

2014 年度 修士論文

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

Subjective Evaluation of Crowd Noise in Public Spaces Using Sound Field
Simulation

西村 裕喜子

NISHIMURA Yukiko

2015 年 1 月 26 日

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

Institute of Environmental Studies,
Graduate School of Frontier science, the University of Tokyo

目次

第 1 章	序論	3
1.1	研究の背景	3
1.1.1	公共空間の音響設計	3
1.1.2	音環境の予測・評価	5
1.2	関連の既往研究	6
1.3	研究の目的	7
1.4	論文の構成	8
第 2 章	シミュレーション手法	9
2.1	はじめに	9
2.1.1	数値解析手法	9
2.1.2	音場再生手法	10
2.2	幾何音響解析	13
2.2.1	音線法	13
2.2.2	音線法の計算方法	18
2.3	6 チャンネル収音・再生システム	27
2.3.1	システム概要	27
2.3.2	収音系	31
2.3.3	再生系	33
2.4	音線法に基づく 6 チャンネル再生	37
2.4.1	指向性	37
2.4.2	位相	39
第 3 章	雑踏音場シミュレーションシステムの構築	41
3.1	はじめに	41
3.2	雑踏模擬音源モデル	46
3.2.1	空調音	46
3.2.2	足音	46
3.2.3	話し声	47
3.3	幾何音響解析による雑踏音場の模擬	50

3.3.1	音源数	50
3.3.2	音源配置	50
3.3.3	音源移動の模擬	53
3.4	その他各種設定方法	54
3.4.1	空気吸収	54
3.4.2	音圧レベル	54
第 4 章	システムの妥当性の検証	57
4.1	はじめに	57
4.2	実空間の音場の再現性に関する検討	58
4.2.1	実験概要	58
4.2.2	実験結果と考察	67
4.3	室条件変化が印象へ与える影響に関する検討	72
4.3.1	実験概要	72
4.3.2	各データの扱いについて	75
4.3.3	実験結果と考察	76
4.3.4	音響物理指標と心理量の対応	80
4.3.5	音響物理指標・物理条件による予測モデルの検討	87
第 5 章	総括	93
参考文献	95
付録 A	評価用紙	113
付録 B	使用音源	119

第 1 章

序論

1.1 研究の背景

私たちの生活の質は、空気・熱・光など様々な環境要因によって決定される。それぞれの環境要因については各方面で日々研究が進められており、今日までに多くの事象が解明され、人々の生活の質を向上させるための工夫がされてきた。そして現在も高まり続ける、より豊かで快適な生活を送りたいという社会的な要求により、あらゆる分野で研究が行われている。

音というのも生活の質を決定する重要な環境要因の一つで、快適な音環境を整えるために建築音響の分野では様々な研究が進められている。一般に建築音響における音の制御は、騒音の制御と残響音の制御に大別される。騒音の制御では音源・伝搬・受音においてそれぞれ制御することで、残響音の制御では適度な響き・十分な明瞭性をコントロールすることなどで音響設計が行われる。音の制御は対象空間の使用目的に応じ、求められる音環境を想定して設計する。例えばコンサートホールのような演奏空間で求められる音環境と、オフィスなどの執務空間で求められる音環境は全く異なる。コンサートホールでは、音が十分に拡散することや適度な響きが付加されることが非常に重要であるが、それに対して執務空間において音の拡散は特筆すべき重要事項ではないし、他者のパソコンのタイプ音がよく響いては不快である。また工場のように室内で発生する大型機械の稼動音が非常に大きい場合、室内の音環境ももちろん重要であるが、それ以前に近隣への音の伝搬を防止することが最低条件として求められる。このように求められる音環境やその程度は室の使用目的によって大きく異なり、それぞれに適した音響設計を行うことが大変重要である。

1.1.1 公共空間の音響設計

室の目的に応じて音響設計を行うことが音響設計では非常に重要であるが、室の目的が明確でない空間も存在する。その 1 つに公共空間がある。公共空間の定義は明確でないが、一般には公共の場として提供される空間のことを指し、その空間を利用することが主な目的でない不特定多数の人が利用する場合が多い。例えば屋外であれば公園や道路、商店街のアーケードなども公共空間の一つであり、屋内であれば鉄道駅ホームや空港のロビー、地下通路や商業空間、またオフィスビルの共用部分として設置されたロビー、複合施設を接続する大空間の各種アトリウムなどが挙げられる。このように多種多様な目的や利用

者がいる空間のことを、本論文中では『公共空間』と呼ぶ [19]。

これら公共空間ではどのような音響設計が行われているかを考える。室の使用目的が多様で不特定多数の利用者がいる空間においては、安全性が最も重要である。音の安全性とは、音情報が確実に伝搬できることである。利用者の中には高齢者や聴覚障害者のように聴力が低下している人や、視覚障害者のように聴力に大きく頼っている人など様々な人がおり、例えば鉄道駅ホームにおける電車の遅延などの伝達すべき音情報は、健常者はもちろんこのような障害者を含めた全ての利用者に難なく伝わらなければならない。浅野ら [6] は駅において視覚障害者が感じている音情報に対する不満をアンケート調査により明らかにしており、その重要性が述べられている。高齢社会の進行に伴いバリアフリーがいっそう求められる今日においてこの事はより重要である [12]。また災害時には、音情報の確実な伝搬は直接安全性へとつながる。そこで電気音響においては拡声音声システムの伝達性、室内音響においては明瞭性が求められ、また暗騒音を十分に小さくするためには騒音制御の観点も必要となってくる。電気音響的にはスピーカの配置や音圧レベルの適切な設定、警報システムの不具合の解消などが求められる。室内音響的には過剰な響きによる明瞭性の低下を防ぐことが急務であり、最も一般的に行われる音響設計である。公共空間は意匠的観点や技術の向上によってアトリウムや吹抜け等の大空間が多く、また耐久性のためガラスやタイル・石材などの反射性の高い材質が使われることが多いため、過剰な響きが生まれやすい。従って天井や壁面に吸音性の高い材質を用いることによって、残響時間を短くする必要がある。騒音制御による音響設計は場合によって非常に難しい。例えば鉄道駅ホームを例に上げると、特に都会の大きな駅では電車の発着が激しく人の出入りも大変多いため、電車の発着を知らせる案内放送や電車進入時の注意喚起がはっきりなしに流れているのだが、それと同時に電車本体から走行時に発せられる音があるため大変な喧騒感であり、音声案内が聞き取れないことがしばしばある。もちろんこの電車から発せられる音は制御されるべき騒音の一つであるが、案内放送の類については初めてその駅を利用する人や視覚障害者には重要である一方で、聞く人によっては騒音と感じられることもあり、また音情報がそれぞれに主張し合うためお互いを打ち消しあってしてしまうことも多々ある。

安全性の次に公共空間で重要なのは、快適性である。安全性の向上は快適性の向上につながるとも言えるが、安全性は確保されていても快適でないという空間は数多く存在する。公共空間の利用形態の多くは通行・休憩・待合いなどの一時的なものとはいえ、不快な場所での滞在は出来る限り避けたい。さらに生活の質の向上に伴い社会的要求も高まっている今日では、公共空間の快適性の向上がその空間の付随する建物全体の印象を高め建物の利用につながるということも考えられ、経済的な効果をもたらす可能性がある。では快適な音環境とはどのようなものかということ、落ち着く・喧騒感がない・会話がしやすい等が考えられる。非常にうるさい空間では落ち着かず会話が聞き取れないことがあるが、単に静かであればよいというわけではなく、ある程度のぎわいによって周りを気にせず会話がしやすいということもある。

以上のように公共空間の安全性・快適性確保には音環境の面からも様々な工夫が必要である事は明確であるが、空間によって求められる音環境は大きく異なるために音響設計の指針が立てにくい。また視覚的に分かりやすい意匠的な計画と異なり、音は目に見えないため問題が浮き彫りになりにくい。避難経路が十分に確保されていないことは設計図からわかるが、避難誘導を確実にできる音環境かどうかはその時その場で体験してみないと気がつかないことが多いのだ。さらには公共空間という場所の性質上、音響的に問題があると認識ができて、経済的な余裕が無い場合に施主が音環境を改善するためのお金を払う判断をすることは稀である。そこで音環境の整備が重要であることを設計前に認識・把握させ、的確な音響設

計を行うため、公共空間においても音環境の予測・評価は重要である。

以上の現状・研究背景から、公共空間の音環境の設計段階における評価・予測を行うにあたって必要な基準の整備は十分でなく、施主・設計者の音に対する認識は非常に低いと言える。しかし音環境に問題があることは前に述べたとおりであり、この現状を打破するためには基準や手順、またそのための有用なシステムを構築すべきである。

1.1.2 音環境の予測・評価

より良い音響設計には、予測と評価が重要である。正確な予測は良い音響設計につながり、出来上がった空間の評価は次の音響設計につながる。また予測や評価が行われることで、どのような音響設計を行うべきかといった具体的な方法案や、基準が整備されていく。そして音響設計の目標や基準が明らかになることは、音を専門としない設計者・施主にもわかりやすく、音響設計の必要性が認識されやすい。

予測は、コンサートホールのような音響が重要視される空間の音響設計では、主に幾何音響理論に基づいた数値解析によるコンピュータシミュレーションによって行われており、商用ソフトが用いられることも多い。これらのシミュレーションでは想定される空間のインパルス応答を算出し、そのインパルス応答から各種音響物理指標を予測し、室内の音の響きを数値で評価することが出来る。またインパルス応答を音源に畳み込み、仕様の違いによる響きの違いを実際に聞いて確かめることも可能である。この手法はコンサートホールに限らず、会議室などの明瞭性が必要とされる空間においても有用な予測の方法である。空調などの暗騒音がある場合は、可聴化シミュレーションとは別に暗騒音として雑音を流す等の工夫をすることで、暗騒音下における明瞭性の確認も行えるため、非常に有用である。このような手法を用いて予測のもと設計された空間は、竣工後に音響測定を行い、目標とした音環境になっているかを確認し予測と照らし合わせ、評価する。目標に達していない場合は何らかの処理を行うこともある。

このようにコンサートホールや会議室などの音環境が特に重要視される空間においては上記のような音環境の予測・評価が一般的に行われている一方で、公共空間では可聴化による予測まで行われることは非常に少なく、その場合は評価されることもない。場合によっては空間で録音した雑踏音を暗騒音として用いた拡声放送の聞き取りやすさの評価や、室内インパルス応答の測定や数値解析による可聴化シミュレーションによる聞き取りにくさの評価などが行われている場合もあるが、数は多くない。

1.2 関連の既往研究

公共空間の音響設計への関心は1990年代中頃から増加し始めている。この頃村上ら[30]は公共空間の音環境に関して国内外の実態の調査と音響測定を行い、日本の公共空間の音環境の重要性を述べている。その後橘ら[18]は公共空間の音環境に関する研究を進め、鉄道駅・地下公共空間における実態調査や、音場シミュレーション手法による喧騒感の評価を行っている。また同時期にアトリウム空間の増加が指摘されており、樋口ら[27]は音に限らない各環境要因に対する調査を行い、内部環境の許容範囲と最適値をアンケート調査によって求めている。さらにアンケート調査にとどまらず綿谷ら[37]は音響測定と幾何音響シミュレーションを行い、幾何音響シミュレーションによるアトリウム空間への適用を確認している。駅の音環境についてもこの頃から問題が指摘されており、土田ら[22][21]や伊積ら[9]は駅の音環境設計に関する基礎的な研究として、現状調査や音響測定、また発車合図やアナウンスの運用について考察を行っている。着目され始めて20年ほど経った現在でも、公共空間の音環境に関する研究は数多く行われているが、初期の音環境の把握とは異なり近年では具体的な改善を視野に入れた研究も進められている。特に音の問題が取り上げられやすい駅については様々な面から調査・実験が行われている。辻村ら[20]は駅の音環境に関するアンケート調査を行い、現状の最も重要な課題は案内放送であり、内容や頻度を調整することで駅の音環境が改善すると指摘している。亀田ら[15]は改修時の駅コンコースの仕上げ材に着目した実測を行い、金属系天井材を用いることの問題を指摘している。さらに実際の駅における調査・測定のみではなく、星野ら[28]は公共空間で実測したインパルス応答を用い拡声放送の了解性を再生音場で評価させている。以上の研究は竣工後の空間を対象としているのに対して、吉野ら[36]は公共空間の音環境を可聴化シミュレーションによって予測することの可能性を探る研究を行っている。幾何音響解析と6チャンネル再生システムを用い、大規模な鉄道駅アトリウム空間を対象とし、計算と実際に測定した残響時間の対応を確認した上で、それらを用いたアナウンスの聞き取りにくさを評価する実験を行っている。この検討では中音域において算出した残響時間が長いなどの差が確認されているものの、主観評価実験ではほぼ評価値が一致しており、利用可能性が確認されている。しかしこの検討では背景騒音の考慮が行われておらず、現場の音環境と実験の音環境では印象がかなり異なることが予想される。背景騒音に関しては録音した暗騒音を用いた会話実験などが行われているものの[31]、実際に背景となる音場の予測・再現に踏み込んだ研究は行われていない。

1.3 研究の目的

以上の状況を踏まえ、本研究では公共空間の音環境の設計段階における評価・予測のための知見を得ることを大目的とし、公共空間の音環境の可聴化シミュレーションシステム構築を目指す。一般的に背景騒音として扱われる雑踏音が公共空間では主な発生源であることに着目し、数値解析手法と音場再生システムを用いて仮想音場を作成する。本研究で構築するシステムが有効なものとなれば、設計の前段階における吸音の効果の確認や、音環境設計の提案が可能となる。従って認識の向上や基準の整備が期待でき、快適・安全な音環境設計に貢献するものと考える。

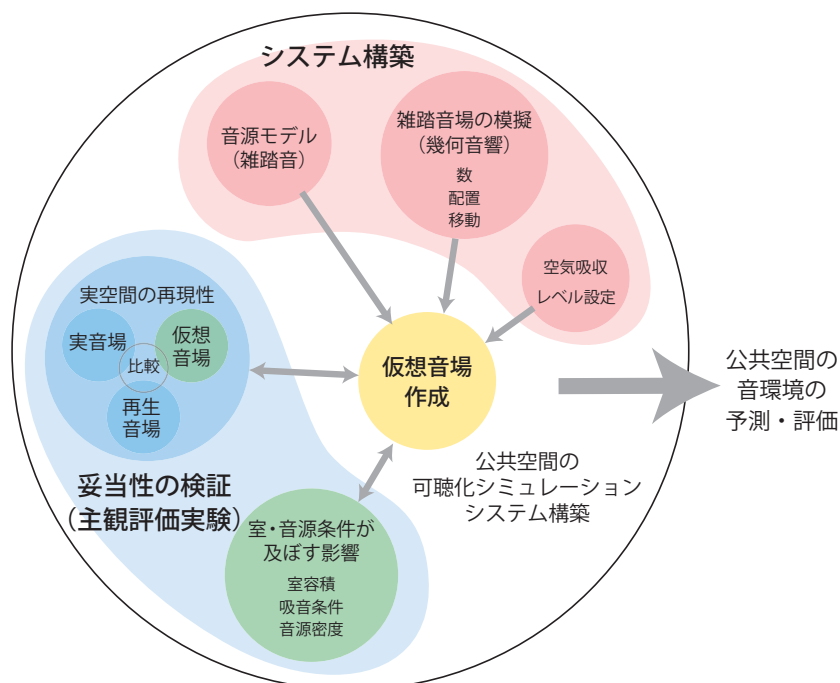


Fig. 1.1 Construction flow of sound field simulation system for public spaces.

1.4 論文の構成

第1章では、公共空間の音環境の予測・評価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、本研究で用いるシミュレーション手法について述べる。はじめに第1節で様々な可聴化シミュレーション手法について概説し、本研究で用いる手法の概要を述べる。第2節では数値解析手法として用いる音線法のアルゴリズムと計算方法を述べ、第3節で音場再生システムとして用いる6チャンネル収音・再生システムの概要と構成について述べる。

第3章では、公共空間の音環境を忠実に再現するために行った雑踏音場シミュレーションシステムの構築方法について述べる。第1節では公共空間の音環境の実態把握として行った予備調査の報告を行う。第2節では雑踏音場の音源として用いる各音源の作成・収録方法について述べる。第3節では音線法によって雑踏音場の模擬を行うための各音源の配置・移動条件や、音圧レベルなどの諸設定について述べる。

第4章では、第3章で作成した雑踏音場シミュレーションシステムの妥当性の検証を行うために行った主観評価実験について述べる。第3節では実音場・再生音場・仮想音場の各音場における主観評価結果の比較によって妥当性の検証を行い、結果を考察した。第4節では仮想音場で室条件や人口密度を変化させた場合の心理量の変化との対応の確認によって妥当性の検証を行い、結果を考察した。第5節では第3,4節で行った実験の結果から考察した今後の課題についてまとめ、本システムの実用性について述べる。

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。本節では各分野における様々な手法を簡単に紹介し、本研究で用いる手法の利点と問題点を明らかにする。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 つの手法に大別される [42]。

波動音響解析手法

1 つ目は波動音響解析手法で、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い、分割された領域または面のそれぞれは要素またはセルと呼ばれ、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で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。

幾何音響解析手法

2 つ目は幾何音響解析手法で、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 [13]。代表的な手法としては、音線法、虚像法などがあげられる (図 2.1 (a),(b))[8]。音線法は音源から放出した多数の音線を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。虚像法は鏡面反射点から音が発せられていると考え、その音源の位置と出力の大きさを求め、受音点におけるそれらの総和を算出する手法である [25]。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、波動音響解析手法と比較して再現性は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出来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。商用の幾何音響シミュレーション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。

本研究は公共空間という大空間の音環境を再現する事が目的であり、音の回折・干渉などの波動的な振る舞いや、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容易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。音線法の説明の一部には [42] より引用する。

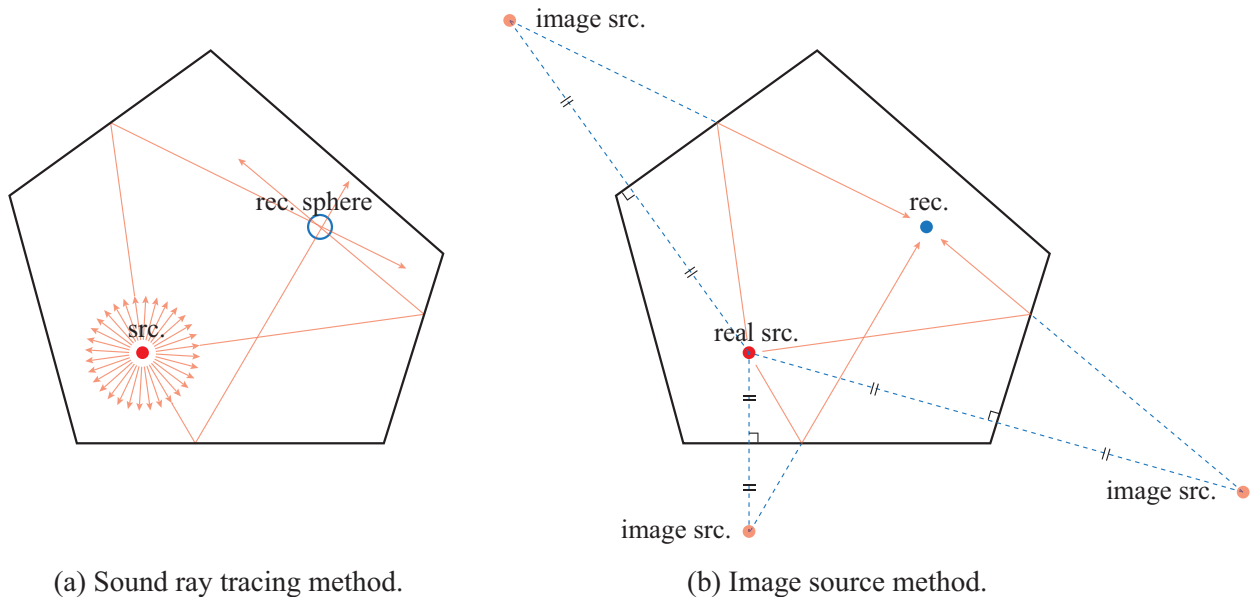


Fig. 2.1 Geometrical acoustic analysis method.

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。一般に普及されているいくつかのシステムを簡単に紹介する [14]。

■1 チャンネル再生 最も単純で、モノラルな情報のみを有する音源を1チャンネルのスピーカまたはイヤフォンから再生する手法である。収音時に複数本のマイクロフォンや指向性を有するマイクロフォンを用いた場合も、1チャンネルの情報に変換してしまうため3次元の音場の情報を得ることは難しい(図2.2(a))。

■2 チャンネル再生 ステレオ再生と呼ばれ現在最も普及している再生手法で、2 チャンネルのスピーカまたはイヤフォンから再生する。左右の音のレベル差や位相差によって音像の位置の調節を行うことで、臨場感のある音場を再現する。受聴時の姿勢は自由であるが、前後上下方向の定位は難しい(図 2.2(b))。

■5.1 チャンネルサラウンドシステム 一般的によく知られており家庭用にも普及されている、主流の多チャンネル再生方式である。スピーカの配置は前方左右に 2 つと前方中央に 1 つ、後方あるいは横方向に 2 つの 5 つと、超低音専用のサブウーファー 1 つの、合計 6 台のスピーカで構成される。より臨場感の高い音場を再現することを目指しているが、使用方法によって距離・角度などを変えて用いることも多い。(図 2.2(c))。

その他にもチャンネル数を増やした 7.1 チャンネルや、スーパーハイビジョンのための 3 次元立体音響システムである 22.2 チャンネルシステムなどがある [26]。

ここまでで紹介した再生システムは、臨場感を求め開発が行われ一般的に普及しているものであるため、学術的に主観評価実験を行うためには正確性に欠ける。主観評価実験を実験室で行う場合は対象の 3 次元の音場をより忠実に再現することが求められる。そのための音場シミュレーション手法としても、様々な手法が開発され用いられている。

■トランスオーラルシステム 2 チャンネルの再生システムの一つで、ダミーヘッドを用いて人間の耳による聴取を模擬した収録を行う [7]。再生には 2 台のスピーカを用い、クロストークをキャンセルするために受聴者本人の頭部伝達関数による補正を行った上で再生するため、複雑な信号処理が必要となる。また受聴時には頭部伝達関数を測定した時の位置関係を厳密に再現・保持しなければならないため、自由な姿勢で聴くことは出来ない(図 2.2(d))。

■バイノーラルシステム 2 チャンネルの再生システムの一つで、トランスオーラルシステムと同様にダミーヘッドを用いて収録を行い、再生にはヘッドフォンを用いる(図 2.2(e))。

■6 チャンネル收音・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收音した音を、無響室で等距離に配置された 6 台のスピーカから再生するシステムである [33][32][11]。原理は極めて単純なため複雑な信号処理が不要なく、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(図 2.2(f))。

その他にも、アンビソニックス、Wave Field Synthesis、境界音場制御 (Boundary Surface Control:BoSC) システムなど、複雑な信号処理を用いた様々な音場再生手法が開発されている。

本研究ではこの中から、收音・再生に複雑な信号処理が不必要であるため受聴時の姿勢の制約が小さく、正確かつ自然な再現が可能である 6 チャンネル收音・再生システムを用いることとした。

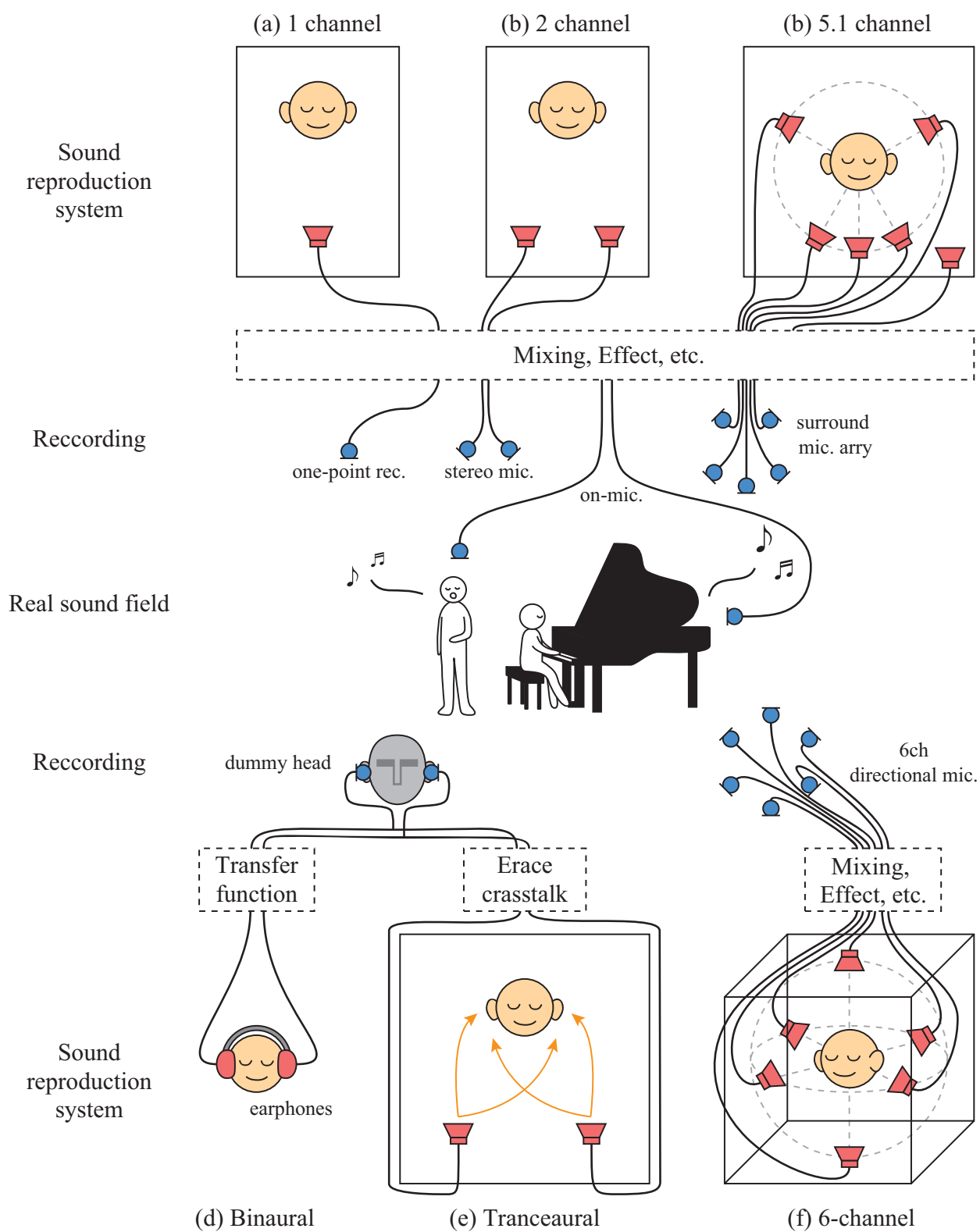


Fig. 2.2 Sound field reproduction systems.

2.2 幾何音響解析

2.2.1 音線法

音線法とは、図 2.1 (a) に示すように、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、壁面での反射およびエネルギーの減衰を追跡し、最終的に受音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、同じ幾何音響手法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。音粒子と音線は同意で表現されることが多く、本論文でもほぼ同意のものとして扱う。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 2.3)。

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 2.4 のように音粒子が進むに従って音線の間隔が広がり、単位面積あたりの通過音線数が減少する。この音線数の減少で球面波を模擬する。

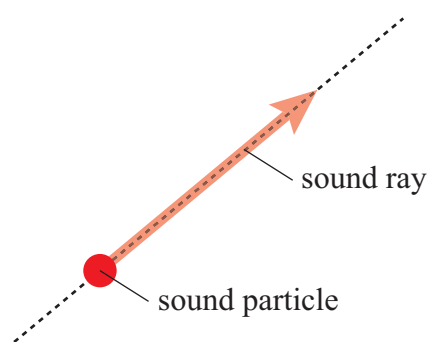


Fig. 2.3 Sound particle and sound ray.

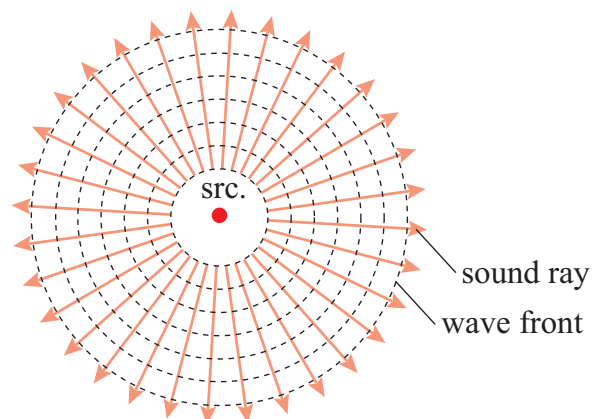


Fig. 2.4 Spherical sound wave.

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 2.5)、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 は吸収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。

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

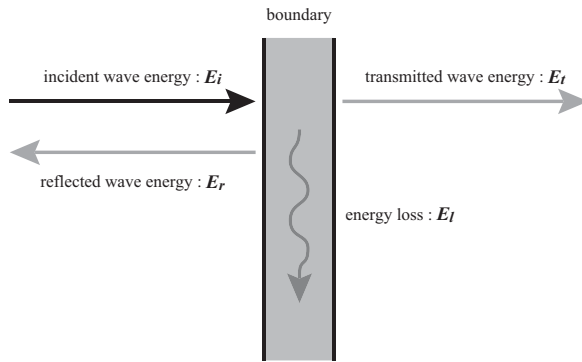


Fig. 2.5 Sound energy on boundary.

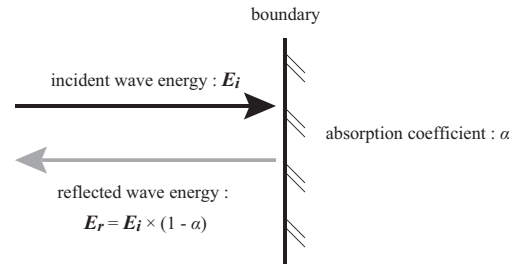


Fig. 2.6 Treatment of sound energy on boundary.

