

環境音聴取時の内観に基づく 音響特徴量の可視化に関する検討 ～聴覚障害者の環境音学習での活用を目指して～

加藤 優^{1,a)} 平賀 瑠美² 若月 大輔² 安 啓一² 荒井 隆行¹

概要: 本研究では、聴覚障害者が環境音学習を効果的に行うための視覚的支援方法を提案する。視覚的支援方法において効果的な要素を抽出するために、まず 18 名の聴覚障害者を対象にして環境音聴取時の抽象的な形状を手書きで表現してもらった。いくつかの共通した表現を選択し、それらの表現に対応すると考えられる音響特徴量を決定した。その音響特徴量を可視化することで、環境音と同期させた映像を制作した。次に、15 名の聴覚障害者に対して、環境音と制作した映像の親和性についての評価実験を行った。その結果、各音響特徴量の表現方法について、図形の色彩・大きさ・位置などにおいてバランスよく配置することを再考するべきであることが分かった。今後は、本実験で得られた知見に基づき視覚的支援方法としての映像を改善し、環境音と制作した映像の親和性について検討を重ねたい。

1. はじめに

1.1 背景

環境音は、人間が生活していく過程で身の安全を守り、暮らしの心地よさを感じさせてくれる重要な聴覚情報である。健聴者は、環境音を聴取し適切な行動をとることが可能である。しかし、聴覚に障害がある人々（以下、聴覚障害者）は残存聴力を活用しても環境音を聴取することが難しい場合がある。我々は以前に、この困難を解決することを目標に、聴覚障害児のための環境音学習システムを試作した [1]。この環境音学習システムでは、環境音の聴覚情報を提示している。聴覚障害児に実際に使用してもらったと好評であった。しかし、聴覚障害児の保護者や担当教員からは、重度の聴覚障害児にとっては聴覚情報だけで学習することは負担が多く困難が生じるのではないかという指摘があった。成人の聴覚障害者の環境音学習について、先行研究では、15 名の人工内耳装用者（年齢: Mean 63, range 51~87）に対し 40 種類の環境音を用いた環境音学習の効果を Shafiro ら [2] が報告しており、学習前の同定課題と比べて学習後の結果は平均 15.8 ポイント向上したと示した。子どもの場合でも、同様の効果が報告されている。木村ら [3] が 3 名の人工内耳装用児（年齢: Mean 3, range 3~4）に対し 15 種類の環境音を用いた環境音学習を行うと、

学習前の同定課題と比べて学習後の結果は平均 38 ポイント向上した。このように聴覚障害児・者が環境音学習を行えば、環境音を学習前よりある程度認識できるようになる。しかし、前述のように我々の検討により、音がききにくい子どもたちが聴覚情報だけの環境音学習を行うには困難を生じる可能性がある。聴覚障害児・者が長期的に環境音学習を継続できるためには、このような困難を解決することが課題だと考えた。

聴覚障害者や健聴者の音学習において、どのような支援方法が効果的であるかについて、いくつかの先行研究を調査した。松原ら [4] は、聴覚障害者向け音楽のタッピングゲームにおける視覚手がかりがリズム認知能力の短期学習に与える影響を報告している。視覚手がかりがある場合はない場合に比べて、リズム認知の成績が向上したと示した。この学習の支援方法は、音楽と同期して拍をガイドバーで視覚的に表示するものであった。Chun ら [5] は、広東語学習者が広東語の声調習得のために、ピッチカーブを視覚的に表示し、その画像を用いたトレーニングの結果を報告している。ピッチカーブの画像があることで、声調の聞き分けや発音が学習前より向上し、学習者の向上を手助けする可能性が高いと示した。このように音学習で用いる支援方法は、音の特徴をリアルタイムかつ、詳細に可視化されたものが最適だと考えられる。これらの知見から、環境音学習についてもリアルタイムに音の特徴が詳細に可視化された映像の利用に効果があると考えられる。

¹ 上智大学大学院理工学研究科

² 筑波技術大学産業技術学部

^{a)} yu_kato@eagle.sohpia.ac.jp

1.2 仮説と本研究の狙い

本研究では、「環境音を聴覚情報だけでなく、視覚情報も同時に提示することによって聴覚障害児が学習しやすくなる」という仮説を立てた。重度の聴覚障害児でも環境音学習をおこなえるために、環境音学習の効果的な視覚的支援方法を提案することを本研究の目的とした。

