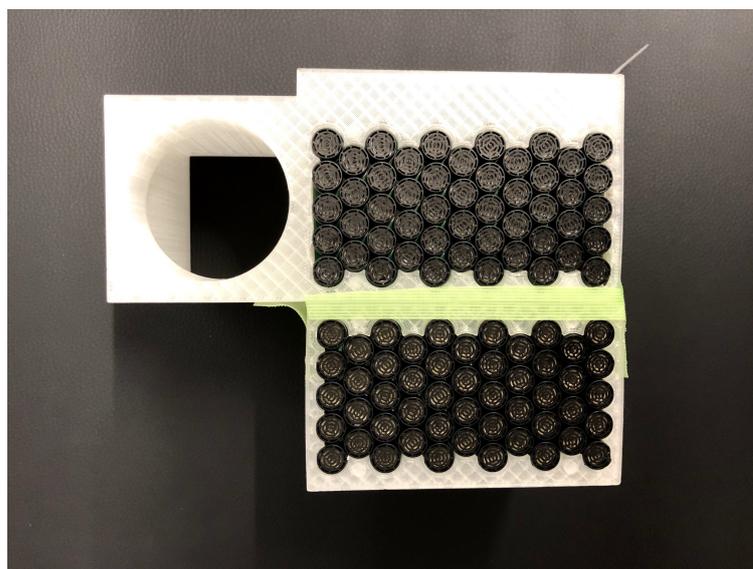


図 7.1: SW を連結して超音波発振子の 100 個にした超指向性スピーカー

本実験で使用したスピーカーは SW と予備の SW を連結して超音波発振子の数を 2 倍の 100 個にしたものである。1つのスピーカーで、超音波発振子が 50 個と 100 個の使い分けが可能になる。

7.3 実験で再生する音声

利用しているスピーカーが再生できる周波数帯は 400Hz～5kHz 程度であることが分かっている [14]。それを前提として以下の音声を使用した。

- 500Hz の正弦波
- 1kHz の正弦波
- 3.5kHz の正弦波
- 10kHz の正弦波

全ての音声ファイルで、超音波発振子が 50 個と 100 個の 2 パターンを測定した。

7.4 実験方法

北海道科学大学 E 棟および F 棟前広場で行った、スピーカーから出力される音と距離の関係を調査する実験方法を以下に示す。

1. ショットガンマイク ZOOM SGH-6 を装着したハンディレコーダー ZOOM H6 と騒音計をスピーカーから 7.5m 離れた位置に設置する。
2. スマートフォンとスピーカーを無線接続し、スマートフォンで Volumio2 の音量設定を最大音量の 100 にする。
3. 騒音計で環境騒音の値を調べる。
4. スマートフォンで音声を再生し、レコーダーで録音を開始する。騒音計もレコーダーの横に設置し音量の変化を調べる。
5. 音声の再生が終了後、録音を止め騒音計の測定値を確認する。

スピーカーから前方に 7.5m, 15m, 30m, 60m および 100m, 横方向に 0m, 3m および 6m の 15 地点で録音を行なった。

7.5 結果と考察

録音音声ファイルから一定時間の波形を取り出して長時間平均スペクトル (LTAS) を算出し、LTAS から音声信号の正弦波の周波数成分の振幅を求め、音圧分布図を作成した (音圧分布図の作成は付録 C を参照)。各音声における音圧分布図を図 7.2~図 7.5 に示す。図右の凡例は音圧レベルを表す。図 7.2 の 500Hz および図 7.3 の 1kHz の測定においては、実験時に風が非常に強く、ショットガンマイクの風切り音対策ができていなかった事もあり、風切り音による騒音しか収録されず、正しい測定ができなかった。以下に示すのは、風の影響を大きく受けず正しく測定できた周波数に対する実験結果である。

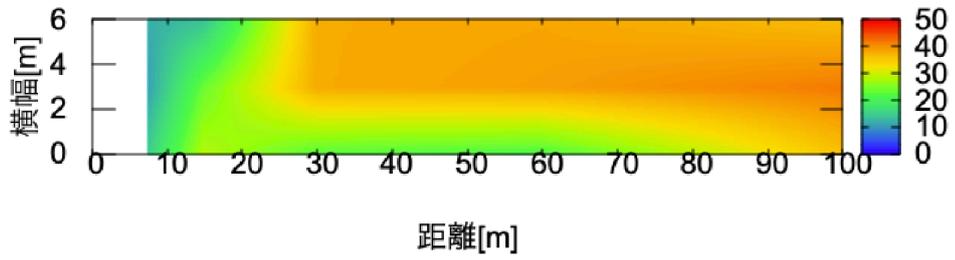
1. 3.5kHz の正弦波

図 7.4 より、近距離では指向性音が横方向にほとんど伝搬していないが、距離が離れるに従って横方向にも広がっていること、並びに距離が 60m 以上離れると音圧がかなり低下していることがわかる。

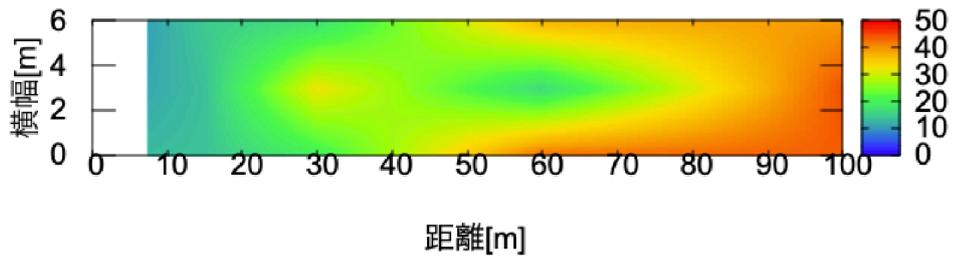
2. 10kHz の正弦波

図 7.5 より、超指向性音の分布は図 7.4 の場合とほとんど変わらないが、縦方向および横方向ともに距離が離れるに従って急激に音圧が低下していることがわかる。これは遠方にいるエゾシカにこの音が届かないことを示唆している。図 5.2 で示したようにこの周波数では歪みが非常に大きくなることも合わせて、10kHz の音は本スピーカーでは適切に再生できないと言える。

実際に超指向性スピーカーを車両に取り付けて運用する際の効率的な方法について、これらの結果を踏まえ、車両の両サイドミラーに取り付けるのが適切なのではないかと考察した。角度も車の正面ではなく路肩の方へ向けることで、茂みに潜むエゾシカにも音声を聴かせることができ、鹿の足を止められる可能性が高まる。

