

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

2020 年度
修 士 論 文

音場シミュレーションに基づく
屋内移動空間の拡声放送の聴取環境評価

Evaluation of Speakers in Indoor Pedestrian Spaces
Using Sound Field Simulation

2021 年 1 月 18 日提出

指導教員 佐久間 哲哉 教授

土屋 洵

Tsuchiya Jun

目次

第 1 章 序章	4
1.1 研究背景.....	4
1.1.1 公共空間の音環境の現状.....	4
1.1.2 屋内移動空間の音環境改善に向けて.....	4
1.2 関連の既往研究.....	5
1.3 研究目的.....	6
1.4 論文の構成.....	6
第 2 章 シミュレーション手法	8
2.1 はじめに.....	8
2.1.1 数値解析手法.....	8
2.1.2 音場再生手法.....	10
2.2 幾何音響解析.....	11
2.2.1 音線法.....	11
2.2.2 音線法の計算方法.....	16
2.3 6チャンネル再生システム.....	24
2.3.1 システム概要.....	24
2.4 音線法に基づく6チャンネル再生.....	28
2.4.1 指向性.....	28
2.4.2 位相.....	30
第 3 章 屋内移動空間のシミュレーション	32
3.1 はじめに.....	32
3.2 屋内移動空間モデルの設定.....	34
3.2.1 空間寸法の設定.....	34
3.2.2 吸音条件の設定.....	35
3.2.3 音源の設定.....	35
3.3 幾何音響解析による物理指標の算出.....	39
3.3.1 各種物理指標.....	39
3.3.2 解析結果および考察.....	41

第4章 聴取環境に関する実験的検討.....	50
4.1 はじめに.....	50
4.1.1 実験目的.....	50
4.1.2 実験内容.....	50
4.2 実験結果.....	53
4.2.1 実験結果と考察.....	53
4.2.2 物理量と心理量の対応.....	60
第5章 総括.....	66
参考文献.....	68
謝辞.....	70
発表論文一覧.....	72

第1章

序章

1.1 研究背景

1.1.1 公共空間の音環境の現状

近年、建築空間の環境改善について様々な試みがなされている。その環境要因には空気・熱・光など様々なものがある。「音」も建築環境の質を決定する重要な要因であるが、建築空間の設計・利用に関して、音についての配慮は十分になされているとは言い難い。

音環境が問題となる建築空間の一つとして、公共空間がある。公共空間においては、一般に耐火性やメンテナンス等が優先され、金属板・タイル・石膏ボード等、音を反射しやすい材料が使われることが多い。また大空間であることも多いため、残響過多となる傾向がある。加えて、利用者の会話や雑踏、案内放送や BGM のためのスピーカ等、多種多数の音源が存在すると、喧騒感が高まる。このような状況下では、単に利用者の居心地が悪くなることに加え、音情報の伝達が困難になり、快適性や非常時における安全性の確保が不十分となる。

1.1.2 屋内移動空間の音環境改善に向けて

公共空間の中でも、駅や空港等の旅客施設は、我々の社会にとって必要不可欠であり、年齢・性別・国籍を問わず不特定多数の人が利用することから、環境の改善が望まれる。本研究では、駅・空港のコンコースや通路等、多数の利用者（旅客）が移動する屋内空間を「屋内移動空間」と定義する。前述した公共空間の音環境における問題を解決するためには、設計段階で残響抑制・騒音低減のための対策を行うことが必要となるが、建築音響の視点からは、適切な吸音処理が必要であるといえる。他方、我が国では一部の空間を除き、吸音設計についての指針が存在しないことも相まって、吸音の必要性が十分に認識されているとは言い難い。このような状況を改善するためには、吸音効果についてのデータを蓄積し、どれほど音環境が改善できるかを示し、吸音の必要性を広く訴えていくことが必要であると考えられる。

1.2 関連の既往研究

屋内移動空間についての既往研究としては、現地における実測調査を行ったもの、シミュレーションや被験者実験に基づくものが挙げられる。横山ら[8]は駅や地下商店街、空港ロビー等、11カ所を対象に実測調査を行った。大規模駅コンコースにおいては騒音レベルが65～75dB、空港や吸音処理された商業空間においては60～65dBとなっていること、また聴感印象でも喧騒感が少なくなっていることを報告し、吸音処理の効果を示している。伊積[3]は駅コンコースの音環境について実態を調査した上で、理論値やシミュレーションを用いた音響特性の予測方法の検討や、主観評価実験を行っている。首都圏のある駅において、天井改修前後での残響時間を測定し、天井を金属板とした改修前は1kHzで2.3s、ロックウール化粧吸音板とした改修後は1.4sとなっており、その他の駅空間についても天井吸音なしで2.0s以上、吸音ありで1.5s程度となることを報告し、吸音による残響抑制効果を示している。また、横山ら[10]は現場での調査にとどまらず、複数の音環境を比較し、心理的影響を系統的に明らかにするための手法として、無響室内シミュレーション音場(6チャンネル収音・再生システム)を用いた評価を提案し、被験者実験を実施している。星野ら[11]は、屋内移動空間の音環境の中で、特に拡声放送の了解性に着目し、6チャンネル収音・再生システムを用いて拡声放送の「聴き取りにくさ」についての主観評価実験を行なっている。背景騒音が55dB程度と決して劣悪とはいえない環境においても、残響が2秒程度になると了解度が50%を下回ることを指摘し、アナウンスおよび背景騒音のレベルだけでなく残響についても考慮することの重要性を指摘している。西村[12]は従来の公共空間の可聴化シミュレーションについて、背景騒音の考慮がなされていないことを指摘し、雑踏音に着目して仮装音場を作成するシステムの構築を行なっている。音響設計に広く用いられ、比較的簡易な手法である幾何音響解析と、6チャンネル収音・再生システムを組み合わせた、汎用性の高い手法の提案を行なっているが、背景騒音に重点を置いており、拡声放送を用いた検討には至っていない。兪[13]は幾何音響解析および6チャンネルシステムを用い、空港のコンコースを想定したモデルについて、拡声放送の聴取に着目したシミュレーションと主観評価実験を行なっている。ここでは拡声放送用のスピーカは1台の場合のみの検討で、現実的に広く用いられる複数台の条件、即ち分散配置方式についての検討はなされていない。またスピーカの音源モデルは点音源であり、吸音材の吸音率周波数特性が一定であるなど、現実的条件に踏み込まず、基礎的な検討にとどまっている。

1.3 研究目的

以上の状況を踏まえ、本研究では、屋内移動空間の音環境改善に資する知見を得ることを目的とし、より現実的な条件を想定したシミュレーションを行う。特に屋内移動空間における吸音効果を明らかにすることが主題であり、吸音を行う室の諸条件、即ち室形状・室天井高・利用者の密度・スピーカ台数等との関連についても検討する。幾何音響解析によって室内音響指標を算出したのち、解析に基づく被験者実験を行い、聴感と吸音および諸条件との対応関係を明らかにする。本研究によって得られた知見が屋内移動空間の音環境改善に繋がることを期待する。

1.4 論文の構成

第1章では、公共空間の音環境評価に関連する背景を述べ、本研究の目的をまとめた。

第2章では、本研究で用いるシミュレーション手法について述べる。

第3章では、本研究で用いる屋内移動空間のモデル設定について述べたのち、それらのモデルを用いた物理指標の算出・考察を行う。

第4章では、第3章で設定したモデルに基づいた主観評価実験の概要、および結果と考察を述べる。

第5章では本研究を総括し、今後の課題を述べる。

第 2 章

シミュレーション手法

2.1 はじめに

本研究で用いる数値解析手法と音場再生手法について説明する。本節では本研究で用いる手法の概要と位置付けについて述べる。第 2 節では音線法における基礎事項と計算方法を述べ、第 3 節では 6 チャンネル音場再生システムの概要・原理・システム構成について述べる。第 4 節では音線法に基づいた音場再生の方法について概説する。

2.1.1 数値解析手法

数値解析手法は以下の 2 つに大別される。

波動音響解析

1 つ目は波動音響解析で、波動方程式を離散化し音の波動的な振る舞いを予測する手法である。代表例としては境界要素法 (BEM: boundary element method)、有限要素法 (FEM: finite element method)、時間領域有限差分法 (FDTD 法: finite-difference time-domain method) などがあげられる。これらの手法は、いずれも対象となる音場領域またはその境界面を細かく分割して解析を行うもので、分割された領域または面のそれぞれは要素あるいはセルと呼ばれ、それらの集合はメッシュと呼ばれる。理論的に波動性を考慮することから高精度の予測が可能であるが、対象の音場全体をセルに分割し解析を行うため、複雑な形状の音場の予測に非常に向いている一方、ホールのような大空間の音場解析の際には計算負荷が大きくなり難しい。

幾何音響解析

2 つ目は幾何音響解析で、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 [20]。代表的な手段としては音線法、虚像法などがあげられる (図 2.1)。音線法は音源から放出した多数の音線の反射とエネルギーの減衰を追跡し、受音点 (受音球) に到来するエネルギーを求める手法である。虚像法は音源の鏡面反射点から音が発せられていると考え、その点 (音源) の位置と出力の大きさを求め、受音点における総和を

算出する手法である。どちらの手法も波動的な理論に基づかないため、波動性による現象の再現が不可能であり、波動音響解析と比較して再現性が劣ることは否めない。しかし、少ない計算機資源と非常に短い計算時間で解析できるという利点があり、波動音響では解析が困難なホールのような大規模空間の音場を対象とした伝搬予測に広く用いられている。詳細な部材の設計や、複雑な形状の空間では厳密な予測が必要とされるため、波動音響解析や縮尺模型実験等を用いるが、大まかな室形状や壁面部材の検討には十分な予測精度が得られる。商用の幾何音響解析ソフトウェアの開発も進んでおり、ソフトウェアを用いた音響設計も数多く行われている。

本研究で解析・再現の対象とする屋内移動空間は駅コンコース等の大空間であり、音の回折・干渉などの波動的振る舞いや、反射音構造などの詳細な検討は行わない。そこで後者の幾何音響解析手法のうち比較的音場計算が等位で、一般的に広く用いられている手法である音線法を用いる。以下、音線法の説明の一部は[31]より引用する。

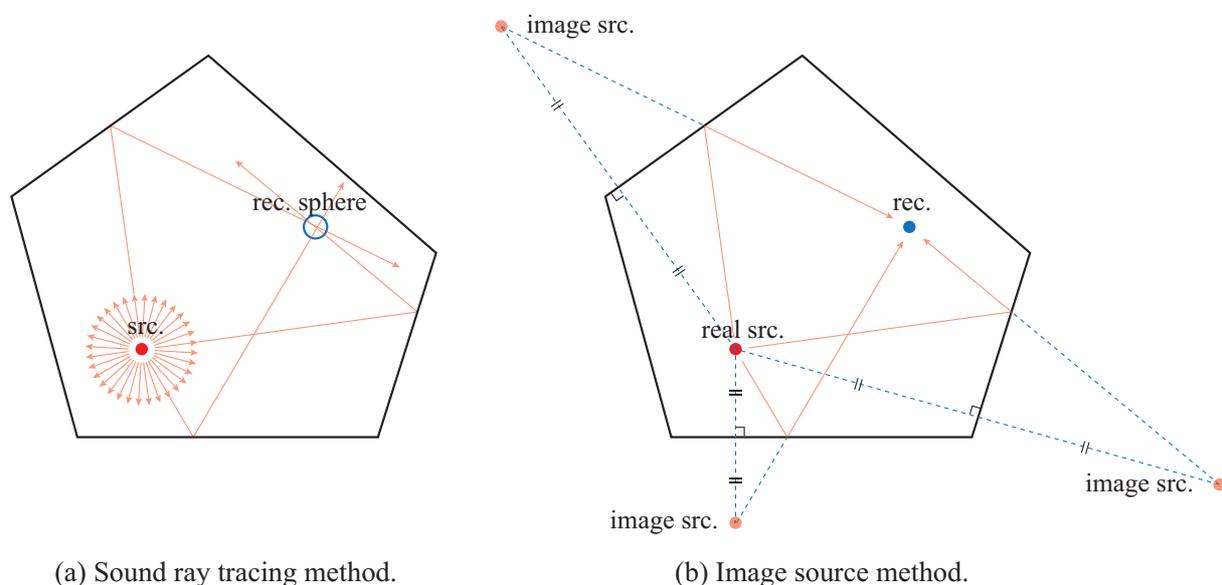


Fig.2.1 Geometrical acoustic analysis method.

2.1.2 音場再生手法

音場を再生するシステムとしては、1チャンネルからマルチチャンネルまで、時代や求められる技術・精度に合わせて様々な手法が考案され用いられている。本研究で使用するシステムについて以下に述べる。

6 チャンネル収音・再生システム

多チャンネル再生方式の一つで、3次元方向に直交配置した6本のマイクロフォンで収録した音を、無響室で等間隔に配置された6台のスピーカから再生するシステムである[10]。原理は極めて単純なため複雑な信号処理は必要なく、受聴時の姿勢も比較的自由であるが、3次的に正確かつ自然な再現が可能である。

簡便であり音場の自然な再現が可能であるといった利点に加え、本研究で対象とする屋内移動空間には多種多数の音源が存在し、その空間的な分布も再現することが重要であると考えられるため、本システムを用いることとした。

2.2 幾何音響解析

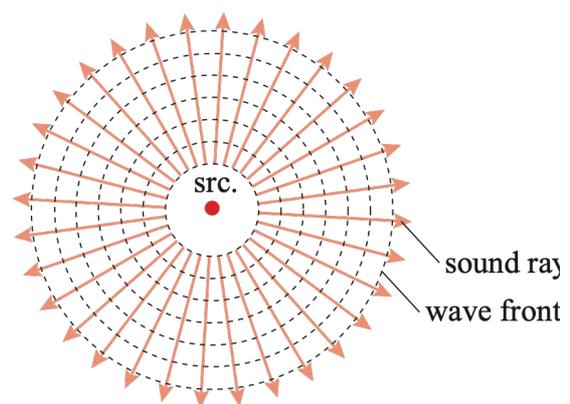
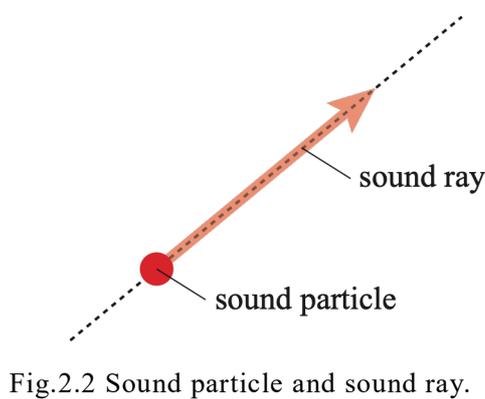
2.2.1 音線法

音線法とは、図 2.1(a)に示したように、音源から放出された多数のエネルギーを持った音線を追跡し、最終的に受信エリアに到来するエネルギーの時間的分布をインパルス応答として求める手法である。計算にかかる時間は、壁面数・反射回数・音線数を乗じた数に比例するため、同じ幾何音響解析である虚像法と比較して短い。

音波の表現

音線法では、音の伝搬をあるエネルギーを持った物体が空間を進行するものとする。この進行する物体を音粒子と呼び、音粒子の進行方向ベクトルまたは音粒子が通過した軌跡を音線と呼ぶ。音粒子と音線は同義で表現されることが多く、本論文でもほぼ同義のものとして扱う。また、音の進行は空間的に幅を持つものであるが、音線法における音粒子は概念的なものであり、大きさを持たない。音粒子の移動は、進むのに要する時間が最小となるような経路を通るという Fermat の法則に従うため、温度・密度が均一な媒質中を進行する場合は、音粒子は直進する(図 2.2)。

音波は全(無)指向性の点音源から球面上に広がるものとする。音線法でこれを表すと、図 2.3 のように音粒子が進むにしたがって音線の間隔が広がり、単位面積当たりの通過音線数が減少する。この音線数の減少によって球面波を模擬する。



境界面における音波の振る舞い

境界面に入射する音波のエネルギー E_i は、反射エネルギー E_r 、境界内部の欠損エネルギー E_l 、透過エネルギー E_t に分かれ(図 2.4)、エネルギー保存則より以下の式が成り立つ。

$$E_i = E_r + E_l + E_t \quad (2.1)$$

このとき入射エネルギー E_i に対する反射エネルギー E_r の割合を反射率 r といい

$$r = \frac{E_r}{E_i} \quad (2.2)$$

で表される。音線法において、反射しないエネルギー E_l 、 E_t は吸音されると仮定すると、吸音率は反射率 r を用いて以下の式で表される。

$$\alpha = 1 - r \quad (2.3)$$

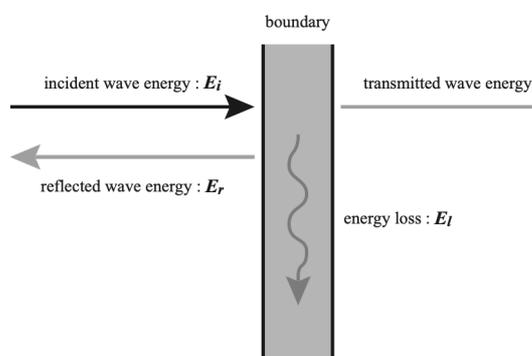


Fig.2.4 Sound energy on boundary.

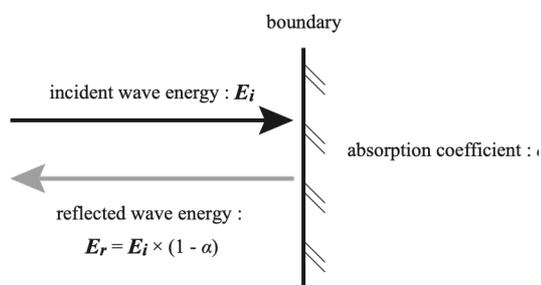


Fig.2.5 Treatment of sound energy on boundary.

一般に、音は境界面で拡散反射をするとし、拡散反射の反射性状を支配する法則としてランベルトの余弦則を用いることが多い。ランベルトの余弦則では、境界面に入射する度に多数の音線を各方向に分散させる。しかしこの方法では反射の度に音線数が爆発的に増え、計算負荷が大きくなる。したがって本検討では、統計的な考え方にに基づき単一音線飲みを追跡することとし、後述の方法で鏡面反射または拡散反射をするものとする[20]。

境界面において反射した音波の進行方向は、鏡面反射と拡散反射で異なる。鏡面反射のときは、図 2.6 のように Snell の法則に従って入射角と同じ角度で反射し、拡散反射のときは図 2.7 のように方位角 φ_r 、仰角 θ_r で反射する。方位角 φ_r は $0 < \varphi_r < 2\pi$ 、仰角は $0 < \theta_r < \frac{\pi}{2}$ を満たし、以下の式に従ってランダムな反射ベクトル $v = (v_x, v_y, v_z)$ を算出する。 m, n は一様乱数($0 < m < 1, 0 < n < 1$)である。

$$\begin{aligned} \varphi_r &= 2\pi m \\ \theta_r &= \arccos(1 - 2n) \\ v_x &= \cos\varphi_r \sin\theta_r \\ v_y &= \sin\varphi_r \sin\theta_r \\ v_z &= \cos\theta_r \end{aligned} \quad (2.4)$$

鏡面反射をするか拡散反射をするかの判定には、一様乱数を用いる。前述の一様乱数 n を発生させ、乱反射率を s とすると $n < s$ のとき鏡面反射、 $n > s$ のとき拡散反射と判定する。乱反射率 s は次式で定義する。

$$s = 1 - \frac{E_{spec}}{E_{total}} \quad (2.5)$$

ただし、 E_{total} :全反射エネルギー、 E_{spec} :鏡面反射エネルギーとする。

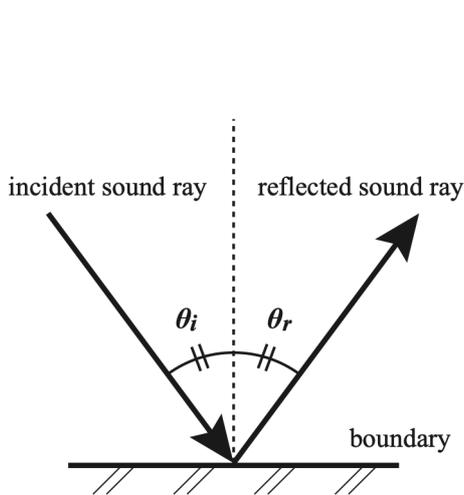


Fig.2.6 Direction of specular reflect sound.

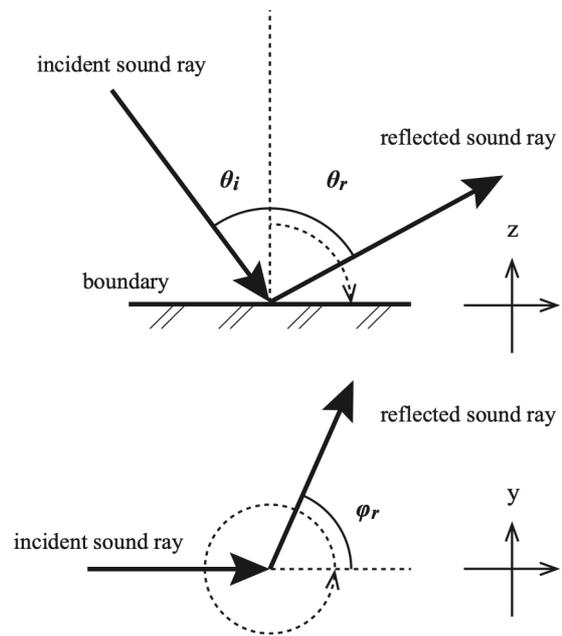


Fig.2.7 Direction of scattered sound.

境界面におけるエネルギーの損失は、鏡面反射・拡散反射の場合で吸音率 α と乱反射率 s を用いて式(2.6)、図 2.8 のように表される。

$$E_{r_{spec}} = E_i(1 - \alpha)(1 - s) \quad (2.6)$$

$$E_{r_{scat}} = E_i(1 - \alpha)s \quad (2.7)$$

音線法の留意点

音線法では、受音点でのエネルギーの到来時間と大きさを求めるため、音線を多数飛ばし、ある大きさの受音エリアで受音する。このときの音線数の受音エリアの大きさについて、いくつかの考え方から以下に述べる。なお受音エリアの形状は球とし、音粒子（音線）数を N (個)、受音球の半径を r (m)、室の体積を V (m^3)とする。

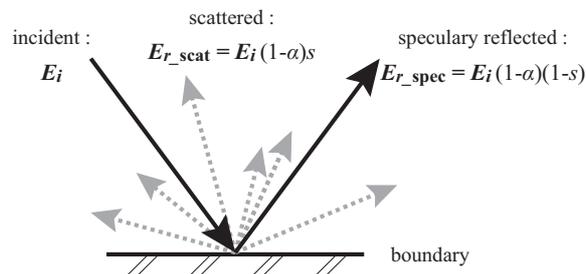


Fig.2.8 Scattering from rough surface.