これまで、視覚的支援方法として音圧の時間波形を併用した環境音学習の効果を検討した [6]。音圧の時間波形がある場合 (AV 法) は、ない場合 (A 法) に比べて学習負担が少なく感じると回答した聴覚障害者が多数であった。しかし、学習効果において、A 法と AV 法の間では統計的有意差が認められなかった。音圧の時間波形だけでは学習効果を向上させるのに不十分であると考え、環境音認識に相関があると報告された音響特徴量に着目した [7]。周波数スペクトルの尖度、バーストを採用した。それらの音響特徴量を音圧の時間波形と組み合わせて一つの画像として環境音と同期させた映像を制作した。その制作した映像を聴覚障害者に評価してもらおうと、直感的なものではないとの意見が示され、音圧の時間波形を表示させた場合と比べて、評価の向上はみられなかった。さらに聴覚障害者の意見には、音の高さの可視化を要望する声が多かった。そこで、本研究は学習者である聴覚障害者の視点を尊重し、聴覚障害者が普段環境音をどのように感じ取っているのかという点から見直すことにした。

2. 環境音聴取時の内観調査

聴覚障害者の環境音聴取時の抽象的な形状を手描きで表してもらい、環境音学習に効果的な視覚的支援方法に含まれる要素を抽出することを調査目的とした。

2.1 実験参加者

実験参加者は、最重度の聴覚障害者 18 名 (聴力レベルは両耳ともに裸耳 90 dB 以上、男性 10 名、女性 8 名、年齢: Mean 23, range 22~25) である。補聴器装用者は 15 名、人工内耳装用者は 3 名である。実験参加者 18 名を 2 つのグループに分けた。1 つ目のグループは事前に環境音の名称を教えたうえで環境音をきかせる^{*1}グループ (以下、Easy-group)、2 つ目のグループは名称を教えず環境音をきかせるグループ (以下、Diff-group) である。実験開始前に、補聴器や人工内耳のスイッチがオンになっているかどうかの確認を行った。

2.2 実験環境

刺激としての環境音は、①金づちで釘を打つ音、②牛の

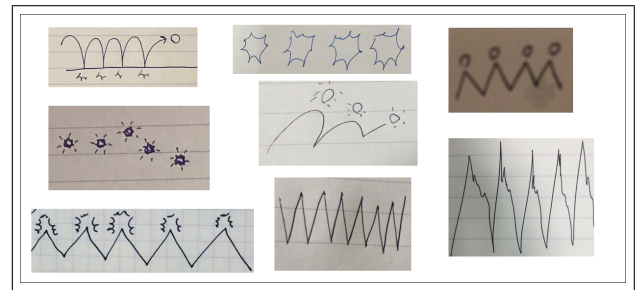


図 1 Easy-group : ①金づちで釘を打つ音

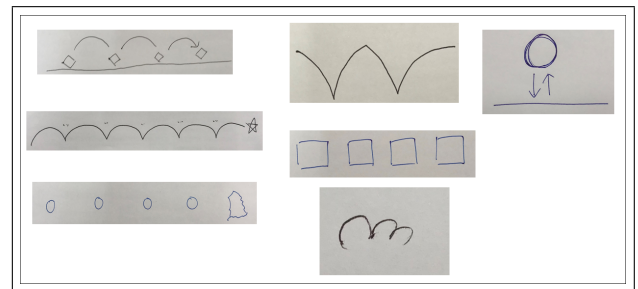


図 2 Diffi-group : ①金づちで釘を打つ音

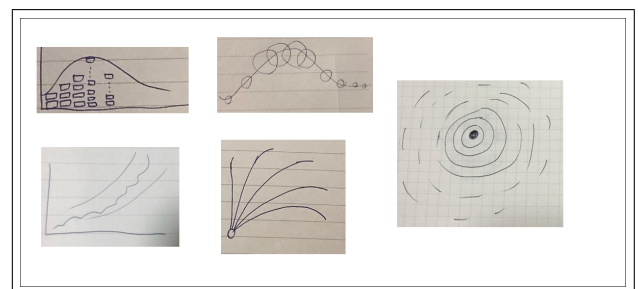


図 3 Easy-group : ②牛の鳴き声

鳴き声、③踏切警報機の音である。音響提示は、PC(富士通製 LIFEBOOK, Microsoft 製 Surface) で音声再生ソフト (Microsoft 製 Groove ミュージック) を使用した。提示音量は、実験参加者に調整してもらった。

