

東京大学大学院新領域創成科学研究科
社会文化環境学専攻

2019 年度
修 士 論 文

旅客コンコースのアナウンス聴取に対する
吸音対策効果の実験的検討

Experimental Study on Effects of Absorption
on Speech Intelligibility of Announcement in Concourse

2020 年 1 月 20 日提出
指導教員 佐久間 哲哉 准教授

俞 凡
Yu, Fan

目次

第1章 序章	1
1.1 研究背景	1
1.2 関連の既往研究	2
1.3 研究の目的	2
1.4 論文の構成	3
第2章 可聴化シミュレーションシステム	5
2.1 概要	5
2.2 IR 生成系	6
2.2.1 数値解析手法	6
2.2.2 IR の生成について	6
2.3 生音源収録系	8
2.3.1 生音源収録系の概要	8
2.3.2 生音源収録の手順	8
2.4 再生音生成系	10
2.5 音源再生系	11
2.5.1 6 チャンネル再生システムについて	11
2.5.2 音源再生系の構成	11
第3章 実験設定に関する検討	13
3.1 旅客コンコースに関する実態調査	13
3.2 実験設定	16
3.3 物理指標による吸音効果の予測	20
第4章 実験的検討	28
4.1 実験内容	28
4.2 実験結果	31
第5章 総括	52
5.1 まとめ	52
5.2 今後の課題	53

第1章

序章

1.1 研究背景

鉄道の駅や空港などの公共交通機関を快適に利用できるようにするには、旅客コンコースの環境を重視することが必要である。より良い環境を創成するためには、温熱・音・光などの環境要因が挙げられる。旅客コンコースにおいて、様々な音が存在し、音によるコミュニケーションも頻繁に発生するので、旅客コンコースの音環境を検討することも重要である。

音環境の視点から見ると、旅客コンコースには列車、旅客、商業施設、案内放送など多種多様の音源が存在する。旅客コンコースとは喧騒的な音響空間と言える場合が多い。また、多くの旅客コンコースが設計される際には安全性、耐久性、メンテナンス性を優先させることから、タイル、金属板など音を反射しやすい材料が使用される場合が多い。そのため、過剰な響きが生まれやすい。

旅客コンコースの利用者が不特定多数のため、安全性が最も重要である。しかし、音環境に関する考慮が不足の結果、地震や火災などが発生する非常時に避難情報を伝わるのが困難となり、安全性が確保されない恐れがある。特に高齢者あるいは聴覚障害者のように聴力が低下している人に、安全性のための必要な情報が正しく伝わるができない可能性はより一層高くなる。また、視覚障害者に対する音サインの明瞭度が過剰な響きと騒音により低下している場合、安全な利用もできない。

安全性の次に重視すべきは快適性である。公共交通機関を利用する際に、列車の発車時刻や飛行機の搭乗案内など情報が円滑に伝わらなければ快適な利用とは言えない。また、騒音過大の環境に会話がしにくくなり、利用者が落ち着かにくくなることも少なくない。このような環境に勤務する人も騒音により身体的・精神的な被害をもたらすと考えられる。

旅客コンコースにおいて最も重要な安全性を考慮すると、音声情報の伝達が非常に重要だと言える。以上の旅客コンコースの音環境の現状を踏まえ、音声伝達ためのアナウンス音の明瞭度を向上する対策が必要であると考えられる。

都市・建築空間における音声伝達のプロセスは、発信系、伝送系、受信系の三つの系に分けることができる^[1]。発声系は発話者が声に出すところまでをいい、伝送系は音声の出口である発声者の口から受聴者の耳に届くまで、受聴系は受聴者の外耳から認識までの系をいう。伝送系の要因に着目すると、吸音では残響抑制と騒音低減の効果を持つため、吸音対策ではアナウンスの明瞭度を向上する効果があるだと考えられる。しかし吸音対策がアナウンス聴取に対する具体的な効果が不明である。

1.2 関連の既往研究

現存な旅客コンコースにおいて音響特性を把握するため、実測調査が実施された。

横山らは駅や地下商店街、空港ロビーなどの公共空間 11 カ所を対象として実測調査を行った^[2]。鉄道駅などでは音響的な配慮がなされているところが少なく、環境音の L_{Aeq} の値が大きくなっている傾向がみられた。また、天井など可能な部位に吸音処理を施した空間では、騒音レベルも低く、聴感的印象でも喧噪感が少なくなっていることが確かめられた。

橘らは、新宿駅、池袋駅、大阪駅、京都駅のコンコースに対する実測調査を行った^[2]。その結果、吸音対策のとられている京都駅コンコースは等価騒音レベルが 65dB 程度になっており、吸音対策なしの駅コンコースより 7~8dB 低いレベルであり、吸音対策の効果が表れているといえよう。

さらに旅客コンコースなどの公共空間の音環境を評価するため、伊積らは駅コンコースを対象に、現場で主観評価実験を行なった^[4]。その結果、駅コンコースにおいては基本的に騒音レベルが高くなると音環境に対する不快感が高まることが分かった。また、騒音レベルが 65dB を超えていなければ、どちらかと言えば「静か」と評価され、不快感もそれほど高くはならないと想定される。

音環境を評価する手法としては、現場で調査を実施することは難しいため、横山らは、実際の公共空間における環境音を実験室内に 6 チャンネル収音・再生システムにより 3 次元的にシミュレートし、喧噪感や会話影響に関する主観評価実験を行う手法を提案した^[5]。

森らは、幾何音響シミュレーションと 6 チャンネル再生手法を併用する方法を提案し、アナウンスの聞き取りにくさを聴感実験によって調べた結果、実際に録音した音とシミュレーションによって合成した音の間により対応が見られた^[5]。

前述の既往研究により、吸音対策の騒音に対する低減の効果が示されているが、アナウンス音の明瞭度に対する具体的な効果が不明である。また、複数の音環境を比較する際に実験室実験が有効であることが示されているが、暗騒音に関しては録音した暗騒音を用いた場合が多い、暗騒音を忠実に予測・再現し実験を行うことはまたない。

1.3 研究の目的

以上の状況を踏まえ、本研究では旅客コンコースのアナウンス音の聴取に対する吸音対策効果の具体的な効果を検討するため、音声の再現性を重視する旅客コンコースの音環境に対する可聴化シミュレーションシステムを構築する。そして室寸法・騒音設定・吸音設定が異なる旅客コンコースの音環境を可聴化し、主観評価実験により吸音対策の効果を確認する。これらの知見は、旅客コンコースの音環境の改善に貢献するものとする。

1.4 論文の構成

第1章では、旅客コンコースの音環境の現状を説明し、コンコースにおける吸音設計に関する背景を述べた後に、本研究の目的をまとめた。

第2章では、本研究に用いる旅客コンコースの音環境の再現するための可聴化シミュレーションシステムについて述べる。

第3章では、実験設定のため行なった旅客コンコースに関する実態調査を述べた後に、実験設定と物理指標による吸音効果の予測を説明する。

第4章では、主観評価実験を行い、吸音対策の効果を検討する。

第5章では本研究を総括し、今後の課題について述べる。

第2章

可聴化シミュレーションシステム

2.1 概要

本研究では可聴化シミュレーションシステムを用いて

旅客コンコースの音環境に対する可聴化シミュレーションシステムでは四つの部分から構成される。生音源収録系では生音源の録音を行い、ドライソースを作成する。IR生成系では幾何音響シミュレーションを用いてインパルス応答を生成する。再生音生成系ではドライソースとインパルス応答の畳み込みを行い、6ch音源を生成する。音場再生系では6ch音源を再生し、音場を三次元的に再現する。

システムの概要を Fig2-1 に示す。機材のリストを Tab. 2-1 に示す。

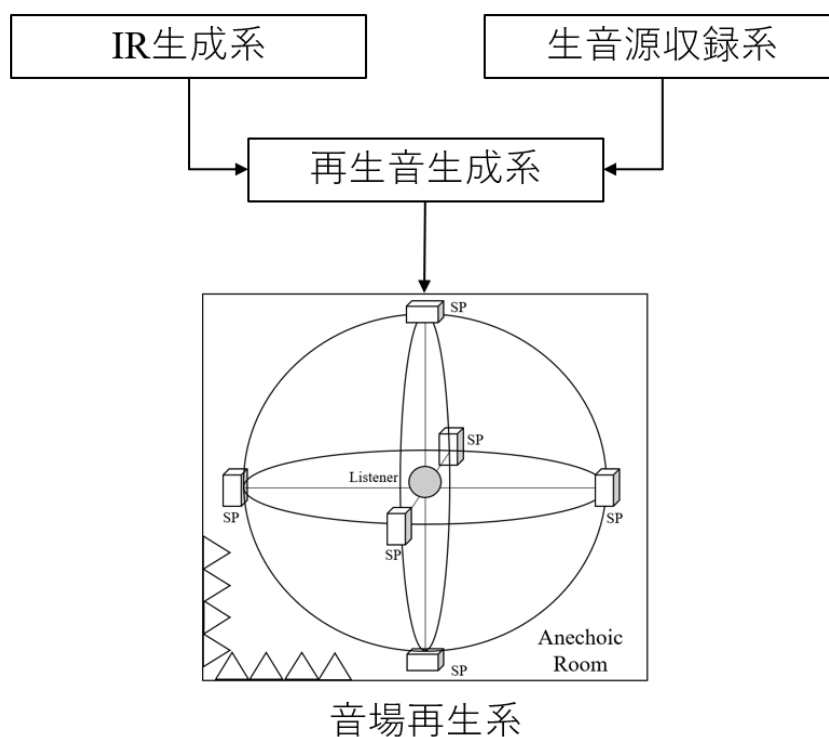


Fig. 2-1 可聴化シミュレーションシステムの概要

Tab. 2-1 機材リスト

	機材分類	メーカー	品番
音源収録系	PCM レコーダー	Sony	PDM-D50
	騒音計	RION	LA-1350
IR 生成系 再生音生成系	PC	Acer	Aspire V15
音場再生系	PC	Apple	MacBook
	編集用ソフト	Adobe	Adobe Audition
	オーディオ・インターフェース	RME	Fireface800
	デジタルミキシングエンジン	YAMAHA	DME24N
	パワーアンプ	YAMAHA	IPA8200
	スピーカー×6	YAMAHA	NS-2HX

2.2 IR 生成系

2.2.1 数値解析手法

音響の数値解析手法は波動音響解析手法と幾何音響解析手法に大別される^[7]。

波動音響解析手法は波動方程式を離散化し音の波動的な振る舞いを予測手法である。複雑な形状の音場に対する高精度の予測が可能であるが、計算負荷が大きい。

幾何音響解析手法は音の波動性を無視し、エネルギーの伝搬・拡散を幾何学的に予測する手法である。波動音響解析手法と比較すると波動性の現象が再現できないが、解析時間が短いという利点がある。

既往の研究において、西村は幾何音響解析手法と 6 チャンネル可聴化システムを利用し雑踏音場シミュレーションシステムを構築し、主観評価実験によりシステムの再現性を確認した^[8]。幾何音響解析手法は音環境の再現に活用できる可能性が示された。

2.2.2 IR の生成について

本研究では旅客コンコースという大空間の音場の再現を目的とし、音の波動的な現象を検討しないため、IR 生成系には幾何音響解析手法の一種であり音線法を採用しインパルス応答を生成する。

音線法とは、1 本の音線が 1 のエネルギーを持つことを想定し、音源から放出した N 本の音線の反射とエネルギーの減衰の追跡を行い、受音点（球）に到来するエネルギーを求める手法である。本システムでは相反則を用いて、受音点から音線を放出し音源点のエネルギーを求めることで、一回の追跡で複数の音源のインパルス応答の解析ができる。

IR 生成系のプロセス図を Fig2-2 に示す。

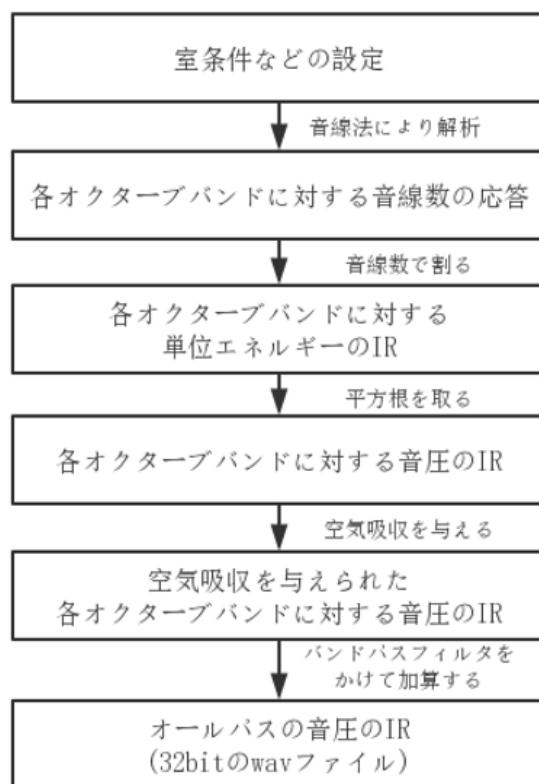


Fig. 2-2 IR 生成系のプロセス図

数値解析に用いる各種パラメータを Tab. 2-2 に示す。音速を室温 15℃ の場合の値に設定する。音線数は 100000 本に設定する。受音球の半径は受音球の見付面積は 1 m² となるように設定する。反射回数は十分大きい値に設定する。総計算時間について、本研究に残響時間が最も長い場合は 7s 程度であるため、聴感に影響がない十分な減衰時間として、便宜的に 5.0s と設定する。

Tab. 2-2 数値解析に用いるパラメータ

音速	340.48(m/s)
音線数	1,000,000
受音球半径	0.56m
反射回数上限	10,000,000
総計算時間	5.0(s)

2.3 生音源収録系

2.3.1 生音源収録系の概要

生音源収録系には、可聴化シミュレーションに必要な生音源を収録し、編集を行い、生音源の情報を持つテキストファイルを作成する。

生音源収録系のプロセス図は Fig.2-3 に示す。

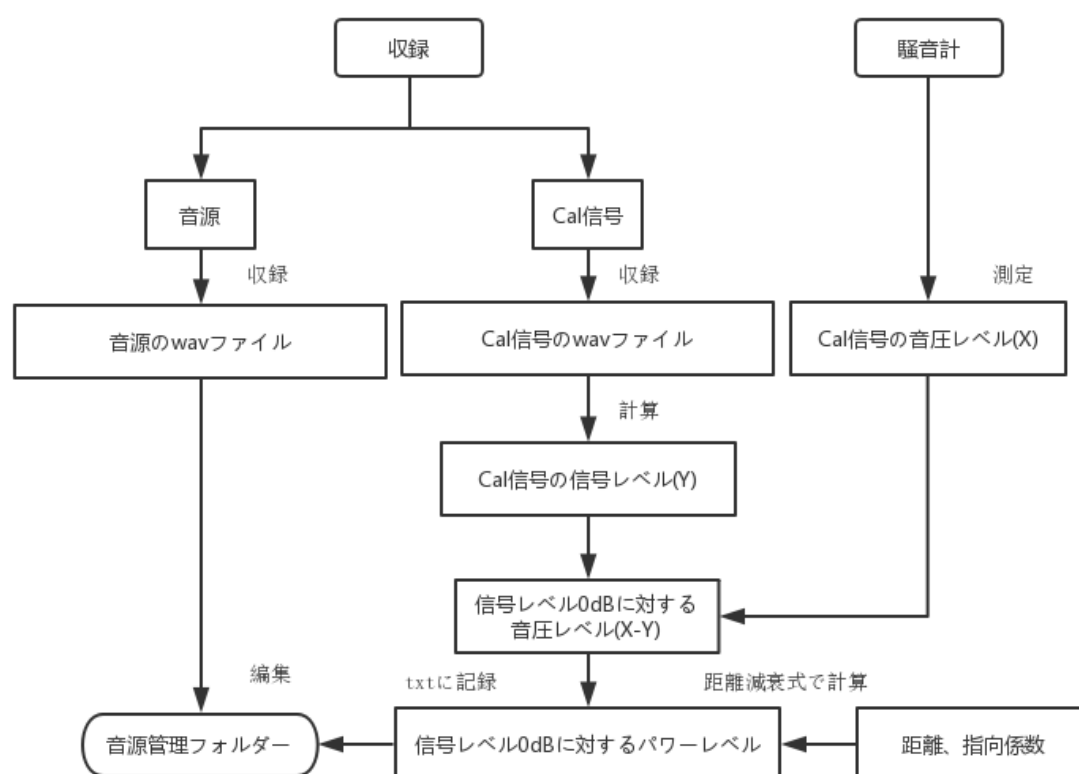


Fig. 2-3 生音源収録系のプロセス図

2.3.2 生音源収録の手順

生音源の収録には無指向性のマイクロフォンを有する騒音計と PCM レコーダーを用いる。騒音計で生音源を録音し、Line out で pcm レコーダーに入力しデータを保存する。

wav ファイルのフォーマットは Tab.2-3 に示す。

Tab. 2-3 Wav ファイルのフォーマット

チャンネル数	1
サンプリング周波数	48000Hz
ビットレート	16bit

機材のレンジ設定について、まず、騒音計の動特性を「FLAT」にする。騒音計から Calibration 信号をレコーダーに入力し、レコーダーが示す信号レベルが-6dB になるように

レコーダーの録音レベルダイヤルを調整する。Calibration 信号が流す状態で 15 秒の信号を録音する。

次は音源の音圧レベルによる騒音計のレンジを決める。SN 比を確保するため、オーバーロードしない限り低いレンジを設定する。騒音計が示す Calibration 信号の音圧レベルを記録する。その後音源の収録を行う。収録は無響室に話者の口元から 1m 点に行く。収録の様子は Fig.2-4 に示す。

音環境を再現する際に生音源のパワーレベルを再現するため、音源ファイルの信号レベル 0dBFS 相当のパワーレベルが計算される。音源管理プログラムによって、式(2.1)で Cal 信号の信号レベルが計算され、式(2.2)で信号レベル 0dB に対するパワーレベルが計算され、音源の wav ファイルと音源の収録情報を持つテキストファイルが作成される。

$$L_s = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_i^2) \right] (dB)$$

L_s : sound pressure nomarlized to [-1,1] (2.1)

n : number of samples

$$L_p = L_{cal} - L_s$$

$$L_w = L_p + 10 \log_{10} \left(\frac{Q}{4\pi r^2} \right)$$

L_{cal} : sound pressure level of calibration signal

L_s : signal level of calibration signal

(2.2)

L_p : sound pressure level equal to 0dBFS

r : distance

Q : directivity factor



Fig. 2-4 収録の様子

2.4再生音生成系

再生音生成系では、IR 生成系により生成したインパルス応答と生音源収録系により作成したドライソースの畳み込みを行い、再生音を生成し、ドライソースの情報より再生音のレンジ（信号レベル 0dB 相当のパワーレベル）を計算し出力する。

再生音生成系のプロセス図は Fig.2-5 に示す。

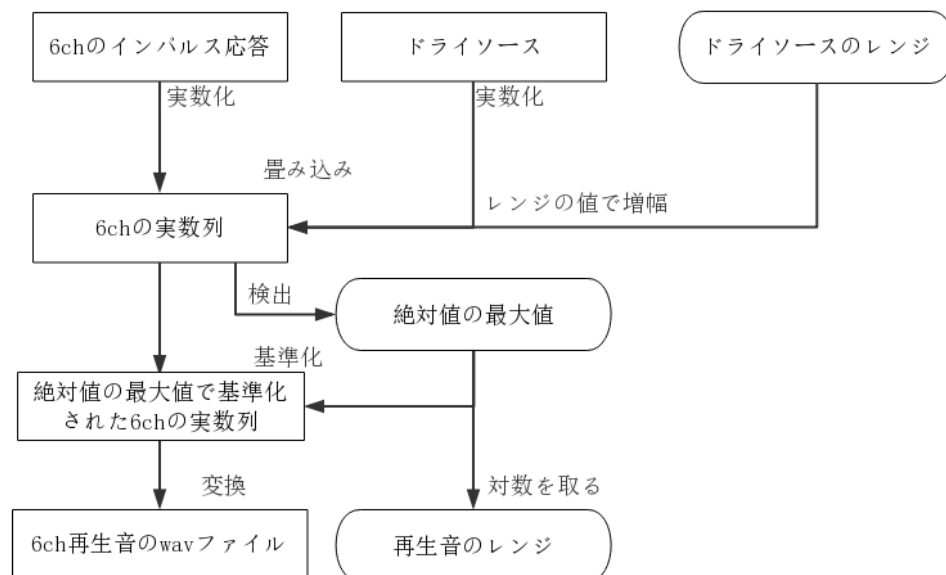


Fig. 2-5 再生音生成系のプロセス図

再生音の基準化について、まず 6ch のインパルス応答とドライソースのデータを実数化し畳み込みを行い、ドライソースのレンジで増幅し、六つの実数列を生成する。次に六つの実数列の中に絶対値の最大値を検出し、各実数列を最大値の絶対値で割ることで基準化を行う。最後、基準化された実数列より 6 チャンネルの 16bit の wav ファイルを生成し、最大値の絶対値の対数を取ることで再生音のレンジを計算して出力する。

2.5 音源再生系

2.5.1 6チャンネル再生システムについて

6チャンネル再生システムとは、6チャンネルの収音系で実音場を録音した音源あるいは6方向指向性重み付きインパルス応答とドライソースをたたみ込んだ音源を、無響室で等距離に配置された6台のスピーカーから再生するシステムである^{[9][10]}。原理的には非常に単純であり、複雑な信号処理の必要もない。また受聴時の姿勢についても制約が緩く、様々な音場を自然な聴感印象で聴くことができる^[5]。旅客コンコースの音環境の再現においては有効な手法と考えられる。

2.5.2 音源再生系の構成

音源再生系の概要図を Fig.2-6 に示す。

再生用音源には前述の音源再生系で生成した wav ファイルを PC に取り込んで使用する。Digital Audio Workstation : DAW(Adobe Audition)を用いてデータを編集する。AD/DA 変換にはインターフェース(FireFace800, RME)を用いた。デジタルイコライザ(DME24,YAMAHA)を用いて周波数補正を行なった信号をパワーアンプ(IPA8200,YAMAHA)で増幅する。最後にアンプで増幅した信号を無響室に配置された六台のスピーカーで再生する。無響室の中央で受聴することで、音環境の再現ができる。

スピーカーの配置

無響室の有効室寸法は 5.4m×6.0m×4.8m(H)である。スピーカー配置について、再生中心からスピーカーまでの距離は無響室内の中心から最大限に円の半径をとった 2170mm、スピーカー高さはツイーターの中心で床面から 1200mm である。

周波数補正

スピーカー毎にピンクノイズを再生し、無響室の中央の周波数特性をもとにイコライジングを行った。DME24N のグラフィックイコライザコンポーネントを用いて、1/3 オクターブバンドで 80Hz 帯域から 4kHz 帯域において各チャンネルとも 1dB 以内に補正した。また、各チャンネル間の再生レベルも揃えた。