■ **S/N 比** 1つは S/N 比から音粒子の個数を導く考え方である。数値解析ではノイズが 0dB であるため、信号の大きさがそのまま S/N 比となる。信号の大きさは音線法でいうと音粒子の数であり、音粒子の数が多いほどダイナミックレンジが広い。音粒子 1 個を基準としたとき、S/N 比を $x(\text{dB})$ 確保するために必要な音粒子 N は次式から

$$x = 10 \log_{10} \frac{N}{1} \quad (2.8)$$

となり、 $10^{x/10}$ 個必要である。ただし受音エリアに入る音粒子は音源から放った音粒子の一部であるため、少なくともさらに 10~100 倍の音粒子を音源から放つ必要がある。

■ **定常状態** 定常状態を表現できる音粒子の最低個数を導く考え方もある。音源から放ったエネルギーが空間内にまんべんなく行き渡った状態であれば、受音球をどこに設定しても等しい数の音粒子が検出される。これを模擬するためには、任意の 1 に受音球を設定したときに音粒子が少なくとも 1 つは存在することが必要条件となり、このとき式(2.9)を満たす。

$$\frac{V}{\frac{4}{3}\pi r^3} \leq N \quad (2.9)$$

これはあくまで必要条件であり、 N が大きいほど設定位置による値の変動は小さくなる。

■ **伝搬距離** 点音源から音線が球面状に広がるため距離に従って音線の間隔が広くなり、これが距離減衰を表すことは既に述べた。しかし、音線の間隔が広がりすぎて受音球に入らない状況を避けるため、受音球に少なくとも一つは入ることが必要条件となる。

音速を $c(\text{m/s})$ 、音線追跡時間を $t_{max}(\text{s})$ としたとき、図 2.9 のように音波は半径 $ct_{max}(\text{m})$ の球に広がっている。ここで音源を頂点とし、音線が回転軸となる円錐を考えると、1 本の音線が占める立体角は

$$\frac{4\pi}{N} [\text{sr}] \quad (2.10)$$

であり、音波が ct_{max} (m)伝搬したとき、波面が円錐によって切り取られる面積は

$$\frac{4\pi}{N} ct_{max} [\text{m}^2] \quad (2.11)$$

で表される。

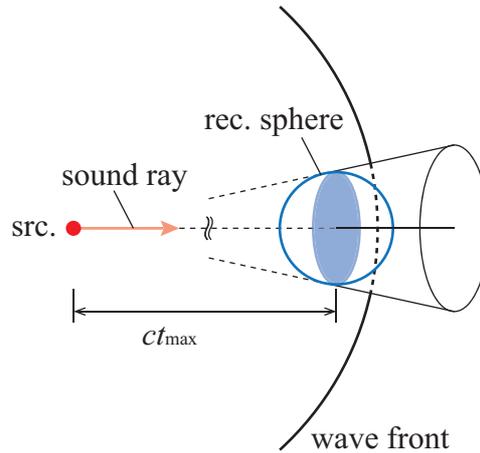


Fig.2.9 Relationship between solid receiving sphere and angle obtained by a sound

音粒子数 N が十分に大きければ式 2.11 はほぼ平面の円とみなすことができ、その半径は

$$2 \sqrt{\frac{ct_{max}}{N}} [\text{m}] \quad (2.12)$$

である。これより受音球の半径 r が大きければ少なくとも音線 1 本が受音球と交差することが期待でき、

$$r \geq 2 \sqrt{\frac{ct_{max}}{N}} [\text{m}] \quad (2.13)$$

が必要条件となる。

■ 受音球の大きさと室容積の関係 上記三つの必要条件を満たすように音粒子の数 N 、受音球半径の大きさ r を設定することが理想的である。しかし例えば計算負荷軽減のために音線数を減らした場合、式 2.9、2.13 を満たすために受音球半径 r を大きくする。その結果、図 2.10 のように室の大部分が受音球で占められるような状態になってしまうと、シミュレーションの精度が非常に低下する。したがって室容積との関係を十分に考慮し、適切な受音球の大きさになるように音線数を決定する必要がある。

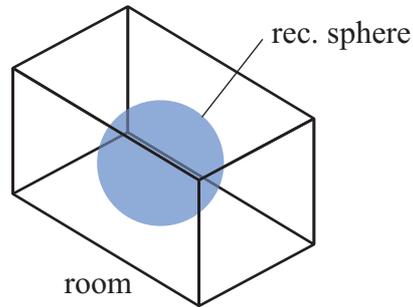


Fig.2.10 An example image that receiving sphere is too large.

2.2.2 音線法の計算方法

図 2.11 に音線法のフローチャートを示す。プログラムは入力、準備、計算、出力で構成されている。はじめに室条件を定義するため、室の形状と各壁面の物性値として吸音率、乱反射率を読み込む。また音源・受音点の座標と受音球の半径などの各種パラメータを読み込む。次に壁面の方程式を求め、音源の設定を行う。続いて計算の根幹となる音線を追跡する部分を実行する、6 チャンネル再生を行うため、チャンネルごとに各チャンネルの指向性情報を持った音線を追跡し、計算結果の出力・整理をする。得られたインパルス応答は計算中に随時出力し、チャンネルごとに整理する。

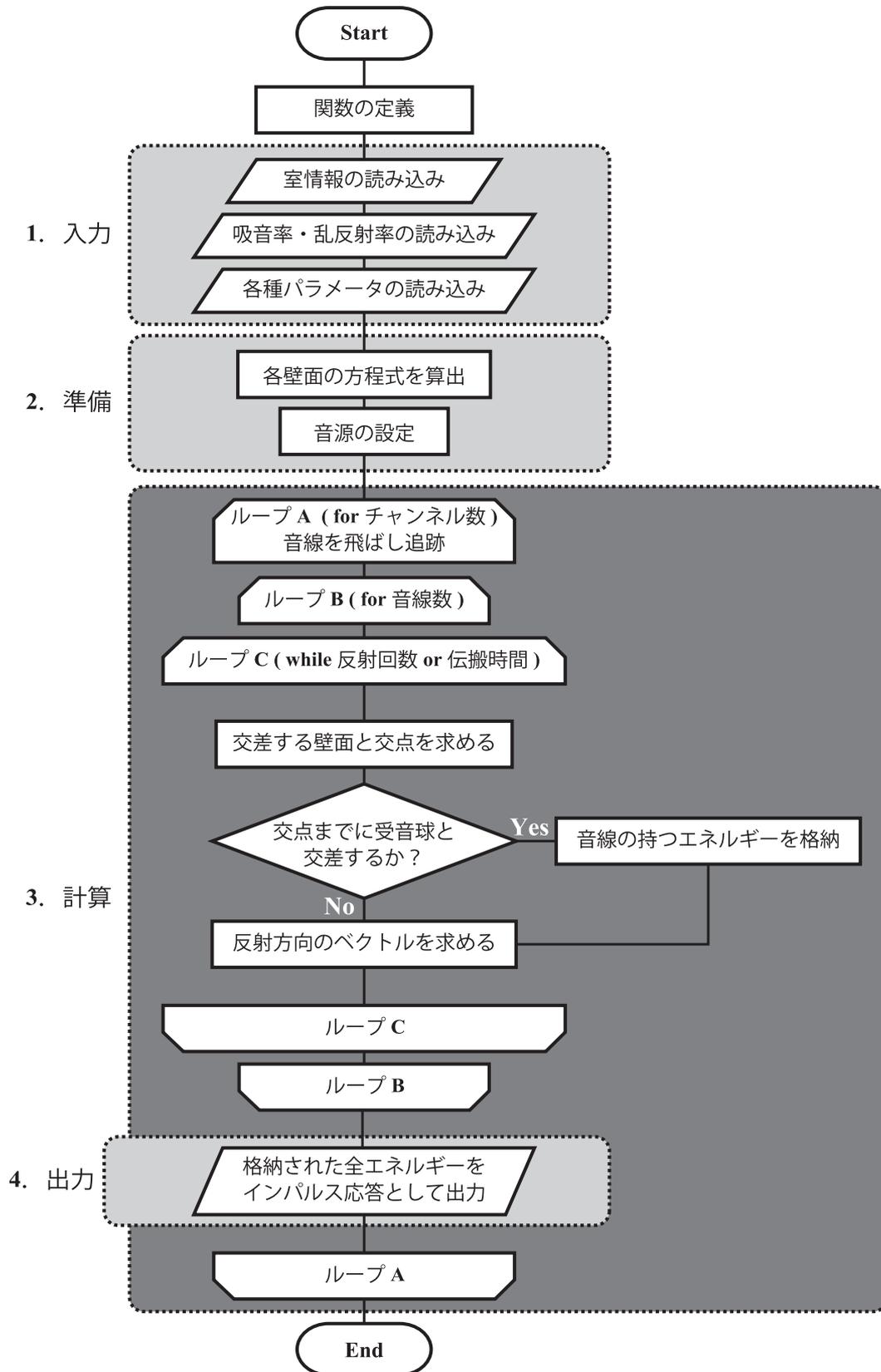


Fig.2.11 Flow chart of ray tracing program.

計算条件の入力

■**室情報** 室情報とは室の頂点の番号と座標、壁面を構成する頂点番号、およびその部材の物性値を示すインデックス情報を記したものである。このインデックス情報とは、吸音率と乱反射率のデータベースと連携するための番号である。

室形状は平面で囲まれていると定義する。壁面は裏表の定義が必要であり、本研究では図 2.12 に示すように、頂点番号を反時計回りに指定された面を内部に向けた面とする。

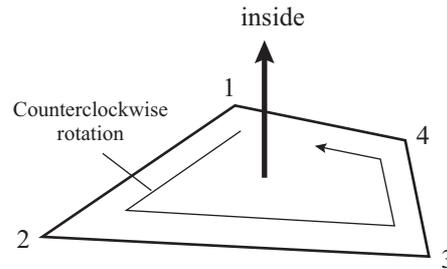


Fig.2.12 An example image that receiving sphere is too large.

■**壁面の物性値** 各壁面の物性値を壁ごとに設定できる。本研究では物性値として吸音率と乱反射率を用い、吸音率は 125-8kHz の 7 オクターブバンドの中心周波数で指定した。詳細な設定については第 3 章で述べる。音線数等、他のパラメータについても後述する。

計算前の準備

■**壁面の方程式を算出** 壁面を定義するため、各壁面の方程式を算出する。一般に平面の方程式は式 2.14 で表され、方程式の係数 a, b, c は平面状の直線でない 3 点の座標から求められる。またこの係数は平面の法線ベクトルの成分 $n(a, b, c)$ でもある。

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (2.14)$$

図 2.13 に示すように、ある平面上に q_0, q_1, q_2 という 3 点があるとき、2 点を結ぶベクトル \vec{v}_1, \vec{v}_2 の外積は平面の法線ベクトルとなるので

$$\vec{v}_1 \times \vec{v}_2 = \begin{pmatrix} v_{1y}v_{2z} - v_{1z}v_{2y} \\ v_{1z}v_{2x} - v_{1x}v_{2z} \\ v_{1x}v_{2y} - v_{1y}v_{2x} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

として求められる。また平面状の任意の座標を式 2.14 に代入し、切片 d が求められる。

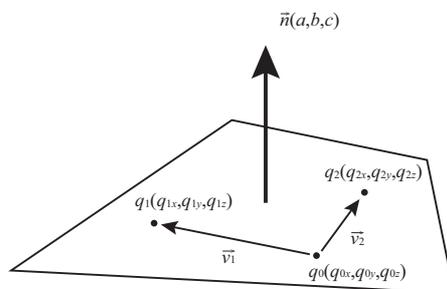


Fig.2.13 3 points and vector on the wall.

■音源の生成 音源は指向性音源を用いる。6チャンネルのスピーカに合わせ、図 2.14 に示す 3 軸 6 方向の音源を作成する。

音線の放射方法は 2 通りの方法が考えられる。1 つ目は音線の放射立体角が等しくなるように放射する方法、2 つ目は一様乱数によって 3 次元のベクトルを決定しランダムに放射する方法である。本研究では後者のランダムに放射する方法を用いて音線ベクトル \vec{v} (式 2.16)を決定する(図 2.15)。ただし、 m, n は一様乱数($0 < m < 1, 0 < n < 1$)である。

$$\begin{aligned} \varphi_r &= 2\pi m \\ \theta_r &= \arccos(1 - 2n) \\ v_x &= \cos\varphi_r \sin\theta \\ v_y &= \sin\varphi_r \sin\theta \\ v_z &= \cos\theta \end{aligned} \tag{2.16}$$

全(無)指向性の場合、式 2.16 で決定したベクトルは方向にかかわらず全てはじめにエネルギー1 を持つものとする。本研究ではカージオイド型の指向性を有するものとし、このエネルギーに式 2.17 を満たす係数 d を乗じて指向性を再現する。 \vec{u} は基準化された指向性方向のベクトル、 \vec{v} は音線ベクトル、 θ は \vec{u}, \vec{v} がなす角である

$$\begin{aligned} \theta &= \arccos \frac{\vec{u} \cdot \vec{v}}{|\vec{u}| |\vec{v}|} \\ d &= \frac{1 + \cos\theta}{2} \end{aligned} \tag{2.17}$$

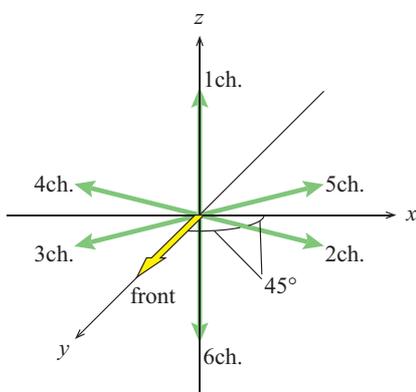


Fig.2.14 Direction of sound ray.

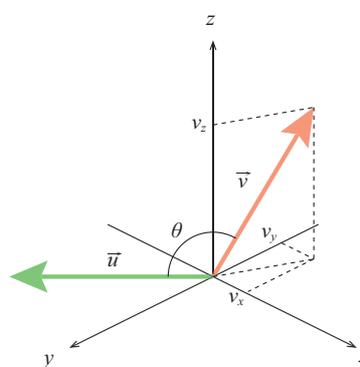


Fig.2.15 Direction of sound ray which was determined by random number.

音線追跡計算

音線の追跡は、最後に反射した点(初めは音源点)から次の反射する点を明らかにし、その間に音線と受音球の交差の有無を判定し、交差する場合は音波が到来したものとして、次の反射点における音線方向を求める。

■交差壁面との交点算出 最後に反射した点の座標を $p_1 = (p_{1x}, p_{1y}, p_{1z})$ 、音線ベクトルを $\vec{u}_1 = (u_{1x}, u_{1y}, u_{1z})$ とし、次の壁面との交点の座標 $p_2 = (p_{2x}, p_{2y}, p_{2z})$ を求める(図 2.16)。

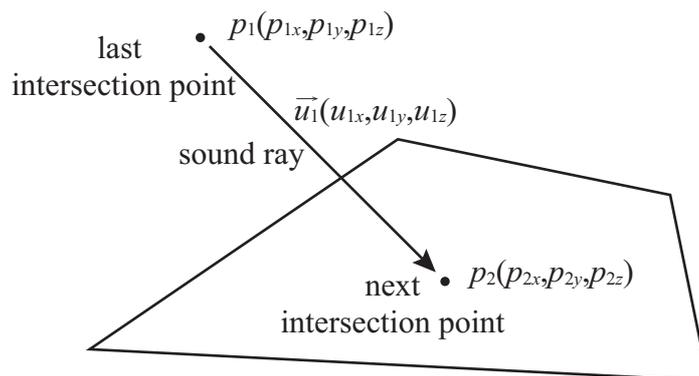


Fig.2.16 Coordinates of intersection points and sound ray

交点を求めるには、まず音線が壁面に向かっているかどうかを判定する。音線の方法ベクトルと壁面の法線ベクトルの内積を求め、負であればよい(図 2.17)。

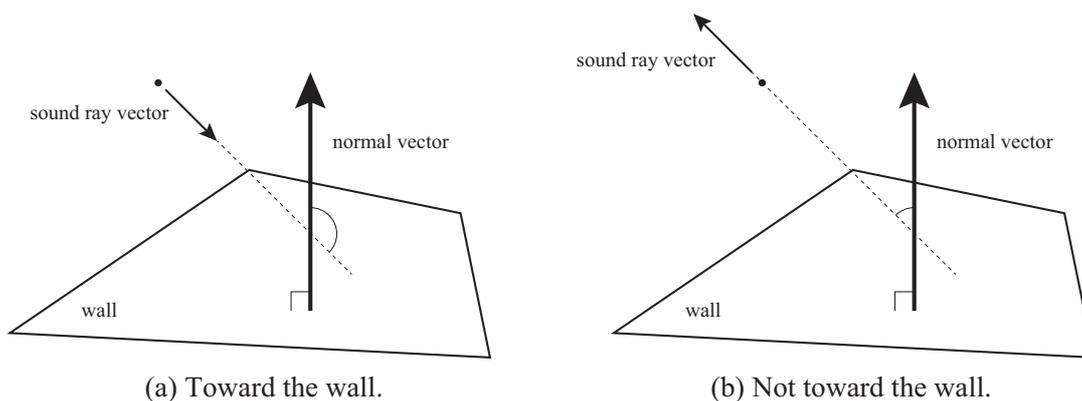


Fig.2.17 Judgement of sound ray vector's direction.

次に交点が壁面内に存在するかどうかを判定する。交点と壁面の頂点を結ぶ直線同士がなす角をそれぞれ求め、全ての角度の和が 2π のとき交点は内部にあり、 0 のとき外部にある(図 2.18)。

また、これらの条件を満たす壁面が複数ある場合がある(図 2.19)ため、条件を満たす壁面の交点との距離が最も近いものを選択する。

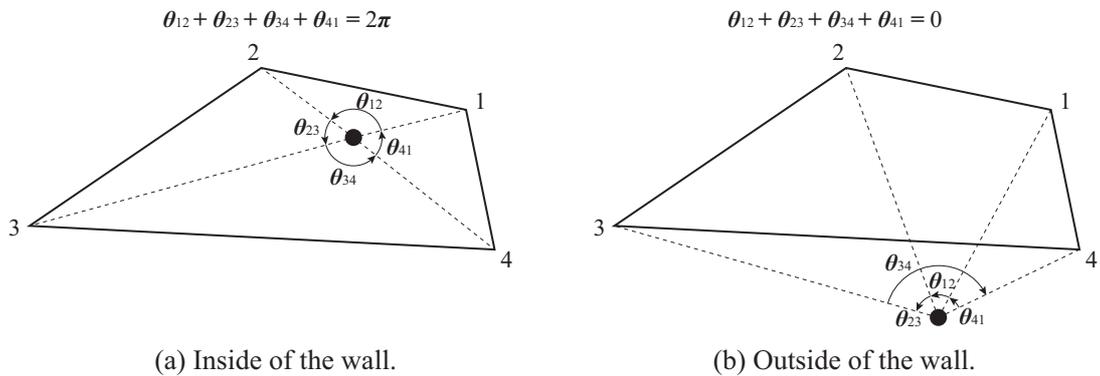


Fig.2.18 Judgement of intersection's position.

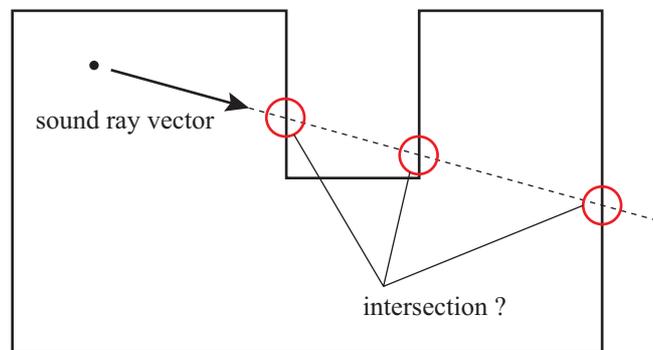


Fig.2.19 Judgement of nearest wall.

■ **受信球との交差判定** まず音線が受信球のほうへ向かっているかどうかを判定する。音線の方角ベクトルと受信球中心の位置座標方向のベクトルとの内積を求め、値が負であればよい(図 2.20)。

そののち、音線が次に壁面と交差するまでに受信球と交差するかどうかを判定する。受信球の位置座標から音線に下ろした垂線の距離 h を求め、受信球の半径 r より小さければ交差する(図 2.21)。

■ **反射方向のベクトルの算出** すでに 2.21 項で述べたが、反射方向のベクトルは鏡面反射の場合と拡散反射の場合で算出方法が異なる。鏡面反射の場合、入射波のベクトルを \vec{u}_1 、壁面の法線ベクトルを \vec{n} とすると、反射波のベクトル \vec{u}_2 は以下の式で表される。ただし、算出ベクトルは単位ベクトルとなるように正規化している。

$$\vec{u}_2 = \vec{u}_1 - 2(\vec{n} \cdot \vec{u}_1)\vec{n} \quad (2.18)$$

拡散反射の場合はランダムな反射ベクトルとなり、式 2.4 のように求められる。

計算結果の出力

以上の手順で音線を 1 本ずつ追跡し、受信球と交差するときの時点で音線が持っているエネルギーを、その到達時間に格納していく。ここで、最後の交点 P_n から P_r までの距離 D_{nr} は、音線と受信点座標の距離 d より式(2.19)のように求められる。

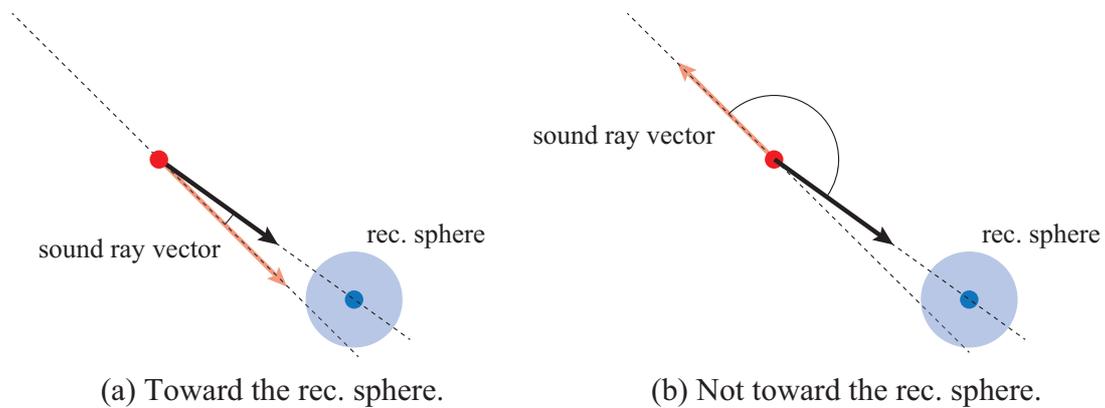


Fig.2.20 Judgement sound ray vector's direction to rec. sphere.

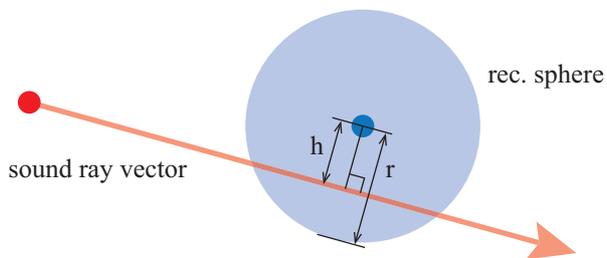


Fig.2.21 Distance of sound receiving point and sound ray.

$$D_{nr} = \sqrt{P_n R^2 - d^2} \quad (2.19)$$

また、 D_{nr} と最後の交点までの距離 D_n の和を音速 c で割ることで到達時間 t_n が求められる(式 2.20)。

$$t_n = \frac{D_n + D_{nr}}{c} \quad (2.20)$$

これを全音線に対して繰り返し、エネルギーを加算していくことで、インパルス応答が求められる(図 2.22)。

2.3 6チャンネル再生システム

6チャンネル再生システムは、実際の3次元音場を、臨場感を伴って実験室内に再現し、主観評価実験を行うために考案・改良されてきた音場再生手法の1つである。これまでに建築音響・騒音分野における様々な音場を対象として、主観評価実験に適用されてきた。

システム概要

本システムは無響室内に直交配置された6台のスピーカを通して音源を再生し、音場を再現するものである。音源としては、実音場の音を6チャンネルマイクロフォンで収録したものをを用いる方法、数値解析によって算出した6方向のインパルス応答とドライソースを畳み込んで作成した音源を用いる方法があるが、本研究では後者を採用する。再生システムのダイアグラムを図2.23、使用機材を表2.1および図2.24に示す。

数値解析に基づき生成したWAVファイルをPCに取り込み、音源として使用した。データの編集はDigital Audio Workstation : DAW(Adobe Audition)を用いてPC上で行った。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った信号を、パワーアンプ(IPA8200, YAMAHA)で増幅し、無響室に配置された6台のスピーカで再生した。各スピーカの中央で受聴することで、音場の3次元的な再現が可能となる。

Tab. 2.1 Equipment list of 6-channel reproduction system.

	Equipment	Product name	Manufactures
Reproduction system	personal computer	MacBook Pro	Apple
	audio editing software	Adobe audition 3.0	Adobe
	audio interface	Fireface 800	RME
	signal processor	DME24	YAMAHA
	power amplifier	IPA8200	YAMAHA
	loud speaker (×6)	NS-2HX	YAMAHA

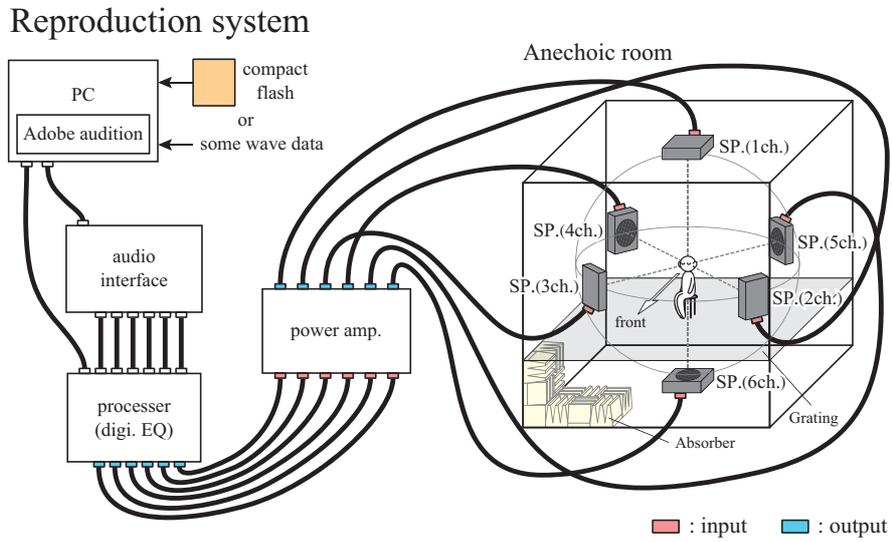


Fig.2.23 Diagram of 6-channel reproduction system.

