音サインのコンテンツの差異が視覚障がい者の直進歩行に与える影響

－積雪寒冷地における視覚障がい者の単独歩行に関する研究 その3－

VARIETIES OF NAVIGATIONAL EFFECTS CAUSED BY SOUND CONTENTS

A study on the independent travel of visually impaired persons in a cold and snow region Part 3

福田 菜々*, 大野 隆造**, 那須 聖***

Nana FUKUDA, Ryuzo OHNO and Satoshi NASU

An outdoor experiment with nine visually impaired people was conducted to investigate the navigational effect of sound cues. Loudspeakers were placed at a height of 3m, pointing vertically toward the ground at 10m intervals. Experimental stimuli were birds' tweet and the sound of a creek. These stimuli were used individually or mixed in three different conditions. It was revealed that the visually impaired tend to use birds' tweet to check for the direction while a creek sound for the localization. Moreover, subjects were able to pick up the timbre change caused by coloration as well as volume change of the continuous sound as clues.

Keywords : *the visually impaired, snow region, sound contents, stationary continuous sound, timbre change*

視覚障がい者, 積雪地, 音サインのコンテンツ, 連続的な定常音, 音色変化

1. 研究の背景と目的

積雪寒冷地に住む視覚障がい者は、周囲環境が日々著しく変化する冬季の単独歩行では、さまざまな不便を強いられている¹⁾。こうした状況において、冬季の視覚障がい者の単独歩行を支援する具体的な対応策の提案はなされていない。

本研究は前稿²⁾に続き、視覚障がい者のための、季節による周囲環境の変化に左右されにくい、新しい歩行環境のデザインを目的としたものである。これまでの研究成果から、視覚障がい者の歩行方向や直進歩行を誘導する上で、音サインのコンテンツが重要であるという仮説が得られた。そこで、本研究では2種類のコンテンツを用いた音サインにより一定幅の歩行経路の提示を試み、視覚障がい者にその範囲から逸脱しない直進歩行を誘導するにあたり、コンテンツの差異が視覚障がい者の直進歩行に与える影響を検証する。

2. 歩行実験の諸条件設定

2.1 音サインと暗騒音との関係 (SN 比)

音サインの音量と騒音問題は切り離せない関係である。過大な音量で音サインを設定した場合には、周囲に長時間滞在する人々にとっては不快に感じられるおそれがあり、視覚障がい者の混乱も招きかねない。永幡ら³⁾は視覚障がい者が盲導鈴に求めている音量につい

て評価実験を行い、背景騒音に対して SN 比を 12dB 確保することが好ましいとした。一方、日常生活の中で危険を知らせる信号音を検討する際、背景騒音との SN 比が 0 dB の場合でも、信号音がどこかの周波数帯域で背景騒音の音圧レベルより高ければ検知されるという研究報告がある⁴⁾。この考えにもとづけば、全帯域音圧レベルの SN 比を大きくする必要がないため、騒音問題も発生しにくくなる。また、福祉のまちづくり学会が中心となって JIS T0902 高齢者・障害者配慮設計指針における音サインのガイドラインを現在検討中であるが、原案では公共空間に設置する移動支援用音案内の SN 比は約 10dB 以上としている⁵⁾。

これらを参考に、本研究ではまず①実験場所の暗騒音(背景騒音と同義と捉える)を測定し、②暗騒音の音圧周波数特性を分析する。続いて③音圧周波数特性が暗騒音とは異なる音サインを選定し、④音サインの音圧レベルが最も高い周波数帯域において暗騒音との SN 比が 10dB 以上となるよう音サインの再生音量を設定することとした。

2.2 実験環境の特徴と音サインのコンテンツおよび音サインの音量

実験場所には北海道科学大学敷地内の一角を選んだ。周囲は閑静な住宅街であり、大きな騒音もないため、音サインを用いた実験を行うには適した場所といえる。実験場所は西側が校舎、東側は住宅

* 北海道科学大学工学部 講師・博士(工学)

** 東京工業大学大学院総合理工学研究科 教授・工博

*** 東京工業大学大学院総合理工学研究科
准教授・博士(工学)

Lecturer, Faculty of Engineering, Hokkaido University of Science, Dr. Eng.

Prof., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Assoc. Prof., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

街の道路（大学敷地内に一部、木造小屋が点在）に面している。

実験条件として、コンテンツの差異によるそれぞれの誘導効果を確認するため、条件1は断続音のみ、条件2は連続的な定常音のみを用いた。さらに、これら2種を組み合わせることで、より精度の高い直進歩行を誘導できると仮説をたて、条件3では断続音と連続的な定常音を混在させた。スピーカーは、歩行者の双方向の移動を誘導するといった実用化面を考慮し、音圧レベルの分布が前後左右対称となるよう、図1に示す主軸垂直下向とし、経路上に複数配置した。

実験に先立って実験場所の暗騒音の測定を行った（2013年10月8日実施）ところ、42dB（測定値は騒音レベルを示す）であった。図2に示すように、周波数が高くなるにつれ音圧レベルが小さくなる特性があるため、実験で用いる音サインには1～2kHzの周波数帯域に音圧レベルの最大値があるものを2種類選定した。ひとつは、北海道内の音響装置付信号機に使用されている「ビヨビヨ」（断続音）と名付けられた音であり、もうひとつは長時間聞いていても苦痛が少なく、比較的広帯域に周波数成分を含む「水のせせらぎ音」（連続的な定常音）である（Atomosphere Light を使用して作成）。