2.3 実験手順

Easy-group には環境音 1 種類ずつ名称を教えた後に、Diff-group には名称を教えず環境音をきいてもらった。音の再生回数に制限を設けず、繰り返してきいてよいことにした。

次に、Easy-group と Diff-group ともにきき取った環境音について「環境音をきいたときに頭の中で浮かんだイメージ」を手描きで表現してもらった。描ける範囲で依頼し、描けない場合は記述なしとして認めた。環境音 3 種類について、上記の方法を繰り返した。この実験は、1 回につき 2~4 人で実施した。

2.4 結果

実験参加者が描いた環境音聴取時の内観を図 1~図 6 に示す。

^{*1} 本研究では、耳で聞く、聴くことを記述する際に、ひらがなの「きく」を使用する。暮らしの心地よさを感じる環境音を、聴く。自分の身を守るための環境音を、聞く。どちらの状況が起これると考えられるため、「環境音をきく」のように使用する。

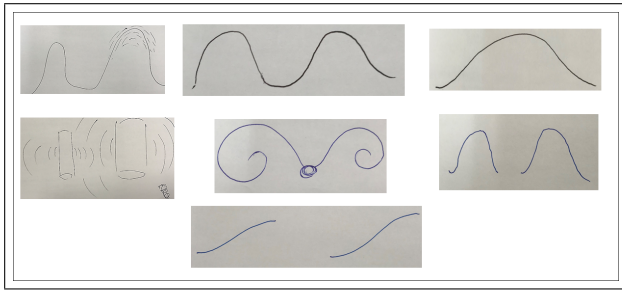


図 4 Diffi-group : ②牛の鳴き声

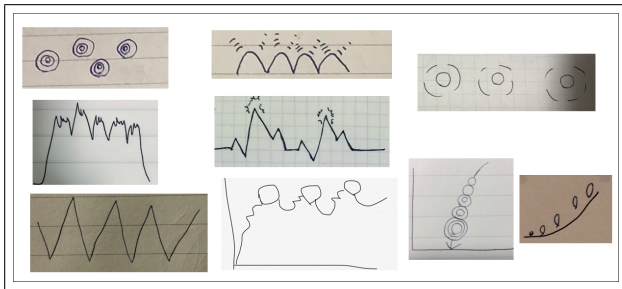


図 5 Easy-group : ③踏切警報機の音

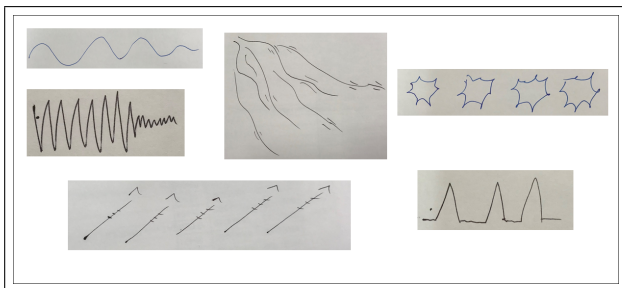


図 6 Diffi-group : ③踏切警報機の音

共通した表現を挙げると、①金槌で釘を打つ音(図1, 図2)について Easy-group は 8人中5人, Diffi-group は 7人中3人が角張った図形で表現していた。②牛の鳴き声(図3, 図4)について Easy-group は 5人中5人, Diffi-group は 7人中6人, ③踏切警報機の音(図5, 図6)について Easy-group は 9人中6人, Diffi-group は 6人中2人が曲線を多用する図形で表現していた。②牛の鳴き声について Easy-group は 5人中1人, Diffi-group は 7人中2人, ③踏切警報機の音について Easy-group は 9人中4人, Diffi-group は 6人中2人, 図形の周りに破線を付加していた。

2.5 考察

以上の結果から、図形の直線性については音の発生時の鋭さを、図形の付近に破線を付加する点については音の緩やかな減衰を感じて、それぞれ表現している可能性がある。例えば、②牛の鳴き声は①金槌を打つ音の場合と比べて曲線が多く用いられていた。②牛の鳴き声や③踏切警報機の音は音の減衰が緩やかであることが目立つことより、図形の付近に破線が付加されている。

音の柔らかさは、音の立ち上がりの速度に、音の緩やか

な減衰は、音の立ち下りの速度に関係すると考えた。音圧の時間波形の立ち上がりの傾きを示すエンベロープのアタックスロープ、立ち下りの傾きを示すリリーススロープが可視化するのに最適であると考えた。

