国産スギ材を利用した
バリアフリー歩道開発に向けた
舗装材の音響特性の比較分析

2017 年

地球環境工学科
建設都市工学コース
尾木悠哉

目次

英文 abstract
概要
1. 序論・・1
1.1 背景
1.2 目的
1.3 本研究の位置付け
1.4 本研究の流れ
2. 既往の研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・6
2.1 既往の研究
2.2 本研究の位置付け
3. 材料試験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・9
3.1 試験目的
3.2 試験概要
3.3 試験方法
3.4 試験手順
3.5 試験結果および考察
4. 官能評価試験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・15
4.1 試験目的
4.2 試験概要
4.3 試験方法
4.4 試験手順
4.5 試験結果および考察
5. 官能評価試験結果の定量的比較試験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・23
5.1 試験目的
5.2 試験概要
5.3 試験方法
5.4 試験手順
5.5 試験結果および考察
6. 結論・・30
謝辞

1. 序論

1.1 背景

2005 年、国土交通省の公表したユニバーサルデザイン政策大綱 1)では，『可能な限り全ての人が』使いやすい生活環境の整備を目指すとしている．高齢化社会となった日本において，特定のバリアを除くための現在のバリアフリー整備が，他の利用者にはバリアとなる可能性を秘めている．ユニバーサルデザインは障害の有無を問わず多様なニーズに合わせた整備を進めるために，そのニーズを持つ多様な利用者の参加が必要であることを示している．

日本での視覚障害者を誘導するためのバリアフリー整備は，1967 年の岡山県における視覚障害者誘導用ブロック(以下，誘導用ブロック)の設置が発端で、現在では広く設置されている 2)．視覚障害者は足裏の感覚や白杖を用いることでその凹凸を認識している．一方で，車椅子利用者や高齢者にはその凹凸が障害となることが指摘されている．ユニバーサルデザインの観点から，視覚障害者を誘導する機能は維持しつつ，多様な利用者のバリアを除く歩道の研究や開発がなされている．

筆者の所属する九州大学景観研究室では，2005 年からの長崎市三和町における長崎県栄上為石線の拡幅事業にあたって，地元住民とともに新しい形のバリアフリー歩道の開発に取り組んだ．バリアフリー歩道設計の検討チームでは既存の誘導用ブロックの問題点として，高齢者や車椅子利用者にとっては誘導用ブロックの凹凸がバリアになっている点，全盲者は細い誘導ブロックから逸れてしまう危険性がある点が挙げられた．以上の点を踏まえ，誘導用ブロックより凹凸の小さい 2 種類の舗装面を採用し，その粗度の違いから視覚障害者を誘導するバリアフリー歩道が提案された．設計と試験舗装と検証を繰り返したのち，インターロッキングブロックとコンクリートを舗装面に採用した歩道(**図 1-1**)が 2011 年に完成した．このバリアフリー歩道を『面誘導方式バリアフリー歩道』と呼ぶ．

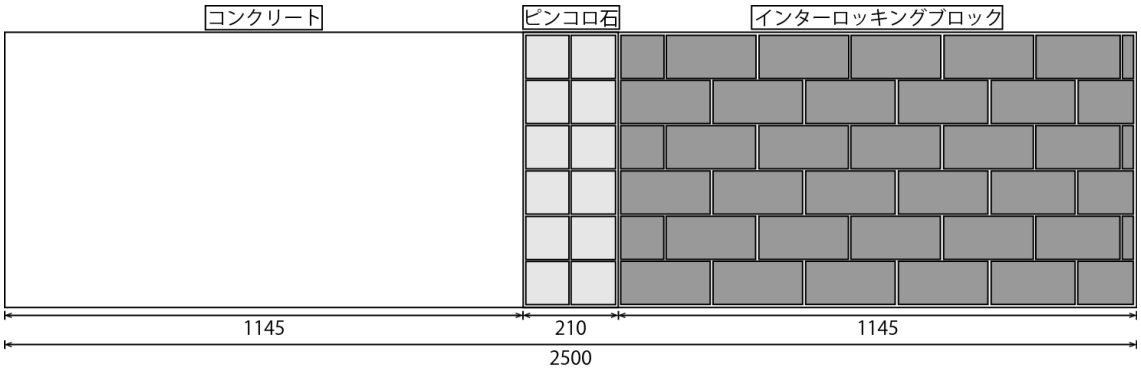


図 1-1 面誘導方式バリアフリー歩道平面図(TypeA)

表 1-1 に現行の誘導用ブロックの問題点とその問題解決のための面誘導方式バリアフリー歩道の設計意図を示す．**表 1-1** にある凹凸，色彩の問題に加え，施工コストを通常程度に抑えることも方針の 1 つである．

表 1-1 誘導用ブロックの問題点と問題解決のための設計意図

	視覚障害者		車椅子利用者	健常者
	全盲者	弱視者		
誘導用ブロックの従来の問題点			ブロックの凹凸が負担になる	景観的問題
誘導用ブロックの利用方法	足裏や白杖の触感覚を元に歩行	ブロックと路面の輝度比を元に歩行		
設計意図	2 種類の舗装面の粗度の違いで誘導	2 種類の舗装面の輝度比で誘導	IL 含む舗装面全体の凹凸を軽減	目立つ配色を回避

凹凸に関する問題

色彩に関する問題

2013 年からは施工された面誘導方式バリアフリー歩道の事後検証を行った．当初の設計意図は舗装面の粗度の差を足裏や白杖で認知してもらうことで視覚障害者を誘導するものであった．しかしこの検証では，特に全盲歴の浅い全盲者や歩行訓練の経験が少ない視覚障害者を誘導するのが難しいことが明らかとなった．一方で，ウッドデッキとコンクリートの組み合わせ(TypeB，**図 1-2**）で同様の実験を行った際，足裏の感覚ではなく白杖で路面を叩いたときの音の違いを利用して誘導ができるのではないかという視点が視覚障害者へのヒアリング調査で示された．

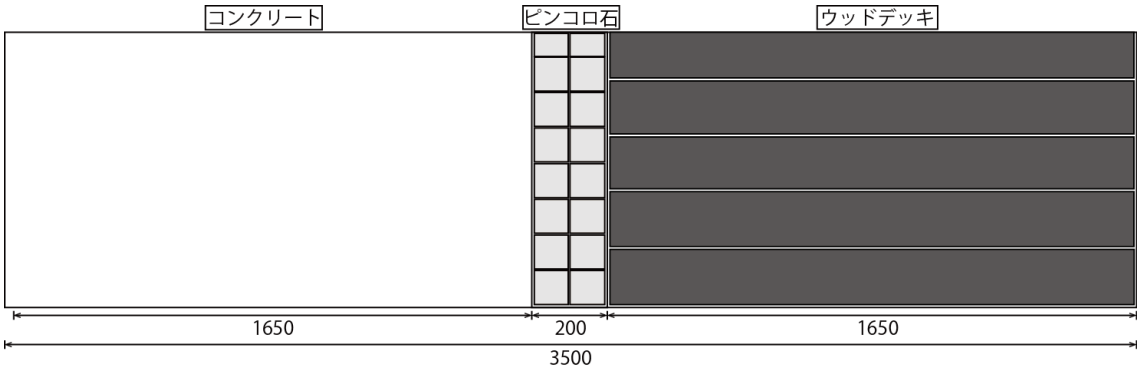


図 1-2 面誘導方式バリアフリー歩道平面図(TypeB)

1.2 目的

本研究は視覚障害者を音で誘導する面誘導方式木製バリアフリー歩道の実現に向け，既存舗装材料の音響特性を把握すること，およびウッドデッキや道路舗装材を叩いたときの音のうち，人間の聴覚が音の違いを認識できる舗装材料の組み合わせを調査することを目的とする．まず，視覚障害者の用いる白杖による打音に関して，木材および道路舗装材料の音響特性を把握する．次に，実際のウッドデッキ歩道と道路を模した試験体を叩いたときの音の違いを，人間がはっきり認識できる組み合わせが存在するかを官能評価試験によって検証する．最後に，この官能評価試験で得た結果の裏付けとして，官能評価試験で用いる試験体の音響特性を定量的に把握し比較を行う．

1.3 本研究の位置付け

視覚障害者を音で誘導する新しいバリアフリー歩道の開発を目的とし，H28 年度に行った本研究を含め H30 年度までの 3 年間の研究計画を組む．その研究フローチャートを**図 1-3** に示す．1 年目の 28 年度では，舗装材料の基礎的な音響特性を把握することを主目的とし，材料の音響試験と健常者に対する官能評価試験を行う．29 年度以降は本研究での成果を元に，実際に歩行することを想定した試験として視覚障害者に対する官能評価試験や歩行試験，およびその結果に基づく歩道の設計を行う．