音サインの再生音量を設定するにあたり、音サインが暗騒音によりかき消されることのないように、実験歩行路上で最も音サインの音圧レベルが低くなるスピーカーの中間地点（10m 地点）を受音点とした（図1）。表1に示す通り、連続的な定常音の音圧レベルを暗騒音のレベルよりも3dB^{注1)}大きい設定（45dB）を基準値とし、これを音量「小」とした。基準値から3dB刻みで「中」、「大」と音量を設定した。断続音については、連続的な定常音にかき消されないよう、基準値よりもさらに3dBだけ大きい値（48dB）を「小」と設定し、3dB刻みで「中」、「大」と設定した（ただし、断続音は変動が大きいので、測定値は騒音レベルの最大値を示す）。条件3では、2種類の音サインが混在することで、より小さい音量でも効果があると考え、音量の「中」と「小」を組み合わせ、4つのパターンを設定した。

断続音と連続的な定常音の音量をどちらも「大」に設定した場合の音圧周波数特性を分析（図2）すると、断続音の音圧周波数特性の最大値は2kHzにあり、暗騒音の音圧レベルより大きい。連続的な定常音は500Hz以上の周波数帯域で暗騒音を上回っている（2kHzで暗騒音との差は10dBを確保）。暗騒音と音サインの音圧周波数特性がそれぞれ異なるため、実験場所ではどちらの音サインも検知されやすいと考えられる。なお、受音点で断続音の音圧レベルが「大（54dB）」のとき、スピーカー直下ではおよそ70dBである。

3. 歩行実験

3.1 実験の概要

実験は縦30m×横4m（横は中央の基準線を中心に左右2mずつ）の実験歩行路を設営し行った。実験歩行路は水平で障害物はない。路上には60cm間隔でグリッドを引いた（中心線を基準に左右90cmまでは30cm間隔）。のぼり用のポール上部に竹で片持梁を制作し、その梁の先端にスピーカーを固定し、中央基準線上の地上高さ3mに位置するよう実験補助員が支えた（写真1）。スピーカーは全国の一一般的な音響装置付信号機に使用されているアシダ音響社製（RUH-5）とした。このスピーカーをTEAC社製プリメインアンプ（A-R630）に接続し、前出の音サインを図3に示す間隔で呈示し、再

図1 スピーカの配置間隔及び取付角度
（※ サービスエリアは1kHzで3dB減衰する指向角度（60°）を示す。）

図2 実験場所の暗騒音と音サインの音圧周波数特性

表1 音サインのコンテンツと音量の設定

条件	音サインのコンテンツ	音量	音圧レベル(dB)	暗騒音との差 (dB)
条件1	断続音 「ビヨビヨ」	大	54	+12
		中	51	+9
		小	48	+6
条件2	定常音 「水のせせらぎ音」	大	51	+9
		中	48	+6
		小	45	+3
条件3	パターン1 断続音+定常音	断続音の中(51)と定常音の中(48)		—
	パターン2	断続音の小(48)と定常音の中(48)		—
	パターン3	断続音の中(51)と定常音の小(45)		—
	パターン4	断続音の小(48)と定常音の小(45)		—

写真1 実験風景

図3 音サインの呈示間隔

表2 被験者属性（年齢は実験当時のもの）

被験者	性別	年齢	視覚障害の程度	障害歴	外出時	外出頻度	歩行訓練経験
1	男	34	光の感覚あり	先天性	単独	多い	有（冬期無し）
2	男	69	光の感覚なし	先天性	単独	多い	無
3	男	46	光の感覚あり	33年	単独	多い	有（冬期もあり）
4	男	45	光の感覚なし	36年	単独	多い	有（冬期にあり）
5	男	60	光の感覚なし	先天性	単独	多い	無
6	女	46	光の感覚あり	先天性	単独	多い	有
7	女	54	光の感覚なし	21年	単独	多い	無
8	女	34	視力0.02	先天性	単独	多い	有（冬期もあり）
9	男	62	光の感覚なし	20年	単独	多い	無

生した。

被験者は9名の視覚障がい者である。被験者属性を表2に示す。被験者8は視力が残るが、スピーカーについては「かなり意識しないと見えない」と本人から申告を受けたため、実験に支障はないと

判断した。ただし、歩行中は普段通りの目線で、スピーカーの位置は意識しないよう指示した。白杖については、冬季の歩行時を想定し、緩衝シートで先端の石突き部分を覆い、音が生じないようにした上で使用を許可した。実験は2013年10月19日と20日に行った(午前11時から午後3時までの4時間)。実験日の暗騒音は事前の測定日とほぼ同等であったが、時折近隣住宅のリフォーム工事音が響くこともあり、その場合には都度実験を中断した。