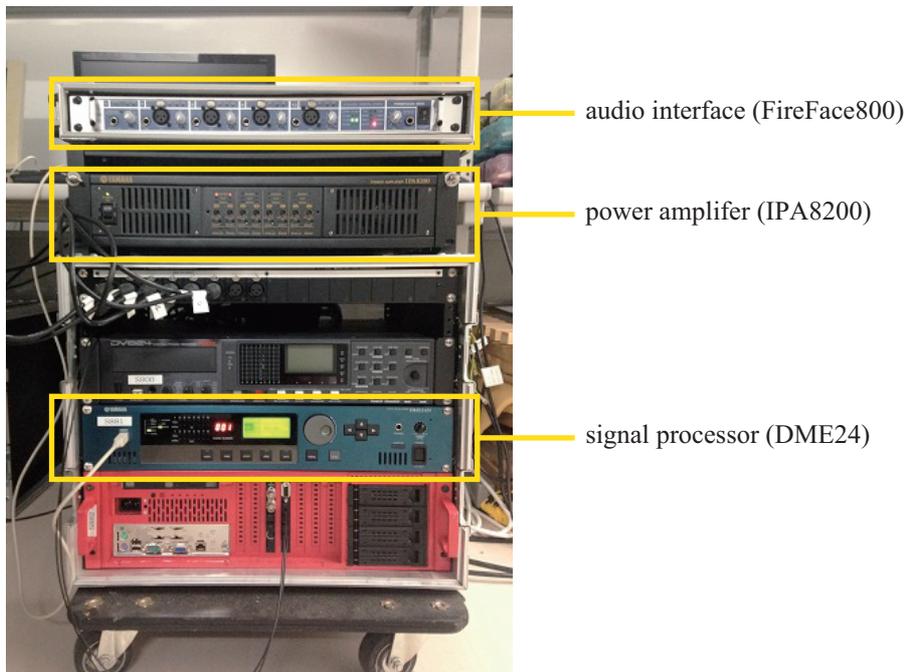


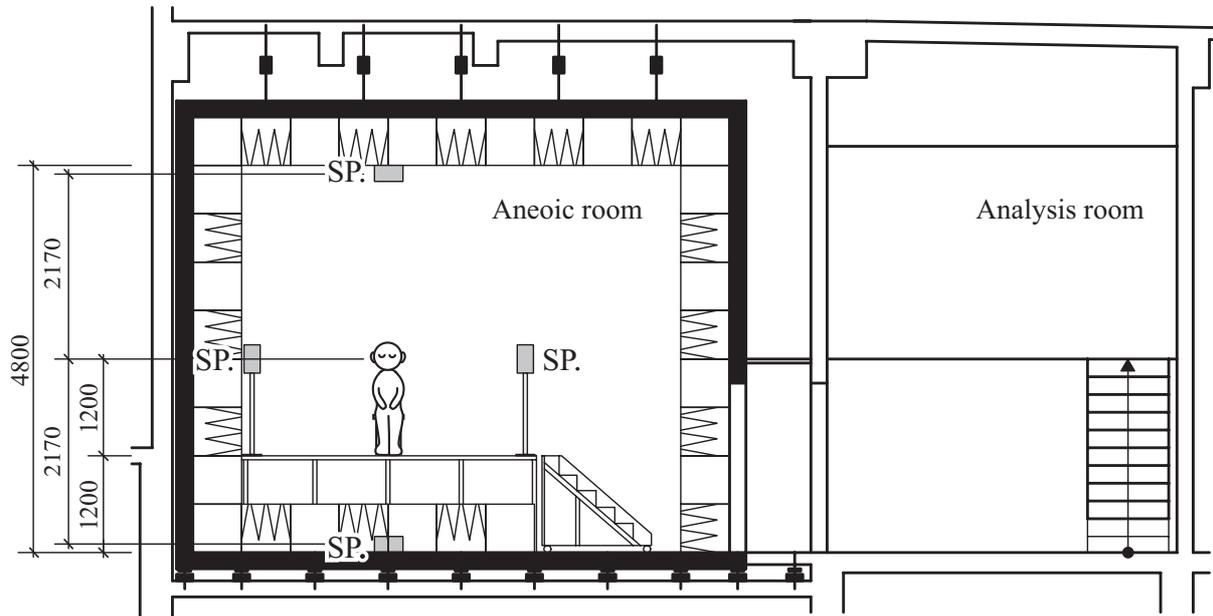
Fig.2.24 Equipment of reproduction system.

スピーカ配置

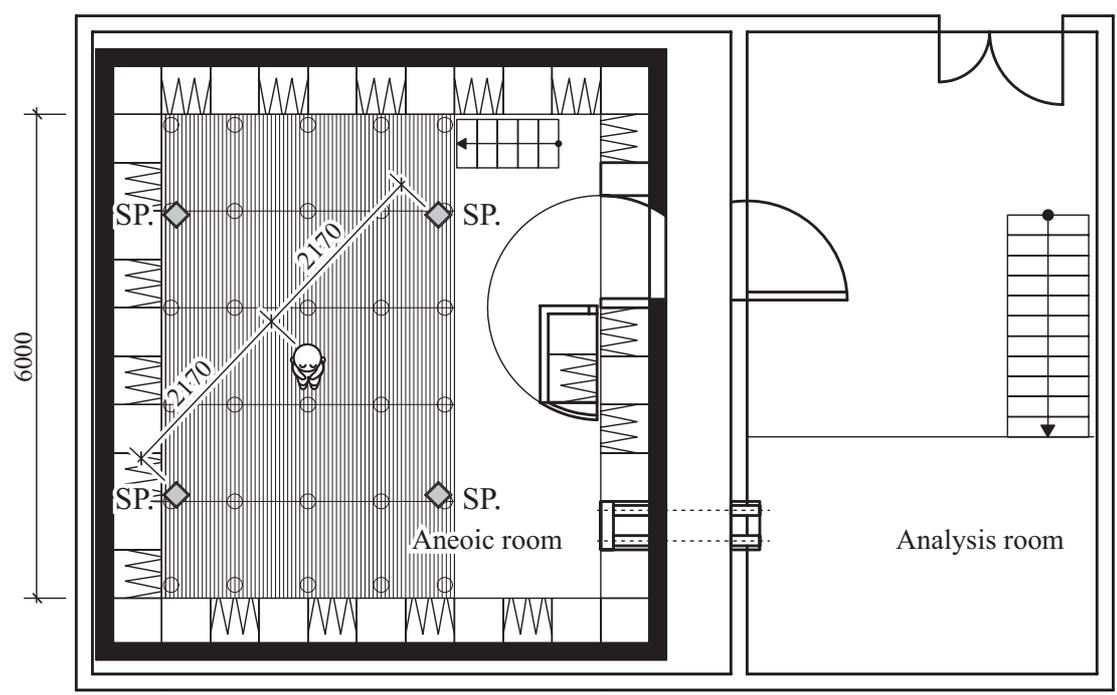
本研究の無響室の仕様と、再生系に用いる6台のスピーカ配置を図2.25に示す。無響室の有効室寸法5.4m×6.0m×4.8m(H)で、床面の1/3を除いた全面に吸音楔を設置している。床面の2/3は床面高さ1.2mにグレーチングが設置され、その下に吸音楔が配置されている。スピーカはこのグレーチング上に4台と天井と床面に1台ずつ、受聴位置を中心とした半径2,170mmの円上に配置されている。グレーチング上のスピーカ高さはツイーター中心でグレーチング面から1,200mmである。

周波数特性

再生に用いるラウドスピーカは、平坦な周波数特性を持つように調整されているが、多少異なる周波数特性を有する。そのためSignal processor(DME)のグラフィックイコライザコンポーネントを用いPC操作で1/3オクターブバンドごとの周波数補正をかける。スピーカからピンクノイズを流し、80~4kHz帯域において各チャンネルとも±1dB以内に補正した。また、各チャンネルの再生レベルを揃えた。



Section



Plan

5400

1:100

Fig.2.25 A plan of anechoic room and an arrangement of speakers.

2.4 音線法に基づく6チャンネル再生

本研究では音線法によって作成した音源を用い、6チャンネル再生システムによって音場を再生する。6チャンネルのデータを作成し可聴化を行うにあたって、音線法考慮すべき点について述べる。

2.4.1 指向性

ある空間内に音源 S と受聴点 R があるとする。図 2.26 に示すように音源 S が無指向性で全方向に音線が進行するとき、受聴点 R が無指向性であれば、音線と受聴点の距離が球の半径より小さければ入射方向によらず全て受音する。

図 2.27(a)のように受聴点 R が指向性を持つとき、音線と受聴点 R の距離に加えて受聴点 R の指向性に対する入射角度を求め、角度に応じた指向係数を算出し、エネルギーに乗じるという計算を全音線に対して行う必要があり、計算が複雑になる。

そこで音源・受聴点の2点間の関係は場所を入れ替えても同じであるという相反則性に基づき、図 2.27(b)のように音源 S を受聴点 R_s 、受聴点 R を音源 S_r に置き換え、音源 S_r から指向性を持たせた音線を飛ばして受聴点 R_s で受音球に入射する音線を受音する。音源 S_r の指向性付加の方法は、指向性に応じて音線の密度を変化させる方法と、全方向に飛ばした音線に指向性に応じた初期エネルギーを持たせる方法が考えられるが、複雑な工夫が必要のない後者の方法を採用する。

音源の指向性に応じたエネルギーは、指向係数 d_θ を初期エネルギー E_0 に乗じて算出する。本検討では $E_0 = 1$ とした。まず音源の指向性 \vec{u} とある音線の方向ベクトル \vec{v} の内積から放射角度 θ を求め(式 2.25)、それを用いて最大半径 1 のカージオイド型の式 2.26 から指向係数 d_θ を求める。

$$\cos \theta = \frac{\vec{u} \cdot \vec{v}}{|\vec{u}| |\vec{v}|} \quad (2.25)$$

$$d_\theta = \frac{1 + \cos \theta}{2} \quad (2.26)$$

放出されるエネルギーは初期エネルギーに対して d_θ を乗じた値なので、 d_θ である。放出されて以降は壁面反射時に吸音されエネルギーが減衰し、最終的に受音球にエネルギー E で入射する(式 2.27, r : 反射回数)。

$$E = (1 - \alpha)^r \times d_\theta \quad (2.27)$$

この値は受聴点 R が指向性をもつ場合に受音するエネルギーと同等になり、相反則が成り立つ。

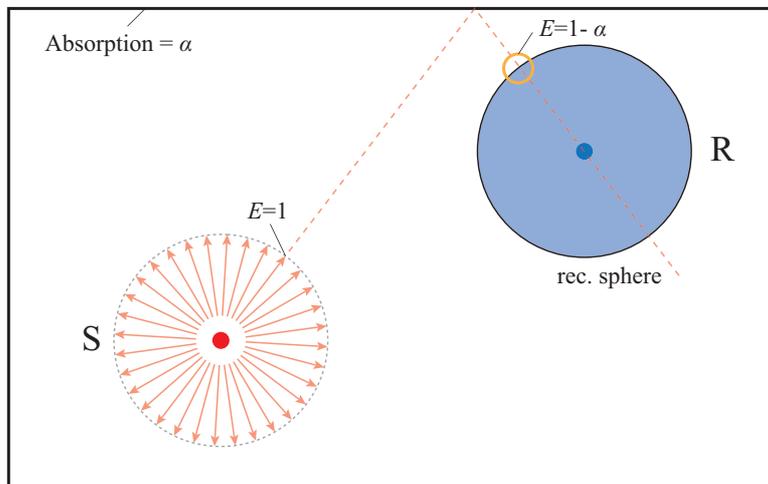


Fig.2.26 In case both source and receiver are omni-directional.

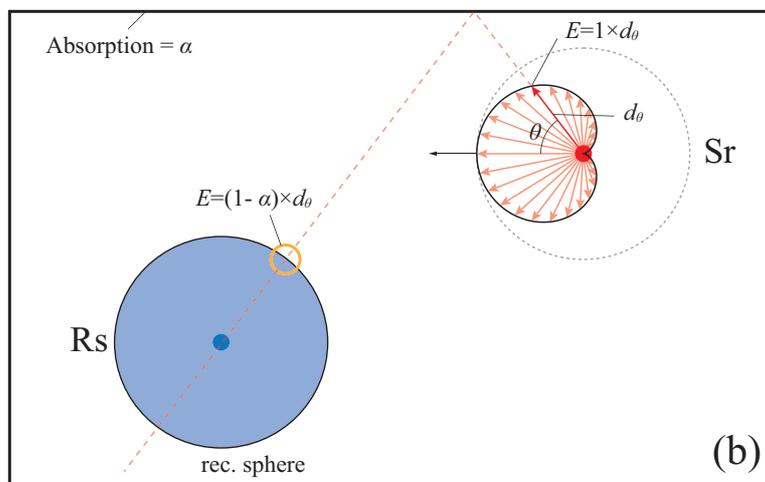
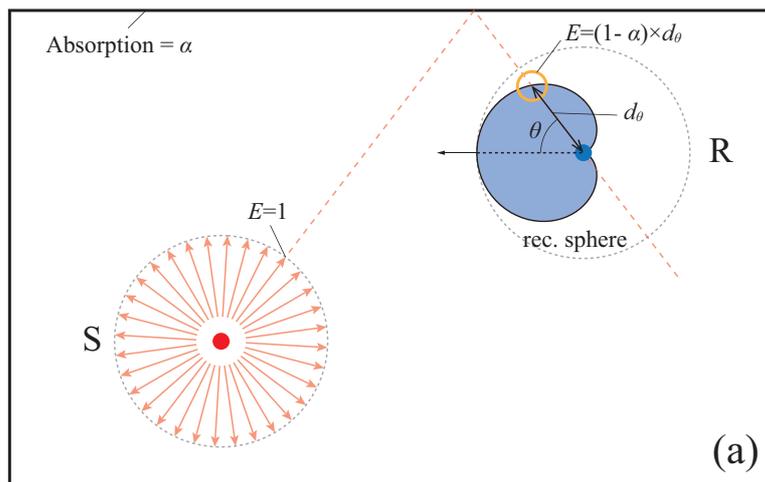


Fig.2.27 Equivalent analyses based on the reciprocity : (a)cardioid receiver – omni-directional source and(b)omni receiver – cardioid source.

2.4.2 位相

音線法で得られたインパルス応答はエネルギーの総和であり、位相情報を持たない。このまま音源にインパルス応答を畳み込むと、本来とは大きく異なる響きが付加される。それゆえ可聴化を行うにあたってインパルス応答に位相情報を与える必要がある。

使用した音線法では 125-8kHz の 1/1 オクターブバンドごとにインパルス応答を算出している。そこで各周波数帯域ごとに位相フィルターを掛けることで、位相情報を有するインパルス応答を模擬的に作成した。

第 3 章

屋内移動空間のシミュレーション

3.1 はじめに

本章では幾何音響解析に基づく屋内移動空間のシミュレーション設定、および解析結果について述べる。

序章で述べた通り「屋内移動空間」としては鉄道駅・空港等様々な空間が想定されるが、本研究では、比較的多くの音環境の問題が取り上げられる鉄道駅構内の空間を想定することとする。大規模なターミナル駅には多くの利用者が存在し、その中には初めての利用者を含む様々な人がいることを考慮すれば、音声情報が確実に伝わる必要がある。また、非常時の案内放送が確実に伝わらなければ、利用者は危険に晒される。したがってアナウンスの残響を抑制し、明瞭度を向上させることが重要であり、吸音は建築的側面からの対策であるといえる。他方、残響のほかに確実な音声情報伝達を阻害する要因として、アナウンス以外の騒音、即ち暗騒音(背景騒音)がある。既往研究[3][8]では駅構内の等価騒音レベルはおおよそ 60dB から 70dB 後半と、環境騒音としてはかなり高いレベルに達することが示されている。天井等に吸音処理を施した場合は低減効果があることが知られており、音声伝送性能に限らず、日常時の快適性を確保するためにも適切な吸音処理が必要である。吸音処理効果について論じる際に重要なのが、吸音対象とする室やアナウンス音・話声等に関連するパラメータである。以下ではまずパラメータの設定について述べる。

■幾何音響解析のパラメータ

幾何音響解析で設定したパラメータを表 3.1 に示す。音速は室温 18°Cのときの値である。音源位置は複数個設定でき、後述する各条件に応じた座標を与えた。受音点についても後述する。第 2 章で述べた留意点を考慮し、音線数と受音球半径を決定した。ただし受音球は見付面積が 1m²となるようにした。反射回数は十分に多く設定し、解析時間(伝搬時間の上限)は各条件における Sabine 式の残響時間程度とした。なお、解析では空気吸収と境界全面に乱反射率 1 を与えている。空気の吸収は減衰率 m で与えられ、温度・湿度によって変化する。減衰率 m から減衰係数 e^{-mct} を式 3.1 によって算出し、解析で算出した全てのインパルス応答にこの減衰係数を、周波数帯域ごと、時間領域において掛け合わせることで、空気吸収を模擬した。ただし、 I_t : t 秒後のエネルギー、 I_0 : 初期エネルギーとする。

$$I_t = I_0 e^{-mct} \quad (3.1)$$

Tab.3-1 幾何音響解析のパラメータ

音速	342.25[m/s]
音線数	100,000
音源点・受音点	後述
受音球半径	0.56[m]
反射回数上限	10,000,000
解析時間長	残響時間程度

3.2 屋内移動空間モデルの設定

3.2.1 空間寸法の設定

既往研究に示される鉄道駅構内の空間寸法(表 3.1)を参考に、解析モデルの室寸法を決定した。幾何音響解析と 6 チャンネル再生システムを用いた屋内移動空間に関する既往研究 [13]では空港を想定し、室容積 8,000~16,000[m³]の超大規模空間のモデルが用いられている。本研究では比較的中規模な空間について検討することとした。駅構内の空間には通路、コンコース等があり、表 3.1 に示されるように、平面的にアスペクト比が極端ではない扁平な形状、通路や地下コンコース等に見られる細長い形状がある。形状による室内音響特性の違いを考慮するため、扁平な形状を F 型(Flat type)、細長い形状を L 型(Long type)と命名し、図 3.1、3.2 に示される平面寸法を設定した。

Tab.3-2 駅構内の空間寸法

箇所名	形態	W×D×H [m]	容積[m ³]
IK駅通路	軌道下通路	9.9×60×2.7	1,604
SB駅(吸音有)	橋上コンコース	19×26×4.1	2,025
SB駅(吸音無)	橋上コンコース	19×26×4.1	2,025
SJ駅通路	軌道下通路	16×120×2.9	5,568
MT駅	橋上コンコース	40×35×4.0	5,600
TK駅 Kコンコース	地下コンコース	23×190×3.5	15,295
TK駅 Sコンコース	地下コンコース	33×230×2.9	22,011

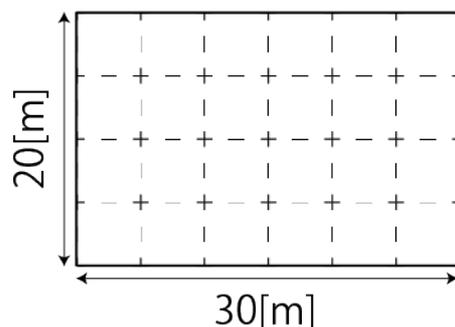


Fig.3.1 平面寸法(F型)

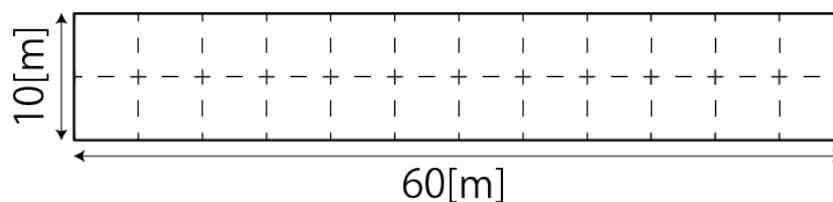


Fig.3.2 平面寸法(L型)

3.2.2 吸音条件の設定

本研究で用いた吸音材の設定を表 3-2 に示す。吸音率のデータは建築学会から出版される音環境設計のパンフレット[32]から引用した。天井のみ吸音の有無を考慮し、吸音ありの場合は岩綿吸音板、なしの場合は一般的な石膏ボードとした。壁面は石膏ボードとした。床面については、コンサートホール等の音響設計で一般に考慮される人の吸音面積を与えることとした。本研究では閑散時・混雑時の2パターンの利用者密度を検討する。床面の吸音率に対し、利用者密度に対応する吸音面積 A が、床面積 S と床面上の等価的な人の平均吸音率 $\bar{\alpha}$ の積 $S\bar{\alpha}$ と等しくなるような $\bar{\alpha}$ を加えることで、人の吸音を模擬できる。人(利用者)の吸音面積は既往文献[24]より引用した。

Tab.3-3 各材料の吸音率

仕上げ材料/部位	周波数 [Hz]						
	125	250	500	1000	2000	4000	8000
石膏ボード/天井(反射性)・壁面	0.26	0.13	0.08	0.06	0.06	0.06	0.06
岩綿吸音板/天井(吸音)	0.4	0.35	0.45	0.55	0.65	0.75	0.85
タイル/床面	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03
タイル(0.04人/m ²)/床面	0.02	0.02	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05
タイル(0.25人/m ²)/床面	0.06	0.09	0.13	0.13	0.14	0.13	0.13

3.2.3 音源の設定

■スピーカ

案内放送に用いるスピーカである。スピーカの設置方式としては、特定のエリアに音声情報を伝達するため、単一あるいは集中配置とする方式と、全館的に情報伝達するために複数台を分散配置する方式が考えられる。単一配置の場合の検討は既に行われている[13]が、比較のため分散配置方式についても検討を行う。本研究で設定したスピーカの平面配置を図 3.3 に示す。ただし受音点は平面的な室中心、高さ 1.5m に設けた。

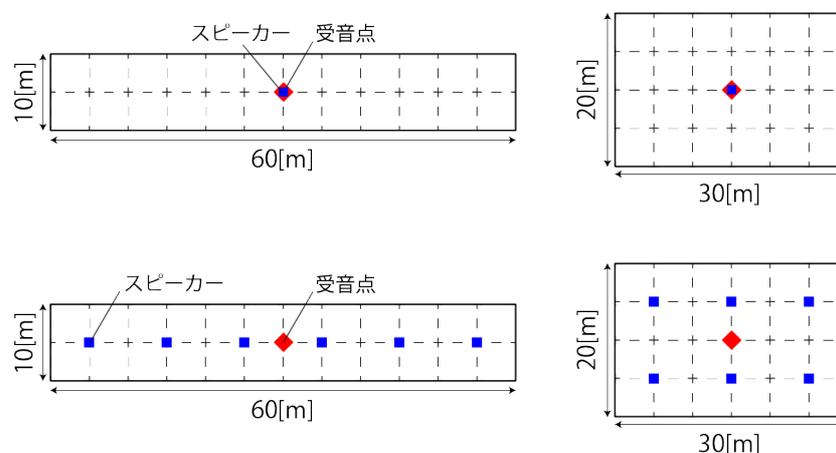


Fig.3.3 スピーカの平面配置(上：単一配置、下：分散配置)

スピーカは駅コンコース等においてよく見られる天井埋め込み型を想定し、全て天井面に配置する（幾何音響解析では微小距離離す）。単一配置の場合は受音点の真上に設置することとし、分散配置の場合は既往研究[2]を参照しつつ 10m 間隔で 6 台を配置することとした。指向係数 $Q = 2$ を与えるため、幾何音響解析では音線の初期エネルギー E_0 を 2 倍し、受音球で音線の方向ベクトルの z 成分が正のもののみカウントすることとした。音量設定については、あるパワーレベルを設定し、案内放送音声として想定する音源と、幾何音響解析で算出した各条件のインパルス応答から求めるという方法がありうるが、実際には音量は現場で可変なものであると考えられる。したがって全条件で、受音点で 65dBA とすることとした。文献[14]では、妨害音がない場合、アナウンスの音声レベルが 65dBA で高齢者と若齢者のアナウンスの「聴き取りにくさ」がともに最小になるとしている。本研究でアナウンス用に設定した音源の等価騒音レベルを図 3.4 に示す。