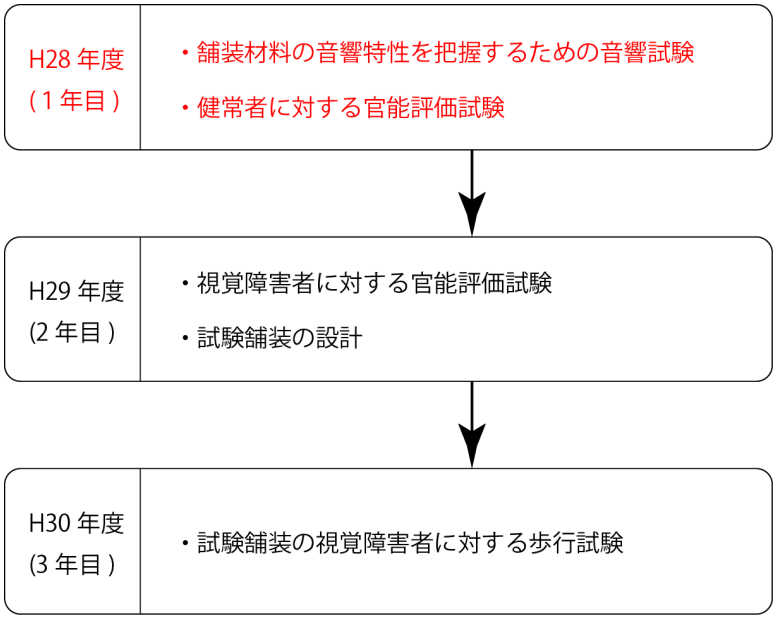


図 1-3 研究計画

1.4 本研究の流れ

1 章では，本研究を始めるにあたって既存の誘導用ブロックの経緯および問題点を述べる．また，筆者の所属する景観研究室が行った新しいバリアフリー歩道の開発に関する長崎県三和町のユニバーサルデザイン歩道開発の事例についても触れる．

2 章では，既往研究として視覚障害者の誘導に関する研究を取り上げる．誘導用ブロックに代わる新しいバリアフリー歩道開発の研究についても触れ，これまでにどのような視点で問題点解決を図ったかを調べる．

4～6 章では，本研究で行った実験の内容およびその結果について述べる．4 章では，木材および既存の道路舗装材料の音響特性を把握する実験について述べる．5 章では，4 章で得た音響特性データを元に試験体を作成し，健常者に対して官能評価試験を行った．6 章では，5 章で用いた試験体について音響特性を把握し，人間の聴覚による結果と実際の音響特性との比較を行う．

7 章では，本研究の結論として実験から導かれる考察および今後の課題を述べる．

参考文献

1) 国土交通省:ユニバーサルデザイン政策大綱, 2005

2) 日本盲人会連合 HP 点字ブロックについて(アクセス日:1 月 21 日)
http://nichimou.org/impaired-vision/barrier-free/induction-block/

２章 既往の研究

2.1 既往の研究

視覚障害者の誘導に関する主な研究及び開発の経緯を，章末にフローチャートで示す.

本章では，音で誘導する木製バリアフリー歩道の開発にあたって次の観点から既往研究を整理し，本研究の位置付けを確認する。

⑴音による視覚障害者の誘導に関する研究

日本盲人会連合によると，音による視覚障害者の誘導は音声信号と音サインの大きく２つに分類される．前者は人の声で言葉を用いて誘導を行うもので，駅など案内が複雑となる公共施設で多く見られる設備である．後者は電子音など非言語のもので誘導を行うもので，屋外では歩行者用信号の発するカッコー・ピヨピヨと鳴る音，屋内では家電製品のピッと発する電子音などの設備がある[1)]．日本工業規格(以下, JIS)では音サインに関して基本周波数や音量に関する記述がなされている[2)].

視覚障害者の音を認識する過程に関する研究は太田らや永幡によって行われている．太田らは，視覚障害者が歩く際の音に関する情報が音の聞こえ方に依るものと音の種類に依るものに分類できるとした．さらに太田らは，前者は障害物からの音の反射により空間や障害物を認知しているということ，後者は視覚障害者が街を歩く際に自動車の音など交通流の音を利用していることを明らかにした[3)-5)]．永幡は視覚障害者が街の音から場所を特定するまでの過程が，大雑把な特徴を捉えてから具体的な場所を特定する「階層的」なものと，音すべてを総合的に判断して特定する「並列的」なものの２種類があり，人によってどちらかを採用していることを明らかにした[6)].

視覚障害者の認識に関する過程の研究を元に,音サインを用いた視覚障害者の誘導に関する研究が瀬野ら(2002)や福田ら(2013)によって行われている.瀬野らはある目標地点に音源(音サイン)を設置し，視覚障害者をその目標地点付近へ誘導することができるかを検証し，視覚障害者の音源への接近に一定の効果があることが明らかになった[7)]．福田らは連続的な非言語の定常音を発することによって視覚障害者を誘導するシステムの開発を行った.

現在の音による視覚障害者の誘導では,視覚障害者が歩くコースに対してあらかじめ音源を設置し接近を促す形を取っている．本研究は，白杖で歩道を叩いたときの音を目標に視覚障害者に歩いてもらうものであり，事前に音源を設置するという点では共通しているが，木材と道路舗装材の音響性質を把握した上で，両者の判別ができるかを検証する必要がある.

⑵バリアフリー歩道に関する研究

前章でも触れた通り，現在の誘導用ブロックの凹凸は車椅子利用者や高齢者の歩行の障害となっている．この障害を軽減するため，様々な側面からの研究がなされている．

誘導用ブロックそのものに関する研究は中村らや柳原らによって行われている．中村らは，現行の誘導用ブロックの JIS の規定にある突起の高さを低くしても，視覚障害者の誘導機能を損なうことがないことを明らかにした．柳原らは点状突起に着目し，その突起の配列変更および増設することでさらにその高さを低くできると報告している．

誘導用ブロック自体ではなく，路面の材質の違いを利用して白杖および足裏の路面に対する触感覚によって視覚障害者を誘導する歩道の研究も存在する．この研究は横山らや柳原らによって行われている．本研究の契機となった栄上為石線整備事業における三和ユニバーサルデザイン歩道開発も，歩道の路面を 2 種類の材質を用いて設計，施工されたものである．

⑶官能評価試験に関する研究

官能評価試験(官能試験とも．以下，官能試験)とは人間の五感(触覚，視覚，嗅覚，味覚，聴覚)を用いて試料を評価することを指す．特に，試料の差異を評価することあるいは差異を検出できるかを調査することを分析型官能試験，人が一般的に好む試料を調査することを嗜好型官能試験という．国際標準規格 ISO では官能試験の適用範囲を食品分野のみに限定しているが，JIS では全工業製品まで拡大されている．

視覚障害者を対象とする官能試験は横山ら [8]や布川ら [9]によって行われている．横山らは白杖を用いたときの路面や床の変化の認知度合は，凹凸の大きさの変化，あるいは凹凸のパターンの変化によって影響されるとしており，凹凸のパターンの変化によって生じる加速度振幅を用いて物理量で表現している．布川らは，視覚障害者がものの硬度やテクスチャーを推測するのに使われる情報が何であるかを明らかにするため，マグニチュード推定法を利用した複数の実験を行った．(マグニチュード推定は官能試験に用いる尺度の 1 つである比率尺度にあたる．同推定法は基準となる試料にあらかじめ決定した尺度内の一定の点数を与え，他の試料が基準の試料に対してどう感じたかを具体的な数値で示してもらうものである．例えば，基準となる A という試料が 10 点の硬さを持つと仮定し，その上で B が A の 3 倍硬いと被験者が感じた場合，B の硬さに関する点数は 30 点となる．）布川らは，白杖を用いて間接的に叩いたときの方が指先で直接的に叩いたときよりも硬度に関する感度が良いことや，硬度の情報が白杖で叩いたときの手に伝わる振動情報として伝達され判断材料となっていること，また試験体を叩くときに生じる音による聴覚情報も判断材料になっていることをそれぞれ明らかにした．本研究においては，後述する聴覚情報に関連する官能試験を行う際に振動情報が混在しないよう，実験者が白杖を持って音を発生させるものとした．

2-2 本研究の位置付け

本研究では，視覚障害者を音で誘導する新しいバリアフリー歩道実現に向け，木製舗装材と既存の道路舗装材料の音響特性を比較検証することを目的とする。

参考文献

1) 日本盲人会連合 HP 音サインの現状(アクセス日:1 月 21 日)
http://nichimou.org/impaired-vision/barrier-free/sound-sign/
2) JIS S 0014:2013　高齢者・障害者配慮設計指針-消費生活用製品の報知音-妨害音及び聴覚
3) 太田篤史，田村明弘:視覚障害者と地域音環境のあり方についての基礎的考察，日本建築学会大会学術講演梗概集，P241-242，1993
4) 太田篤史，田村明弘，鹿島教昭:視覚障害者の空間認知における地域音環境の役割に関する発達的研究，日本騒音制御工学会技術発表会講論集，P113-116，1995
5) 太田篤史，田村明弘，鹿島教昭:視覚障害者の未知空間の認知過程における聴覚情報の役割，日本騒音制御工学会技術発表会講論集，P.41-44,1996
6) 永幡幸司:視覚障害者が音で場所を特定する過程について，日本音響学会誌 56 巻 6 号 P.406-417，2000
7) 瀬野豪志，若宮眞一郎:104 視覚障害者が音サインを接近行為に利用する可能性,[No.02-14]日本機械学会第 12 回環境工学総合シンポジウム 2002 講演論文集 P.64-67，2002
8) 横山裕，馬場峰雄，横井健:凹凸の違いによる床の変化の認知度合の表示方法 白杖による床の変化の認知度合の表示方法（２），日本建築学会構造系論文集，第 73 巻第 629 号，1063-1070，2008
9) 布川清彦，関喜一,近井学,土井幸輝,井野 秀一: 白杖で対象を叩いた時に生じる音を用いた対象の硬さ判断における周波数分析の試み，電子情報通信学会技術研究報告 WIT，福祉情報工学 114(217)，39-44，2014