3.2 実験手順

被験者には条件1から順に、条件2、条件3を一往復させた。音量は大中小の順である。ただし、条件2の連続的な定常音は、これまで音サインとして用いられたことがなく、視覚障がい者はその音環境を手がかりとして歩行することに慣れていないと考えられた。そこで、音環境を意識させるための「学習」時間を実験途中に設けた。具体的には、条件2の音環境の説明を一切なしに大中小の順に歩行させた後、連続的な定常音が流れる歩行路内を実験者が被験者を個別に連れて案内した。その際、スピーカー直下やスピーカーから左右前後に1、2m 偏軌した地点などで音の大きさや聞こえ方がどのように変化するか、また歩行路内を敢えて斜めに誘導するなどして、音環境の変化を体感させた。スピーカーとの距離や中心線(正しい経路)からの偏軌の程度は被験者に口頭で伝えた。これを音量が「大」「小」の場合と1回ずつ行い、被験者が音環境に対して十分納得した後、条件2を再度歩行させた。条件1の断続音は道内の音響信号で使われており、視覚障がい者は既に慣れていると判断したため、学習の機会は設けていない。各条件終了後、使用した音サインに対す

る主観的評価、歩きやすさ、好ましい条件等に関してヒアリングした。

実験開始時にスタート地点にてスピーカーが正しい経路の真上に設置されていることを被験者に口頭で伝え、それらのスピーカーを頼りにできるだけ正しい経路を「ストップ」と声がかかるまで歩くよう指示した。条件および音量が変わる度に被験者に伝え、スタート地点にて音サインが聞こえることを確認した後、歩行を開始させた。その他、被験者には普段と同じように歩行するよう指示した。

実験者は、歩行する被験者の足下を後方からビデオカメラで撮影しながら追跡し、歩行が実験歩行路幅を外れてしまった場合は、その都度歩行中止の指示を出すこととした。パソコンに取り込んだ映像をもとに、被験者の踵の着地点をCADソフト(JW-CAD)で作成した平面図上にプロットしたのち、両踵の着地点の中点を結んで歩行軌跡とした。

4. 結果

4.1 各条件の歩行軌跡と平均偏軌量の傾向

各条件における被験者の歩行軌跡を図4に示す。復路は上下を反転し、往路と出発点を合わせている。ハッチングは高さ1.5m 地点(耳の高さ)におけるスピーカーのサービスエリア(1kHzで3dB減衰する指向角度で対応したエリア)を示す。全体的な歩行軌跡の傾向として、音圧レベルが最も低くなる地点(10m, 20m)付近で偏軌が大きくなり、スピーカーに近づくにつれ偏軌が収束する傾向が見られる。

条件1の歩行軌跡では、実験歩行路から逸脱してしまう試行が数

図4 各条件ごとの歩行軌跡 (ハッチング部分はスピーカーのサービスエリアを示す。)

回見られた。直進歩行が比較的安定しているのは音量が中である。音量が小では全体的な偏軌量が大きくなっている。特に、音圧レベルが低い区間での偏軌がその他の条件と比較して大きく、スピーカー直下での収束度合いも低い。条件2の歩行軌跡は学習後の結果である。一部の乱れは見られるものの、全体的な偏軌が小さく、最も直進的な歩行ができています。15mから25m区間では3条件のうち最も偏軌量が小さく、音圧レベルが低くなる地点でも偏軌が小さい。全ての試行でスピーカーサービスエリア内を通過しており、スピーカー通過後の経路に沿った歩行は高く維持されている。音量差による影響は小さい。また、スピーカー近傍での急激な真横方向への修正が見られるのも特徴的である。条件3の歩行軌跡は条件2の結果と類似している。音量の組み合わせによる顕著な差は見られず、4パターンとも似た結果となった。音圧レベルが低い区間での偏軌が条件2と比較して、やや大きい。

各条件における3mから27m区間の全被験者1mごとの平均偏軌量を図5に示す(スタート地点とゴール地点から2mについては、連続してスピーカーを配置した実験環境の前後空間であるため、データに含めない)。エラーバーは95%信頼区間を示す。条件1では、平均偏軌量・ばらつきともに最も大きい。音量が中の試行時には偏軌量が小さくなっているが、音量が小になると再び偏軌が大きくなっており、音量差による偏軌量の変動が見られる。一方、連続的な定常音が使われている条件2と条件3では、音量差による偏軌量の変動は見られず、平均偏軌量は300mm以下を維持している。ばらつきも条件1と比較して小さい。

T検定の結果、条件2と条件3とでは平均偏軌量における有意差は見られなかったが、条件1との間にはそれぞれ有意差がみられた。したがって、断続音のみでは偏軌がやや大きくなる傾向があるのに対し、連続的な定常音が流れている場合にはより経路に沿った直進的な歩行ができていているといえる。

4.2 順序効果・経験の差による歩行軌跡の比較と学習効果

本実験では、各条件を音量が大中小の順に3往復させているが、被験者が辿った軌跡の偏軌量は本人に知らせていないため、次の試行で前試行の結果を参照して補正を行うことはできず、被験者各々の感覚に頼らざるを得ない。したがって、より後に行った条件において結果が良くなるといった順序効果は小さいと考えられる。また、条件1の断続音は既に音響装置付信号機に使われてきており、被験者にとって聞き慣れた音サインである一方、条件2の連続的な定常音は聞き慣れない音サインであるといった経験の差が考えられる。これらを踏まえ、経験に差のある、条件1(図4)と条件2・学習前(図6)を比較すると、条件2・学習前は聞き慣れていない音サインにもかかわらず、試行回数を重ねるにつれ(逸脱した試行もあるが)徐々に直進的な歩行へと改善されていく様子が見られる。また、スピーカー直下での収束度合いは条件1よりも高い。