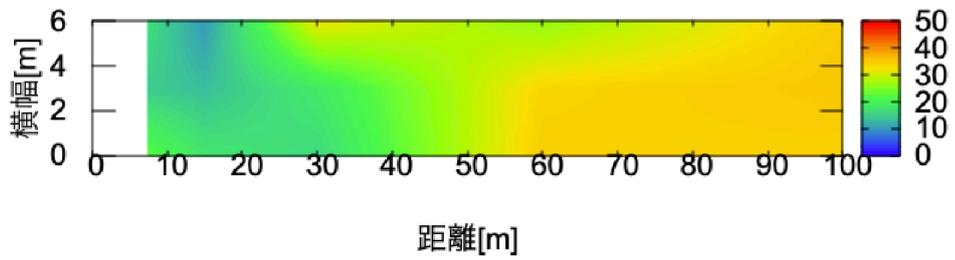


超音波発振子 50 個

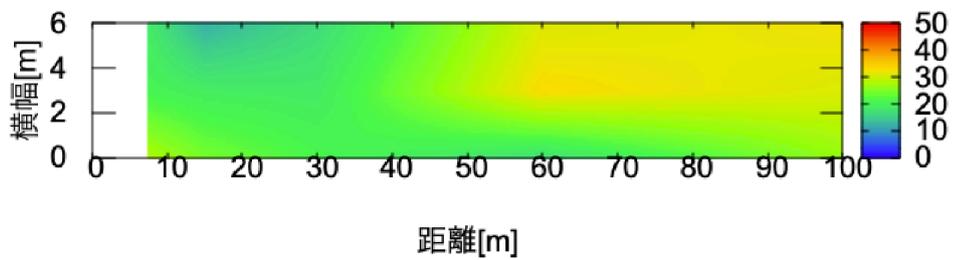


超音波発振子 100 個

図 7.2: 500Hz の正弦波の音圧分布



超音波発振子 50 個



超音波発振子 100 個

図 7.3: 1kHz の正弦波の音圧分布

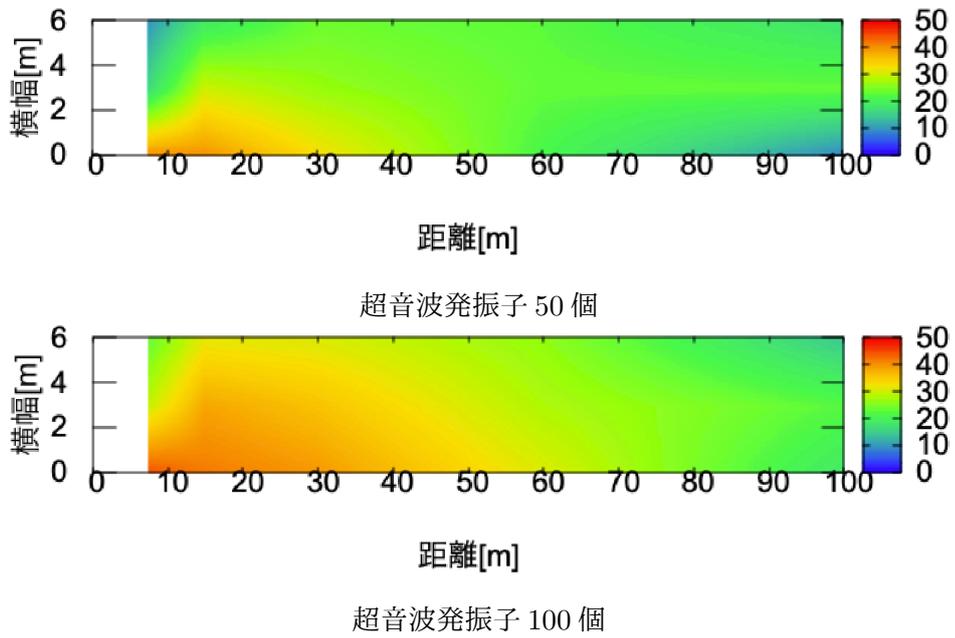


図 7.4: 3.5kHz の正弦波の音圧分布

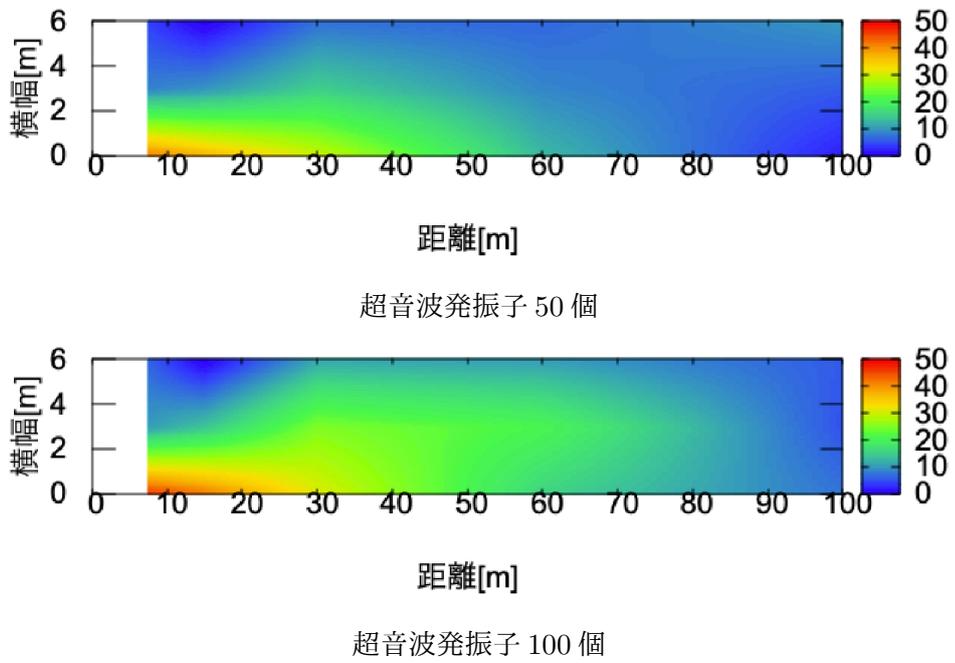


図 7.5: 10kHz の正弦波の音圧分布

第8章 超指向性スピーカーの作製

8.1 実験で使用したスピーカーの問題点

本実験で使用した HW では，秋月電子通称が販売する有限会社トライステート製のパラメトリック・スピーカー実験キット，および超音波発振子を増設する専用の増設キットを用いて100個の超音波発振子を並べた．キットの性質上，50個の超音波発振子群同士に隙間ができ，中央部の音量が小さくなるという問題があった．また，筐体に増幅回路の JustBoom Amp and DAC Zero pHAT for Raspberry Pi Zero を収納しているため本体が厚く (図 8.1 の HW の筐体の設計図参照)，実用化するにあたり小型化をしなければならなかった．