3 章 材料試験

3.1 試験目的

音は，その大きさ(音のレベル)，高さ，および音色の 3 要素から構成されている．本研究で取り扱う白杖で路面を叩く際の打撃音も同様であり，木琴や鉄琴が音板の長さや厚さを利用して音を弾き分けているように，音のレベルは白杖で叩くときの強さ，高さや音色は舗装材料の寸法，白杖の種類，あるいは路面の構造などあらゆる条件によって変動する．

本章では，バリアフリー歩道を検討･設計するにあたって必要となる，既存の道路舗装材料の基礎的な音響特性データを調査することを目的とする．

3.2 試験概要

(1)実施日程，場所

材料試験

実施日:2016 年 12 月 26 日，2017 年 1 月 17 日

実施場所:岡山県工業技術センター内無響室

(2)使用機材

音響計測システム:ブリュエル・ケアー社 PULSE3560 1 台

マイクロホン:ブリュエル・ケアー社 4189-B/C/L-001 型 2 台

3.3 試験方法

すべての音の計測を，マイクロホンを用いて行う．使用するマイクロホンは 3.15～20000Hz の音まで計測でき，人間の一般的な可聴域である 20～20000Hz を含んでいる．また，計測場所には無響室を選ぶ．**図 3-1** に示すように，無響室内での音は壁に設置された吸音材によって吸音され反射せず，試験体を叩いたときの音のうち壁方向に向かう音はマイクロホンによって計測されない．すなわち，マイクロホンの方向に向かう音のみを計測できるため，舗装材料の音響特性を把握するのに適当であると判断した．

録音したデータは音響計測システムを用いて周波数分析を行う．周波数分析とは，複数の周波数が混在した音に対し，周波数ごとの音のレベルを調べることである．白杖で路面を叩いた音をマイクロホンで録音したのち，FFT 分析および CPB 分析を行う．FFT 分析では，縦軸に音レベル軸(Pa)，横軸に時間軸(s)を取り，CPB 分析では縦軸に音レベル軸(Pa)，横軸に周波数軸(s)を取る．

FFT 分析によって得られるグラフでは，音量の時間変化を見ることができる．この時間変化を音量のエンベロープと呼ぶが，周波数の時間変化も含めた音のエンベロープが人間の聴覚に大きく影響し，音色の変化として捉えている [1]．このグラフにより，叩いた直後の音色の違いを捉えることができる．

CPB 分析によって得られるグラフ(**図 3-2** 参照)では，周波数ごとの音レベルを見ることができる．もっとも大きい音レベルを持つ周波数を特にピーク周波数と呼び，人間の聴覚にはこの周波数の音がもっとも卓越して聞こえる．すなわち，ピーク周波数の値が変われば，人間の耳に聞こえる音の高さも変動する．このグラフにより，材料ごとに変化する音の高さの違いを捉えることができる．

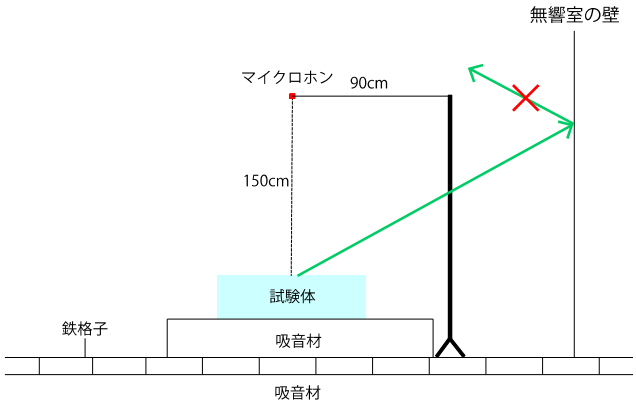


図 3-1 無響室内の音の流れ

3.4 試験手順

材質あるいは寸法の異なる木材および道路舗装材料の試験体を用意した(**表 3-1**). 無響室の中央に**図 3-2** のように試験体，吸音材およびマイクロホンなどの機材を並べた．マイクロホンの設置基準は，1 つが衝撃音を直近で計測でき，かつ叩く白杖が当たらないための十分な距離をとった位置，もう 1 つが試験体上面から人間の耳の位置を想定した高さ 150cm，かつ実験者が白杖で試験体を自然体で叩くことのできる距離 90cm の位置であり，前者を signal 1，後者を signal 2 とした．

もう一人の実験者が合図を出してから 3 秒間を録音時間とし，その時間内に白杖で試験体を 20cm の高さから叩いた．この録音を 1 つの白杖，試験体に対して 3 度行い，これを 3 種類の白杖(**表 3-2**)，および**表 3-1** の試験体に対して全ての組み合わせで行った．

表 3-1 材料試験使用試験体一覧

番号	材質	高さ	表面積	番号	材質	高さ	表面積
A1-3	スギ素材	90	90×90	F1-3	ヒノキエコアコール	38	90×90
A4-6	スギ素材	60	90×90	G4-6	ヒノキエコアコール	60	90×90
B	スギ素材	38	90×90	I	IL	60	90×90
D	スギエコアコール	38	90×90	S1	石材	60	90×90
E1-3	スギエコアコール	90	90×90	S2-4	石材	100	100×100
E4-6	スギエコアコール	60	90×90	R1	レンガ	60	90×90
	単位:mm			H1	コンクリート	100	100×100

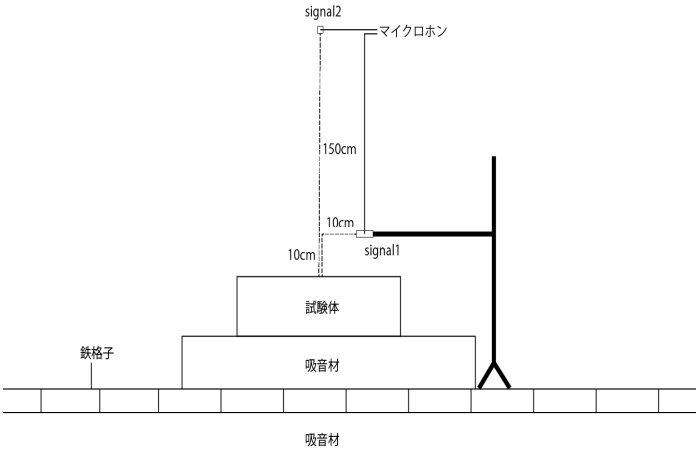


図 3-2 材料試験配置図

3.5 試験結果および考察

各材料を白杖で叩いたときの音響特性を明らかにするため，録音したデータは CPB 分析を使い，以下の点に着目してデータを整理した．なお，一部のグラフにおいてはピーク周波数前後での波形の違いをより明らかにするため，音レベルの微小な高周波数帯を省略した．

(a)材料厚さによる音の違い

表 3-1 に示した試験体のうち，厚さ 38，60，90mm のスギ素材についての結果を**図 3-2** に示す．波形の異なる 1000~5000Hz の範囲について，音レベルが異なる一方で，ピーク周波数の値はほぼ等しい．すなわち，人間の耳に聞こえる音の高さはほぼ変わらず，厚さによる音の違いはないと言える．

(b)材質による音の違い

表 3-1 に示した試験体のうち，厚さ 60mm のスギ素材，エコアコール処理を施したスギおよびヒノキ，IL，レンガ，石材についての結果を**図 3-3** に示す．波形の異なる 1000 から 8000Hz の範囲について，ピーク周波数はスギが 1600Hz 前後なのに対し，ヒノキは 2000Hz 前後，その他の舗装材料は概ね 3500 から 4000Hz 付近に位置している．すなわち，木材と既存の舗装材料では叩いたときの音の高さに特に違いがあると言える．

(c)白杖タイプによる音の違い

表 3-1 に示した試験体のうち，厚さ 60mm のスギ素材を 3 種類の白杖で叩いたときの音についての結果を**図 3-4** に示す．パームチップのみピーク周波数が異なり，音の高さの違いがあると言えるが，実験者 2 名は 3 種類間でそれぞれ音の違いを感じたことから，ラウンドチップの倍音の有無が音の違いに影響していると考えられる．