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事が多い [2]。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。従って本検討では統計的な考え方に基づき単一音線の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。[17]

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 2.7 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 2.8 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 θ_r 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。

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

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。一様乱数 $n(0 < n < 1)$ を発生させ、乱反射率 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 は式 2.5 で定義する。

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

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。

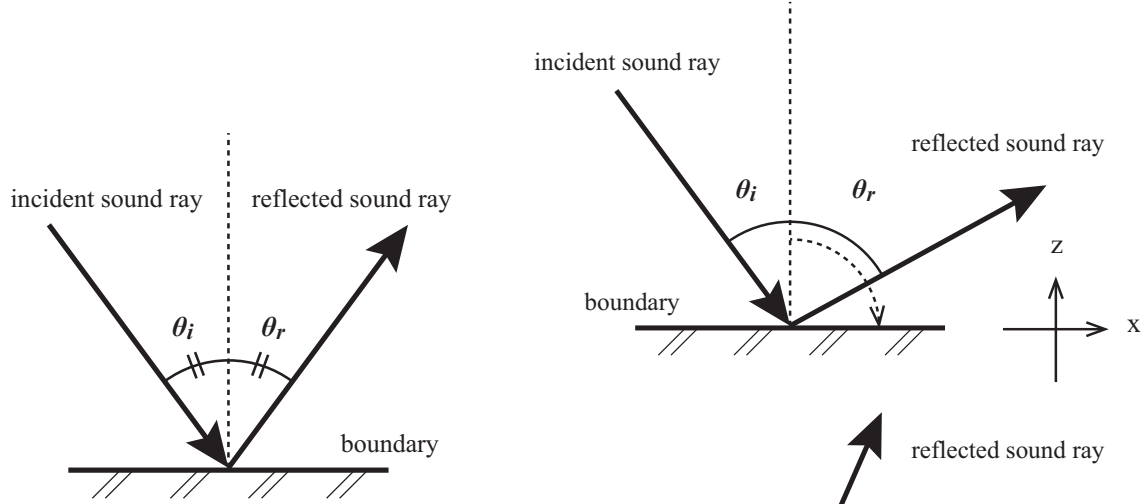


Fig. 2.7 Direction of specular reflect sound.

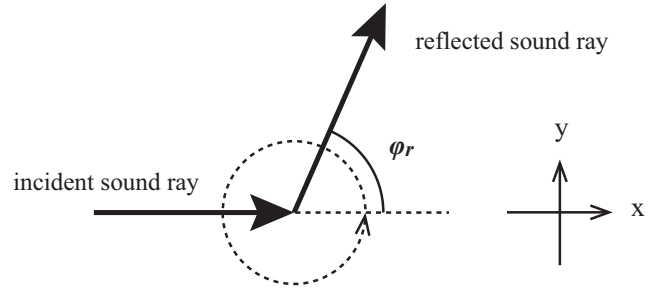


Fig. 2.8 Direction of scattered sound.

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 2.9 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。この時の音線数と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 $N(\text{個})$ 、受音球の半径を $r(\text{m})$ 、室の体積を $V(\text{m}^3)$ とする。

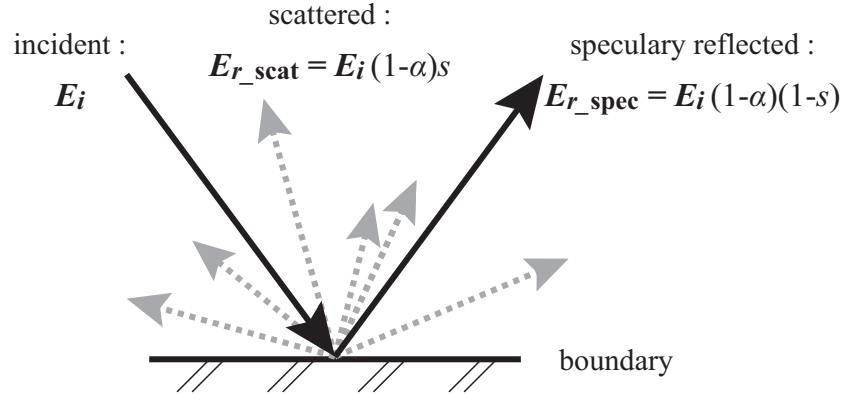


Fig. 2.9 Scattering from rough surface.

■**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 0 dB 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 個を基準とした時、S/N 比を x (dB) 確保するために必要な音粒子の数 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 倍の数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、任意の位置に受音球を設定した時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、この時式 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が小さくなる。

■**伝搬距離** 点音源から音線が球面上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事は既に述べた。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 1 つは入ることが必要条件となる。

音速を c (m/s)、音線追跡時間を t_{\max} (s) としたとき、図 2.10 のように音波は半径 ct_{\max} (m) の球に広がっている。ここで音源を頂点、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) 伝搬した時，波面が円錐によって切り取られる面積は

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

で表される。

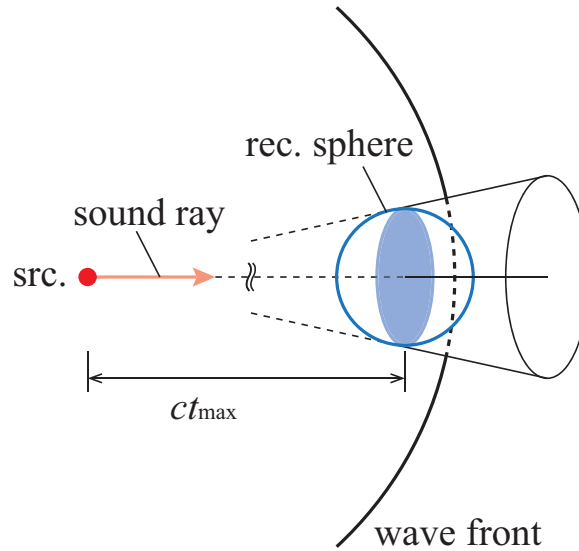


Fig. 2.10 Relationship between solid receiving sphere and angle obtained by a sound ray.

音粒子数 N が十分に大きければ式 2.11 はほぼ平面の円と見なす事ができ，この円の半径は

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

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，

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

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みたすように音粒子の数 N と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の半径 r を大きくする。その結果図 2.11 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。従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める必要がある。

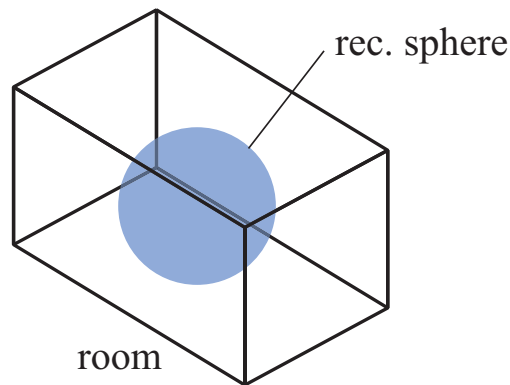


Fig. 2.11 An example image that receiving sphere is too large.

2.2.2 音線法の計算方法

図 2.12 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。

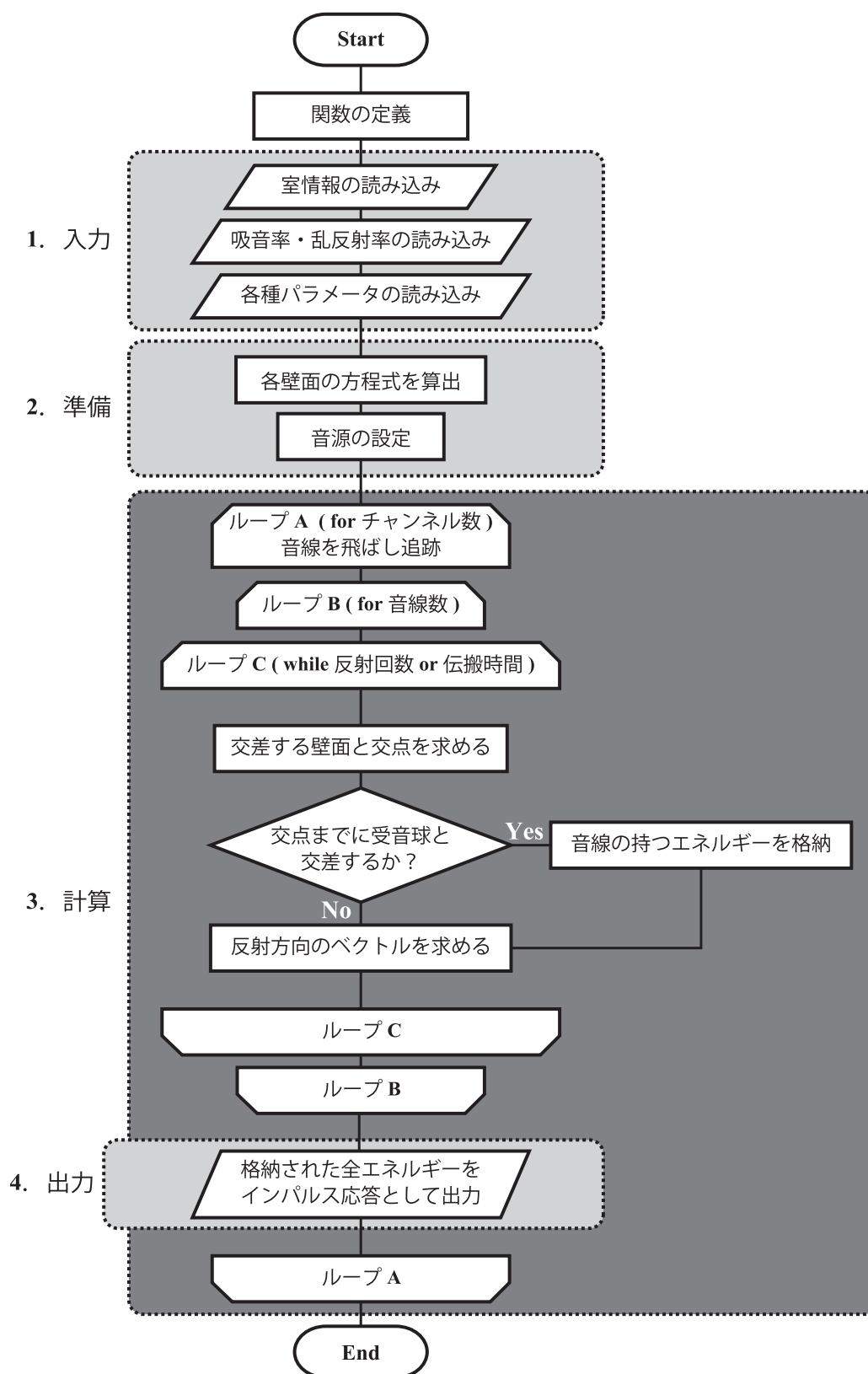


Fig. 2.12 Flow chart of ray tracing program.

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 2.13 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いた面とする。

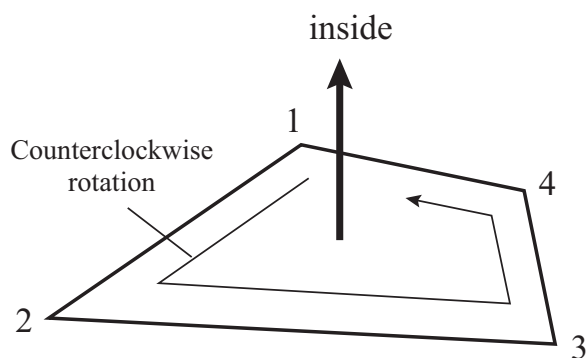


Fig. 2.13 Specify surface by vertex number.

■**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 - 8k Hz の 7 オクターブバンドの中心周波数で指定した。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 [41] から表 2.1 に示す 3 つの材料の吸音率を用いた。乱反射率は全壁面で一定値 : 0.4 を与えた。

Tab. 2.1 Absorption coefficient.

	Absorption coefficient (Frequency[Hz])						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
plaster board 9-12mm with air layer 45mm	0.26	0.13	0.08	0.06	0.06	0.06	0.06
pitched stone	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03
rock wool 15mm with air layer 300mm	0.40	0.35	0.45	0.55	0.65	0.75	0.85

■**各種パラメーター** 設定した各種パラメータを図 2.2 に示す。音速は室温 15 °C のときの値である。音源位置は複数個設定でき，条件によって任意の値を与える。音線数と受音球の半径は前述した留意点を考慮し，また受音球の半径は見付面積が 1 m² となるように設定した。受音位置は全空間条件で室中央，高さ 1.5 m に固定した。反射回数は十分に多く設定し，伝搬時間の上限は大空間の長い残響を模擬出来るように長めに設定した。なお，本研究中の計算では残響時間が 6.0 s を越える場合があるが，全試行で設定値を越えない十分な残響時間を確保すると計算負荷が非常に大きくなってしまう。そこで可聴化に際して大きな影響がない十分な減衰時間として，本研究では便宜的に 6.0 s と設定した。

Tab. 2.2 Configuration parameters of ray tracing method.

Sound speed	348.48(m/s)
Sound source position (xyz)	given value
Number of sound rays	1, 000, 000
Receive position (xyz)	(0, 0, 1.5)(m)
Radius of receiver	0.56(m)
Limit number of reflection times	10, 000, 000
Calculation total time	6.0(s)

計算前の準備

■各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 は平面上の直線上でない 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 2.14 に示すように、ある平面上に q_0, q_1, q_2 の 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

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

と求められる。また平面上の任意の座標を式 2.14 に代入することで、切片 d は求められる。

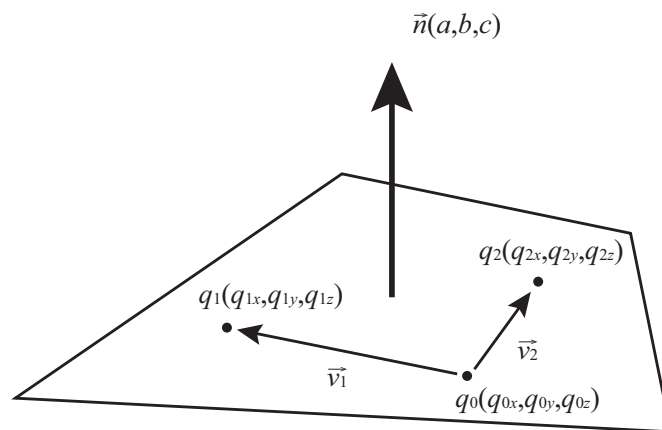


Fig. 2.14 3 points and vector on the wall.

■音源の生成 6チャンネルのスピーカから再生する音源を作成するため、受信側に指向性を設定する必要があるが、本手法では相反則の原理を用いて音源側に指向性を持たせることとした。そのため音源に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 2.15 に示す 3 軸 6 方向の音源を作成する。

音線の放射方法は次の 2 通りの手法が考えられる。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 2.16)。ただし、 m , n は $0 < m < 1$, $0 < n < 1$ を満たす一様乱数とする。

$$\begin{aligned}\varphi_r &= 2\pi m \\ \theta_r &= \arccos(1 - 2n) \\ \vec{v}_x &= \cos \varphi \sin \theta \\ \vec{v}_y &= \sin \varphi \sin \theta \\ \vec{v}_z &= \cos \theta\end{aligned}\tag{2.16}$$

全(無)指向性の場合、式 2.16 で決定したベクトルは方向に関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 をかけることで指向性を再現する。 \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} のなす角である。

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

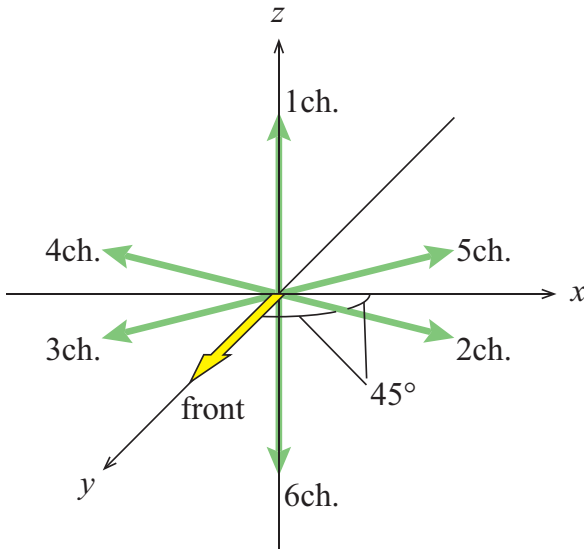


Fig. 2.15 Direction of sound ray.

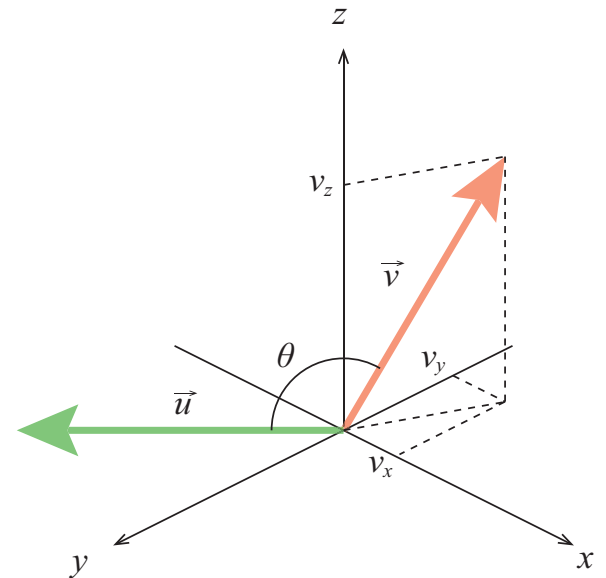


Fig. 2.16 Direction of sound ray which was determined by random number.

音線追跡計算

音線の追跡は、最後に反射した点 (始めは音源点) 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。

■交差する壁面と交点を求める 最後に反射した点 (始めは音源点) 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 2.17)。

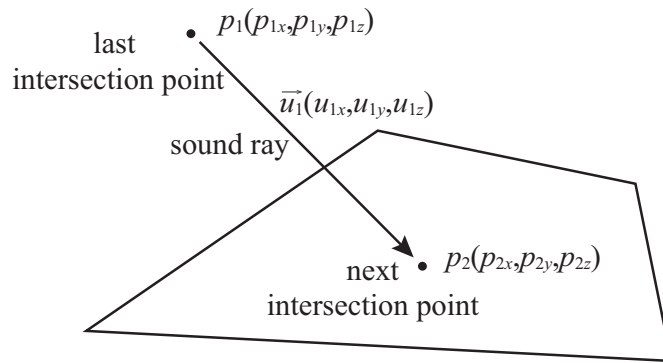


Fig. 2.17 Coordinates of intersection points and sound ray vector.

交点を求めるには、まず音線が壁面に向かっているかを判定する。判定には、音線の方角ベクトルと壁面の法線ベクトルの内積を求め、値が負であれば良い (図 2.18)。

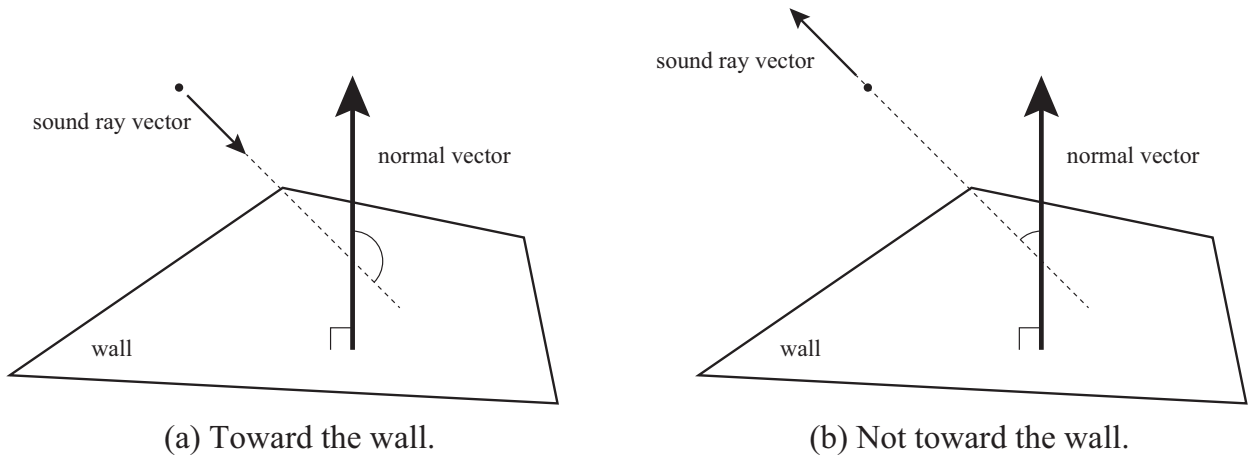


Fig. 2.18 Judgment of sound ray vector's direction.

次に交点が壁面内に存在するかを判定する。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 のとき交点が内部にあり、0 のとき外部にある (図 2.19)。

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 2.20) ため、条件を満たす壁面との交点との距離が最も近いものを選択する。

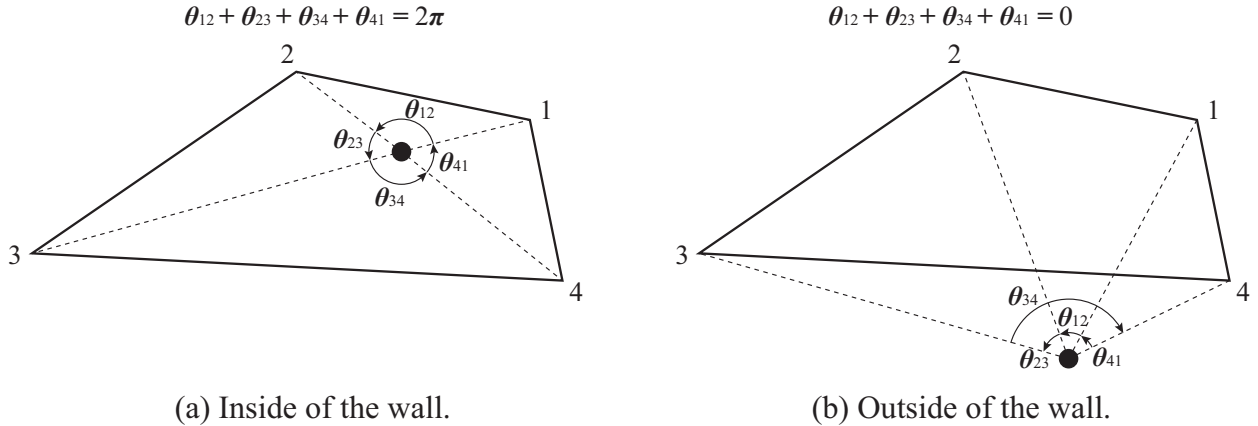


Fig. 2.19 Judgment of intersection's position.

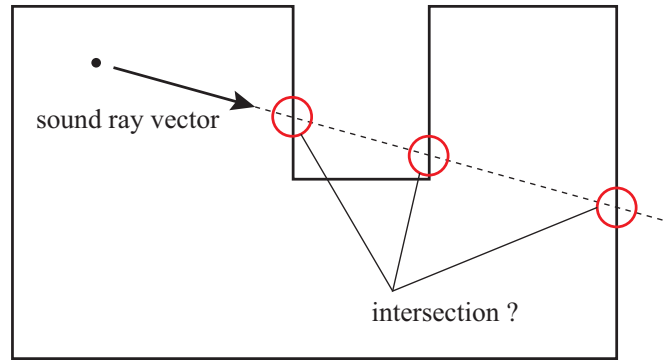


Fig. 2.20 Judgment of nearest wall.

■**受音球と交差するか判定する** まず音線が、受音球の方へ向かっているかを判断する。判定には、音線の方角ベクトルと受音球の位置座標方向のベクトルの内積を求め、値が負であれば良い (図 2.21)。

次に音線が次に壁面と交差するまでに、受音球と交差するかを判定する。受音球の位置座標から音線に降ろした垂線の距離 h を求め、受音球の半径 r より小さければ交差する (図 2.22)。

■**反射方向のベクトルを求める** 項 2.2.1 で既に述べたが、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に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、一様乱数 m, n を用いて式 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、受音球と交差するときそ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、音線と受音点座標の距

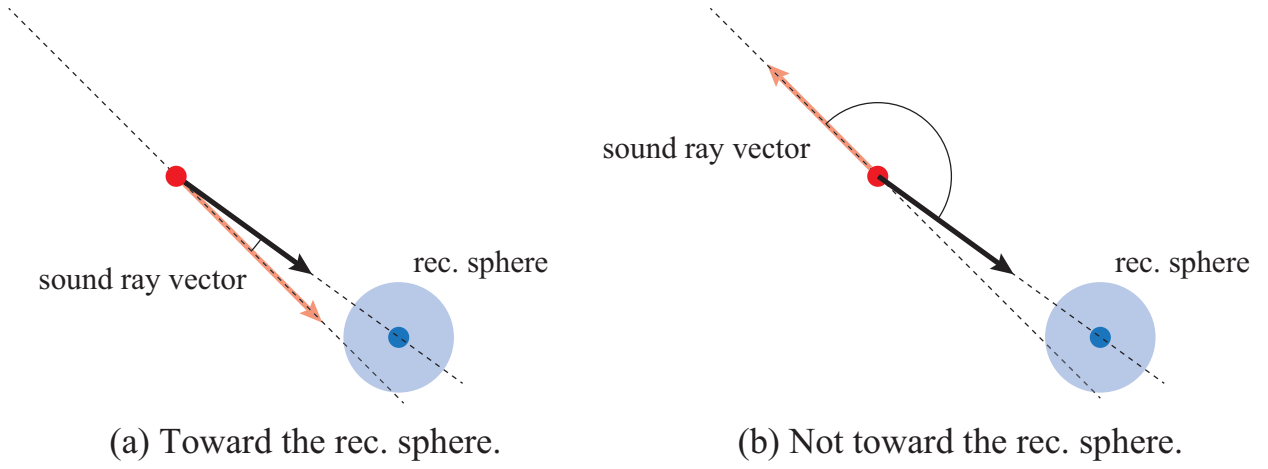


Fig. 2.21 Judgment sound ray vector's direction to rec. sphere.

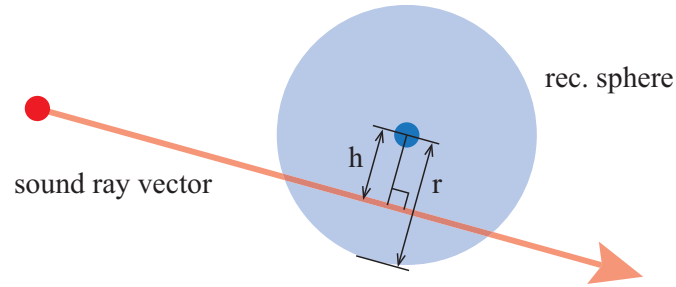


Fig. 2.22 Distance of sound receiving point and sound ray.

離 d より以下のように求められ,

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

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

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

これを全音線で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 2.23)。

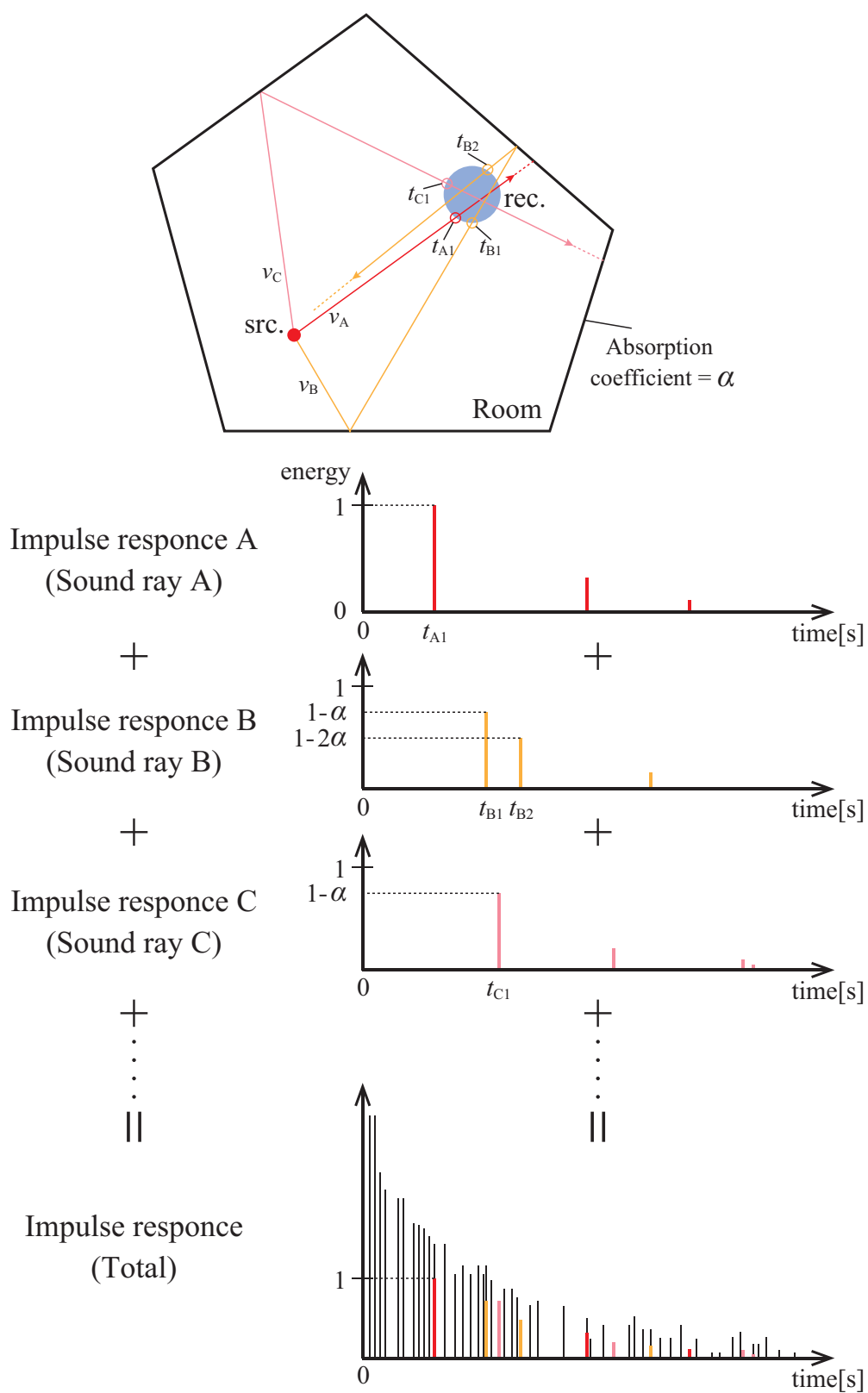


Fig. 2.23 Impulse response as calculation results.