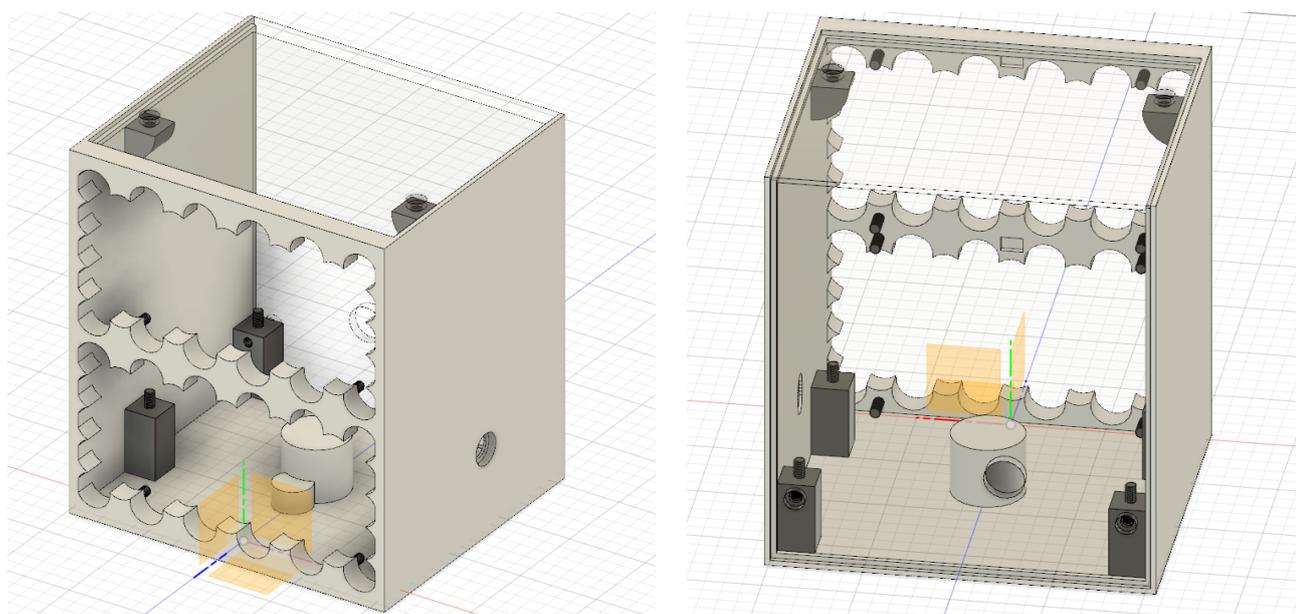


図 8.1: 実験で使用した HW の筐体

上記の問題点を踏まえ，実用化に向けて筐体の小型化をはかり，超音波発振子の同士の隙間を最小限にする超指向性スピーカーの作製を行った．

実際に設計した画像を図 8.2 に示す．

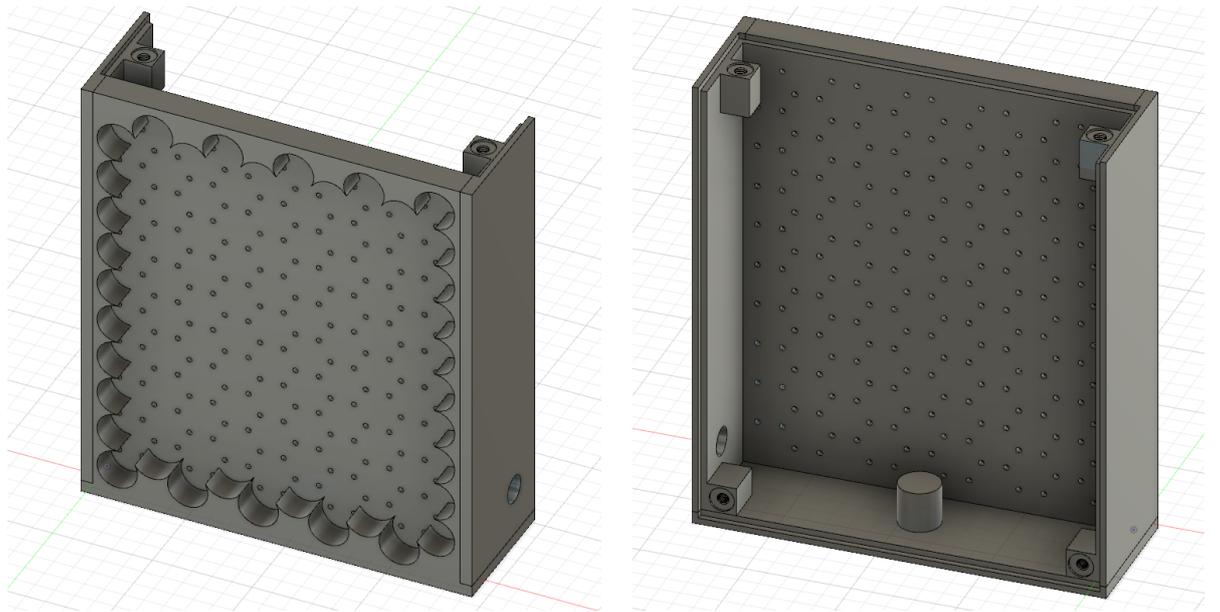


図 8.2: 100 個の超音波発振子を密集して配置し、かつ厚みを減らすように設計した超指向性スピーカーの筐体

まず、小型化をするにあたり、3D プリンターで筐体を作製した (作製過程については付録 D を参照)。Raspberry Pi Zero を筐体の外で接続することにより 91.6mm あった筐体の厚みを 33.5mm まで減らすことができた。また、共立電子産業から発売されている 4 芯スピーカーケーブル 4S6 [25] を 2m にカットしたものを使用し Raspberry Pi Zero + JustBoom Amp and DAC Zero pHAT for Raspberry Pi Zero と超音波発振子群 (図 8.3) の接続を行うこととした。

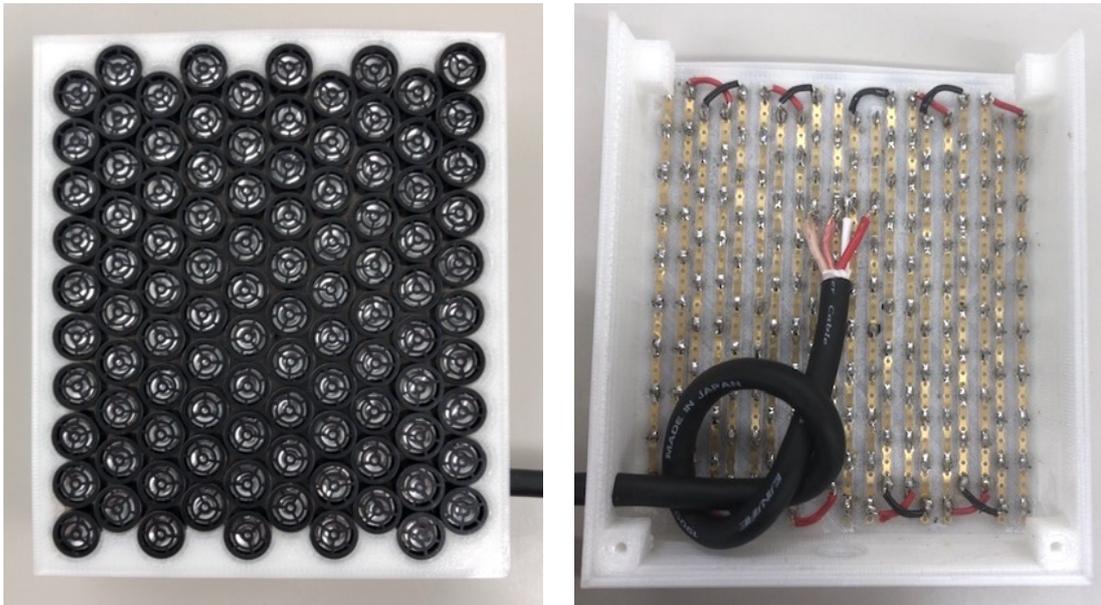


図 8.3: 完成した超指向性スピーカ

本スピーカの作製において、

1. 基板と超音波発振子同士の接続
2. わに口クリップを用いた最適な音圧の測定
3. 筐体とスピーカケーブルの接続

を行った。

図 8.3 右図では垂直方向に超音波発振子の足を並べたため、発振子の極性を考え、縦軸方向に同じ極性が並ぶように配置をした。その際 Sunhayato 製のシール基板 [26]100 個の超音波発振子を縦方向に 50 個ずつ左右に分け、超音波発振子をはんだで接続した。はんだごての温度がスピーカに使用したマテリアルの融点より高い場合、長時間接着させるとスピーカ本体が溶けてしまうため注意が必要である。同極同士となる接続されていないシール基板については、図 8.3 右図に示すように、ビニル絶縁電線 (図中の赤と黒の線) を使用して接続した。

JustBoom Amp and DAC Zero pHAT for Raspberry Pi Zero の出力は 2 チャンネルある。1 チャンネルだけで 100 個の超音波発振子群を駆動した場合と、各チャンネルで 50 個の超音波発振子群をそれぞれ駆動した場合で出力される音量に差異があるか確認したところ、各チャンネルで 50 個を駆動した方が出力音量が大きかったため、各チャンネルで 50 個を駆動することにした。スピーカケーブルには赤、白、桃、透白色のケーブルがあり、赤

と白，桃と透白色を1セットとする。それぞれ赤に近い色をプラス極，白に近い色をマイナス極側とし，片端をシール基板にはんだ付け，もう一方を JustBoom Amp and DAC Zero pHAT for Raspberry Pi Zero の出力端子に接続した。

作製したスピーカーを使用し，実際に車両に取り付け走行実験を行う予定であったが，作製や制御に時間がかかり走行実験を行うことができなかったため，今後の課題とする。

第9章 結論と今後の課題

本研究では、実際に超指向性音を発するスピーカーを用い、その性能や超指向性音の生成に適した音声信号の変調指数に加え、実際に音を聴かせた際のエゾシカの反応から見出した効果を期待できる音声データを報告した。実験結果は、超音波発振子が100個のものであれば、我々で作成可能な音声データでの超指向性音でも、エゾシカに対し警戒を促すのに有効であることを示唆するものであった。

本研究を進めるにあたり、以下の問題点が存在した。

- 実験に対する事前知識およびアクシデントへの対応力の欠如
- 知識不足に伴う、後から気づく取得データの不備

今後の研究遂行においては、以上の問題があったことを加味し、繰り返さないための十分な事前準備を行わなければならない。

特にエゾシカに対する実験の際は、様々なアクシデントが伴うことを事前に想定し、その際の対策を考え迅速かつ的確に対応する必要がある。

また、本研究の進行のためにあげられる今後の課題を以下に示す。

- 完成したスピーカーを車両に取り付けての走行実験
- 定性的かつ定量的なエゾシカに対する反応実験調査結果の取得および、より有効な音声データの模索

以上の課題を解決することに取り組み、エゾシカの足を止める事が出来る音声の発見と、その音声を汎用的に運用可能なスピーカーの実現を目指したい。

参考文献

- [1] 北海道警察ホームページ シカと車の交通事故多発！平成30年中エゾシカが関係する交通事故発生状況（道内）
https://www.police.pref.hokkaido.lg.jp/info/koutuu/sika_jiko/sika_jiko.pdf
- [2] 梶光一，宮木雅美，宇野裕之，”エゾシカの保存と管理，”北海道大学出版会 (2006).
- [3] チューリッヒ保険会社 犬や猫など動物との交通事故で自動車保険は使える？ <https://www.zurich.co.jp/car/useful/animal-traffic-accident/>
- [4] 鹿野たか嶺，野呂美紗子，柳川 久，神馬強志，”音を用いたエゾシカの交通事故対策の検討（中間報告），”第6回「野生生物と交通」研究発表会，83-88，2007.
- [5] 鹿野たか嶺，柳川 久，野呂美紗子，原文宏，神馬強志，”交通事故防止を目的としたエゾシカに対するディアホイッスルの有効性，”Wildlife Conservation Japan,12(2)，39-46，2010.
- [6] 石村知恵，鹿野たか嶺，野呂美紗子，原文宏，柚原和 敏，杉本加奈子，柳川 久，”エゾシカの警戒声を用いた交通事故防止策の試み，” 第12回「野生生物と交通」研究発表会，33-38，2013.
- [7] 松崎博季，真田博文，和田直史，“スピーカー再生された警笛音に対するエゾシカの反応調査，” 第17回「野生生物と交通」研究発表会，17-014，pp. 81-84，2018
- [8] トラベル Watch
<https://travel.watch.impress.co.jp/docs/news/751578.html>
- [9] Deer Whistle / Deer Alert
<http://www.autodeeralert.com/>