3. 音響特徴量の抽出および可視化

聴覚障害者の環境音をきいた時の内観に基づいて、環境音の音響特徴量を抽出し、それらを組み合わせて可視化した映像を制作することを目的とした。

3.1 音響特徴量の検討

これまでの研究で得られた知見および環境音聴取時の内観の調査により、可視化する音響特徴量は、エンベロープ、ピッチ、ピッチセリエンシス、エンベロープのアタックスロープおよびリリーススロープとした。エンベロープは音圧の時間波形の包絡線である。ピッチは音高であり、ピッチセリエンシスはピッチの確からしさを表す数値(0~1, 1に近づくほどピッチが感じやすい)である[8]。エンベロープのアタックスロープおよびリリーススロープは、音圧の時間波形の立ち上がりの傾きおよび立ち下りの傾きである[9]。上記の音響特徴量は、MATLABで特徴量ごとに分析窓を20msに設定し音響分析を行った。その結果をCSVファイルで保存した。

3.2 可視化方法

Visual Studio 2017のC++言語で、音響特徴量を動画として表示できるプログラムを実装した。表示方法は、シークバーである赤線の左側に過去の1秒間分、右側に未来の1秒間分の画像を表示させた。音響特徴量を可視化した画像が提示された音の時間に対応させて右から左に向かって動くようにした。

エンベロープの表示については、振幅を0~1の範囲に収まるように正規化した。次に、表示画面の最上部を振幅1とし、最下部を0として対応させた。表示画面の時間に対応させて振幅の値を長方形の高さにし、黒で塗りつぶした。

ピッチの表示については、緑色の実線で表現する。環境音認識に有効なピッチ範囲を調査すると、環境音に対しローパスフィルタ(低域の周波数を通過させる)の設定値が3500 Hzの場合、人工内耳装用者、健聴者がそれぞれ80%, 90%に近い環境音認識率を有している[10]。そのため、可視化するピッチの範囲を0~3500 Hzとした。ピッチのlog値をy軸とし、画面の最下部は0 Hz, 最上部は3500 Hz以上の値とした。ピッチの表示時の値を y_pitch , 表示画面上の縦軸の長さを y_length , ピッチの値を P とすると、

$$y_pitch = y_length - ((\log_{10} P / \log_{10} 3500) \times y_length)$$

である。上記の式を問題なく活用するために、ピッチの音響分析結果に0 Hzが生じた場合、1 Hzに置き換えること

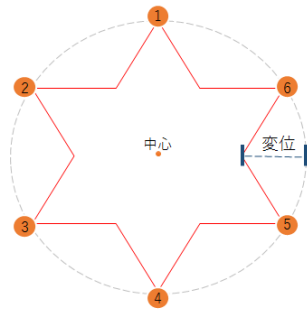


図 7 アタックスロープの表現について

で対処する。

ピッチセリエン스는、ピッチを表現する緑色の実線の透過率 (0~100) を設定する際に用いた。ピッチセリエン스의値が小さいほど透過させるようにした。ピッチセリエン스의可視化条件として、無音区間には透過率を上げること、有音区間でピッチセリエン스가高い場合は透過率を下げるのが適切だと考えた。そこで、ピッチセリエン스에 3 乗を使用した。緑色の実線の透過率を P_m 、ピッチセリエン스의値を PS とすると、

$$P_m = PS^3$$

である。

アタックスロープでは、音の鋭さの具合を表現する際に活用する。図形の線の色は、赤色とした。アタックスロープが検知された時刻に、多角形を配置する。その多角形を構築するための変数は、変位、頂点数の 2 つである (図 7)。

変位 (-0.5~0.5) は、ピッチの値 (0~3500 Hz) を利用する。ピッチが低ければ変位は小さく、ピッチが高ければ変位は大きくなるように下記の式を作成した。変位を D 、ピッチの値を P とすると、

$$D = ((3500 - P) \times (1.0 \div 3500)) - 0.5$$

である。頂点数は傾きの値を利用する。多角形は、六角形以上を扱うこととし、傾きの値に 6 だけ足す。多角形の頂点数を Num_T 、傾きの値を $Slope$ とすると、

$$Num_T = Slope + 6$$

である。

リリーススロープでは、音の減衰を表現する。リリーススロープが検知された時刻を、エンベロープの時刻に対応させ、線分を 20 ms 単位に適宜に 5 つ配置させた。リリーススロープが検知された時間の長さが分析窓 20 ms より短い場合があるため、ここでは適宜に 5 つ配置することで対処する。また、その複数の線分には、傾きの値を参考にして透過率を設定する。青色の実線の透過率を R_m 、ピッチセリエン스의値を PS とすると、