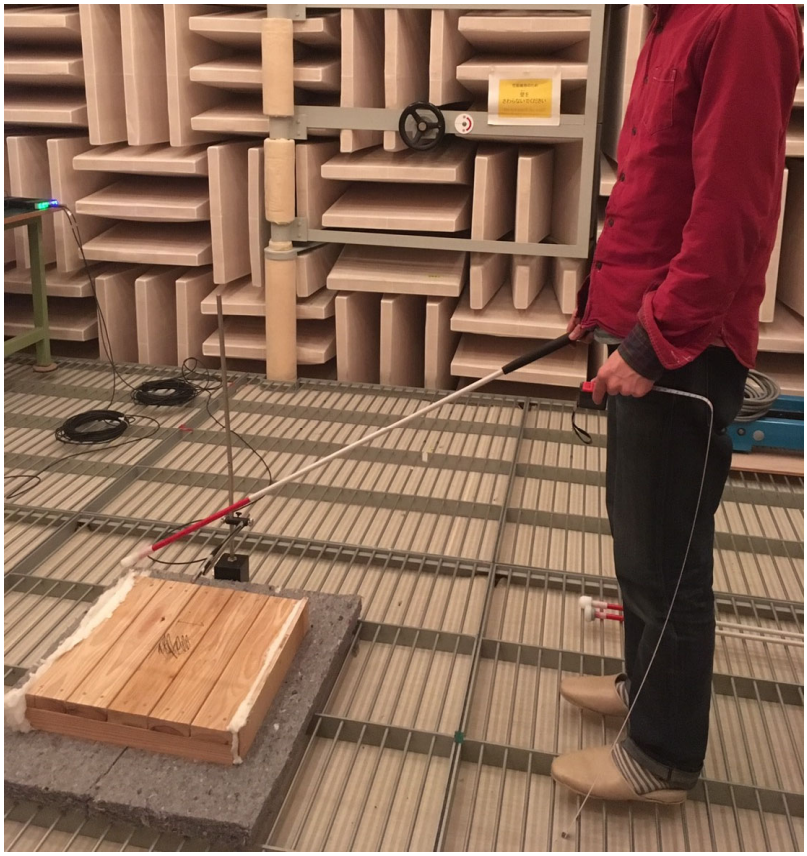


写真 3-1 材料試験の様子

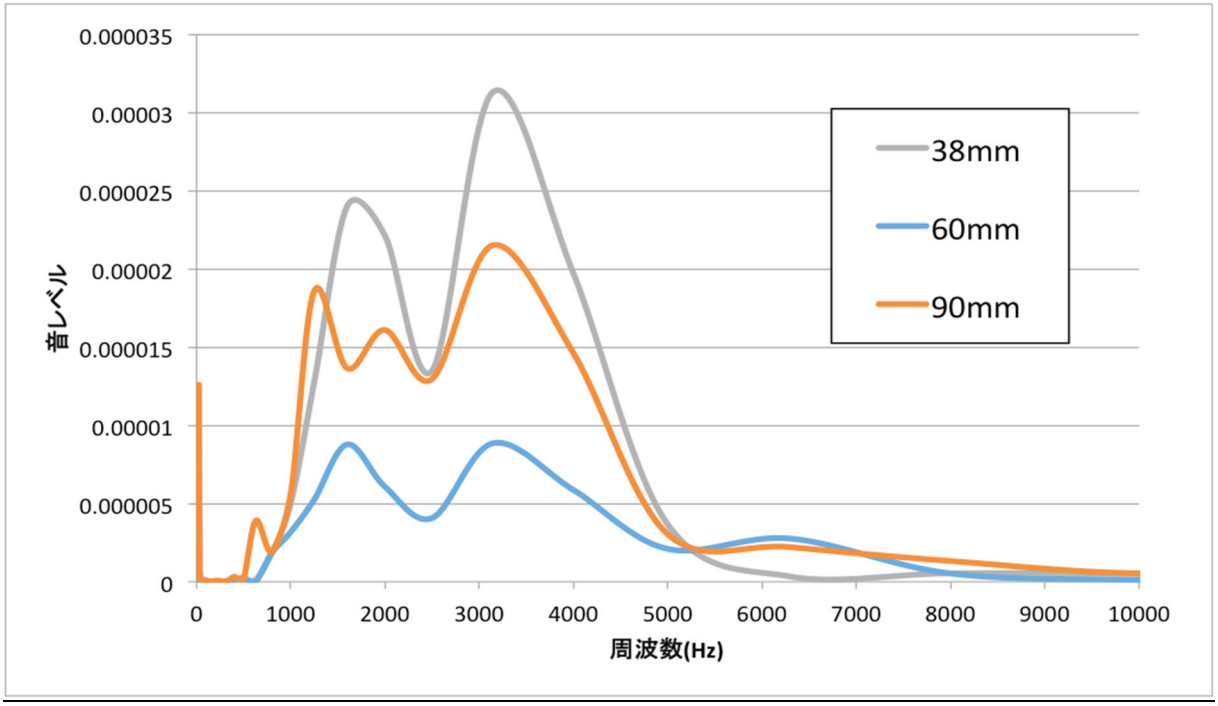


図 3-2 材料厚さによる周波数の違い

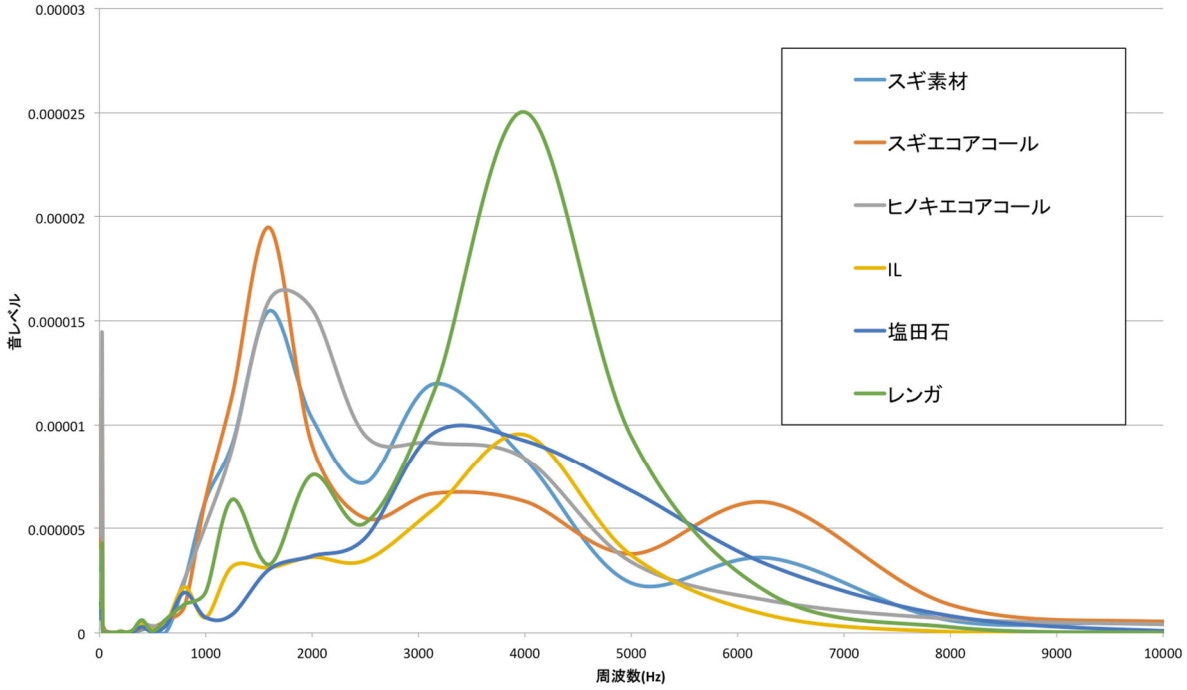


図 3-3 材質による周波数の違い

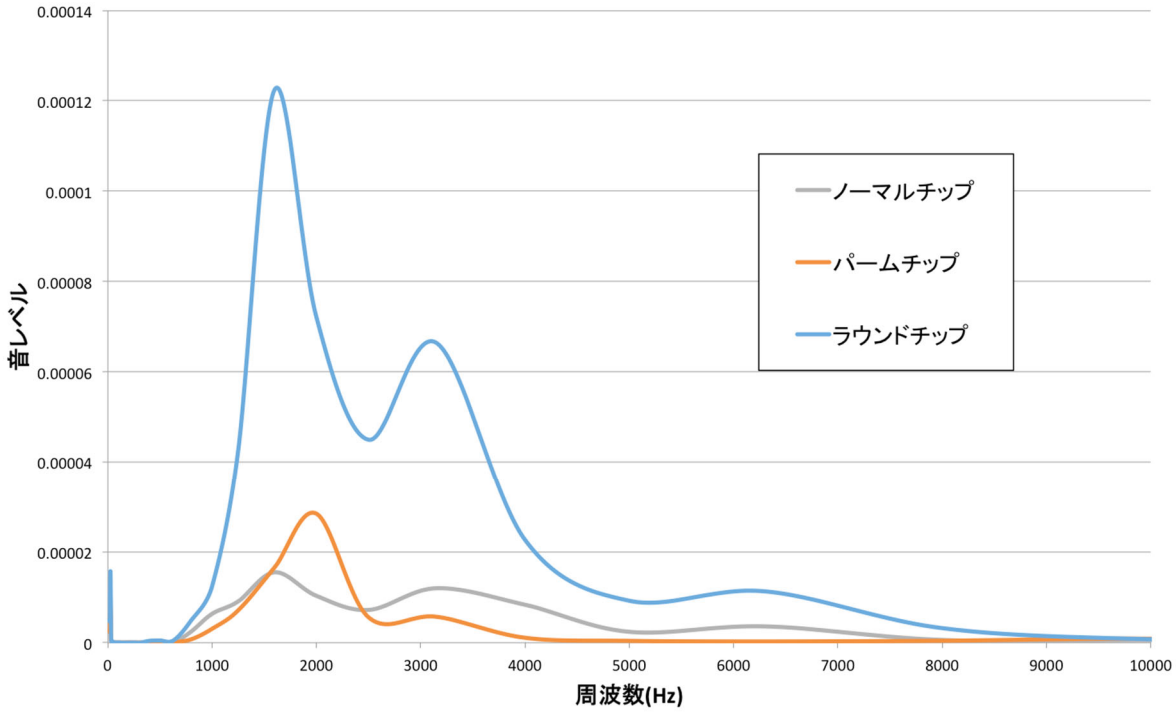


図 3-4 白杖タイプによる周波数の違い

4. 官能試験

4.1 目的

材料試験では白杖で叩いたときの音響特性を材料ごとに明らかにしたが，その材料をどのような構造で用いるかによっても音響特性が異なる．三和町面誘導方式バリアフリー歩道にも採用されたウッドデッキはデッキ材の下に空洞を持ち，空洞を持たない木材の構造体とは白杖で叩いたときの音響特性が明らかに異なる．これはウッドデッキを叩いた際に音の一部がデッキ材を透過し，地面から反射音として返ってくるため，空洞のないものより音が響いて感じるためである．

視覚障害者にとって，歩行の際の最重要項目は歩道と車道を判別できることである．すなわち，歩道の開発に際して，ウッドデッキでの歩道と道路舗装材での車道をそれぞれ白杖で叩いたときの音に判別できるだけの差異がなければ，視覚障害者を誘導するという点で不十分となる．この試験では，実際の路面での構造を模した試験体を用いて音の違いを認識できるか，またどのような判断材料をもって音の違いを認識するのかを明らかにする．

4.2 試験概要

試験実施日:2017 年 2 月 7 日

試験実施場所:九州大学伊都キャンパスウエスト 3 号館 8 階 816-2 号室

被験者:20 代の男性 9 名，女性 1 名，計 10 名

4.3 実験方法

本試験は音の違いを認識できるかを調べるため, JIS に規定された官能評価分析の中で 2 点試験法を選択する [1].

官能評価試験で用いる試験体を**表 4-1** に示す. 試験体はウッドデッキ 3 種類および既存の道路舗装材料 3 種類の計 6 種類で構成される. ウッドデッキは実験者が 6 種類の試験体の中から 2 種類を選択し, その 2 種類の試験体を白杖で叩いたときの音の違いを被験者に 4 段階評価(**図 4-1**)してもらう. さらに, 音の違いを感じた場合(**図 4-1** で 3 あるいは 4 を選択した場合), 簡潔にどのように違うかを答えてもらう. この手順を, 重複を含む 6 種類の全組合せ 21 通りについて行う.

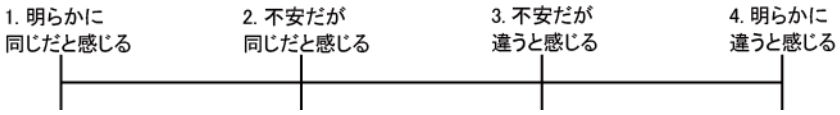
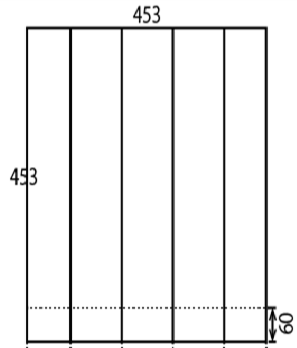
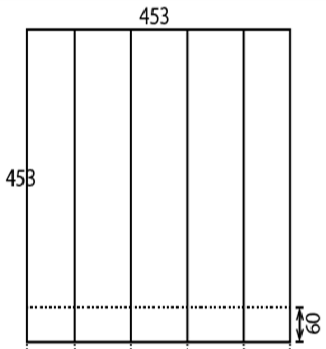
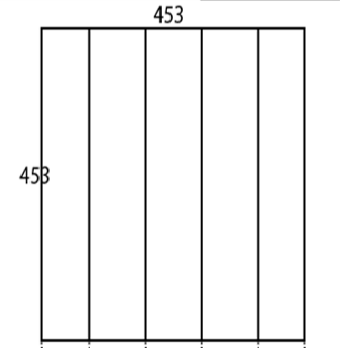
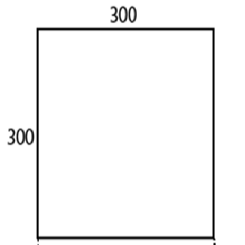
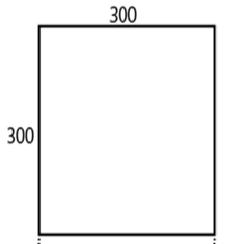
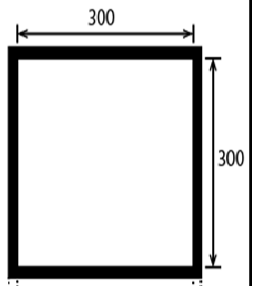
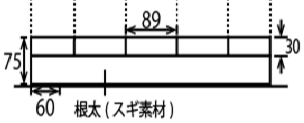