- [10] The Hornet Deer Whistle - Electronic Deer Avoidance System
<http://www.xp3hornet.com/index.shtml>
- [11] T.M.WORKS 鹿ソニック
<https://tmworks-web.jp/products/shikasonic.htm>
- [12] 本多電子株式会社 超音波の正体<超音波ってなんだろう？ >
https://www.honda-el.co.jp/hb/1_1.html
- [13] 夢ナビ 音の「聞こえ方」,「伝え方」をデザインしよう
<https://yumenavi.info/lecture.aspx?GNKCD=g007320>
- [14] 秋月電子通商 パラメトリック・スピーカー実験キット
<http://akizukidenshi.com/catalog/g/gK-02617/>
- [15] 西浦敬信, ”高臨場音場再現:パラメトリックスピーカーを用いた最新の研究動向”
https://www.jstage.jst.go.jp/article/essfr/10/1/10_57/_pdf/-char/ja
- [16] SWITCH SCIENCE MAGAZINE
http://doc.switch-science.com/mft2014/SSCI_magazine_MFT2014.pdf
- [17] 秋月電子通商 パラメトリック・スピーカー増設キット
<http://akizukidenshi.com/catalog/g/gK-02815/>
- [18] WaveSpectra
<http://efu.jp.net/soft/ws/ws.html>
- [19] 西興部村鹿牧場
<https://www.vill.nishiokoppe.lg.jp/feeub000001ul9d.html>
- [20] WoofWorks, “夜更かしはシカの特権?(シカの警戒音),”
<http://www7.big.or.jp/~woofwrks/wp/archives/575>
- [21] 松崎博季, 真田博文, 和田直史, “超音波を利用した エゾシカと車両の衝突回避に関する一考察,” 第 18 回「野生生物と交通」研究発表会, pp. 21-24, 18-004, 2019.
- [22] 松崎博季, 真田博文, 和田直史, “音によるエゾシカと車両の衝突回避における超指向性スピーカー使用に関する一考察,” 信学技報, EA2019-6, pp. 23-28, 2019.
- [23] 東京ゾーネット, 動物たちの鳴き声図鑑
<https://www.tokyo-zoo.net/cry/index.html>

- [24] 効果音ラボ, 自然・動物 [1]
<https://www.tokyo-zoo.net/cry/index.html>
- [25] 共立エレショップ 4芯スピーカケーブル / 4S6
<https://eleshop.jp/shop/g/gA6M14D/>
- [26] シール基板 ICB-062
<https://www.sunhayato.co.jp/material2/index.php/item?cell1003=ユニバーサル基板製品&cell1004=シール基板・エクステンション基板&name=シール基板%E3%80%80ICB-062&id=527&label=1>
- [27] KDDI 変調の概要
<https://www.kddi.com/yogo/通信サービス/変調.html>
- [28] セットトップボックス設計・製造.com 料無線の代表的な変調方法
<http://toa-stb.com/567.html>
- [29] 5. 振幅変調 (AM)・周波数変調 (FM) に関する実験
https://www.hakodate-ct.ac.jp/~moriya/class/5SCE_Exp/text05-1.pdf
- [30] 共立エレショップ Raspberry Pi Zero WH ヘッダーピン実装仕様
<http://eleshop.jp/shop/g/gI5L312/>
- [31] 共立エレショップ JustBoom Amp Zero pHAT for the Raspberry Pi Zero アンプボード
<http://eleshop.jp/shop/g/gH3P313/>
- [32] 共立エレショップ シングルボードコンピュータ ラズベリーパイ 3 モデル B
<http://eleshop.jp/shop/g/gGBH312/>
- [33] 共立エレショップ JustBoom DAC HAT for the Raspberry Pi DAC ボード JBM-001
<http://eleshop.jp/shop/g/gH31311/>
- [34] gnuplot ホームページ
<http://www.gnuplot.info/>
- [35] Fusion360 - オートデスク
<https://www.autodesk.co.jp/products/fusion-360/overview>

- [36] Fusion360 学生、教員向けの無料ソフトウェア オートデスク
<https://www.autodesk.co.jp/products/fusion-360/students-teachers-educators>
- [37] Simplify3D スライサーソフトウェア 日本語対応 最新版
<https://dddjapan.com/products/simplify3d>
- [38] 3D プリンターの PLA(ポリ乳酸) フィラメント完全ガイド
<https://i-maker.jp/blog/pla-filament-11486.html>
- [39] Lepton2 - MagnaRecta
<http://magnarecta.com/lepton/>
- [40] 3D プリンターのサポート材完全ガイド、注意点と対策
<https://i-maker.jp/blog/support-material-11673.html#i>
- [41] 3D プリンター トラブルシューティング④
<https://www.kyokutos.co.jp/product/semiconductors/tabid/193/Default.aspx>
- [42] ここだけは、押さえておきたい！ 3D プリンターの基礎知識
<https://cweb.canon.jp/solution/biz/trend/3dprinter01.html>
- [43] 機能性フィルム『カプトンテープ』
<https://www.kyokutos.co.jp/product/semiconductors/tabid/193/Default.aspx>

付録A 変調方法

A.1 概要

超指向性スピーカーから音声を再生する際に、変調を行なった音声ファイルを使用した。その際に用いた変調方法について述べる。

A.2 変調

変調とは、情報を表現した信号を搬送波に乗せるために、信号の振幅や周波数を変化させることで情報の通信を可能にするように変換することである。また、搬送波から元の信号を取り出すことを復調という [27]。

A.3 振幅変調

振幅変調（AM）は、図 A.1 に示したように情報（信号）を搬送波の振幅変化で伝達する変調方式である [29]。

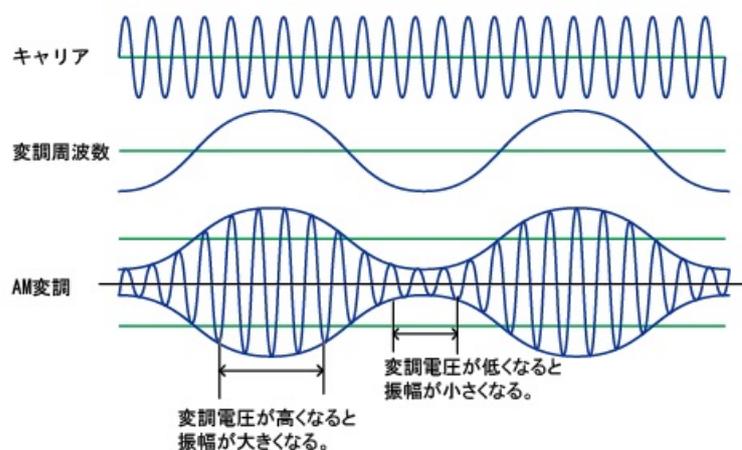


図 A.1: AM の仕組み [28]