$$R_m = 255 - (|\log_{10} PS| \times 255)$$

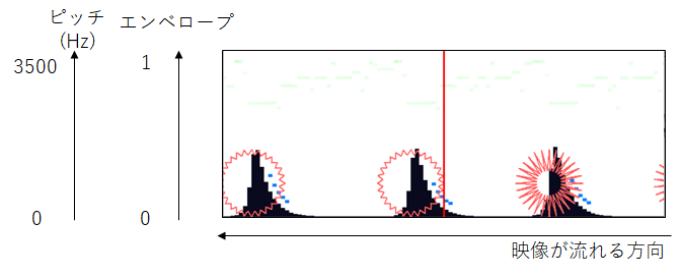


図 8 金槌で釘を打つ音の可視化

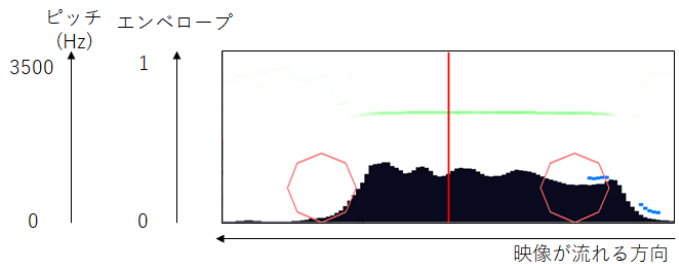


図 9 牛の鳴き声の可視化

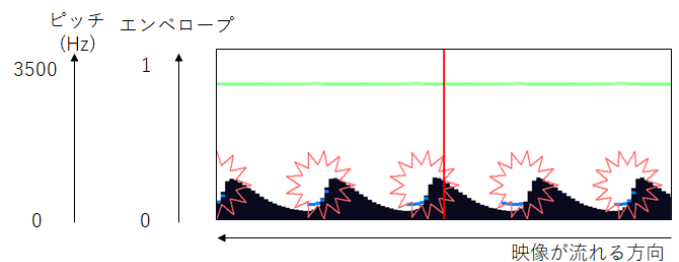


図 10 踏切の音の可視化

である。傾きの値と透過率は線形的関係とし、傾きの値の絶対値が大きいほど透過率は高くなる。

以上の、各音響特徴量の表現方法を反映させた金槌で釘を打つ音、牛の鳴き声、踏切警報機の音を、図 8、図 9、図 10 に示す。

3.3 評価

前節で制作した環境音学習のための視覚的支援の映像について、音との親和性に着目して聴覚障害者を対象に評価実験を行った。

3.3.1 実験参加者

参加した聴覚障害者は、15 名 (聴力レベルは両耳ともに裸耳 90 dB 以上、男性 8 名、女性 7 名、平均 23.9 歳 (22~25 歳)) である。補聴器着用者は 12 名、人工内耳着用者は 3 名である。

3.3.2 実験環境

実験で用いた環境音は、①金槌で釘を打つ音、②牛の鳴き声、③踏切警報機の音、④車の走行音、⑤水の泡の音、⑥犬の鳴き声、⑦電話のベル、⑧人の足音、⑨人の嚙下音、⑩かみなりの音の 10 種類である。提示する映像は、前節で述べた可視化方法を環境音 10 種類に対応させた。

映像提示は、プロジェクトまたはPC(マイクロソフト製 Surface Pro3)の画面で、音響提示はスピーカ(GENELEC製 G One)またはMリンク(自立コム製)で行った。視聴方法は、実験参加者に選んでもらった。

3.3.3 実験手順

実験手順は、以下の2ステップである。

- 1) 音と映像を視聴
- 2) 主観的評価アンケート

手順1での音量調整は実験参加者の任意とし、再生回数の制限は行わなかった。可視化した音響特徴量についての説明は行わなかった。手順2では、1つの映像に対して、「音と提示された映像は合っていると思いますか?」という質問を設け、実験参加者には、5段階評価で回答してもらった。さらに、回答理由やコメントをそれぞれの環境音の映像の静止画が印刷された用紙に書いてもらった。環境音10種類について、手順1~2を繰り返した。この実験では、1回につき2~4人ずつ実施し、環境音の提示順はランダムとした。