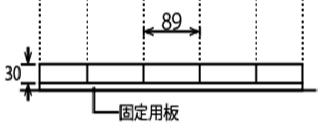
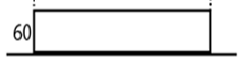
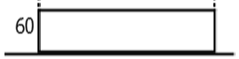
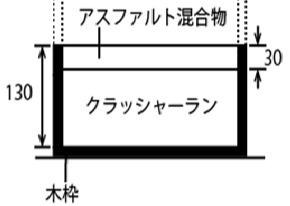


図 4-1 音の違いに関する 4 段階評価

4 段階評価で得られたデータは χ 二乗分布を用いて検定を行い, それぞれの試験体の組合せに対して明確に違うと判別できる組合せを調査する. また, その音の違いがどのような判断材料によってなされたかを音の三要素である a)音の高さ, b)反響音の有無, または c)その他に分類し整理する.

表 4-1 官能評価試験使用試験体詳細

	1. ウッドデッキ (A)	2. ウッドデッキ (B)	3. ウッドデッキ (C)	4. コンクリート	5. インターロッキングブロック	6. アスファルト舗装
平面図						
断面図						
材料	スギ素材 :30×89×453 5 本 スギ素材 :45×60×453 2 本	スギ素材 :30×89×453 5 本 軽量鉄骨 :45×60×453 2 本	スギ素材 :30×89×453 5 本 固定用板 :500×500×10 1 枚	コンクリート平板 300×300×60	インターロッキングブロック :300×300×60	アスファルト (マイルドパッチ) 300×300×60

4.4 試験手順

1. 本試験前に以下の手順を行った．試験体を公開しないため，この手順は試験体の置かれた部屋とは違う部屋で行った．

1)事前調査(年齢，性別，音楽経験，聴覚疾患)を行った(**別紙 1** 参照)．

2)試験手順についての説明をプリント配布(**別紙 1** 参照)および口頭で説明した．

2. 被験者にアイマスクを装着したのち試験体の置かれた部屋へ誘導し，被験者に試験体から 90cm の位置(**図 4-2**)へ立たせた．この距離は，実験者が白杖を握り白杖の先端を試験体の中心部に置いたときの，試験体中心部から実験者の耳までの距離である．

3. 実験者は 6 個の試験体から 4 個を図 4-2 のように並べた．実験者はここから 2 個を選択して白杖(ノーマルチップ)で叩いた.この 2 つの手順における組み合わせの順番は固定であり，**表 4-2** に示す通りである．これは，同じ試験体を叩いたときの音を連続で聞くことを極力回避する順番で組むためである．また，同じ試験体を選ぶ(重複を許す)組合せを含めた全組合せ 21 通りに対して連続で試験を行うにあたって被験者の疲労を考慮し，1 グループ 7 通りの 3 グループに分け，実験者が 2 度試験体のグループを入れ替える間に被験者はそれぞれ休憩を取ってもらうという形を取った．叩く回数はそれぞれ 1 回ずつ，叩く間隔は 2 秒，実験者が叩く位置は試験体から 90cm の位置で，被験者と試験体を挟んで向かい側である(**図 4-2**)．被験者は叩いた際の音を聞いて 2 つの音の違いを感じたか，違いを感じた場合どのように違ったかをそれぞれ口頭で自由回答させた．これを試験体の組合せを変え，重複を含めた 6 種類全組合せである 21 通りを行った．

写真 4-1 官能試験の様子

表 2 試験体を叩く順序

※丸数字は図 4-2 における丸数字に対応する位置に配置したことを示す.