再生レベルの補正

生音源のパワーレベルを再現するため、再生系の再生レンジと再生用音源のレンジを揃えることが必要である。

そのため、スピーカー毎に信号レベル-16dB のホワイトノイズを再生し、グラフィックイコライザコンポーネントを用いて、無響室中央の音圧レベルが 74dB になるように調整した。その場合、再生系の再生レンジが 90dB である。音源を再生する際に、Adobe Audition を用いて音源と再生系のレンジの差を補正することで、生音源のパワーレベルを再現が可能となる。

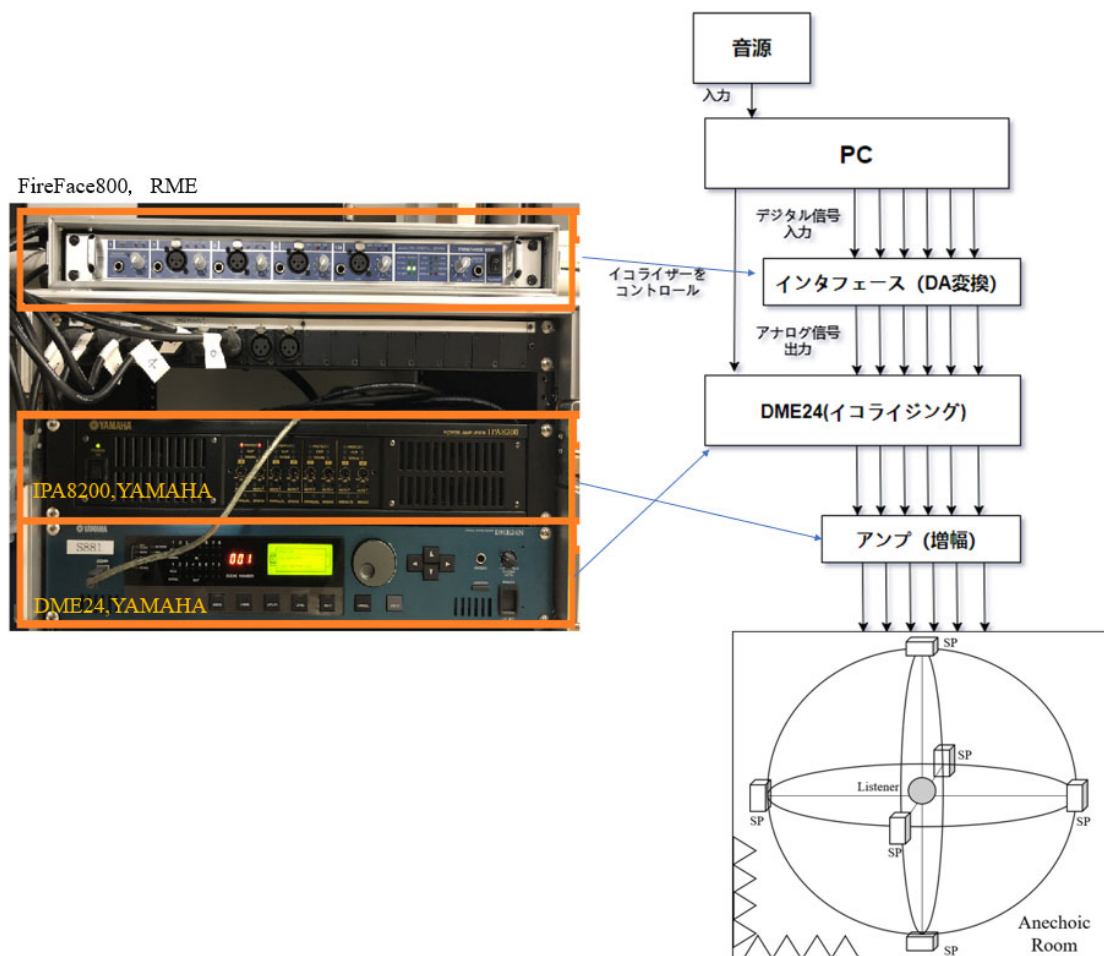


Fig. 2-6 音源再生系の概要図

第3章

実験設定に関する検討

3.1 旅客コンコースに関する実態調査

主観評価実験により吸音対策を検討する際に、可聴化シミュレーションシステムに用いる室寸法・騒音設定・吸音設定などの音環境の条件設定が重要である。実際の旅客コンコースの音環境を参考して設定するのは適切と考えられる。そこで、首都圏の旅客コンコースを対象に、音環境の現状を把握するための実態調査を行った。

調査方法

首都圏の三つの旅客コンコースを対象に、アナウンス音の音圧レベル及び暗騒音レベルの測定を行なった。暗騒音の測定地点は、旅客コンコースの通路の付近とした。アナウンス音の測定地点はスピーカーから 5m 点とした。測定時間は休日の 16 時から 20 時までの時間帯とした。

調査結果

各旅客コンコースにおいて、アナウンス音と暗騒音の A 特性音圧レベル、室寸法と利用者密度を Fig.3-1, Fig.3-2, Fig.3-3 に示す。室寸法、利用者密度は概略値である。スピーカーが壁に設置されているため、アナウンス音の音圧レベルからパワーレベルを逆算する際に音源の指向係数を 2 とした。

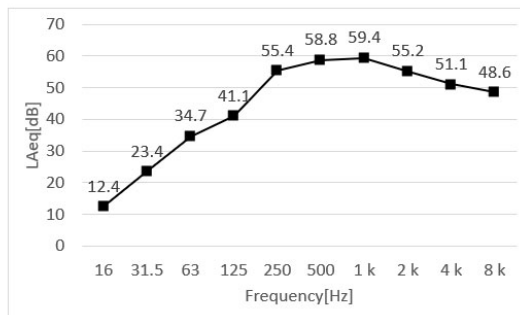
測定した全ての駅コンコースの等価騒音レベルは 60dB 以上の高い値になっていた。暗騒音の周波数特性を見ると、500Hz 又は 1kHz にピークを持つため、騒音源は主に人の話声だと考えられる。



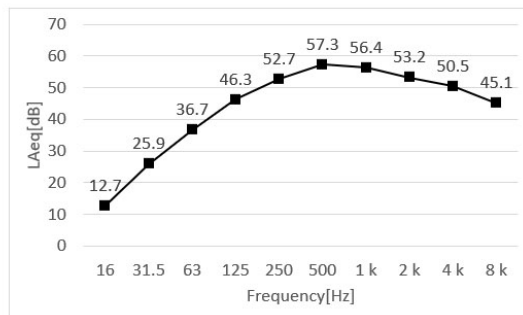
コンコースA
コンコースの寸法:210m*75m*17m
利用者密度:0.022/m²

アナウンス音のA特性音圧レベル(5m点): 64.2dB
アナウンス音のA特性パワーレベル: 86.2dB

暗騒音の等価騒音レベル: 61.9dB



アナウンス音の周波数特性



暗騒音の周波数特性

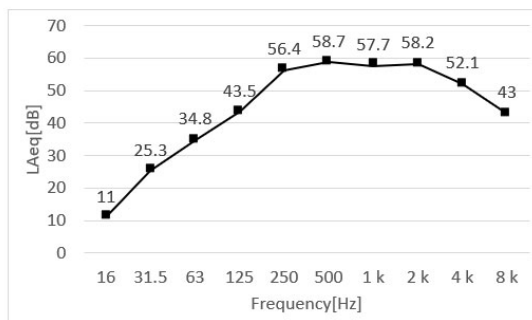
Fig. 3-1 コンコース A の調査結果



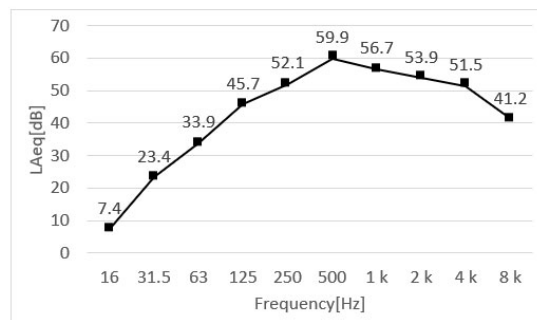
コンコースB
コンコースの寸法:200m*25m*16m
利用者密度:0.016/m²

アナウンス音のA特性音圧レベル(5m点): 64.2dB
アナウンス音のA特性パワーレベル: 86.2dB

暗騒音の等価騒音レベル: 63.1dB



アナウンス音の周波数特性



暗騒音の周波数特性

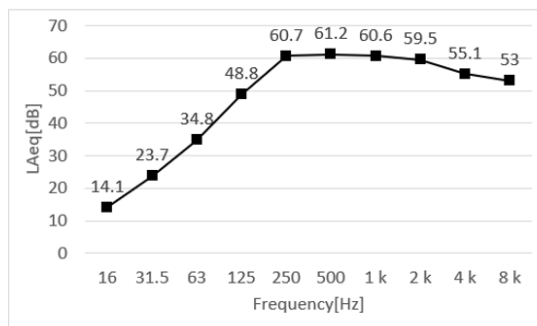
Fig. 3-2 コンコース B の調査結果



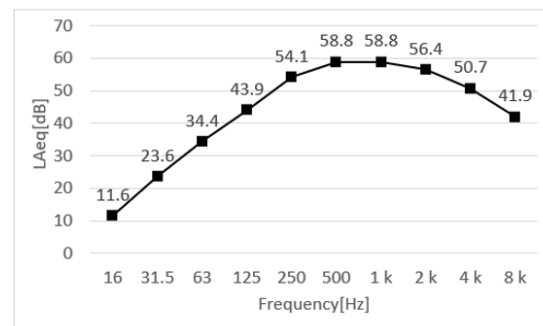
コンコースC
コンコースの寸法:100m*24m*14m
利用者密度:0.024/m²

アナウンス音のA特性音圧レベル(5m点): 67.1dB
アナウンス音のA特性パワーレベル: 89.1dB

暗騒音の等価騒音レベル: 63.8dB



アナウンス音の周波数特性



暗騒音の周波数特性

Fig. 3-3 コンコース C の調査結果

3.2 実験設定

本節では前述の実態調査を参考し、可聴化シミュレーションに用いる実験条件を設定する。

室寸法

コンコースの室寸法ではコンコース C の寸法を参考し設定する。矩形室を想定し、広さは $100\text{m} \times 20\text{m}$ に固定させる。天井高では 10m , 20m の二条件である(Fig.3-4)。

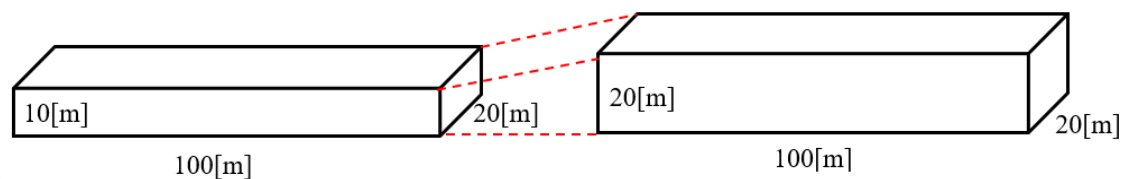


Fig. 3-4 コンコースの室寸法

受音点・アナウンス音・騒音源の設定

受音点・アナウンス音・騒音源の配置図を Fig.3-5 に示す。

受音点は室の中心に高さ 1.5m 点に配置する。

アナウンスの音源は壁近傍に受音点から 10m 離れた高さ 5m の場所に配置する。アナウンスの A 特性パワーレベルは 85dB とする。

騒音源は人の話声とし、高さは 1.5m とする。話者密度の設定より暗騒音レベルを変化させる。

低密度(0.01 人/ m^2)、高密度(0.04 人/ m^2)の二条件で騒音源を配置する。

各騒音源の A 特性パワーレベルは普通会話程度の 68dB とした^[11]。

アナウンス音・騒音源の収録

アナウンス音・騒音源の収録は 2.3 に記述した手法で行なった。

アナウンス音の生音源収録には空港の案内放送を想定する文章を二十代の女性から読んでもらい、収録を行なった。アナウンス音の周波数特性は Fig.3-6 に示す。

騒音源を作成するための生音源収録には日本語テストから会話テキストを抜き出して、長さ 2 分程度の文章を六つ用意し男女 3 名から読んでもらった。音声の周波数特性は Fig.3-7 に示す。

吸音設定

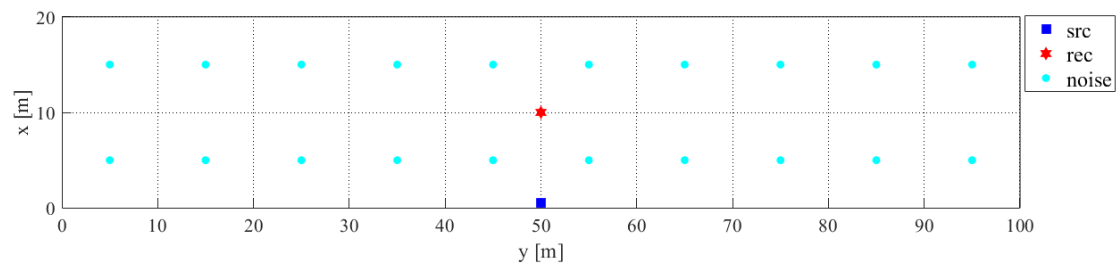
吸音設定については Tab.3-1 に示す七条件である。

吸音材の配置位置では吸音なし、天井のみ吸音、天井と壁上部吸音、天井と壁下部吸音の四条件とする(Fig.3-8)。吸音なしの表面はボード仕上げと想定し吸音率は 0.1 とする。

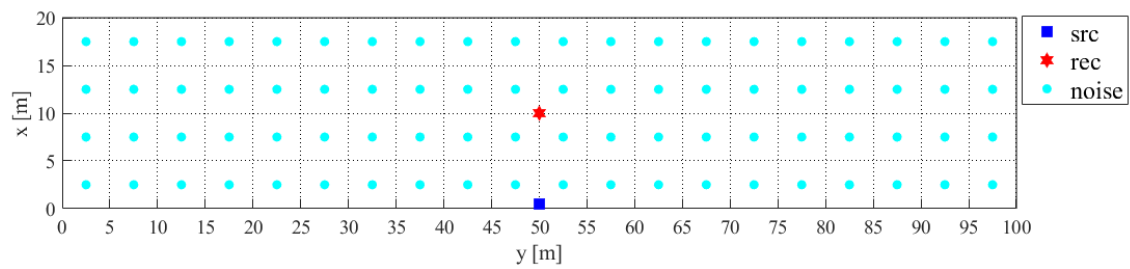
吸音材配置ありの場合、吸音材の吸音率は中程度吸音の 0.5 と高度吸音の 0.85 に設定する。本実験に用いる生音源の周波数はほぼ $100 \sim 4\text{kHz}$ の範囲であるため、吸音材の吸音率は全周波数帯域に同様に設定される。

以上の実験条件では、吸音設定 7 条件、話者密度 2 条件、天井高 2 条件より、 $7 \times 2 \times 2$ で 28 条件となる。

話者密度 0.01 人/m²



話者密度 0.04 人/m²



断面図

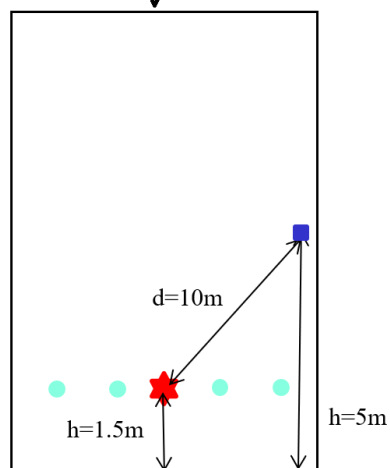


Fig. 3-5 受信点・アナウンス音・騒音源の配置図

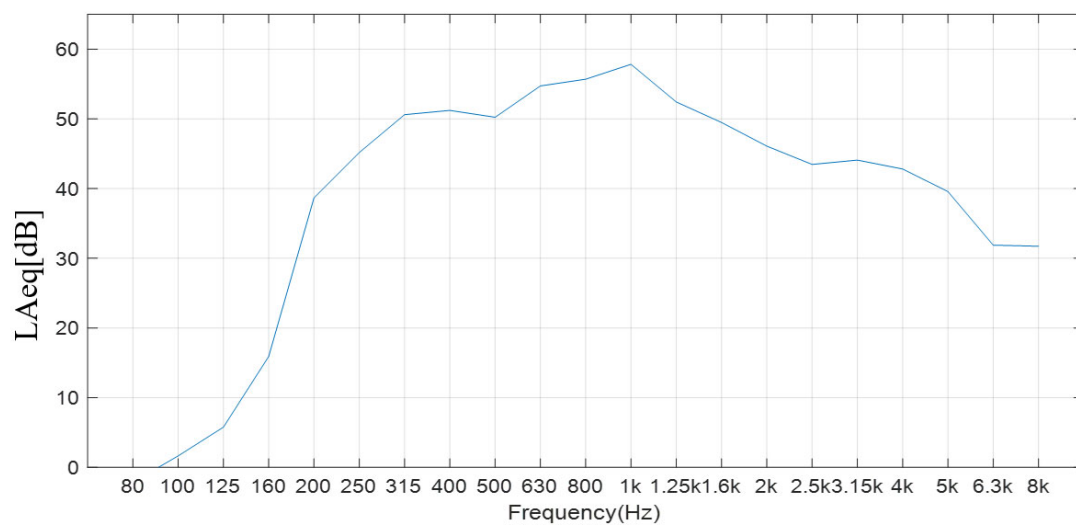
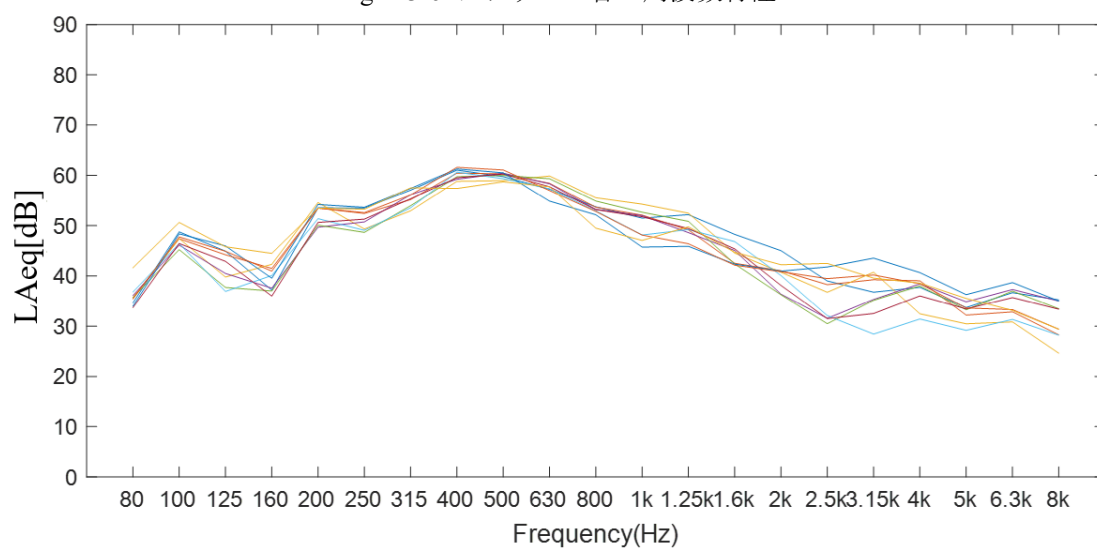
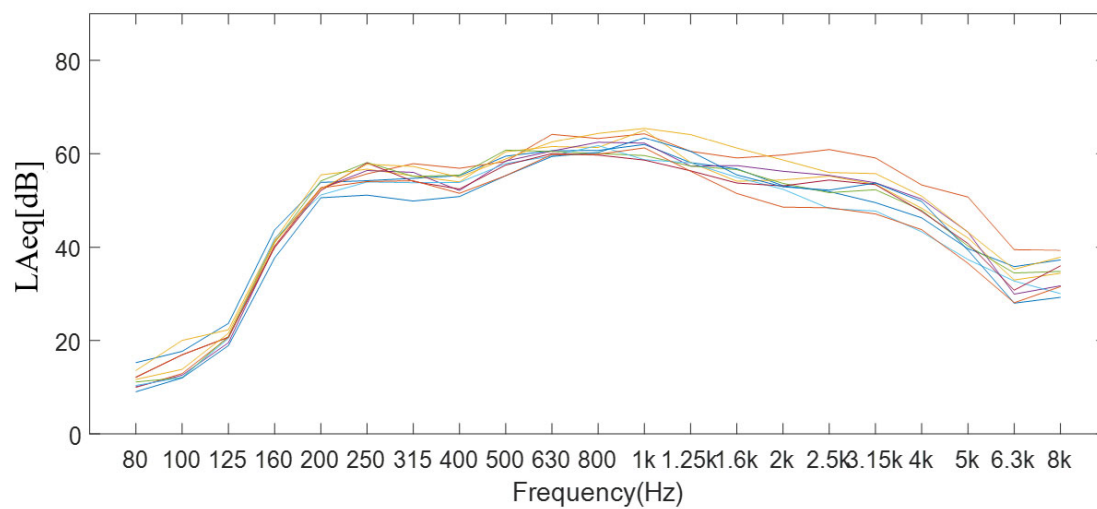


Fig. 3-6 アナウンス音の周波数特性



(a) 男性により音声の周波数特性



(b) 女性により音声の周波数特性

Fig. 3-7 音声の周波数特性

Tab. 3-1 七条件の吸音設定

N: 吸音なし
 A1: 天井のみ中程度吸音
 A2: 天井のみ高度吸音
 B1: 天井と壁上部中程度吸音
 B2: 天井と壁上部高度吸音
 C1: 天井と壁下部中程度吸音
 C2: 天井と壁下部高度吸音

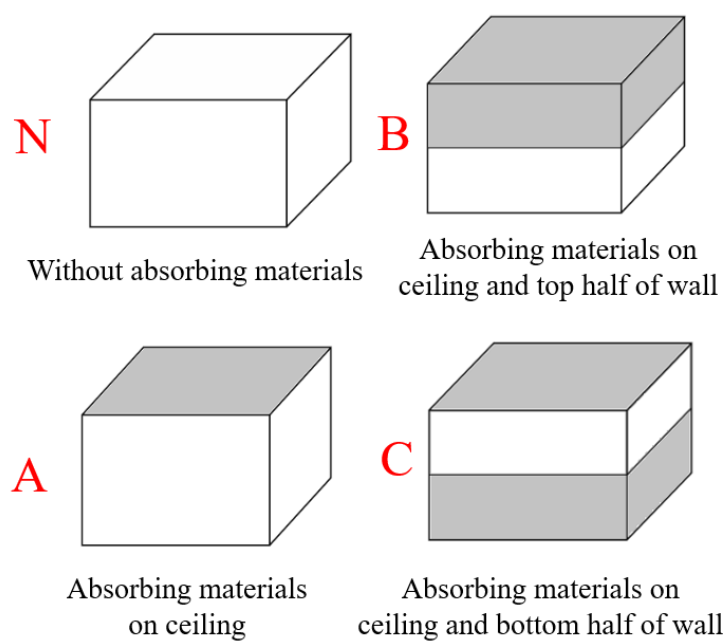


Fig. 3-8 吸音材の配置位置

3.3物理指標による吸音効果の予測

前述の条件設定により可聴化シミュレーションシステムを用いてインパルス応答及び仮想音場を作成する。作成したデータにおいて物理指標を算出し、各条件において吸音効果の予測を行った。