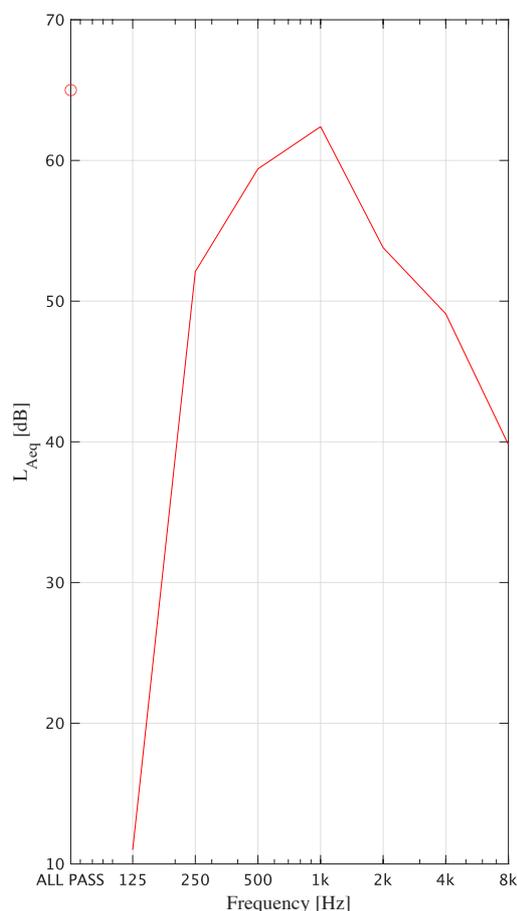


Fig. 3.4 アナウンス音の等価騒音レベル

■ 暗騒音

アナウンス音の伝達性能に着目しているため、アナウンス音以外の聴取を妨害する音は全て暗騒音である。本研究で対象とする駅コンコースや通路等の空間では、利用者の話声・足音・キャスターの音・券売機のサイン音等、多種多数の暗騒音が存在すると考えられる。そのうち最も支配的なものは話声であるという研究結果[5]に基づき、本研究では利用者の話声のみを考慮する。指向係数 $Q = 1$ の点音源とし、音量は日常時の普通会話程度、A特性パワーレベル 68dB とした。また、閑散時・混雑時を想定した2パターンの利用者密度(閑散時:0.04 人/m², 混雑時:0.25 人/m²)について検討を行うが、利用者のうち、会話を行っている話者は一部(1対1の会話では半分、多数の会話ではそれ以下)と考えられる。それゆえ騒音源としての話者は閑散時で全体の1/4、混雑時で全体の1/5と設定した。利用者密度は前述した人の吸音条件に反映される。音源(話声)の配置を図3.5に示す。分析および聴感実験のため男性10種類(1名)、女性10種類(1名)、計20種類の話声のドライソースを音源に用いた。等価騒音レベルおよび20種類の平均値を図3.6, 3.7に示す。

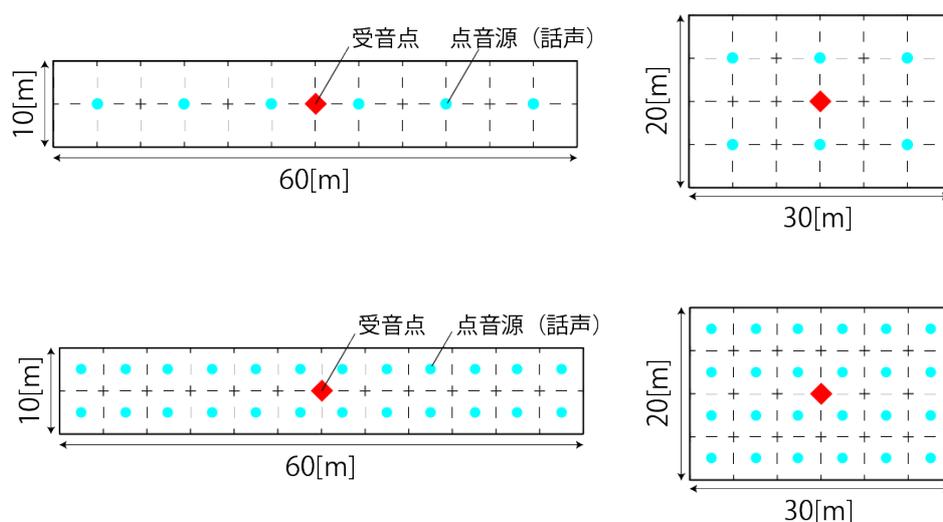


Fig. 3.5 騒音源(話声)の平面配置

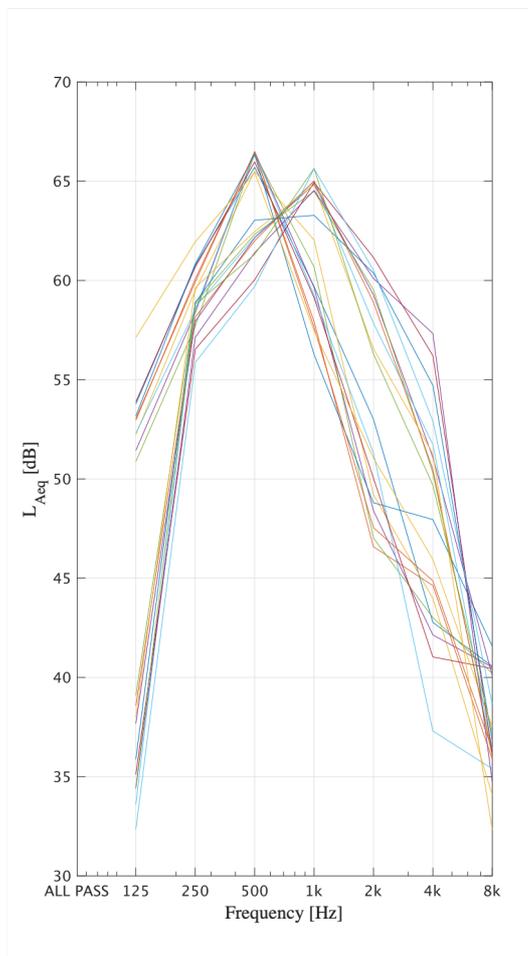


Fig. 3.6 話者音源 20 種の等価騒音レベル

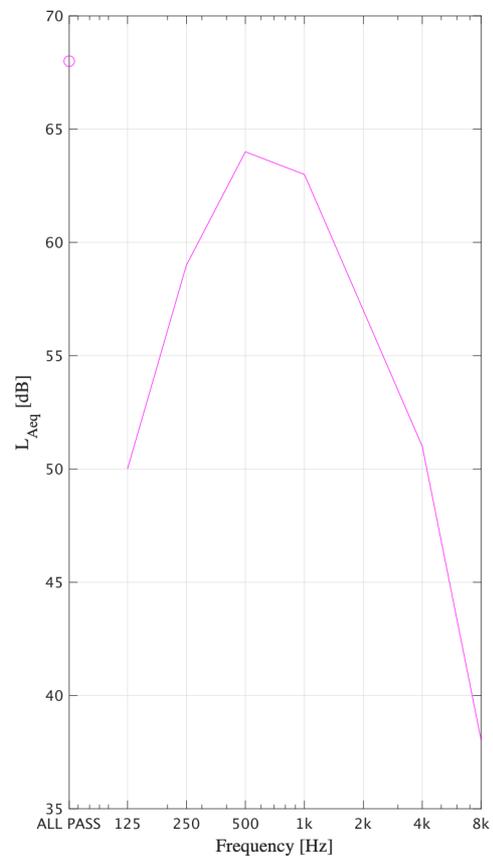


Fig. 3.7 話者音源の等価騒音レベル(平均)

■ 受音点での騒音レベルの算出

話者はアナウンス音と異なり、各音源のパワーレベルを定めているため、受音点での A 特性音圧レベルは別途算出する必要がある。以下の手順に従って求めた。

- ① 各音源点と受音点間のインパルス応答を幾何音響解析で算出する。
- ② 各音源の受音点における音圧レベル減衰量は、インパルス応答を二乗したものに相当する。ただし、減衰量の基準値として、室内を完全吸音とし、無響室を模擬した場合の、受音点から 10m 点での音源のパワーレベルを用いる（インパルス応答の二乗値からこの基準値をオクターブバンドごとに引けば、真の減衰量となる）。図 3.7 に示す、20 種を平均した等価騒音レベルから各音源点からの減衰量を引き、受音点での音圧レベルを求める。
- ③ ②で求めた各音源の受音点での音圧レベルを全てエネルギー合成すれば、受音点での音圧レベルが求まる。

3.3 幾何音響解析による物理指標の算出

3.3.1 各種物理指標

室内音響設計を科学的裏付けによって進めるため、評価指標として様々な物理指標（室内音響指標）が用いられている。本研究では、インパルス応答から容易に算出でき、汎用性の高い指標をいくつか選定した。本節では、幾何音響解析で算出する各項目について概説したのち、解析結果と考察を述べる。

■エネルギー減衰曲線

受音点での時間的なエネルギー減衰の特性を示す。室内のインパルス応答をシュレーダー積分して得られる。式(3.2)によって算出する。

$$\langle S^2(t) \rangle = \int_0^{\infty} h^2(t) dt - \int_0^t h^2(t) dt \quad (3.2)$$

ただし、 $\langle S^2(t) \rangle$ ：減衰波形の集合平均、 $h(t)$ ：インパルス応答

■残響時間 (Sabine, T_{20} , T_{30})

室内の平均エネルギー密度が定常の値から 60dB 減衰するのに要する時間である。インパルス応答から得たエネルギー減衰波形の初期レベル（定常のレベル）に対して、-5~-25dB を回帰区間とした場合の回帰直線の減衰率から求めたものを T_{20} 、-5~-35dB を回帰区間とした場合を T_{30} と呼ぶ。なお、拡散音場を仮定した場合の残響時間の理論値は、式(3.3)に示す Sabine の残響式によって求めた。いずれも 500Hz・1kHz 帯域の平均値とした。

$$T = \frac{KV}{A} \text{ [s]} \quad (3.3)$$

ただし、 K ：0.16、 V ：室の体積[m³]、 A ：等価吸音面積

■ディフィニション D_{50}

スピーチの明瞭度評価に用いられる指標で、インパルス応答の直接音到来から 50ms までの初期音エネルギーを明瞭度に貢献する因子とみなし、全エネルギーに対する割合[%]で評価する。本研究では 500Hz・1kHz 帯域を平均した値を用いた。

$$\frac{\int_0^{50\text{ms}} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \text{ [%]} \quad (3.4)$$

ただし、 $p(t)$ ：インパルス応答の音圧瞬時値

■クラリティ C_{50}

クラリティは音場の明瞭性評価に用いられる指標である。インパルス応答の、直接音到来から 50ms までの初期音エネルギーを明瞭度に貢献する因子とみなし、それ以降を明瞭度に対する妨害因子とみなしている。本研究では後述する U_{50} に合わせ、500~4kHz 帯域のエネルギーを用いて算出した。

$$C_{50} = 10 \log_{10} \frac{E}{L_{50}} [dB] \quad (3.5)$$

ただし、

E : 直接音到来から 50ms までの初期音エネルギー

L_{50} : 後期反射音エネルギー

■ U_{50} (Useful-to-detrimental-ratio)

日本建築学会環境規準(AIJES)[33]によれば、インパルス応答の直接音到来からある時間までの初期エネルギーを貢献因子(Useful)、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背景騒音エネルギーを妨害因子(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指標は一般に Useful-to-Detrimental Ratio や Signal-to-Noise Ratio などと呼ばれる。そのうち有効な初期応答の時間を 50ms とし、簡潔に算出できるようにまとめられたものが式 3.6 に示す U_{50} である。A 特性の騒音エネルギーを用い、500~4kHz を有効帯域とした例が示され、定まった方法はないとされている[16][33]が、本研究ではこの手法にしたがった。STI などと比較しても非常に相関が高いと報告されている。

$$U_{50} = 10 \log_{10} \frac{E}{L_{50} + (E + L_{50}) 10^{-\frac{SNR}{10}}} [dB] \quad (3.6)$$

ただし、

E : 直接音到来から 50ms までの初期音エネルギー

L_{50} : 後期反射音エネルギー

SNR : 音源信号エネルギー S と背景騒音エネルギー N の SN 比

本研究では受音点におけるアナウンス音の A 特性音圧レベルが S に相当する。また、背景騒音(暗騒音)エネルギー N は 3.2.3 で述べた手法にしたがって算出した。

3.3.2 解析結果および考察

■エネルギー減衰曲線

幾何音響解析で算出したエネルギー減衰曲線を図 3.8-3.11 に示す。スピーカ 1 台・単一配置の条件を実線で、スピーカ 6 台・分散配置の条件を波線で示している。全体的に波線は実線の上方にあることから、分散配置条件でのエネルギー上昇があらわれているといえる。天井高を高くした場合、単一配置・分散配置での音源・受音点間距離の比率が近づくため、曲線も近づいていると考えられる。また天井反射性条件で、閑散時よりも混雑時の減衰が早くなる傾向があるのは、人の吸音によるものである。

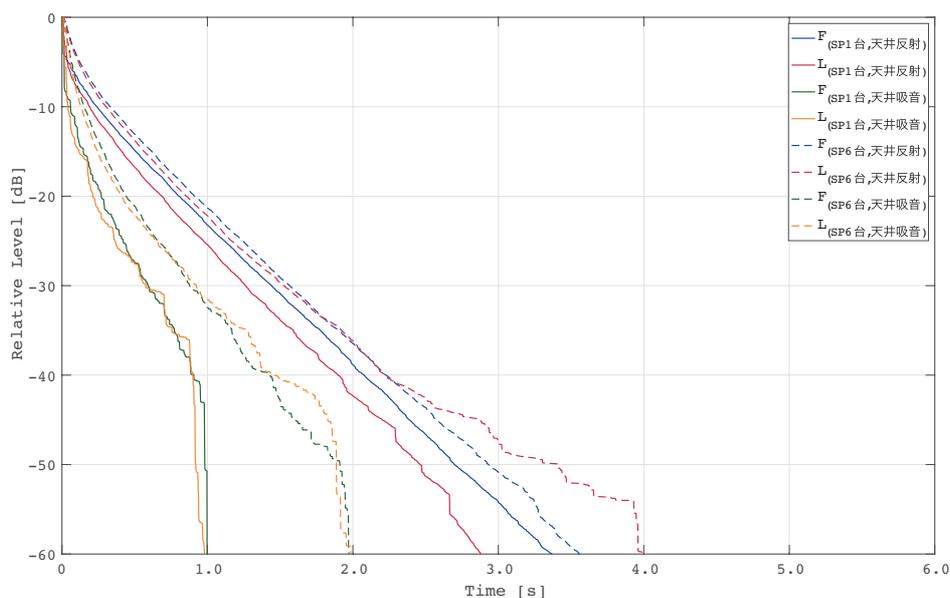


Fig. 3.8 エネルギー減衰曲線(閑散時・天井高 4m)

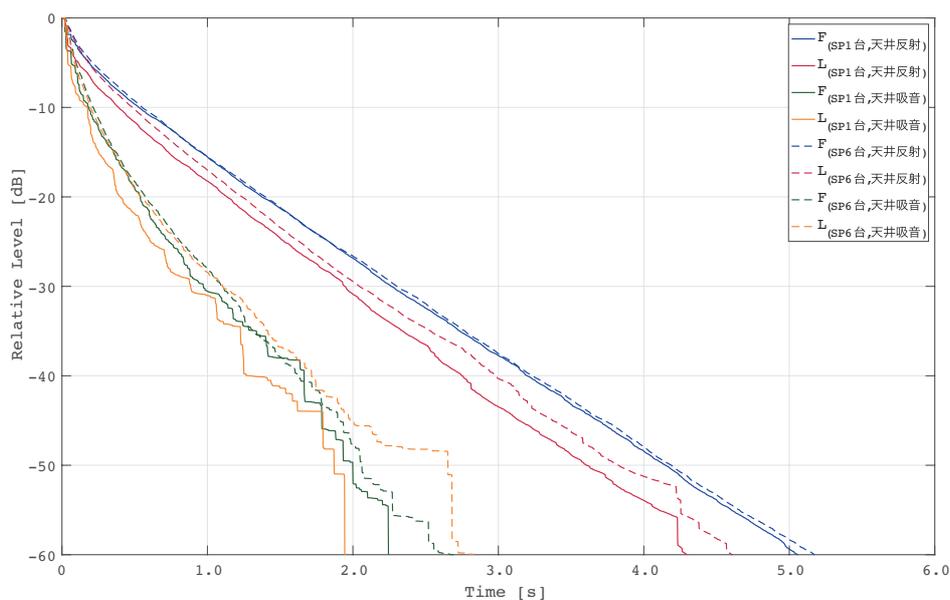


Fig. 3.9 エネルギー減衰曲線(閑散時・天井高 8m)

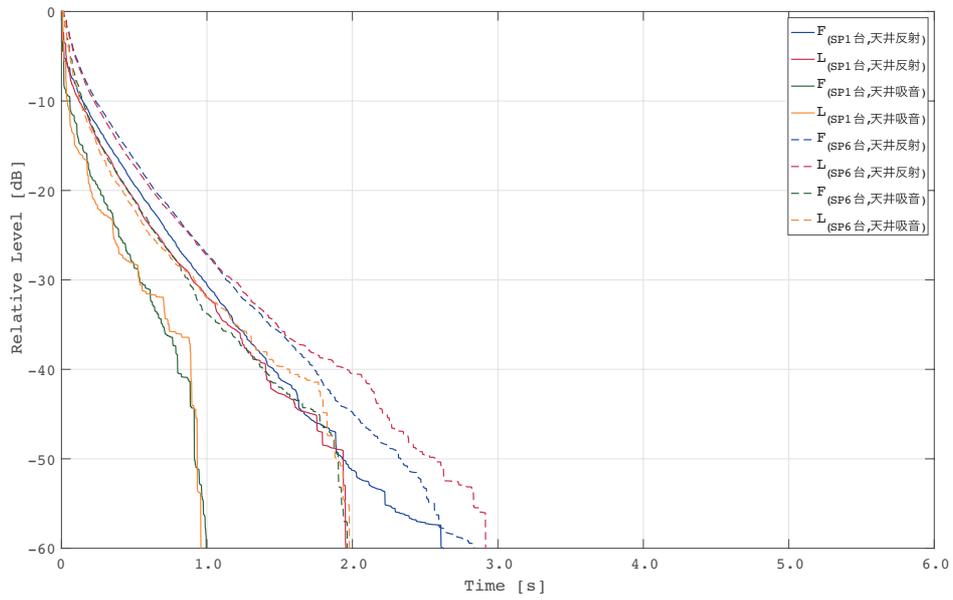


Fig. 3.10 エネルギー減衰曲線(混雑時・天井高 4m)

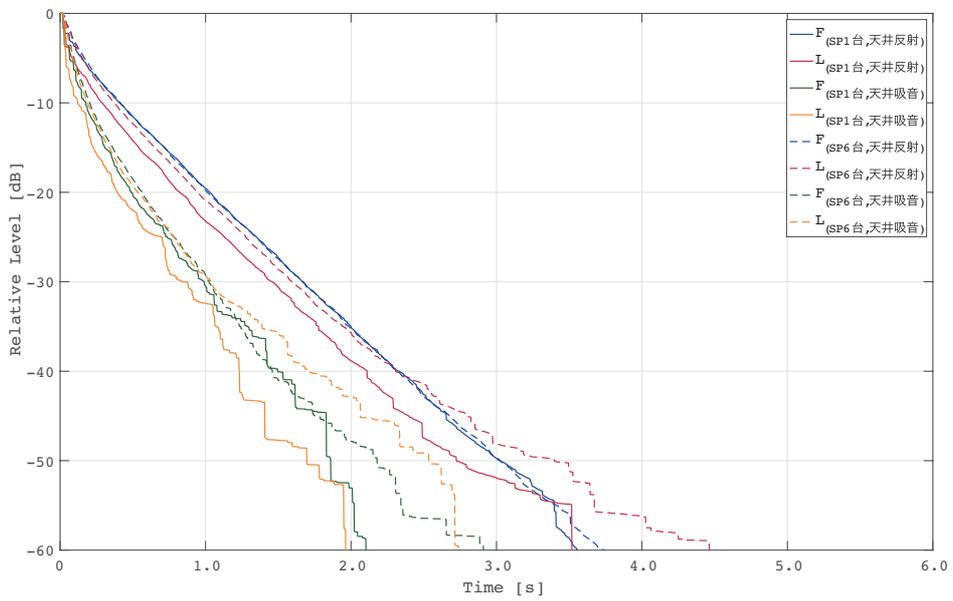


Fig. 3.11 エネルギー減衰曲線(混雑時・天井高 8m)

■ 残響時間

解析で算出した残響時間を 3.12-3.15 に示す。Sabine 式による拡散音場仮定の理論値、インパルス応答から算出した解析値である T_{20} および T_{30} を示している。解析値の室容積増加や天井を反射性としたことによる増加傾向は、理論値に対応している。分散配置条件では、単一配置条件よりも T_{20} および T_{30} が多少増加する傾向にあるが、ほとんど変わらない条件も多い。スピーカ台数の増加によりエネルギー量は増加するものの、残響時間そのものは室のエネルギー減衰特性によって決まっているためと考えられる。また、天井高によらず天井反射性の場合には解析値が理論値より短く、天井吸音の場合には長くなる傾向にある。天井反射性の場合には平均自由行路が拡散音場仮定の理論値におけるそれよりも短くなるため解析値が短くなり、天井吸音の場合には反射性の壁面間での残響により解析値が長くなっていくものと推察される。また、天井反射性の場合には閑散時・混雑時の人の吸音の影響が強くなり、天井吸音の場合には天井面の吸音が支配的であり影響が少ないと考えられる。

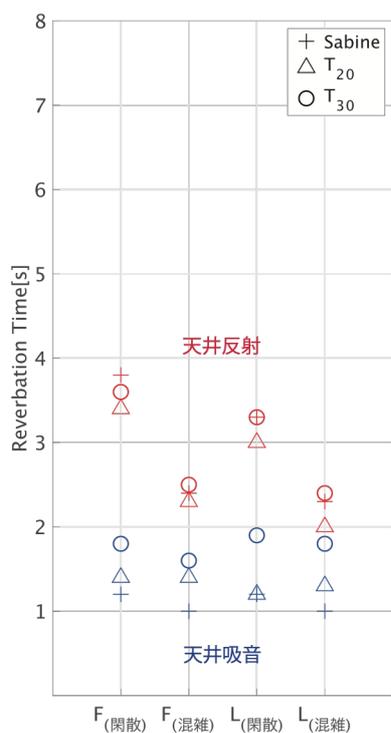


Fig. 3.12 残響時間 (SP1 台・天井高 4m)

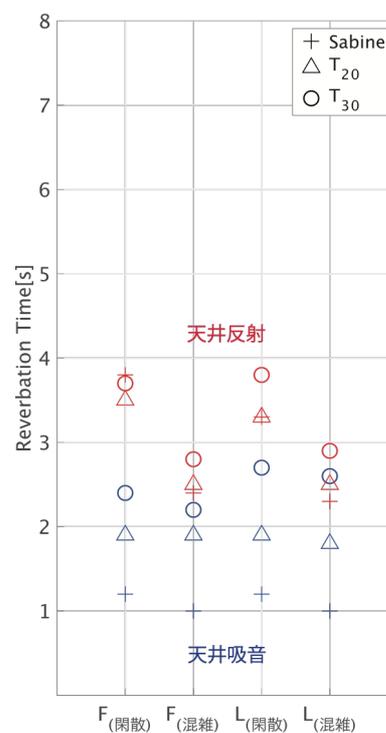


Fig. 3.13 残響時間 (SP6 台・天井高 4m)

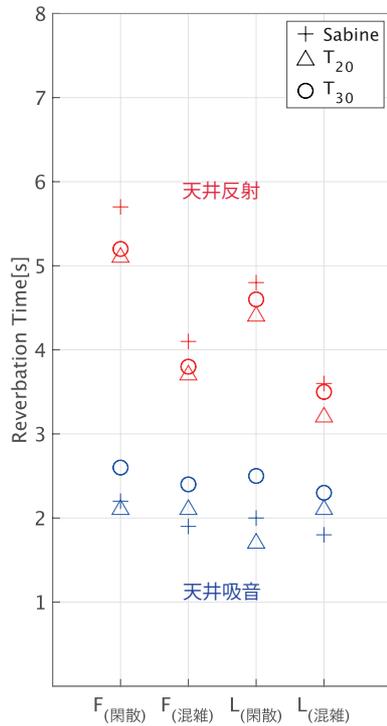


Fig. 3.14 残響時間 (SP1 台・天井高 8m)