2.3 6チャンネル収音・再生システム

6チャンネル収音・再生システムは、実際の3次元音場を臨場感をもって実験室内に再現し、主観評価実験を行う目的のために考案・改良されてきた多チャンネル音場再生手法の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ている。

2.3.1 システム概要

機材構成

本システムは収音系と再生系から構成される。3次元方向に直交配置した6本の単一指向性マイクロフォンで実音場の音を収音し、無響室内に直交配置された各マイクロフォンの指向性に対応する6個のスピーカから再生することで、3次元の音場が忠実かつ自然に再現される。はじめに考案された6チャンネル収音・再生システム[35]では、個々の単一指向性のマイクロフォンを組み合わせ用いていたが、現在は小型化された単一指向性のマイクロフォンを合わせた6チャンネルマイクロフォンを用いている。

本研究では本システムを2通りの再現方法で用いる。1つ目は通常的使用方法通り実音場の音を6チャンネルマイクロフォンで収音し6台のスピーカを通して再生する方法、2つ目は本システムの再生系のみを用い、音源は音響数値解析を用いて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する方法である[29]。

収音系・再生系のダイアグラムを図2.24、図2.25、使用機材を表2.3に示す。

Tab. 2.3 Equipment list of 6-channel reproduction system.

	Equipments	Product name	Manufactures	Notes
Recording system	6-channel microphone	CU-6CHII	sanken	
	microphone amplifier	QuadMic	RME	×2
	lead-acid battery	PE12V2W	GSYUASA	×2
	non-directional microphone	LA-1350	ONO SOKKI	
	Multi-channel data recorder	DA-40	RION	
Reproduction system	personal computer	CF-52	Panasonic	
	audio editing software	Adobe Audition 3.0	Adobe	
	audio interface	FireFace800	RME	
	signal processor	DME24	YAMAHA	
	power amplifier	IPA8200	YAMAHA	
	loud speaker	NS-2HX	YAMAHA	×6

Recording system

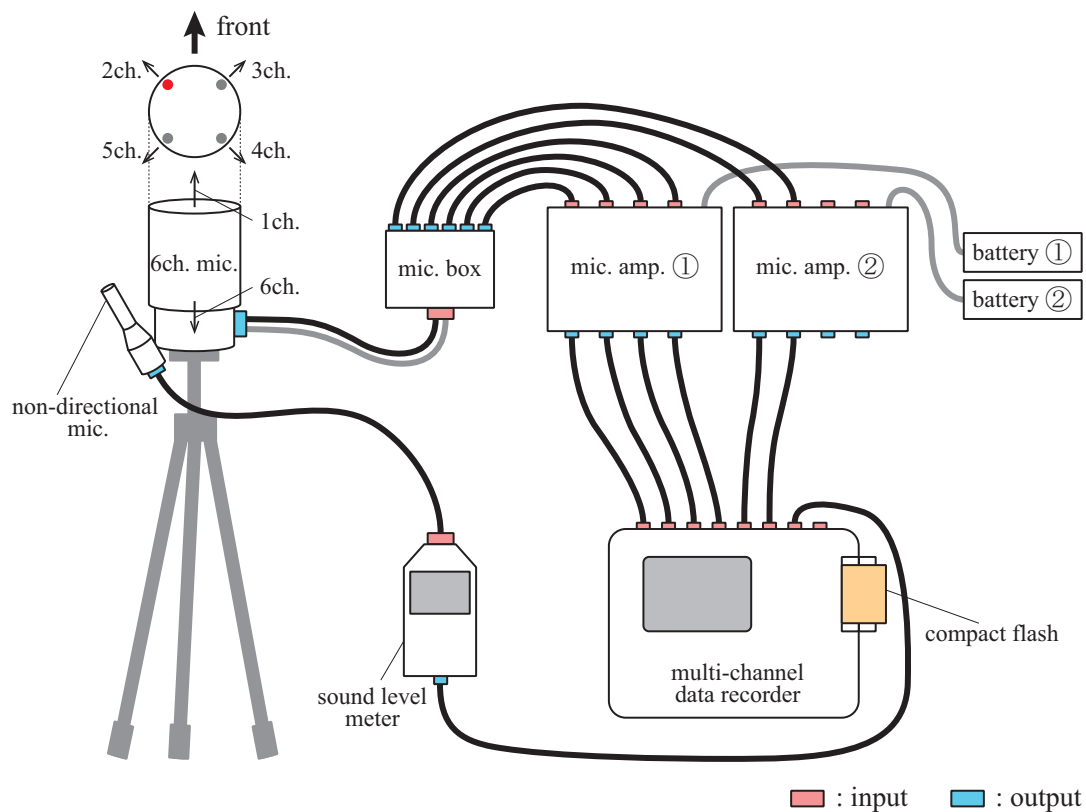


Fig. 2.24 Diagram of 6-channel recording system.

Reproduction system

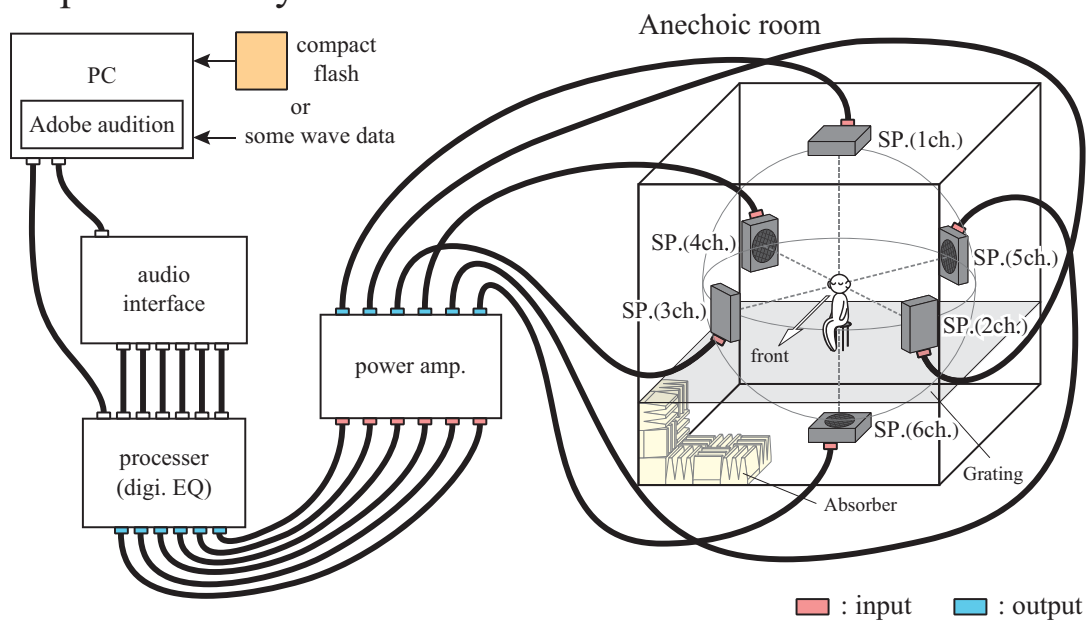


Fig. 2.25 Diagram of 6-channel reproduction system.

数学的理論

6 チャンネル収音・再生システムの数学的な原理を以下に示す。ただし個々のマイクロフォンは図 2.26 のように Δd の軸方向設置間隔があるが、以下の原理において設置間隔は全て $\Delta d = 0$ と仮定し、マイクロフォンの指向特性は式 (2.21) で示されるカーディオイド特性を満たすものとする。

$$D(\theta) = \frac{1 + \cos \theta}{2} \quad (2.21)$$

はじめに 2 次元音場 (x, y 平面) における音波の到来を考える。 y 軸正の向きを 0 度とし、角度 θ で音波が入射する時、図 2.27 のように 90 度ごとに指向性を回転させた 4 本のマイクロフォンを通して 4 つの信号 (p_1, p_2, p_3, p_4) が収音される。これらの信号を全て足し合わせると、音波の到来角度に関わらず音圧は定数となる (式 (2.22))。

$$\begin{aligned} p_{\text{total}} &= p_1 + p_2 + p_3 + p_4 \\ &= \frac{1 + \cos \theta}{2} + \frac{1 - \sin \theta}{2} + \frac{1 - \cos \theta}{2} + \frac{1 + \sin \theta}{2} \\ &= 2 \end{aligned} \quad (2.22)$$

以上の考え方を 3 次元音場に拡張すると、以下の式 (2.23) で表すことができ、入射角度に依らず音波を正確に再現することが可能である。粒子速度についても同様に密度 ρ 、音速 c のみによる定数 (式 (2.24)) となり、入射角度に依らない。

$$p_{\text{total}} = p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5 + p_6 = 3 \quad (2.23)$$

$$u_{\text{total}} = u_x + u_y + u_z = \frac{1}{\rho c} \quad (2.24)$$

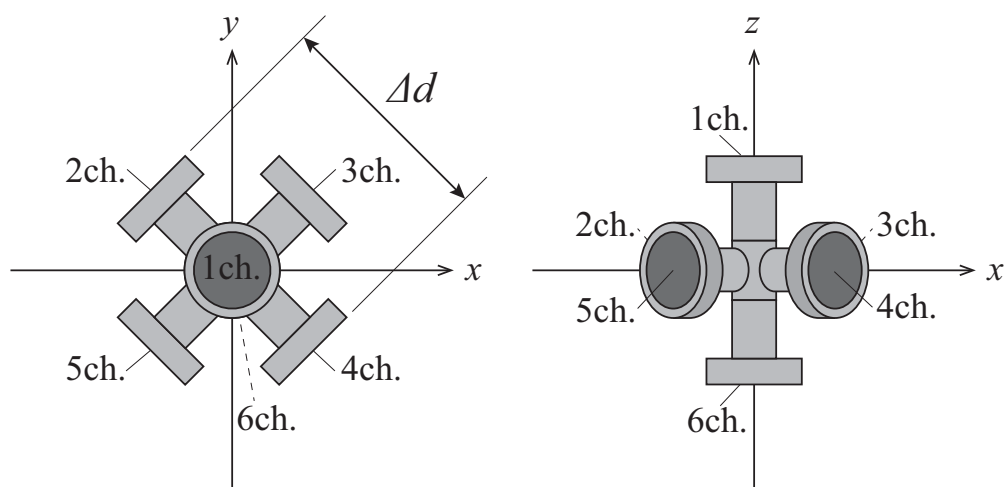


Fig. 2.26 Distance of condenser microphones of 6-channel microphone.

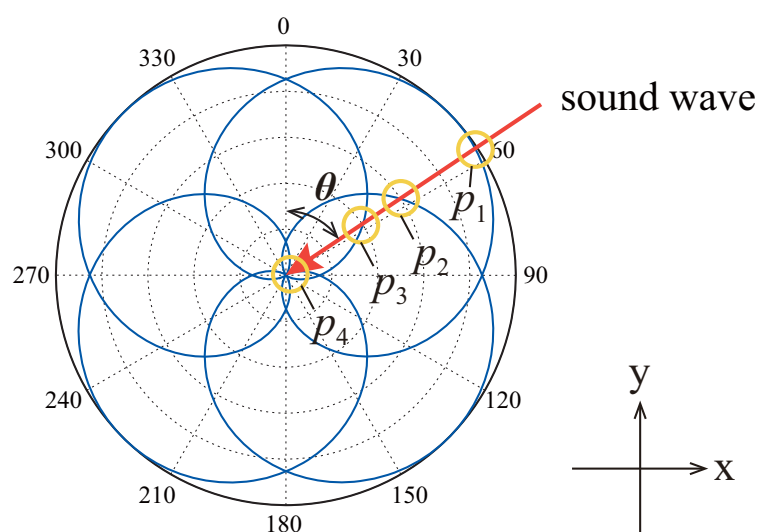


Fig. 2.27 Arrival direction of the sound wave.

2.3.2 収音系

収音系の概要は図 2.24 に示した。収録には 6 チャンネルマイクロフォンを用いる。このマイクロフォンは、単一指向性 (カーディオイド型) の指向性を持つ小型マイクロフォン 6 本を直交軸 (x, y, z) 上にそれぞれ指向性が外側を向くように組み合わせたもので、同時に 6 方向の音を収音する。収音したデータはマイクボックスを通して 6 チャンネルに分岐し、マイクアンプで増幅する。マイクにはマイクアンプよりファンタム電源を供給する。また収音時の音圧レベルを記録するため、6 チャンネルマイクロフォン近傍で無指向性マイクロフォンで収音を行う。6 チャンネルデータと無指向性データはマルチチャンネルデータレコーダを用いてコンパクトフラッシュに記録する。

また実空間の音の収音を行う際に持ち運び易いよう、図 2.28 のように一部を開けて操作が行えるような工夫を施した旅行用キャリーケースに機材を収納し、実空間へ持ち運び収音を行った。



Fig. 2.28 6-channel recording system.

6 チャンネルマイクロフォン

sanken の CU-6CII を用いた。直交 3 軸 6 方向の 6 つのコンデンサーマイクロフォンから構成され、各マイクロフォンの指向特性は図 2.29 に示すカーディオイド特性を満たすものである。径が数ミリの 6 つの小型マイクロフォンは図 2.31 に示す径 $\phi 70$, 高さ 130 mm のマイクグリルの中にそれぞれ x, y, z 軸方向を向いて収納されており、各同軸上のマイクロフォンは数十ミリの設置間隔がある。6 チャンネルマイクロフォンはマイク部と BOX 部から構成されており、マイク部から 1 本のケーブルで 6 チャンネルのデータが送られ、BOX 部で 6 本のケーブルに分岐される。マイクアンプよりファンタム電源を供給する。

■周波数特性の補正 6チャンネルマイクロフォンの周波数特性は、実際には全周波数で完全なカーディオイド特性を満たしておらず、マイクロフォンごとにその特性は異なる。従って実音場と収音された音場の周波数特性が一致しないため、補正を行う必要がある。周波数補正の考え方には自由音場補正と拡散音場補正があるが、本実験で用いたマイクロフォンは拡散音場の考え方にに基づき残響室法によって 1/3 オクターブバンドごとに補正を施し、63 Hz から 20 kHz 帯域において差が 1 dB 以内になるようにしている。補正には DME24N のグラフィックイコライザコンポーネントを用いている [29]。

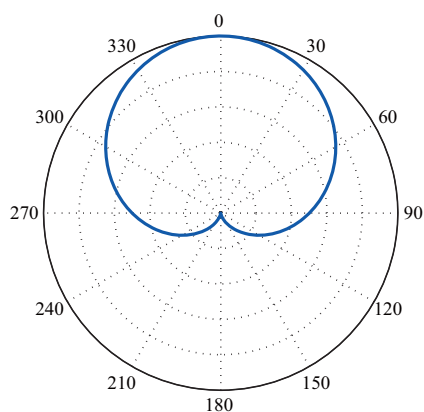


Fig. 2.29 Cardioid directivity.



Fig. 2.30 Distributor of 6-channel microphone.



Fig. 2.31 6-channel microphone.

モニターマイクロフォン

6チャンネルマイクロフォンの収音時の音圧レベルを把握するため、モニターマイクロフォンとして無指向性のマイクロフォンを有する普通騒音計 (LA-1350, ONO SOKKI) 図 2.32 を用い、6チャンネルのデータと同時に収音を行った。騒音計の設定レンジは 30-100 dB とした。

マイクアンプ

6チャンネルマイクロフォンで収音したデータは、マイクアンプを通して増幅を行った後にデータレコーダで記録する。マイクアンプには RME の QuadMic を用いた。1台に4チャンネルで2台使用した。Gain は全チャンネルで +30 dB とした。電源には鉛蓄電池を用いており、持ち運びが可能である (図 2.34)。

多チャンネルデータレコーダ

データの記録には、RION の DA-40 を用いた (図 2.33)。DA-40 は 8チャンネル同時録音が可能であり、本研究では収音した 6チャンネルと、モニターマイクロフォンの 7チャンネルを同時に録音を行った。ビットレートは 16 bit, サンプリング周波数は 48k Hz で、レンジフルスケールは 110 dB とした。記録したデータはコンパクトフラッシュを介して PC へ取り込んだ。



Fig. 2.32 Sound level meter.



Fig. 2.33 Multi-channel data recorder.

2.3.3 再生系

再生系の概要は図 2.25 に示した。音源には収音系でコンパクトフラッシュに記録したデータ、もしくは数値解析などを用いて作成した wave データを PC に取り込んで使用する。データの編集は Digital Audio Workstation : DAW (Adobe Audition) を用いて PC 上で行った。音源はデジタルイコライザ (DME24, YAMAHA) を用いて周波数補正を行った後、パワーアンプ (IPA8200, YAMAHA) で増

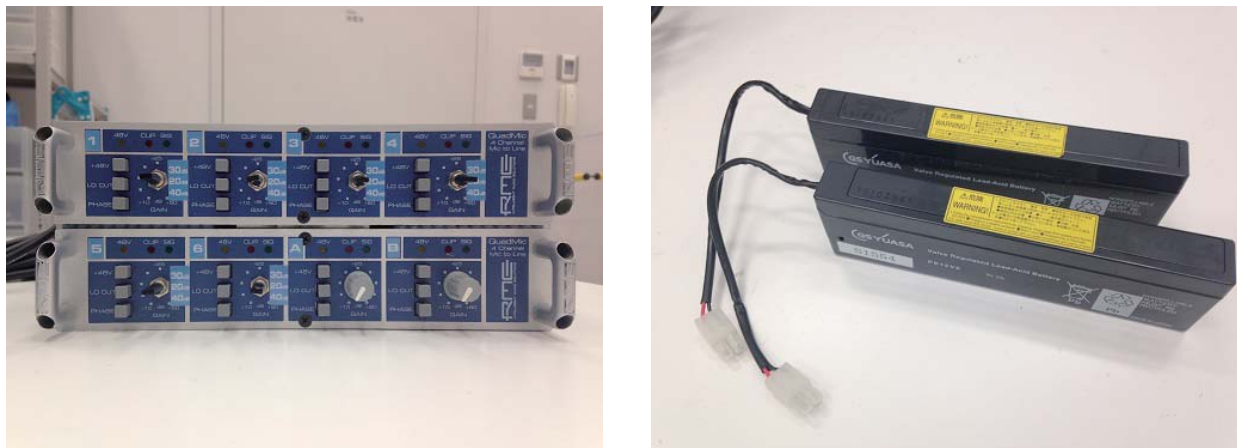


Fig. 2.34 Microphone amplifiers (left) and lead-acid storage batteries (right).

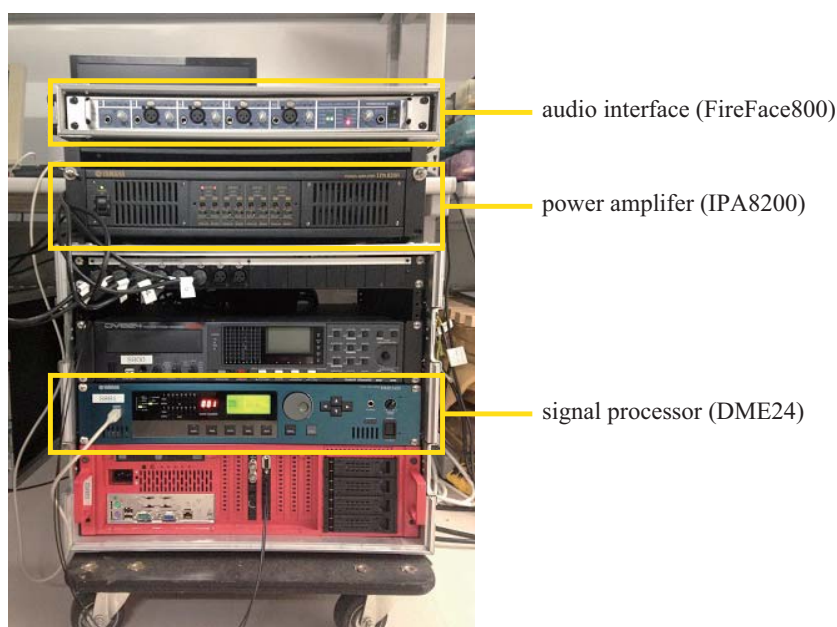


Fig. 2.35 Equipments of reproduction system.

幅したものを無響室に配置された 6 台のスピーカで再生する。AD/DA 変換にはインターフェース (FireFace800,RME) を用いた (図 2.35)。各スピーカは 6 チャンネルマイクロフォンの指向性に対応するように直交軸上の等距離に配置されている。收音した 6 方向のデータを対応する各スピーカからそれぞれ再生し中央で受聴することで、実音場の 3 次元的な再現が可能となる。

スピーカ

本研究室の無響室の仕様と、再生系に用いる 6 台のスピーカ配置を図 2.36 に示す。無響室の有効室寸法は $5.4\text{ m} \times 6.0\text{ m} \times 4.8\text{ m(H)}$ 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 1.2 m 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 2,170 mm 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 1,200 mm である。

周波数特性の補正

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 6 チャンネルマイクロフォンの周波数特性の補正と同様に本実験では，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。補正にはスピーカからピンクノイズを用い，再生時に平坦な周波数特性となるように調整した。イコライザは 2 段階でかけており，1 つ目で各スピーカの周波数補正を行ない，2 つ目で収音に用いた 6 チャンネルマイクロフォンの周波数補正を行い 63～16k Hz の全周波数で ± 1 dB 以内の差になるように調整した。

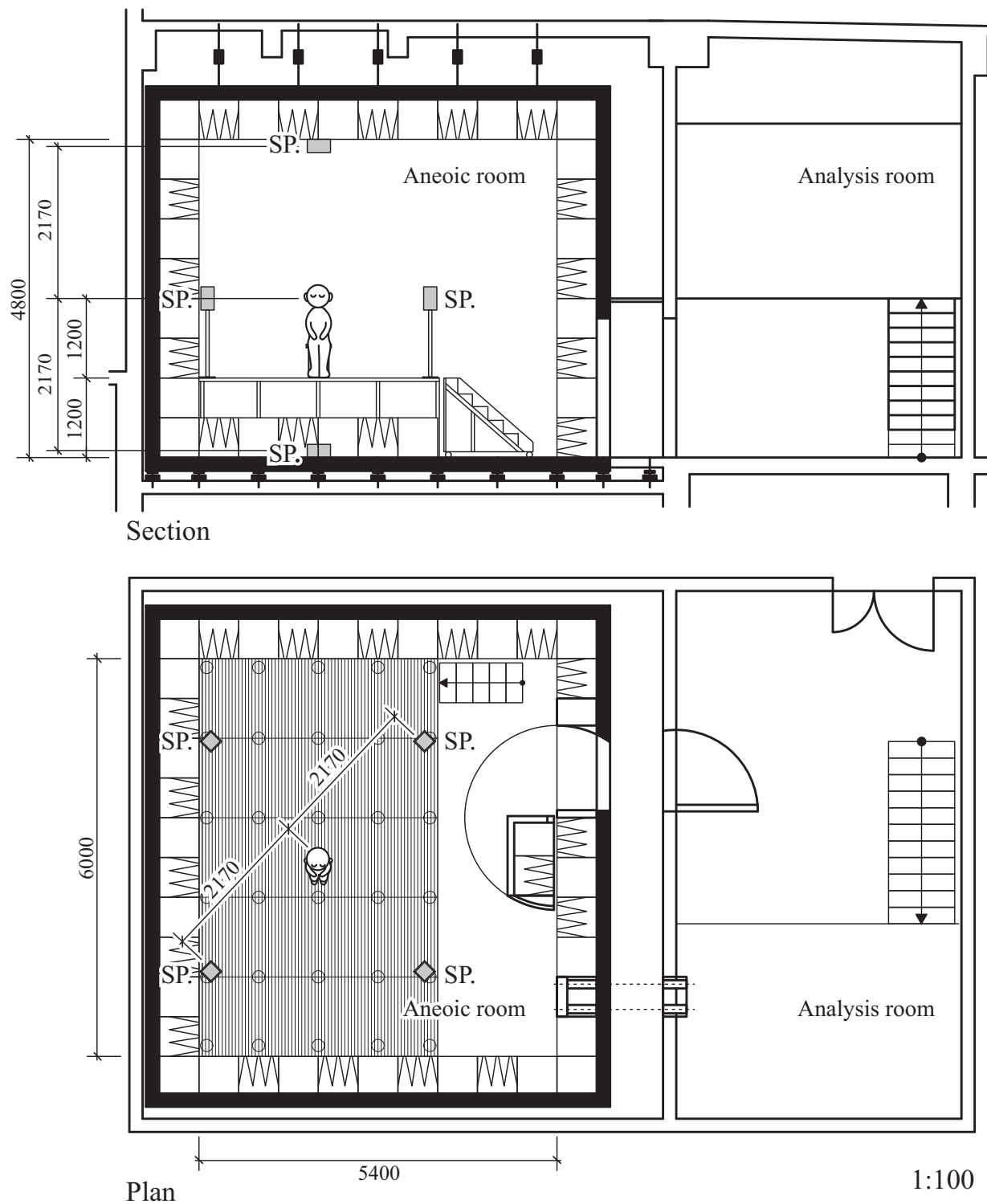


Fig. 2.36 A plan of anechoic room and an arrangement of speakers.

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、音線法で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 2.37 に示すように音源 S が無指向性で全方向に向かって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する方向に関わらず全て受音する。

図 2.38(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、エネルギーに掛けるという計算を全音線ごとに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 2.38(b) のように音源 S を受聴点 R_s 、受聴点 R とを音源 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こととする。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} とある音線の方角ベクトル \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 のカーゴイド型の式 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 $E_0 = 1$ に乗じた値なので、 d_θ である。放出された後は壁面反射時に吸音されてエネルギーが減衰し、最終的に受音球でエネルギー E で入射する (式 2.27、但し r : 反射回数 とする)。

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

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となり、相反則が成り立つ。

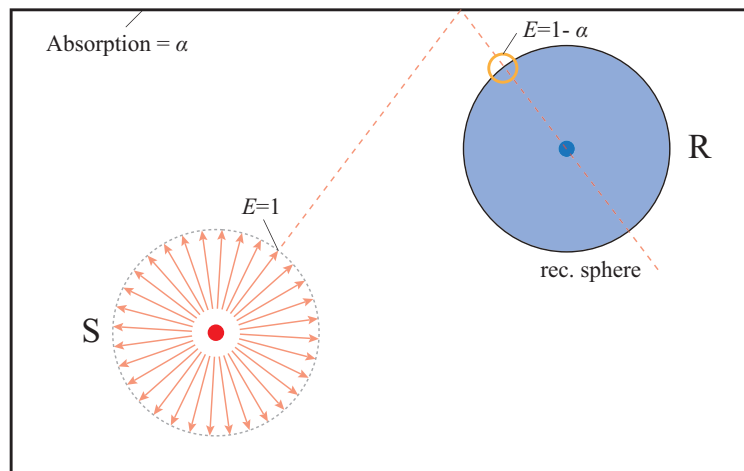


Fig. 2.37 In case both source and receiver are omni-directional.

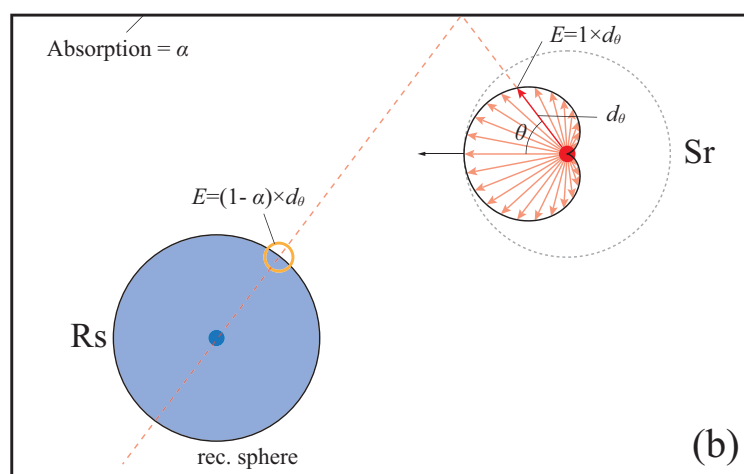
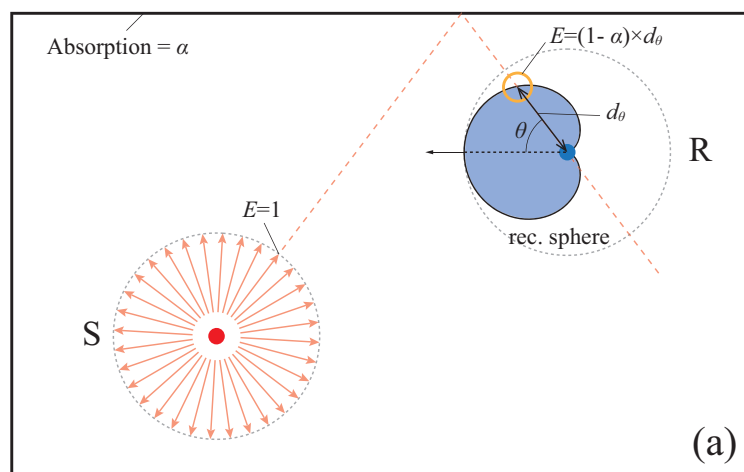


Fig. 2.38 Equivalent analyses based on the reciprocity : (a)cardioid receiver - omni-directional source and (b)omni receiver cardioid source.