室内等価吸音面積

室内等価吸音面積とは、室内表面の各部位の表面積にその表面の吸音率を掛けた値の総和で、吸音力とも呼ばれる。n 種類な表面を持つ室では、各材料の吸音率 a_i に各材料の面積 S_i を掛け合わせ、それぞれを合算することで室内の等価吸音面積が得られる。以下に算出式を示す。

$$A = \sum_{i=1}^n a_i S_i \quad [m^2]$$

a_i : 各材料の吸音率 S_i : 各材料の面積

Fig. 3-9 に各条件設定の室内等価吸音面積を示す。

床面積一定のため、天井高が高いほど等価吸音面積が大きい。天井高と吸音材の吸音率一定の場合、「天井と壁上部吸音」と「天井と壁下部吸音」では同じ等価吸音面積を持つ。また、天井高一定の場合、「天井と壁上部中程度吸音」及び「天井と壁下部中程度吸音」では「天井のみ高度吸音」と近い等価吸音面積を持つため、三者が近い吸音効果を持つ可能性があると考えられる。

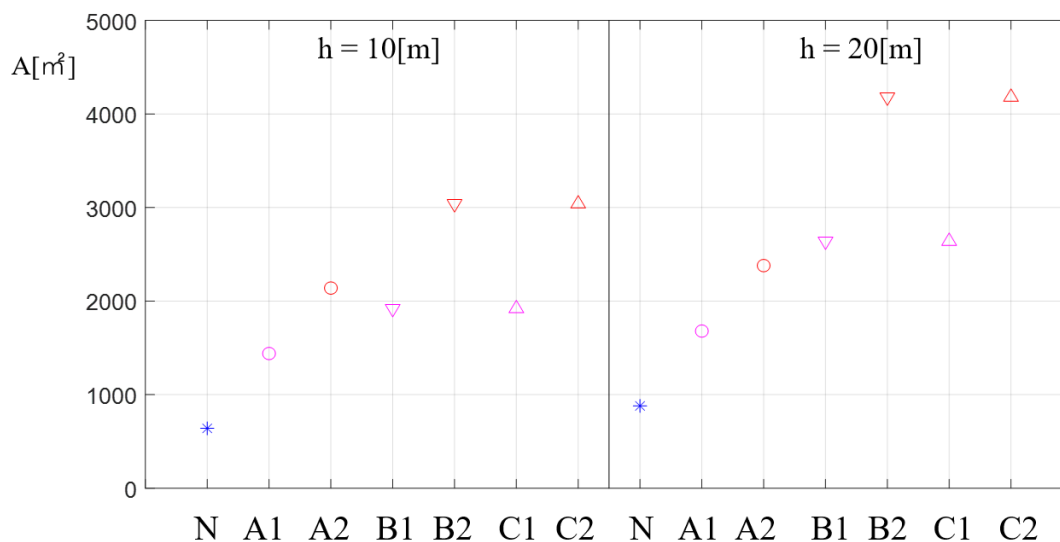


Fig. 3-9 各条件設定の室内等価吸音面積

残響時間

残響時間は室の響きの具合を表す量であり、具体的には音源の振動が停止したから、音圧レベルが 60dB 減衰するまでの所要時間である。

アナウンス音の残響時間が長いほど、アナウンス音が聴き取りにくくなる。暗騒音の残響時間が長いほど、暗騒音の音圧レベルが高くなり、アナウンス音の聴き取りに対する妨害が大きくなる。従って、各条件設定の残響時間を算出することでアナウンス音の明瞭度を予測することができる。

完全拡散音場を仮定した場合、残響時間は以下の Sabine の式で計算される。

$$T = 0.161 \cdot \frac{V}{A}$$

V: 室容積[m³], A: 吸音面積[m²]

「天井のみ吸音」及び「天井と壁の半分吸音」など吸音面が偏在する場合は完全拡散音場の条件を満たさないため、実際の残響時間は Sabine の式で予測できない可能性がある。

故に、音線法で算出したアナウンス音の音源点-受音点間のインパルス応答により残響時間を算出した。具体的にはインパルス応答を逆二乗積分し、エネルギーのレベルが-5dB から-25dB までの減衰に最小二乗法による直線回帰式を求め、その直線回帰式より 60dB 減衰するまでの所要時間を計算する。

Fig. 3-10 に各条件設定における Sabine の式で求められた残響時間とインパルス応答により算出した残響時間を示す。

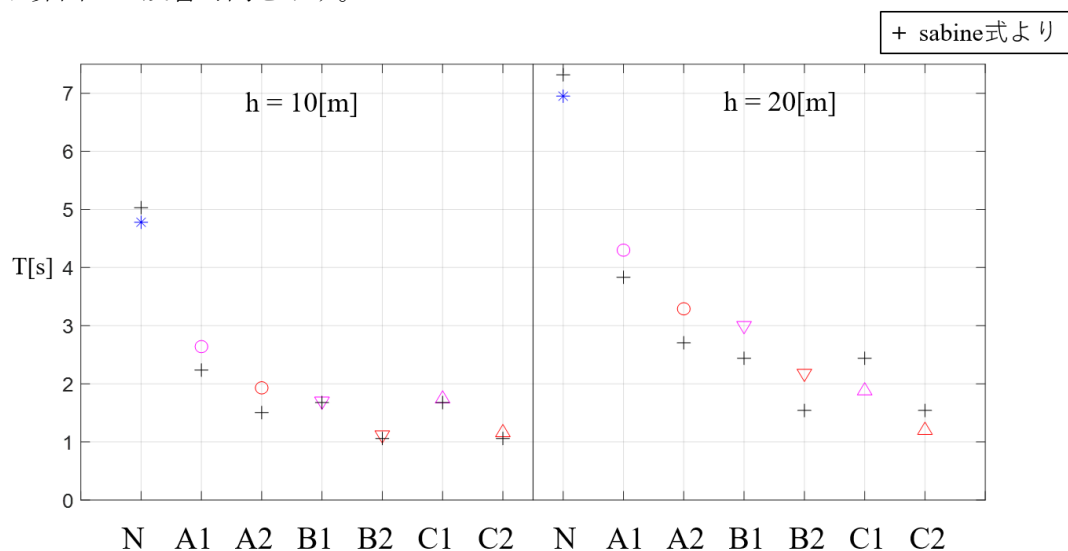


Fig. 3-10 各条件設定の残響時間

吸音により、残響時間が 4.8s~1.2s(天井高 10m)と 7.0s~1.2s(天井高 20m)の範囲で大きく変化することがわかる。吸音対策の残響抑制の効果が大きいと言える。

全体的に同じ吸音設定で天井が高い場合残響時間が長い。「吸音なし」の場合、インパルス応答より算出した残響時間は Sabine の式で求められた残響時間とほぼ同じであるが、「天井のみ吸音」の場合、インパルス応答より算出した残響時間が Sabine の式で求められた残響時間より長い。その原因は、受音点の高さが低いため、「天井のみ吸音」の場合室の下部の反射音が吸音されにくく、残響時間が完全拡散音場仮定の場合より長いと考えられる。

天井高 10m・「天井と壁の半分吸音」の場合、インパルス応答より算出した残響時間は Sabine の式で求められた残響時間とほぼ同じである。これは、アナウンス音の音源点の高さが天井高の半分の 5m で、吸音面が偏在することがあんまり影響が出ないためである。

また、天井高 20m の場合、「天井と壁上部吸音」はインパルス応答より算出した残響時間が Sabine の式で求められた残響時間より長いが、「天井と壁下部吸音」はインパルス応答より算出した残響時間が Sabine の式で求められた残響時間より短い。その原因は、アナウンス音の音源点の高さが天井高の半分より低いため、「壁下部吸音」が残響時間に対する影響は「壁上部吸音」より顕著だと考えられる。

暗騒音レベル

各条件設定で作成した暗騒音の 6ch 音源を無響室に再生し、無響室の中央に精密騒音計で測定することで暗騒音レベルを測定し、Fig. 3-11 に示す。

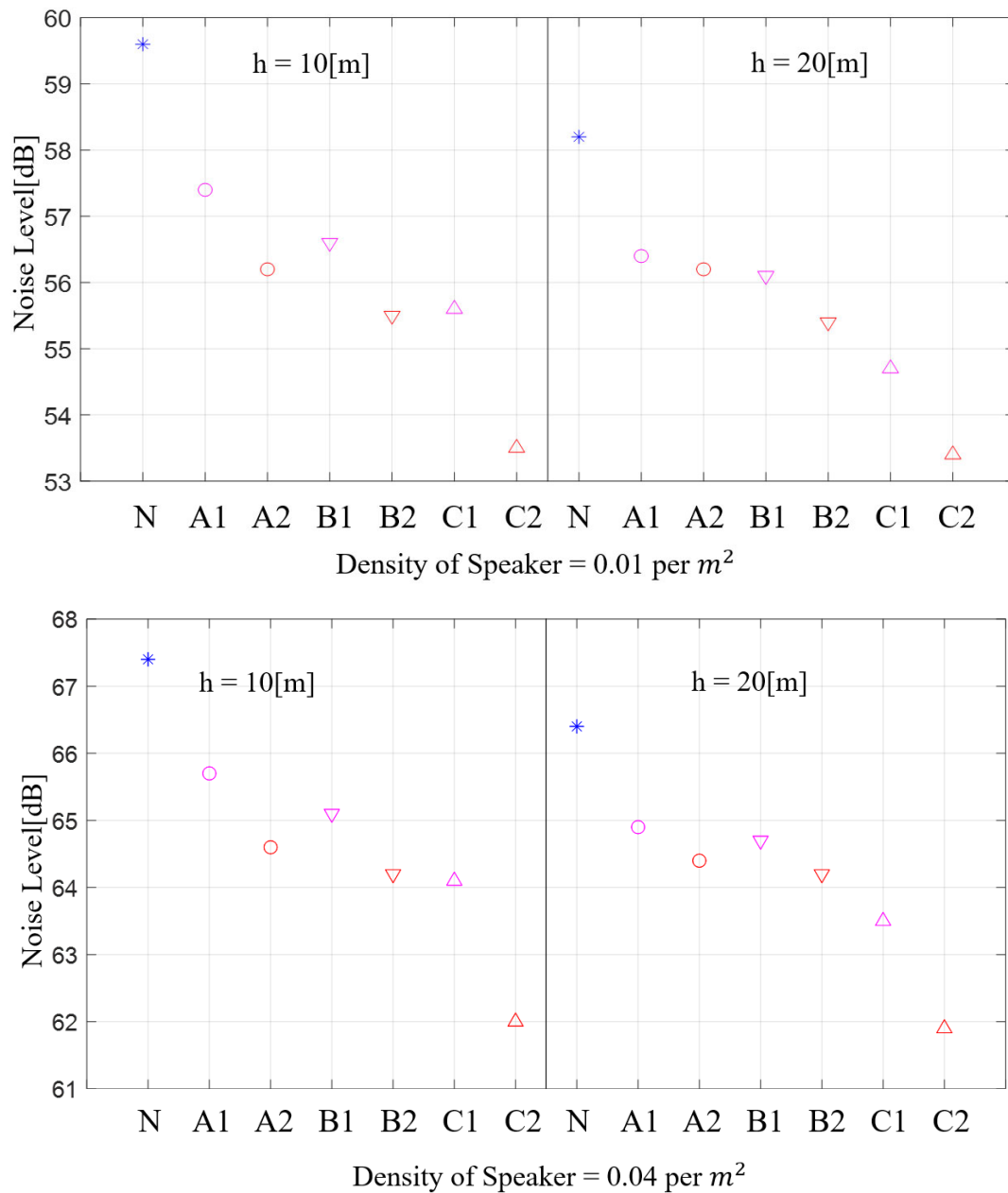


Fig. 3-11 各条件設定の暗騒音レベル

吸音により，暗騒音レベルが 59.7dB～53.4dB(話者密度 $0.01/m^2$, 天井高 10m)，58.2dB～53.3dB(話者密度 $0.01/m^2$, 天井高 20m)，67.4dB～62.0dB(話者密度 $0.04/m^2$, 天井高 10m)と 66.4dB～61.9dB(話者密度 $0.04/m^2$, 天井高 20m)の範囲で大きく変化することがわかる。吸音対策の騒音低減の効果が示されている。

「天井と壁上部吸音」と「天井と壁下部吸音」の等価吸音面積は同じが，「天井と壁下部吸音」の騒音低減の効果が大きいと示されている。その原因は，騒音源と受音点の位置は地面に近いので，壁下部吸音の効果が壁上部吸音の効果より大きいと考えられる。

話者密度と吸音設定が同じの場合，天井高が高い場合暗騒音レベルが低い。しかし，天井高が低い場合吸音対策の騒音低減の効果が大きい。最も暗騒音の反射音が吸音される「天井と壁下部高度吸音」の場合，天井高 10m と天井高 20m の暗騒音レベルはほぼ同じである。

アナウンス音の音圧レベル

各条件設定で作成したアナウンス音の 6ch 音源を無響室に再生し，無響室の中央に精密騒音計で測定することでアナウンス音の音圧レベルを測定し，図に示す。

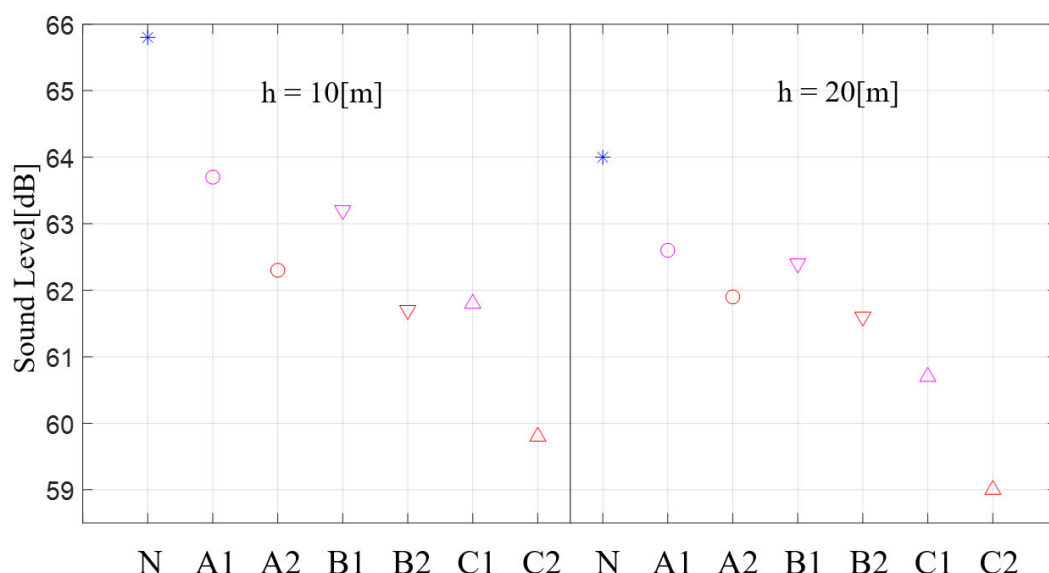


Fig. 3-12 各条件設定のアナウンス音の音圧レベル

吸音により，二つの話者密度でアナウンス音の音圧レベルの変化は暗騒音レベルと似た傾向を示す。つまり，等価吸音面積が大きくなると，暗騒音レベルが低くなる同時に，アナウンス音の音圧レベルも低くなる。

Fig. 3-13 に示す SN 比(アナウンス音の音圧レベルと暗騒音レベルの比例)から見ても，吸音対策が SN 比に対する影響には顕著な傾向が見られなかった。単に吸音によりアナウンス音の音圧レベルと暗騒音レベルの変化から見ると，吸音によりアナウンス音の明瞭度が向上するとは言えない。

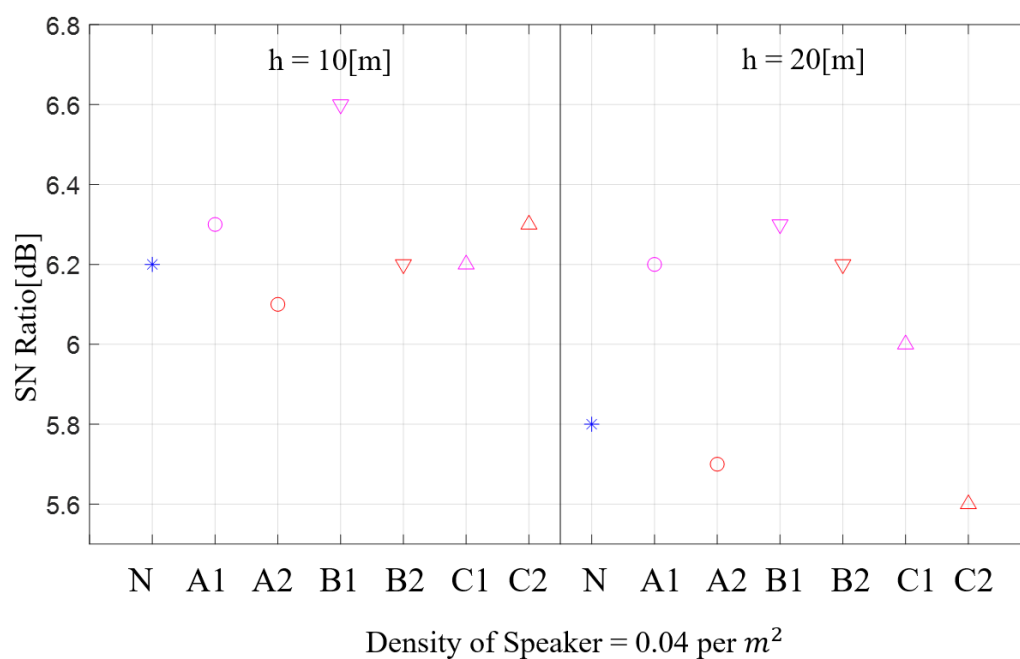
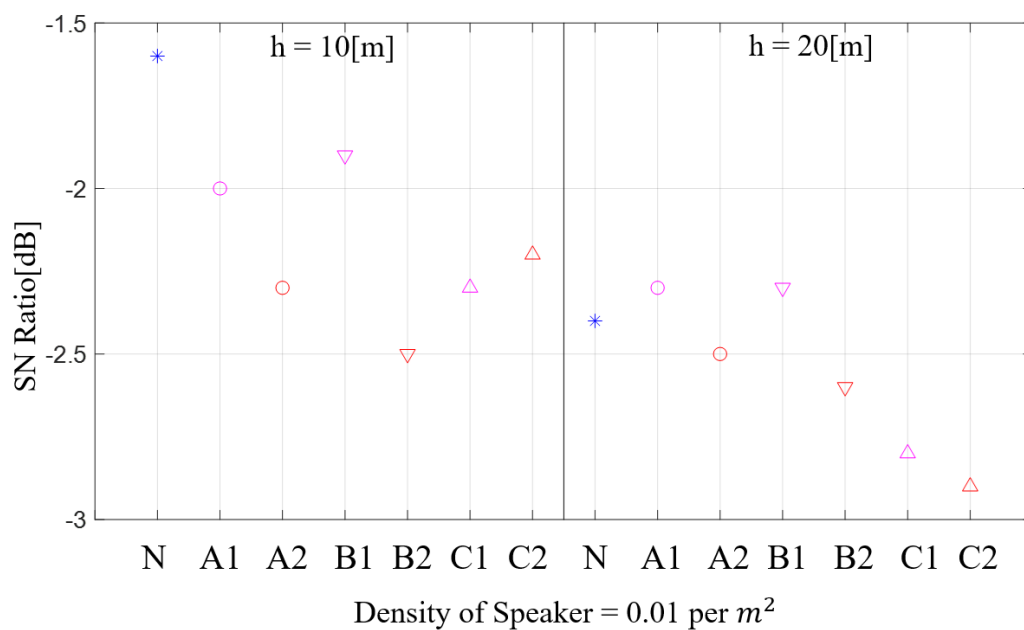


Fig. 3-13 各条件設定の SN 比

音声明瞭度指標

日本建築学会環境工学委員会は、音声伝送性能の物理的評価指標について主に以下のような方法に分類されると述べている^[1]。

- 騒音によるマスキングの影響に着目した方法

この方法は、音声の聴取音圧レベル、背景騒音の音圧レベル、周波数特性等の物理量が異なった条件で、音声に対する騒音によるマスキングの影響をいくつかの周波数帯域に分けて分析し、これらの関係性から明瞭度評価値を算出するものである。

- 室応答のエネルギー比に着目した方法

この方法は、伝送路内で測定されたインパルス応答波形の、直接音到来からある時間内までの初期応答エネルギーを貢献因子(Useful)とし、それ以降の反射音エネルギーやターゲットとなる音声以外の音、つまり背景騒音を妨害因子(Detrimental)として、両者の SN 比によって伝送路内の音声伝送性能を表すものである。

その原理に基づいて、インパルス応答の 50ms 以内の初期応答エネルギーを貢献因子とし U_{50} が提案された。 U_{50} は以下の式により計算される。

$$U_{50} = 10 \log \frac{E}{L_{50} + N} \quad [dB]$$

E : 50ms 以内の初期応答エネルギー

L_{50} : 後期反射音エネルギー

N : 背景騒音エネルギー

- 音声信号強度の時間変化に伴う包絡線情報保存度に着目した方法

この方法は、会話音声を経験の経過に従って連続的に変化するスペクトルを持つ音の流れとしてとらえ、発信者(話者)から発せられた音声の特徴を表す信号強度の時間的な変化(包絡線情報)が、伝送路内での残響や騒音の影響を受けて、受信者の位置でどれだけ保存されているかによって音場内の音声伝送性能を示そうとするものである^[13]。

以上のように、数々の音声伝送性能評価に関わる指標が示されているが、容易に結果が算出できることが望まれ、主観的な評価との対応が示されていることが必要であることを考慮すると、最も適応性が高いものとして、U 値及び STI が考えられる。

また、「聴き取りにくさ」との関係から考慮すると、既往の研究において、STI による「聴き取りにくさ」の推定は背景騒音の音圧レベルが 45dB 以下の場合に適用することが望ましいが、背景騒音の音圧レベルが 50dB 以上の音場では、STI による「聴き取りにくさ」の推定値は実験値より低く、背景騒音の音圧レベルが高くなるほどその傾向が顕著になる。本研究に用いられる暗騒音の音圧レベルは全部 50dB より高いので、STI による「聴き取りにくさ」の推定は適用できないと考えられる。