A.4 周波数変調

周波数変調（FM）は，図 A.2 に示したように情報（信号）を搬送波の周波数の変化で伝達する変調方式である [29]．

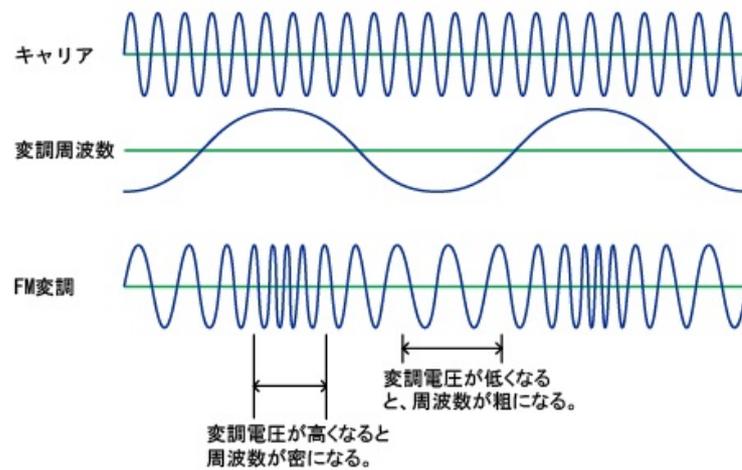


図 A.2: FM の仕組み [28]

付 録 B 使用機器の仕様

B.1 秋月電子パラメトリック・スピーカー実験キット

秋月電子パラメトリック・スピーカー実験キットの仕様表および制御基板の説明図 [14] を図 B.1 および図 B.2 に示す。

CPU	PIC16F819 20MHzクロック (周波数カウンター、超音波出力コントロール)
超音波発振子	日本セラミック製 AT40-10PB3トランスデューサー 50個パラレル接続 (100個まで可)
出力周波数	搬送波発振周波数 40.3kHzセンター ±0.1kHz
入 力	モノラル。3.5mmステレオ・ミニプラグにて入力。
変調方式	FM (周波数変調) 特許出願中
無変調時	約5秒で搬送波停止機能
使用環境条件	室 内 (屋外で使用の場合は防滴、結露対策を十分行なう)
電 源	12VDC 約300mA平均, ピーク600mA (12V/A程度の電源をご使用下さい)
基板寸法	制御基板： 98mm×65mm 1.6両面ガラススルホール基板 スピーカー基板： 98mm×55mm 1.6両面ガラススルホール基板

図 B.1: 仕様表 [14]

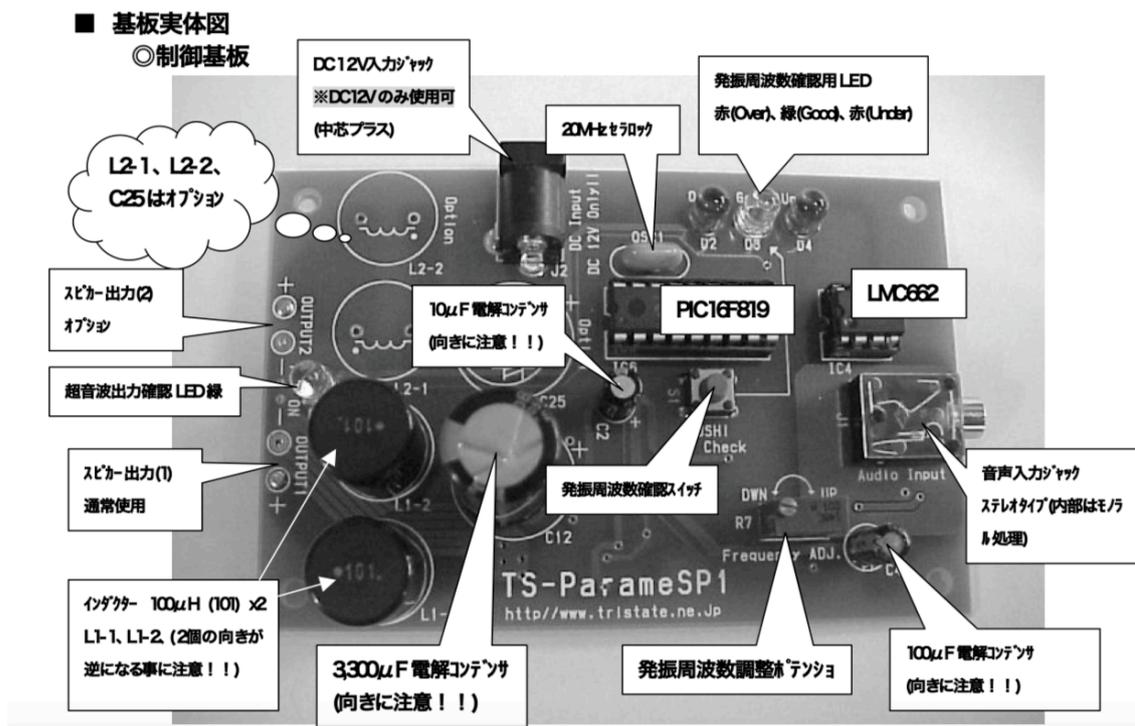


図 B.2: 制御基板の説明図 [14]

B.2 秋月電子パラメトリック・スピーカー増設キット

秋月電子パラメトリック・スピーカー増設キットの部品表 [17] を図 B.3 に示す。

専用基板 スピーカー基板	TS-ParameSP2	1 両面ガラスエポキシ・スルホール基板
超音波発振子	UT1007-Z325R	50 SPL社製

図 B.3: 部品表 [17]

B.3 Raspberry pi Zero WH

Raspberry pi Zero WH の仕様およびインターフェース [30] を以下に示す。

- SoC : Broadcom BCM2835
- CPU : 1000MHz シングルコア ARM1176JZ-F(ARMv6)
- GPU : デュアルコア VideoCore IV(R) 250MHz OpenGL ES 2.0 対応, ハードウェア OpenVG 対応, 1080p30 H.264 high-profile デコード 1G ピクセル/秒, 1.5G テクセル/秒, または 24G FLOP の性能を持つ
- メモリー : 512MB DDR2 低電圧 SDRAM
- 電源 : Micro USB B ソケット 5V 1A / 2.54mm ピンヘッダー

- サイズ：30(W) × 5(H) × 65(D)mm
- 生産国：英国

【インターフェース】

- イーサネット：なし (EDIMAX USB 2.0 Fast Ethernet Adapter 等で対応可能)
- Wi-Fi(無線 LAN)：IEEE 802.11 b/g/n 2.4GHz
- Bluetooth(低消費電力近距離無線通信)：Bluetooth 4.1, Bluetooth Low Energy(BLE)
- ビデオ出力：mini HDMI(rev.1.3, 1.4)
- オーディオ出力：mini HDMI(ビデオ出力と共有), I2S ピンヘッダー
- USB：USB 2.0(microUSB, USB OTG) × 1
- CSI(Pi カメラ専用ポート)：22 ピン MIPI 2-Lane × 1 Pi 3などで使われている 15 ピン CSI コネクタとは異なるコネクタです。Pi カメラ, NoIR カメラをご使用になる際には、専用 15-22 ピン変換ケーブルが必要となります。Pi カメラ V1, V2 の両方に対応しています。
- GPIO コネクタ：40 ピン 2.54mm ピンヘッダー実装済 GPIO × 26, 3.3V 16mA, UART, I2C, SPI, I2S, PWM, 5V(使用電源に依存) 3.3V 50mA(GPIO との総和)
- メモリーカードスロット：micro SD メモリーカード (SDIO)

B.4 JustBoom Amp pHat for Raspberry pi Zero

JustBoom Amp pHat for Raspberry pi Zero の仕様 [31] を以下に示す。

- Raspberry Pi Zero, Pi Zero Wireless 対応
- 高品質オーディオ：192kHz 32bit
- 高度な ESD 保護
- 使いやすいプラグアンドプレイ対応
- Raspberry Pi のハードウェア音量コントロール
- ハンダ付不要
- Raspberry Pi GPIO ヘッダーを搭載
- 取り付け用ハードウェア付属
- オプションの IR レシーバ付属
- Raspbian/NOOBS の完全なドライバサポート
- class-D デジタルオーディオ AMP：TAS5756
- 138mW ヘッドフォンアンプ：TPA6133A2
- 最大出力：30W(RMS)/55W(ピーク)
- 「alsamixer」や ALSA 互換アプリケーションを介して完全に統合されたハードウェア
ボリュームミキシング
- SNR：112dB
- THD：-93dB