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るため、位相の情報が無い。このまま音源にインパルス応答を畳み込むと、本来の響きとは大きく異なる響きが付加される。そのため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 - 8k Hz 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

雑踏音場シミュレーションシステムの構築

3.1 はじめに

本章では、公共空間の音環境のシミュレーションシステムの構築手法を述べる。シミュレーションシステムを構築するにあたって、はじめに公共空間がどのような音環境になっているかを観察する必要がある。そこで本節では、まず公共空間のうち比較的室の性格が明確な鉄道駅・空港・商業空間などについて、既往の研究等を参考にまとめる。次に事務所ロビーや各種アトリウム空間などの室の性格がより不明確である公共空間について簡単な調査を行い、音環境を把握した。これらの結果から、公共空間としてシミュレートすべき音環境についての方針を述べる。

次節からはその方針に沿ってシミュレーションシステムの構築を行った。第 2 節では音源モデルについて作成方法を述べる。第 3 節では幾何音響解析によって雑踏音場を模擬する手法について説明する。第 4 節ではその他の設定として空気吸収と再生レベルについて述べる。

■**鉄道駅・空港・商業施設** はじめに公共空間と呼ばれる空間の中でも、比較的室の性格や目的が明確な空間であり、公共空間で最も多く音環境の問題が取り上げられる鉄道駅の音に着目する。筆者ら [24] は駅のプラットフォームにおける音環境の印象を調査しており、その予備実験としてホームで聞き取られた音事象を被験者に記述させ分類している。それによると、人の声や物音が最も多く、話し声や足音に加えて咳払いや物音など多くの音が記述されている。次に音声案内が多く、電車の発着やドアの開閉、その他の様々な音声案内が発生していることがわかる。3 番目に多いのは発着電車音で、走行音やブレーキ音、クラクションやドアの開閉音などが挙げられている。その他にも突発的サイン音として発着のベル、常時サイン音としてエスカレータ等による音、また駅に関係のない街の音や自然の音がある。この報告では述べられていないが、同じ駅でも改札では改札通過時の IC カードのサイン音や切符購入時の音もある。











次に場所を変えて空港のロビーにおける音を観察すると、ここでは施設側が発生させるサイン音は多くなく、主に旅行客の話し声や足音・キャストの音と航空会社の従業員の呼びかける声が占め、時折便の遅延・欠航を知らせる音声案内が流れる。また、空調設備やエスカレータ・動く歩道などから発生する機械音の低音が聞こえる [23]。

また商業空間においては、まず人々の話し声や足音が多いが、それに加えてBGMを流すことによって賑わいを演出することが多い[10]。大型デパートのように、1つの大きな空間が壁で仕切られて幾つもの店舗が並んでいた場合、施設全体で流すBGMに加えて、各店舗で異なるBGMを流している。さらに店員による大声の呼び込みや拡声放送など施設側で恣意的に発生させている音が非常に多いことがわかる。











■ロビー・アトリウム 次に各種施設の待合場所・休憩場所となることの多いロビー・アトリウムは、場所によって非常に多様で一概に言うことが難しい。そこで実際に都内の数十箇所の各種ロビーやアトリウムの音環境等を観察した。観察対象とした空間については表3.1-3.3に示す。その結果、どの空間においても最も多い発生音は人の話し声や足音、その他動作に付随する物音などであった。場所によっては空調音やエスカレータの機械音、またオフィスなどの入口が設置されている場合はセキュリティカードをかざした際に発生する音が大きかった。その他には宣伝用テレビから発せられる音、隣り合う商業空間から聞こえるBGMや店員の声とレジの音、ドア開閉時に聞こえる屋外の自動車の音、インテリアとして設置されている噴水の音など、空間の利用形態によって多種多様の音環境が観察された。

以上の検討から、公共空間の例として以上に挙げた鉄道駅、空港ロビー、商業施設、ロビーやアトリウム空間、全ての共通発生音について考察した。サイン音やアナウンスは各空間によって有無・頻度・種類が大きく異なるし、BGMは商業施設で多い発生音である。すると、どの空間でも共通するのは利用者が発生させる音と、人が利用する建築空間であれば必ず使用する空調等の機械音であろう。これらの音は公共空間を対象とした多くの研究において『暗騒音』とされており、1つ1つの音源が着目されることは少ない。しかし一般に『暗騒音』とされる音が実際は公共空間の印象を大きく左右しており、また空間の音響設計によってこの『暗騒音』の印象が変わるとも言える。例えば会話のしやすさを評価するにも、拡声放送の聞き取りやすさを評価するにも、この『暗騒音』がどういった状態であるのかによって評価は変わる。そこで公共空間の音環境をシミュレートするにあたって、一般に『暗騒音』と言われる音に着目した。具体的には空調音、足音、話し声の3つの音で、本研究ではこの3つの音を便宜的に『雑踏音』と呼ぶこととする。

また仮想的な公共空間の音環境を施行する場合には、室容積・形状、利用形態などを表3.1-3.3に示す公共空間を参考とした。

No.	利用形態	形状	容積(m ³) (概算)	吸音条件	人通り	L _{Aeq} (dB)
1	商業施設・ アトリウム	立方体型	27,000	天井, 壁一面	多	-
						
2	ホテル・ ロビー	垂直型	3,000	-	少	-
						
3	オフィスビル・ ロビー	偏平・ 平面型	360	-	少	47.5
						
4	オフィスビル・ ロビー	偏平・ 平面型	490	-	少	53.2
						
5	オフィスビル・ ロビー	偏平・ 平面型	840	-	少	-
						
No.	利用形態	形状	容積(m ³) (概算)	吸音条件	人通り	L _{Aeq} (dB)
6	オフィスビル・ ロビー	偏平・ 平面型	1,200	天井	少	-
						
7	オフィスビル・ ロビー	偏平・ 平面型	1,200	-	少	58.9
						
8	オフィスビル・ ロビー	偏平・ 平面型	1,890	天井	少	-
						
9	オフィスビル・ ロビー	偏平・ 平面型	1,955	-	少	-
						
10	オフィスビル・ ロビー	偏平・ 平面型	2,250	天井	少	-
						

Tab. 3.1 Example of public spaces-1.

No.	利用形態	形状	容積(m ³) (概算)	吸音条件	人通り	L _{Aeq} (dB)
11	オフィスビル・ロビー	偏平・平面型	3,456	天井	中	46.9
						
12	ホテル・オフィス・ロビー	偏平・平面型	3,024	天井	多	53
						
13	オフィスビル・ロビー	偏平・平面型	4,480	-	多	-
						
14	オフィスビル・ロビー	偏平・平面型	5,460	天井	少	47.7
						
15	オフィスビル・ロビー	偏平・平面型	7,000	-	中	51.4
						
16	オフィスビル・ロビー	偏平・平面型	1,414	-	少	52.4
						
17	オフィスビル・ロビー	偏平・垂直型	3,500	-	少	58.1
						
18	オフィス・アトリウム	偏平・垂直型	4,800	-	少	-
						
19	オフィスビル・ロビー	偏平・垂直型	21,708	-	少	59
						
20	オフィスビル・ロビー	通路型	306	天井	少	-
						

Tab. 3.2 Example of public spaces-2.

No.	利用形態	形状	容積(m ³) (概算)	吸音条件	人通り	L _{Aeq} (dB)
21	商業施設・ 共通通路	通路型	360	-	少	55.3
						
22	オフィスビル・ 共通通路	通路型	975	天井	多	-
						
23	オフィスビル・ 共通通路	通路型	1,050	-	少	62.7
						
24	オフィスビル・ ロビー	通路型	1,152	天井	多	-
						
25	商業施設・ アトリウム	通路型	2,160	-	少	-
						

Tab. 3.3 Example of public spaces-3.

3.2 雑踏模擬音源モデル

前述のとおり公共空間の音環境を再現する音として空調音，足音，話し声の3つの雑踏音を選定した。以下にそれぞれのドライソースの作成方法について述べる。

3.2.1 空調音

一般的な空調騒音の周波数特性を有する Hoth ノイズ [1] を用いた。このノイズは電話による会話時の背景雑音の特性を把握するために数多くの室内空調音の測定から決定されており，公共空間などの大空間における各種主観評価実験時の空調騒音としても用いられている [16][38]。Hoth ノイズの 1/3 オクターブバンドごと周波数特性 (100 Hz - 8k Hz) を図 3.1 に示す。また参考値としてピンクノイズの 1/1 オクターブバンドごとの周波数特性を 100 Hz で同レベルとして合わせて示す。Hoth ノイズは 100 Hz から 3.15k Hz 付近まではピンクノイズと比較して傾きが小さいが 4k Hz 以上で傾きが大きくなる。

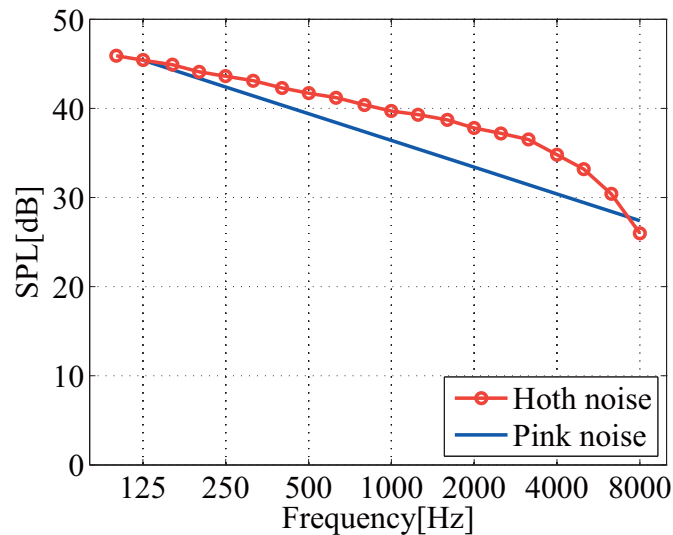


Fig. 3.1 Frequency response of Hoth noise.

一様乱数から生成したピンクノイズに，図 3.1 に示した Hoth ノイズとピンクノイズの差分値を中心周波数 1/3 オクターブバンドごとに補正し，Hoth ノイズを作成した。用いた音源の例として図 3.2 に時間波形を，図 3.3 に周波数波形を示す。また空調音源は 1 つの空間に複数個用いるため，全ての空調音源が同じ Hoth ノイズを使用すると位相が一致してしまう。そこで 1 つの空間に用いる全ての空調音源は異なる乱数を用いて作成した。

3.2.2 足音

東京大学構内の地面が石のタイルで出来た十分に広く静かな屋外において，男 2 名女 2 名の計 4 名にハイヒール・革靴・運動靴等の様々な靴を履き，様々な速さで歩いてもらい，足音を録音した。録音には普

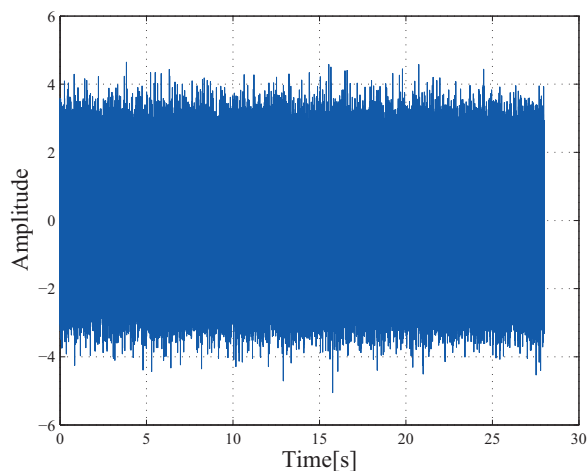


Fig. 3.2 Time response of air noise.

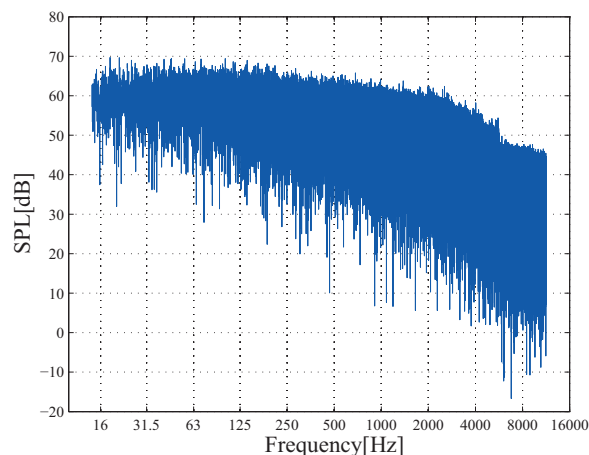


Fig. 3.3 Frequency response of air noise.

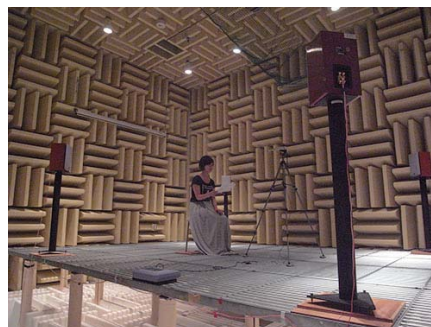


Fig. 3.4 Recording of footsteps (left) and speaking voice (right) .

通騒音計 (ONO SOKKI, LA-1350) を用い、多チャンネルデータレコーダ (RION, DA-40) に記録した。録音の配置条件を図 3.5 に示す。マイクロフォンから収録したい足音音源までの距離が 1 m になるように高さ 0.8 m、音源からの水平距離 0.6 m の地点に設置した。また歩く位置に印を付け、その上を歩かせた。

データの編集には DAW(Adobe Audition) を用い、1 m 点の 2 歩分の音を切り出して繰り返しつなげることで 28 秒間の音源を作成した (図 3.6)。録音は夜中の静かな時間帯に行ったが、虫の声などによるノイズが多少入ったため、ノイズが大きい音源については DAW(Adobe Audition) の Noise reduction 機能を用いてノイズを消去した。音源は計 37 個作成した。

3.2.3 話し声

無響室内で男 4 名女 3 名の計 7 名に用意した会話文を読んでもらい、1m 点での話し声を録音した。会話文は小説と日本語会話テキストから通常の会話、ビジネス会話等を抜き出して、長さ 1~2 分の文章を 9 つ用意し、その中から読んでもらった。足音と同様に録音には普通騒音計 (ONO SOKKI, LA-1350) を用い、多チャンネルデータレコーダ (RION, DA-40) に記録した。録音の配置条件を図 3.7 に示す。会話は無響室の中央に座り、口元から 1 m 程度の点 (高さ 1.2 m) で録音した。編集には足音と同様に DAW(Adobe Audition) を用いて適当な 28 秒間を切り取り、計 107 個の音源を作成した。

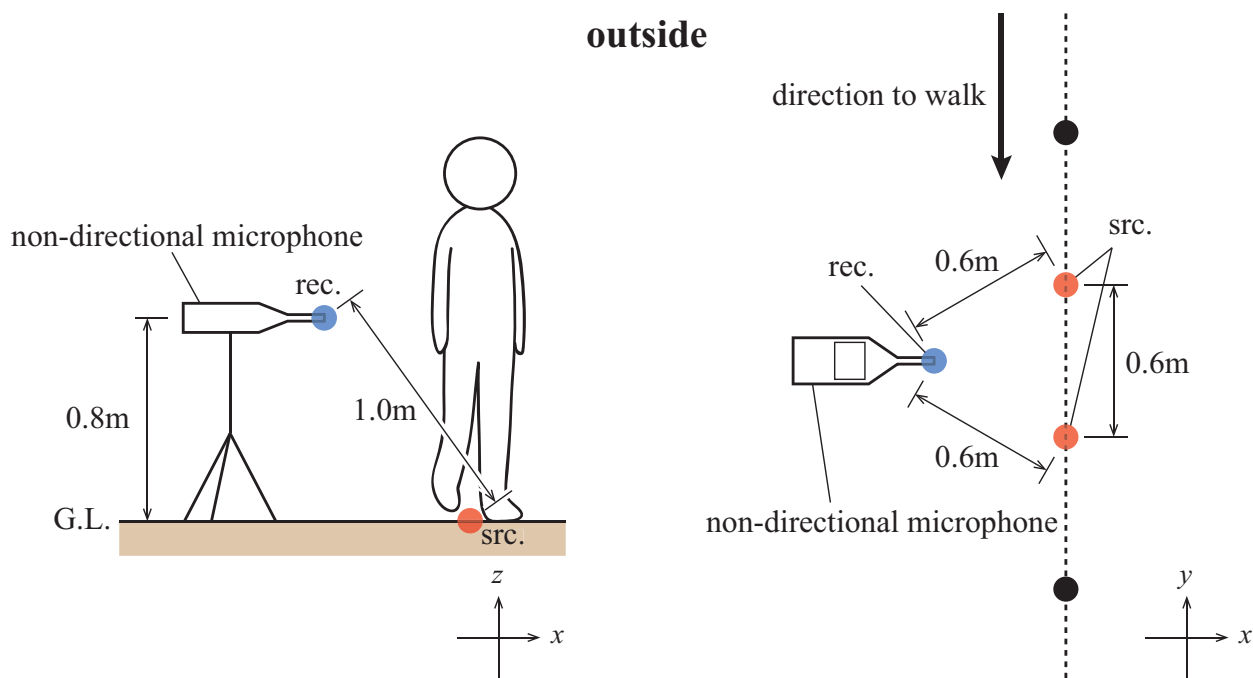


Fig. 3.5 Recording condition of footsteps.

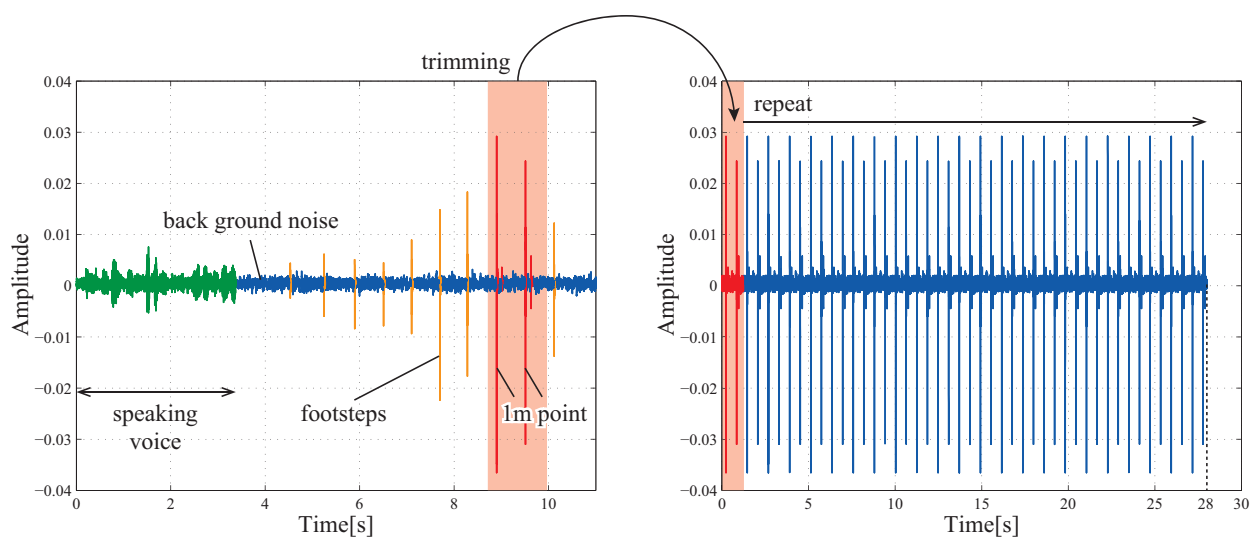


Fig. 3.6 Signal wave of footsteps sound.

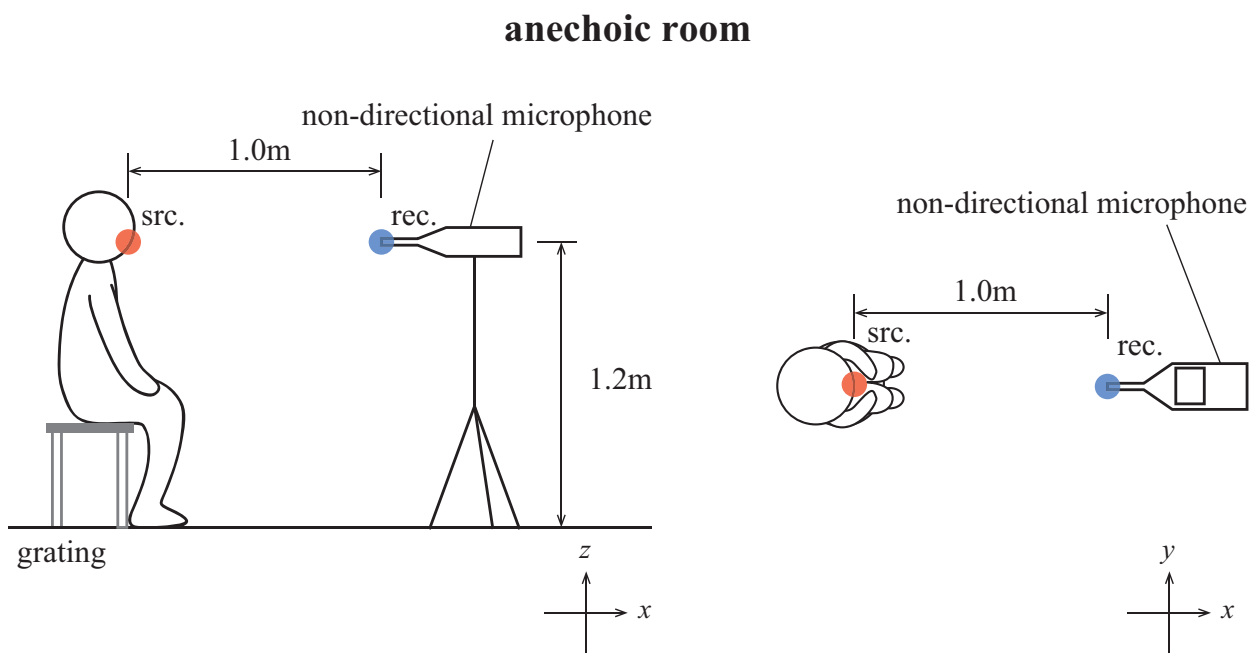


Fig. 3.7 Recording condition of speaking voice.

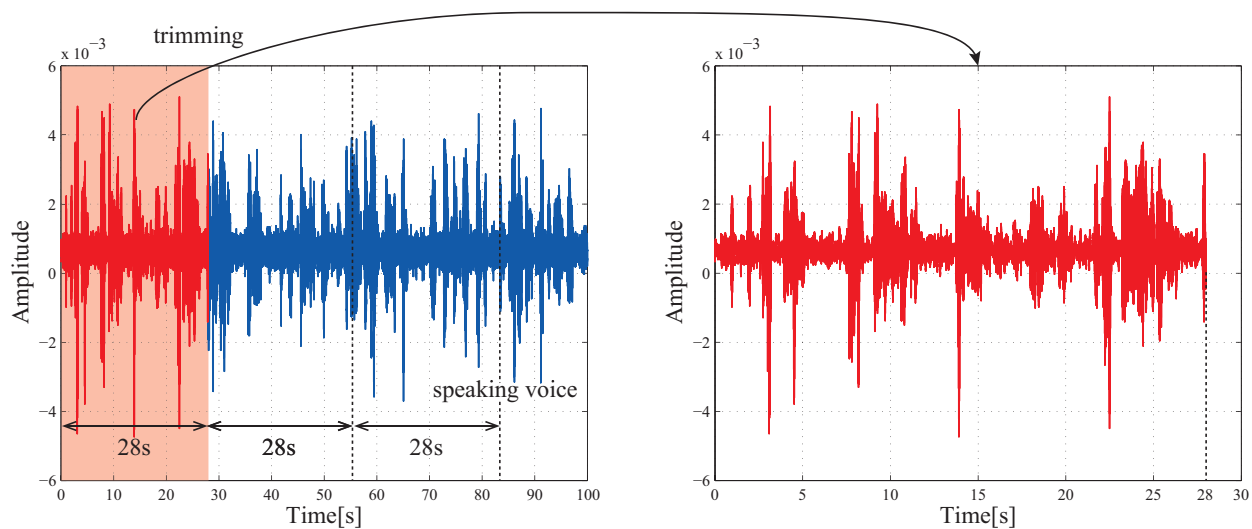


Fig. 3.8 Signal wave of speaking voice.

3.3 幾何音響解析による雑踏音場の模擬

幾何音響解析のアルゴリズムを使用して、多数の音源が移動する雑踏音場を模擬する。以下に雑踏音場の模擬にあたって設定した各種音源条件、再生条件、空気吸収、位相の付加について説明する。

3.3.1 音源数

音源として採用した空調音・足音・話し声のうち、足音・話し声は移動することが考えられ、実際の公共空間において一定時間の音の数を観察した場合、流動的であり一定数になることは考え難い。シミュレーションではその流動的な音源数を模擬することは難しいため、何らかの規則に従って時間内の音源数を一定数にする。本シミュレーションでは、空間の床(天井)面積 S_{total} (m^2)、人口密度 S_{person} ($\text{人}/\text{m}^2$) のとき、空調の数 N_N 、足音の数 N_F 、話し声の数 N_T はそれぞれ

$$N_N = \left[\frac{S_{\text{total}}}{64} \right] \quad (3.1)$$

$$N_F = \left[\frac{S_{\text{total}}}{S_{\text{person}}} \times 0.8 + 0.5 \right] \quad (3.2)$$

$$N_T = \left[\frac{S_{\text{total}}}{S_{\text{person}}} \times 0.2 + 0.5 \right] \quad (3.3)$$

で決定することとした。なお $[\]$ はガウス記号とする。空調音は床(天井)面積 64 m^2 に1つ設置するものとし、小数点以下は切り下げる。足音と話し声は一人あたり床面積によって決定する。人による全音源数 $S_{\text{total}}/S_{\text{person}}$ の1つは足音または話し声のどちらか一方を発生し、足音と話し声の割合は足音：話し声 = 4：1 とし、小数点以下は四捨五入した。なお式 3.23.3 中の“+0.5”は四捨五入によるものである。

3.3.2 音源配置

受聴位置は常に室中央の高さ 1.5 m の位置とする。空調は天井面に均等配置されるものと仮定し、図 3.9 の緑色の●で示すように 8 m の正方形グリッド上に固定する。足音は床面(高さ 0 m) の 4 m グリッド上を4秒ごとに移動することで $1 \text{ m}/\text{秒}$ の移動を模擬し、話し声も高さ 1.5 m で足音と同様に移動する(図 3.9 の青色・水色の●)。

足音と話し声は高さが異なる以外は同じように移動する。ここではある音源の x - y 平面での移動を考える。数値解析の観点から考えたとき、ある1点の場所にいる場合はその点におけるインパルス応答を算出するが、移動する場合はその移動経路上に幾つもの点を取り、多数のインパルス応答を算出する必要がある。細かく点をとるほど移動の模擬が滑らかに出来ると考えられるが、数が増えるほど計算負荷が大きくなるため、ある程度の間隔を開けて点をとらなければならない。そこで今回は試行的に 4 m 間隔で点をとることとした。また音源によって歩行速さは異なるが、便宜的に全音源が同じ速さで移動すると仮定し、歩行速さはおよそ一般的な歩行の速さとして 1 m/s とした。計8点選定することで28秒間の音源を作成した。

移動する音源の配置は以下の方法でランダムに設定する。室寸法 $x \times y$ の時、移動の初めの位置 $P(P_x, P_y)$ は整数の乱数 $n_x(0 \leq n_x \leq n_{x\max}), n_y(0 \leq n_y \leq n_{y\max})$ によって図 3.9 に示す 4 m のグリッド上に決定する (P_x の場合：式 3.4, P_y のときも同様)。

$$\begin{aligned} n_{x\max} &= \left\lfloor \frac{x}{4} \right\rfloor \\ P_x &= n_x \times 4 - n_{x\max} \times 2 - 2 \end{aligned} \quad (3.4)$$

次の点の移動方向は、 y 軸方向に隣接するグリッドのどちらかとし、乱数によって移動方向を決定する。その後は同じ方向に移動し続けるが、図 3.10(a) の $3 \rightarrow 4 \rightarrow 5$ のように壁にぶつかる場合は、それまで移動していた y 軸方向と逆向きの y 軸方向に移動する。図 3.10(b) の $1 \rightarrow 2$ のように初めの位置が y 軸グリッドの端で、次の移動方向を壁にぶつかる方向と判断した場合は、 x 軸方向に隣接するグリッドのどちらかに乱数によって移動し、さらに次の移動では壁にぶつからない方向に移動する。また、 $x = 0$ の y 軸上を移動している場合、受聴位置 $(0, 0)$ は通らず、図 3.10(c) の $2 \rightarrow 4$ ように x 軸方向に隣接するグリッドのどちらかに移動して y 軸方向にも移動し続ける。以上の移動を繰り返し計 7 回行い、8 点を選定する。

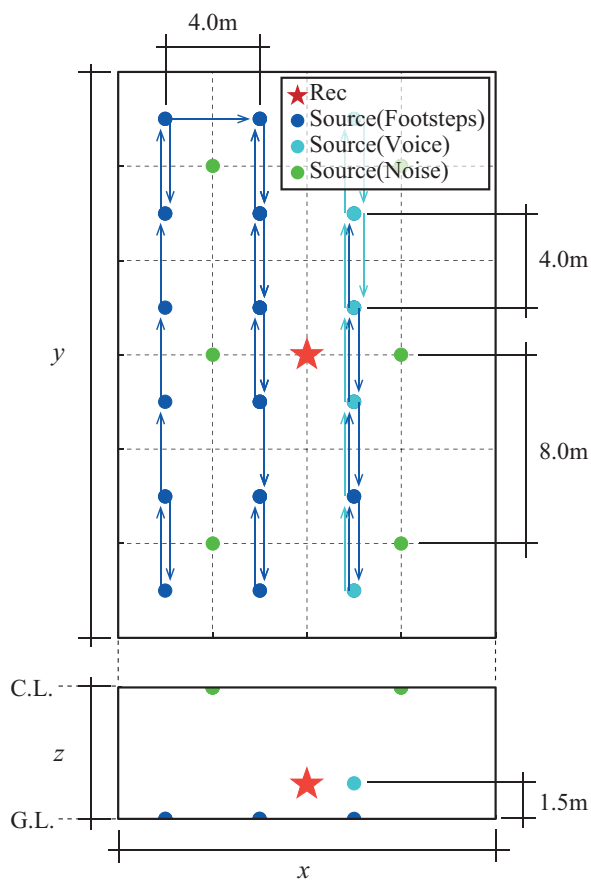


Fig. 3.9 An example of Sound sources' position .