さらに、順序効果と経験の差による歩行軌跡の差異が比較的小さいことを考慮すると、条件2における学習前後の歩行軌跡を比較することで、学習による効果を見ることができると考えられる(図6)。スピーカー前後の軌跡に着目すると、学習後の歩行軌跡では全ての被験者がスピーカーのサービスエリア内を通過しており(図6の一点鎖線)、直進歩行が維持されている。また偏軌に気付いてからの修正が速いため、修正時の角度が鋭くなる傾向が見られた(図6の点線)。

図5 各条件の平均偏軌量(3m~27m区間)

図6 学習前後における歩行軌跡の変化(条件2)

スピーカーの手前3m程度の地点から、自身の偏軌に気づき修正を開始している(図6の*印)。その際、スピーカーを通過してしまうことはなく、スピーカー直下で一旦速度を緩め、スピーカーの正確な位置を確認した後、正しい経路に沿った歩行を続けている。スピーカー直下への移動時は、進行方向を失わないようにするべく、身体の中面はゴールへ向けたまま真横に平行移動するといった被験者の行動も見られた。これは学習前には見られなかった行動である。

学習直後に実施した歩き方に関するヒアリングでは、学習時間を設けたことで、「スピーカー直下や1m離れた地点などにおける音の大きさを把握することができるようになった」という回答を全ての被験者から得られた。特に「スピーカー直下における音の大きさを基準として、スピーカーとの距離がより正確にわかるようになった」と回答した被験者がほとんどである。

4.3 ヒアリング結果と音サインの捉え方

条件1と条件2を比較した歩きやすさに対するヒアリング結果を表3(a)に示す。条件1の断続音に対しては、スピーカーとスピーカーの間で音サインが聞こえにくく不安に感じる点を多くの被験者が指

表3 実験後のヒアリング結果

(a) 条件1と条件2を比較して、どちらが歩きやすいですか？	
条件1	・それほど差はない、しいて言うならピヨピヨ（被験者5）
条件2	・水の音のほうが歩きやすい（被験者1、3） ・水は高い音や低い音があり、スピーカー通過後は低い音がきこえる。成分中、方向は高い音、スピーカーとの距離感は低い音を利用（被験者1） ・水の流れる音は常になっているのでピヨピヨより音源の位置が分かりやすい（被験者3） ・音が連続音であり、前後に感じるドップラー効果の“ヒューン”という音も進行方向を定める参考になる（被験者4） ・スピーカー通過後の残響音を参考にできる（被験者6） ・まっすぐ歩く安心感は連続音の水の音の方がある（被験者6、8） ・条件1は、スピーカー間の音サインが聞こえにくいところや不安になり歩きにくい（被験者1、2、3、4） ・条件1は音サインがならない間は予測して歩かなくてはならない（被験者4）
(b) 条件3ではどの音サインを誘導の手がかりとして聞き取り、歩きましたか？	
断続音	・色々な音の中でも、ピヨピヨが聞き取りやすい（被験者2） ・特に理由なし、音があればいい（被験者5）
定常音	・二つの音が混じり、ドップラー効果が感じにくい（被験者1） ・歩行時の直進性確認は水、方向を定める時はピヨピヨ（被験者4）
両方	・周囲の雑音があるとピヨピヨが効く。周囲の音が余りなければ、水の流れる音の方が歩きやすい（被験者3） ・ピヨピヨを手がかりにして歩いていると思ったが、常に鳴っている音があると安心感がある（被験者6） ・ピヨピヨは方向確認、水の流れるは自分の位置の確認（被験者7、8、9）
(c) 条件1、条件2、条件3を比較して、最も歩きやすい条件はどれですか？またその理由は？	
条件1	・どちらもいい、選ぶのであればピヨピヨの方が聞きやすい（被験者2、5）
条件2	・水の方が正確なスピーカーの位置が分かりやすい、完全に見失った時は、ピヨピヨがあると回復しやすい（被験者1） ・騒音が大きくないときは音がずっと鳴っている条件2が歩きやすい（被験者3、4）
条件3	・両方（ピヨピヨ：方向性、水：自分の位置）を確認できるので、安心感がある（被験者6、7、8、9）

摘している。また、無音区間は歩行方向を予測して歩行する必要がある点を指摘した被験者もいた。一方、条件2の連続的な定常音に対しては、常に確認できるという利点から、真っ直ぐ歩ける安心感があり、スピーカーの位置を確認しやすい点が指摘された。さらに、単調な音の中にも「高い／低い」、「ヒューン」という音、「残響音」といった表現のように、さまざまな音の特徴を聞き分け、それらを参考にしながら歩行していることがわかる。

表3(b)のように、断続音と連続的な定常音が混在した条件3においては、歩行の手がかりとして「両方聞く」という回答が多い。しかし、視覚障がい者は断続音と連続的な定常音のそれぞれのコンテンツの区別ができており、断続音は歩行方向、連続的な定常音は自身の位置を確認するために使い分けている。

表3(c)では、歩行方向と自身の位置の2つを確認しやすい条件3を好む視覚障がい者がやや多い。基本的には連続的な定常音を手がかりとして利用し、必要な時に断続音を聞くといい意見もあり、臨機応変に聞き分けている。