第 1 グループ

①ウッドデッキ(根太あり) ②ウッドデッキ(軽量鉄骨)

③ウッドデッキ(根太なし) ④コンクリート

No.1	ウッドデッキ(根太あり)	ウッドデッキ(根太なし)
No.2	ウッドデッキ(軽量鉄骨)	ウッドデッキ(軽量鉄骨)
No.3	ウッドデッキ(根太あり)	コンクリート
No.4	ウッドデッキ(根太あり)	ウッドデッキ(軽量鉄骨)
No.5	ウッドデッキ(軽量鉄骨)	ウッドデッキ(根太なし)
No.6	ウッドデッキ(根太あり)	ウッドデッキ(根太あり)
No.7	ウッドデッキ(軽量鉄骨)	コンクリート

試験体入れ替え/休憩時間

第 2 グループ

①ウッドデッキ(根太なし) ②コンクリート

③インターロッキングブロック ④アスファルト

No.1	ウッドデッキ(根太なし)	インターロッキングブロック
No.2	コンクリート	コンクリート
No.3	ウッドデッキ(根太なし)	アスファルト
No.4	ウッドデッキ(根太なし)	コンクリート
No.5	コンクリート	インターロッキングブロック
No.6	ウッドデッキ(根太なし)	ウッドデッキ(根太なし)
No.7	コンクリート	アスファルト

試験体入れ替え/休憩時間

第 3 グループ

①インターロッキングブロック ②アスファルト

③ウッドデッキ(根太あり) ④ウッドデッキ(軽量鉄骨)

No.1	インターロッキングブロック	ウッドデッキ(根太あり)
No.2	アスファルト	アスファルト
No.3	インターロッキングブロック	ウッドデッキ(軽量鉄骨)
No.4	インターロッキングブロック	アスファルト
No.5	アスファルト	ウッドデッキ(根太あり)
No.6	インターロッキングブロック	インターロッキングブロック
No.7	アスファルト	ウッドデッキ(軽量鉄骨)

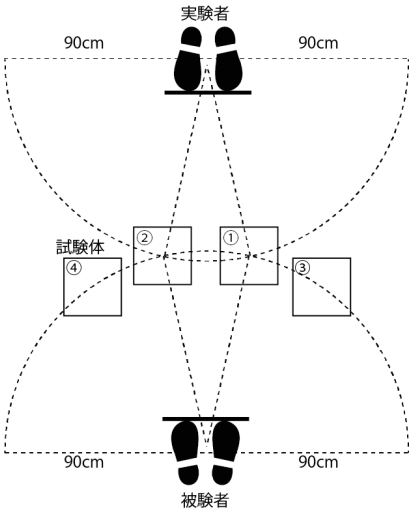


図 4-2 試験体配置図

4.5 試験結果および考察

表 4-3 に 4 段階評価の結果を示す．評価の数字は**図 4-1** の数字に従っている．また合計点はこの数字を得点とし，それぞれ足し合わせたものである(明らかに違うと答えた人が 10 人ならば 4×10=40 点となる)．

また，**表 4-4** には χ 二乗検定の結果と，検定によって明らかに違うと判定されたものに関してその判断理由を(a)音の高さ (b)反響音の有無 (c)その他に分類したものを示す．分類の基準として，(a)音の高さ は音の高低について，“高い”“低い” という表現を用いたもの，(b)反響音の有無は”響いた””空洞(がある)”という表現を用いたもの，(c)その他 には(a),(b)の基準に含まれない”硬い””軽い”といった材質に言及したもの，“重みがある”といった音色に言及したものをそれぞれ分類した．なお，重複した回答はそれぞれに分類している．例えば，「高くてよく響いている」という回答に対しては，(a), (b)それぞれに 1 点ずつ加えている．

表 4-3 4 段階評価結果

組み合わせ		1 明らかに同じ	2 不安だが同じ	3 不安だが違う	4 明らかに違う	合計点数
ウッドデッキ(根太あり)	ウッドデッキ(根太あり)	10	0	0	0	10
	ウッドデッキ(軽量鉄骨)	0	0	0	10	40
	ウッドデッキ(根太なし)	0	2	3	5	33
	コンクリート	0	0	0	10	40
	IL	0	0	0	10	40
	アスファルト	0	0	0	10	40
ウッドデッキ(軽量鉄骨)	ウッドデッキ(軽量鉄骨)	5	2	2	1	19
	ウッドデッキ(根太なし)	0	0	3	7	37
	コンクリート	0	0	0	10	40
	IL	0	0	0	10	40
	アスファルト	0	0	0	10	40
ウッドデッキ(根太なし)	ウッドデッキ(根太なし)	7	1	2	0	15
	コンクリート	0	0	0	10	40
	IL	0	0	0	10	40
	アスファルト	0	0	0	10	40
コンクリート	コンクリート	9	0	1	0	12
	IL	2	2	6	0	24
	アスファルト	0	4	4	2	28
IL	IL	8	2	0	0	12
	アスファルト	5	4	1	0	16
アスファルト	アスファルト	8	1	1	0	13

表 4-4 音の違いの判別理由

組み合わせ		音の高さ	反響音の有無	その他
ウッドデッキ(根太あり)	ウッドデッキ(軽量鉄骨)	5	4	2
	コンクリート	5	5	5
	インターロッキングブロック	6	4	3
	アスファルト	4	7	0
ウッドデッキ(軽量鉄骨)	コンクリート	3	5	6
	インターロッキングブロック	3	5	5
	アスファルト	2	6	5
ウッドデッキ(根太なし)	コンクリート	4	5	4
	インターロッキングブロック	5	3	6
	アスファルト	5	4	3

判断理由は重複解答あり.

参考文献

1) JIS Z 9080:2004 官能評価分析 -方法 http://kikakurui.com/z9/Z9080-2004-01.html
アクセス日:2017/1/29

5. 官能評価試験結果の定量的比較試験

5.1 目的

4 章の官能評価試験において，ウッドデッキの根太の種類や有無にかかわらず，既存の道路舗装材料との組み合わせでは被験者全員が”明らかに音が違うと感じる”と回答した．一方で，アスファルトとインターロッキングの組み合わせでは半数の被験者が”明らかに音が同じだと感じる”と回答するなど，道路舗装材料同士では音の違いを認識できないと判定された．この結果から，ウッドデッキ+既存の道路舗装材料の組み合わせは，道路舗装材料同士の組み合わせよりも音響特性の違いが大きいと推測できる．

本章では，官能評価試験で認識された音の違いはどのような音響特性の違いに因るものかを定量的に比較することを目的とする．

5.2 試験概要

(1)実施日程，場所

材料試験

実施日:2016 年 2 月 8 日

実施場所:岡山県工業技術センター内無響室

(2)使用機材

音響計測システム:ブリュエル・ケアー社 PULSE3560 1 台

マイクロホン:ブリュエル・ケアー社 4189-B/C/L-001 型 2 台

5.3 試験方法

定量的比較試験を行うため，試験体は官能評価試験で使用した試験体と同一のものを用いる．材料試験のときと同じく無響室内においてマイクロホンを用いて録音を行う．

録音したデータはFFT分析およびCPB分析を用いて音レベルの時間変化および周波数変化を捉えることにより，各試験体の音響特性を把握する．このデータをもとに，官能評価試験で被験者全員が”明らかに違う”と答えた各組み合わせ内の音響特性の違いを確認する．

5.4 試験手順

官能評価試験体での試験体(**表 4-1**)をそのまま用いた．3章の材料試験とマイクロホンの設置位置の基準や吸音材の大きさの基準は同様であり，試験体の大きさが異なることを除き，試験体の配置は**図 3-1** と同様とした．