一方、既往の研究において、 U_{50} では背景騒音の音圧レベルが 45dB 以上の場合も適用できることが示されている。従って、インパルス応答から容易に結果が算出できること及び「聴き取りにくさ」との対応が良いから考慮すると、本研究では U_{50} を採用し「聴き取りにくさ」を予測する。

各条件設定の U_{50} を Fig.3-14 に示す。 U_{50} と「聴き取りにくさ」は負の相関であるため、 U_{50} が高くなるほど、音声の明瞭度が高い。

吸音により、 U_{50} が 0.3dB~5.2dB(話者密度 $0.01/m^2$, 天井高 10m), 0.4dB~4.7dB(話者密度 $0.01/m^2$, 天井高 20m), -4.5dB~-2.6dB(話者密度 $0.04/m^2$, 天井高 10m) と -4.9dB~-3.2dB(話者密度 $0.04/m^2$, 天井高 20m) の範囲で大きく変化することがわかる。吸音対策によりアナウンス音の明瞭度が改善されることが示されている。

話者密度 $0.01/m^2$ の場合、 U_{50} の上昇が話者密度 $0.04/m^2$ の場合より大きい。話者密度が高くなるほど、騒音源との距離が近く、吸音により影響されない暗騒音の直接音の成分が大きくなり、暗騒音レベルが吸音により影響されにくくなると考えられる。

また、吸音ありの場合、等価吸音面積が最も小さい「天井のみ中程度吸音」でも U_{50} の上昇が顕著が、等価吸音面積が大きい差がある「天井のみ中程度吸音」，「天井のみ高度吸音」，「天井と壁上部中程度吸音」，「天井と壁上部高度吸音」及び「天井と壁下部中程度吸音」に対する U_{50} には大きい差が見られなかった。以上の五つの吸音対策において、アナウンス音の明瞭度の改善が同じだと予測できる。

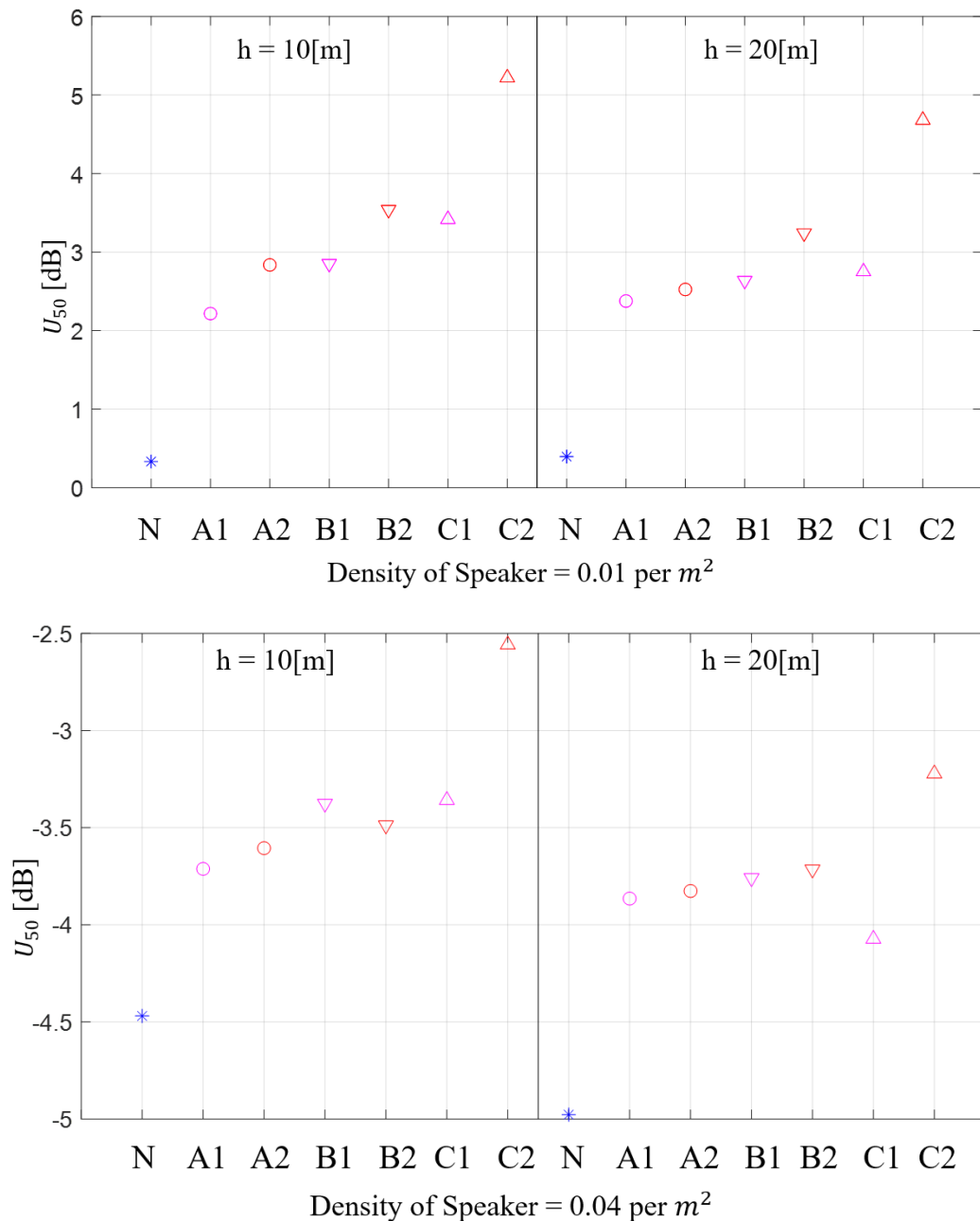


Fig. 3-14 各条件設定の U_{50}

第4章

実験的検討

4.1 実験内容

空港のコンコースでアナウンスを聴き取ることを想定し、前述の条件設定に応じて仮想音場を作成し、アナウンス音に対する「聴き取りにくさ」と周りの音に対する「うるささ」について評価を行い、吸音対策がアナウンスの聴取に対する影響の確認を行なった。

実験はFig. 4-2に示す、東京大学柏キャンパス環境棟地下1F無響室内で行った。実験日時は2019年12月上旬、被験者は20～30代の正常な聴力を持つ男女16名、所要時間は説明時間と休憩時間を含めて1人当たり40分程度である。そのうち、日本語母語話者は9人、日本語非母語話者は7人。

「聴き取りにくさ」について

音声の明瞭度を評価するため、森本ら^[12]は「聴き取りにくい」と判断された割合で音声伝達性能を評価する「聴き取りにくさ」を提案した。被験者が音声の「聴き取りにくさ」に対する評価する際に、Fig.に示す4段階の尺度で聴き取りにくさを評価し、あてはまる尺度の数字を回答する。得られた回答から「聴き取りにくいと判断された割合」を算出し、「1」以外の尺度は、程度は異なるものの「聴き取りにくい」という判断を示している。そこで、「1」以外の尺度の回答をひとまとめにし、これらが全回答に対して占める割合を聴き取りにくさとして算出する。

評価方法

主観評価実験において、Fig. 4-3に示す教示文、記入例を用いて被験者に評価方法を説明した。「聴き取りにくさ」の評価に評価尺度は4段階とし^[12]、「うるささ」の評価に評価尺度は5段階とした。各条件の音源に対する2回の評価を行なった。

音源の提示方法はFig. 4-1に示す。順序効果を考慮して、28条件の音源は被験者毎にランダム再生し、評価を行なった。28条件の音源の評価が終了後、5分程度休憩し、再び28条件の音源をランダム再生し、評価を行なった。

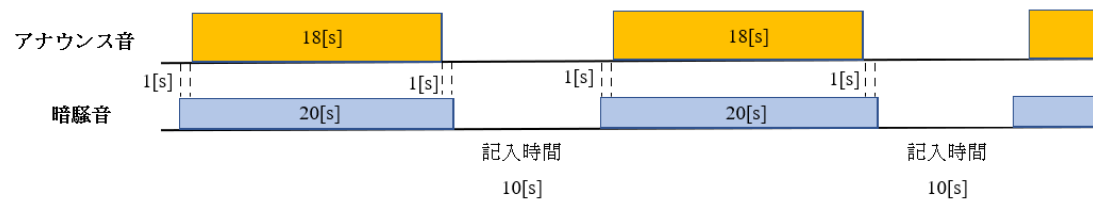


Fig. 4-1 音源の提示方法

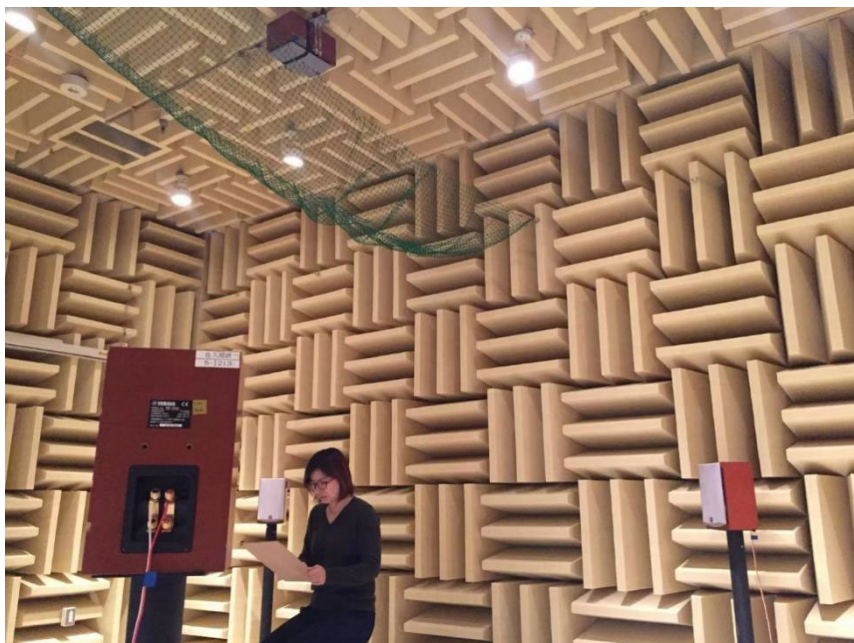


Fig. 4-2 主観評価実験の様子

旅客コンコースのアナウンス聴取に対する印象評価実験

実施日：令和 年 月 日

評価者：氏名 男・女・回答せず 歳

●実験内容

本実験では、空港のコンコースでアナウンスを聴き取ることを想定し、アナウンス音に対する「聴き取りにくさ」と、周りの音に対する「うるささ」について評価していただきます。所要時間は 40 分程度（うち休憩 5 分）です。

●実験手順

- ・無響室の椅子に、指定された向きで座ります。
- ・アナウンス音の「聴き取りにくさ」を 4 段階、周りの音の「うるささ」を 5 段階で評価してください。
- ・まずアナウンス音だけを流します（回答不要）。
- ・次に練習用の音源を 1 度だけ流します。本紙下部に回答してください。
- ・練習が終わり次第本試験を開始します。28 条件 x 2 セット、計 56 条件の印象を評価してください。

※評価中は携帯電話の電源をお切りください。ご協力お願いいたします。

（練習用）

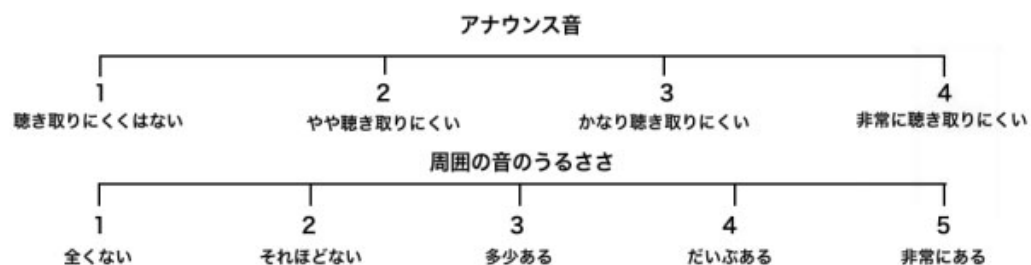


Fig. 4-3 被験者実験教示文

4.2 実験結果

被験者実験より得た評価値を用いて分析を行う。各条件設定に対する二回評価を行なったので、被験者ごとの「聴き取りにくさ」と「うるささ」の評価点は二回の評価の平均値とした。

二元配置分散分析

● 日本語母語話者と日本語非母語話者

各条件の評価点について、日本語母語話者と日本語非母語話者の違いによる有意な差があるか確認するため、二元配置分散分析を行った(Tab.4-1, Tab.4-2)。

Tab. 4-1 日本語母語話者と日本語非母語話者の「聴き取りにくさ」の二元配置分散分析の結果

	天井高 10[m] 低密度	天井高 20[m] 低密度	天井高 10[m] 高密度	天井高 20[m] 高密度
日本語母語話者と 日本語非母語話者間			*	

** : $p < 1\%$, * : $1\% \leq p < 5\%$

Tab. 4-2 日本語母語話者と日本語非母語話者の「うるささ」の二元配置分散分析の結果

	天井高 10[m] 低密度	天井高 20[m] 低密度	天井高 10[m] 高密度	天井高 20[m] 高密度
日本語母語話者と 日本語非母語話者間				

** : $p < 1\%$, * : $1\% \leq p < 5\%$

日本語母語話者と日本語非母語話者間では、天井高 10[m]話者密度高密度の「聴き取りにくさ」以外、有意差が確認されなかった。日本語母語話者と日本語非母語話者の評価結果に違いはほぼないと言える。

● 被験者間と条件間

条件間で有意に差があるか、また被験者による有意な差があるか確認するため、この2条件による二元配置分散分析を行った(Tab.4-3, Tab.4-4)。

Tab. 4-3 被験者間と条件間の「聴き取りにくさ」の二元配置分散分析の結果

	天井高 10[m] 低密度	天井高 20[m] 低密度	天井高 10[m] 高密度	天井高 20[m] 高密度
被験者間	**	*	**	**
条件間	**	**	**	**

** : $p < 1\%$, * : $1\% \leq p < 5\%$

Tab. 4-4 被験者間と条件間の「うるささ」の二元配置分散分析の結果

	天井高 10[m] 低密度	天井高 20[m] 低密度	天井高 10[m] 高密度	天井高 20[m] 高密度
被験者間	**	**	**	**
条件間	**	**	**	**

** : $p < 1\%$, * : $1\% \leq p < 5\%$

全部の被験者間と条件間では、有意差が確認された。被験者によって感じ方が異なる可能性がある。また、条件ごとの違いが十分にあると言える。

条件の違いによる傾向

● 「聴き取りにくさ」

Fig.4-4 に「聴き取りにくさ」の平均評点を示す。また、「聴き取りにくさ」と関連性が高いと予測された U50 も同じ図に「*」でプロットした。Fig.4-5 に「聴き取りにくさ」の箱ひげ図を示す。

各音場より得られた「聴き取りにくさ」に対する回答の割合を z 値に変換し、それに基づいて各条件設定の音声転送性能のクラスを Fig.4-6 に示している。

「聴き取りにくさ」の平均評点と回答より計算した音声転送性能のクラスについて考察する。

吸音ありの条件と吸音なしの条件に対する平均評点を比較すると、どの吸音設定においても吸音より「聴き取りにくさ」を低減する効果が示されている。

吸音ありの条件のうち、最も U50 が小さい「天井のみ中程度吸音」でも顕著な「聴き取りにくさ」を低減する効果を示しているが、吸音ありの各吸音条件において「聴き取りにくさ」の変化幅が小さく、吸音率と吸音面積の増大より「聴き取りにくさ」を低減する効果の増大が見られなかった。これは U50 と同じ傾向を示している。また、「天井と壁下部高度吸音」の場合の「聴き取りにくさ」は「天井と壁下部中程度吸音」の場合より大きく、U50 との逆の傾向を示している。これは吸音効果の増大により騒音の明瞭度も共に上昇することで、本来の無意味騒音が有意味騒音になり、妨害感が増大することが原因だと考えられる。

音声転送性能のクラスを見ても、U50 が高い吸音条件において「聴き取りにくさ」が逆に上昇する場合もある。また、天井高 10m の場合、音声伝達性能が最も高い吸音条件は「天井のみ高度吸音」と「天井と壁上部中程度吸音」である。天井高 20m の場合、話者密度 0.01 人/m²では「天井と壁上部高度吸音」、話者密度 0.04 人/m²では「天井のみ中程度吸音」が最も高い音声伝達性能を持つ。つまり、適切な吸音対策ではアナウンス音の明瞭度を向上する効果を持つが、吸音過剰の場合、アナウンス音が逆に聴き取りにくくなる可能性がある。

また、「聴き取りにくさ」のクラスと「聴き取りにくさ」の平均得点を比較すると、話者密度 0.01 人/m²では良い対応が見られたが、話者密度 0.04 人/m²の場合では逆の傾向を示された場合がある。それは、暗騒音レベルが高い場合、「聴き取りにくさ」に対する回答が 1 以上になる場合が多い、特に今回の実験に被験者数は少ないため、少数な「聴き取りにくくはない」の回答でも大きい影響が出た。一例として、話者密度 0.04 人/m²、天井高 20m の場合、「天井と壁下部中程度吸音」の「聴き取りにくさ」の平均得点は「天井と壁上部高度吸音」より低い、「聴き取りにくさ」のクラスはより高い。「聴き取りにくくはない」の回答数を見ると、「天井と壁下部中程度吸音」では「なし」、「天井と壁上部

高度吸音」では「1回」である。しかし被験者数が少ないため、「聴き取りにくさ」のクラスが、「聴き取りにくくはない」の回答数は「なし」の場合は「クラスF」、「1回」の場合は「クラスE」になる。一回の回答の差異で「聴き取りにくさ」のクラスについて差を付くことが不合理だと考えられる。音声の明瞭度が低い場合、「聴き取りにくさ」のクラスを判定するためには、十分な被験者数が必要だと考えられる。

- 「うるささ」

Fig.4-7に「うるささ」の平均評点を示す。また、「聴き取りにくさ」と関連性が高いと予測された暗騒音レベルも同じ図に「*」でプロットした。Fig.4-8に「うるささ」の箱ひげ図を示す。

吸音ありの条件と吸音なしの条件に対する平均評点を比較すると、どの吸音設定においても吸音より「うるささ」を低減する効果が示されている。これは暗騒音レベルと同じ傾向を示している。

「天井と壁下部高度吸音」の場合と「天井と壁下部中程度吸音」の場合の「うるささ」を比較すると、話者密度 0.04 人/m^2 ・天井高 20m の場合だけは暗騒音レベルと逆の傾向を示している。有意味騒音は無意味騒音より高いうるささ感を持つ可能性があると考えられる。