その他、音サインとして普段聞き慣れている断続音「ピヨピヨ」は耳に入ってきてやすく歩きやすいと感じる被験者も少なからずおり、新しい音サインとしての連続的な定常音に馴染んでいない様子が見える。

5. 考察

5.1 連続的な定常音による誘導効果

実験結果から、条件2・学習後の歩行は直進性が高く維持されていることが明らかとなった。表3(a)より、条件2で用いられた連続的な定常音に対する被験者の「ヒューン」という音、「残響音を参考」、「スピーカー通過後は低い音」といった音色に関する発言があった。このような発言は断続音に対してはない。録画画像に記録されている音声信号を確認したところ、スピーカー前後において音量の変化とは異なる、音色の変化が聞き取れた。ここで知覚されている音色の変化は、実験条件を鑑みると、次の2つに起因すると考えられる。

- ①スピーカーの指向特性による音色の変化
- ②カラーレーションによる音色の変化

スピーカーの指向特性は、一般的に低い周波数(500Hz)は指向性が低く広がりが大きい、高い周波数(1kHz以上)は指向性が高く広がりが小さい。したがって、スピーカー直下では高い周波数の音

のエネルギーが強くなる。そのため、①は被験者がスピーカーに近づくにつれ、連続的な定常音の周波数成分のうち低い周波数の音から高い周波数の音へと徐々に音色が変化しているように感じたと推察される。スピーカー通過後は高い音から低い音へと変化し、表3(a)被験者1の「スピーカー通過後は低い音が聞こえる」とも一致する。

このように、広帯域に周波数成分をもった定常音を連続的に流すことで、スピーカーの指向特性による音色の変化を知覚しやすい音環境を創りだすことができたといえる。

②は、スピーカーからの直接音と周囲の建物や道路面からの反射音が干渉することで生じると考えられる。これは伊福部ら⁶⁾が指摘する音色の変化であると推察され、視覚障がい者が周囲の障害物を知覚するときにも利用されている。実験では、スピーカーは地上3mの地点で垂直下向きに配置されており、近くの建造物は道路面までの距離と比較して十分離れている。したがって、スピーカーからの直接音と干渉を引き起こす反射音は道路面の反射によるものとみなすことができる。この環境下で、被験者はスピーカーからの直接音と、直接音とほぼ同様の音圧周波数特性をもつ道路面からの反射音という2つの音を聞いていると考えられる。

スピーカーからの直接音と、道路面からの反射音が被験者の耳に到達する際の経路(ld, lr)を図7に示す。直接音と、直接音と同様の音圧周波数特性をもつ単一の反射音が時間差(ΔT)をもって耳に到達する場合、人間の耳には一種のフィルタが形成される^{注2)}。形成されるフィルタのピークの周波数の密度は、スピーカーと被験者、そして道路面との距離関係に依存している。これらの距離関係が被験者の移動によって変化することで、ピークの周波数の密度が連続的に変化し、それが音色の変化として被験者に知覚されたと考えられる。

スピーカーまでの距離(ls) 1mごとに、直接音と道路面からの反射

図7 直接音と反射音が被験者の耳まで到達する際の経路

図8 カラーレーションにより知覚される音色の変化

音が被験者に到達するまでの距離 (ld, lr) を式 1 および式 2 より求めた (図 7)。直接音に対する反射音が被験者の耳に到達する時間の遅れ (ΔT) は式 3 より計算した。これらをもとに、実験歩行路において被験者が歩行中に認識したと思われる音色 ($1/\Delta T$) を式 4 より求め図 8 に示す。スピーカーに近づくにつれ、カラーレーションによる音色の周波数は高い方から低い方へと変化する。被験者には、“ブーン” といった正弦波に似た音色が、水のせせらぎ音に新たに付加された印象を与えたと推察される。この音色の変化を視覚障がい者は歩行路内における (スピーカーとの相対的な) 自らの位置を把握する手がかりとして利用していたと考えられる。

このように、被験者の歩行偏軌量が最も安定していた条件 2 の実験環境を音響的に考察すると、スピーカーを道路に対し垂直下向に配置することで音サインの反射が道路面からのみに絞られ、単一の反射音と直接音による干渉を促すものであったと考えられる。

5.2 音色の変化に対する積雪の影響

本研究は、季節による周囲環境の変化に左右されにくい新しい歩行環境のデザインを目指すものであるから、冬季の積雪による影響を考慮しなければならない。

スピーカーの指向特性による音色の変化は周波数ごとの直接音エネルギーの変化に起因するため、積雪による影響はない。一方、カラーレーションによる音色の変化は、直接音と反射音の干渉によって生じる。したがって、積雪時に連続的な定常音を流すと、雪の吸音性が影響し、反射音の音圧レベルが減衰することが考えられ、カラーレーションによる音色の変化を知覚できない場合も考えられる。

先行研究^[33]を参考に、新雪の吸音率は 0.8、圧雪は 0.5、凍結は 0.2^[40]と設定し、直接音の音圧レベルを 0 とした場合の反射音の音圧レベルの減衰レベルを計算によって求めた^[41]。音色の変化が最も知覚されやすいと考えられる地点 (スピーカーとの距離 2 m 以上) では、新雪の場合に反射音は -13dB まで直接音の音圧レベルに対して減衰する計算結果となった。これは、音色の変化を検知する限界値である -18dB^[45] よりも大きいため、新雪の場合でも音色の変化は知覚できると考えられる。