録音の手順も，試験体が異なることを除いて3章の材料試験と全て同じである．

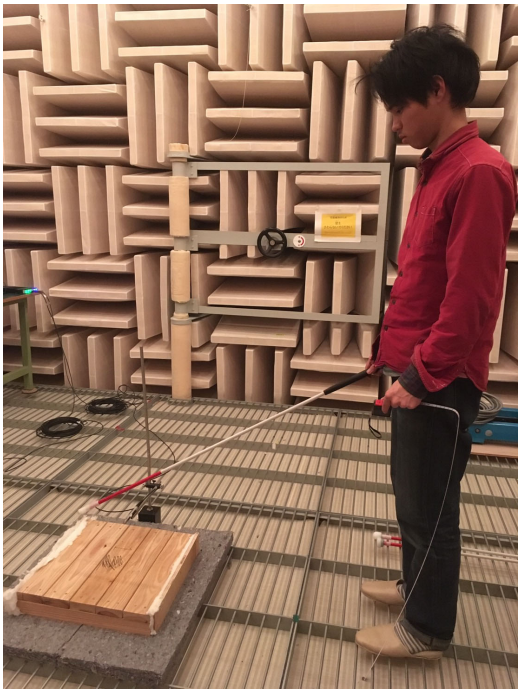


写真 5-1 試験の様子

5.5 試験結果および考察

FFT 分析，および CPB 分析を用いて録音したデータを整理した．

図 5-1(a)～(f)に FFT 分析による音レベル-時間図を，0.10～0.20s の範囲でそれぞれ示す．3 種類のウッドデッキについて，根太に軽量鉄骨を用いたウッドデッキ(B)が他の 2 種類に比べ叩いた際の音の大きさが小さいことが読み取れる．また，3 節で述べたエンベロープに関して，各試験体の音レベルはもっとも大きな t=0.11s 前後から徐々に減衰しているが，t=0.15s 付近において 3 種類のウッドデッキは道路舗装材料より音のレベルが相対的に大きく，ウッドデッキを叩いたときにより残響が感じられることがわかる．

図 5-2 に CPB 分析による音レベル-周波数図を示す．なお，10000Hz 以上の高周波数帯は各材料間に音レベルの違いがほぼなかったため，省略して示している．いずれの試験体もピーク周波数が異なるが，コンクリートは 2000Hz，IL は 2800Hz，アスファルトは 4000Hz であり，1000Hz 以内の範囲にピーク周波数を持つウッドデッキと大きな差を持つ．しかし，4 章での官能評価試験において，“明らかに違う”と認識されなかった IL とアスファルトの組み合わせでは 1200Hz の差を持つのに対し，“明らかに違う”と認識されたウッドデッキ(根太あり)とウッドデッキ(軽量鉄骨)の組み合わせでは 200Hz の差を持つことから，音の高さの違いが官能評価試験の結果に直結しているとは言い難い．

図 5-6 のうち，音レベル 0.00002Pa=20μPa は一般的な人間の最小可聴値，すなわち人間が聞き取れる最小の音レベルの音である．**表 5-1** にピーク周波数における音レベルの大きさを示す．これによると，ウッドデッキ(根太あり)が最小可聴値の約 27 倍，ウッドデッキ(根太なし)が約 33 倍であるのに対し，ウッドデッキ(軽量鉄骨)やコンクリート，インターロッキングブロックは最小可聴値の約 2～3 倍，アスファルトは最小可聴値を下回っている．打撃音は複数の周波数の音が混合しており，ピーク周波数の大きい音についてはこの周波数の音が卓越して聞こえるのに対し，ピーク周波数での音レベルが小さい音，または他の周波数との音レベルとの差が小さい音については卓越して聞き取ることができず，周波数の違い，すなわち音の高さの認識が正確に行われなかったと考えられる．

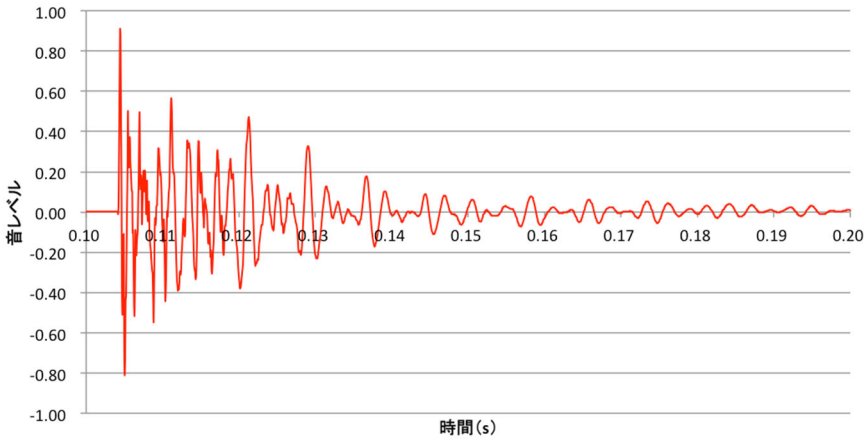


図 5-1(a) 音レベル-時間図(ウッドデッキ(根太あり))

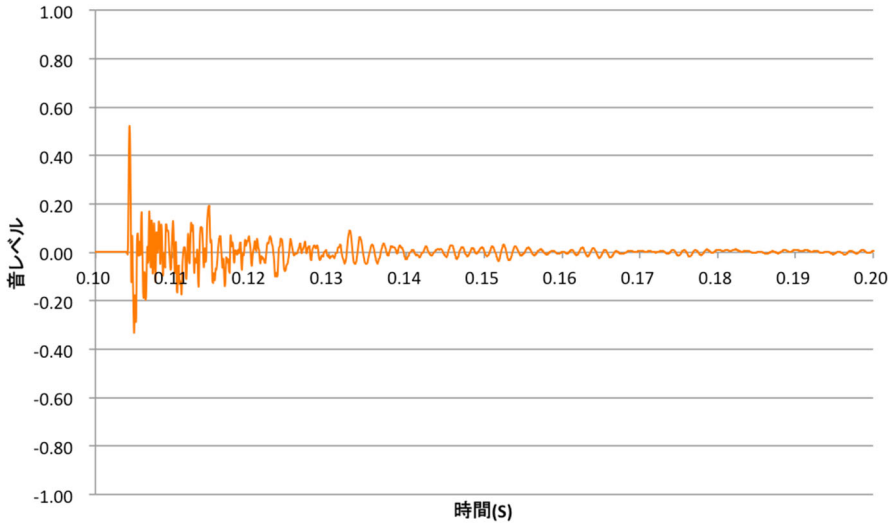


図 5-1(b) 音レベル-時間図(ウッドデッキ(軽量鉄骨))

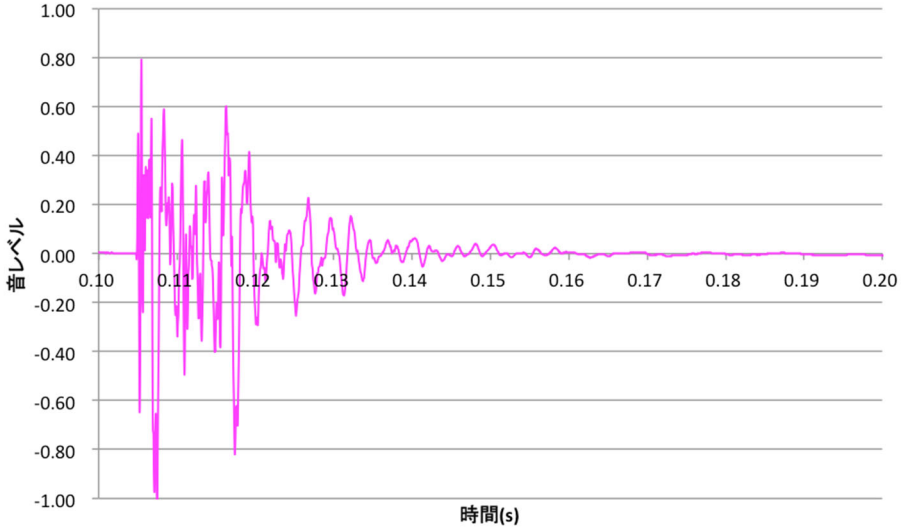


図 5-1(c) 音レベル-時間図(ウッドデッキ(根太なし))

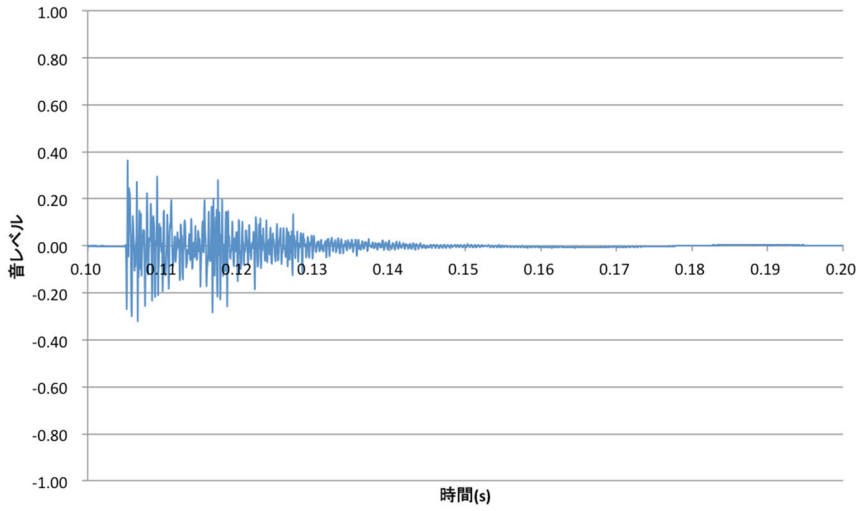


図 5-1(d) 音レベル-時間図(コンクリート)