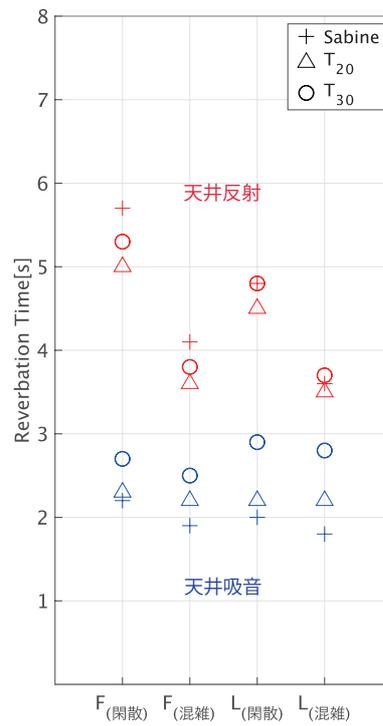


Fig. 3.15 残響時間 (SP6 台・天井高 8m)

■ ディフィニション D_{50}

解析で算出した D_{50} を図 3.16-19 に示す。分散配置条件ではおおよそ 20% ほど、条件によってはそれ以上 D_{50} が低下している。スピーカ台数の増加によって、50ms 以降の妨害音の割合が上昇したためであると考えられる。また、天井吸音条件では、天井反射性条件に対して 10%~30% の範囲で D_{50} が上昇している。なお、天井反射性条件では人の吸音効果があられ、閑散時の D_{50} よりも混雑時が高い値となった。天井吸音条件では必ずしもそうとは言えず、条件によっては閑散時よりも混雑時で低い結果となっている。床面に人の吸音を考慮したことによって、50ms までの有効な初期反射音エネルギー(主に床からの 1 次反射音エネルギーが低減し、算出結果にあらわれた可能性がある。

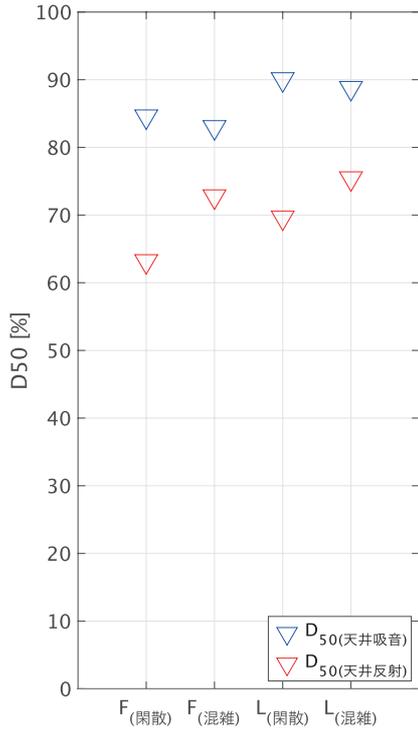


Fig. 3. 16 D50 (SP1 台・天井高 4m)

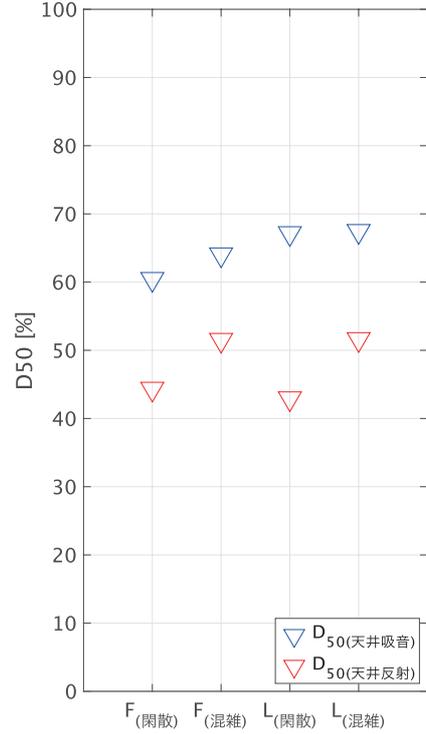


Fig. 3. 17 D50 (SP6 台・天井高 4m)

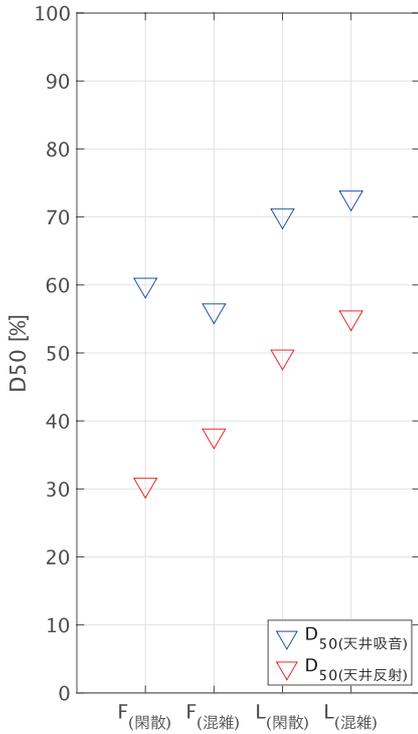


Fig. 3. 18 D50 (SP1 台・天井高 8m)

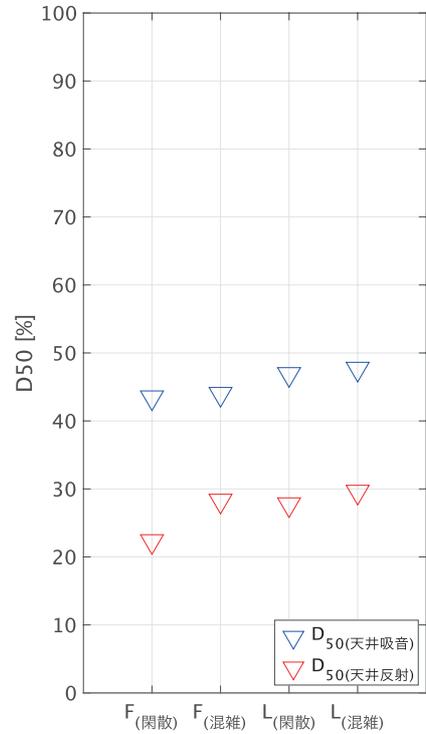


Fig. 3. 19 D50 (SP6 台・天井高 8m)

■暗騒音レベル N・SN 比

3.2.3「音源の設定」で述べた方法にしたがって話声による暗騒音レベルを算出した(図 3.20-21)。天井高 8m では 4m に対して 1dB 程低い値となっている。また天井吸音条件では反射性条件に対して 2~3dB 低い値をとっている。おおよそ 57~67dB となっており、特に反射性条件の値は、駅コンコース等における実測値[3][8]と概ね対応している。また、SN 比の算出結果を図 3.22-23 に示す。本研究ではスピーカの音量設定は現場で可変であることをふまえ、パワーレベルを設定せず、アナウンス音による受音点での A 特性音圧レベルが 65dB となる設定を用いた。すなわち SN 比の S が一定であるため、各条件間の暗騒音の差と SN 比の差は等しい。したがってこのような算出結果となっている。

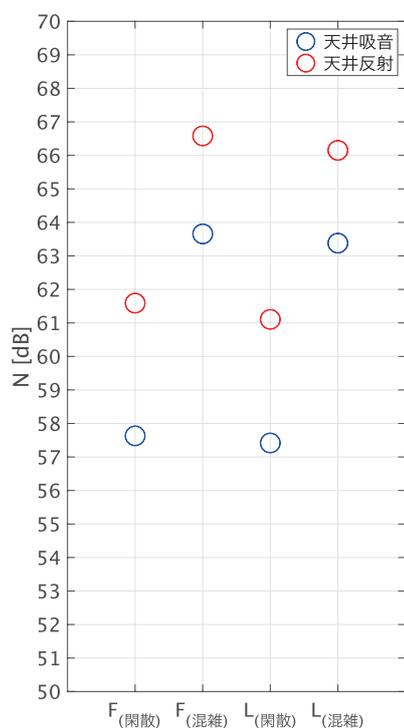


Fig. 3.20 暗騒音レベル N(天井高 4m)

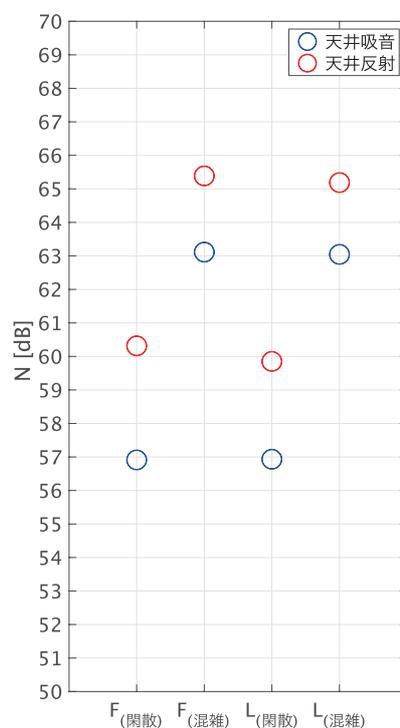


Fig. 3.21 暗騒音レベル N(天井高 8m)

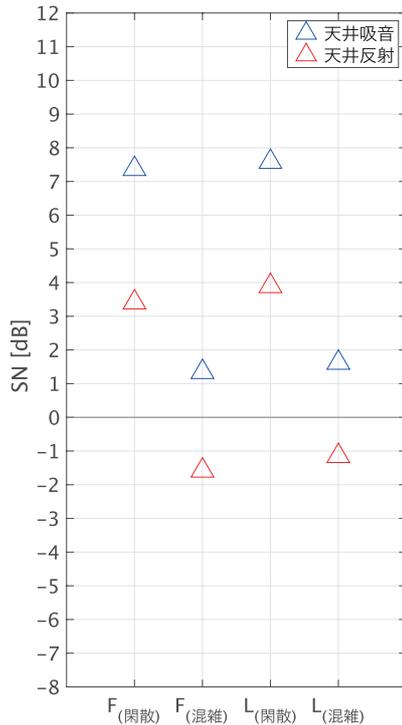


Fig. 3.22 SN比(天井高4m)

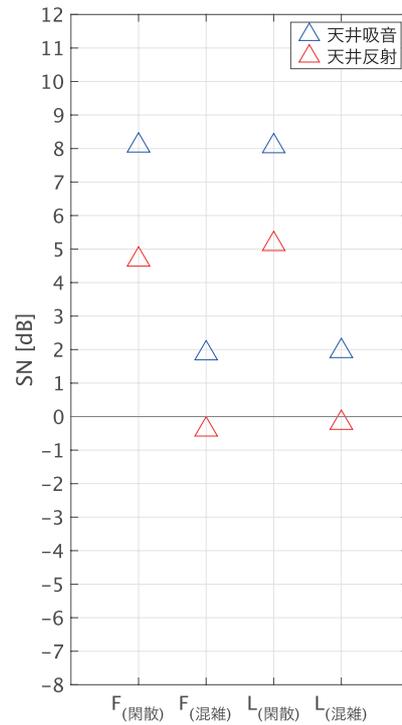


Fig. 3.23 SN比(天井高8m)

■クラリティ C_{50} ・ U_{50}

クラリティ C_{50} および有効音-妨害音比率 U_{50} の算出結果を Fig.3.24-3.27 に示す。各条件の C_{50} と U_{50} を比較すると、 U_{50} では暗騒音のエネルギーを考慮しているため、 C_{50} よりも低い値となっている。特に混雑時では騒音レベルのために大きく低下する。 $U_{50} = 0\text{dB}$ では、アナウンス音の明瞭度に対して、聴取者の 50% が聴き取りにくいと評価するとされているが、天井が反射性の場合、天井高 4m では L(閑散)を除く全条件で、天井高 8m では全条件で U_{50} が 0dB を下回っている。また混雑時の条件では、天井吸音を行っていても U_{50} が負となるものも多い。本研究では受音点での S を 65dB と設定しているが、これら U_{50} が負となる騒音レベルに対しては、 S を上げる必要があることが示唆されている。全体的傾向として分散配置条件は単一配置条件よりも明瞭度が低くなっているが、 D_{50} 同様、妨害音となる拡散音の増加によるものである。また F 型よりも L 型で明瞭度が高くなっているのは、それぞれの室形状と時間的な反射音構造によると考えられる。すなわち、L 型は平面形状の短出方向が 10m と比較的短く、壁からの 1 次反射音が 50ms 以内の有効音となる。一方、F 型では壁からの一次反射音は 50ms 以内の妨害音となるため、L 型よりも明瞭度が低くなる。

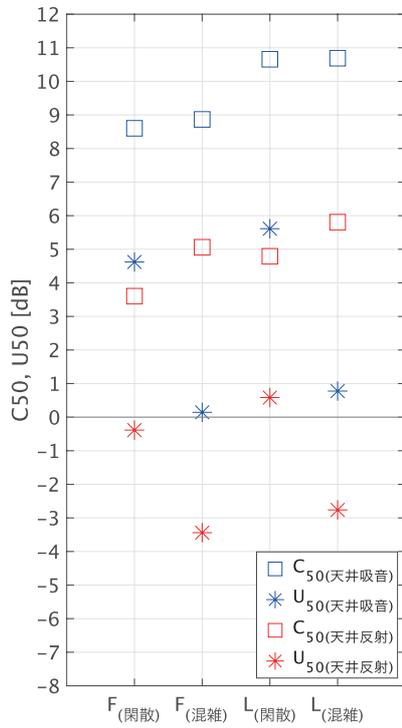


Fig. 3.24 C50・U50(SP1台・天井高 4m)

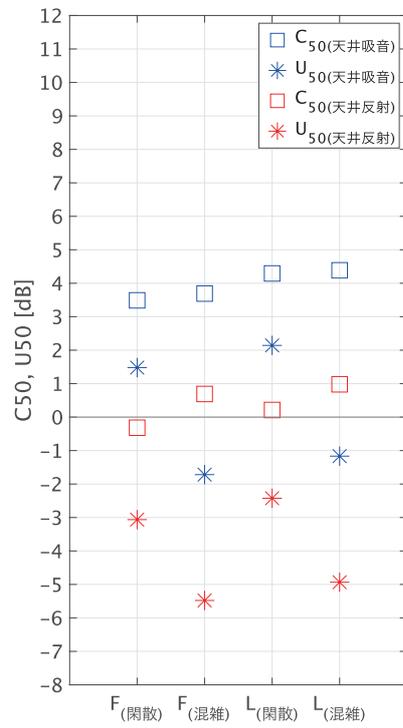


Fig. 3.25 C50・U50(SP6台・天井高 4m)

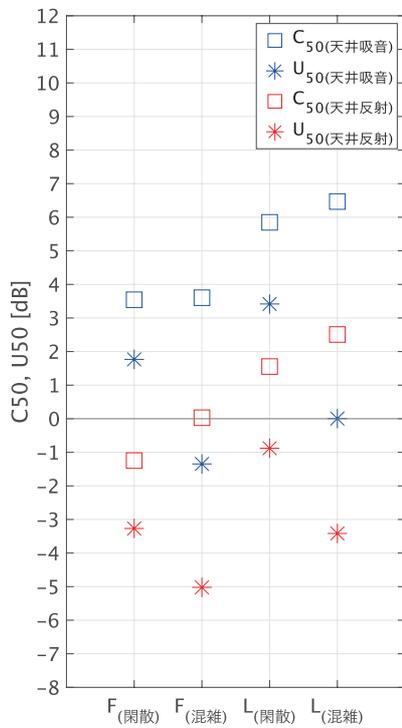


Fig. 3.26 C50・U50(SP1台・天井高 8m)

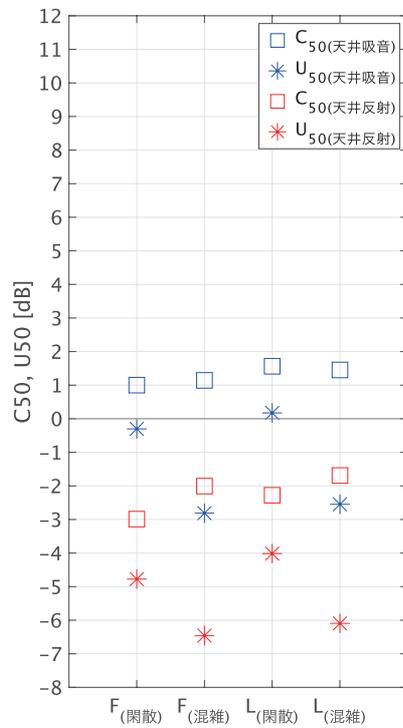


Fig. 3.27 C50・U50(SP6台・天井高 8m)

第 4 章

聴取環境に関する実験的検討

4.1 はじめに

4.1.1 実験目的

前章では、屋内移動空間における聴取環境について、物理指標を用いた理論的検討を行った。吸音の不足、騒音の増大、スピーカ台数の増加などが明瞭度を低下させ、聴取環境を悪化させることが示唆された。室寸法、音源および吸音の設定が異なる条件が聴感印象に及ぼす効果について検証を行うこと、各種物理指標と聴感印象との対応関係を明らかにすることを目的として、可聴化シミュレーションシステムにより屋内移動空間の音環境を再現し、聴感印象についての主観評価実験を行った。

4.1.2 実験内容

■概要

駅コンコース等の屋内移動空間におけるアナウンス聴取を想定し、前章で示した各条件の音場を 6ch 再生システムにおいて再現し、聴感印象を確認した。各音場に対して、アナウンス音の「聴き取りにくさ」を 4 段階、周囲の音環境の「うるささ」を 5 段階で評価してもらった。

実験は図 4.1 に示す、東京大学柏キャンパス環境棟地下 1F 無響室内の 6ch 再生システムで行った。被験者は上部・下部を除く 4 台のスピーカの中心に着席して評価を行った。実験日時は 2020 年 12 月中旬～下旬、被験者は正常な聴力をもつ健康な男女 14 名である。所要時間は休憩時間 10 分を含め、1 人あたり 40 分程度である。



Fig.4.1 被験者実験の様子

■実験音源

3章で述べた室形状・天井高・天井吸音・話者密度・スピーカ台数の各2条件をパラメータとした計32条件の音場を再現するため、可聴化用音源を作成した。アナウンス音については、幾何音響解析で算出したインパルス応答とアナウンス音源のドライソースを畳み込み、無響室で再生して測定した音圧レベルをもとに、A特性音圧レベルが65dBとなるようAdobe Audition上で補正を行った。暗騒音については3章に示した20種類の話声の音源と各条件・各音源のインパルス応答を畳み込んだ波形を重ね合わせて作成した。なお、暗騒音作成では6chの各インパルス応答に含まれる実数列から最大値の絶対値を検出し、各実数列をその値で割ることによって基準化を行った。18秒間のアナウンス音音源と20秒間の暗騒音音源をAdobe Audition上で重ね合わせたものを実験音源として用いた。

■評価方法

上記のように作成した32の音場の音源をランダムに並び替えたものを1セットとし、10分間の休憩を挟んで2セットの評価を行った。評価項目はアナウンス音の「聞き取りにくさ」4段階、周囲の「うるささ」5段階である。被験者実験で用いた評価語を含む評価用紙を図4.2に示す。

「聞き取りにくさ」は単語了解度による評価など、従来の音声伝達性能評価がもつ問題を解消する評価方法として、森本らが提案した[14]。特に多くの公共空間が含まれる、SN比が0dBから15dBの空間では「聞き取りにくさ」による評価が適しているとされる。また、「うるささ」については、ICBEN Team6の提案にしたがって構成され、種々の言語間で比較可能なものとして提案されている評価語を用いた[26]。

屋内移動空間の聴取環境評価実験

実験者：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
佐久間研究室 修士2年 土屋 洵

氏名	性別	年齢
	男・女	

◆ 実験内容

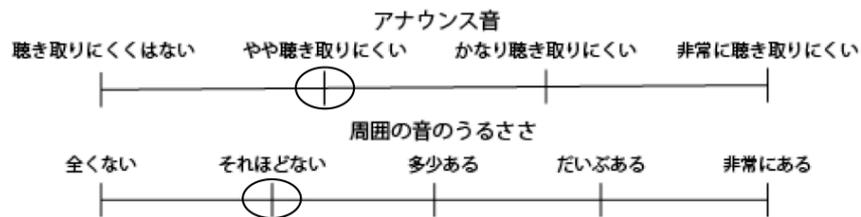
この度は実験にご協力いただき、誠にありがとうございます。本実験では、駅・空港等のコンコースを想定した音場を再現し、アナウンス音に対する「聴き取りにくさ」、周りの音に対する「うるささ」を評価していただきます。所要時間は 40 分程度（休憩 10 分）です。

◆ 実験手順

- ・無響室内の椅子に、指定された向きで座っていただきます。
- ・20 秒間の音源を聴き、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 段階で評価していただきます。評価及び音源の切り替え時間は 10 秒です。
- ・上記の評価を、32 種類の音源を 1 セットとして、2 セットについて行っていただきます。

◆ 評価項目・回答例

- ・以下の項目について、直感的な印象で○をつけてください。



◆ 注意事項

- ・音源を聴いているときは目を閉じてください。
- ・無響室内のスピーカには触れないでください。ご協力よろしく願いたします。

次のページから、実験の回答用紙になります。

Fig.4.2 主観評価実験の評価用紙

4.2 実験結果

4.2.1 実験結果と考察

被験者実験より得た回答をもとに分析を行う。評価は 32 条件をランダムに並び替えたものを 1 セットとし、順序を変更した 2 セットに対して行ったため、被験者ごとの「聴き取りにくさ」と「うるささ」の評価点は、2 セットの平均値とした。

■六元配置分散分析

各条件の評価点について、有意性の確認のため、被験者・室形状・天井高・天井吸音・混雑度・スピーカ配置を要因とした 6 元配置分散分析を行った。結果を表 4.1 に示す。聴き取りにくさ・うるささ のいずれについても、室形状の主効果が有意、その他の 5 要因の主効果が十分に有意となった。

Tab.4.1 六元配置分散分析

	被験者	室形状	天井高	天井吸音	混雑度	SP配置
聴き取りにくさ	**	*	**	**	**	**
うるささ	**	*	**	**	**	**

****** $p < 1\%$ (十分に有意) ***** $1 \leq p < 5\%$ (有意)

■平均評点

「聴き取りにくさ」と「うるささ」の平均評点と標準偏差を図 4.3-4.6 に示す。

●「聴き取りにくさ」の平均評点

各条件、閑散時よりも混雑時で騒音レベルの増大に伴って、聴き取りにくさが高くなっており、 U_{50} の傾向との対応が見られる。天井高 4m の場合、単一配置よりも分散配置で聴き取りにくさが高くなっている。一方、天井高 8m の場合、ほとんど変わらない条件もあり、単一配置と分散配置の差は天井高 4m と比べ縮まっている。天井高 4m・単一配置では直接音が支配的であり、50ms までの有効音の比率が高まるため、拡散音が優勢な分散配置との差が大きく出ていると考えられる。天井高 8m の場合、単一配置でも 50ms 妨害音の割合が上昇し、分散配置との差が縮まっていると考えられる。この差が縮まるという傾向は U_{50} よりも C_{50} とよく対応しており、騒音レベルよりもアナウンス音そのものの明瞭度がより評価に影響している可能性がある。室の平面形状 L 型・F 型による比較では、 U_{50} の傾向同様、L 型でより聴き取りやすいという評価がされている場合が多く見られた。一部では評価が U_{50} と逆転しており、L 型では暗騒音の明瞭性も高まってしまふことで、会話の内容がはっきりと聴き取れてしまう、すなわち有意味性の効果が出ていることも考えられる。