3.3.4 結果

評価結果は、音と提示された映像は「合うと思う」と「どちらかといえば合うと思う」を肯定的な回答として、「どちらでもない」を中立的な回答として、「どちらかといえば合わないと思う」と「合わないと思う」を否定的な回答としてまとめた。表1に示し、評価が高かった環境音を上から順に並べた。環境音それぞれに対する回答理由やコメントは下記に示す。映像の静止画が印刷された用紙の上で回答理由やコメント書いてもらったため、対象の図形に矢印が付け加えられていた。その意図を筆者が補足情報としてカッコで囲んだ。

聴覚障害者全員15名がアタックスロープを表現する多角形に注目した。しかし、ピッチを表現する緑色の線分、リリーススロープを表現する青色の線分についてコメントした聴覚障害者は2名のみだった。

- 踏切警報機の音
「カーンのカーは一番高い・大きいので、図(多角形)の位置はイメージ通りだと思う」
「マーク(多角形)と音が合っている」
- 牛の鳴き声
「丸(多角形)が始まりの音というイメージ」
「緑色の線は音をのばしている(というイメージ)」
- 金槌で釘を打つ音
「音にはそんなに違いはないようだが、角のとんがり具合(多角形)に差がすごくある。」
「きいた音と図形(多角形)の違いが気になる」
「(多角形が)カンカンコンというイメージに合っていた」
- 電話のベル
「緑色の線はなに？」

- 「視界がうるさい」
- 「星と星(多角形)の間隔が狭い」
- 「(多角形の)大きさを変えては?」
- 車の走行音
「(多角形が)何を表しているか分からない」
- 人の足音
「(青色の線分は)何?」
- 犬の鳴き声
「マーク(多角形)の意味が分からない」
- 水の泡の音
「角(多角形)の多さによって音の高さが変わるのかなと思った」
- 人の嚙下音
「多角形だけじゃなく、柔らかい雰囲気(多角形)もあつたらいいのではと思った」
「(多角形が)重なっている、意味が分からない」
- かみなりの音
「マーク(多角形)が多すぎてわからない、パリパリ音(かみなりの音)がどこで発生しているのかわからない」
「音が一定にきこえるので、(多角形の)違いがわからない」
「予想より優しい音。図形を見ても強い音だとわからず、(多角形の)違いも区別しにくい」
「かみなりのイメージは落ちた音だと思っている。」
「自分が思っている音と違っていたからイメージしにくかった」

3.3.5 考察

多くの聴覚障害者がアタックスロープの表示に注目する背景は、提示した映像のなかでアタックスロープを表現した多角形は表示面積が大きく、インパクトのある表現であるためではないかと考えられる。それにより多くの聴覚障害者が、自然にその多角形に目を追うようになり、ピッチやリリーススロープの表現に気付かなかったということが考えられる。

我々が制作した音響特徴量の映像のうち、踏切警報機の音は音と親和性があると聴覚障害者によって評価された。踏切警報機の音は規則性があるため、規則的に同様の図形を繰り返している映像が表示されている。これは、電話のベル(図11)でも同様であると思われるが、評価が多少下がる結果となった。前述のようにアタックスロープの表現が目立つ問題に影響していると考えられる。電話のベルは、実際にアタックスロープが多く検知され、映像では多角形がたくさん重なり、エンベロープの表示が見にくくなった可能性がある。

最も評価が低かったかみなりの音(図12)に関しては、コメントによると多くの実験参加者は、アタックスロープの表示に対してかみなりの音と対応していないという印象を

表 1 評価実験の結果 (%)

刺激	合うと思う※	どちらでもない	合わないと思う※
踏切の音	100(20)	0	0(0)
牛の鳴き声	73(60)	7	20(13)
金槌で釘を打つ音	67(27)	7	6(6)
電話のベル	67(54)	7	26(13)
車の走行音	60(27)	13	27(13)
人の足音	53(40)	20	27(20)
犬の鳴き声	47(27)	27	26(13)
水の泡の音	40(33)	6	54(27)
人の嘔下音	34(27)	20	46(33)
かみナリの音	7(7)	13	80(47)