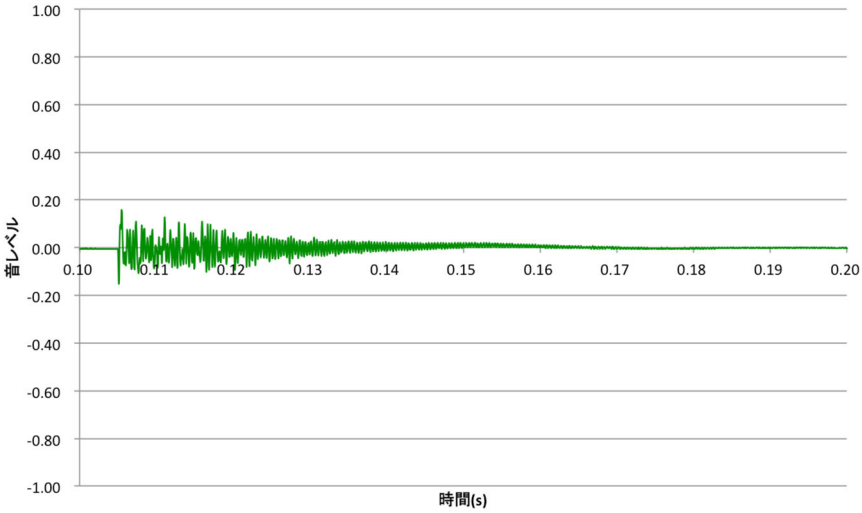


図 5-1(e) 音レベル-時間図(インターロッキングブロック)

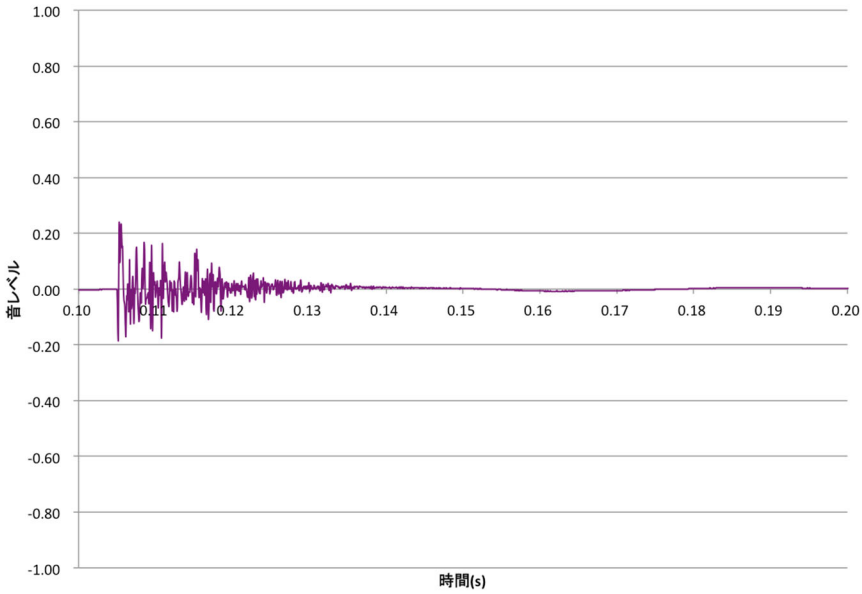


図 5-1(f) 音レベル-時間図(アスファルト)

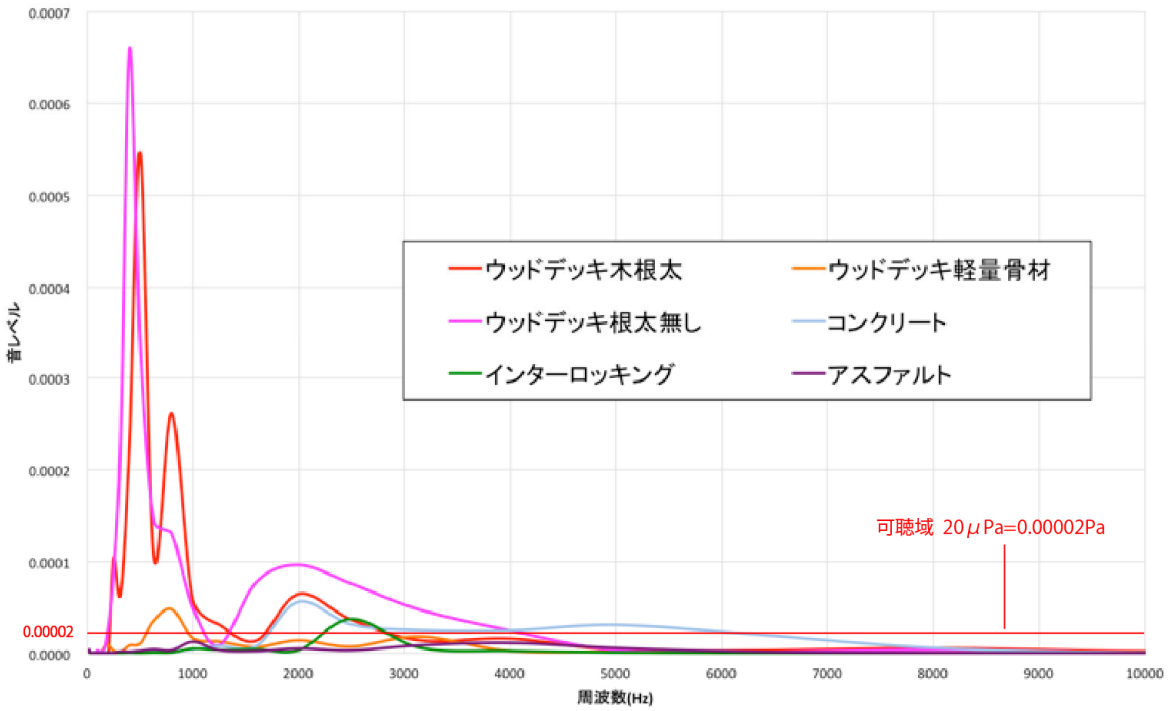


図 5-2 音レベル-周波数図

表 5-1 各試験体のピーク周波数と最大音レベル

	ピーク周波数(Hz)	最大音レベル(μPa)
ウッドデッキ(根太あり)	500	546
ウッドデッキ(軽量鉄骨)	800	48.1
ウッドデッキ(根太なし)	400	659
コンクリート	2000	56.3
インターロッキングブロック	2500	37.3
アスファルト	1000	8.89

参考文献

1)蘆原郁:共通振幅変調と調波性の協調による音響ストリームの知覚 日本音響学会誌 53 巻 12 号, P907-914, 1997

6 章 結論

本研究では，実際の舗装を模した試験体を用いて音の違いを認識できる舗装材料の組み合わせを調査した．4 章での官能評価試験では，人間の聴覚で試験体の音の違いを認識できるかどうかを試験し，ウッドデッキは根太の種類および有無に関係なく，道路舗装材料との音の違いが明らかに認識できることが判明した．IL とアスファルトなど道路舗装材料同士の組み合わせでは”明らかに違いを認識できる”と答えた被験者は少なかったことから，現段階においては音で誘導するバリアフリー歩道を開発するにあたっては木材を利用したウッドデッキを用いることがより適切であると言える．

5 章での定量的比較試験においては，官能評価試験で用いた試験体の音響特性を分析することで，官能評価試験結果を定量的にして把握した．この中では，エンベロープの違いが人の聴覚に影響していること，また音の高さの違いが人の聴覚に正確に認識されるにはピーク周波数の音の大きさが他の周波数と比べて十分に卓越している必要があることが判明した．

今後の研究の課題として

(1)屋外環境での官能評価試験

(2)視覚障害者を対象とした官能評価試験,

(3)コストや耐久性

の 3 点を挙げる．

(1)について，本研究では試験体そのものの音響特性の違いを認識できるかを把握するため雑音の少ない屋内環境で試験を行ったが，実際の屋外環境において道路の車両通過による音や生活騒音などが舗装面を叩いた際の音に影響を及ぼさないか試験を行う必要がある．本研究は前身の研究と同様に都市郊外部で地域の視覚障害者の方々に利用してもらうためのバリアフリー歩道の開発を目指しており，長崎市三和町あるいはそれに類似した環境を用意することが要求される．また，実際の施行に向けて天気や気温による音の違いがあるかを確認する必要がある．特に，乾燥状態や水を多く含んだときなど，材料の性質そのものが変わってしまう恐れのある場合については注意深く検討する必要がある．

(2)について，音響特性を把握するための試験のため健常者を対象に試験を行うことに支障はなかった．しかし，実際には視覚障害者の方々に安心して利用してもらう必要があるため，同じ試験を行っても同様の結果を得られるかを確認する必要がある．

(3)について,実際の歩道に乗用車が乗り上げることなどによる耐久性の確認を行う必要がある．(1)とも関連するが，屋外環境での複数の懸案事項を考慮した材料を選定し，施工コストとのバランスを見た総合的な判断が必要である．