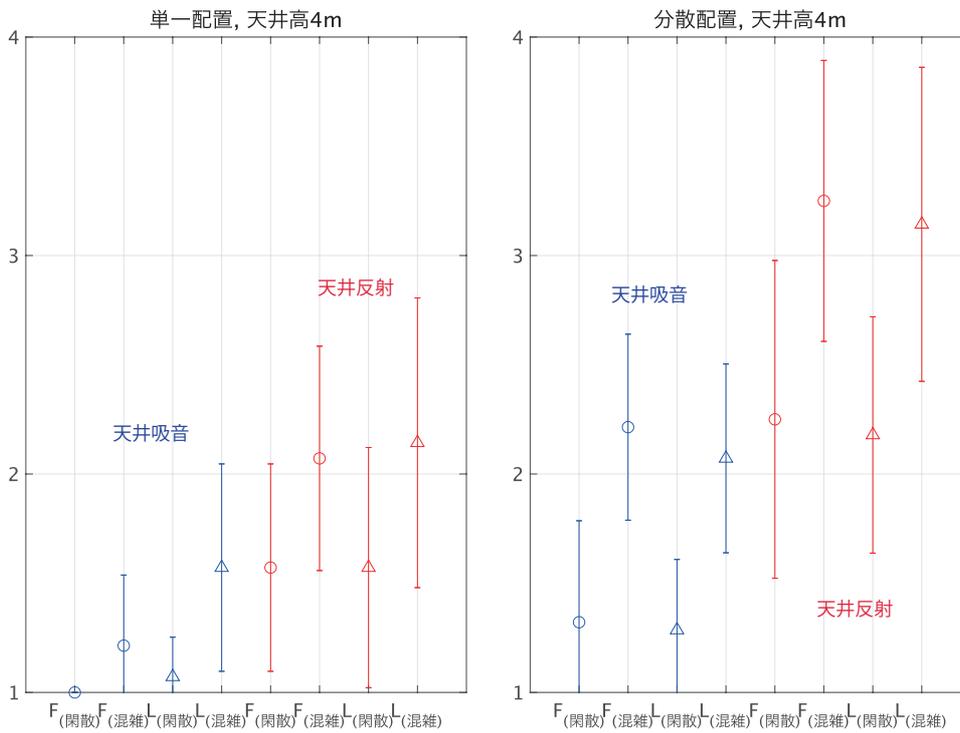


Fig.4.3 「聴き取りにくさ」平均評点(天井高 4m)

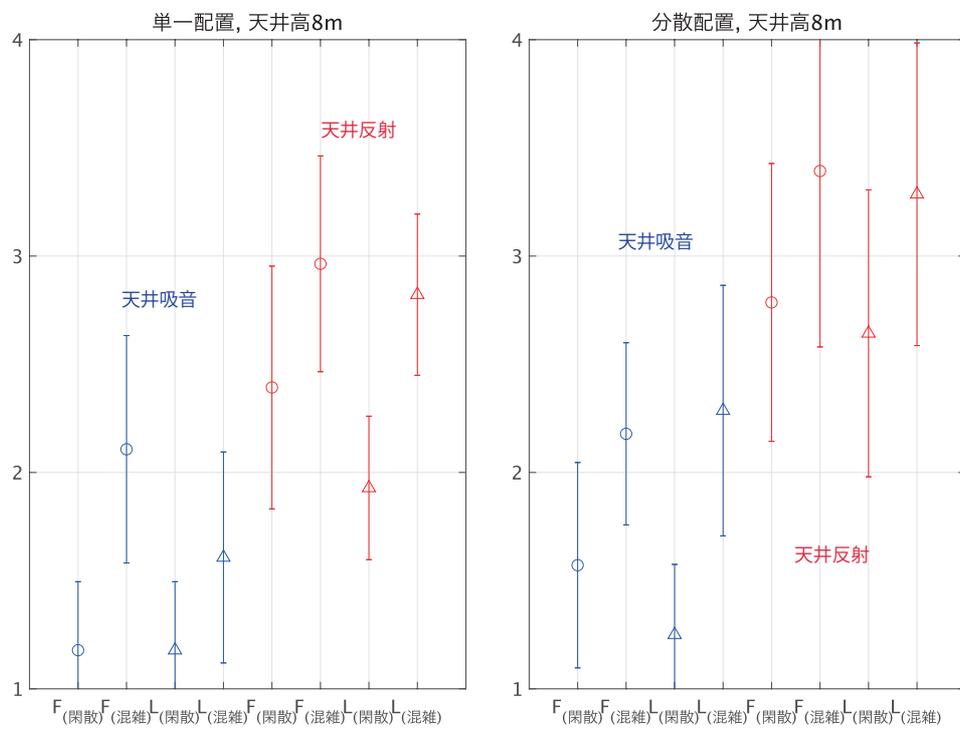


Fig.4.4 「聴き取りにくさ」平均評点(天井高 8m)

●「うるささ」の平均評点

天井高 4m の場合、若干ではあるが単一配置よりも分散配置でうるささが高まっている。本実験では「周囲の音のうるささ」についての評価を行ったが、この「周囲の音」としてアナウンス音の残響が含まれるとみなされ、評価結果に反映されている可能性がある。即ち暗騒音や SN 比のみを考慮するのではなく、アナウンス音の残響等も含む「全体的な音環境のうるささ」を聴くべきであった可能性もある。また、「聴き取りにくさ」でも述べたが、天井高 4m・単一配置では、 U_{50} や C_{50} の傾向にも見られるように有効な初期音の割合が非常に高まる。一方、天井高 8m の単一配置では妨害音の割合が高まり、分散配置との差が縮まる。それを反映し天井高 8m では単一配置と分散配置での評価結果に大きな差が見られなく考えられる。「閑散時」と「混雑時」での差が最も大きく、うるささの評価は基本的に騒音レベルおよび SN 比にしたがっていることがわかる。

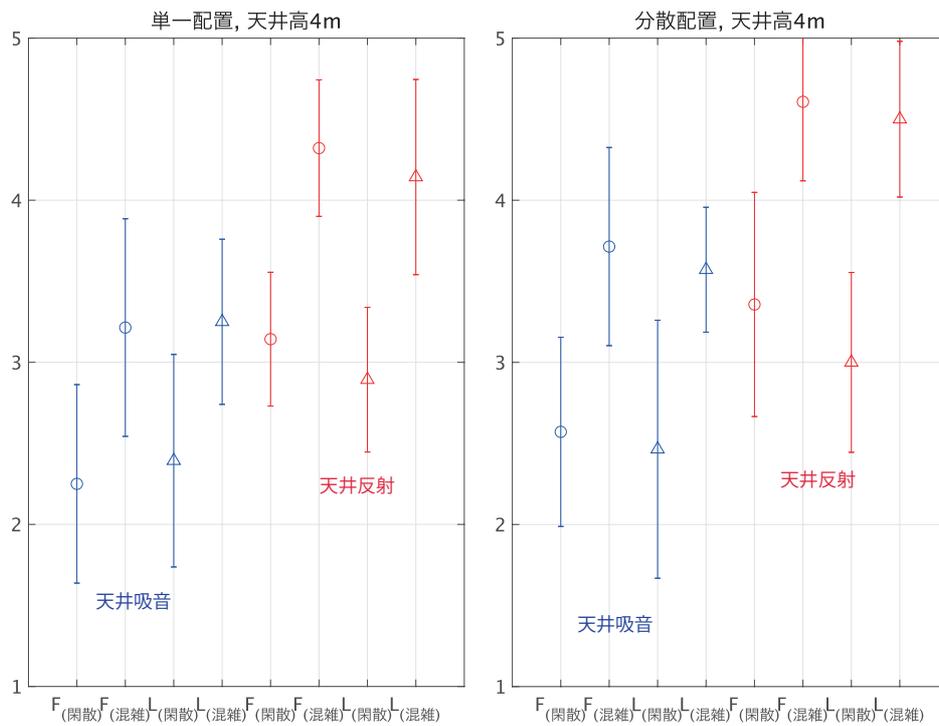


Fig.4.5 「うるささ」平均評点(天井高 4m)

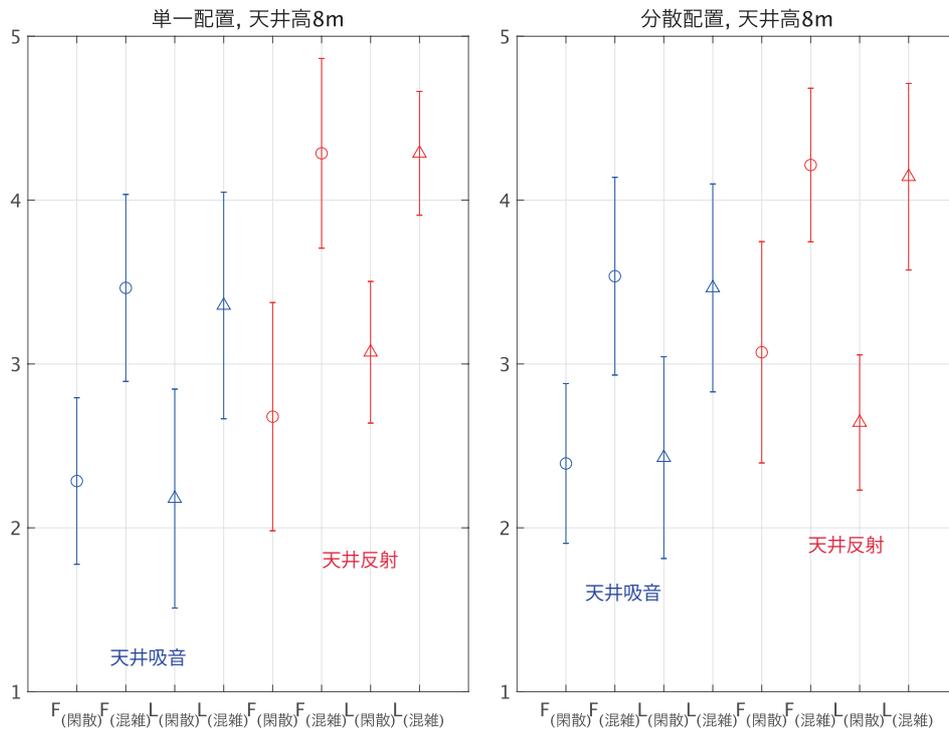


Fig.4.6 「うるささ」平均評点(天井高 8m)

■音声伝送性能のクラス

日本建築学会は、音声による情報伝達が必要な空間に対して、音声伝送性能のクラスを定めている[33]。音声伝送性能のクラスは、「聴き取りにくさ」および「聴き取り間違い」を用いて、4段階に順序づけした尺度であり、空間の用途に応じて必要な伝送性能を表現するものである。1stクラスは、聴き取りにくさを感じない性能であり、音声による情報伝達が空間の重要な性能の一つと位置づけられ、かつ特別の配慮が必要な空間に適用する。2ndクラスは、聴き取りにくさをほとんど感じない性能であり、音声による情報伝達が空間の重要な性能の一つと位置付けられる場合に適用する。3rdクラスは、聴き取りにくさを感じることがあるが、聴き取り間違いは生じない性能であり、音声による情報伝達が空間の性能の一つとして位置付けられる場合に適用する。4thクラスは、聴き取りにくさを感じることがあり、かつ聴き取り間違いが生じ始める性能である。これは音声による情報伝達が空間の一つとして位置付けられるが、残響過多あるいは騒音抑制が困難な場合に適用するものであるとされる。各クラスと「聴き取りにくさ」および「聴き取り間違い」との対応関係は表 4.2 のようになっている。また情報伝達の形態・伝送種別に応じ、表 4.3 に示すクラスを下回らないことが望ましいとされる。カテゴリ I は音声による情報伝達のみが目的であるか、または他の目的を遂行するのに良好な情報伝達が必要不可欠である空間用途に適用するものである。カテゴリ II は I に含まれない空間用途に適用する。本研究で対象とする屋内移動空間は、会話が主目的の空間ではなく、カテゴリ II に含まれると考えられるため、求められる音声伝送性能のクラスは3rd*である。*は、基本的には3rdの条件を下回らないことが望ましいが、残響過多あるいは騒音抑制が困難な条件の場合に、4thの性能となることがやむを得ないことを示している。

Tab.4.2 音声伝送性能のクラスとそれらの位置づけ

クラス	「聴き取りにくさ」	「聴き取り間違い」
1 st	感じない(0~2%)	生じない(0~2%)
2 nd	ほとんど感じない(2~16%)	
3 rd	感じることもある(16~50%)	
4 th		若干生じる(2~5%)

Tab.4.3 音声による情報伝達の形態と伝送種別とに対応する音声伝送性能のクラス

情報伝達形態	伝送種別	クラス	
		カテゴリⅠ	カテゴリⅡ
(1)会話	拡声なし	2 nd	3 rd
(2)スピーチ・講義	拡声なし	2 nd	3 rd
	拡声あり	2 nd	3 rd *
(3)案内放送	拡声あり	2 nd	3 rd *

■「聴き取りにくさ」の割合

森本らが提案した「聴き取りにくさ」の割合[14]は式 4.1 で定義される。最も評価の高い聴き取りにくくはない」以外の回答の合計が全回答数に対して占める割合であり、目指すべき音声伝送性能は「聴き取りにくさ」が 0%の状態であると定義されている。

算出結果を図 4.7-4.8 に示す。屋内移動空間に求められる性能が3rd*であることは既に述べたが、表 4.2 から、これは「聴き取りにくさ」50%以下に相当する。全体的傾向として、天井反射性の場合、単一配置・天井高 4m の L 型を除く全条件で 50%を超えている。また単一配置・天井高 4m の L 型についても辛うじて 50%となっている。本研究で対象とした屋内移動空間のモデルにおいては天井吸音が必須といえる。天井吸音の場合、単一配置・天井高 4m では全て 50%を下回り要求性能を満たしている一方、分散配置・天井高 4m と単一配置・天井高 8m、分散配置・天井高 8m では、混雑時の全条件で聴き取りにくさが 50%を上回っている。これらの空間においては天井を吸音するだけでは不十分で、アナウンス音のパワーレベルを上げることが必要である可能性が高い。本研究での設定「受信点で A 特性音圧レベル 65dB」から段階的に上げていく検討も必要であると考えられる。特に混雑時には暗騒音レベルの影響を鑑みて音量を上げる必要がある。しかしながら、特に若齢者に対しては音量を上げすぎるとかえって不快となることも報告されている[19]ため、この点を考慮して検討を行っていく必要がある。形状による比較では F 型よりも L 型で聴き取りにくさが低くなっている場合が多いものの、単一配置・天井高 4m の一部条件では評価が逆転していた。暗騒音そのものの明瞭性など、何か別の要因が影響していた可能性もある。

$$LDR = \left(1 - \frac{n_1}{N} \right) \times 100 [\%] \quad (4.1)$$

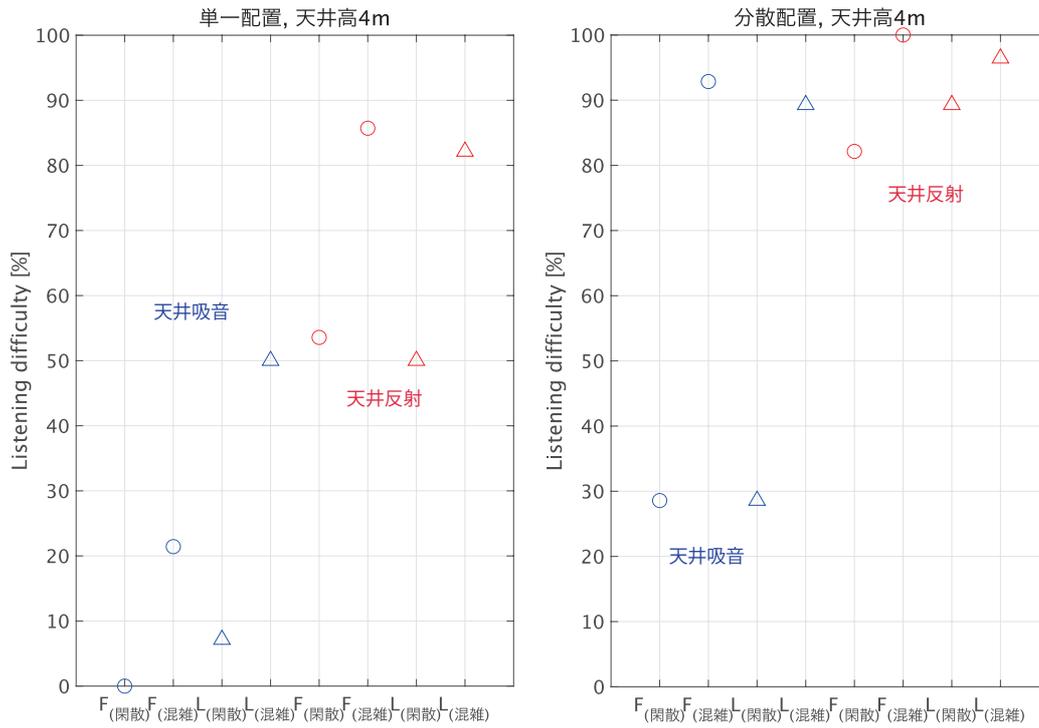


Fig.4.7 「聴き取りにくさ」の割合(天井高 4m)

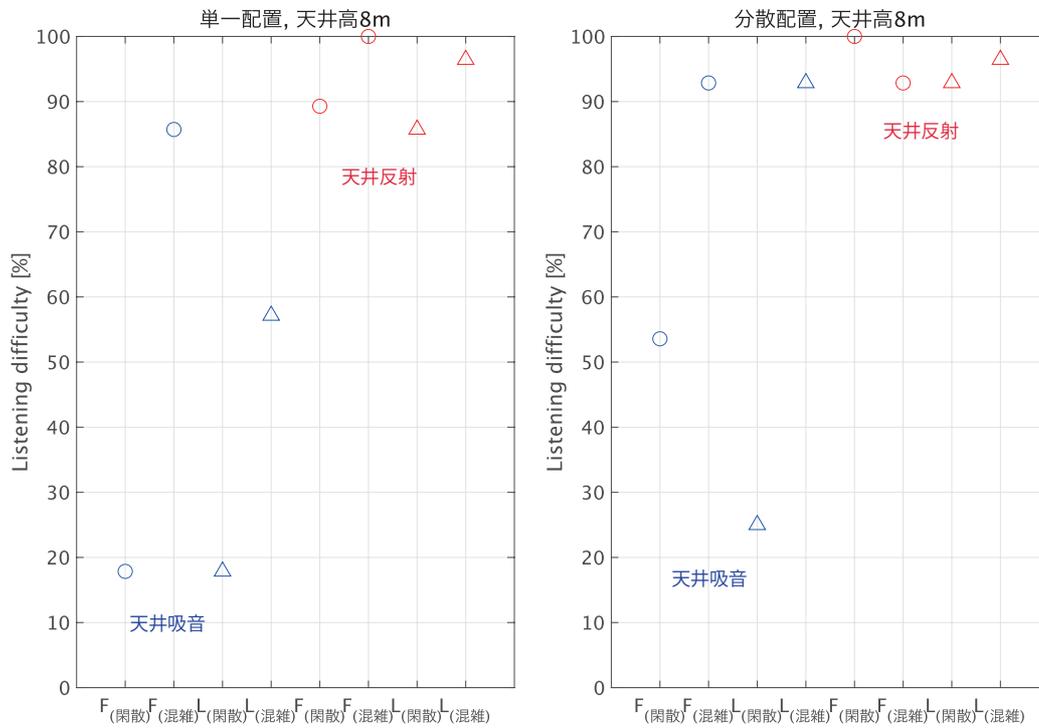


Fig.4.8 「聴き取りにくさ」の割合(天井高 8m)

4.2.2 物理量と心理量の対応

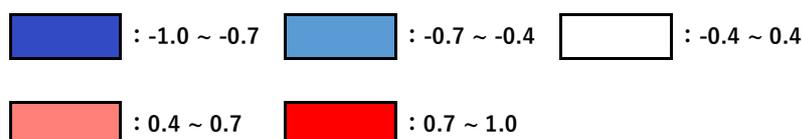
■平均評点との対応

評価語と物理量との対応関係を確認するため、32条件の音場に対する平均評点と各物理指標との相関係数を算出した。相関係数を表4.4に示す。また、散布図を図4.9-20に示す。「聴き取りにくさ」は暗騒音のレベルや、アナウンス音のレベルと暗騒音のレベルとのSN比を用いて評価されることが多い。また、残響時間は響きの評価によく用いられる。「聴き取りにくさ」の平均評点とこれらの物理量および、明瞭度指標である D_{50} ・ C_{50} ・ U_{50} との対応関係を確認したところ、いずれも負の相関が確認された。特に U_{50} とは強い相関が確認された。天井吸音条件では U_{50} が高いため全体的にグラフの右寄り、反射性条件では U_{50} が低いため左寄りとなっている。単一配置・分散配置方式での傾向の差は見られなかった。聴き取りにくさの予測や評価の際には、一般的に用いられているSN比や騒音レベルだけでなく響きも考慮した指標として、 U_{50} が有用な指標であることが示されたといえる。本研究で新たに設定した分散配置方式についても、単一配置方式と同様に予測できる可能性が高く、電気音響設備を含めた音環境の評価に用いることができる指標といえる。SN比・暗騒音レベル・ C_{50} ・ U_{50} との相関はいずれも同程度であった。また、SN比や暗騒音レベルとの比較のため、アナウンス音(S)と暗騒音レベル(N)を合成したS+Nと聴き取りにくさとの相関係数も算出したが、大きな差は見られなかった。「うるささ」については暗騒音レベルとの強い相関が確認された。またSN比・S+Nとの対応についても同様に強い相関が確認された。

Tab.4.4 「聴き取りにくさ」および「うるささ」平均評点と物理量の相関係数

	D50	C50	U50
聴き取りにくさ	-0.69	-0.72	-0.94
	T20	T30	Sabine
聴き取りにくさ	0.58	0.54	0.54
	N	S+N	SN
聴き取りにくさ	0.71	0.70	-0.71