※カッコ内は「どちらかといえば合うと思う」、「どちらかといえば合わないと思う」の回答率である。

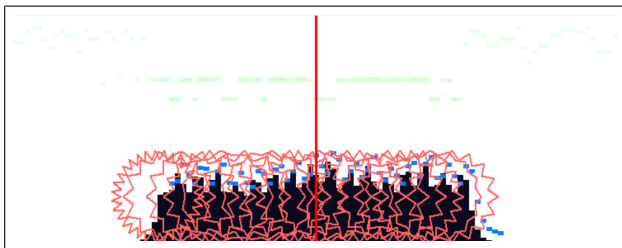


図 11 電話のベルの場合

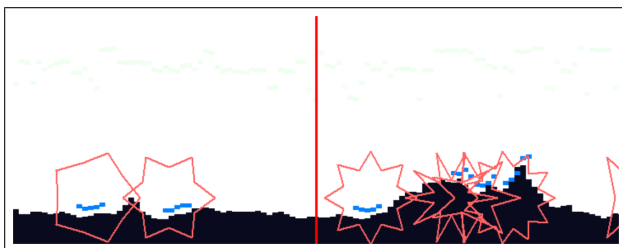


図 12 かみナリの音の場合

持った。

本実験が採用したかみナリの音は、雨の音が含まれておりノイズのような音が続いているが、時折雲の中を走るかみなり「ゴロゴロ」が鳴っている。その「ゴロゴロ」が発生しているときに、アタックスロープが検知される。その音響分析の結果が映像に反映されているため、学習に有効であると考えの方が自然である。ところが、コメントによると、「パリパリ音がどこで発生しているのかわからない」、「音が一定にきこえる」、「予想より優しい音」、「かみナリのイメージは落ちた音だと思っている」、「自分がイメージしていた音と違っていただけからイメージしにくかった」というものがあり、多くの聴覚障害者はおそらく「ゴロゴロ」を聴取できていないことが可能性として考えられる。そのため、「ゴロゴロ」という目的の音を聴取できないことより映像と音の親和性について判断することが難しく、その結果評価が低くなってしまった。本実験は、音と映像の親和性について評価してもらうことが目的である。しかし、かみナリの音の場合は、聴覚障害者が「ゴロゴロ」という目

的の音を聴取するのに学習する場が必要だと思われる。最初のうちはききとれなかった音を、我々が制作した映像を併用して学習を行えばききとれるようになるかどうかの過程を観察することも評価として必要な実験だと考えた。

以上のことより、まずは、音響特徴量の表示に関し、各特徴量の表示の大きさ・位置・色彩など、バランスよく配置することを再考すべきである。加えて、映像を用いた環境音学習を実施し、学習前後の成績変化や学習過程を観察することを評価の一つとして検討したい。

3.4 音響特徴量の可視化について改良

上記の考察より、音響特徴量の可視化について改良内容を示す。改良対象の音響特徴量は、アタックスロープ、リリーススロープ、ピッチである。

まず、アタックスロープを表現する多角形について、表示面積を 1/2 縮小する。多角形の変位を決定つけるのに、アタックスロープが検知されている間の時間にあたるピッチを平均して求めた値を参照にすることを考える。

次に、リリーススロープを表現する線分に関して、該当の時間に当たるエンベロープの上部に、垂直方向に隙間なく配置することを考えている。これまでは、該当の時間に当たるエンベロープの上部に、線分を少し浮かばせていた。また、線分がエンベロープの減衰部分に沿って配置できるように、リリーススロープの分析結果の活用を再検討する。

最後に、ピッチの表現方法について図 4 の 200 Hz 程度の牛の鳴き声の表示結果を見ると、0~3500 Hz の範囲に対して、本研究が期待していた位置より高い位置にピッチを表す線が提示された。ピッチを可視化するスケールについて、対数の底や係数などの調整が必要であると考えている。

現時点で改善を試みた映像を、金槌で釘を打つ音、牛の鳴き声、踏切警報機の音で示す (図 13, 図 14, 図 15)。上述した内容のとおり、アタックスロープとリリーススロープの表現方法を改善させた。ピッチに関しては、今後検討したい。