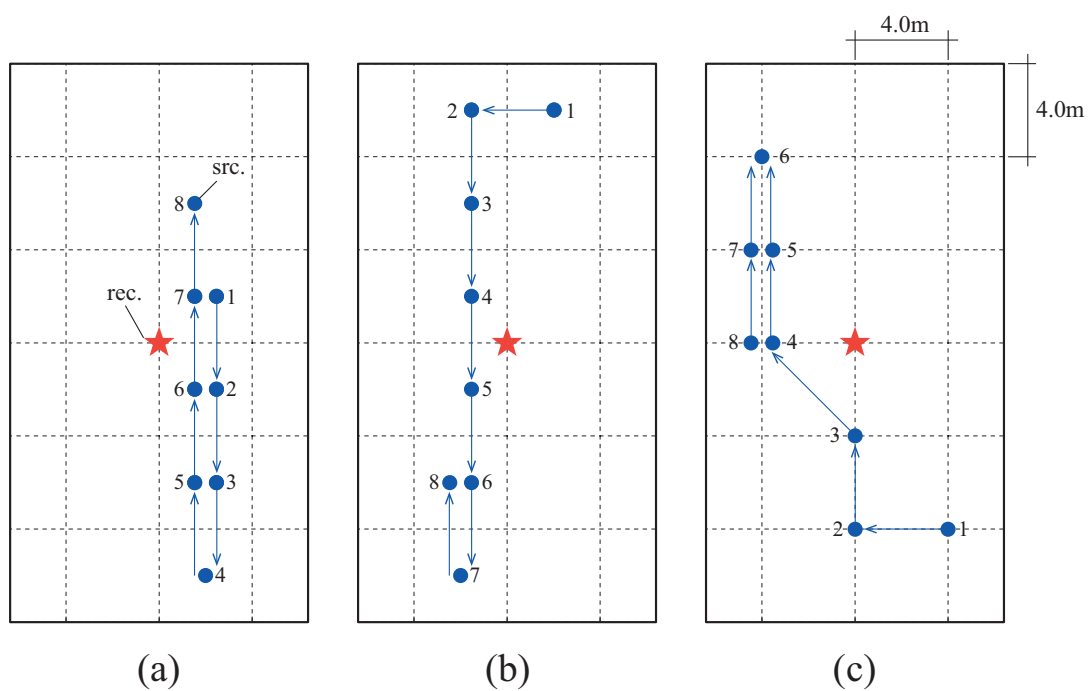


Fig. 3.10 Examples how sound source move.

3.3.3 音源移動の模擬

前項で述べたように、足音・話し声は移動を模擬するため 1 つの音源に対して複数の座標を選定した。選定した各座標に対してそれぞれインパルス応答を算出するが、対応する音源に畳み込んで $1 \rightarrow 2 \rightarrow \dots \rightarrow 8$ の順に単純に 4 秒ごとに再生すると、4 秒間定位置で足踏みを行って突然 4 m 移動していることの繰り返しに聞こえてしまい、不自然である (図 3.11)。従って図 3.12 のようになめらかに音源の移動を模擬するためには工夫が必要となる。音源を滑らかに移動させるための工夫を行っている研究としては、朝倉による自動車走行音のシミュレーション [5] などが挙げられる。

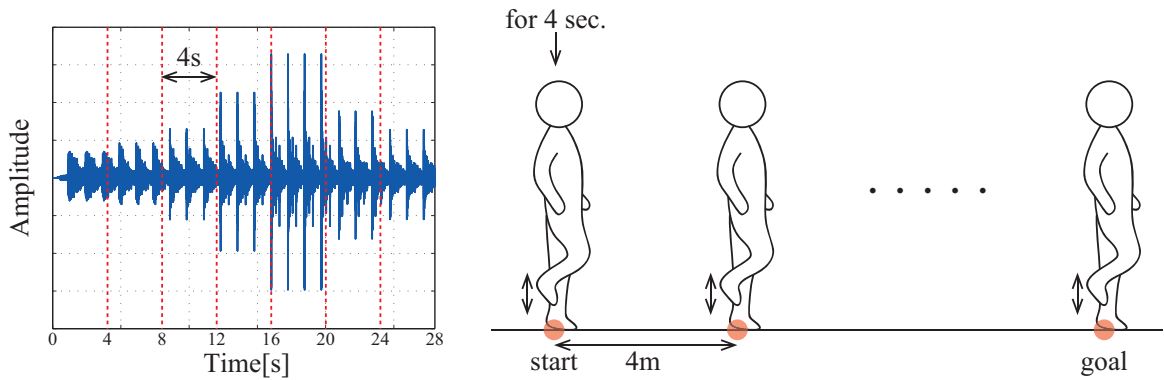


Fig. 3.11 Failure case of creating moving sound sources.

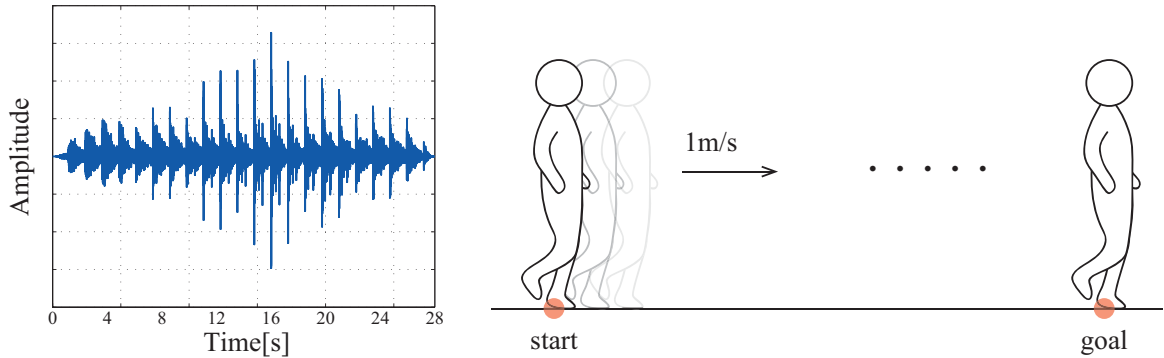


Fig. 3.12 Successful case of creating moving sound sources.

本システムでは以下に説明する時間窓を掛けることで滑らかな移動を模擬した。対象とする m 番目の音源 src_m のとき音源の信号を $s_m(t)$ とし、8 点のインパルス応答のうち n 番目のインパルス応答の信号を $h_{m,n}(t)$ とおく。また正弦波からなる n 番目の時間窓関数を $w_n(t)$ とし、どの音源についても同様に図 3.13 の特性を有する。この時、生成される音源信号 $S_{m,n}(t)$ は以下の式で表される。

$$S_{m,n}(t) = \Sigma\{s_m(t) * h_{m,n}(t) \times w_n(t)\} \quad (3.5)$$

図 3.13 のように、はじめに音源と各点のインパルス応答を畳み込んで n 番目の位置における響きの付加された音を 8 個作成する。次に各点に対応する時間窓をそれぞれ掛けることで、各点に到達する時間を

中心とした時間の重み付けがなされ、各点の音源が出来る。さらにそれらを音源ごとに全て足し合わせると、点と点の間においては隣り合う点の特性が滑らかに移り変わる事となり、滑らかな移動が模擬される。なお足し合わせ時の位相のずれを防ぐため、同じ音源のインパルス応答は同じ音線を用いて作成している。

3.4 その他各種設定方法

3.4.1 空気吸収

音は伝搬する際エネルギーが媒体に吸収されて減衰していく。空気の吸収は減衰率 $m(\text{m}^{-1})$ で与えられ、温度・湿度によって変化する [3][4]。この空気吸収を考慮するため、減衰率 m から減衰係数 e^{-mct} を式 3.6 によって算出し、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に時間領域で掛け合わせる事によって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。気温 15 °C、湿度 50 % のときの減衰率と減衰係数を図 3.14, 3.15 に示す。低音域では減衰が非常に小さく、1k,2k Hz 以上から影響が大きく、4k,8k Hz では 1 秒程度でも大きく減衰することがわかる。

$$I_t = I_0 e^{-mct} \quad (3.6)$$

3.4.2 音圧レベル

空調音の音圧レベルは、空調音 1 つ分の面積である 64 m² あたりの音響パワーレベルを約 72 dB、1 m² あたりでは 54 dB になるように基準化を行った。この値は室寸法 16 m× 24 m× 8m(H)、壁面における 125 Hz - 8k Hz の平均吸音率が 0.079 の反射性の空間において、天井に 8 m 間隔で合計 6 個の空調を設定した場合に、室中央高さ 1.5 m 地点における空調音のみの音圧レベルが 40 dB になるように調整したときの音響パワーレベルである。

足音、話し声の平均音響パワーレベルはそれぞれ 73.6, 69.3 dB である。これらは録音時の音圧レベルを再現するため、1 m 点における音圧レベルが録音時と同レベルになるように、1 m 点におけるインパルス応答の最大値で基準化を行った。

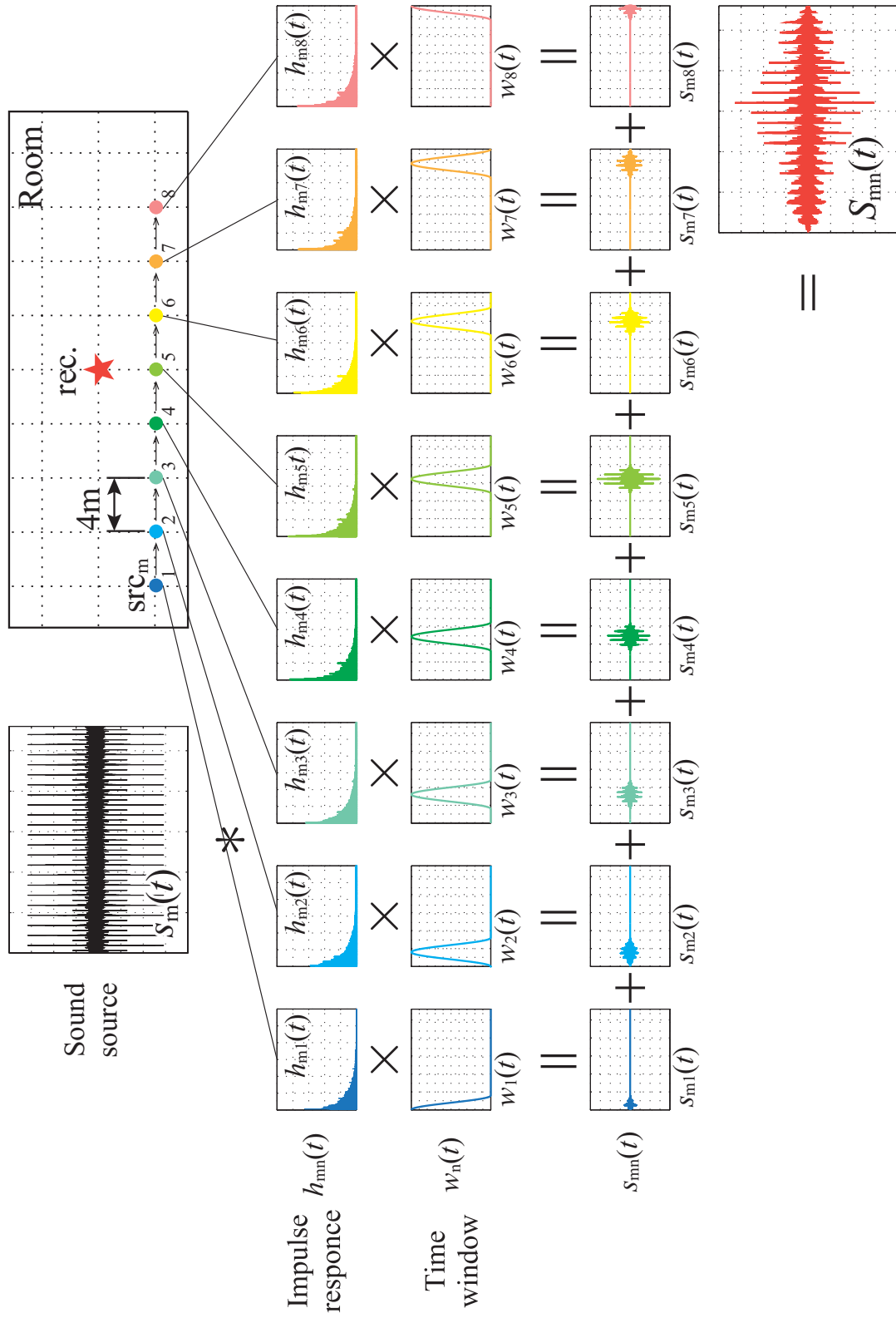


Fig. 3.13 Method of creating moving sound sources.

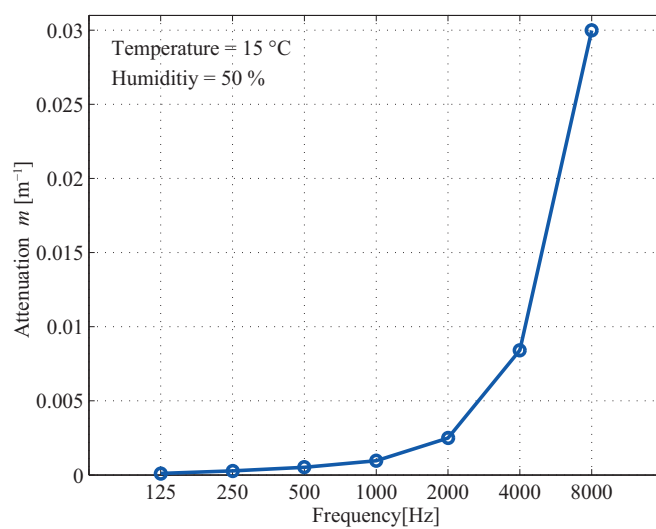


Fig. 3.14 Attenuation due to air sound absorption.

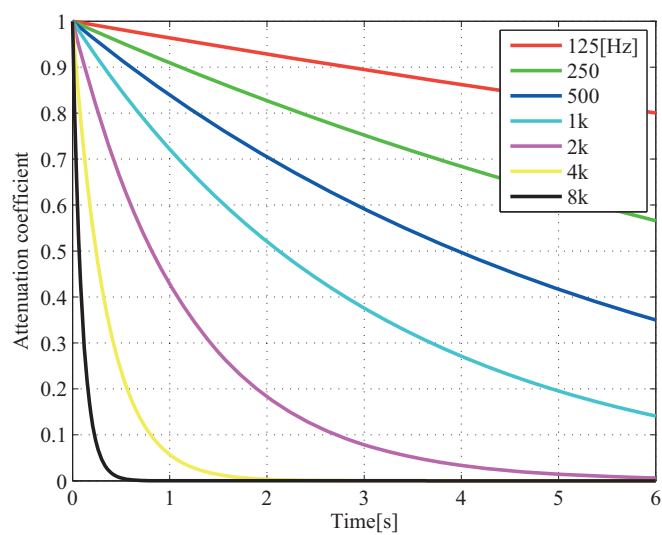


Fig. 3.15 Attenuation coefficient due to air sound absorption.

第 4 章

システムの妥当性の検証

4.1 はじめに

前章では公共空間の音環境の予測・評価を目指し、公共空間の音環境の可聴化シミュレーションシステムの構築を行った。本システムは、移動せずに様々な音を聞くことが出来るため、少ない負担で多くの主観評価実験を行えるという利点がある。また室寸法や吸音条件をシステム上で自由に変化させることができ、設計の前段階で空間の評価が可能である。ただし、設計の前段階の適用にあたっては以下の問題点が挙げられる。

- 無響室内で受聴するため、視覚情報の違いが空間印象に影響を与える可能性がある
- 幾何音響解析を用いているため、音の反射・吸音・拡散が忠実でない
- 設計空間の特性の違いが印象に与える影響の程度が不明である

従って、本システムを用いた際の妥当性や適用可能範囲について検証する必要がある。本システムの検証には、残響時間や音圧レベルなどの基本的な物理指標に加えて、主観評価を用い、空間の評価を行う。

第 2 節では実際の空間の音場 (実音場)、実際の空間の音を録音し 6 チャンネル再生システムから再生した音場 (再生音場)、実際の空間の音を前述のシミュレーションシステムを用いて作成・再生した音場 (仮想音場) をそれぞれ用意し、音場によって音響物理指標値と心理印象がどのように対応しているかを確認する。さらに第 3 節では仮想的な空間のを複数作成し、それらの音場を聴き比べた時の印象を各物理条件と比較することで、条件を変化させた時に有意な印象差を得られているかを確認する。

4.2 実空間の音場の再現性に関する検討

公共空間の音環境を幾何音響シミュレーションと6チャンネル音場再生システムを用いて作成し(仮想音場), 実音場・再生音場・仮想音場の3つの空間で同じ主観評価実験を行う。実音場における主観評価実験時には, 6チャンネル音場再生システム(再生音場)における主観評価実験のための收音を行った。なお, 主観評価実験を行う空間の特性を把握するため, 室の大きさはあらかじめ測定した。

4.2.1 実験概要

実音場における主観評価実験

公共空間の実音場における心理印象を確認するため, 公共空間の一例として東京都内のオフィスビルの一部となっているロビー・アトリウム計4箇所を実験の対象空間に選定し, 主観評価実験を行った。実験日は2014年4月28日(月), 時間は勤務者の出入りが多い昼休みを狙い午後12~13時の間とした。被験者は20~40代の本研究室に所属する正常な聴力を持つ男女5名, 所要時間は1箇所あたり10分程度で移動時間を含め計1時間程度である。また, 主観評価実験を行うと同時に6チャンネル收音システムを用いて収録を行った。



Fig. 4.1 Subjective evaluation in real sound field.

■対象空間 表 4.1, 図 4.2 に対象とした東京都内のオフィ스로ビー, アトリウムについて示す。公共空間には様々な音があるが, 本研究で作成するシミュレーションシステムではサイン音, BGM 音, 拡声放送などの特殊な音を省き, 足音・話し声・空調音のみを模擬することで, いわゆる暗騒音を作成する。本検討ではその雑踏による音場の再現性確認を行うため, 鉄道駅・商業空間などの特殊な音が多い空間を避け, 特殊な音の少ないオフィ스로ビーや多目的なアトリウム空間を対象とした。また, 多くの空間の印象実験を行うことによって, 一つ一つの空間の特異性が埋もれ実験結果の信頼性が高まるが, 本実験は予備的な実験という位置付けであり, できるだけ少ない実験数で結果を得ることを目指し, 以下の 4 箇所の空間を選定した。

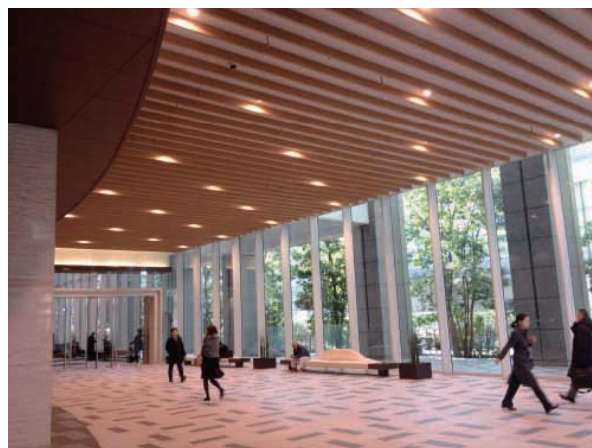
Tab. 4.1 Conditions of real sound field.

	Volume (m ³)	Floor space(m ²)	Length(m)			Absorption	The number of person
			Width	Depth	Height		
A	7,531	768.5	14.5	53	9.8	Reflective	0~10
B	1,839	334.28	12.2	27.4	5.5	Reflective	0~10
C	12,196	623	8.9	70	19.6	Reflective	30~40
D	252,000	4200	28	150	60	Absorptive(wall)	30~40

空間 A は, 室容積 7,500 m³, 壁 3 面がガラス張りのオフィ스로ビーで, 主に上階のオフィス勤務者が利用している。空間の片隅にソファが設置されており, 休憩・待ち合わせに利用できる。評価と收音はこのソファ近辺で行った。天井面・壁面・床面は全て反射性の材質で, 非常によく響く。発生音は雑踏音の他にオフィス出入口の”ピンポン”という音と, エスカレータによる低音の機械音が定常的に発生していた。空間 B は, 4 空間のうち最も小さい室容積約 2,000m³ の偏平なロビーであり, 隣接するホテル・オフィスの利用者が主に通行している。また短両辺に自動ドアがあり, 駅への通り抜け通路としても利用されている。A 空間と同様にソファが設置されており, 評価と收音はこのソファ近辺で行った。ドアを含めた壁 3 面はガラス張りで, 天井は木材のリブが施されているが, 吸音処理は行われていない。発生音は主に雑踏音であるが, 人通りがあるため両側の自動ドアが頻繁に開閉し, 屋外の車の走行音や隣接する空間で流れている水の音が聞こえる。空間 C は非常に細長く天井の高い通路型のアトリウムで, 室容積は約 12,000 m³ である。空間 B と同様に短両辺にドアがあり非常に人通りが多い。ソファなどの休憩スペースはなく, 各々壁付近で評価と收音を行った。天井は一部ガラス張り, 壁面は建物外壁のような作りで, 吸音処理は行われていない。発生音は主に人の足音・話し声で, 幅が狭いため音が近傍を人が通ることで音が大きく聞こえる。長両辺には商業店舗が並んでおり, 店内のレジの音は聞こえるが BGM 等は聞こえない。空間 D は, 4 空間のうち桁外れに大きい空間で, 室容積 200,000 m³ を超える巨大アトリウム空間である。室形状は直方体ではなく船底の形をしており, 天井と壁の半分がガラス張りとなっている。評価と收音を行った 1 階部分は壁片面に吸音処理を施してあり, 非常に大きな空間であるが 1 階部分ではそれほど響きが気にならない。通り抜けが可能であるためある程度の人通りがあるが, 空間の広さに対しては密度が低く, 吸音処理の効果もあり全体的に音が小さい。発生音は雑踏音が主で, その他にはオフィス出入口の”ピンポン”という音があった。



A



B



C



D

Fig. 4.2 Real sound field.

■**評価語** 公共空間の音環境に対する全体的な印象の確認を行うため、音環境の印象評価に用いられる評価語対から表 4.2 の 11 項目を選定した。音環境の総合的な印象の評価項目には『好み (好きな－嫌いな)』、『快適性 (快適な－不快な)』、『安心感 (安心な－不安な)』の 3 項目、音の基本要素の評価には『音の高さ (音が低い－高い)』、『音の大きさ (音が小さい－大きい)』、空間的要素には『賑やかさ (賑やかな－寂しい)』、『広がり (広がりを感じる－感じない)』、残響に関わる要素には『響き (響く－響かない)』、『明瞭性 (はっきりした－ぼんやりした)』、音源の認知に関する要素には『音の種類 (音の種類が少ない－多い)』、『音の数 (音の数が少ない－多い)』とした。評価語には、7 段階のうち両端と真ん中にそれぞれの評価項目にふさわしい程度を表す言葉として「非常に～」 「どちらでもない」 「非常に～」か「非常に～」 「多少～」 「全く～」を記入して提示した。実際に使用した評価用紙は付録 A を参照。

■**実験手順** 実験は全被験者に同じ音を聞かせるため、全員同時に行った。はじめに実験対象空間以外の場所で被験者に教示文と評価用紙を配布し、実験の内容・手順の説明を行った。次に被験者は対象空間内

Tab. 4.2 Evaluation terms for subjective evaluations.

	評価点数						
	3	2	1	0	-1	-2	-3
評価項目	形容詞対						
好み	非常に好きな	←	どちらでもない	→			非常に嫌いな
快適性	非常に快適な	←	どちらでもない	→			非常に不快な
安心感	非常に安心な	←	どちらでもない	→			非常に不安な
賑やかさ	非常に賑やかな	←	どちらでもない	→			非常に寂しい
音の種類	非常に音の種類が少ない	←	どちらでもない	→			非常に音の種類が多い
音の数	非常に音の数が少ない	←	どちらでもない	→			非常に音の数が多い
響き	非常に響く	←	多少響く	→			全く響かない
音の高さ	非常に音が低い	←	どちらでもない	→			非常に音が高い
音の大きさ	非常に音が小さい	←	どちらでもない	→			非常に音が大きい
広がり	非常に広がりを感じる	←	多少広がりを感じる	→			全く広がりを感じない
明瞭性	非常にはっきりした	←	どちらでもない	→			非常にぼんやりした

の指定した位置の近くに座り (立ち), 「始めてください」という実験者の合図で目を閉じた状態で 30 秒間程度音を聞いた。30 分経過の合図は行われず, 被験者は各々のタイミングで聞いた音に対する印象を評価用紙に記入された 11 項目 (表 4.2) に対して SD 法 (7 段階) で回答した。また「始めてください」の合図で收音も同時に開始し, 10 分間收音を行うため, 評価が終わってから收音が終わるまで被験者は静かに待機した。收音が終了したら次の空間に移動し同様の手順で実験を行った。本来主観評価実験では順序効果を考慮するために被験者によって提示の順番を変更させるが, 本実験では全員同時に行ったため順序効果を考慮せず, 全員空間 A, B, C, D の順とした。

再生音場における主観評価実験

公共空間の再生音場における心理印象を確認するため、先の実音場における主観評価実験時に6チャンネル收音システムを用いて收音した音源を用い、東京大学柏キャンパスの環境棟地下無響室にある再生システムを用いて再生し主観評価実験を行った。実験日時は2014年5月上旬、被験者は10~40代の正常な聴力を持つ男女10名、所要時間は1箇所あたり2分程度で説明の時間を含め15分程度である。ただし被験者10名のうち5名は本研究室に所属し、実音場実験にも参加した者である。



Fig. 4.3 Subjective evaluation in reproduced sound field.

■対象空間 対象空間は実音場実験と同様で表4.1に示す4箇所である。実音場における主観評価実験を行う際に、実験と同時に6チャンネル收音システムを用いて收音を行った。收音時間は各空間10分間行い、その中から特異な音が含まれていない1分間を切り取り、音源の最初と最後に数秒間の Fade in/out を掛け、実験音源に使用した。

図4.4に使用した音源の125 - 8k HzのオクターブごととAPの等価騒音レベルを示す。レベルの測定には精密騒音計(RION,NA-29)を用い、A特性、動特性Fast、測定時間50秒(Fade in/outの時間を除くため)で、6チャンネル再生システムの受聴位置(高さ1.2m)で測定を行った。空間Dは他の空間と比べて中音域・APで10dB程度静かで、歩行者密度の低さと吸音の効果が考えられる。その他3箇所の音圧レベルはそれほど大きな差はないが音場Bで中音域が少々高く、APでも音場A・Cと比較して2~3dB程度高いことが分かる。音場Bは最も空間が小さく、歩行者密度が高いことが要因と考えられる。なお実際に使用した音源の各チャンネルの時間波形と、主要な発生音については付録Bに示す。

■実験手順 実験は1人ずつ行った。はじめに被験者に教示文と評価用紙を配布し、実験の内容・手順の説明を行った。次に被験者は無響室の中央に配置された椅子に指定された方向を向いて座り、目を閉じた状態で1分間の音を聞いた。音は1分間流すが、30秒ほど経過した時点で被験者は各々のタイミングで聞いた音に対する印象を評価用紙に記入された11項目(実音場実験と同様で表4.2に示す)に対してSD法(7段階)で回答した。評価が終了したら次の音に移り同様の手順で実験を行った。順番は実音場と合わ

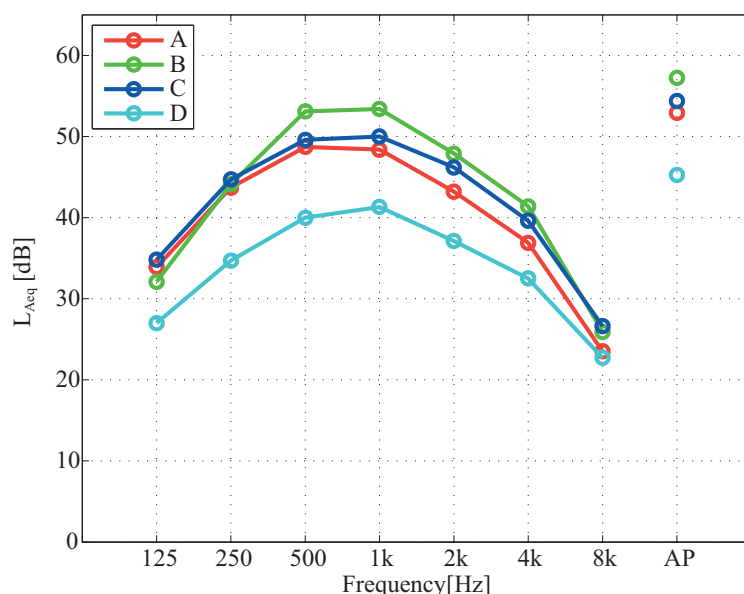


Fig. 4.4 A-weighted sound pressure level of reproduced sound field.