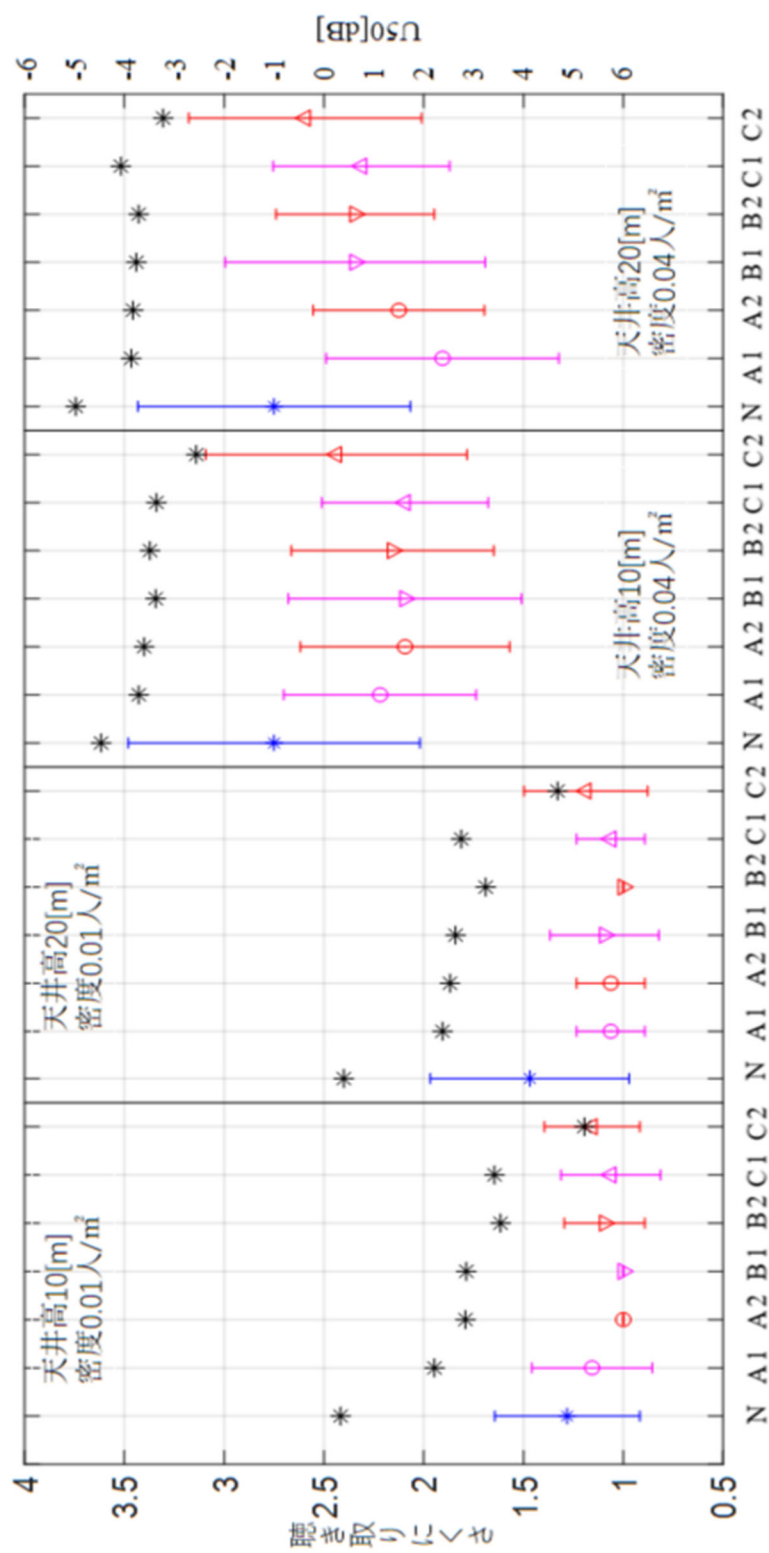


Fig. 4-4 「聞き取りにくさ」の平均評点

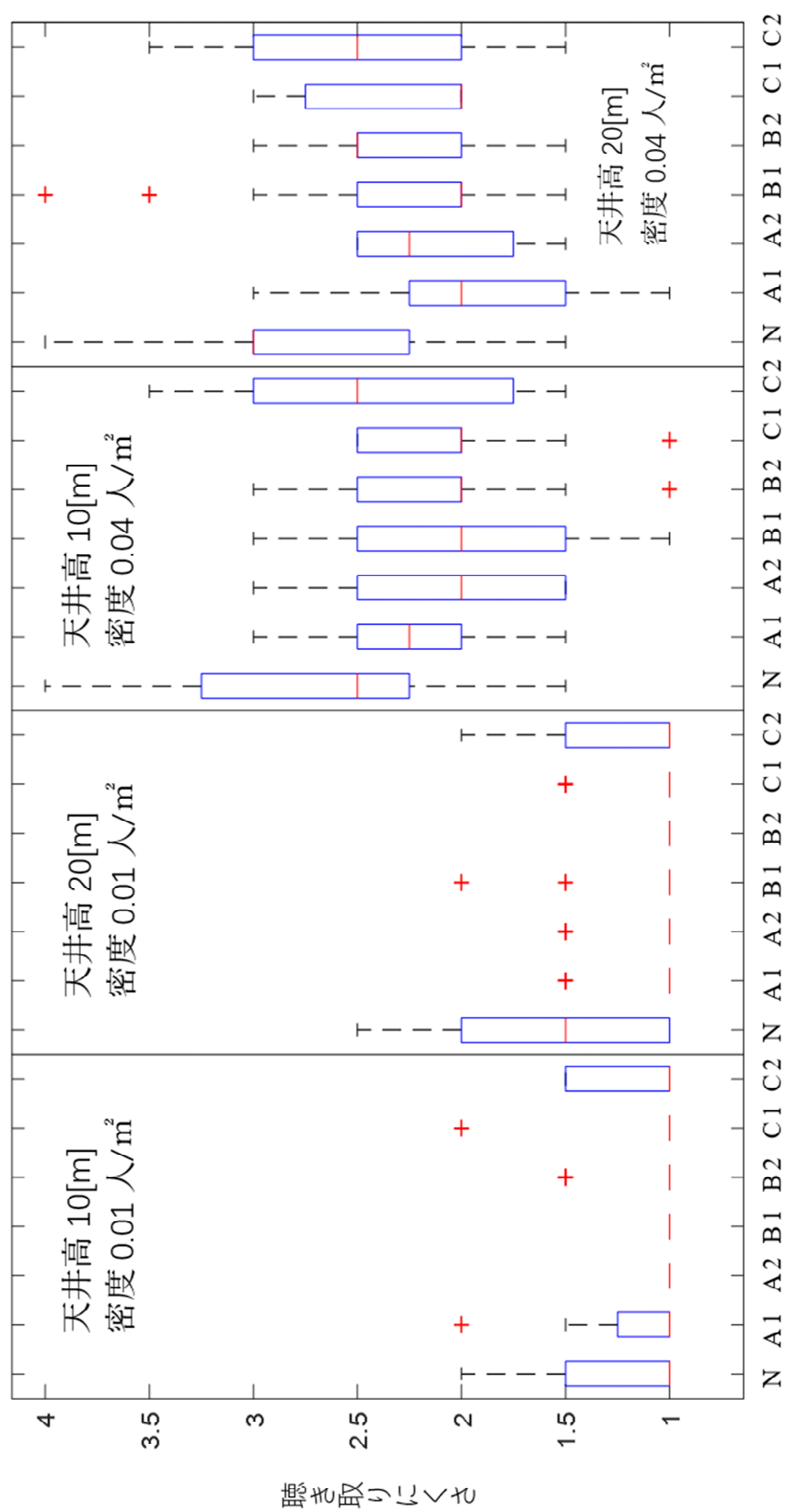


Fig. 4-5 「聞き取りにくさ」の箱ひげ図

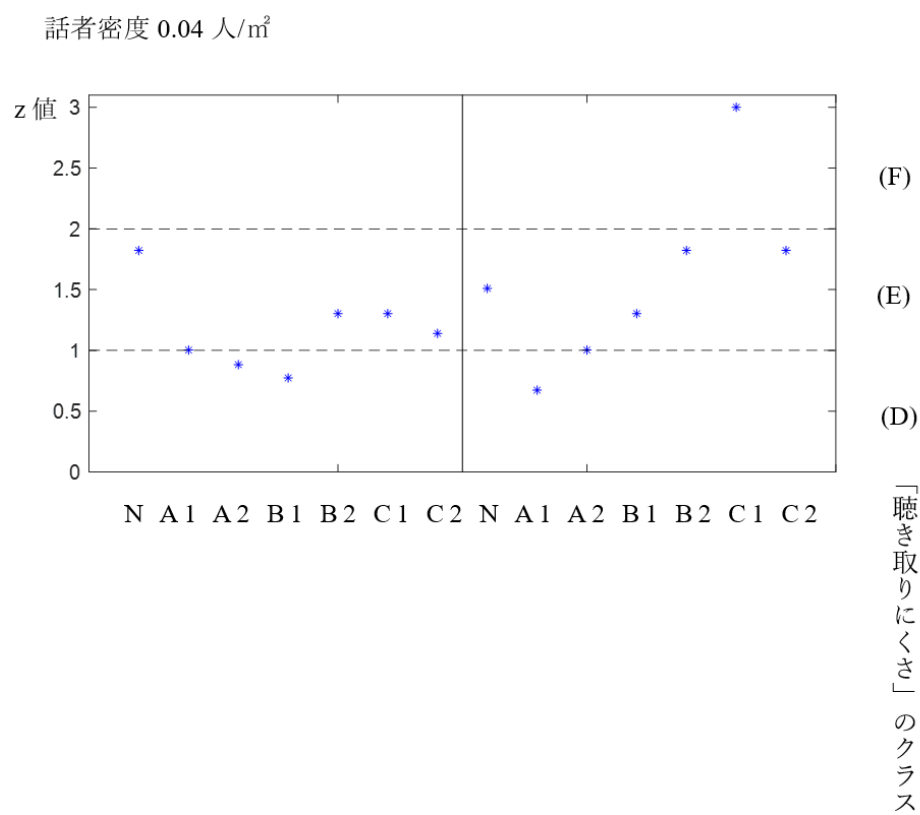
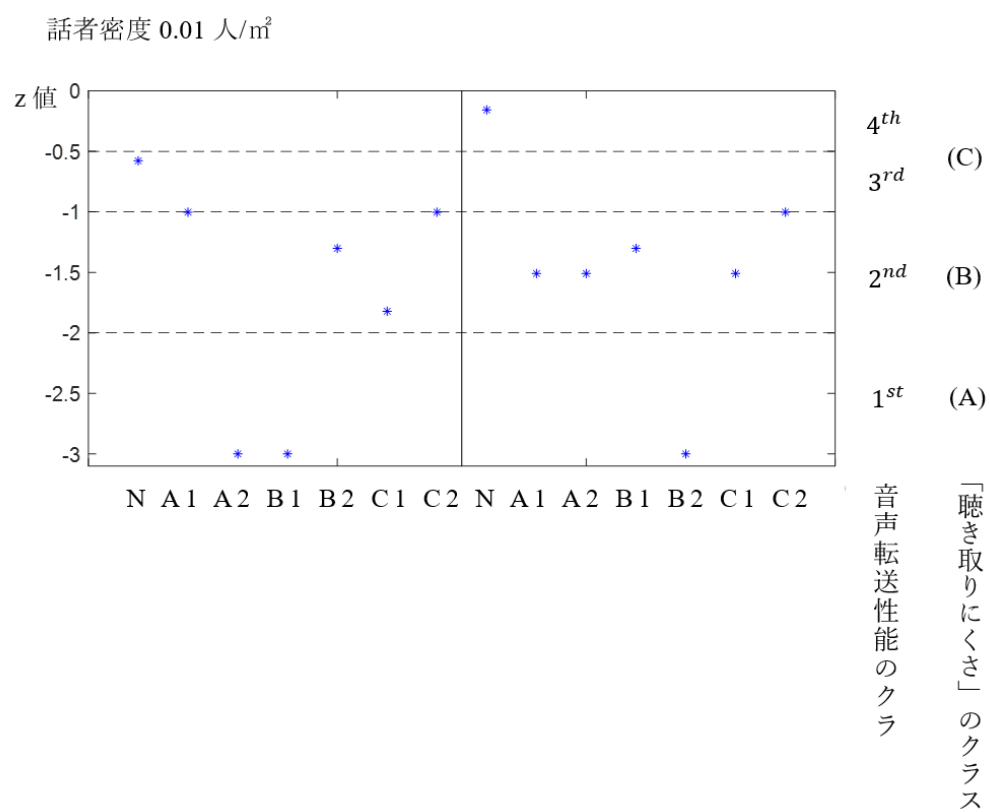


Fig. 4-6 音声転送性能と「聴き取りにくさ」のクラス

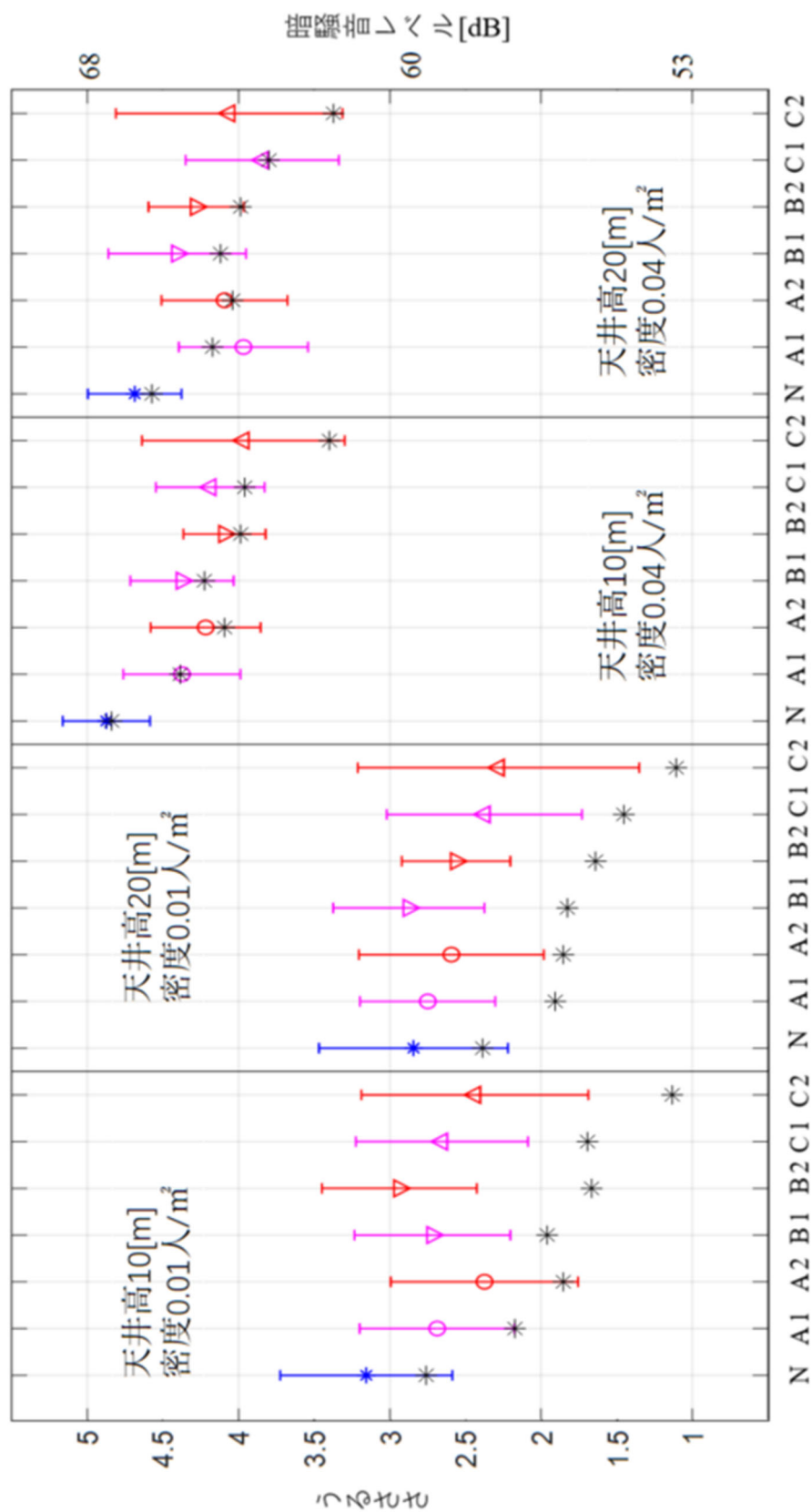


Fig. 4-7 「うるささ」の平均評点

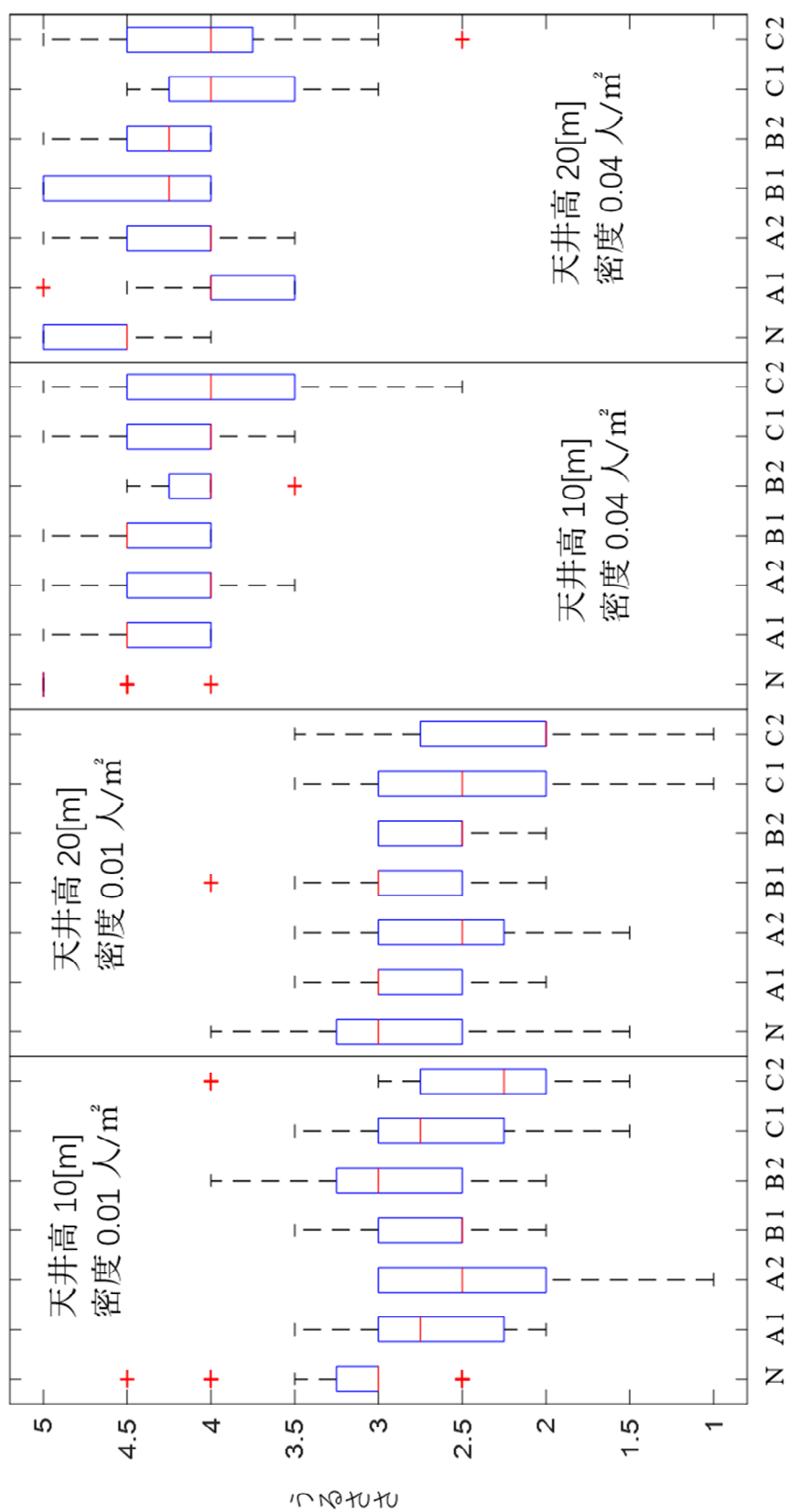


Fig. 4-8 「うるささ」の箱ひげ図

物理指標と心理量の対応

評価語と物理指標との対応を確認するため、相関係数を算出し、Tab.4-5 に示す。

Tab. 4-5 評価語と物理指標の相関係数

話者密度 0.01 人/m²

	聴き取りにくさ	うるささ	暗騒音レベル	SN 比	U50
聴き取りにくさ					
うるささ	0.37				
暗騒音レベル	0.43	0.77			
SN 比	-0.38	0.35	0.18		
U50	-0.50	-0.67	-0.94	0.03	

話者密度 0.04 人/m²

	聴き取りにくさ	うるささ	暗騒音レベル	SN 比	U50
聴き取りにくさ					
うるささ	0.56				
暗騒音レベル	0.16	0.82			
SN 比	0.04	0.65	0.67		
U50	-0.39	-0.60	-0.77	-0.11	

■ : -1.0~-0.7 ■ : -0.7~-0.4 ■ : -0.4~0.4 ■ : 0.4~0.7 ■ : 0.7~1.0

「うるささ」と暗騒音レベルには強い正の相関が示している。吸音対策により暗騒音の低減で周りの音の「うるささ」感も低減されることがわかる。一方、「聴き取りにくさ」と U50 には強い相関が見られず、期待に反した結果が示されている。暗騒音の意味性の影響により「聴き取りにくさ」と U50 の相関が低くなる可能性があると考えられる。

物理指標と心理量の対応の検討を深めるため、各物理指標と心理量の一对一の回帰分析を行い、両者の関係をプロットして回帰直線を引いた。また、各回帰モデルの決定係数 R^2 と F 検定により p 値をグラフに示す。モデルが有意($p<0.05$)である、そして決定係数 R^2 が高い($R^2>0.4$)場合は赤字で示す。

回帰分析の結果と検討

● 等価吸音面積(Fig.4-9)

「聴き取りにくさ」と「うるささ」は両方とも等価吸音面積との有意な相関が確認できなかった。やはり等価吸音面積が同じでも、吸音材の配置位置により吸音効果が違い、等価吸音面積により「聴き取りにくさ」あるいは「うるささ」の予測が不適切だと言える。

● 残響時間(Fig.4-10)

話者密度 0.01/m²の場合「聴き取りにくさ」と残響時間にやや正の相関が確認できたが、それ以外の場合「聴き取りにくさ」「うるささ」と残響時間に有意な相関が確認できなかった。「聴き取りにくさ」と残響時間の無相関の原因は、吸音対策の残響低減の効果はアナウンス音の初期反射音と暗騒音の反射音に同時に作用すると考えられる。残響時間が短くなるほどアナウンス音の明瞭度が向上するとは言えない。「うるささ」と残響時間の無相関の原因は、話者密度と吸音設定が同じの場合、天井高が高い場合残響時間が長い、

暗騒音レベルが逆に低いので、単に残響時間により「うるささ」の予測ができないと考えられる。

- アナウンス音の音圧レベル(Fig.4-11)

「聴き取りにくさ」とアナウンス音の音圧レベルに有意な相関が確認できなかったが、「うるささ」とアナウンス音の音圧レベルに正の相関が見られた。やはり吸音によりアナウンス音の音圧レベルが低くなるほど、暗騒音レベルも低くなり、暗騒音レベルと強い正の相関を持つ「うるささ」も同時に低くなる。

- 暗騒音レベル(Fig.4-12)

「聴き取りにくさ」と暗騒音レベルに有意な相関が確認できなかったが、「うるささ」と暗騒音レベルに正の相関が見られた。やはり吸音により暗騒音の反射音が吸音されるほど「うるささ」が低くなる。吸音対策の騒音低減の効果が顕著だと言える。

- SN 比(Fig.4-13)

「聴き取りにくさ」と「うるささ」は両方とも SN 比との有意な相関が確認できなかった。やはり単に吸音により全体的な SN 比の変化を見ることで、アナウンス音の貢献因子と妨害因子の変化は不明であるため、SN 比により「聴き取りにくさ」の予測ができないと考えられる。

- U50(Fig.4-14)

U50 により「聴き取りにくさ」の予測が期待されたが、「聴き取りにくさ」と U50 に有意な相関が確認できなかった。「天井と壁下部高度吸音」の場合「聴き取りにくさ」は予測値より顕著に高い。その原因は、「天井と壁下部高度吸音」の場合のみ暗騒音は有意味騒音であり、騒音の有意性は「聴き取りにくさ」を向上する効果を持つ可能性がある。従って、騒音の有意性の有無をダミー変数とし、U50 と「聴き取りにくさ」の重回帰分析を行った(Fig.4-17)。

その結果、U50 と「聴き取りにくさ」に強い相関が見られた。やはり騒音の有意性を考慮すると、吸音の残響抑制の効果が大きい場合でも U50 で「聴き取りにくさ」の予測ができることが示されている。二つの話者密度においてダミー変数の偏回帰係数が違い、騒音の有意性により「聴き取りにくさ」向上の程度は一定とは言えない。話者密度が高い場合ダミー変数の偏回帰係数が大きいので、暗騒音レベルが高いほど、騒音の有意性により「聴き取りにくさ」向上の程度は高くなる可能性があるが、今回の有意味騒音に対する実験結果が少ないため、そういう結論が得られない。

- z 値(Fig.4-15, Fig.4-16)

話者密度 0.01/m²の場合「聴き取りにくさ」と z 値に正の相関が確認できたが、それ以外の場合「聴き取りにくさ」「うるささ」と z 値に有意な相関が確認できなかった。また、z 値と U50 の相関が確認できなかった。音声の明瞭度が高い場合、z 値と「聴き取りにくさ」の対応が良い、標本数が少ないでも z 値により「聴き取りにくさ」のクラス分類は妥当だと考えられる。

音環境の改善に対する検討

吸音対策が音環境の改善に対する効果を検討するため、条件設定毎に「聴き取りにくさ」と「うるささ」を関連してプロットし、Fig.4-18 に示す。点が原点に近いほど音環境が良いと考えられる。

話者密度 $0.01/m^2$ の場合、最も良い音環境と言えるのは「天井高 10m」「天井のみ高度吸音」であり、話者密度 $0.04/m^2$ の場合、最も良い音環境と言えるのは「天井高 20m」

「天井のみ中程度吸音」である。軽度な吸音対策でも良い音環境を改善する効果を持つことが示されている。また、室寸法あるいは騒音源の分布が異なる場合、吸音対策の効果が異なる可能性が示唆された。