実際の積雪の影響を確認するため、実験場所を含めた 3 地点にて、冬季に実験条件を再現し音サインを流した。録音は各地点で 2 回ずつ行った (2014 年 1 月 24 日に実施、気温 0°、1 カ所目 (10 月実験場所) : 新雪、2 カ所目 : 圧雪、3 カ所目 : やや凍結)。結果、新雪が積もった実験場所ではカラーレーションによる音色の変化は聞こえなかった。しかし、その他の 2 地点では、ともに音色の変化を聴感的に確認できた。したがって、雪質などの諸条件が影響することもあるが、圧雪や凍結状態では積雪の吸音による影響が少ないことがわかった。

5.3 断続音と連続的な定常音のコンテンツ差異による誘導効果

各条件で音サインとして用いた 2 種類のコンテンツについて、それぞれの特徴と誘導効果を考察する。

断続音「ピヨピヨ」は、「ピ」「ヨ」というように、時間経過にともない音のスペクトルが変化するため、音色が変化し無音区間があるコンテンツであるといえる。一方、連続的な定常音「水のせせらぎ音」は、時間経過にかかわらず音のスペクトルが一定であるため、音色が変化しないコンテンツであるといえる。

このようなコンテンツの特徴と前節でのカラーレーションの知覚

との関係については、音色が変化する断続音はカラーレーションを知覚しにくく、音色が変化しない連続的な定常音はカラーレーションを知覚しやすいといえる。なぜなら、周波数特性が同様の 2 つの音でなければ干渉は生じにくいからである。カラーレーションは知覚されにくい断続音ではあるが、無音区間があることで、音サインが左右の耳に到達するまでの時間的なずれを知覚しやすく、方向感が得られやすいといった音サインとしての効果がある。

以上から、断続音のコンテンツは音サインの時間的なずれを利用してスピーカーの方向を知覚するのに適したコンテンツであり、連続的な定常音は音色の変化や音の大きさの変化を利用し、空間内で自らの位置を確認するのに適したコンテンツであると考えられる。

前稿で明らかにした①前方にある音サインを目標にして歩く、②通過した音サインには注意を示さない、③目標とする音サインの無音区間が長い場合には歩行方向が確認できず不安になるといった視覚障がい者の特徴を考慮すると、常に音が鳴っている連続的な定常音は、歩行中も手がかりとして利用しやすく、視覚障がい者に安心感を与えることができるため、音サインのコンテンツとして好ましいと考えられる。しかし、ヒアリング結果からもわかるように、音サインのコンテンツ差異を視覚障がい者は認識しており、それぞれの特徴を活かし、手がかりにしている。ただし、条件 3 の偏軌量が条件 2 よりわずかに大きくなった理由として、被験者 1 の発言 (表 3 (b)) にもあるように、断続音と連続的な定常音が混在する場合、両方の音を聞こうとするあまり、それぞれの効果を感じにくくなってしまったと推察される。

また、表 3 (c) では条件 3 を最も歩きやすいと回答した被験者が多いが、実際の歩行軌跡を照合すると、最も安定しているのは条件 2 である。すなわち、実際に直進歩行を高く維持しながら確実に歩けている条件が必ずしも主観的に歩きやすいと評価されるわけではない。視覚障がい者の心理として、歩行方向と自分の位置を確認できる 2 種類の音サインが混在した条件が好まれる傾向にある。

さらに本実験では、連続的な定常音に対する意識を「学習」によって高められたといえ、音の大きさの変化に気づきやすくなったといえる。同時に、学習時のスピーカー直下での音の大きさが基準となり、スピーカーと自身の相対的な距離や左右への偏軌に気付きやすくなったといえる。そのため、視覚障がい者は素早く修正ができるようになり、直進歩行を維持できたと推察される。

6. まとめ

本研究で得られた結果は以下の通りである。

1. コンテンツの異なる音サインが混在する場合、視覚障がい者は断続音と連続的な定常音を個々に捉えることができ、断続音は主に歩行方向の確認、連続的な定常音は音源の位置との相対的な自身の位置の確認のために利用している。
2. 断続音では、無音区間は歩行方向を予測して歩かなければならず、歩行軌跡に乱れが生じる可能性が高い。
3. 連続的な定常音は直進歩行の確認をいつでもとれるため、視覚障がい者は安心感をもちながら歩行できる。
4. 視覚障がい者は、連続的な定常音に対する意識を学習によって高められ、音の大きさの変化とスピーカとの相対的位置を関連づけて捉えることができる。

5. 連続的な定常音をコンテンツとして用いた場合、視覚障がい者は音の大きさの変化のみならず、スピーカーの指向特性による音色の変化やカラーレーションによる音色の変化をも歩行中の手がかりとして利用できる。
6. カラーレーションによる音色の変化は、スピーカーの主軸垂直下向配置条件と連続的な定常音を音サインのコンテンツとして用いることで、直接音と道路面からの反射音が干渉し、生じる。
7. 音色の変化は積雪状態でも聴覚的に知覚可能であり、視覚障がい者の単独歩行中の手がかりとして通年の利用を期待できる。