せ、全員に対して空間 A, B, C, D の順とした。また被験者の内半数の 5 名が実音場における実験の被験者であるため、聞いた音から空間が想像されることが予測されるが、特に空間に関する情報は与えずに全被験者同様に音源を聞かせた。

仮想音場における主観評価実験

幾何音響解析と 6 チャンネル音場再生システムを用いて作成した公共空間の仮想音場における心理印象を確認するため、実音場・再生音場で対象とした空間の音環境を幾何音響解析で作成し、東京大学柏キャンパスの環境棟地下無響室にある再生システムを用い、主観評価実験を行った。実験日時は 2014 年 11 月下旬～月上旬の 2 週間程度にかけて、被験者は 10～20 代の正常な聴力を持つ男女 20 名、所要時間は 1 箇所あたり 2 分程度で説明の時間を含め 15 分程度である。ただし被験者 20 名のうち 4 名は本研究室に所属し、実音場実験にも参加した者である。

■対象空間 実音場・再生音場で対象とした 4 空間を対象とする。実音場では既存の公共空間を対象としたため、正しい室容積・辺の長さや実際の吸音率が不明であり、また音源の数は常に変化し制御が不能であった。それに対して仮想音場ではそれらの全ての物理・音源条件を決定して音場を作成する必要がある。図 4.5 に本実験で作成した空間のイメージ図、表 4.3 に空間の物理条件を示す。実際の空間は複雑な形状をしているが、簡易的に再現するため全て直方体型に単純化した。特に音場 D の実空間は船底のような形状をしているが、仮想音場では直方体にしたために大きく形状が異なる。また、便宜的に与えた吸音率を表 4.4 に示す。音場 A・B・C は全面反射性で壁面と天井面は石膏ボード、床面は石張りとし、音場 D は吸音壁面のみ岩綿吸音板として、[41] の値を与えた。

前章で構築した雑踏音場シミュレーションシステムを用い、前述した 4 空間の音源を作成した。図 4.7

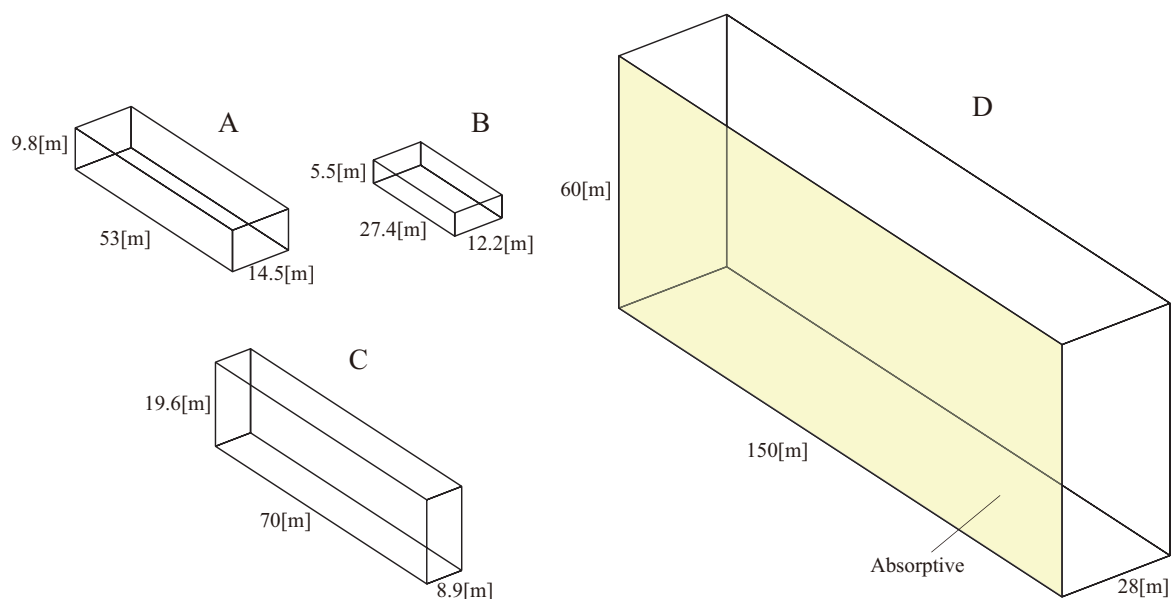


Fig. 4.5 An image of virtual sound spaces.

Tab. 4.3 Conditions of virtual sound fields.

	Volume (m ³)	Floor space(m ²)	Length(m)			Absorption	The number of person
			Width	Depth	Height		
A	7,531	768.5	14.5	53	9.8	Reflective	10
B	1,839	334.28	12.2	27.4	5.5	Reflective	10
C	12,196	623	8.9	70	19.6	Reflective	30
D	252,000	4200	28	150	60	Absorptive(wall)	30

Tab. 4.4 Absorption coefficient.

		Absorption coefficient (Frequency[Hz])						
		125	250	500	1k	2k	4k	8k
Reflective	wall,ceiling : plaster board 9 12mm width air layer 45mm	0.26	0.13	0.08	0.06	0.06	0.06	0.06
	floor : pitched stone	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03
Absorptive(wall)	wall,ceiling : plaster board 9 12mm width air layer 45mm	0.26	0.13	0.08	0.06	0.06	0.06	0.06
	Absorptive wall : rock wool 15mm width air layer 300mm	0.40	0.35	0.45	0.55	0.65	0.75	0.85
	floor : pitched stone	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03

に使用した音源の 125Hz - 8kHz のオクターブバンドごとと AP の等価騒音レベルを示す。また参考値として空調音のみのときの AP の等価騒音レベルも示した。レベルの測定には精密騒音計 (RION,NA-29) を用い、A 特性、動特性 Fast、測定時間 20 秒 (Fade in/out の時間を除くため) で、6 チャンネル再生システムの受聴位置 (高さ 1.2 m) で測定を行った。実音場と比較すると音場によっては低音域・高音域で 5-10 dB 程度低下している。中音域では音場 A のレベルが 5 dB 程度低下しているが、他の 3 音場ではほぼ一致している。AP で見ると、音場 A は 5 dB 程度、音場 B は 3 dB 程度低下しているが、音場 C, D は 1 dB 以内の差にとどまっている。音場 A で等価騒音レベルが大幅に低下した原因としては、実音場ではエスカレータの運転による定常騒音が大きかったことが考えられ、また音場 B ではドアの開閉時に隣の空間から定常的な水流音や道路騒音が聞こえていたことが考えられる。

図 4.8 に 125Hz - 8kHz のオクターブバンドごとと Single(500,1k Hz の平均) の残響時間を示す。残響時間は幾何音響解析で得られたインパルス応答から算出した T_{30} である。なお、使用したインパルス応答は全ての空間において、高さ 1.5 m、音源・受音点間距離 16 m のものである (図 4.6)。比較的空間の小さい音場 B では他の音場と比較して 2 s 以上短い。音場 D は非常に大きな空間のため低～中音域では長い残響が確認できるが、高音域では比較的短くなっており、空気吸収と壁面吸音の効果と考えられる。

実際に使用した音源の各チャンネルの時間波形と、主要な発生音については付録の図 B.5-B.8 に示す。

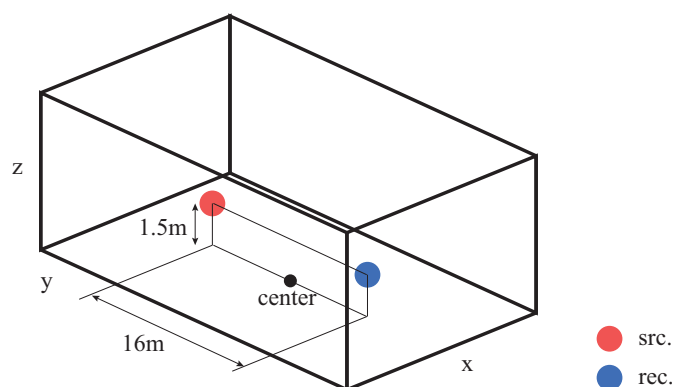


Fig. 4.6 Src. and rec. position of the impulse response calculated reverberation time.

■**実験手順** 実験は 1 人ずつ行った。はじめに被験者に教示文と評価用紙を配布し、実験の内容・手順の説明を行った。次に被験者は無響室の中央に配置された椅子に指定された方向を向いて座り、目を閉じた状態で 30 秒間程度の音を聞いた。音は 2 回流し、1 回目終了した時点で被験者は各々のタイミングで聞いた音に対する印象を評価用紙に記入された 11 項目 (実音場・再生音場実験と同様で表 4.2 に示す) に対して SD 法 (7 段階) で回答した。評価終了後次の音に移り同様の手順で実験を行った。本実験の被験者には、音の専門ではない人や、主観評価実験に慣れない者が多かった。そこで実音場・再生音場の時と異なり、1 つ目にダミー音源として対象の空間以外の音を用いて練習を行い、合計 5 空間の音環境を評価させた。被験者には 1 つ目が練習である旨を伝えていない。2 つ目以降の順番は実音場・再生音場と同様で、全員に対して空間 A, B, C, D の順とした。

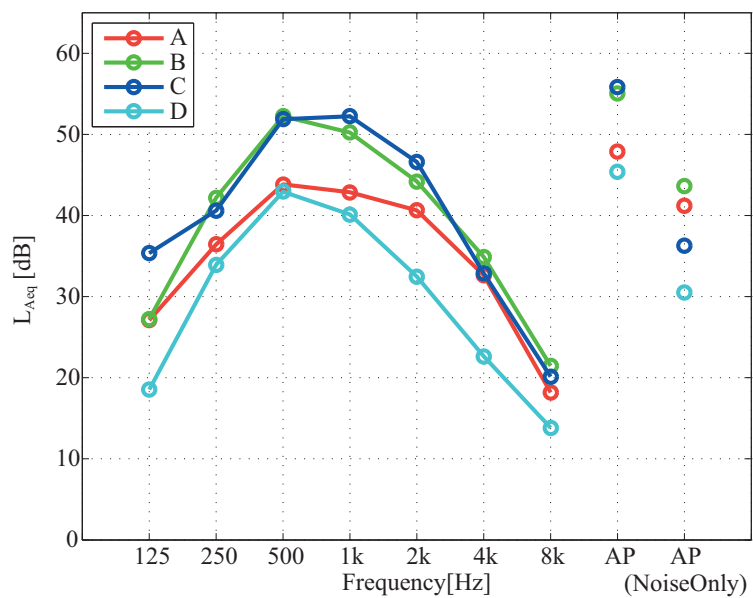
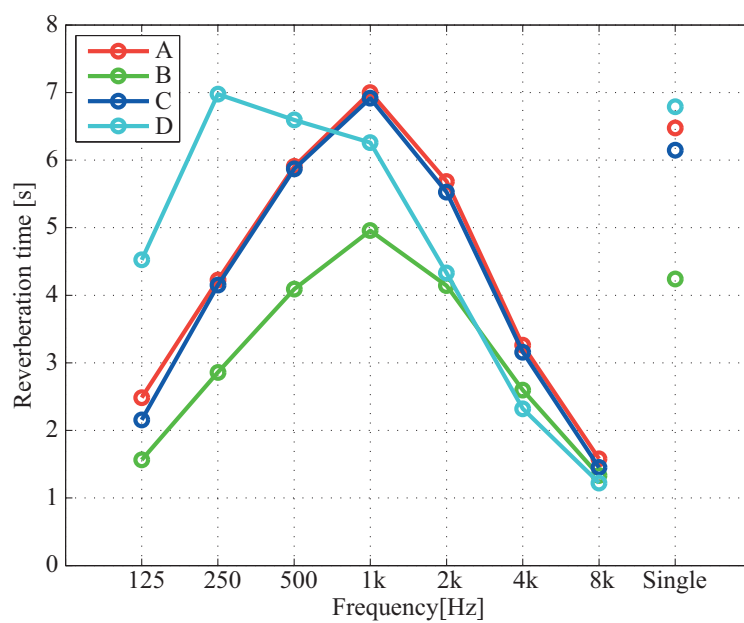


Fig. 4.7 A-weighted sound pressure level of virtual sound field.

Fig. 4.8 Reverberation time (T_{30}) of virtual sound field.

4.2.2 実験結果と考察

得られた評価値を用いて各種分析を行った結果を示す。本研究全体を通して分析には統計解析ソフト JMP Pro11 を用いた。

二元配置分散分析

はじめに得られたデータが十分に信頼性のあるものかを確認するため、有意性の確認を行う。分析には各実験音場における各評価語の個人評点を用い、空間条件 (4 条件) と被験者 (実音場 : 5 名, 再生音場 : 10 名, 仮想音場 : 20 名) の二元配置分散分析を行った。なお、実音場の実験名を Ex1, 再生音場の実験名を Ex2, 仮想音場の実験名を Ex3 と表記する。結果を表 4.5 に示す。

Tab. 4.5 One-way analysis of variance.

		好きな/ 嫌いな	快適な/ 不快な	安心な/ 不安な	賑やかな/ 寂しい	音の種類 が少ない/ 多い	音の数が 少ない/ 多い	響く/ 響かない	音が低い/ 高い	音が 小さい/ 大きい	広がり を感じる/ 感じない	はっきり した/ぼん やりした
Ex1	被験者間								*			
	条件間	*			**	**	**	**		**		*
Ex2	被験者間							*				
	条件間	*	*		**	*	*	**		**		*
Ex3	被験者間							*	*	*		
	条件間				**	**	**	**	**	**		

$p < 1\%$ (十分に有意)

$1\% \leq p < 5\%$ (有意)

$5\% \leq p$ (有意でない)

被験者間の主効果は、実音場では『音の高低』、再生音場では『響き』、仮想音場では『音の高低』と『響き』に加えて『音の大小』でも主効果が確認された。その他の項目については被験者間の主効果は確認されなかった。条件間においては、『賑やかさ』『音の種類』『音の数』『響き』『音の大きさ』の 5 項目では全実験音場において有意な差が得られた。『好み』『快適性』『はっきり感』の 3 項目では実音場・再生音場において有意な差が得られた。実際の音場ではサイン音などの仮想音場には存在しない音が発生しており、その音が総合的な印象であるこれら 3 項目の印象に影響している可能性がある。また、実音場では実験の前後に空間を視覚的にも捉えているため、聴覚以外の要因が影響した可能性も考えられる。反対に『音の高さ』は仮想音場においてのみ有意差が得られた。また『安心感』『広がり感』ではどの音場においても有意な差は得られなかった。『安心感』には、音がうるさいために不安に思う感じ方と、反対に人が多いために安心に思う感じ方があり、有意な差が得られなかった可能性がある。安全性へつながる印象とも言えるので、今後考察が必要である。

音場の違いによる傾向

各実験音場における平均評点を、空間条件(4条件)ごとにプロットしたグラフを図4.10に示す。なお平均評点と共に個人評点のバラつきとして、10%、90%、四分位範囲(25%、75%)、中央点(50%)、外れ値も示している。

二元配置分散分析で条件感で有意差が得られた『賑やかさ』『音の種類』『音の数』『響き』『音の大きさ』の5項目では、各実験の傾向が全体的に一致しており、これらの項目についてはある程度の再現性があるといえる。このうち音の大きさに関する評価項目である『賑やかさ』『音の大きさ』は表4.9の等価騒音レベル(AP)とよく一致しており、音圧レベルと音の大きさに関する印象は対応していることが見受けられる。また『音の種類』『音の数』についても、実際の種類や数とは異なり等価騒音レベルと同じ傾向を示しており、音圧レベルに影響を受けている可能性がある。『響き』は残響時間と対応することが予想されたが、最も響かない音場Bで全ての音場で『響く』と評価され、最も響いている音場Dはどの音場においても『響かない』という評価が得られており、実音場と仮想音場では一致しているものの、音響物理指標値とは一致しないという興味深い結果が得られた。

全実験で有意差が得られなかった『安心感』では仮想音場の音場Dを除くとある程度傾向が一致しているようであるが、差異が非常に小さいため、有意に一致しているとはいえない。また全実験で有意差が得られなかった『広がり感』は実験音場の違いによる明らかな傾向が確認できなかったが、全ての音場の評価値が正の値を示しており、全体的に広がりを感じる空間だったと言える。

『好み』と『快適性』の評価はほぼ一致しており、この2つの印象はほぼ同じものと言える。どの実験でも音場Dが比較的高評価になっているが、その他の音場において傾向の一致は確認できない。『明瞭性』は仮想音場の音場Dを除くとある程度傾向が一致しているようである。また実音場・再生音場の評価は『響き』と対応しているようであるが、仮想音場では対応が確認できない。『好み』『快適性』『明瞭性』については、実音場・再生音場では発生していたサイン音などの影響が大きく、仮想音場ではそれが再現できなかったために同じ傾向が確認出来なかったという事が考えられるが、定かではない。これらは一般に空間の印象を決める重要な評価項目であるため、何が原因となっているかを突き止め、仮想音場の再現性を上げるための工夫が必要であると言える。

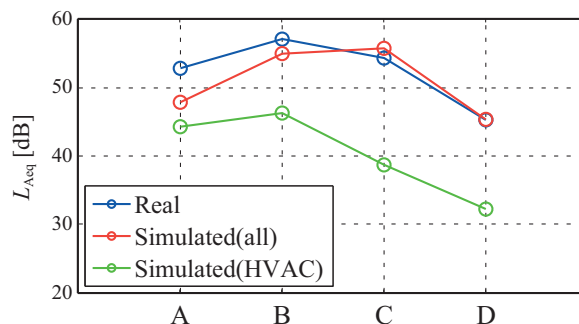


Fig. 4.9 L_{Aeq} for real and simulated sound fields.

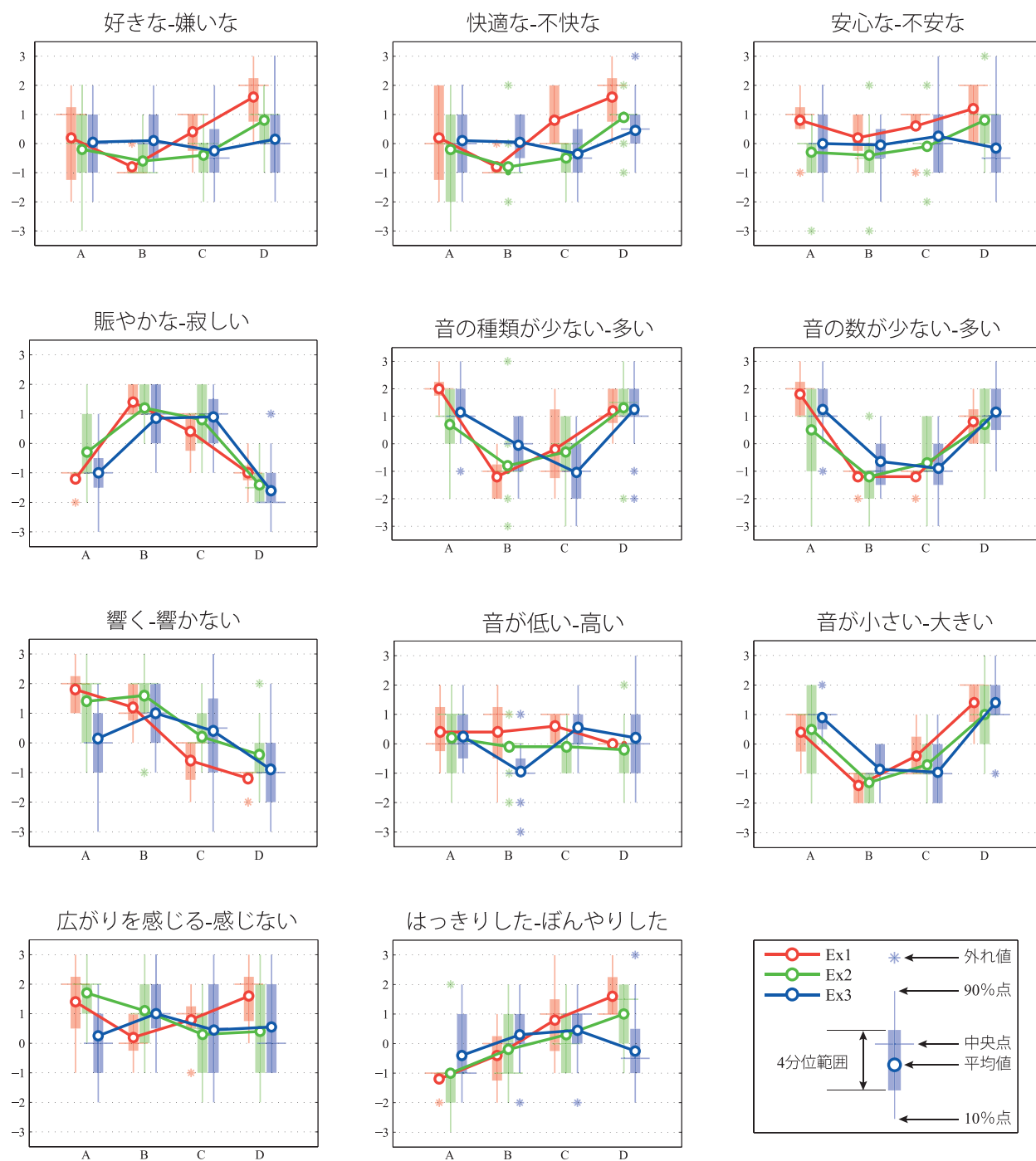


Fig. 4.10 Average evaluation score for all sound fields.

評価語の相関

二元配置分散分析において条件間に有意差が確認できた5項目について、評価語間の相関係数を算出した(図4.6)。色分けは $-1 \sim -0.7$, $-0.7 \sim -0.4$, $-0.4 \sim 0.4$, $0.4 \sim 0.7$, $0.7 \sim 1$ の5段階で行った。用いたデータは各音場の各条件における平均評点である。なお、今回の実験では条件が4条件しかないため、相関係数は1つの条件に大きく依存した値になることを承知の上で行っている。

同じ評価語で音場が異なる場合は全評価語で高い正の相関が得られ、音場の違いによる評価語の扱いの違いは無いことが確認された。『賑やかなさ』『音の種類』『音の数』『音の大きさ』の4項目間では全て高い相関が得られ、これらの項目の印象は大きく関係している可能性がある。『響き』は実音場、再生音場では他項目との相関が低いが、仮想音場では他項目との相関が高い。

Tab. 4.6 Correlation coefficient.

		賑やかな/寂しい			音の種類が少ない/多い			音の数が少ない/多い			響く/響かない			音が小さい/大きい		
		実音場	再生音場	仮想音場	実音場	再生音場	仮想音場	実音場	再生音場	仮想音場	実音場	再生音場	仮想音場	実音場	再生音場	仮想音場
賑やかな/ 寂しい	実音場															
	再生音場	0.880														
	仮想音場	0.905	0.967													
音の種類が 少ない/多い	実音場	-0.986	-0.801	-0.865												
	再生音場	-0.940	-0.989	-0.970	0.879											
	仮想音場	-0.745	-0.808	-0.922	0.746	0.802										
音の数が 少ない/多い	実音場	-0.923	-0.774	-0.892	0.958	0.836	0.881									
	再生音場	-0.981	-0.951	-0.966	0.947	0.985	0.820	0.910								
	仮想音場	-0.909	-0.882	-0.971	0.909	0.909	0.954	0.968	0.944							
響く/響かない	実音場	0.114	0.401	0.156	0.049	-0.332	0.161	0.233	-0.190	0.076						
	再生音場	0.374	0.597	0.373	-0.219	-0.552	-0.029	-0.023	-0.434	-0.159	0.964					
	仮想音場	0.803	0.965	0.867	-0.693	-0.943	-0.630	-0.606	-0.876	-0.732	0.622	0.787				
音が小さい/ 大きい	実音場	-0.914	-0.978	-0.918	0.833	0.986	0.694	0.748	0.955	0.827	-0.471	-0.678	-0.976			
	再生音場	-0.961	-0.977	-0.969	0.909	0.998	0.804	0.865	0.994	0.922	-0.284	-0.515	-0.922	0.979		
	仮想音場	-0.904	-0.959	-1.000	0.868	0.964	0.932	0.901	0.964	0.977	-0.128	-0.347	-0.852	0.908	0.964	

心理量と物理量の関係

条件間の有意差が得られた評価語のうち、音量と関係があると考えられる『賑やかさ』『音の大きさ』の2項目と L_{Aeq} の関係を図 4.11 に示す。また残響時間に関係があると考えられる『響き』と $T_{30}(500,1k\text{ Hz})$ の関係を図 4.12 に示す。

『賑やかさ』と L_{Aeq} は正の相関、『音の大きさ』『小さい』が正)と L_{Aeq} は負の相関が見られる。従ってこれらの2項目の印象は等価騒音レベルとの対応がある程度あるということが確認された。また、響きと残響時間については全体的に弱めの負の相関にある傾向が見られるが、値にバラつきがある。しかし条件が少ないため、この図からはっきりとした関係を述べることは困難であり、実験対象を増やし、条件を増やしてさらに関係性を確認する必要がある。

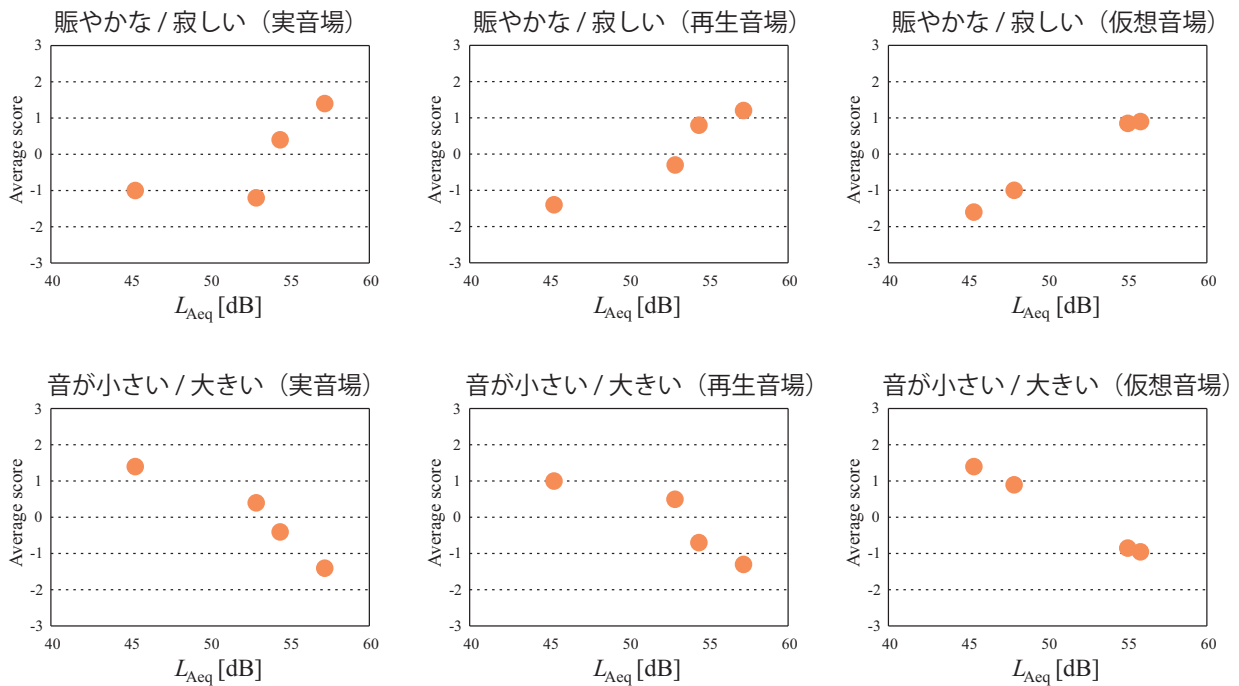


Fig. 4.11 Relationship between evaluation terms and L_{Aeq} (upper:Liveliness and L_{Aeq} ,lower:Loudness and L_{Aeq}).

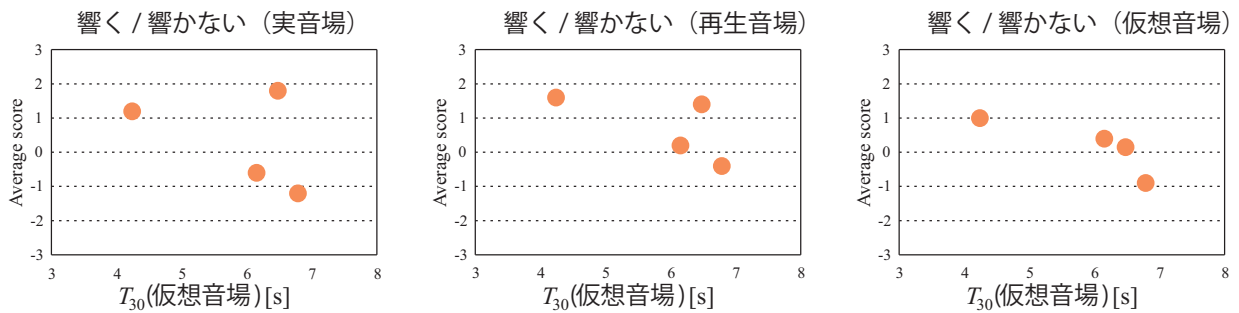


Fig. 4.12 Relationship between evaluation term and T_{30} .

4.3 室条件変化が印象へ与える影響に関する検討

シミュレーションシステムを用いて仮想音場を作成する際、室条件を十分に变化させたときに対応した印象が得られれば、再現性があるという考え方ができる。本検討ではこの考え方のもと、室条件を十分に变化させた時に、印象の変化が有意に有るかを確認することで、再現性の確認を行う。

4.3.1 実験概要

シミュレーションシステムを用いて作成した仮想音場において、室容積・室アスペクト比・吸音率・一人あたり床面積の各条件による印象への弁別の有無を確認するため、これらの条件を変化させた空間の音場を作成し、一対比較法による主観評価実験を行った。実験は東京大学柏キャンパスの環境棟地下無響室にある再生システムを用いた。実験日時は2014年11月下旬～12月上旬の2週間程度にかけて、被験者は10～20代の正常な聴力を持つ男女20名、所要時間は1対あたり5分程度で13対あり、説明と休憩の時間を含めて1時間強程度である。

対象空間

対象空間とした6空間の室条件を表4.7に、イメージを図4.13示す。また、実際に与えた吸音率を表4.8に示す。全て仮想の空間で、室容積・室アスペクト比・吸音率・一人あたり床面積の各条件変化の組み合わせを考えて決定した。空間Aは室容積約 $3,000\text{ m}^3$ の少し大きめの空間である。室アスペクト比は幅:奥行き:高さ=2:3:1、壁面と天井は石膏ボード、床面は石張りとし、吸音面はない。歩行者数は床面積 384 m^2 に対して24人、つまり一人あたり床面積は 16 m^2 であり、オフィスビルのロビーやアトリウムとしては高めの密度に設定した。この条件を基準条件とし、その他の空間はこの条件に対して1条件を変化させたものとする。空間Bは空間Aの各辺の長さを全て2倍、つまり室容積を8倍にしたものである。その他の条件はすべて空間Aと同様である。空間Cは空間Aの奥行きの長さのみを2倍にしたもので、従って室容積は2倍である。空間Dは空間Aの高さのみを2倍にしたもので、従って空間Cと同様に室容積は2倍である。空間Eは形状は空間Aと同じで、天井のみ岩綿吸音板(吸音性)にしたものである。空間Fは形状・吸音率は空間Aと同じで、歩行者の密度を2倍にしたものである。

Tab. 4.7 Conditions of virtual sound fields.