* 吸音なし
 ○ 天井のみ吸音
 ▽ 天井と壁上部吸音
 △ 天井と壁下部吸音

■ 中程度吸音
 ■ 高度吸音

○ 天井高10m
 ● 天井高20m

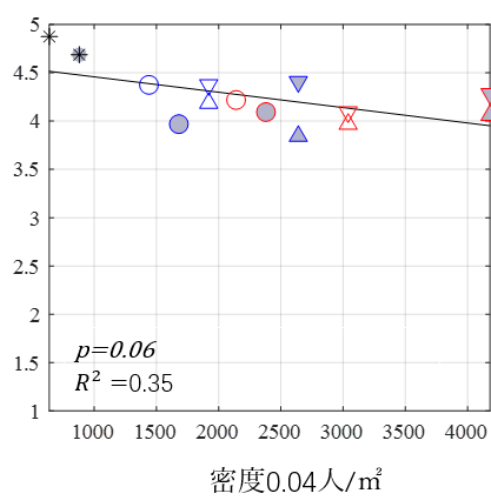
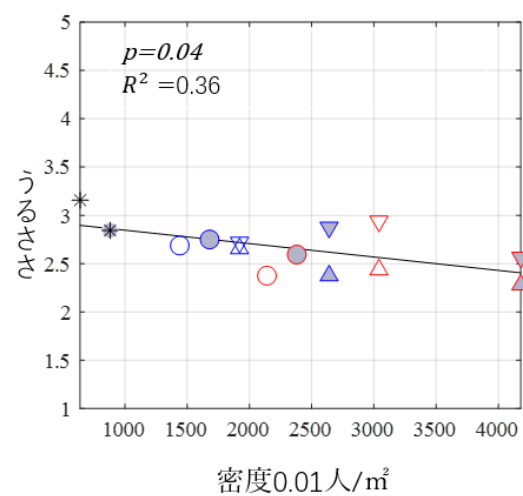
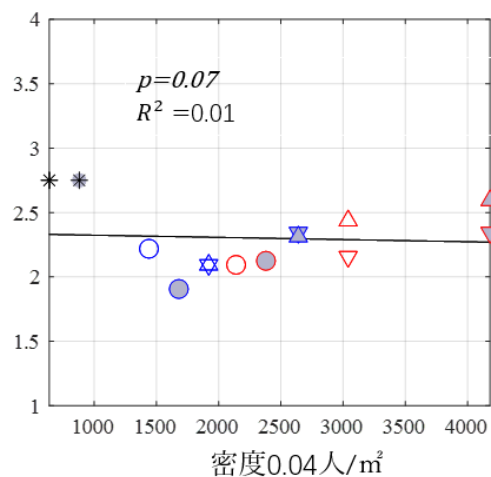
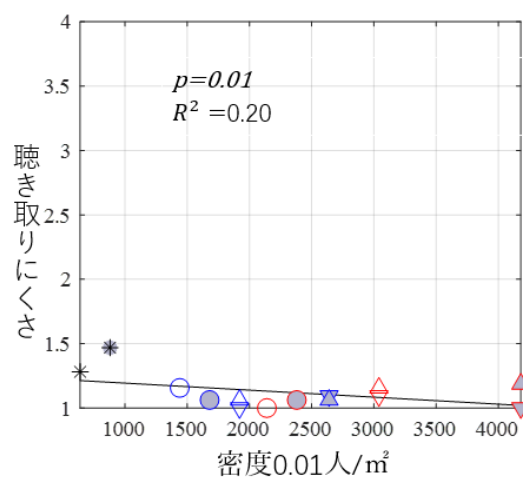


Fig. 4-9 等価吸音面積と評価語の対応関係

* 吸音なし
 ○ 天井のみ吸音
 ▽ 天井と壁上部吸音
 △ 天井と壁下部吸音

■ 中程度吸音
 ■ 高度吸音

○ 天井高10m
 ● 天井高20m

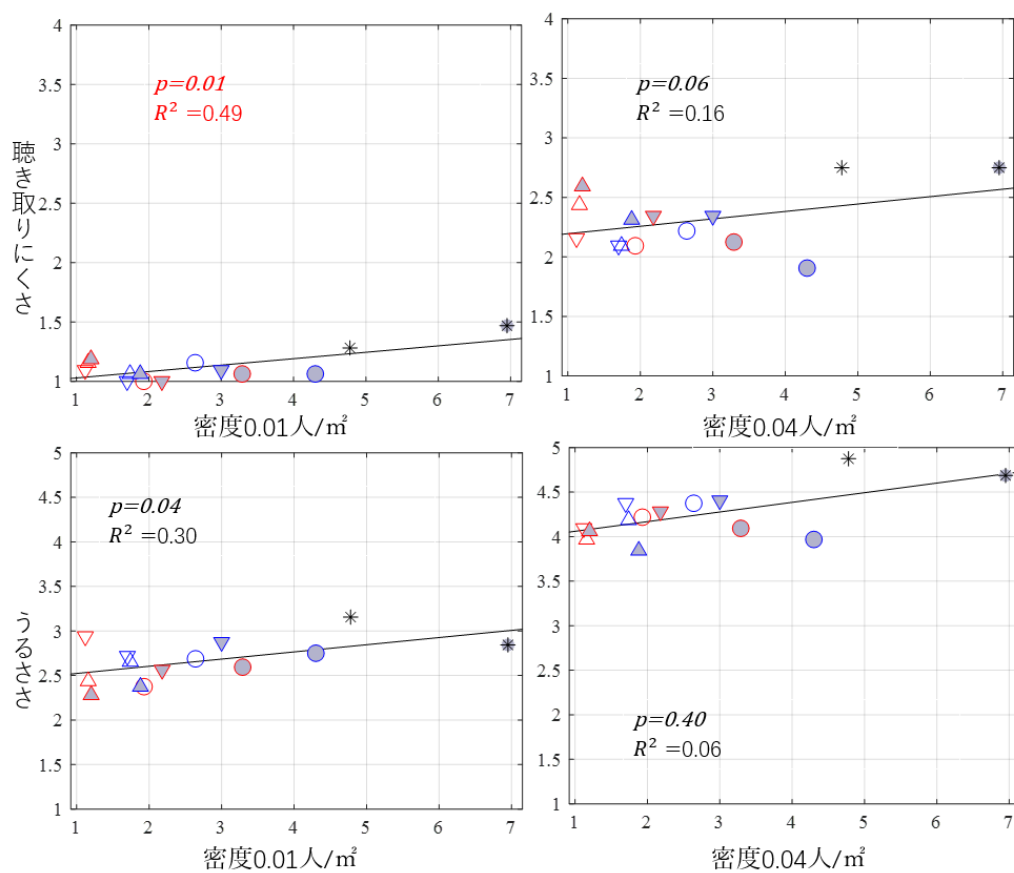


Fig. 4-10 残響時間と評価語の対応関係

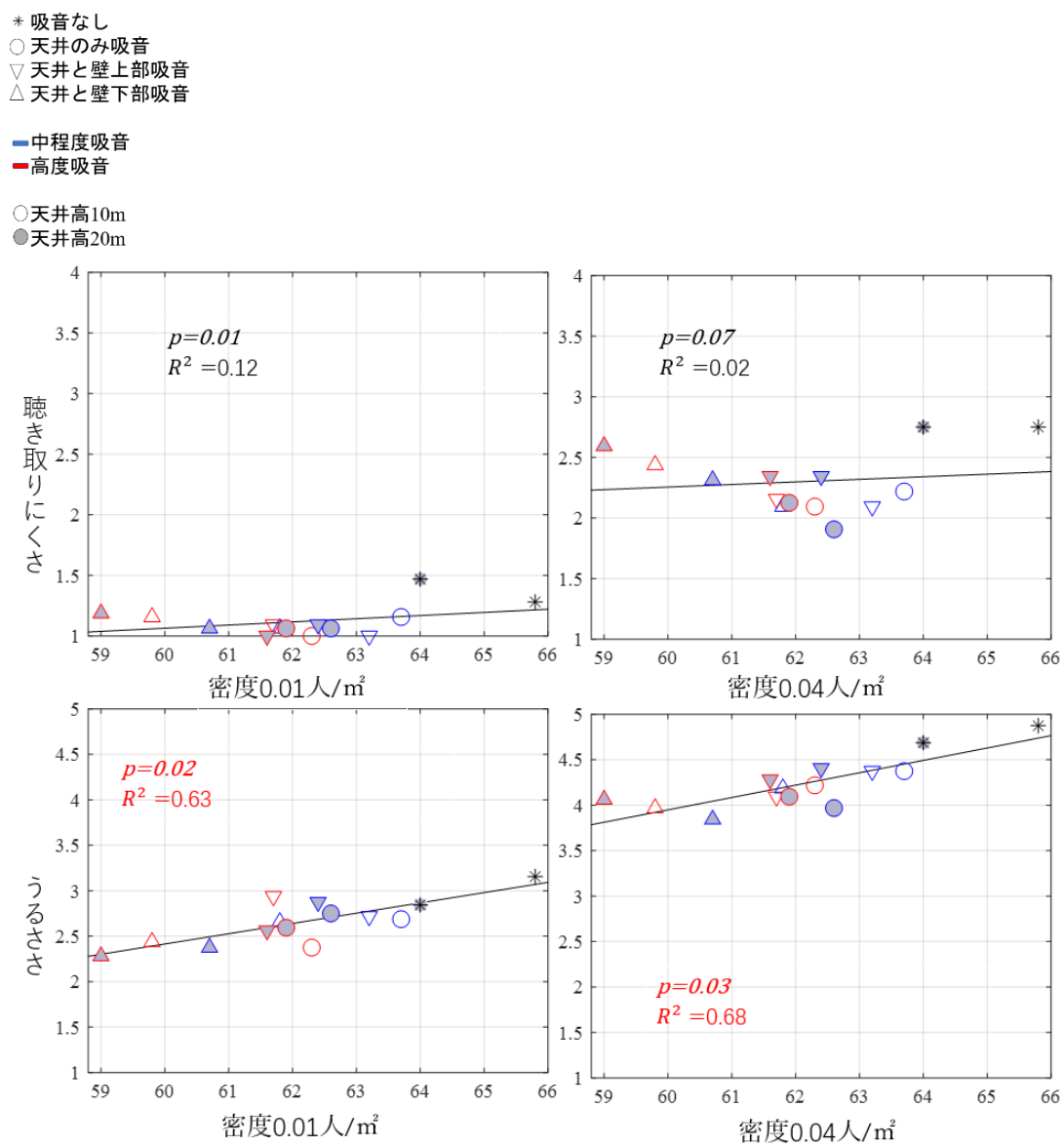


Fig. 4-11 アナウンス音の音圧レベルと評価語の対応関係

- * 吸音なし
- 天井のみ吸音
- ▽ 天井と壁上部吸音
- △ 天井と壁下部吸音
- 中程度吸音
- 高度吸音
- 天井高10m
- 天井高20m

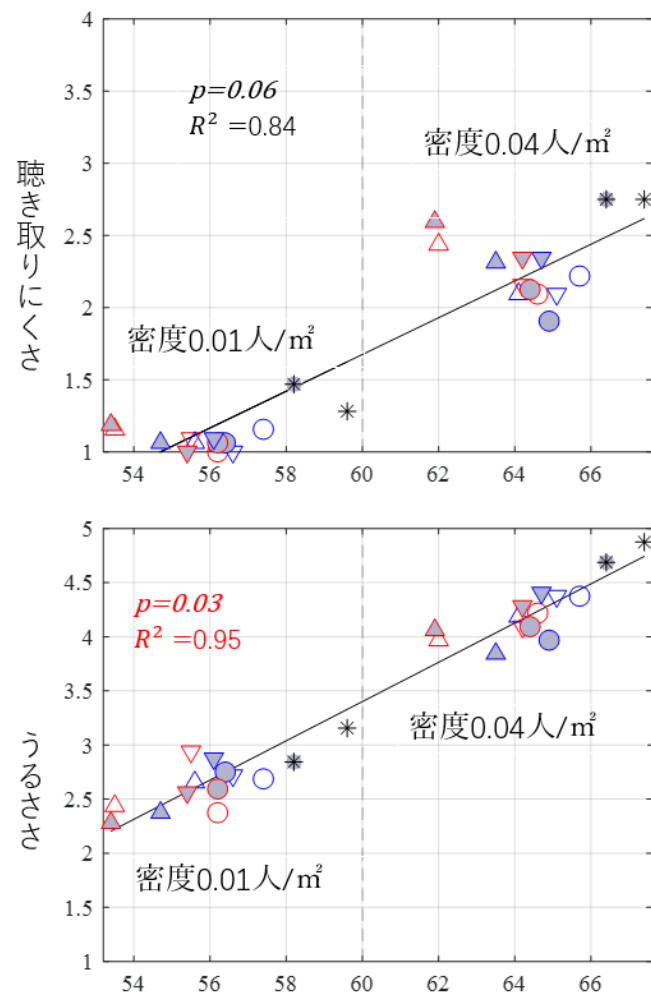


Fig. 4-12 暗騒音レベルと評価語の対応関係

* 吸音なし
 ○ 天井のみ吸音
 ▽ 天井と壁上部吸音
 △ 天井と壁下部吸音

— 中程度吸音
 — 高度吸音

○ 天井高10m
 ● 天井高20m

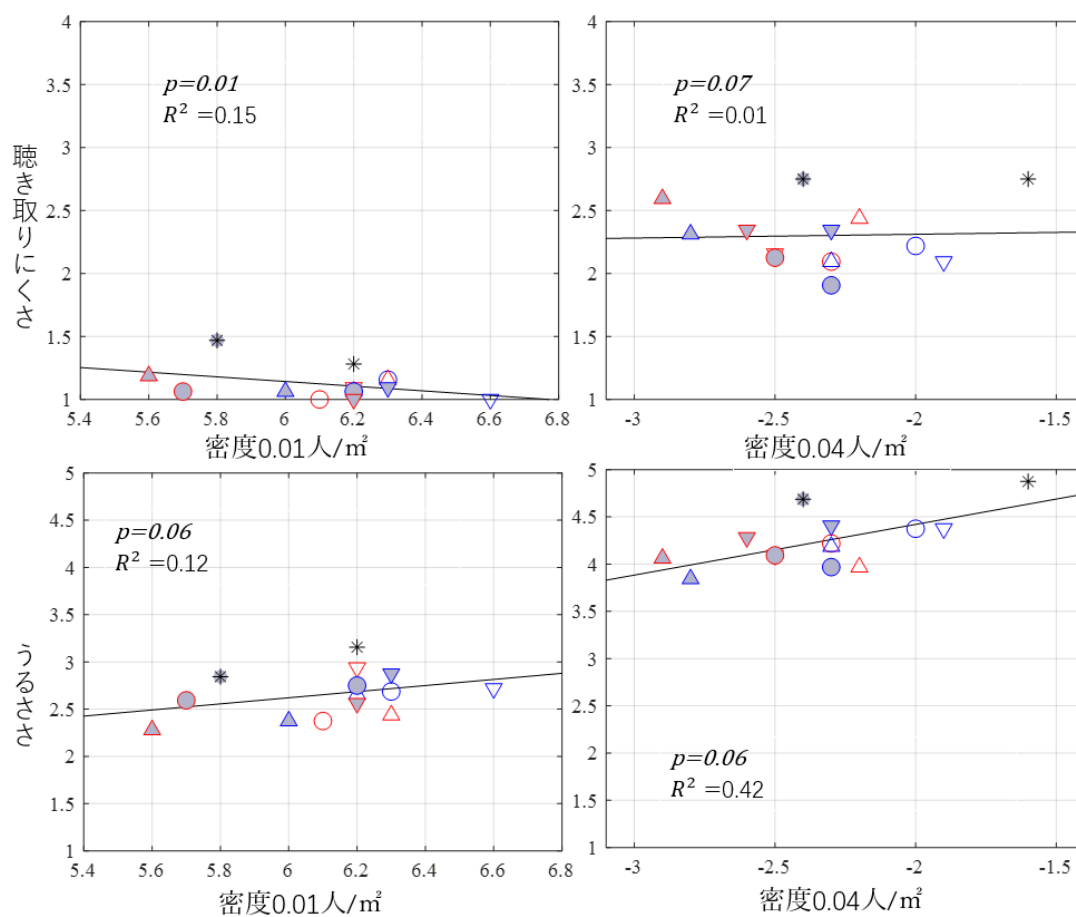


Fig. 4-13 SN 比と評価語の対応関係

* 吸音なし
 ○ 天井のみ吸音
 ▽ 天井と壁上部吸音
 △ 天井と壁下部吸音

■ 中程度吸音
 ■ 高度吸音

○ 天井高10m
 ● 天井高20m

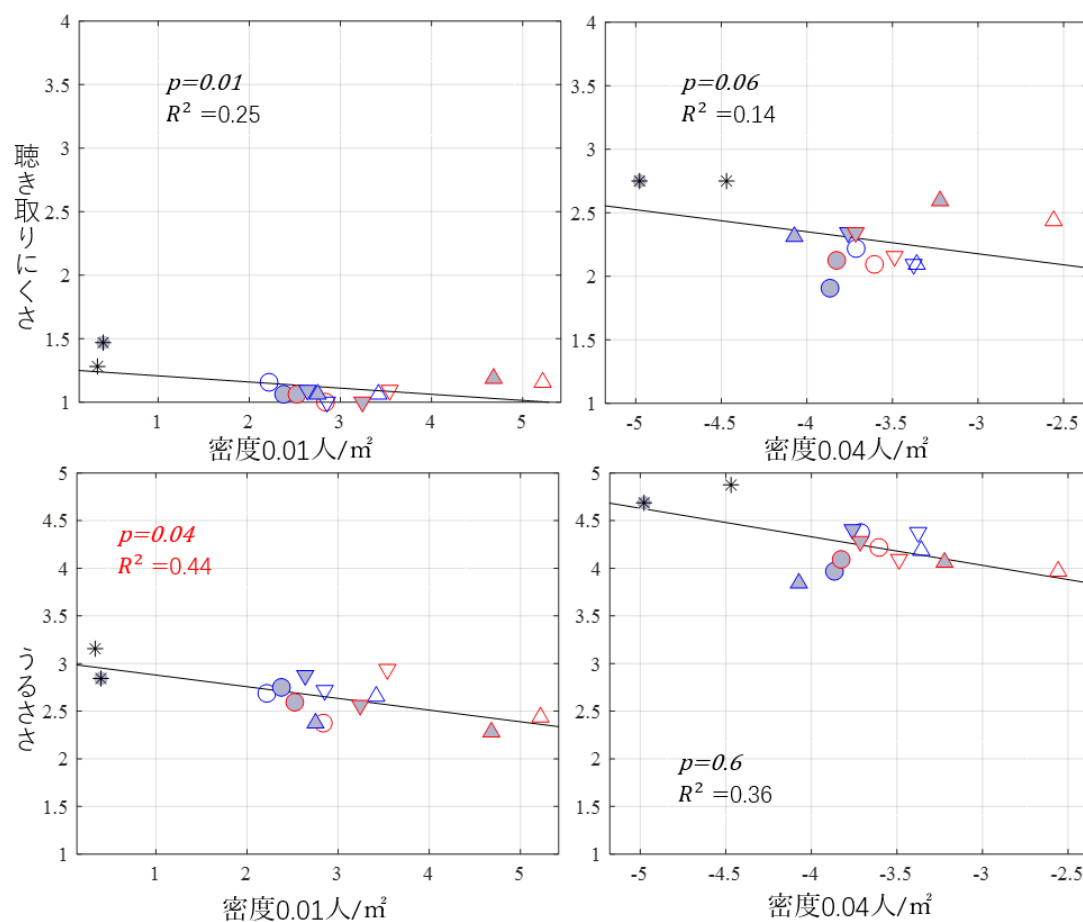


Fig. 4-14 U50 と評価語の対応関係

* 吸音なし
 ○ 天井のみ吸音
 ▽ 天井と壁上部吸音
 △ 天井と壁下部吸音

— 中程度吸音
 — 高度吸音

○ 天井高10m
 ● 天井高20m

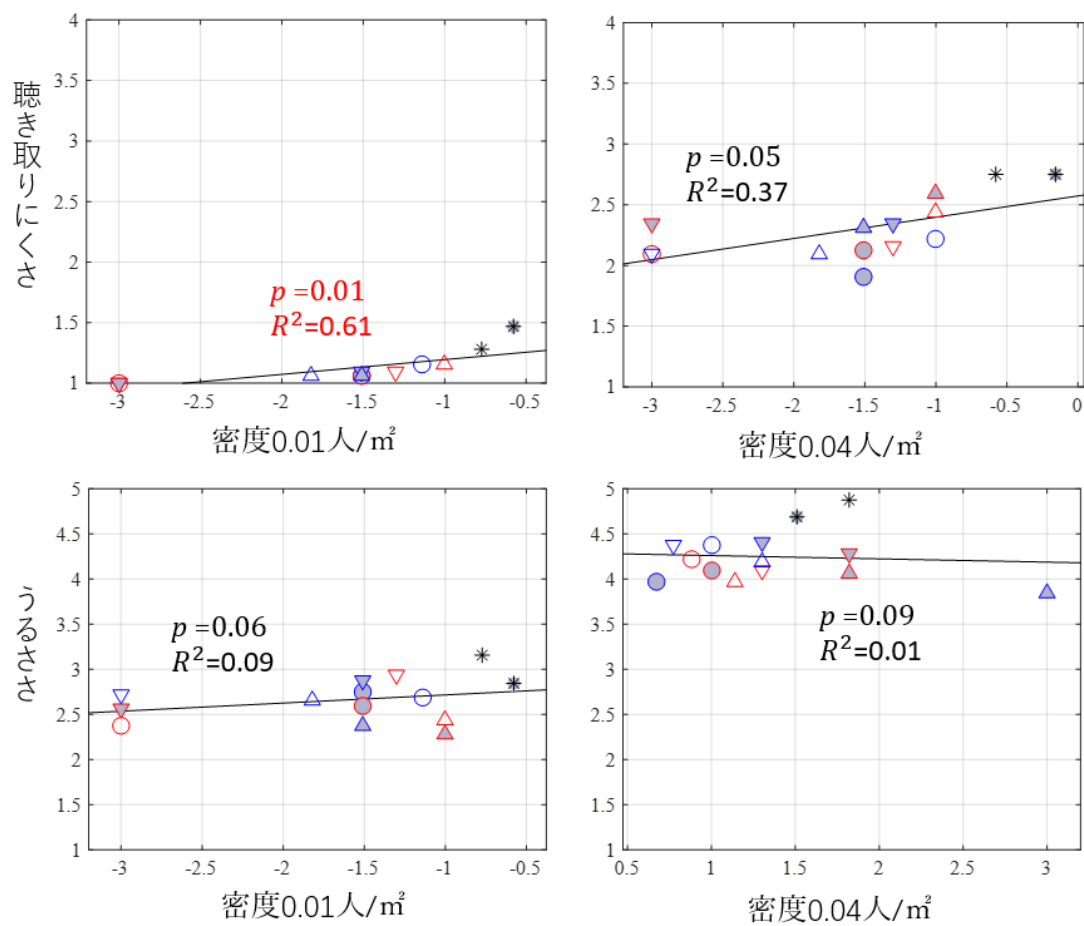


Fig. 4-15 z 値と評価語の対応関係

* 吸音なし
 ○ 天井のみ吸音
 ▽ 天井と壁上部吸音
 △ 天井と壁下部吸音

— 中程度吸音
 — 高度吸音

○ 天井高10m
 ● 天井高20m

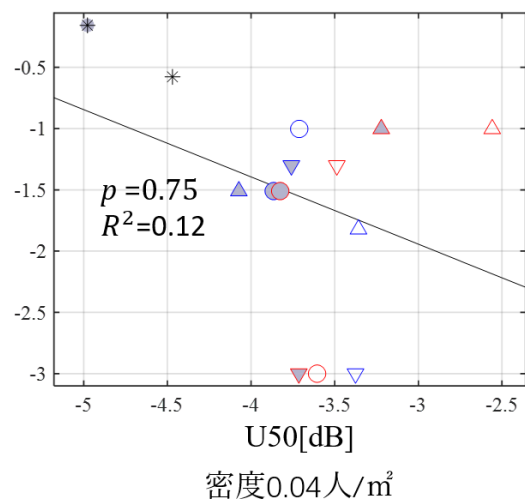
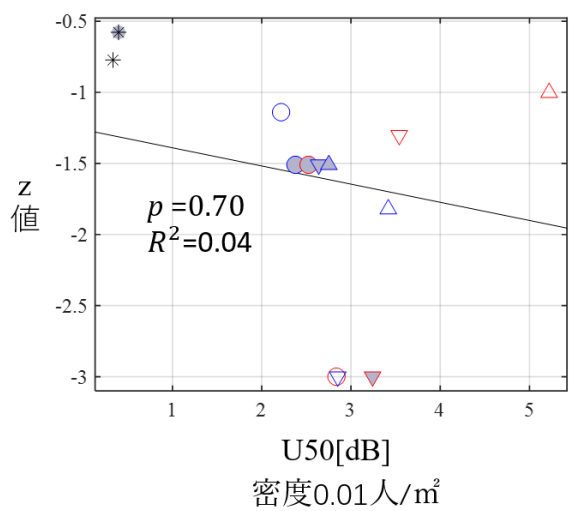