	N	S+N	SN
うるささ	0.96	0.97	-0.96



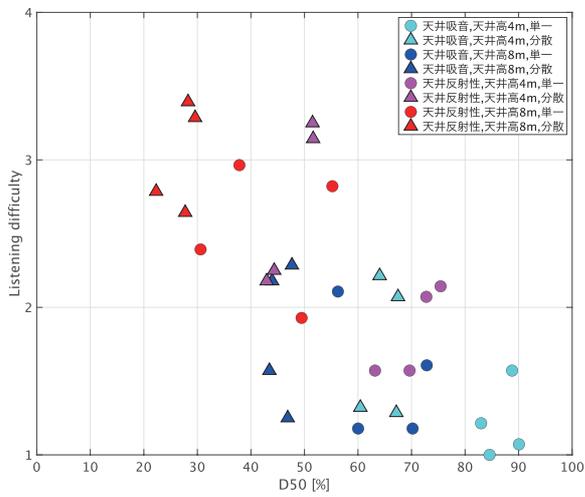


Fig.4.9 D50 と「聴き取りにくさ」

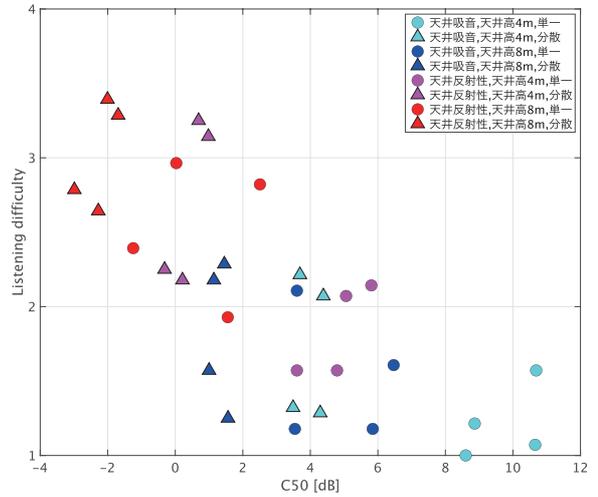


Fig.4.10 C50 と「聴き取りにくさ」

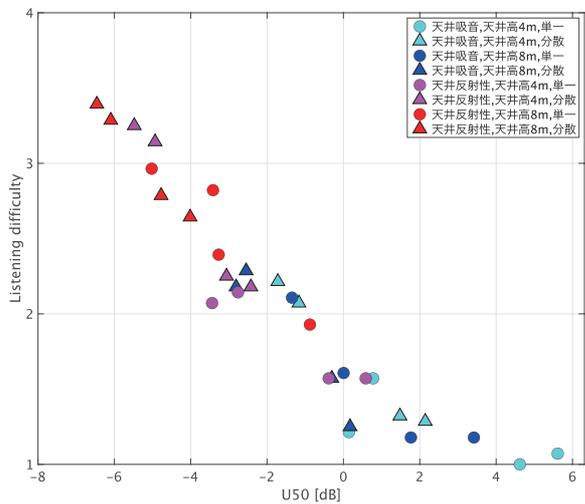


Fig.4.11 U50 と「聴き取りにくさ」

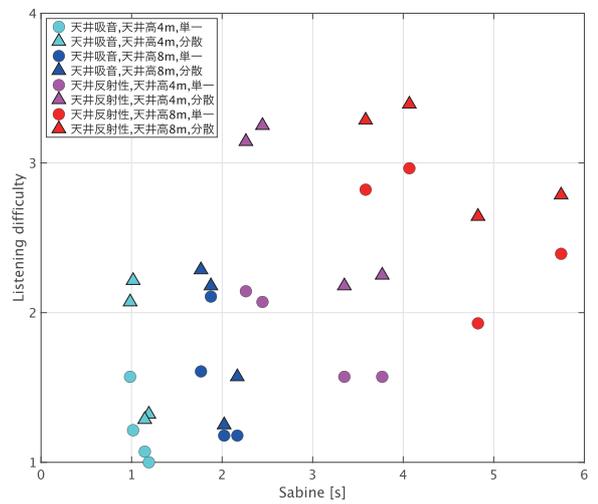


Fig.4.12 T(Sabine)と「聴き取りにくさ」

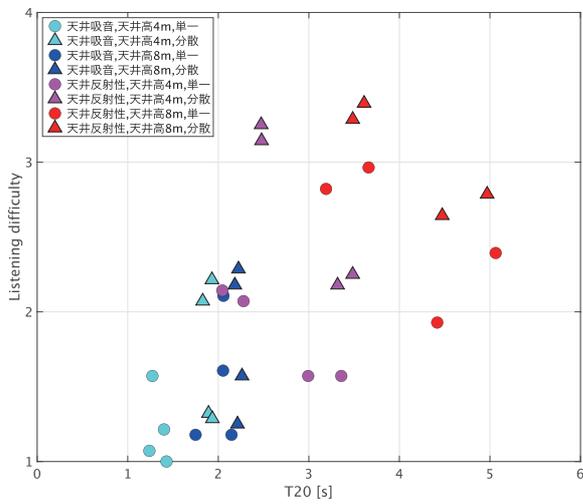


Fig.4.13 T20 と「聴き取りにくさ」

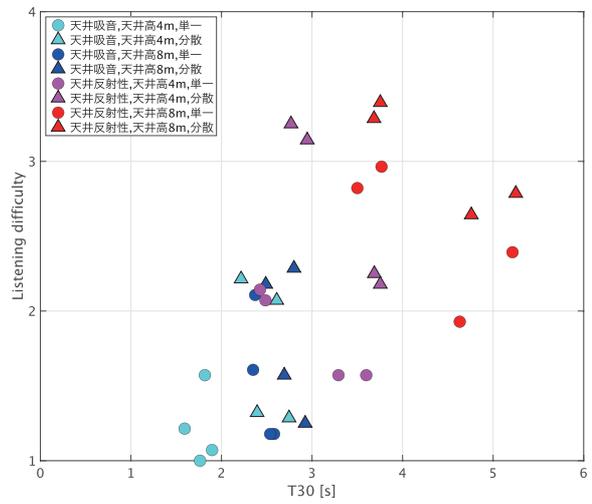


Fig.4.14 T30 と「聴き取りにくさ」

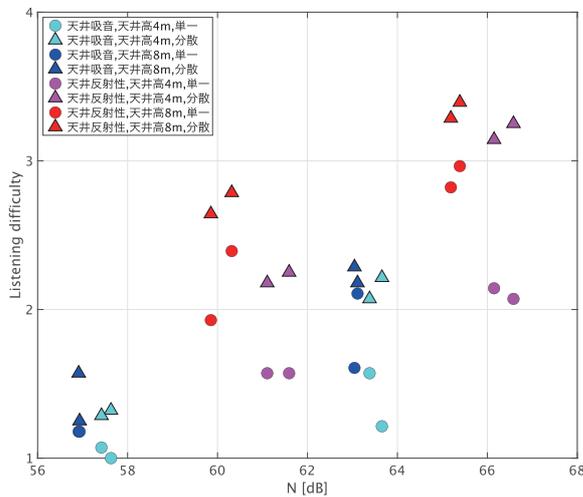


Fig.4.15 N と「聴き取りにくさ」

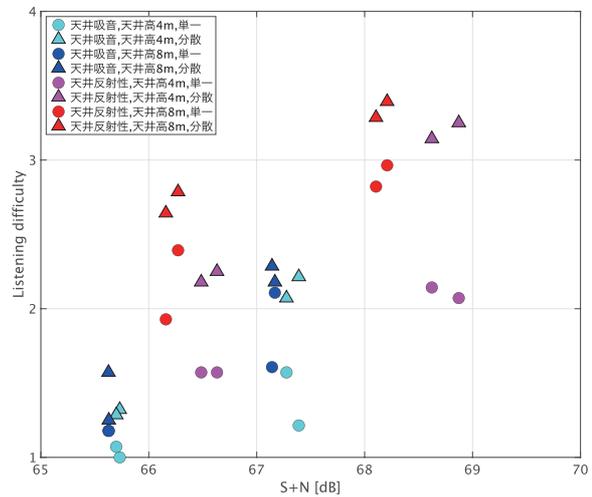


Fig.4.16 S+N と「聴き取りにくさ」

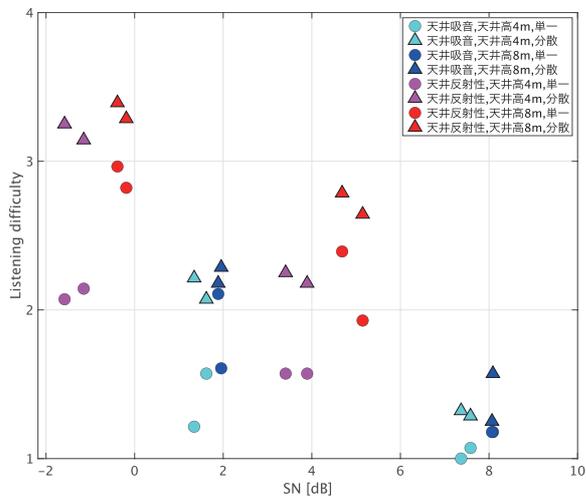


Fig.4.17 SN 比と「聞き取りにくさ」

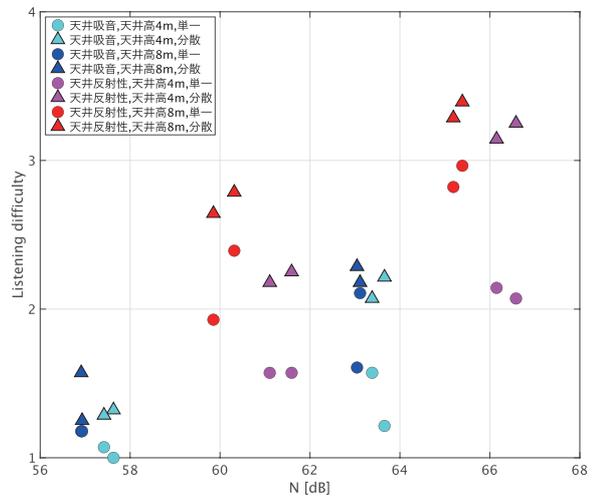


Fig.4.18 N と「うるささ」

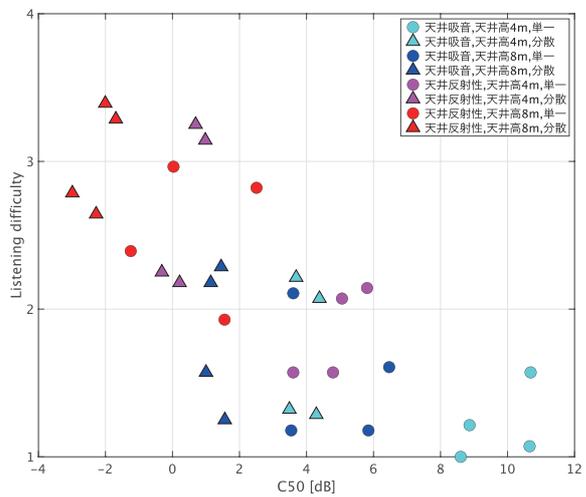


Fig.4.19 S+N と「うるささ」

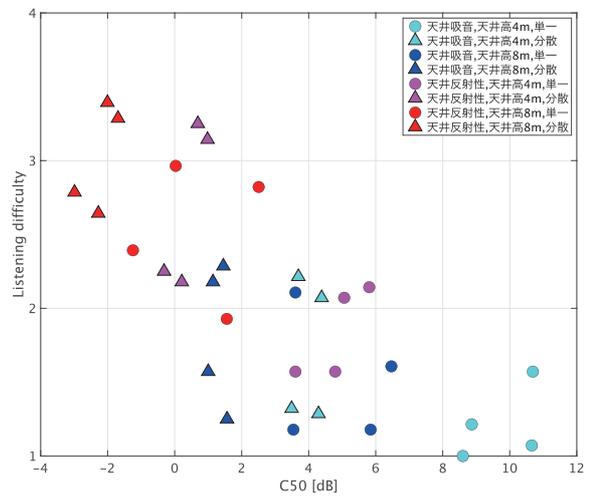


Fig.4.20 SN 比と「うるささ」

■ 「聴き取りにくさ」の割合および z 値との対応

「聴き取りにくさ」の平均評点と最も強い相関が確認できた U_{50} について、「聴き取りにくさ」の割合 (LDR) およびその z 値との対応を確認した。 z 値の算出は式 4.2-4.3 にしたがった[33]。 z 値を用いた場合、 U_{50} との関係は線形になるとされる[19]。したがって線形回帰式を算出した。相関係数 r は -0.90 と非常に強い相関がみられ、聴き取りにくさの z 値と U_{50} との対応はよいことが確認された。図 4.20 では U_{50} が負となると聴き取りにくさの割合が非常に高まっていることが伺える。既往文献[33]では z 値が 0 のとき聴き取りにくさの割合が 50% になるとされる。したがって屋内移動空間に要求される音声伝送性能のクラス 3^{rd*} を満たすためには z 値が負となることが必要で、それを満たす U_{50} の値は図 4.22 の線形回帰式から 0.52 以上である。しかしこれは 4^{th} とそれを下回る「クラスなし」との境界値であり、満たすべき最低限の性能であることに留意する必要がある。

$$z = -\sqrt{-\frac{\pi}{2} \log_e \left(\frac{4y}{100} \left(1 - \frac{y}{100} \right) \right)} \quad (0\% < y \leq 50\%) \quad (4.2)$$

$$z = \sqrt{-\frac{\pi}{2} \log_e \left(\frac{4y}{100} \left(1 - \frac{y}{100} \right) \right)} \quad (50\% \leq y < 100\%) \quad (4.3)$$

ただし、

y : 「聴き取りにくさ」の割合[%]

z : 「聴き取りにくさ」の z 値

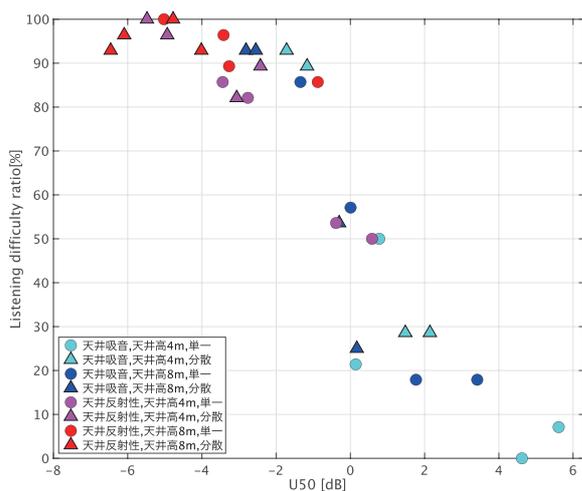


Fig.4.21 U50 と LDR[%]

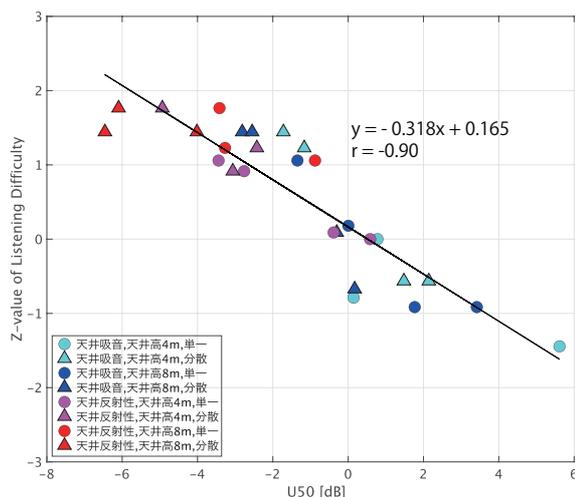


Fig.4.22 U50 と聴き取りにくさの z 値

第 5 章

総括

本章では本研究で得られた成果をまとめ、今後の課題について述べる。

本論文のまとめ

第 1 章では、屋内移動空間の聴取環境を評価するにあたり、公共空間の音環境の現状について概説した。一般に公共空間の音環境は残響過多・騒音過大となる傾向があり、それらの抑制に向けて吸音対策が必要であることを述べた。また、関連する既往研究を紹介し、屋内移動空間の評価にあたって新たに考慮すべき項目を述べ、吸音に関連するスピーカ配置方式や利用者密度(混雑度)などについて現実的な想定をしたうえで、吸音効果についての知見を得ることを目的に研究を行うことを述べた。

第 2 章では、本研究で用いる数値解析手法と音場再生手法について述べた。第 1 節では数値解析手法と音場再生手法について簡単に説明を行い、本研究で用いる音線法と 6 チャンネル再生システムの概要を述べた。第 2 節では音線法の具体的な計算方法を述べ、第 3 節では 6 チャンネル再生システムの概要と再生系の具体的な仕様について述べた。第 4 節では音線法に基づいた 6 チャンネル再生にあたって考慮すべき指向性と位相について述べた。

第 3 章では屋内移動空間を想定したシミュレーションについて述べた。第 1 節では屋内移動空間の音環境の現状と、シミュレーションにおける基本的パラメータについて述べた。第 2 節では具体的な屋内移動空間モデルの設定および根拠を述べた。第 3 節では本研究における検討項目となる各種物理指標を概説したのち、その算出結果および考察を述べた。本研究での設定に基づく暗騒音レベル算出結果は屋内移動空間における実測値と概ね対応していること、天井を吸音しない場合には音環境が非常に劣悪となること、またスピーカを分散配置とした場合には単一配置の場合に比べ U_{50} などの明瞭度指標が低下することを述べた。

第 4 章では 6 チャンネル再生システムを用いた被験者実験および結果と考察について述べた。第 1 節ではシミュレーションで設定したモデルの音場と聴感印象との対応関係を明らかにすることを目的として主観評価実験を行うことを述べたのち、実験内容・実験音源・評価方法について述べた。第 2 節では実験結果と考察を述べたのち、実験結果に基づく分析について述べた。実験結果に対する六元配置分析を行った結果、いずれの要因も主効果が有意となった。また聴き取りにくさの平均評点と U_{50} の傾向は概ね対応していた。音声

伝送性能のクラスに基づく「聴き取りにくさ」の割合についての分析では、天井が反射性の場合にはほとんどがクラス4thを下回ることから、屋内移動空間に求められる性能を満たさないことを述べた。また天井を吸音していても性能を満たさないものがあることを述べた。物理量と心理量の対応関係について相関係数を算出した結果、特に U_{50} と聴き取りにくさ、および聴き取りにくさの割合・z値とに強い相関が確認された。そこで U_{50} とz値との直線回帰式を算出し、屋内移動空間が最低限満たすべき U_{50} の条件について述べた。全体として、本研究で新たに設定したスピーカの分散配置条件を含め、 U_{50} は聴き取りにくさの評価に非常に有効な指標であることが示唆された。

今後の課題

本研究では、前述の通り屋内移動空間を想定した幾何音響解析に基づくシミュレーションを行い、物理指標を算出したのち、聴感印象を主観評価実験によって確認した。物理指標が示す傾向同様、吸音が不足した場合やスピーカを分散配置とした場合には聴き取りにくさ・うるささの評価値が上昇すること、また U_{50} はスピーカの分散配置条件など、電気音響システムも含めた音声伝送性能評価に有用であることが示唆された。今後の課題として、本研究では受音点におけるアナウンス音の音圧レベルを固定しており、より音圧レベルを上げた場合の聴感印象評価を行なっていく必要があると考えられる。その際、アナウンス音の音圧レベルを上げすぎると不快な音環境となることに留意したうえで、適切なレベルを探ることが必要であると思われる。また本研究では屋内移動空間の中でも比較的小・中規模な空間のみを対象としたため、より大規模な空間における分散配置方式についての検討も行っていくことが求められると考える。

参考文献

- [1] 伊積康彦, 藤井光治郎, 岩瀬昭雄, 駅コンコースの音環境に関する実態調査と主観評価実験, 日本建築学会環境系論文集 第76巻 第660号, pp.115-124, 2011
- [2] 伊積康彦, 石突光隆, 駅コンコース案内放送の明瞭度向上手法, 鉄道総研報告 Vol.27 No.6, pp.49-54, 2013
- [3] 伊積康彦, 駅の音環境評価に関する研究, 新潟大学博士論文, 2011
- [4] 大西豊, 森本政之, 佐藤逸人, 空港旅客ターミナルにおけるアナウンスに対する暗騒音の音響特性, 神戸大学大学院工学研究科・システム情報学研究科紀要 第2号, pp.20-27, 2010
- [5] 大西豊, 森本政之, 佐藤逸人, 地下鉄構内におけるアナウンスに対する暗騒音の音響特性, 神戸大学大学院工学研究科・システム情報学研究科紀要 第1号, pp.29-35, 2009
- [6] 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 Vol.23 No.4, pp.238-242, 1999
- [7] 橘秀樹, 公共空間の音環境のあり方, 騒音制御 Vol.23 No.4, pp.205-210, 1999
- [8] 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, pp.228-231, 1999
- [9] 辻村壮平, 高齢者に対応した鉄道駅の案内放送, 日本音響学会誌 73巻 5号, pp.311-318, 2017
- [10] 横山栄, 橘秀樹, 公共空間における音環境の評価, 騒音制御 Vol.30 No.6, pp.477-481, 2006
- [11] 星野知栄, 上野佳奈子, 横山栄, 橘秀樹, 公共空間における拡声放送の了解性に関する主観評価実験, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.349-350, 2011
- [12] 西村祐希子, 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, 東京大学修士論文, 2014
- [13] 兪凡, 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, 東京大学修士論文, 2019
- [14] 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 63巻 5号, pp.275-280, 2007
- [15] 西村竜一, 坂本修一, 苜木 禎史, 崔 正烈, 防災行政無線屋外拡声レベルのU50に基づく最適設計, 電気情報通信学会技術研究報告 EA2017-146, pp.245-250, 2018
- [16] 佐藤洋, 音声伝達研究の新しい動き, 日本音響学会誌 60巻 3号, pp.141-146, 2004
- [17] 川田一貴, 空港の旅客ターミナルビルにおける拡声放送設備について, 電気設備学会誌 Vol.27 No.5, pp.359-362, 2007
- [18] 翁長博, 池田哲朗, 騒音・残響音場における最適聴取レベルに関する検討, 日本建築学会環境系論文集 第74巻 第635号, pp.9-15, 2009
- [19] 佐藤逸人, ユニバーサルデザインを考慮した音声伝送性能に関する研究, 神戸大学博士論文, 2008
- [20] 音響技術 No.129 Vol.34 No.1, 2005
- [21] 竹下圭吾, 室内インパルス応答の反射音構造の分析評価に関する研究, 東京大学修士論文, 2014
- [22] 杉原慎一郎, 壁面の拡散性を考慮した幾何音響シミュレーション-乱反射率の入射角依存性の反映-, 東京大学修士論文, 2010

- [23] 佐久間哲哉, 吸音設計に関する基準設定の方向性について -DIN 18041 に関する考察-, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (環境工学 1), pp.325-328, 2020
- [24] 佐藤孝二, 子安勝, 人および椅子の吸音力について, 日本音響学会誌 14 卷 3 号, 1958
- [25] 下山達志, 市川隼, 小野美月, 羽生敏樹, 星和磨, 吸音が偏在した矩形室における残響減衰性状の 1/10 縮尺模型実験による検討 その 1 吸音偏在パターンと残響減衰の関係, 日本大学理工学部 学術講演会, 2017
- [26] 矢野隆, 五十嵐寿一, 加来治郎, 神田一伸, 金子哲也, 桑野園子, 新居洋子, 佐藤哲身, 荘美知子, 山田一郎, 吉野泰子, 騒音の社会反応の測定方法に関する国際共同研究-日本語のうるささの程度表現語の妥当性と質問文の作成-, 日本音響学会誌 58 卷 3 号, pp.165-172, 2002
- [27] 白井君男, 神田幸彦, 日本語における会話音声の音圧レベル測定, Audiology Japan 53, pp.199-207, 2010
- [28] 熊谷直登, 浅倉政隆, 長内傑, 竹林健一, 矢入幹記, 飯田一博, 妨害音の到来方向およびタスクの種類が作業のしにくさに及ぼす影響, 日本音響学会講演論文集, pp.1094-1096, 2014
- [29] 永田穂, 響きのパラメータと音響設計, 計測と制御 第 36 卷 第 12 号, pp.846-852, 1997
- [30] 羽生敏樹, インパルス応答から求める室内音響指標, 日本音響学会誌 69 卷 6 号, pp.291-296, 2013
- [31] 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
- [32] 日本建築学会 編, 建築の音環境設計, 彰国社, 2000
- [33] 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, 丸善出版株式会社, 2011
- [34] 李孝珍, 菅原彬子, 坂本慎一, 池田佳樹 駅コンコースにおける音環境調査および案内放送の聞き取りにくさに関する検討, 日本音響学会建築音響研究委員会資料 AA2018-08, 2018
- [35] 前川純一, 森本政之, 坂上公博, 建築・環境音響学 第 3 版, 共立出版, 2011

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、佐久間哲哉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に取り組むにあたっての姿勢や研究内容、言葉遣いや表現方法など、様々な面からのご指導を頂きました。厳しくも熱意あるご指導で筆者の至らない点を正してくださいました。心より感謝いたします。

副指導教員である同専攻・小崎美希准教授には、筆者が見落としていた新たな視点からのご指摘をいただきました。深く感謝いたします。

佐久間研究室特任助教であった前橋工科大学の井上尚久講師には、研究方法に関する様々なご指導をいただきました。心より感謝いたします。

佐久間研究室の先輩である山崎泰知さんには普段の研究室生活から具体的研究内容に至るまで様々なアドバイスをいただきました。また兪凡さん、孔敬受さん、劉金雨さん、曹達さんにも数多く相談に乗っていただきました。ありがとうございました。

同期の中津成博さん、那須瑞早さん、田主望さんとはことあるごとに励まし合い、助け合って過ごしてきました。沢山のアドバイスをいただき、日々の相談にも乗っていただき、研究を進めていくうえで大きな支えとなりました。ありがとうございました。

後輩の廣瀬量子さん、船津出帆さん、嶋崎駿介さん、石田肇さん、深田竜岐さん、研究生の朴荘熙さんも私の研究生生活を支えてくださいました。感謝いたします。

最後に、私の学生生活を支えてくれた家族と友人に心より感謝申し上げます。

2021年1月18日
土屋 洵

発表論文一覧

修士論文梗概

本研究以外の発表論文

土屋洵，佐久間哲哉：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，日本建築学会大会学術講演梗概集（環境工学1），pp. 301-302, 202

屋内移動空間の音場シミュレーションに基づく拡声放送の聴取環境評価

Evaluation of Speakers in Indoor Pedestrian Spaces Using Sound Field Simulation

学籍番号 47196738

氏名 土屋 洵 (Jun, Tsuchiya)

指導教員 佐久間 哲哉 教授

1. はじめに

1.1. 研究背景

公共空間では、耐火性やメンテナンス性を優先し音を反射しやすい材料が使われることが多い。加えて大空間であることも多く、残響過多となる傾向がある。また、駅・空港のコンコース等、多数の旅客やスピーカが存在する公共空間では、喧騒感が高まりやすい。こうした状況下では利用者の快適性が損なわれることに加え、音情報の伝達が困難となり、快適性や非常時における安全性が損なわれる。残響や喧騒感を抑制し、音環境を改善するためには、適切な吸音処理が必要であるが、その具体的な予測法など未だ未整備の部分も多く、吸音の重要性が十分に認知されているとは言い難い。

1.2. 研究目的

そこで本研究では、空港や駅の内部空間を「屋内移動空間」と定義し、その音環境改善に資する知見を得ることを目的に、吸音を行う室のパラメータおよび具体的な吸音効果と、それらが聴感に与える印象について検証を行う。

1.3. 研究概要

本研究では、屋内移動空間の拡声放送の聴取環境評価についての検討として、いくつかの現実的な室条件を設定し、幾何音響解析によって各種物理指標を算出した。ま

た無響室内の 6ch 音場再生系によって各音場を再現し、主観評価実験によって聴感印象を確認した。また物理指標と聴感印象との対応関係を分析した。

2. 研究手法

2.1. 解析手法

本研究では大空間の音環境を対象とするため、幾何音響解析(音線法)を用いた。音線法とは図 1 に示すように、音源からエネルギーをもつ多数の音線を放出、それらを追跡し、受音点に到来するエネルギーの分布をインパルス応答として求める手法であり、これが響きの情報を持つ。諸条件のインパルス応答から室内音響指標を算出した。