B.5 Raspberry pi 3 Model B

Raspberry pi 3 Model B の仕様 [32] を以下に示す。

- CPU : 64bit 1.2GHz クアッドコア ARM Cortex-A53
- GPU : Broadcom VideoCore IV 3D graphics core(@ 400MHz)
- メモリ (LPDDR2) : 1GB
- Wi-Fi 802.11 b/g/n Wireless LAN
- Bluetooth(4.1/BLE) ※無線機能は日本国内に於いて使用する際に必要な技適取得済です。
- HD 1080p ビデオ出力
- コンポジットビデオ (PAL/NTSC) 出力
- ステレオオーディオ出力
- USB ポート : 4(USB2.0)
- GPIO : 40 本
- カメラインターフェイス (CSI)
- ディスプレイ インターフェイス (DSI)
- Full HDMI 1.3/1.4 ビデオ/オーディオソケット
- ϕ 3.5mm 4極オーディオ/コンポジットビデオ出力ジャックソケット
- ネットワーク : RJ45 10/100Mbps Ethernet
- ストレージ : MicroSD メモリーカード
- 電源 : 5V 2.5A

B.6 JustBoom DAC HAT for the Raspberry pi

JustBoom DAC HAT for the Raspberry pi の仕様 [33] を以下に示す。

- 高品質オーディオ : 最大 192kHz/32bit 出力 (384kHz/32bit DAC チップ搭載)
- DAC とヘッドフォンアンプ搭載
- ラインレベル (RCA) およびヘッドフォン用 ϕ 3.5mm 出力
- 使いやすいプラグアンドプレイ対応
- Raspberry Pi からハードウェア&ソフトウェアボリュームコントロール
- ハンダ付不要
- Raspberry PiGPIO ヘッダを搭載
- 対応 : Raspberry Pi A +/B +/2B/3B
- 取り付け用のハードウェアが含まれています
- オプション : 赤外線受光モジュール (付属)
- DAC HAT の上に重ねて簡単に出力増幅できる JustBoom Amp(別売) に対応※ご注意 : Amp HAT ではありません
- Raspberry Pi の全 GPIO ピンは、未使用の拡張ヘッダでアクセス可能
- HAT 完全準拠
- Raspbian でのフルドライバサポート
- OSMC/Max2Play/RuneAudio/Volumio/Moode/PiCorePlayer/PiMusicBox/OpenELEC などのメディアセンターに対応

付録C Gnuplotによる音圧分布図の作成

超指向性スピーカ―の性能調査で使―用した音圧分布図の出力に用いた Gnuplot について記述する。

C.1 Gnuplot

Gnuplot (ニュープロット) は 1986 年からサポートされ、Linux, OS/2, MS Windows, OSX, VMS, および他の多くのプラットフォーム用の移植コマンドライン駆動のグラフ作成ユーティリティである。ソースコードは著作権で保護されているが、無料で配布されている。元々はデータをインタラクティブに視覚化できるようにするために作成されたが、今では多くの非インタラクティブな使用をサポートするように成長した。ファイルへの出力も、eps, pdf, png, jpeg など様々なタイプに対応している [34]。

C.2 ソースコード

図の出力に使用した Gnuplot プログラムのソースコード、使用したデータの―一部を以下に示す。

ソースコード C.1: 音圧分布図

```
1 set pm3d //3次元プロット
2 set pm3d map // 3次元カラーマップ
3 set palette rgbformulae 22,13,-31 //カラーマップの色彩変更
4 set pm3d interpolate 25, 50 //カラーマップで補間
5 set nokey //凡例の表示設定
6 set size ratio -3 //グラフの拡大・縮小
7 set xlabel 'x[cm]' //x軸のラベル
8 set ylabel 'y[cm]' //y軸のラベル
9 set xlabel offset 0,-3 //x軸のラベルの余白設定
10 set ylabel offset -3,0 //y軸のラベルの余白設定
11 set xlabel font "Arial,20" //x軸の文字サイズ
12 set ylabel font "Arial,20" //y軸の文字サイズ
13 set xtics 10 //x軸の目盛の間隔
14 set ytics 2 //y軸の目盛の間隔
15 set tics font "Arial,20" //目盛のフォントサイズ
16 set cbrange[0:50] //カラーバーを表示する値の範囲
17 splot "lch3500.prn" with pm3d pause -1 //3次元グラフの描画
```

C.3 使用データ

ソースコード C.2: 使用データの一部

```
1 #3500Hz
2 #x y z
3 7.5 0 44.82944654
4 7.5 3 29.70699304
5 7.5 6 23.29670836
6
7 15 0 41.94190033
8 15 3 38.57177307
9 15 6 31.71748457
10
11 30 0 39.68439294
12 30 3 36.01954384
13 30 6 31.03367894
14
15 60 0 31.16097938
16 60 3 28.29713535
17 60 6 26.32186135
18
19 100 0 18.53098973
20 100 3 22.41173488
21 100 6 14.47782269
```

付録D スピーカーの製作過程

D.1 概要

スピーカーを作製するにあたって Fusion360, Simplify3D, Lepton2 を用いた。それぞれ設計, 制御をするソフトウェアと印刷をするハードウェアである。これらを使用し作製したスピーカーの製作過程について述べる。

D.2 筐体の設計

スピーカーの筐体を改良するために AUTODESK 社の Fusion360 を用いた。Fusion360 は, CAD/CAM/CAE を統合したソフトウェアであり, 設計から開発, 製造までのプロセスを単一プラットフォームで一元管理できる [35]。また, クラウドデータで動くため, ネット環境があれば場所や時間を選ばずにデータを操作できる。Fusion360 は, 学生または教職員向けに 3 年間の期限付き教育ライセンス [36] を提供しているため, これを取得することにした。

過去に Fusion360 で作製されたデータからサイズを測る際には, ねじ穴であれば対象のねじ穴を右クリックで選択し, フィーチャ編集を押下すると元のデータで作製されたねじ穴の大きさがわかる。フィーチャー編集をした時の画面を図 D.1 に示す。

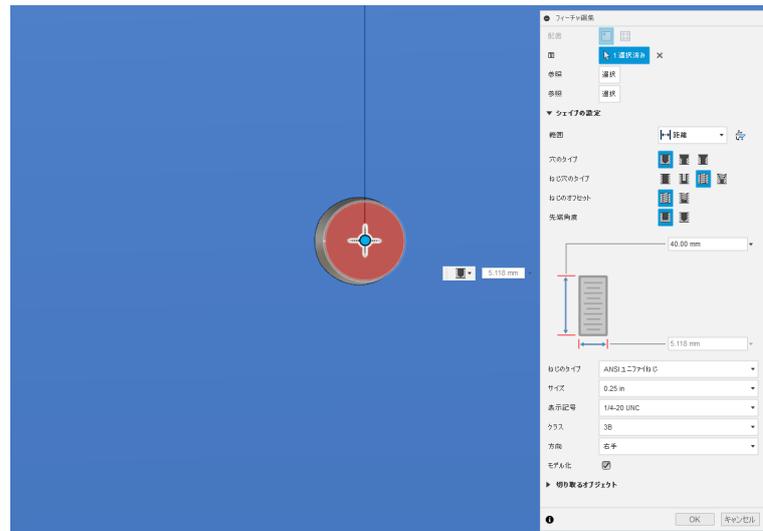


図 D.1: フィーチャ編集画面

昨年と同様に超音波発振子を基盤に取り付けるために筐体の4カ所にねじ穴を設けた。また、実験等で三脚を使用しスピーカーを固定する場合にはカメラねじを筐体の下部に作製する。カメラねじを作製する場合は、ねじコマンドで1/4インチねじを選択し、作製する。実際に1/4インチねじを作製する場合、図D.2のようになる。