Fig. 4-16 z 値と U50 の対応関係

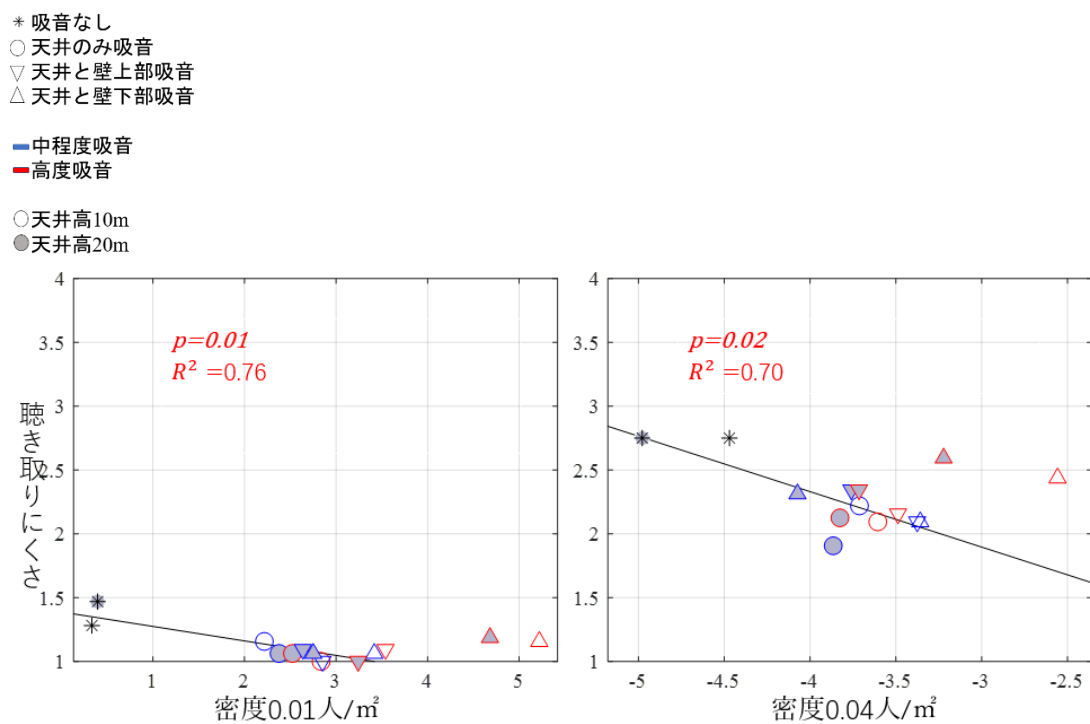


Fig. 4-17 ダミー変数を採用する場合の U50 と「聞き取りにくさ」の対応関係

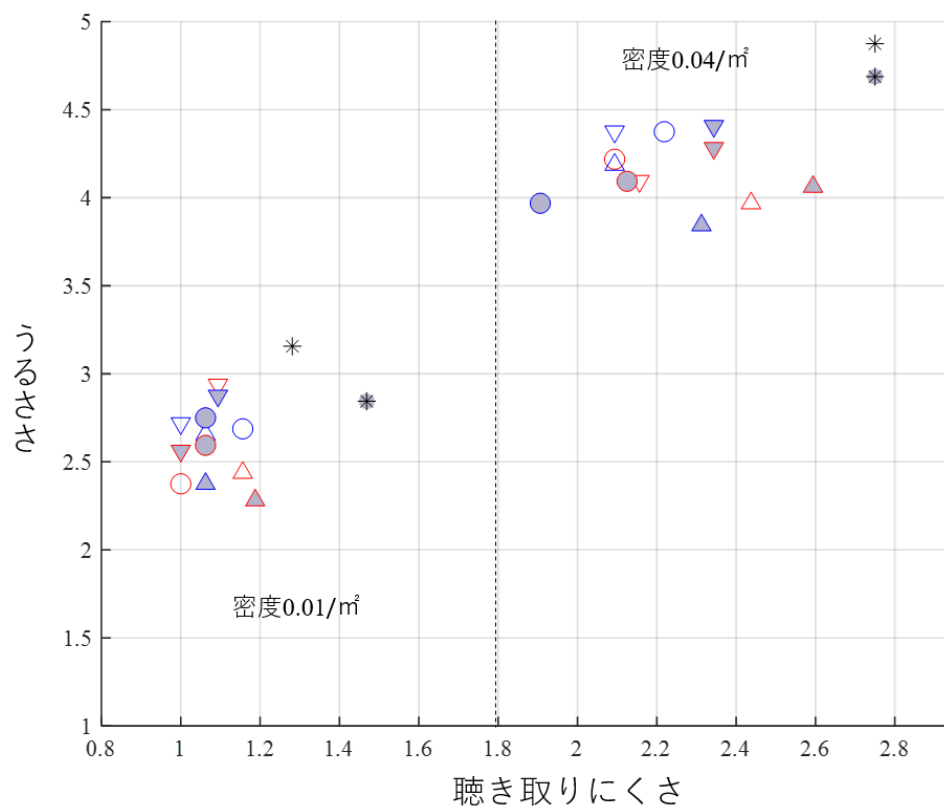


Fig. 4-18 「聞き取りにくさ」と「うるささ」の関連

第5章

総括

5.1 まとめ

第1章では、旅客コンコースの音環境を重視するがあることを説明した。また、現存の旅客コンコースの音環境について検討し、旅客コンコースにアナウンス音の聴取が困難という現状を示した。これを研究背景とし、旅客コンコースのアナウンス聴取に対する吸音対策効果を検討することを最終目標とし、本研究の目的は旅客コンコースの音環境の改善する方法について知見を得ることとして述べた。

第2章では、本研究に用いる旅客コンコースの音環境の再現するための可聴化シミュレーションシステムについて述べる。本システムを構成する生音源収録系、IR生成系、再生音生成系、音場再生系それぞれの設定と機能について述べた。

第3章では、実験設定に関する検討を述べた。まず、旅客コンコースに関する実態調査を行い、旅客コンコースの音環境の現状を把握したことを述べた。そして旅客コンコースの現状より実験条件を設定し説明した。また、実験設定により可聴化音場を作成し、物理指標により吸音対策の効果を予測した。

第4章では、主観評価実験を行い、旅客コンコースのアナウンス聴取に対する吸音対策効果に関する実験的検討を述べた。第1節では、主観評価実験の内容について簡単に説明した。第2節では、実験の結果を述べた。実験の結果から、吸音対策がアナウンス聴取に対する明瞭度を向上することが確認した。また、軽度な吸音対策でも比較的に高い明瞭度を向上する効果を持つことが示された。一方、予測の反対、吸音しすぎるとアナウンス聴取が逆に困難になることも示された。物理指標と心理量の対応を検討した結果として、吸音過剰の場合、本来の無意味暗騒音が有意味暗騒音になり、妨害感が向上する可能性が示唆された。また、暗騒音に関する聴感実験では、暗騒音の響き情報の忠実な再現が重要であることも示唆された。

以上より、本研究では可聴化シミュレーションシステムを構築し、旅客コンコースの音環境を再現し、主観評価実験により吸音対策の効果を検討した。軽度な吸音対策でも比較的に高い明瞭度を向上する効果を持つことが示され、吸音過剰の場合明瞭度が逆に低減する可能性を示唆した。

5.2 今後の課題

本研究では、前述の通り、旅客コンコースのアナウンス聴取に対する吸音対策効果について基本的な検討を行なった。しかし、本研究における実験条件が便宜的に設定され、より現実的な音環境を再現し検討する必要がある。実際の旅客コンコースにおいて、複数のスピーカーが存在する例が多い、アナウンス音の遅延により明瞭度に対する影響の検討が必要である。また、本研究に設定した騒音源は話声のみ、より現実には多種多様の騒音を現実すると、吸音対策の効果が変化すると考えられる。

そして、本研究では吸音過剰の場合明瞭度が逆に低減する可能性を示唆したが、騒音の性質に関する検討を深める必要があると考える。

図目次

Fig. 2-1 可聴化シミュレーションシステムの概要	5
Fig. 2-2 IR 生成系のプロセス図	7
Fig. 2-3 生音源収録系のプロセス図	8
Fig. 2-4 収録の様子	9
Fig. 2-5 再生音生成系のプロセス図	10
Fig. 2-6 音源再生系の概要図	12
Fig. 3-1 コンコース A の調査結果	14
Fig. 3-2 コンコース B の調査結果	14
Fig. 3-3 コンコース C の調査結果	15
Fig. 3-4 コンコースの室寸法	16
Fig. 3-5 受音点・アナウンス音・騒音源の配置図	17
Fig. 3-6 アナウンス音の周波数特性	18
Fig. 3-7 音声の周波数特性	18
Fig. 3-8 吸音材の配置位置	19
Fig. 3-9 各条件設定の室内等価吸音面積	20
Fig. 3-10 各条件設定の残響時間	21
Fig. 3-11 各条件設定の暗騒音レベル	22
Fig. 3-12 各条件設定のアナウンス音の音圧レベル	23
Fig. 3-13 各条件設定の SN 比	24
Fig. 3-14 各条件設定の <i>U50</i>	26
Fig. 4-1 音源の提示方法	29
Fig. 4-2 主観評価実験の様子	29
Fig. 4-3 被験者実験教示文	30
Fig. 4-4 「聴き取りにくさ」の平均評点	34
Fig. 4-5 「聴き取りにくさ」の箱ひげ図	35
Fig. 4-6 音声転送性能と「聴き取りにくさ」のクラス	36
Fig. 4-7 「うるささ」の平均評点	37
Fig. 4-8 「うるささ」の箱ひげ図	38
Fig. 4-9 等価吸音面積と評価語の対応関係	42
Fig. 4-10 残響時間と評価語の対応関係	43

Fig. 4-11	アナウンス音の音圧レベルと評価語の対応関係	44
Fig. 4-12	暗騒音レベルと評価語の対応関係	45
Fig. 4-13	SN 比と評価語の対応関係	46
Fig. 4-14	U50 と評価語の対応関係	47
Fig. 4-15	z 値と評価語の対応関係	48
Fig. 4-16	z 値と U50 の対応関係	49
Fig. 4-17	ダミー変数を採用する場合の U50 と「聴き取りにくさ」の対応関係.....	50
Fig. 4-18	「聴き取りにくさ」と「うるささ」の関連	50

表目次

Tab. 2-1	機材リスト	6
Tab. 2-2	数値解析に用いるパラメータ	7
Tab. 2-3	Wav ファイルのフォーマット	8
Tab. 3-1	七条件の吸音設定	19
Tab. 4-1	日本語母語話者と日本語非母語話者の「聴き取りにくさ」の二元配置分散分析の結果	31
Tab. 4-2	日本語母語話者と日本語非母語話者の「うるささ」の二元配置分散分析の結果	31
Tab. 4-3	被験者間と条件間の「聴き取りにくさ」の二元配置分散分析の結果	31
Tab. 4-4	被験者間と条件間の「うるささ」の二元配置分散分析の結果	32
Tab. 4-5	評価語と物理指標の相関係数	39

参考文献

- [1] 日本建築学会 編, “都市・建築空間における音声伝送性能評価規準・同解説-日本建築学会環境基準 AIJES-S0002-2011” (2011)
- [2] 横山 栄, 向井 ひかり, 橘 秀樹, 公共空間の音環境に関する実測調査例, 騒音制御, 1999, 23 巻, 4 号, p. 228-231
- [3] 橘 秀樹, 平野 滋, 公共空間の音環境設計と騒音制御: 駅コンコース, 騒音制御, 1999, 23 巻, 4 号, p. 238-242
- [4] 伊積 康彦, 駅コンコースの音環境の実態(<小特集>公共空間における音環境マネジメント), 日本音響学会誌, 2014, 70 巻, 3 号, p. 116-121
- [5] 横山 栄, 橘 秀樹, 公共空間における音環境の評価, 騒音制御, 2006, 30 巻, 6 号, p. 477-481
- [6] 森 淳一, 横山 栄, 佐藤 史明, 橘 秀樹, 幾何音響シミュレーションと 6 チャンネル再生手法を用いた広域防災放送システムの可聴化の試み, 騒音制御, 2014, 38 巻, 2 号, p. 123-131
- [7] 日本建築学会 編, はじめての音響数値シミュレーションプログラミングガイド, コロナ社, 2012
- [8] 西村裕喜子, 雑踏音場シミュレーションによる公共空間の音環境印象評価, 2015, 東京大学修士論文
- [9] Sakae Yokoyama, Kanako Ueno, Shinichi Sakamoto, Hideki Tachibana, 6-channel recording/reproduction system for 3-dimensional auralization of sound fields, Acoustical Science and Technology, 2002, Volume 23, Issue 2, Pages 97-103
- [10] 三上雄一郎, 幾何音響シミュレーションに基づく 6 チャンネル音場再現システムの構築 -室内音響特性の再現性について-, 2012, 東京大学修士論文
- [11] DIN 18041 : 2016, Acoustic quality in rooms - Specifications and instructions for the room acoustic design - AnnexC : Speech communication, 2016.
- [12] 佐藤 逸人, 森本 政之, 佐藤 洋, “聴き取りにくさ”による音声伝達性能の評価, 日本音響学会誌, 2007, 63 巻, 5 号, p. 275-280
- [13] H.J.M.Steeneken and T.Houtgast : A physical method for measuring speech-transmission quality, J.Acoust. Soc. Am. 67, pp.318-326, 1980.
- [14] Morimoto et al.: Listening difficulty as a subjective measure for evaluation of speech transmission performance in public spaces, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 116, No. 3, September 2004

謝辞

本論文は筆者が東京大学大学院新領域創成科学研究科，社会文化環境学専攻，修士課程において，同専攻の佐久間哲哉准教授のご指導のもとに行った研究をまとめたものです。

佐久間先生には研究の背景から，テーマ内容，本研究に取り組むにあたっての姿勢，研究的視点だけでなく音響設計者の立場からどのように本研究を捉えるべきか等の多角的な指導を頂きました。

同専攻，佐藤宏泰准教授には副指導を担当いただき，本研究の最終的な目標の見解についてご指摘を賜りました。

佐久間研究室の井上尚久特任助教，博士課程の會田祐さん，劉金雨さん，梶本貴之さん，孔敬受さん，研究室の先輩である LIMESA Richard Arthur Jeremia さん，角谷純平さん，駒井彩乃さん，坂吉佑太さん，坂本栞さん，堤遼さん，松井温子さん，谷野葵さんには研究やそれ以外の面でも沢山のアドバイスを頂きました。ありがとうございました。

後輩の中津成博さん，山崎泰知さん，田主望さん，那須瑞早さんも私の研究生活を支えてくださいました。特に土屋洵さんには，被験者実験の際，実験の実施のため沢山の時間を割いていただきました。

忙しい時間の合間を縫って被験者実験に協力していただいた被験者の皆様には大変お世話になりました。

最後に，筆者の学生生活を暖かく見守り，支えてくれた両親，友人に多大なる感謝の意を表します。

2020 年 1 月 20 日

齋 凡

発表論文一覧

- 修士論文梗概

旅客コンコースのアナウンス聴取に対する吸音対策効果の実験的検討

Experimental Study on Effects of Absorption on Speech Intelligibility of Announcement in Concourse

学籍番号 47176829

氏 名 俞 凡 (Yu, Fan)

指導教員 佐久間 哲哉 准教授

1. はじめに

1.1. 研究背景

旅客コンコースとは鉄道の駅や空港などの多くの空間において、通路が交差する場所や大通路、中央広場である。音環境の視点から見ると、旅客コンコースには列車、旅客、商業施設、案内放送など多種多様の音源が存在し、喧騒的な音響空間と言える場合が多い。また、多くの旅客コンコースが設計される際には安全性、耐久性、メンテナンス性を優先させることから、タイル、金属板など音を反射しやすい材料が使用される場合が多い。そのため、過剰な響きが生まれやすい。その結果、多くの旅客コンコースでは快適性の確保が不十分、騒音による健康被害、アナウンスの聞き取りが困難など多数の音環境の問題が生じる。本研究では駅や空港の安全性に関するアナウンス聴取に着目し検討する。

旅客コンコースのアナウンスでは飛行機・列車の発着の案内、視覚障害者の誘導、非常時に避難情報の提供など重要な役割がある。アナウンス聴取が困難の場合では必要な情報が利用者に正しく伝わらない可能性があり、利用者を混乱させ、危険にさらすことにもつながりかねない。従ってアナウンスの明瞭度を改善ための対策が必要

である。

音声伝達性能に影響を及ぼす主要因を図1に示す。音声伝達の過程は発声系、伝送系および受聴系の3段階に分類できる^[1]。発声系は発話者が声に出すところまでをいい、伝送系は音声の出口である発声者の口から受聴者の耳に届くまで、受聴系は受聴者の外耳から認識までの系をいう。伝送系の要因に着目すると、吸音では残響抑制と騒音低減の効果を持つため、吸音対策ではアナウンスの明瞭度を向上する効果があるだと考えられる。しかし吸音対策がアナウンス聴取に対する具体的な効果が不明である。

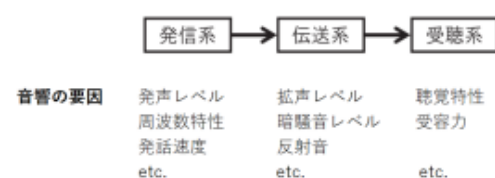


図1. 音声伝達のプロセスと影響を及ぼす要因

1.2. 研究目的

以上の状況を踏まえ、本研究では旅客コンコースのアナウンス音の聴取に対する吸音対策効果の具体的な効果を検討するため、音声の再現性を重視する旅客コンコースの音環境に対する可聴化シミュレーションシ

システムを構築する。そして室寸法・騒音設定・吸音設定が異なる旅客コンコースの音環境を可聴化し、主観評価実験により吸音対策の効果を確認する。

2. 研究手法

2.1. 数値解析手法

数値解析手法には幾何音響解析の音線法という手法を用いる。音線法とは図2に示すように、音源から放出された多数の音線を追跡し、最終的にこの受音球に到達するエネルギーから、音源と受音点の伝達特性である響きの情報をもつインパルス応答を算出する手法である。可聴化にはインパルス応答を生音源に畳み込み、空間の残響を追加する。

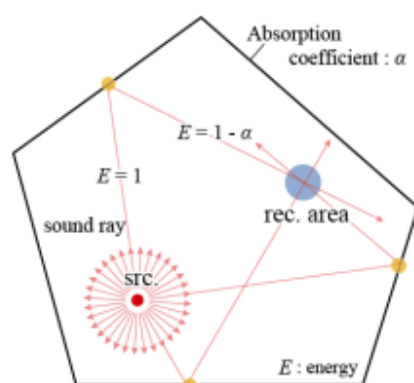


図2. 音線法

2.2. 音場再生手法

音場再生手法には、図3に示すように、6チャンネル音場再生システム⁴⁾を用い、無響室内の6台のスピーカから、指向性を持った音源を再生し、中央の就聴位置で3次元の音場を再現する。

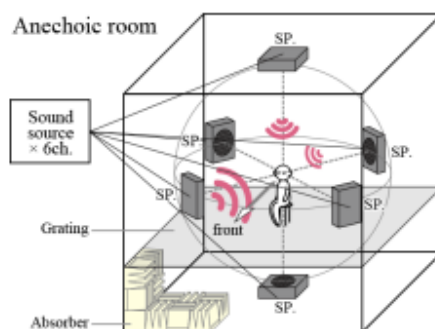


図3. 6チャンネル音場再生システム

3. 条件設定

3.1. 事前調査

条件設定を検討するため、首都圏のコンコースを対象として実測調査を行なった。

一例として、コンコースCの室寸法は約100m×24m×14mであり、5分間に測定した等価騒音レベル(A特性)は63dB、アナウンスのパワーレベル(A特性)は85dBである。暗騒音の等価騒音レベル(A特性)の周波数特性は図4に示す。

500Hz 又は 1kHz にピークを持つため、騒音源は人の話声と足音だと考えられる。

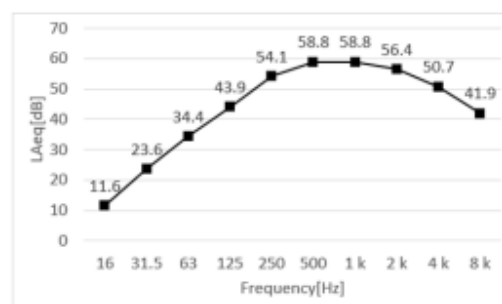


図4. 暗騒音の周波数特性

3.2. コンコース寸法の設定

コンコース寸法ではコンコースCの寸法を参考し設定する。矩形室を想定し、広さは100m×20mに固定させる。天井高は10m、20mの二条件である。

3.3. 暗騒音の設定

騒音源は人の話声とした。話者密度の設定より暗騒音レベルを変化させる。低密度(0.01人/㎡)、高密度(0.04人/㎡)の二条件で騒音源を配置する。各騒音源のA特性パワーレベルは普通会話程度の68dBとした。