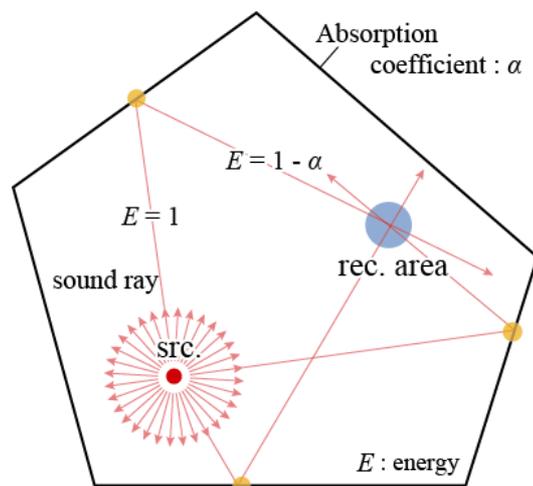


Fig.1 幾何音響解析 (音線法)

2.2. 音場再生手法

再生には図 2 に示す 6ch 音場再生システムを用いた。無教室内に設置された 6 台のスピーカから各方向に対応する音源を再生することで、中央の受聴位置で 3 次元音場が再現される。

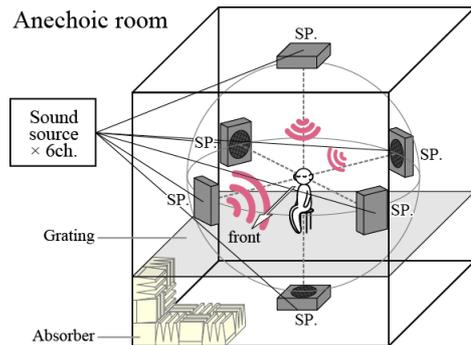


Fig.2 6ch 音場再生系

3. 幾何音響解析によるシミュレーション

3.1. 解析条件

空間寸法 既往文献に示されるターミナル駅のコンコース・通路の寸法を参考に決定した。形状による音響特性の違いを把握するため、20m×30m の扁平な空間(F 型)、床面寸法 10m×60m の細長い空間(L 型)の 2 条件を設定し、天井高は 4m・8m とした。

音源モデル 駅コンコース・通路等の主な背景騒音として利用者の話声が考えられる。そこで混雑度を考慮した 2 種類の利用者密度：閑散時(0.01 人/m²)、高密度(0.04 人/m²)を設定し、グリッド中心、高さ 1.5m に点音源群を配置した(図 3)。受音点は室平面の中心、高さ 1.5m とした。案内放送用のスピーカは単一配置・分散配置を想定した点音源を受音点の真上および 10m 間隔のグリッド中心、天井に配置した。指向係数は 2 とした。配置図を図 3-4 に示す。音量は話声について普通会話程度の A 特性パワーレベル

68dB とし、アナウンス音については現場で可変なものであることを踏まえ、全条件で受音点での A 特性音圧レベルが 65dB となる設定とした。

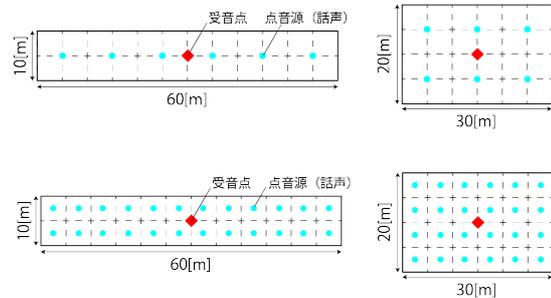


Fig.3 話声平面配置(上：閑散 下：混雑)

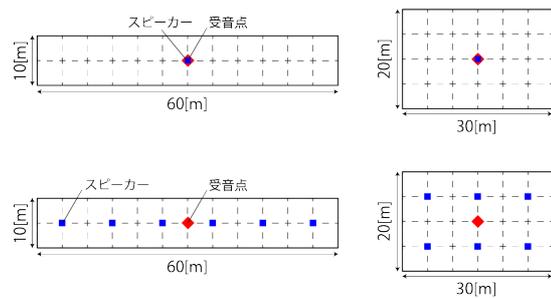


Fig.4 スピーカ配置(上：単一 下：分散)

吸音設定 既往文献に示される駅空間の吸音材・吸音率を参考に、周波数特性を反映した吸音率を室内の各面に与えた。天井は岩綿吸音板・ボード類の 2 条件とし、壁面はボード類とした。床面はタイルとしたが、低密度・高密度それぞれの条件に対し、人の吸音面積を等価的に与えた。

3.2. 解析結果・考察

音声明瞭度 C₅₀・U₅₀ 比較

以上の設定に基づく 32 条件の音場について幾何音響解析によるシミュレーションを行い、物理指標を算出した。C₅₀・U₅₀ は音声伝達性能評価に用いられる指標であり、いずれもインパルス応答の、直接音到来から 50ms までの初期音エネルギーを明瞭度に貢

献する有効音、それ以降の後期反射音エネルギーを妨害音とみなしているが、 U_{50} ではさらに妨害音として背景騒音のエネルギーを考慮している。いずれも(有効音)/(妨害音)比率のdB値として算出する。算出結果を図5-6に示す(h:天井高)。 U_{50} は前述の関係から全体的に C_{50} よりも低い値となっている。また分散配置方式では残響エネルギーの増加によって妨害音の割合が上昇するため、 $C_{50} \cdot U_{50}$ ともに、単一配置よりも低い値となっている。天井吸音による U_{50} の改善は単一配置・分散配置で同程度である。 U_{50} が0dBとなる時、アナウンス音を聴取する者の50%

「聴き取りにくい」という評価をするとされるが、天井反射性ではほとんどの条件で U_{50} が0dBを下回っている。また混雑時の条件では、天井吸音を行なっても U_{50} が負となる場合があり、受音点でのアナウンス音のA特性音圧レベル65dBでは不足していることを示唆している。室の平面形状による比較では、F型よりもL型で $C_{50} \cdot U_{50}$ が高くなる傾向があるが、L型では短手方向の一次反射音が明瞭度を補強する有効音(50ms以内)となるためと考えられる。

4. 主観評価実験

室寸法、吸音設定、話者密度、スピーカ配置をパラメータとした32条件の音場を各2回計64回、各々20秒間被験者に提示し、アナウンス音の「聴き取りにくさ」(4段階)、周囲の音環境の「うるささ」(5段階)を評価させた。被験者は20-30才代の男女16名である。評価尺度を図7に示す。

4.1. 実験結果および考察

「聴き取りにくさ」の平均評点を図8-9に、「うるささ」の平均評点をFig.10-11に示す。天井吸音よりも天井反射性条件で「聴き取りにくさ」が増大しており、スピーカ単一配置よりも分散配置で同様に増大している。この傾向は U_{50} と対応している。「うるささ」は混雑度や天井吸音の有無によって変化する背景騒音レベル・SN比に基本的に対応している傾向がある。「うるささ」の単一配置・分散配置での比較では、SN比は背景騒音のみで決まるため、スピーカ配置によらず同じ値となるにもかかわらず、分散配置で若干の上昇がみられる。これはスピーカの増台に伴って増加した残響の影響によるものと考えられ、「周囲の音」にアナウンス音も含めた評価がなされた可能性がある。

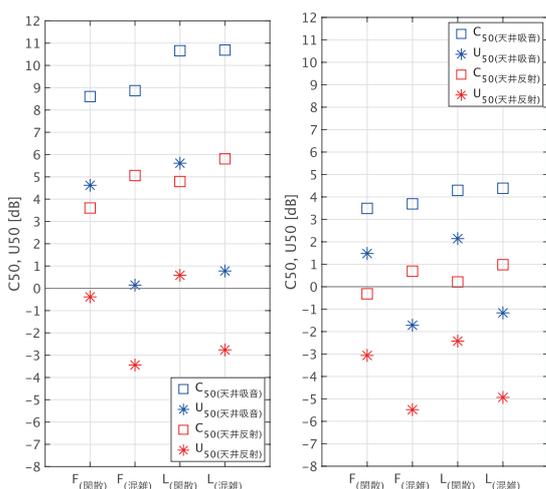


Fig.5 C_{50} , U_{50} (h=4m, 左:単一,右:分散)

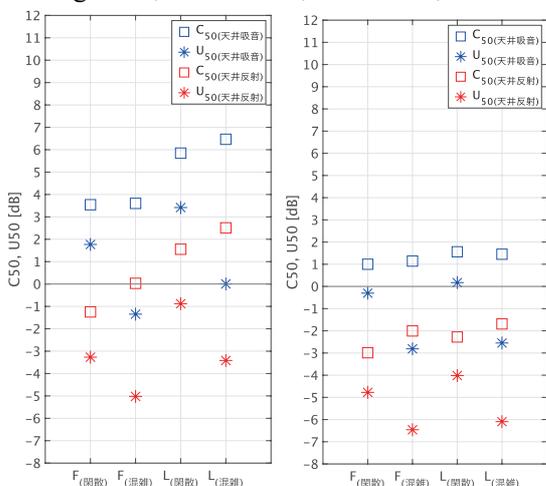


Fig.6 C_{50} , U_{50} (h=8m, 左:単一,右:分散)

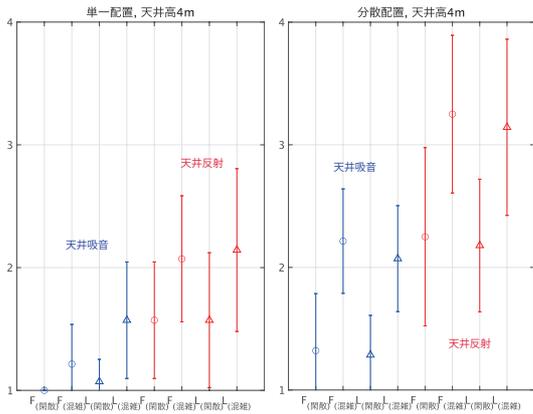


Fig.7 「聞き取りにくさ」平均評点(h=4m)

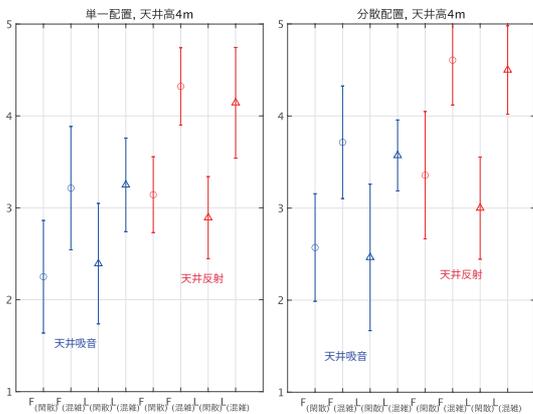


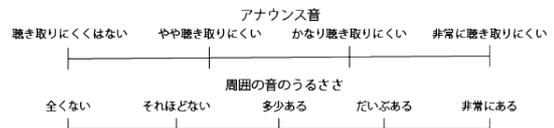
Fig.8 「うるささ」平均評点(h=4m)

4.2. 実験結果に基づく分析

主観評価実験の結果と、幾何音響解析のインパルス応答により算出した物理指標との対応関係を確認するため、32条件の音場に対する平均評点との相関係数を算出した。結果を表1に示す。「うるささ」は背景騒音のレベルおよびSN比との強い相関があった。「聞き取りにくさ」は各種物理指標との相関がみられたが、 U_{50} と最も強い相関があった。少しでも「聞き取りにくい」と評価した回答が全回答数に占める「聞き取りにくさ」の割合を求め、z値に変換したうえで直線回帰式を算出した(図9)。「聞き取りにくさ」の平均評点同様、z値と U_{50} との対応はよく、回帰式を用いてz値が予測できる。分析を通し、スピーカの分散配置や話者混

雑度合いなど様々なパラメータに対する音場を評価する指標として U_{50} が有効であることが示唆された。

Tab.1 アナウンスおよび音環境の評価尺度



Tab.2 物理量と心理量の相関係数

	D50	C50	U50
聞き取りにくさ	-0.69	-0.72	-0.94
	T20	T30	Sabine
聞き取りにくさ	0.58	0.54	0.54
	N	S+N	SN
聞き取りにくさ	0.71	0.70	-0.71

	N	S+N	SN
うるささ	0.96	0.97	-0.96

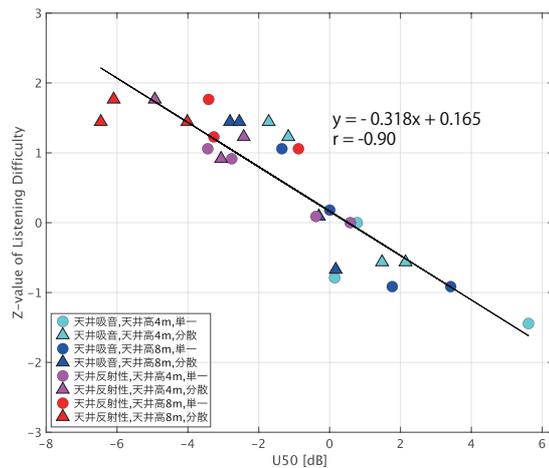
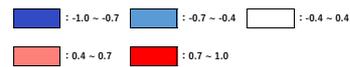


Fig.9 「聞き取りにくさ」z値と U_{50} の関係
おわりに

天井吸音により単一配置・分散配置で同程度の音環境改善効果がみられること、 U_{50} は分散配置も含めた聞き取りにくさの予測に有効な指標であることが示された。本研究では、「聞き取りにくさ」に大きく影響すると考えられるアナウンス音のレベルの段階的検討には踏み込めなかったため、今後の検討が望まれる。

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

正会員 ○土屋 洵*
正会員 佐久間 哲哉**

コンコース 吸音 騒音
音声伝送 音線法 主観評価

1. はじめに

空港や駅のコンコースには、多数の旅客やスピーカが存在するため、喧騒感が高まりやすい。また、メンテナンス性や耐火性のため、比較的音を反射しやすい材料が使われることも多く、残響過多となる可能性がある。こうした状況下ではアナウンス音が聴き取りづらく、快適性が損なわれることに加え、非常時には安全性の確保が困難となる場合がある。

残響や喧騒感を抑制するためには、壁面や天井の吸音処理が必要となる。コンコースにおける吸音処理効果は実測調査によってある程度確認されているが、音響設計の指針に向けては、吸音材の配置位置や空間の大きさ、およびそれらが聴感印象に及ぼす効果についての検証も必要であると考えられる。

本報では、アナウンス聴取と空間内の吸音処理の関係についての基礎的な検討として、幾何音響解析に基づく可聴化シミュレーションシステムにより空港コンコースの音環境を再現し、室寸法、音源および吸音の設定が異なる条件の聴感印象を主観評価実験によって確認した。

2. 可聴化シミュレーションシステムの概要

可聴化シミュレーションシステムは、音線法に基づく幾何音響解析と、無響室内の6ch音場再生系から構成される(Fig. 1)。各々の音源位置に対して受音点におけるカーディオイド特性を持つ6方向のインパルス応答を算出し、ドライソースを畳み込んだ上で、全ての音源を重ね合わせて再生用音源信号を生成した。なお、幾何音響解析では空気吸収と境界全面に乱反射率0.1を与えている。

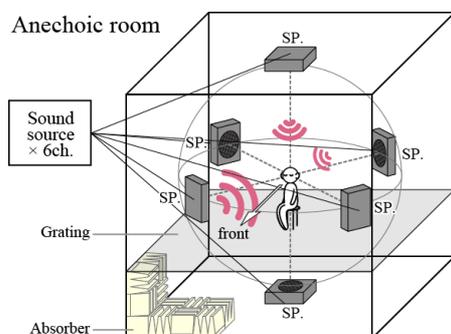


Fig. 1 6ch 音場再生系

空間寸法 拠点空港の大規模コンコースを想定し、床面20m×100mの矩形室とし、天井高は10m、20mの2パターンとした。

音源モデル 空港の音環境の主な背景騒音として利用者の話声を想定し、低密度(0.01人/m²)、高密度(0.04人/m²)のグリッド中心、高さ1.5mに点音源群を配置した。受音点は室平面の中心、高さ1.5mに配置し、そこから水平距離10m、高さ5m点にアナウンス用のスピーカを想定した点音源を配置した。Fig. 2に配置図を示す。音響パワーレベルは話声で一人当たり68dB、アナウンス音(20秒間)で85dBとした。背景騒音である話声のドライソースには、無響室内で録音した男女の会話音を編集して用いた。アナウンス音のドライソースには女性による空港アナウンスの無響室録音を用いた。

吸音設定 全面吸音材なし($\alpha = 0.1$)を基準条件(N)として、天井のみ(A)、天井・壁上半分(B)、天井・壁下半分(C)に中程度吸音(1: $\alpha = 0.5$)または高度吸音(2: $\alpha = 0.85$)を配置した合計7条件を設定した。

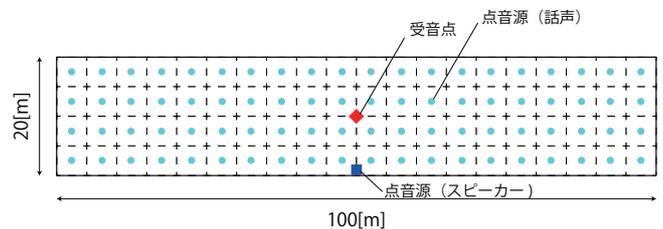


Fig. 2 音源・受音点の平面配置

3. 主観評価実験

室寸法、吸音設定、話者密度をパラメータとした28条件の音場を各2回計56回、各々20秒間被験者に提示し、アナウンス音の「聴き取りにくさ」(4段階)、音環境の「うるささ」(5段階)を評価させた。被験者は20~30才代の男女20名である。評価尺度をFig. 3に示す。

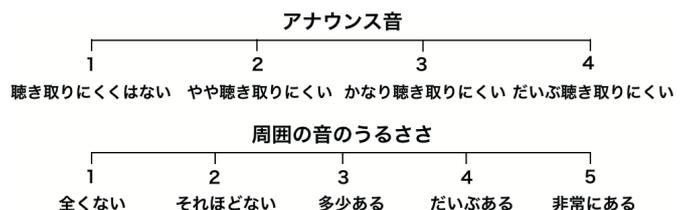


Fig. 3 アナウンスおよび音環境の評価尺度

4. 結果と考察

スピーカと受音点間のインパルス応答から算出した残響時間 T_{20} および T_{30} (500-1000Hz 帯域) を Fig. 4 に示す。天井・壁下半分吸音(C)では Sabine 式による理論値と対応しているが、他の条件では T_{20} より T_{30} がかなり長く、特に天井高 10m の吸音配置 A と B では T_{20} でも理論値を大幅に上回っている。これらの吸音配置は上部に偏在しているため、下部空間の残響が支配的になったものと推察される。

「うるささ」の平均評点とアナウンス音・背景騒音の A 特性音圧レベルの結果を Fig. 5 に示す。全体として SN 比は会話者が低密度の場合に正、高密度の場合に負となっている。吸音効果については、アナウンス音と若干異なり、背景騒音は音源が床面近傍にあるため、天井高によらず吸音配置 A から C の順でレベル低下が見られる。一方、「うるささ」は基準条件に対して吸音条件では低下しているものの、騒音レベルの傾向と必ずしも対応していない。特に天井・壁下部高度吸音(C2)では、背景騒音のレベルは最低ながら、天井のみ吸音(A)と同程度の「うるささ」となっている。吸音効果の増大により音量は減少したものの、近傍の会話音の明瞭性が高まり、その有意性が影響したものと考えられる。

「聞き取りにくさ」の平均評点と U_{50} の結果を Fig. 6 に示す。会話者が低密度の場合、「聞き取りにくさ」は基準条件を除いてほとんど生じていないが、高密度の場合には全条件においてかなり高い割合で生じている。中でも、天井のみ吸音(A)では「聞き取りにくさ」が相対的に低いものに対して、 U_{50} が最低値の天井・壁下部高度吸音(C2)では増しており、 U_{50} とは逆の傾向となっている。「うるささ」と同様、近傍の会話音の有意性の増加がアナウンス聴取の妨害に働いた可能性が高い。

4. おわりに

幾何音響解析に基づく可聴化シミュレーションシステムにより空港コンコースの音環境を再現し、主観評価実験によってアナウンス聴取に対する吸音対策効果を検討した。天井のみに中程度の吸音を施した場合でも残響時間および背景騒音レベルは低減し、アナウンスの聞き取りにくさが緩和することが示された。一方、天井に加えて壁下部まで吸音処理とした場合、周囲の会話音が明瞭となり、かえってアナウンスが聞き取りにくくなる可能性が示唆された。また、物理指標との関係では、背景騒音レベルは「うるささ」と比較的対応するものの、 U_{50} は「聞き取りにくさ」と必ずしも対応しない結果となった。

なお、本報は基礎的な検討として、アナウンス放送用のスピーカは一台としたが、今後は現実的な条件として

複数のスピーカを配置した条件や中規模かつ利用者密度が高い駅コンコースを想定した検討を行う予定である。

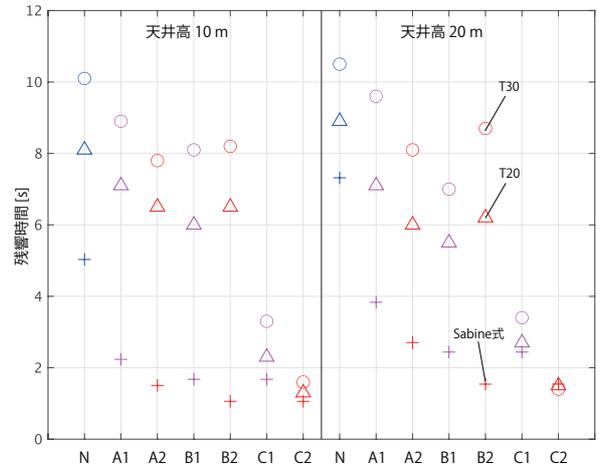


Fig. 4 残響時間 (500-1000Hz 帯域)

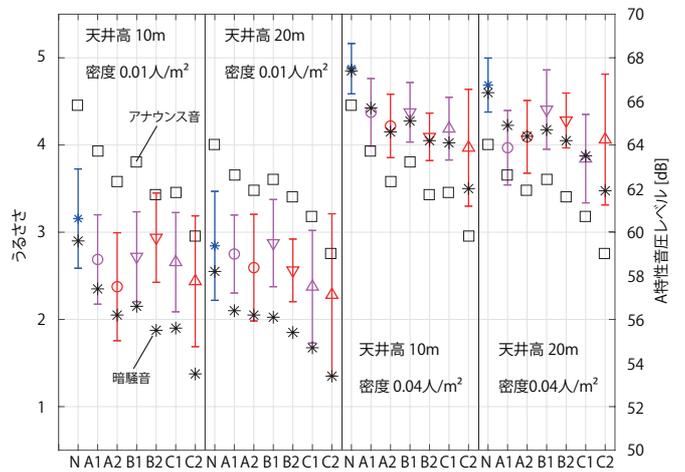


Fig. 5 「うるささ」の平均評点・標準偏差およびアナウンス音・背景騒音の A 特性音圧レベル

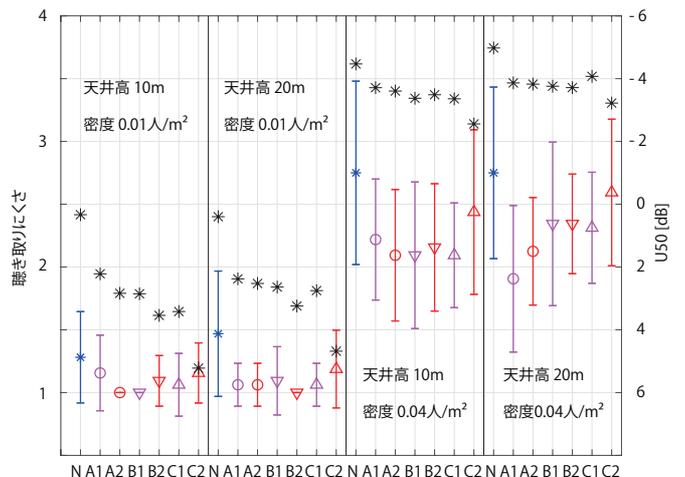


Fig. 6 「聞き取りにくさ」の平均評点・標準偏差および U_{50}

*東京大学大学院新領域創成科学研究科 修士課程

**東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 教授・博士 (工学)

*Grad. Student, Grad. Sch. of Frontier Sci., Univ. of Tokyo

**Prof., Dep. of Arch., Grad. Sch. of Eng., Univ. of Tokyo, Dr. Eng.