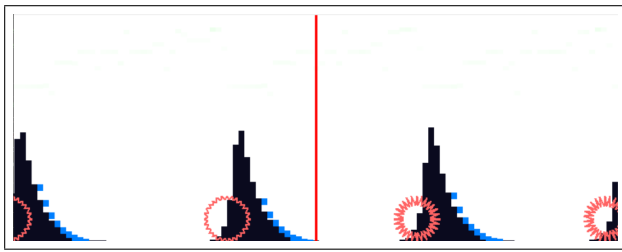


図 13 金槌で釘を打つ音の場合

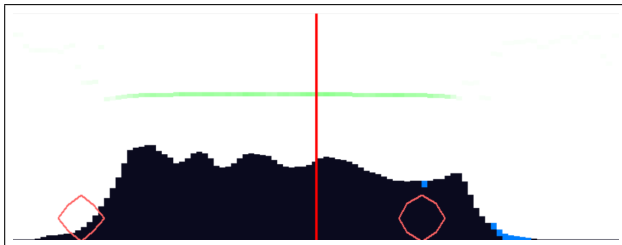


図 14 牛の鳴き声の場合

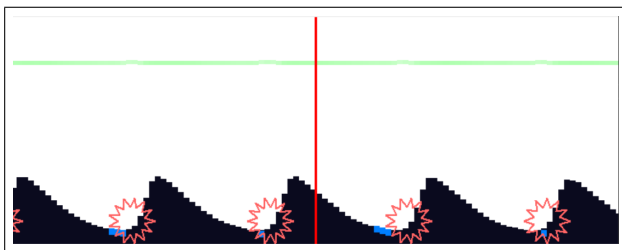


図 15 踏切の音の場合

4. 今後の課題

聴覚障害児・者の環境音学習に効果的な映像を完成させることを目標に、音響特徴量の表示の大きさ・位置・色彩など表現方法をバランスよく配置することを再考する。改善した映像に、見やすさの観点から問題がなければ、再度聴覚障害者や健聴者に音の映像の親和性に関する調査に協力してもらう予定である。

5. まとめ

環境音学習に適した映像を生成するために、聴覚障害者に3種類の環境音をきいてもらい、音から受ける抽象的な形状を紙に描いてもらう実験を行った。スケッチ結果から、図形の直線性は音の発生時の鋭さを、図形の付近に波線を付加する点は音の緩やかな減衰を、それぞれ感じ取っている可能性が考えられた。これまでの検討を含めて音の発生時の鋭さ、音の緩やかな減衰を音響的に可視化した映像を制作した。聴覚障害者に音と映像の親和性について評価してもらおうと、各特徴量の表示の大きさ・位置・色彩など表現方法をバランスよく配置することを再考すべきであることがわかった。また、我々が制作した映像を用いて環境音学習を実施し、学習前後の成績変化や学習過程を評価することも必要であるという知見が新たに得られた。今後

は、制作した映像に関して、聴覚障害者や健聴者の協力を得て評価実験や学習実験を繰り返して改良していきたい。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費 JP15K01056, JP19K02996 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] 平賀瑠美, 加藤優, 松原正樹, 寺澤洋子, 田原敬: 聴覚障害児のための環境音学習システム—試作と今後の展望—, 筑波技術大学テクレポーター, 2017, 24(2), 17–21.
- [2] Shafiro, V., Sheft, S., Kuvadia, S., & Gygi, B.: Environmental sound training in cochlea implant users. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 2005, 58, 509–519.
- [3] 木村淳子, 中川辰雄. 聴覚障害幼児に対するパーソナルコンピュータを用いた聴覚学習. *横浜国立大学教育人間科学部紀要 I*, 教育科学 2009, 11, 89–107.
- [4] 松原正樹, 狩野直哉, 寺澤洋子, 平賀瑠美: 聴覚障害者向けタッピングゲームにおける視覚手がかりによるリズム認知の短期的学習効果, *情報処理学会論文誌*, 2016, 57(5), 1–10.
- [5] Chun, D. M., Jiang, Y., & Avila, N.: Visualization of tone for learning Mandarin Chinese, *Proceedings of the 4th Pronunciation in Second Language Learning and Teaching Conference*, 2012, 77–89.
- [6] 加藤優, 平賀瑠美, 若月大輔, 安啓一: 環境音学習における視覚情報の有効性についての検討—重度の聴覚障害者を対象にする場合—, *日本音響学会, 2018 年春季研究発表会*, 2018, 024.1.3.5.
- [7] 加藤優, 平賀瑠美, 若月大輔, 安啓一: 聴覚障害児を対象とした環境音学習のための音響特徴量の可視化に関する基礎的検討, *信学技報 (福祉情報工学)*, 2018, 117(502), 1–4.
- [8] Slaney, M.: Auditory Toolbox ver2, Technical Report #1998-010, Interval Research Corporation.
- [9] Lartillot, O.: MIRtoolbox ver1.7., <https://www.jyu.fi/hytk/fi/laitokset/mutku/en/research/materials/mirtoolbox>.
- [10] Chang, S. A., Won, J. H., Kim, H., Oh, S. H., Tyler, R. S., & Cho, C. H.: Frequency-limiting effects on speech and environmental sound identification for cochlear implant and normal hearing listeners, *J. Audiol. Otol.*, 2018, 22(1), 28–38.