	Volume (m^3)	Floor space(m^2)	Length(m)			Absorption	The number of person	Space/ 1person
			Width	Depth	Height			
A	3,072	384	16	24	8	Reflective	24	16
B	24,576	1,536	32	48	16	Reflective	96	16
C	6,144	768	16	48	8	Reflective	48	16
D	6,144	384	16	24	16	Reflective	24	16
E	3,072	384	16	24	8	Absorptive	24	16
F	3,072	384	16	24	8	Reflective	48	8

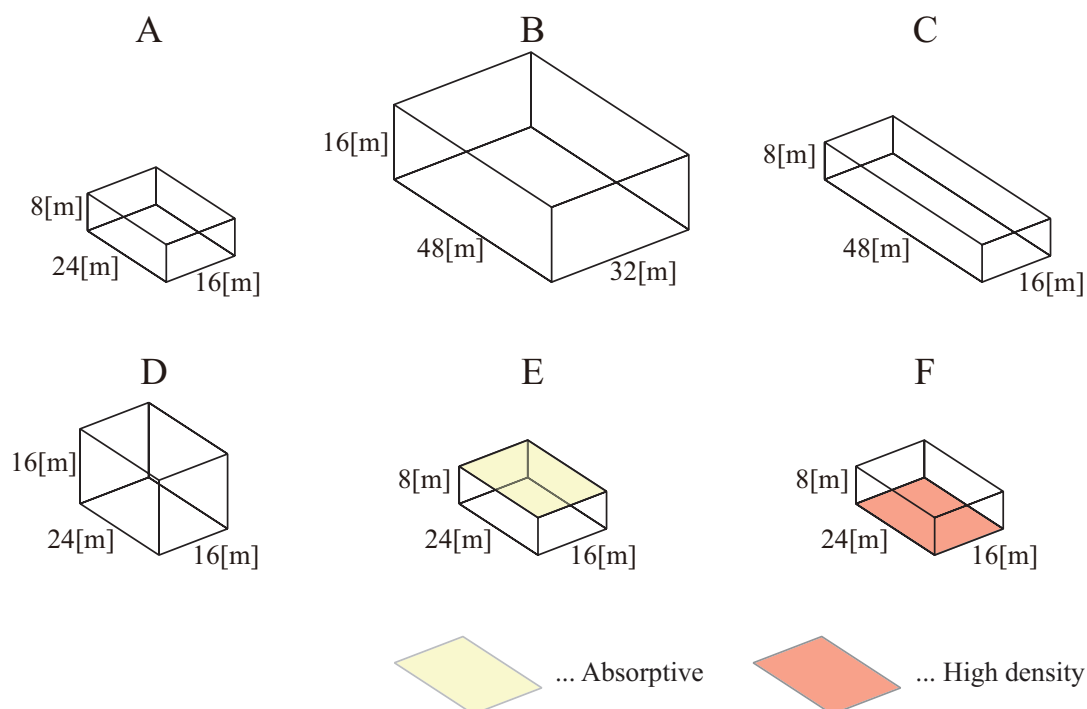


Fig. 4.13 An image of virtual sound spaces.

Tab. 4.8 Absorption coefficient.

		Absorption coefficient (Frequency[Hz])						
		125	250	500	1k	2k	4k	8k
Reflective	wall,ceiling : plaster board	0.26	0.13	0.08	0.06	0.06	0.06	0.06
	9 12mm width air layer 45mm	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03
	floor : pitched stone	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03
Absorptive(wall)	wall : plaster board	0.26	0.13	0.08	0.06	0.06	0.06	0.06
	9 12mm width air layer 45mm	0.40	0.35	0.45	0.55	0.65	0.75	0.85
	ceiling : rock wool	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03
	15mm width air layer 300mm	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03
	floor : pitched stone	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03

前章で構築した雑踏音場シミュレーションシステムを用いて、前述した 6 空間の音源を作成した。図 4.14 に使用した音源の等価騒音レベル、図 4.15 に残響時間を示す。音圧レベルの測定には精密騒音計 (RION,NA-29) を用い、A 特性、動特性 Fast、測定時間 20 秒 (Fade in/out の時間を除くため) で、6 チャンネル再生システムの受聴位置 (高さ 1.2 m) で測定を行った。残響時間は幾何音響解析で得られたインパルス応答から算出した。なお、使用したインパルス応答は全ての空間において、高さ 1.5 m、音源・受聴点距離 16 m のものである (図 4.6)。基準である音場 A と比較すると、等価騒音レベルは歩行者密度が 2 倍の音場 F で 3 dB 程度高くなっている。吸音条件の天井高さ 2 倍の音場 C と音場 E では 1 dB 程度低く、空調のみの場合も 1-2 dB 程度低い。また音場 C は空調音のみの場合で 2 dB 程度高い。残響時間は容積の大きい音場 B で基準に比べて 2 倍弱長くなっているが、高音域の割合は小さくなっており、空気吸収の効果が確認できる。また容積 2 倍の音場 C、D もそれぞれ 0.5~1 秒程度長い。吸音条件の音場 E

では 1/3 程度に短くなっている。

実際に使用した音源の各チャンネルの時間波形と、主要な発生音については付録の図 B.9-B.12 に示す。

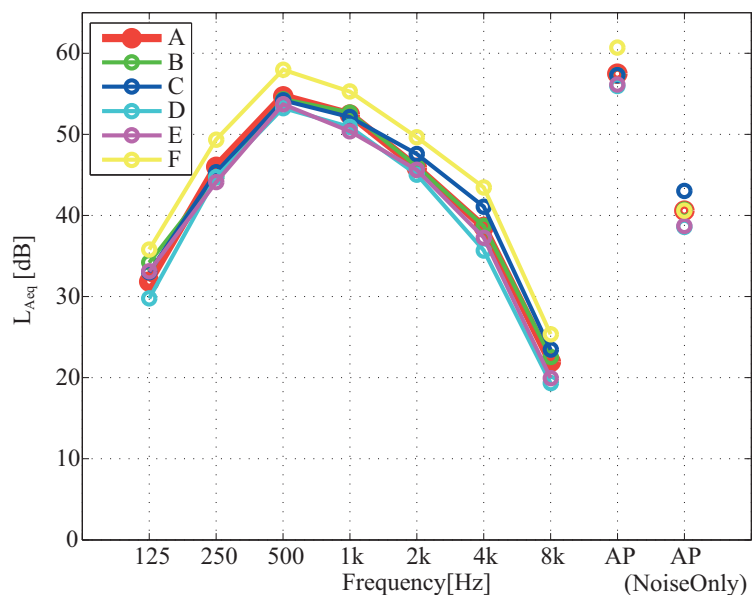


Fig. 4.14 A-weighted sound pressure level of virtual sound field.

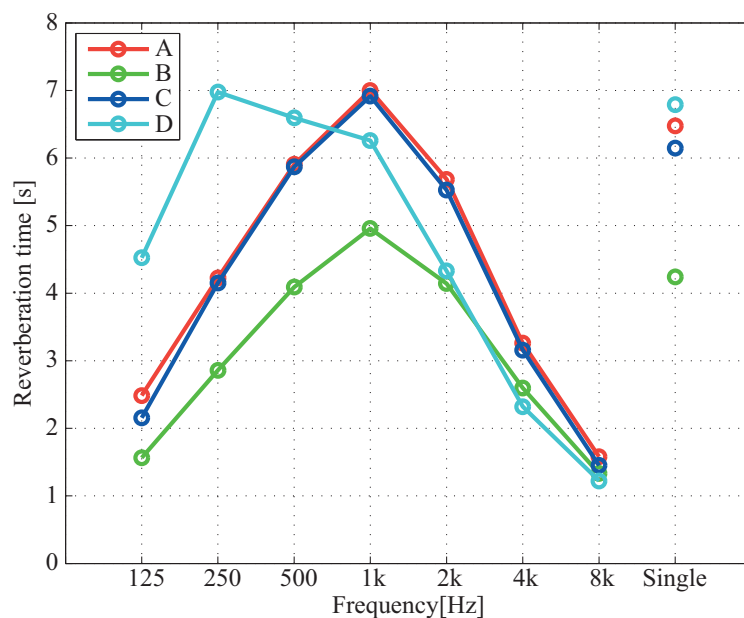


Fig. 4.15 Reverberation time (T_{30}) of virtual sound field.

組み合わせ

基本的には A を基準として各条件の変化を見るために組み合わせを考えた (図 4.16)。それぞれ、B/A は容積、C/A は奥行きと容積、D/A は高さと容積、E/A は吸音、F/A は歩行者密度を変化させた時の影響

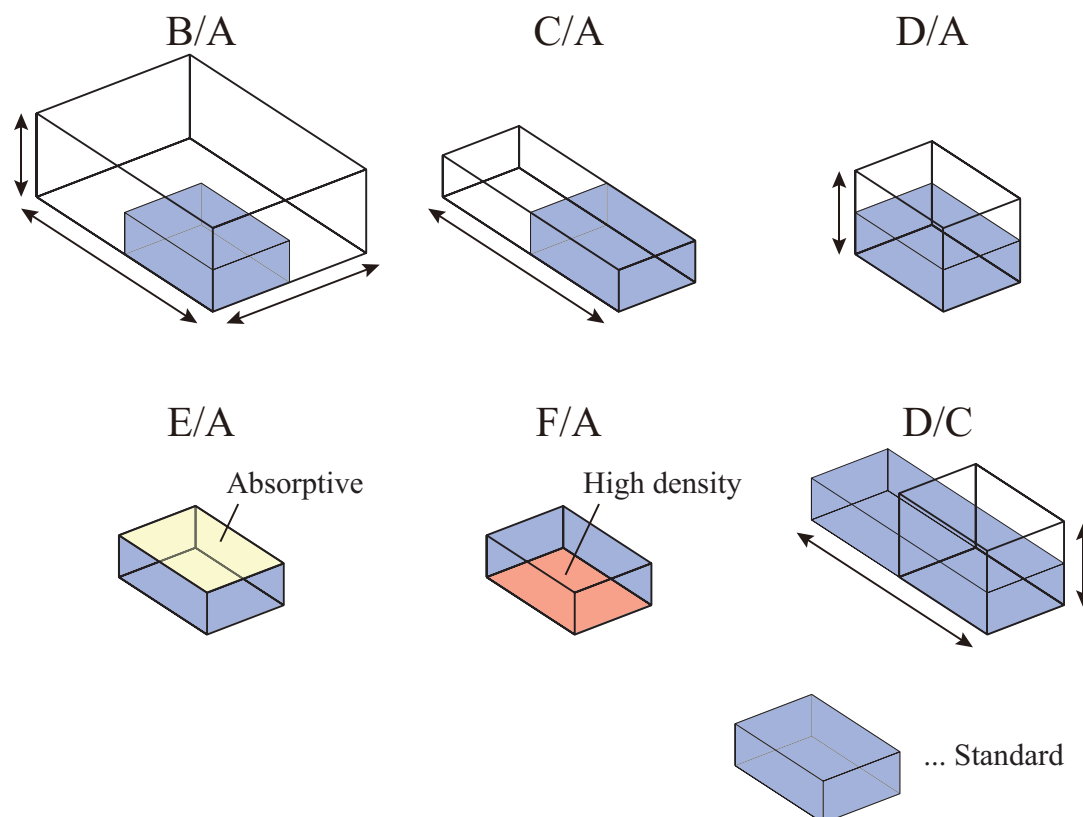


Fig. 4.16 Pairs of virtual sound spaces.

を見ている。また D/C は C を基準とし、容積が一定でアスペクト比を変化させた場合の影響をみている。

4.3.2 各データの扱いについて

条件ごとの一対比較実験で得られた心理量を扱うため、それに合わせて物理条件・音響物理指標値も条件ごとに比較した値で扱う必要がある。以下に物理条件、音響物理指標値の比較値の算出方法を述べる。

物理条件

室条件の比較値は比率と差分値で示す (表 4.9)。

- 辺の長さ，面積，容積：基準空間に対する比較空間の比率
- 人口密度：基準空間に対する比較空間の比率
- 吸音率：AP の平均吸音率で，基準空間に対する比較空間の差分値

音響物理指標値

音響物理指標値としては，音圧レベルと残響時間を用いる。それぞれ 125 - 8kHz の 1/1 オクターブバンドごとの周波数特性を測定・算出し，それぞれ 3 つの指標値に変換しデータを扱う。空間ごとの音響物理指標値を図 4.10 に，その差分値と変化量を図 4.11 に示す。差分値，変化量の算出方法は以下の通り。

Tab. 4.9 Pairs of virtual sound fields conditions.

	Volume	Floor space(m ²)	Length(m)			Absorption	The number of person	Space/ 1person
			Width	Depth	Height			
B/A	8	4	2	2	2	0	4	1
C/A	2	2	1	2	1	-0.002	2	1
D/A	2	1	1	1	2	0.007	1	1
E/A	1	1	1	1	1	0.128	1	1
F/A	1	1	1	1	1	0	2	1
D/C	1	0.5	1	0.5	2	0.5	0.5	1

■音圧レベル

- δ_{LAeq} [dB] : A 特性等価騒音レベルの基準空間に対する比較空間の差分値 (AP)
- δ_{Ll-m} [dB] : 中音域 (500,1k Hz) に対する低音域 (125,250 Hz) のレベル差の, 基準空間に対する比較空間の差分値
- δ_{Lh-m} [dB] : 中音域 (500,1k Hz) に対する高音域 (2k,4k Hz) のレベル差の, 基準空間に対する比較空間の差分値

■残響時間

- σ_{Tl} [%] : 低音域 (125,250 Hz) の基準空間に対する比較空間の変化率
- σ_{Tm} [%] : 中音域 (500,1k Hz) の基準空間に対する比較空間の変化率
- σ_{Th} [%] : 高音域 (2k,4k Hz) の基準空間に対する比較空間の変化率

※ただし基準空間, 比較空間の残響時間をそれぞれ T_A , T_B (s) とすると, 残響時間の変化率 σ_T % は以下の式で表される。

$$\sigma_T = \frac{T_B - T_A}{T_A} \times 100 \quad (4.1)$$

4.3.3 実験結果と考察

二元配置分散分析

基準に対する各条件の評価値が, 条件間 (6 対) で有意に差があるか, また被験者間 (20 名) による有意な差があるかを確認するため, この 2 条件による二元配置分散分析を行った。分析データには各評価語の個人評点を用いた。結果を図 4.12 に示す。

条件間では全評価語に有意差が確認されたので, すべての評価語で条件対ごとの違いが十分にあると言える。また『広がり』のみ被験者間で有意差があり, 被験者によって『広がり』の感じ方が異なる可能性がある。

Tab. 4.10 Acoustic physical measures.

	$L_{Aeq}[dB]$	L_{l-m}	L_{h-m}	$T_l[s]$	$T_m[s]$	$T_h[s]$
A	57.5	-10.6	-10.1	2.59	5.65	3.95
B	57.3	-11.5	-9.8	4.98	9.75	5.85
C	57.3	-10.7	-7.8	2.99	6.29	4.25
D	56.0	-10.4	-9.7	3.30	6.94	4.61
E	56.1	-10.9	-9.2	1.81	1.82	1.23
F	60.7	-10.3	-9.3	2.59	5.65	3.95

Tab. 4.11 Difference and ratio of Acoustic physical measures.

	$\delta L_{Aeq}[dB]$	δL_{l-m}	δL_{h-m}	$\sigma T_l[\%]$	$\sigma T_m[\%]$	$\sigma T_h[\%]$
B/A (Volume $\times 8$)	-0.2	-0.9	0.3	0.92	0.73	0.48
C/A (Depth $\times 2$)	-0.2	-0.1	2.3	0.15	0.11	0.08
D/A (Hight $\times 2$)	-1.5	0.2	0.4	0.27	0.23	0.17
E/A (Absorptive)	-1.3	-0.4	0.9	-0.30	-0.68	-0.69
F/A (Density $\times 2$)	3.2	0.3	0.8	0.00	0.00	0.00
D/C (Depth $\div 2$, Hight $\times 2$)	-1.3	0.3	-1.9	0.11	0.10	0.08

Tab. 4.12 Two-way analysis of variance.

	広がり 大きい/小さい	響く/響かない	うるさい/静か	キンキンする/ こもった
被験者間	**			
条件間	**	**	**	**

**	: $p < 1\%$ (十分に有意)		: $p \leq 5\%$ (有意でない)
----	---------------------	--	------------------------

基準と比較対象の有意差

本検討では基準に対して比較対象がどのように感じるかを数少ない組み合わせで答えさせた。従って通常の一対比較実験と異なり全組み合わせの結果を統計的に扱うことが出来ず、その傾向をひとつひとつ確認する方法で結果の考察をしていく。この方法を用いるにあたって、各比較対で十分有意に差が認識されているかという観点が重要となる。従って各空間条件・評価語ごとに仮説平均値を0として両側t検定を行い、得られたp値によって印象が有意に変化しているか分析を行った。結果を4.13に示す。

『響き』『うるささ』では全条件対で有意差が得られた。『広がり』については容積8倍(B/A)のとき有意差が得られず、十分に容積が大きくなっているにも関わらず室の広がりに対する印象がほとんど変化しなかったことがわかった。しかし容積が2.1倍のときに有意差が確認されており、『広がり』の評価が容積に依存していないと言える。また二元配置分散分析の結果からも『広がり』では被験者間に有意差が得

られており、被験者によって異なる評価をしていることも1つの原因として考えられる。『音色』については奥行き2倍(C/A)、吸音(E/A)、歩行者密度2倍(F/A)のときに有意差が得られた。『音色』の評価に使用した形容詞対は『キンキンする-こもった』で、周波数特性に依存して印象が変化することを想定しており、この形容詞対に対応する条件変化の組み合わせは用意していない。しかしこれら3項目で有意差が得られており、周波数特性との対応が予想される。

Tab. 4.13 T-test of variance.

	広がり	響き	うるささ	音色
B/A (Volume × 8)		*	*	
C/A (Depth × 2)	**	**	**	*
D/A (Hight × 2)	*	*	**	
E/A (Absorptive)	**	**	**	*
F/A (Density × 2)	**	**	**	**
D/C (Depth ÷ 2, Hight × 2)	**	**	**	

**	: p < 1% (十分に有意)	*	: 1% ≤ p < 5% (有意)		: p ≤ 5% (有意でない)
----	------------------	---	--------------------	--	------------------

組み合わせごとの心理印象

一対比較による各評価語の平均評点の変化が、物理条件や音響物理指標値の変化と対応しているかを条件対ごとに確認する。平均評点と物理条件の比率は図4.14に、音響物理指標値の差分・変化率は表4.15に示す。なお正の値(比率は1より上)をpink、負の値(比率は1未満)をblueで塗りつぶし、有意差の得られた平均評点、変化のある物理条件、弁別閾($\delta: \pm 1$ dB, $\sigma: \pm 5\%$)を超える値を太字で表記している。また図4.17には各条件対ごとの平均評価値と、個人評点のばらつきを示し、t検定で有意な差が得られた項目についてはp値に応じて*または**を付けている。変化させた物理条件は条件対名の後ろの()内に示してある。評価値の正の値は評価語対の前の単語と対応している。

■B/A (Volume × 8) 基準空間Aに対して比較空間Bは全辺2倍の長さで、容積が8倍の対である。容積が非常に大きいために残響時間が90%以上長くなっているが、『響き』は少し小さいと評価されており、残響時間と響きの印象が対応していない。雑踏音場ではなくSN比の取れた音場で拡声放送等の音源が発生した場合を考えると、残響時間が中音域で70%以上長いので響きを十分に感じるはずである。しかし雑踏音場では音源として聞いている足音や話し声が背景雑音にもなっており、多数の音源がお互いにSN比のとれない音場を形成していると言える。『広がり』については前項で述べたとおり容積に応じず、広がり大きいという印象が得られなかった。歩行者密度は変化しておらず、拡散音場における音圧レベルの理論式 $L = 4W/cS\alpha$ においてWと $S\alpha$ が共に4倍となるため、音圧レベルは変化しないと考えられ、実際の測定でも音圧レベルはほぼ変化していない。しかし『うるささ』の印象は少しうるさい側に

なっている。歩行者密度は変化していないとはいえ歩行者数は基準の4倍になっており、一人ひとりの発生する音は一致していないので数が増えることで雑踏音が密になって聞こえる。従って音圧レベルには影響が現れないが、うるささの印象へ影響した可能性が考えられる。また全体的に平均評点は ± 0.5 以内であり、室容積の変化によってそれほど大きな印象の変化が感じられていないといえる。

■C/A (Depth $\times 2$) 基準空間 A に対して比較空間 C は奥行きが2倍の長さで、それに付随して床面積・容積・人の数も2倍になっている。歩行者の密度は変わらず、 L_{Aeq} に有意な変化は無いが、『うるささ』は有意に大きく感じている。これは B/A の時と同様に、歩行者密度の変化はないが歩行者数が2倍になっているために雑踏音が密に聞こえる事が1つの原因として考えられる。また中音域に対する高音域の音圧レベル差の差分値が2.3 dB と有意に高くなっており、『音色』がキンキンすると評価されていることと対応している。高音のレベルが大きいことは甲高いうるさいという印象につながっていると考えられ、従って平均的な音圧レベルに有意な変化は無いが、うるさいと感じられた可能性がある。残響時間は中音域で11%長く、『響き』が有意に長いと感じられている。また『広がり』も有意に広いという印象が得られた。

■D/A (Hight $\times 2$) 基準空間 A に対して比較空間 D は高さが2倍の長さで、それに付随して容積も2倍になっている。残響時間が中音域で23%長くなっているが、『響き』の印象は響かない側であり、この残響時間と『響き』の印象が対応していない。一方で L_{Aeq} は弁別閾以上に小さく、定常状態における拡散エネルギーを W と $S\alpha$ で考えた時に $S\alpha$ が大きくなるために理論的にも音圧レベルは下がる。このとき『うるささ』の印象は有意に小さくなっており、音圧レベルと『うるささ』の印象は対応すると言える。『広がり』については高さが2倍に関わらず広がりはいささいという印象が得られ、響きが短いという印象から空間の大きさも小さく感じていると考えられる。『音色』の印象については有意な差が得られなかった。

■E/A (Absorptive) 基準空間 A に対して比較空間 D の室寸法は同じで、天井のみ吸音材とした。その影響で残響時間が中音域で68%短くなっており、十分な変化が確認できる。このとき『響き』の平均評点は-1.7点であり、印象への影響は大きい。また吸音の影響で L_{Aeq} は1.3 dB 小さくなっており、『うるささ』の印象も静か側に有意に出ている。残響時間、音圧レベルと印象との対応から、吸音処理による印象への影響は確認された。中音域に対する低音域の音圧レベル差の差分値は-0.4、高音域は+0.9と弁別閾を超える変化はなかったが、若干高音が大きくなっている。しかし『音色』の印象はこもっていると評価された。ここで「キンキンする-こもった」という評価語について、周波数特性による影響以外にも残響時間による影響があると考えられる。残響時間が非常に短ければ無響室のようにつまった音の印象となり、それをこもった印象とも捉えられる。本対では残響時間が相対的に非常に短くなったため、こもった印象になった可能性がある。『広がり』の平均評点は-1.1点で、残響時間の影響で小さく感じたと考えられる。

■F/A (Density $\times 2$) 基準空間 A に対して比較空間 F の室寸法は同じで、歩行者密度のみ2倍とした。従って残響時間は全く同じであるが、『響き』の印象は平均評点+1.33点と非常に大きい。このことから、『響き』は残響時間のみによって決定していないことが確認された。音圧レベルは+3 dB と非常に大きく

っており、対応して『うるささ』の印象も +1.4 点と大きくなっている。このことから音源が増えたことによる音圧レベルの上昇と『うるささ』の印象が対応していることが確認できた。本対では歩行者密度以外の物理条件は変化させておらず、このとき『響き』の印象に影響が確認されたことから、音圧レベルが『響き』の印象に影響を受けている可能性が高いことが示された。『響き』とは一般には空間の響きのことを示すが、音源自体も響きを有している。本対で響きがあると感じられた理由には、歩行者数が増えたことによって音源の持つ響きが顕著に感じられたという可能性が考えられる。室容積は変化していないが『広がり』が大きくなっているという印象が得られ、『響き』が長く感じられたことで『広がり』も大きくなっていると感じたと考えられる。高音域・低音域の音圧レベルの差分値に有意な変化は見られないが、『音色』はキンキンすると評価された。

■D/C (Depth $\times 1/2$, Hight $\times 2$) 基準空間 C に対して比較空間 D は奥行きが $1/2$ 倍でかつ高さが 2 倍になっており、それに付随して床面積と歩行者数も $1/2$ 倍になっているが、容積は同じである。このとき残響時間は 10 % 程度長いが『響き』が小さいという印象であり、物理量と印象が対応していない。音圧レベルは歩行者数に応じて 1.3 dB 小さくなっており『うるささ』は対応して静かな印象が得られた。『響き』の印象はこのときも音圧レベルに影響されて小さくなっていることが考えられる。また『響き』の印象に応じて『広がり』は小さいという印象が得られている。『音色』の印象は有意な差が得られなかった。

以上 6 対の傾向から、吸音条件を変化させた場合の残響時間の変化による『響き』の印象と、歩行者密度すなわち音源密度を変化させた場合の音圧レベルの変化による『うるささ』の印象の変化は明らかに対応しており、弁別可能であることが示された。しかし『響き』については、室容積の変化による有意な残響時間の変化に対応していない事が多く、音圧レベルの変化に影響を受けている可能性が考えられる。また『うるささ』についても音圧レベルで必ずしも説明が可能ではない。歩行者密度が一定で数が増えている場合、音圧レベルに有意な差がない場合でもうるささを感じることもある。

4.3.4 音響物理指標と心理量の対応

前項の検討より、雑踏音場では残響時間と響きの印象が必ずしも対応していないことや、音圧レベルや周波数特性が変化しない場合でもうるささの印象が変わる事があることがわかった。同じ室条件でも一つの音源に対する印象と、雑踏音のように多数の音源に対する印象は異なる可能性がある。そこで室内の音響特性が変化した場合の雑踏音場における印象の変化を一般的な傾向として捉えるため、音響物理指標と心理量の対応について統計的な検討を行う。但し本検討では比較対として明らかに物理条件を変化させた 6 対のみを設定し、網羅的な比較対を設定せず選定された数少ない比較対で行ったため、本項の検討結果が全ての雑踏音場で満たされない可能性があることに注意する。

相関係数

全体の傾向を把握するための参考値として、評価語・物理条件・音響物理指標値の相関係数を算出し、図 4.16 に示す。評価語の値には条件対ごとの平均評点を、物理条件・音響物理指標値は項 4.3.2(各データ

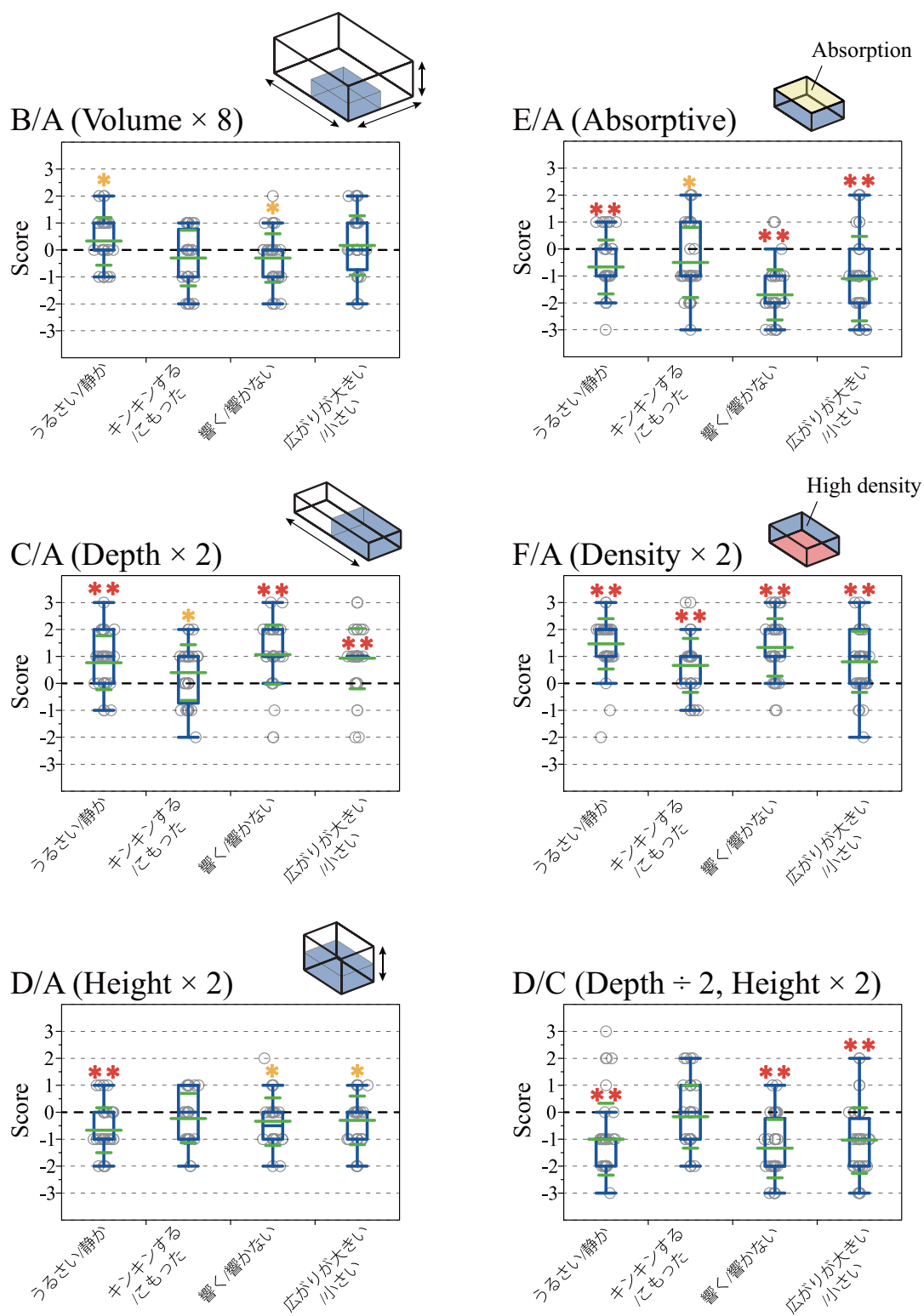


Fig. 4.17 Average.