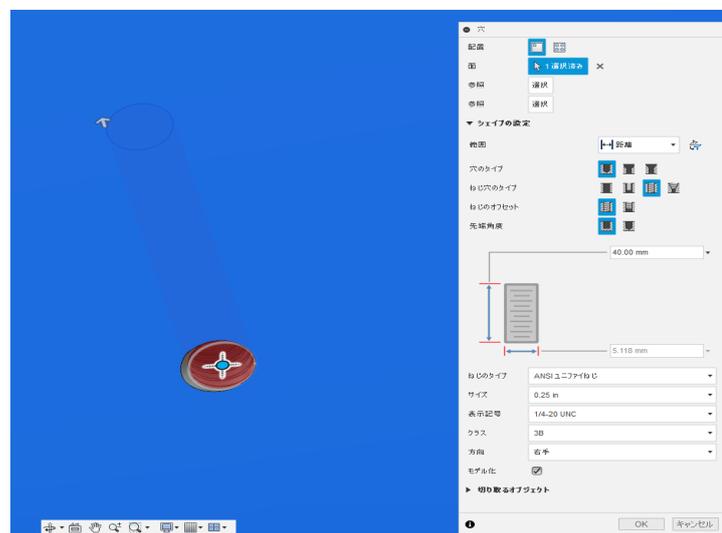


図 D.2: 1/4インチねじでモデル化した画面

ねじ穴をあける際にはモデル化にチェックを入れておくことにより、実際に出力するとねじの形に印刷される。モデル化にチェックを入れなかった場合、ねじ穴が印刷されないため必ずチェックを入れる。ねじ穴作製時にモデル化にチェックを入れた場合と入れなかった場

合とを比較すると図 D.3 のようになる。

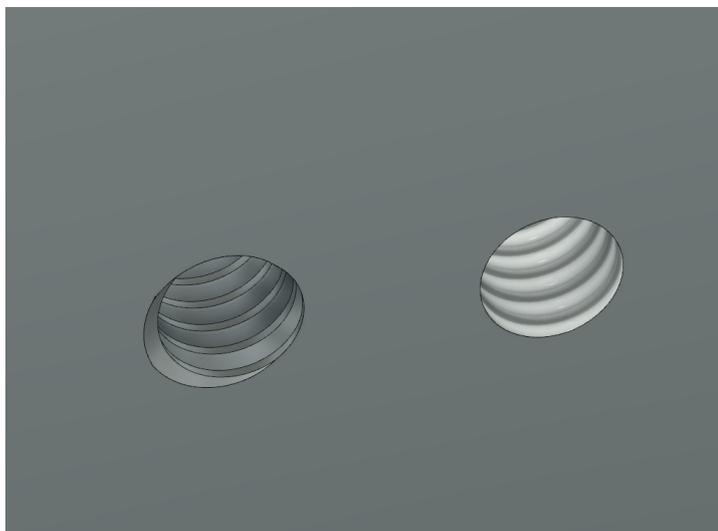


図 D.3: モデル化有とモデル化なし

実際に設計をするときには、左上にあるスケッチを作成するボタンを押下した後、その物体の面をクリックし、作製をしないとその物体の任意の点や線から図形を作れず、誤差の原因となるため注意が必要である。

D.3 プリンターの制御

今回はスライサーソフトウェアである Simplify3D を用いた。スライサーソフトとは、3D データを 3D プリンターが読めるようにする Gcode 化機能と 3D プリンター本体をコントロールするホスト機能が入っているものを指す [37]。Fusion360 で作製したデータは基本的にクラウドに保存されているため、STL ファイルに変換し、エクスポートすることで Simplify3D で 3D データを扱うことが可能になる。

印刷する際に 3D プリンターの材料の代表的なものとして PLA 樹脂と ABS 樹脂が挙げられる。これらの材料は日光の当たる場所や、湿度の高い場所で保管をすると劣化するため注意が必要である。今回は反りにくく、長いものや面積の大きく薄いもののプリントをする場合に優れている PLA 樹脂 [38] を用いた。PLA 樹脂を使用する際にはホットエンド部分に冷却用のファンを取り付けることで造形がより綺麗になる。今回は冷却用のファンが既に取り付けられていたため、そのまま使用した。しかし、夜間を含めた長時間の作業となり、周りの気温に左右されたため本体の一部が反ってしまった。周りの気温を保つために Lepton2 の追加オプションにあるアクリルカバーで周りを囲むのが最善だと考えら

れる [39]。また、樹脂によりノズルとヒートベッドの適切な温度が決められているため確認が必要である。使用したPLA樹脂は、ロールの側面に190度から240度と記載があったため、今回は220度、ヒートベッドは50から70度であるため60度に設定し、印刷した。ノズルやヒートベッドの温度を変更する場合、プロセスをダブルクリックし、編集をする。温度ボタンよりレイヤー単位の温度設定値を設定したい値に変えることで、印刷を開始を押下するとその温度に達したときに自動で印刷が開始される。しかし、実際に印刷された時の温度が最大で設定温度から13度低い値を示したため低くなることを見越して温度を高め調整するのがよい。印刷をする際にはPC(MacBook Pro)からLepton2へデータを送るためUSBを経由して印刷をした。

材料を決めた後にSimplify3Dの歯車のマークを押下し、その右側に表示される材料の自動設定を開く。他にも図D.4にあるように、Lepton2では材料としてPVA,Polyflex,PET,Polycarbonateが指定できる。

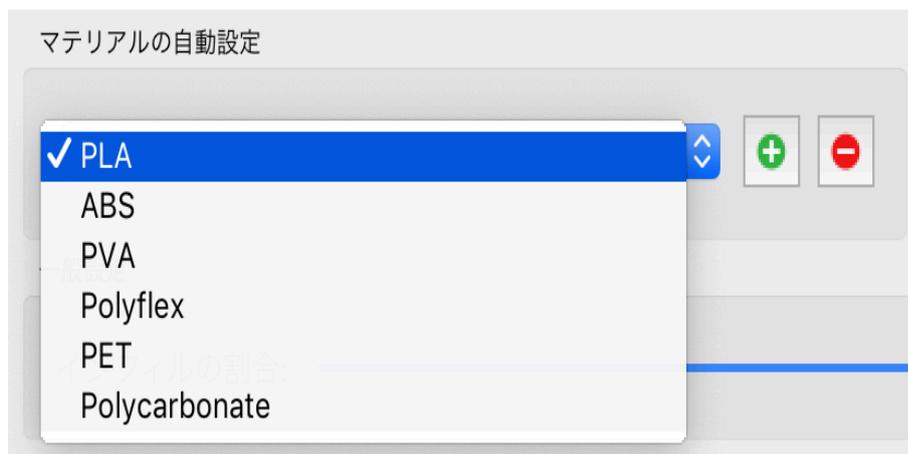


図 D.4: 材料の設定

大きな物体を印刷する際には、初期画面の右上にある移動ボタンを使用し、物体の置き場所や回転を調整する。Fusion360で作製したデータを読み込んだ後にその物体をダブルクリックすると回転の変更ができる。回転や位置を変更することにより、手前のノズル置き場にぶつかりノズルが外れることを防止できる。また、回転をするとサポート材の量を減らすことができる。しかし、今回作製するにあたり、回転角度をマイナスにして出力しようとした場合や、それぞれの軸の角度を何度も調整すると一部設計した通りの動作をしなかったため注意が必要である。サポート材の量を減らすと、印刷時間が短くなるため、サポート材が少なくなるような回転を考えることが必要である。サポート材は一般的にオーバーハングの角度が45度を超えると必要とされている [40]。Lepton2はその角度が45度であるため、