以上、2種類のコンテンツの差異が視覚障がい者の歩行誘導に与える影響を検証した結果、一定幅の歩行路内における視覚障がい者の直進歩行を促すための音サインのコンテンツとして、連続的な定常音の有用性を明らかにした。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、歩行実験にご協力頂いた皆様に深く感謝致します。また、実験空間の音環境の分析、結果の考察について、東京工業大学清水寧連携教授に貴重なご指導を頂きましたこと、この場を借りてお礼申し上げます。

本研究は科研費補助金(B)23360265より助成を受けたものであり、記して謝意を表します。

注

- 注 1)3dB 増加すると音のエネルギーは 2 倍となり、人間が音の大きさの変化に気付く最低限の値である。6dB で音のエネルギーは 4 倍となり、音の大きさの変化はわかりやすい。
- 注 2) 櫛形フィルタと呼ばれ、ピークの周波数密度は時間差 (ΔT) に依存し、スピーカーから遠いほど (時間差小) 密度は高くなり、スピーカーに近いほど (時間差大) 低くなる。そして、その時間差以上に継続する連続音 (すなわち水のせせらぎ音) が櫛形フィルタを通過するとフィルタの周波数密度の変化に連動してカラーレーションが生じ、櫛形フィルタのピークの繰り返し周波数 (1/ΔT) の音を認識することが Kuttruff ら⁷⁾の研究で知られている。
- 注 3) 積雪と音の関係については、これまで積雪面上の音響伝搬特性や吸音率など、古くから実測結果が報告^{8), 9)}されており、雪質 (すなわち密度) や厚さによって吸音率は異なるが、その特性は多孔質吸音材料と同様な減衰係数の周波数特性であることが明らかになっている。雪は新雪からしまり雪まで密度がおよそ 0.01 ~ 0.5g/ cm³程度に変化する。高田ら¹⁰⁾は、積雪上の音の伝播を積雪時と積雪のない時とで測定し比較しているが、積雪面の固い時(密度 0.35~0.50g/ cm³) の音の伝播は積雪のない場合と極めて似ていることを明らかにしている。また、大垣ら¹¹⁾は積雪の垂直入射吸音率は密度が小さいほど、周波数が高いほど大きくなる傾向にあり、密度 0.45g/ cm³の時は垂直入射吸音率が減少する傾向にあり、積雪表面での反射が増大することを明らかにした。したがって、アイスバーンのような凍結した状態では吸音率は極めて小さくなり、コンクリートに近い反射特性をもつといえる。近年の岩瀬ら^{12), 13)}の研究では、自然積雪 50 cm の場合、低い周波数から高音域まで高い吸音特性もち、また圧雪すると吸音率は全般的に 50 %程度に低下することが報告されている。

- 注 4) まず、雪の吸音率による反射音の音圧レベルの減衰を次式で求め、
反射音の音圧レベルの減衰 =10log10(吸音率)(式 5)
さらに、被験者とスピーカーとの場所における直接音と道路面からの反射音の距離減衰の差を式 6 により求めた。

$$\begin{aligned} \text{距離減衰の差} &= 10 \log_{10} \frac{(W / \text{反射音の伝搬距離}^2)}{(W / \text{直接音の伝搬距離}^2)} \quad \text{※ W は音源のパワーを示す} \\ &= 20 \log_{10} \frac{\text{直接音の伝搬距離}}{\text{反射音の伝搬距離}} \quad \text{.....(式 6)} \end{aligned}$$

理論上、直接音に対する反射音の音圧レベルは積雪の吸音率により減衰する減衰レベルと距離減衰による減衰レベルの和となる。計算結果を下表に示す。

注 5) 直接音と反射音との干渉により形成される櫛形フィルタがカラーレーションを発生するかどうかは時間差 (ΔT) と極大値の大きさに依存するが、カラーレーションを知覚できる反射音の絶対閾値は前出の Kuttruff らが求めており、0.01 秒程度の反射音が遅延する場合が最も感度が高く、限界値は -18dB である。式 3 により本実験における反射音の遅延時間は 0.004 から 0.009 秒である。

積雪による反射音の音圧レベル減衰 (直接音の音圧レベルは 0)

スピーカーとの距離	吸音率減衰 新雪 0.8 a	距離減衰 b	全体の減衰 a+b	吸音率減衰 圧雪 0.5 a'	距離減衰 b	全体の減衰 a'+b	吸音率減衰 凍結 0.2 a''	距離減衰 b	全体の減衰 a''+b
5m	-7.0	-2.2	-9.2	-3.0	-2.2	-5.2	-1.0	-2.2	-3.2
4m		-3.0	-10.0		-3.0	-6.0		-3.0	-3.9
3m		-4.1	-11.1		-4.1	-7.2		-4.1	-5.1
2m		-5.9	-12.9		-5.9	-8.9		-5.9	-6.9
1m		-8.2	-15.1		-8.2	-11.2		-8.2	-9.1
0m		-9.5	-16.5		-9.5	-12.6		-9.5	-10.5

参考文献

1) 福田菜々, 大野隆造: 音サインおよび壁の存在が直進歩行に及ぼす影響 – 積雪寒冷地における視覚障がい者の単独歩行に関する研究 – その 1 –, 日本建築学会計画系論文集, 第 78 巻, 第 686 号, pp.783-790, 2013.4