3.4. 吸音条件の設定

吸音設定については図5に示す七条件である。吸音材の配置位置では吸音なし、天井のみ吸音、天井と壁上部吸音、天井と壁下部吸音の四条件とする(図6)。吸音なしの表面はボード仕上げと想定し吸音率は0.1とする。

N: 吸音なし
A1: 天井のみ中程度吸音
A2: 天井のみ高度吸音
B1: 天井と壁上部中程度吸音
B2: 天井と壁上部高度吸音
C1: 天井と壁下部中程度吸音
C2: 天井と壁下部高度吸音

図5. 吸音設定の七条件

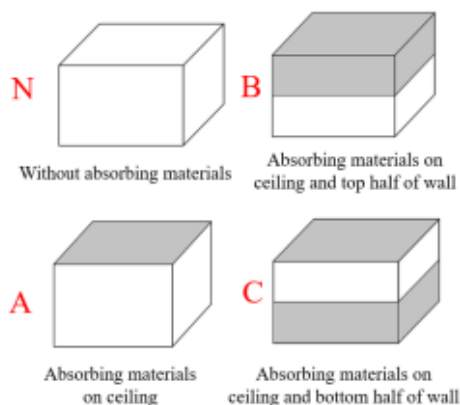


図6. 吸音材の配置位置

3.5. 音源(アナウンス音)・受音点の設定

受音点は室の中心に高さ1.5m点に配置する。アナウンスの音源は壁近傍に受音点から10m離れた高さ5mの場所に配置する。アナウンスのA特性パワーレベルは85dBとする。

4. 主観評価実験

以上の28条件の再生音場において音声の「聴き取りにくさ」や周囲の「うるささ」に関して主観評価実験を行い。実験の様子を図7に示す。



図7. 主観評価実験の様子

5. 実験結果

主観評価実験の結果について、「聴き取りにくさ」の平均評点を図8に示す。また、「聴き取りにくさ」と関連性が高いと予測されたU50も同じ図に「*」でプロットした。

吸音ありの条件と吸音なしの条件に対する平均評点を比較すると、どの吸音設定においても吸音より「聴き取りにくさ」を低減する効果が示されている。

吸音ありの条件のうち、最もU50が小さい「天井のみ中程度吸音」でも顕著な「聴き取りにくさ」を低減する効果を示しているが、吸音ありの各吸音条件において「聴き取りにくさ」の変化幅が小さく、吸音率と吸音面積の増大より「聴き取りにくさ」を低減する効果の増大が見られなかった。これはU50と同じ傾向を示している。

また、「天井と壁下部高度吸音」の場合の「聴き取りにくさ」は「天井と壁下部中程度吸音」の場合より大きく、U50との逆の傾向を示している。これは吸音効果の増大により騒音の明瞭度も共に上昇すること

で、本来の無意味騒音が有意味騒音になり、妨害感が増大することが原因だと考えられる。つまり、適切な吸音対策ではアナウンス音の明瞭度を向上する効果を持つが、吸音過剰の場合、アナウンス音が逆に聴き取りにくくなる可能性がある。

そして、吸音対策が音環境の改善に対する効果を検討するため、条件設定毎に「聴き取りにくさ」と「うるささ」を関連してプロットし、図9に示す。点が原点に近いほど音環境が良いと考えられる。

話者密度 $0.01/\text{m}^2$ の場合、最も良い音環境と言えるのは「天井高10m」「天井のみ高度吸音」であり、話者密度 $0.04/\text{m}^2$ の場合、最も良い音環境と言えるのは「天井高20m」「天井のみ中程度吸音」である。軽度な吸音対策でも良い音環境を改善する効果を持つことがわかる。また、室寸法あるいは騒音源の分布が異なる場合、吸音対策の効果が異なる可能性が示唆された。

6. おわりに

以上より、本研究では可聴化シミュレーションシステムを構築し、旅客コンコースの音環境を再現し、主観評価実験により吸音対策の効果を検討した。軽度な吸音対策でも比較的に高い明瞭度を向上する効果を持つことが示され、吸音過剰の場合明瞭度が逆に低減する可能性を示唆した。

参考文献

- [1] 日本建築学会環境基準 AUES-S0002-2011, “都市・建築空間における音声伝達性能評価基準・同解説,” 日本建築学会 (2011).
- [2] 上杉崇, 佐久間晋哉: 多チャンネル音場再生システムの再現精度に関する検討—音源距離感について—, 日本音響学会学術研究発表会講演論文集, pp.419-420, 2007.

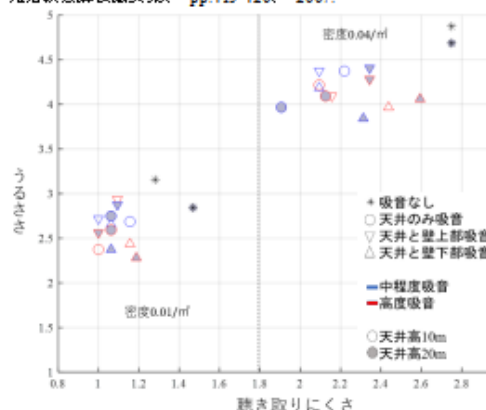


図9. 各条件設定の「聴き取りにくさ」と「うるささ」

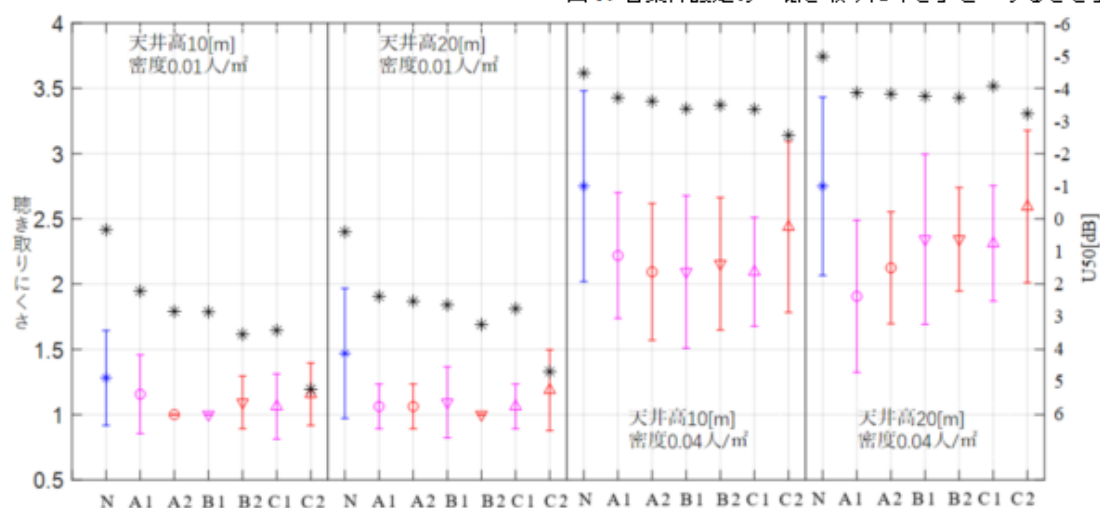
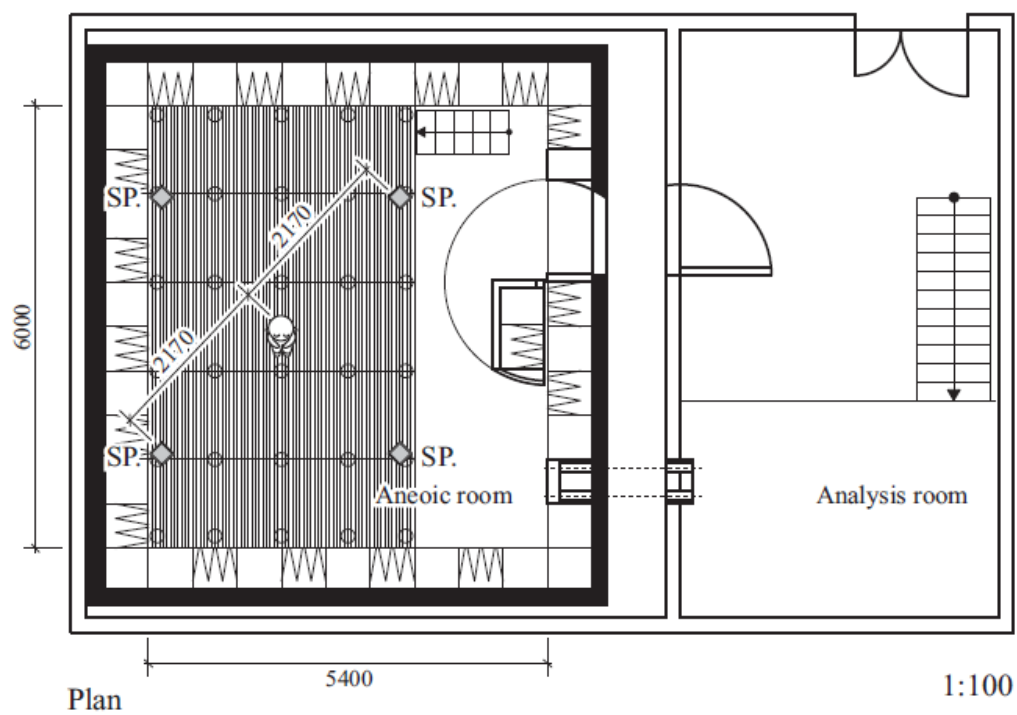
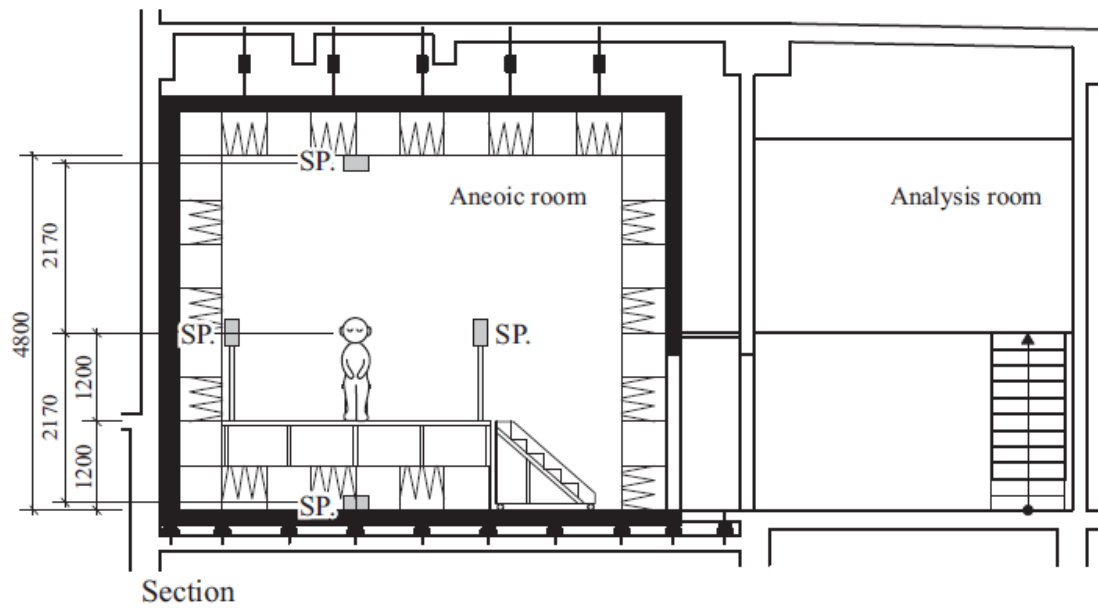


図8. 「聴き取りにくさ」の平均評点

付録 A

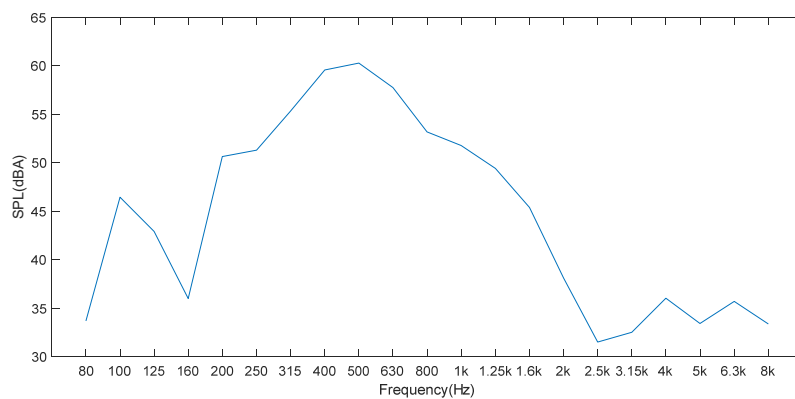
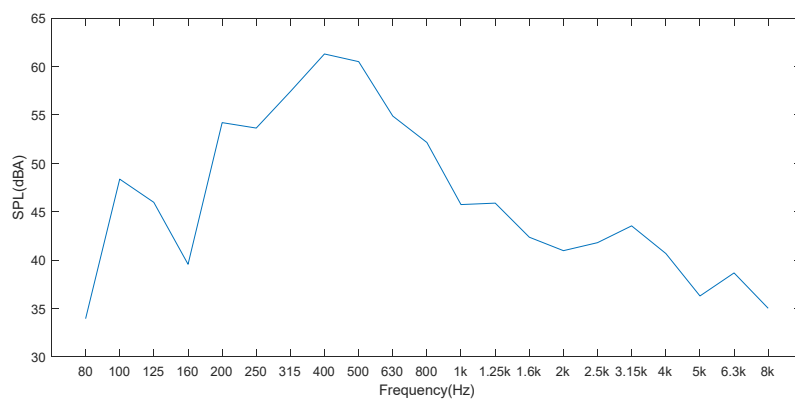
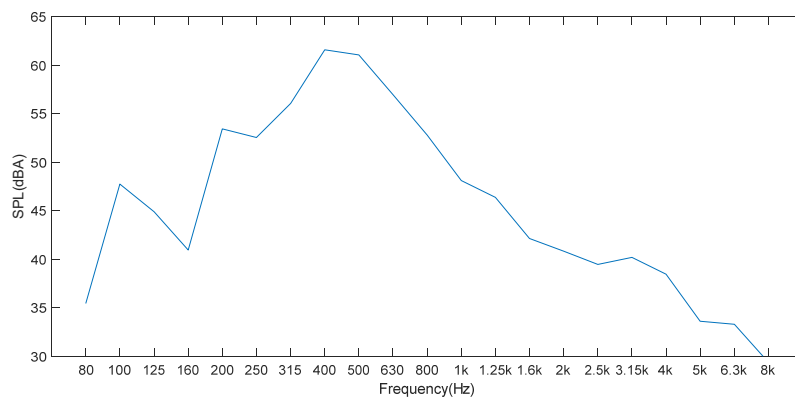
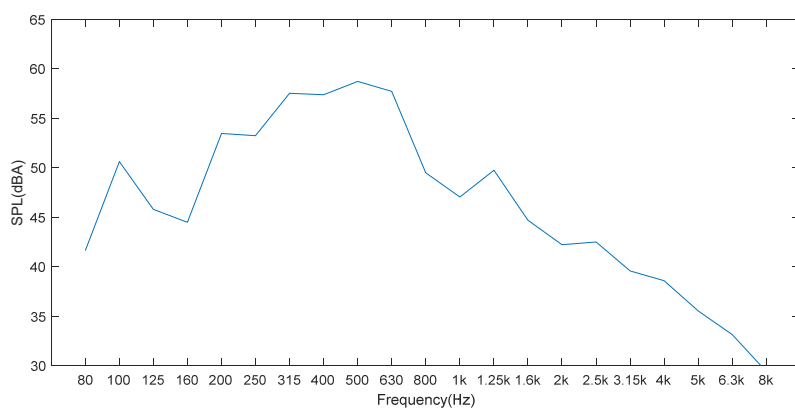
無響室の配置

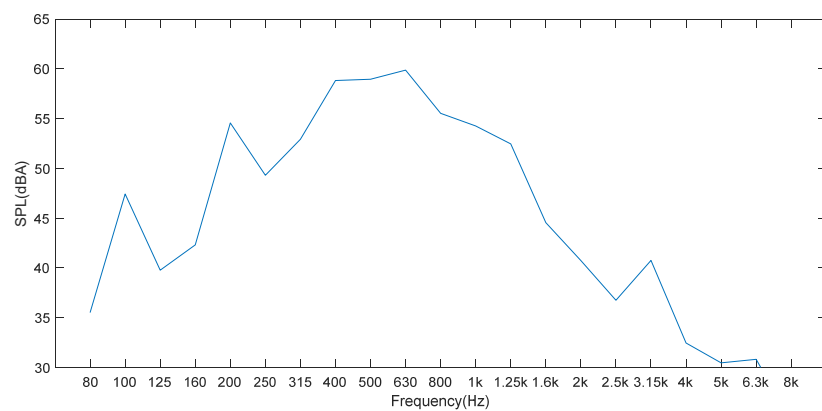
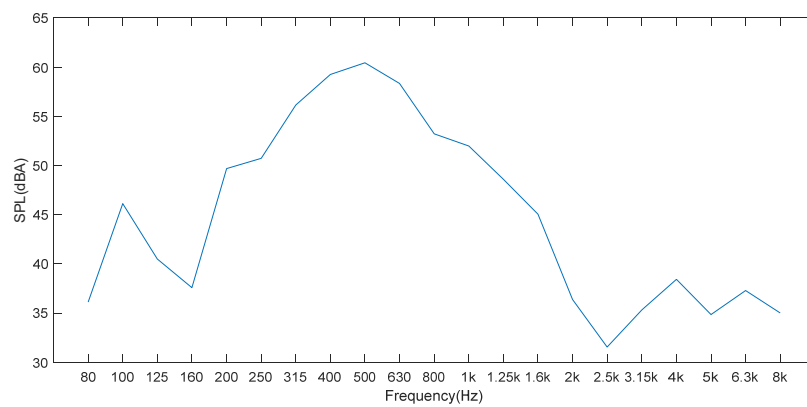
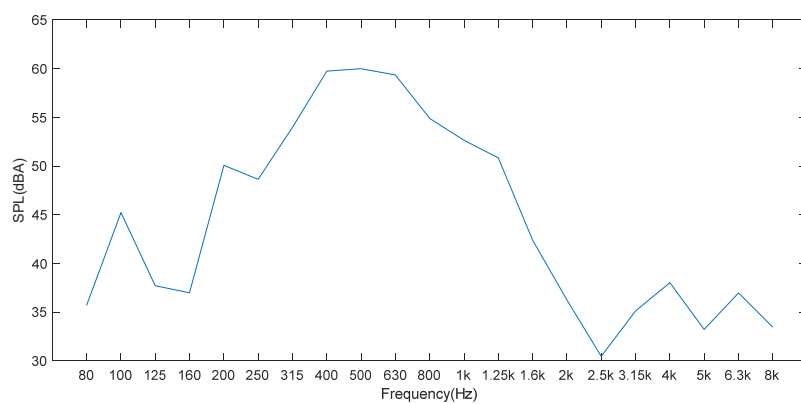
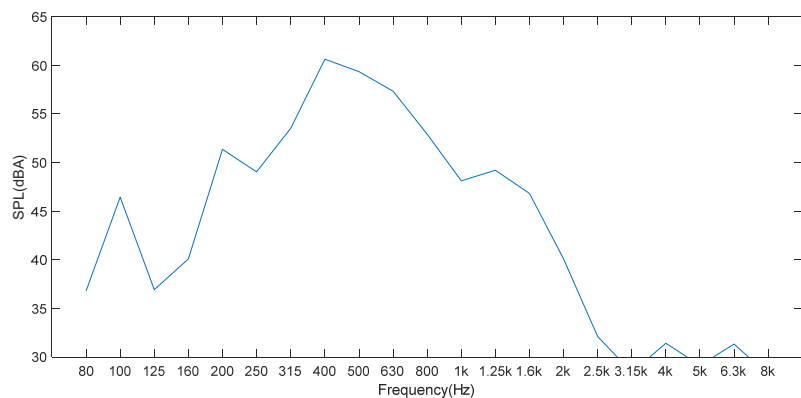


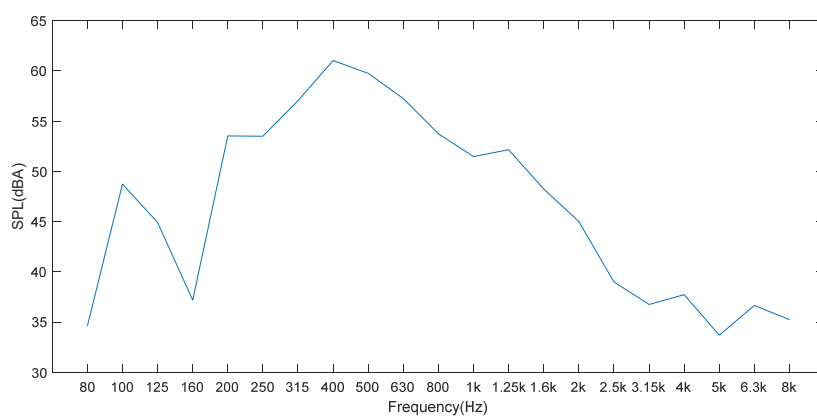
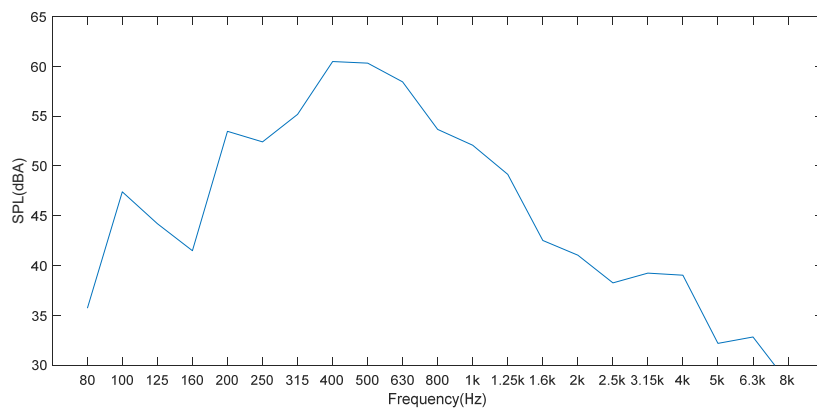
付録 B

使用音源

- 騒音の生音源の周波数特性
男性 10 人







女性 10 人