45度以上の場合にサポート材を使用することにした。同じ物体を回転させたことによる印刷時間の違いを図D.5～D.6に示す。

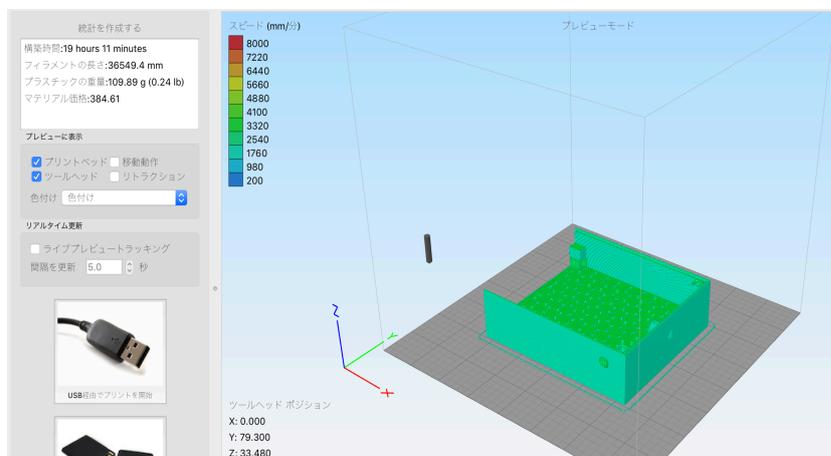


図 D.5: サポート材による時間の短縮

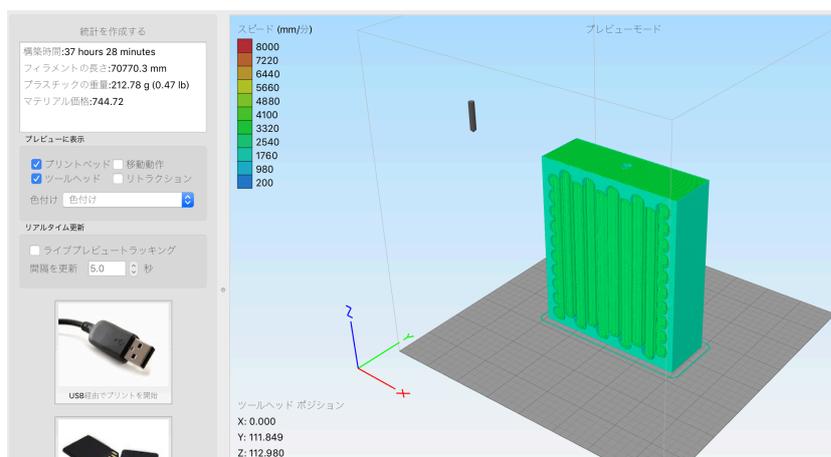


図 D.6: サポート材による時間の延長

このように物体を回転させることで最大で約18時間の差が出たことがわかる。

もし、3Dプリンターが意図しない動きをした場合やノズルから樹脂が出ないという問題が起こった場合は、作製中であっても図D.7にあるマシンコントロールパネルから「EMERGENCY STOP」ボタンを押すことで強制停止をかけることができる。特にノズルからの樹脂の出が悪い時には、エクストルーダーからフィラメントが送れているかを確認しなければならない。特にフィラメントが削れてしまいそれがエクストルーダーに付着すると送り出す力が弱くなり、空転が起こる。これが射出不足の原因となることがある [41]。

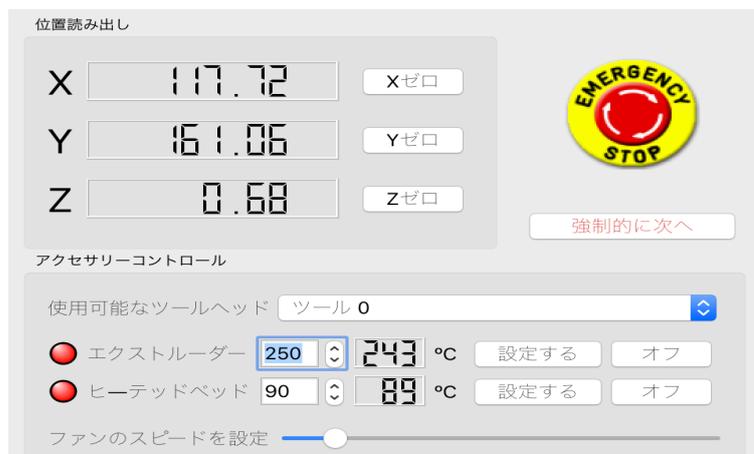


図 D.7: 強制停止画面

2つのノズルを使用し、印刷をすることができるため、Prime ExtruderにPLA樹脂、Sub Extruderにサポート材として水溶性の樹脂を使用すると作製物を水につけることでサポート材のみが外れ、より簡単に作製できる。Prime ExtruderとSub Extruderの2つノズルを使用する際の制御は画面の右下にある設定ボタンからエクストルーダーの自動設定より「Both Extruder」を選択し、その下にあるサポート材画面でサポート用エクストルーダーをSub Extruderとする。Sub Extruderの設定画面を図D.8～D.9に示す。

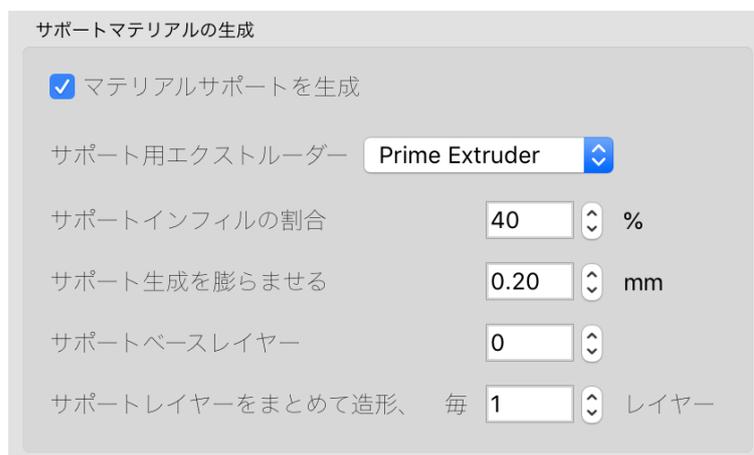


図 D.8: サポート材料の変更



図 D.9: エクストルーダーの温度変更

D.4 筐体の印刷

Fusion360で設計した筐体を出力するためにMagnaRecta社のLepton2を用いた。Lepton2は熱可塑性樹脂を熔融し、エクストルーダーから射出し、1層ずつ積層させていく熱溶解積層方式を採用している [42]。ヒートベッドにねじが3本あるため、ねじを緩めたり締めたりすることで台の傾きや高さを調整できる。ヒートベッドとエクストルーダーの間の厚みをA4用紙1枚分(約0.09mm)程度にすることで積層が綺麗になる。その厚みを測るために図D.10にあるシックネスゲージを使用した。



図 D.10: シックネスゲージ

厚みを測る際にSimplify3Dも使用する。Simplify3Dの右下にある歯車のアイコンから

ジョブコントロールを選択すると下部に X, Y, Z 軸をホームに戻すボタンがある。X, Y, Z 軸はそれぞれ縦軸, 横軸, 奥行きを表す。

Z ホームを押すことで最初の積層の厚みが決まるため調整が重要になる。実際にその厚みを 0.03mm と 0.09mm で印刷を行ってみたところ, 0.03mm で積層した場合, 層と層の間に空間があり, 積層方向に対して脆かった。しかし, 0.09mm で積層した場合は, 層と層の隙間がしっかりと接着されており, 外部の衝撃にも強かった。Y 軸が今いる場所からマイナス方向に動かなくなった場合にも, Y ホームを押下すると治る。

Lepton2 本体の準備としてヒートベッドがある。ヒートベッドにフィラメントは直接貼り付かないため, 図 D.11 にあるカプトンテープとゴムベラを使用した。カプトンテープとは耐熱性や化学薬品性に優れたカプトンフィルムをベースにしたものである [43]。PLA 樹脂や ABS 樹脂は融解温度が高いためそれに耐えられるようなテープを使用した。カプトンテープをヒートベッドに貼り付ける際気泡や凹凸があるとそれがそのまま作製物に写り込み誤差に繋がるため, 中性洗剤などをヒートベッドの間に挟む, もしくはスクイージー等で気泡を外に出すことで綺麗に仕上げることができる。カプトンテープは, 使用する際に表面をエタノール等で脱脂をする必要がある。脱脂をしなければ, フィラメントが貼り付きにくくなり, はがれることがあるため, 注意が必要である。また, ABS 樹脂を使用するときには, ヒートベッドから剥がれやすい性質を持っているため, のりを台に塗ることで反りにくくすることができる。



図 D.11: カプトンテープとスクイージー

謝 辞

本研究は、筆者が北海道科学大学在学中に、北海道科学大学工学部情報工学科松崎研究室において2019年より約1年間に行ったものである。



本研究を進めるにあたり、終始、御指導、御鞭撻をいただいた北海道科学大学工学部情報工学科松崎教授に心より感謝致します。

本研究の遂行にあたり、実験場所の御提供をいただいた西興部村養鹿研究会の中原真一様並びに田尾忠夫様に御礼申し上げます。

本研究の遂行にあたり、多大なるご協力、実験器具の御提供、数々の助言をくださいました株式会社アバ代表取締役 後藤嘉木様に御礼を申し上げます。

本研究の遂行にあたり、過去の論文を提供していただいた北海道開発技術センター 鹿野たか嶺、野呂美紗子、佐藤真人様に深く感謝致します。

最後に本研究の遂行にあたり著者を常に支援し応援してくれた両親、並びに親族の皆様に心より感謝申し上げます。