2) 福田菜々, 大野隆造, 那須聖: 積雪路面上の直進歩行を誘導する音サインの効果 – 積雪寒冷地における視覚障がい者の単独歩行に関する研究 – その 2 –, 日本建築学会計画系論文集, 第 79 巻, 第 697 号, pp.659-667, 2014.3

3) 永幡幸司, 山内勝也, 山田麻理: 視覚障がい者が音響信号及び盲導鈴に求める音量について, 日本騒音制御工学会, 日本騒音制御工学会秋季研究発表会講演論文集, pp.237-240, 2005.9

4) Seiichiro Namba, Sonoko Kuwano, Kanjiro Kinoshita and Kenji Kurakata : Loudness and timbre of broad-band noise mixed with frequency-modulated sounds, J. Acoust Soc. Jpn. (E)13, 1, pp.49-58, 1992

5) 関喜一: 音サインの標準化と今後の課題 (視覚障がい者の誘導), 交通エコモ財団バリアフリー推進研究会第 2 回勉強会資料, 2013. 6

6) 伊福部達, 三浦貴大: 音による「気配知覚」, 日本音響学会聴覚研究会資料, Vol.39, No.3, 2009

7) H.Kuttruff: Room Acoustics, Fifth Edition, CRC Press, 2009. 5

8) 石田完, 小野寺重男: 積雪の吸音率について, 低温科学, 物理篇 12, pp.17-24, 1954

9) 石田完: 積雪の音響特性, 低温科学物理篇 22, pp.59-72, 1964

10) 高田実, 大河内重信, 那須伝夫: 雪の吸音率と雪面上の音の伝播について, 日本音響学会誌, 第 10 巻, 第 1 号, pp.23-27, 1954

11) 大垣正勝, 竹村英夫: 積雪中の音速と垂直入射吸音率の測定, 日本音響学会誌, 第 46 巻 9 号, pp.723-727, 1990

12) 岩瀬昭雄, 佐久間哲哉, 吉久光一: 積雪面上における音響伝搬特性に関する実測—自然積雪と圧雪面上との比較調査—, 日本建築学会北陸支部研究報告集, 第 41 号, 1998

13) 岩瀬昭雄, 佐久間哲哉, 吉久光一: 積雪面の音響伝搬特性に関する実測調査結果について, 日本建築学会北陸支部研究報告集, 第 42 号, pp.179-182, 1999. 7

14) 草間祥吾: ポーラスコンクリートの積雪寒冷地の適用に関する研究, 土木研究所, 2010

VARIETIES OF NAVIGATIONAL EFFECTS CAUSED BY SOUND CONTENTS

A study on the independent travel of visually impaired persons in a cold and snow region Part 3

Nana FUKUDA^{}, Ryuzo OHNO^{**} and Satoshi NASU^{***}*

^{*} Lecturer, Faculty of Engineering, Hokkaido University of Science, Dr. Eng.

^{**} Prof., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

^{***} Assoc. Prof., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

In winter, the conditions of streets get bad and change considerably each day in snowy regions and the visually impaired have many troubles when they walk independently. They can unconsciously lose their direction and get lost when they walk by themselves because snowbank gets their way and braille blocks are no longer useful. They also have to be more careful not to veer off track from pavement as snow blurs the boundary between pavements and roads.

Considering these problems in winter, this paper attempts to create a guidance system, especially one which works in regions with heavy snowfall, to assist the visually impaired with walking safely and accurately from block to block on streets using their own senses.

An outdoor experiment with nine visually impaired people (one is low-vision, and the others are all blind) was conducted to investigate the navigational effect of sound cues. Loudspeakers were placed at a height of 3m, pointing vertically toward the ground at 10m intervals (which was wider than the coverage area of a loudspeaker). To select appropriate sound cues for experimental stimuli, we first recorded the background noise of the experimental site, and analyzed the frequency characteristic of it. Secondly, we selected two sound cues whose frequency characteristics were different from that of the background noise, so that subjects can distinguish those stimuli even with smaller volume. One stimulus was birds' tweet, which has been used in traffic signals for many years to guide the visually impaired crossing the streets safely at junctions, and the other was the sound of a creek. These two stimuli were used individually or mixed in three different conditions. Condition one was only birds' tweet, condition two was the sound of the creek, and condition three combined both sounds. However, since using the stationary continuous creek sound as guide to walk straighter was something new to subjects, first we had subjects walk the experimental course without any instruction. Shortly thereafter, we explained the acoustic field that stationary continuous sound creates, taking individual subjects to the experimental course and having them stand at various points, such as right under the loudspeakers, one-meter away from a loudspeaker, and so on, as training.

The results showed that both sound stimuli can guide the visually impaired to walk straight, but the deviation of subjects' paths were smaller and more consistent when the creek sound was used. Unlike conventional intermittent birds' tweet, the continuous nature of the creek sound seems to create a "sound route" more effectively. Subjects tend to use each type of sound cue separately: birds' tweet is used to check for the direction while a creek sound for the localization. Moreover, subjects were able to pick up the timbre change caused by coloration as well as volume change of the continuous sound as clues to walk within the sound route, while it is hard to pick them up from the intermittent sound. It was also revealed that sensitivity to the creek sound could be enhanced through training, and subjects could more accurately sense the distance and orientation of the loudspeakers, which help them realize their current location in the experimental course.

(2014年5月9日原稿受理, 2014年8月22日採用決定)