Tab. 4.14 Evaluation score and physical condition ratio.

	広がり 大きい/小 さい	響く/響か ない	うるさい/ 静か	キンキン する/こ もった	Volume [m ³]	Space (total) [m ²]	Space (floor) [m ²]	Width [m]	Depth [m]	Height [m]	Space/ 1 person [m]	Absor ption
B/A (Volume × 8)	+0.18	-0.30	+0.33	-0.30	8	4	4	2	2	2	1	0
C/A (Depth × 2)	+0.93	+1.08	+0.78	+0.40	2	1.8	2	1	2	1	1	0
D/A (Hight × 2)	-0.30	-0.35	-0.68	-0.23	2	1.5	1	1	1	2	1	+0.007
E/A (Absorptive)	-1.10	-1.70	-0.68	-0.50	1	1	1	1	1	1	1	+0.128
F/A (Density × 2)	+0.80	+1.33	+1.48	+0.68	1	1	1	1	1	1	0.5	0
D/C (Depth ÷ 2, Hight × 2)	-1.05	-1.35	-1.00	-0.18	1	0.8	0.5	1	0.5	2	1	+0.009

Tab. 4.15 Acoustic physical measures.

	δ_{LAeq} [dB]	δ_{Ll-m} [dB]	δ_{Lh-m} [dB]	σ_{Tl} [%]	σ_{Tm} [%]	σ_{Th} [%]
B/A (Volume × 8)	-0.2	-0.9	+0.3	+92	+73	+48
C/A (Depth × 2)	-0.2	-0.1	+2.3	+15	+11	+8
D/A (Hight × 2)	-1.5	+0.2	+0.4	+27	+23	+17
E/A (Absorptive)	-1.3	-0.4	+0.9	-30	-68	-69
F/A (Density × 2)	+3.2	+0.3	+0.8	0	0	0
D/C (Depth ÷ 2, Hight × 2)	-1.3	+0.3	-1.9	+11	+10	+8

の扱いについて) で定義した値を用いている。

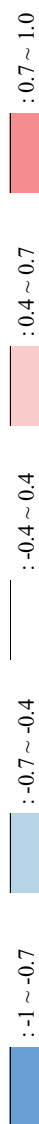
全評価語間で非常に高い相関が確認できる (相関係数 > 0.8)。4 項目のうちいずれかの印象に他の全ての印象が引っ張られている可能性がある。また、全ての評価語と L_{Aeq} の相関係数が 0.7 以上であり、特に『うるささ』との相関が高い (相関係数=0.90)。従って、全 4 項目の印象が音圧レベルに大きな影響を受けていると考えられる。また吸音率と全項目で中程度の負の相関があり、『響き』と『広がり』が特に高い。吸音率は残響時間とも非常に高い相関係数で負の相関が確認された。室条件と音響物理指標間は一般的な拡散音場と同じ傾向で、各室条件と残響時間は全て正の相関がある。音圧レベルの中音域に対する低音域のレベル差の差分値は各室条件と高い負の相関があるが、差分値は 1 dB 以内の振幅であり有意な相関ではない。一人あたり床面積は『うるささ』『音色』と相関係数が高いが、F/A の 1 条件のみで 1 人床面積が変化しており、これも有意な相関とはいえない。

二変量の関係

相関係数の算出から、等価騒音レベル (L_{Aeq}) と各印象項目では『うるささ』を筆頭に相関が高く、また逆に残響時間と各印象項目の相関は『響き』を含めて非常に低いことが示された。この 2 つの音響物理指標と各評価語の一对ごと関係と全体の相関の傾向を確認するため、全条件対の結果を用いて音響物理指標値と各評価語との関係を分析した。分析データは等価騒音レベルの差分値 (δ_{LAeq})、中音域に対する低・高音域のレベル差の差分値 (δ_{Ll-m} , δ_{Lh-m})、残響時間の低・中・高音域における変化率 (σ_{Tl} , σ_{Tm} ,

Tab. 4.16 Correlation coefficient.

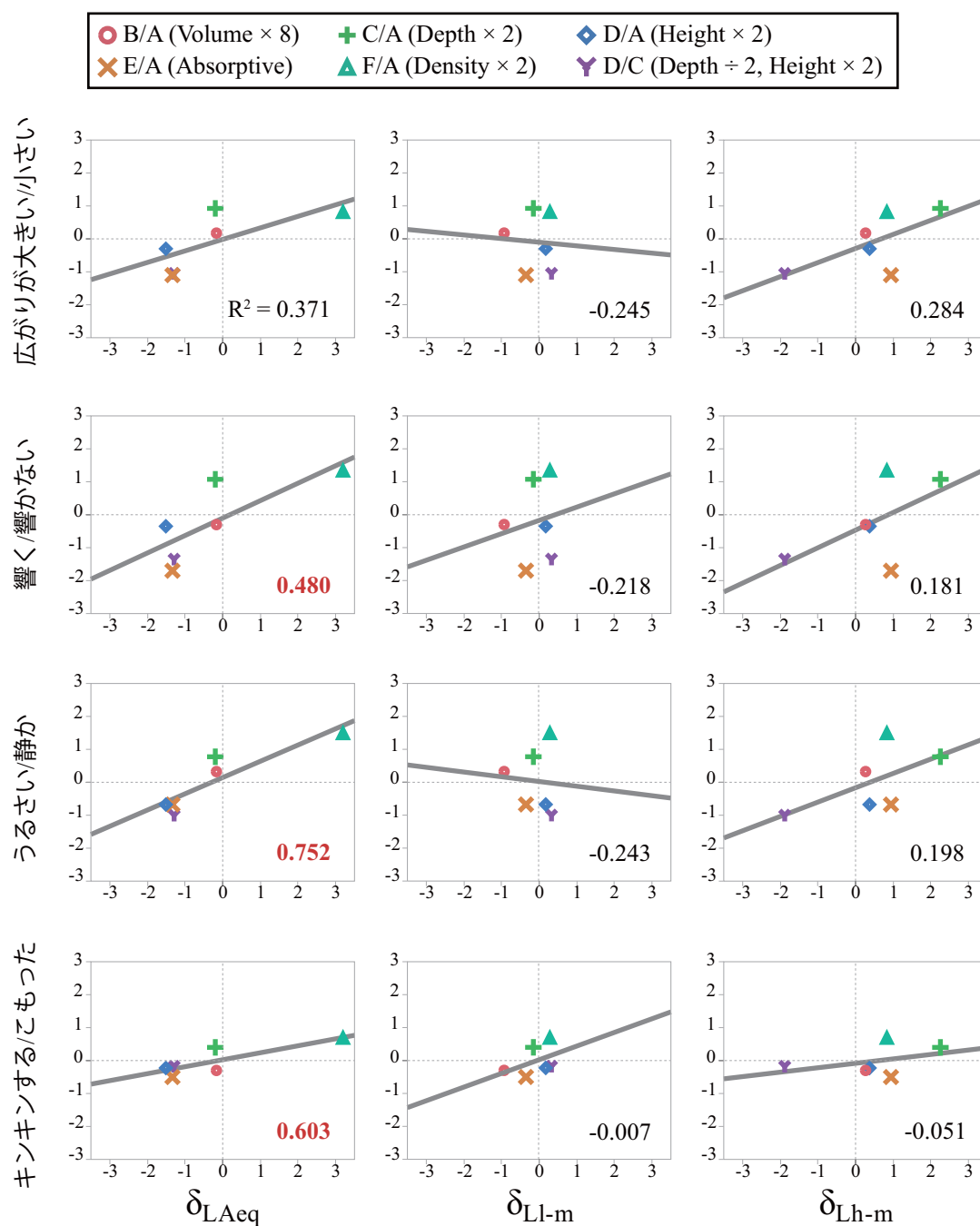
	広がり 大きい/小さい	響く/ 響かない	うるさい/ 静か	キンキン する/ こもった	Space (total)	Space (floor)	Width	Depth	Height	Space/ 1person	Absorp tion	σ_{Tl}	σ_{Tm}	σ_{Th}	δ_{LAeq}	δ_{Ll-m}	δ_{Lh-m}
広がり 大きい/小さい	1.00																
響く/ 響かない	0.97	1.00															
うるさい/ 静か	0.92	0.91	1.00														
キンキン する/ こもった	0.82	0.91	0.84	1.00													
Volume	0.22	0.03	0.15	-0.28	1.00												
Space(total)	0.33	0.13	0.23	-0.20	0.99	1.00											
Space(floor)	0.41	0.20	0.34	-0.12	0.95	0.98	1.00										
Width	0.15	-0.03	0.14	-0.30	0.98	0.95	0.92	1.00									
Depth	0.65	0.47	0.52	0.16	0.69	0.79	0.86	0.60	1.00								
Height	-0.37	-0.40	-0.55	-0.51	0.47	0.37	0.21	0.45	-0.15	1.00							
Space/1person	-0.50	-0.61	-0.72	-0.75	0.27	0.28	0.22	0.20	0.20	0.45	1.00						
Absorption	-0.62	-0.65	-0.43	-0.56	-0.30	-0.31	-0.27	-0.23	-0.27	-0.39	0.23	1.00					
σ_{Tl}	0.31	0.16	0.14	-0.13	0.92	0.91	0.84	0.88	0.59	0.65	0.23	-0.61	1.00				
σ_{Tm}	0.42	0.34	0.23	0.10	0.76	0.75	0.67	0.70	0.48	0.66	0.09	-0.83	0.95	1.00			
σ_{Th}	0.46	0.41	0.25	0.21	0.65	0.64	0.57	0.59	0.41	0.64	0.03	-0.90	0.88	0.99	1.00		
δ_{LAeq}	0.70	0.76	0.90	0.83	-0.04	-0.02	0.06	0.01	0.11	-0.48	-0.94	-0.36	-0.02	0.10	0.14	1.00	
δ_{Ll-m}	-0.06	0.16	-0.07	0.44	-0.84	-0.85	-0.88	-0.84	-0.73	-0.08	-0.40	-0.21	-0.58	-0.30	-0.16	0.18	1.00
δ_{Lh-m}	0.65	0.59	0.60	0.40	0.02	0.16	0.27	-0.07	0.67	-0.71	-0.14	0.10	-0.12	-0.17	-0.19	-0.28	1.00

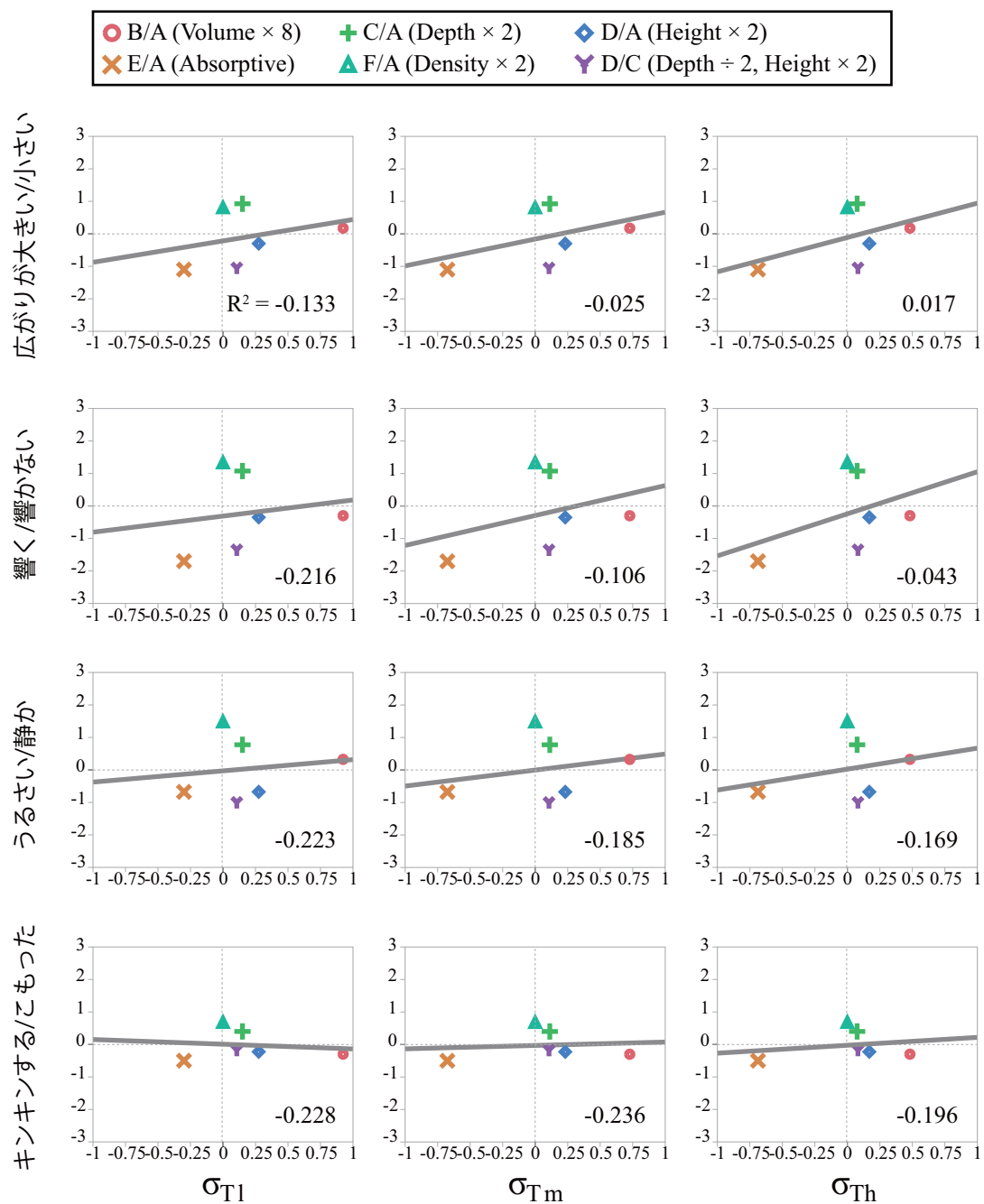


σ_{Th}) の 6 項目と、全評価語 (4 項目) の平均評点とし、音響物理指標値と評価語の関係をプロットして近似直線をひいた (図 4.18, 4.19)。また各グラフ中に回帰直線の決定係数 R^2 (自由度調整済み) を示し、決定係数が高いとき ($R^2 \geq 0.4$ のとき) 赤字で示した。

これまでの検討で良い対応を示している δ_{LAeq} と『うるささ』は、 $R^2 = 0.752$ でやはり非常によく対応していることが分かる。また他の評価語とも比較的対応が良く、二番目に相関の高い『音色』との決定係数は $R^2 = 0.603$ を得られた。しかし L_{Aeq} が 3 dB も異なる F/A で評価値が +1 点以下であり、影響はそれほど大きくない。『響き』とも $R^2 = 0.480$ と比較的相関が高いが、レベル差が同値である C/A(Depth $\times 2$) と B/A(Volume $\times 8$) などでは評価平均値が 1 点以上差があり、等価騒音レベルのみで決定されるわけではないことが推察される。 δ_{Ll-m} はレベル差の大きい条件対がなく、有意な相関は確認できなかった。 δ_{Lh-m} は C/A(Depth $\times 2$)、D/C(Depth $\times 1/2$, Hight $\times 2$) でレベル差が大きくこの 2 対の結果が近似直線に大きく影響しているだけであり、やはり有意な相関は確認できなかった。

次に残響時間の変化率 σ_{Tm} と『響き』の対応を見てみると、やはり $R^2 = -0.106$ で対応が良くないことが分かる。条件対ごとで見ると、C/A(Depth $\times 2$) と F/A(Density $\times 2$) を除いた 4 条件対では、やや低めであるがゆるやかに相関があるようである。『響き』の印象は、ある場合では残響時間によって決まるが、他の要因が大きいときはその印象に影響を受けている可能性がある。また比較的相関係数が高い σ_{Tm} 、 σ_{Th} と『響き』『広がり』の関係に着目してみると、多少傾きが大きい以外は他の組み合わせと同傾向であり、それほど相関が高いとはいえない。

Fig. 4.18 Relationship between L_{Aeq} and evaluation terms.

Fig. 4.19 Relationship between T_{30} and evaluation terms.

4.3.5 音響物理指標・物理条件による予測モデルの検討

音響物理指標値による予測

■ δ_{LAeq} , σ_{Tm} 本実験では音響物理指標値に等価騒音レベル・残響時間を用いて各種分析等を行ってきた。これまでに各音響物理指標と各評価項目間の 1 対 1 の関係については概ね確認ができたが、各印象が一つの要因によって説明されることは考え難い。そこではじめにこれら 2 つの音響物理指標値を説明変数、目的変数には各評価項目として最小二乗法による重回帰分析を行うことで、各印象が高い決定係数で説明可能であることを期待する。等価騒音レベルには各対の差分値 (δ_{LAeq})、残響時間には中音域 (500,1k Hz) の各対の変化率 (σ_{Tm})、評価項目には一対比較実験における各評価語の平均評点を用いる。

図 4.20 に平均評点の予測値と実測値の関係を示し、表 4.17 にそのときの重回帰モデルの決定係数・推定値・p 値を示す。その結果前項の単回帰分析で高い相関が得られた等価騒音レベルと各評価語の関係と比べ、全ての項目で決定係数が 0.005~0.130 程度小さくなり、期待に反して有意な結果が得られなかった。

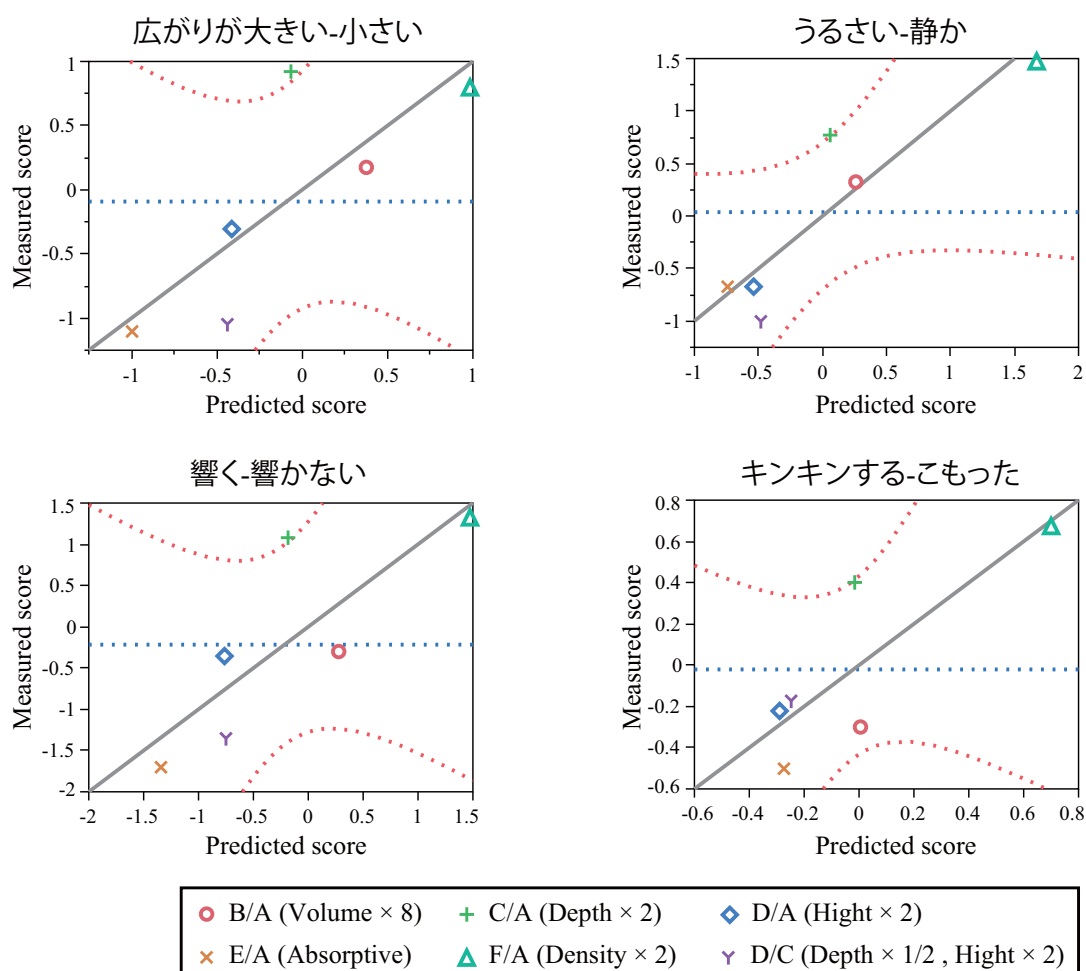


Fig. 4.20 Result of multiple regression analysis.

Tab. 4.17 Result of multiple regression analysis.

目的変数	R ² 値 (自由度調整済)	説明変数	推定値	p 値 (Prob> t)
広がり大きい-小さい	0.375	切片	-0.077	0.809
		σ_{Tm}	0.699	0.386
		δ_{LAeq}	0.333	0.156
響きがある-ない	0.426	切片	-0.166	0.701
		σ_{Tm}	0.727	0.489
		δ_{LAeq}	0.512	0.118
うるさい-静かな	0.703	切片	0.117	0.637
		σ_{Tm}	0.308	0.601
		δ_{LAeq}	0.486	0.037
キンキンする-こもった	0.472	切片	0.023	0.880
		σ_{Tm}	0.024	0.946
		δ_{LAeq}	0.211	0.086

■全音響物理指標値 次に今回算出した全音響物理指標値を説明変数の候補とし予測モデルを求める。全音響物理指標値とは、 δ_{LAeq} 、 δ_{Ll-m} 、 δ_{Lh-m} 、 σ_{Tl} 、 σ_{Tm} 、 σ_{Th} である。周波数特性が反映されたこれらの指標を説明変数の候補として用いることで、代表値2項目では得られなかった有意な予測モデルを得られることを期待し、雑踏音場ではどのような音響特性のときにどのような印象が得られるのかを考察する。分析手法はステップワイズ法に基づく重回帰分析を用い、変数の増減は閾値 p 値 = 0.25 を境として変数を追加・除去する。また目的変数は同様に各評価項目の平均評点とする。

重回帰分析を行うにあたって説明変数に用いる全項目で主成分分析を行った (表 4.18)。累積寄与率 94.6 % で残響時間、音圧レベルの周波数特性、等価騒音レベルの3因子となった。

表 4.19 に重回帰分析モデルの決定係数 (R² 値)・選定された説明変数・推定値・p 値を示す。モデルで説明変数の推定値は正の値を得た。『響き』『音色』は説明変数が δ_{LAeq1} 項目となり、等価騒音レベルが大きな影響を与えているという結果が得られた。今回の実験では『響き』の印象に残響時間の寄与は小さく、この重回帰分析の結果のみに着目すると関係がないようにも捉えられるが、条件対ごとでみると吸音率の変化によって残響時間が大きく変化する場合には『響き』の印象に明らかな影響が確認されている。『音色』には周波数特性が寄与すると予想して分析を行ったが、有意な寄与は確認できなかった。『広がり』については δ_{LAeq} に加えて σ_{Th} 、 δ_{Lh-m} が説明変数として選定された。どちらも高周波数による値であり、等価騒音レベルに加えて高音域の変化も空間の広がりに対する影響が大きいといえる。等価騒音レベルのみの単回帰の場合は R² = 0.371 であまり有意な説明力が得られなかったが、本モデルでは R² = 0.914 と非常に高い説明力が得られ、高音域の影響が大きいと考えられる。『うるささ』についても δ_{LAeq} に加えて σ_{Tm} 、 δ_{Lh-m} が説明変数として選定された。こちらは残響時間の中音域の変化と、高音域の音圧レベルの変化がうるささに対する影響が大きい。等価騒音レベルによる単回帰の場合も R² = 0.703 と

十分に高い説明力であり，本モデルではさらに $R^2 = 0.950$ が得られた。ステップワイズ法による重回帰分析ではこのような結果が得られたが、『うるささ』については等価騒音レベルのみで十分な説明力と考える。

Tab. 4.18 Result of principal component analysis.

	Factor 1	Factor 2	Factor 3
σ_{Tl}	0.956	-0.254	-0.127
σ_{Tm}	0.994	-0.019	0.039
σ_{Th}	0.974	0.091	0.111
δ_{LAeq}	0.094	0.026	0.940
δ_{Ll-m}	-0.330	0.831	0.311
δ_{Lh-m}	-0.246	-0.756	0.479

Tab. 4.19 Result of multiple regression analysis.

目的変数	R^2 値 (自由度調整済)	説明変数	推定値	p 値 (Prob> t)
広がり大きい-小さい	0.914	切片	-0.257	0.160
		σ_{Th}	1.180	0.063
		δ_{LAeq}	0.225	0.083
		δ_{Lh-m}	0.225	0.083
響きがある-ない	0.481	切片	-0.102	0.794
		δ_{LAeq}	0.530	0.077
うるさい-静かな	0.950	切片	-0.057	0.632
		σ_{Tm}	0.494	0.157
		δ_{LAeq}	0.415	0.019
		δ_{Lh-m}	0.308	0.058
キンキンする-こもった	0.604	切片	0.025	0.842
		δ_{LAeq}	0.212	0.043

物理条件による予測

音圧レベル (L) や残響時間 (T) は拡散音場において以下の理論式で表される。

$$E = \frac{4W}{cS\bar{\alpha}}$$

$$L = 10\log_{10} \left(\frac{E}{E_0} \right) \quad (4.2)$$

$$T = \frac{S\bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} \quad (4.3)$$

音圧レベルはエネルギー密度 E と基準エネルギー密度 E_0 から求める。ここで W は音源の出力、 c は音速、 S は表面積、 $\bar{\alpha}$ は平均吸音率である。これらの式からも分かるように、各音響物理指標値は表面積や吸音率、音圧レベルについては加えて音源の総出力に影響を受ける。ここで前項の検討から各印象が音響物理指標値に影響を受けることが明らかになっており、すなわち各印象には上記の物理条件が影響を与えるものと考えられる。そこで目的変数を各印象項目、説明変数の候補を各物理条件として、ステップワイズ法に基づく重回帰分析を行った。変数の増減は閾値 p 値=0.25 を境として変数を追加・除去する。また用いる分析データは各評価項目の平均評点と、物理条件の比率 (吸音率のみ差分値) とする。

重回帰分析を行う前に説明変数として用いる物理条件同士で主成分分析を行った (表 4.20)。累積寄与率 92.5 % で表の 3 因子に分類された。室形状に関する項目の内高さ以外がすべて因子 1、高さは独立で因子 2、一人あたり床面積と吸音率は関係のない項目であるが同じ因子 3 に分類された。なお室形状に関わるデータは似ている値が非常に多いため、室形状に関する項目から幅・奥行き・高さの 3 項目と、それぞれ独立と考えられる一人あたり床面積と吸音率のみを重回帰分析の説明変数とした。

重回帰分析で得られたモデルについて表 4.21 に示す。『広がり』と『うるささ』はどちらも奥行き (正の相関) と一人あたり床面積 (負の相関) の 2 項目が説明変数に選定された。奥行きは表面積等の室寸法と音源数に関わる項目で、値が大きいほど室寸法が大きく音源数が多くなる。前項の検討では音圧レベルと残響時間の両項目が印象に影響していることから、両項目との関係を考える。音圧レベルは理論的に式 4.2 で示されるように室寸法が小さく音源数が多いときに大きい。奥行きは正の相関のため、奥行きが変化することに伴う床面積の増加で音源数がすることが広がりやうるささに影響を与えていると考えられる。また残響時間は理論的に式 4.3 で示されるように室寸法が大きいときに長く、この関係に対応している。従って前項で得られた音響物理指標値重回帰モデルとも対応している。一人あたり床面積は音源数に関わる項目で、値が小さいほど音源が増え、うるささや広がりが大きくなることに対応している。『響き』は高さと吸音率の 2 項目が説明変数に選定され、どちらも負の相関である。つまり高さが低く吸音率が低いとき響く。吸音率については当然の関係であるが、高さについては通常残響理論から考えると逆の傾向が得られた。これまでに行った検討結果から考察すると、恐らく『響き』の印象が音圧レベルに影響を受けているということであろう。高さが高いとき表面積が大きくなり、理論的には音圧レベルが小さくなる。従って静かな印象になると共に響きが小さいという印象になると考えられる。なお『音色』については有意なモデルが得られなかった。

Tab. 4.20 Result of principal component analysis.

	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Volume	0.927	0.332	-0.056
Total Space	0.968	0.238	-0.049
Floor Space	0.996	0.082	-0.034
Width	0.893	0.312	-0.050
Depth	0.893	-0.244	-0.005
Height	0.130	0.980	-0.105
Space/1person	0.211	0.540	0.709
Absorption	-0.225	-0.313	0.841

Tab. 4.21 Result of multiple regression analysis.

目的変数	R ² 値 (自由度調整済)	説明変数	推定値	p 値 (Prob> t)
広がり大きい-小さい	0.727	切片	1.081	0.348
		Depth	1.128	0.046
		Space/1person	-2.817	0.071
響きがある-ない	0.870	切片	2.920	0.022
		Height	-1.733	0.022
		Absorption	-22.717	0.012
うるさい-静かな	0.952	切片	2.432	0.013
		Depth	1.097	0.006
		Space/1person	-4.108	0.003

第 5 章

総括

本章では本研究で得られた成果をまとめ、公共空間の音響設計における本シミュレーションシステムのあり方・展望と、本システムを用いて行うべき今後の課題について述べる。

各章のまとめ

第一章ではまず公共空間の音環境の予測・評価に関する背景をまとめた。次に公共空間の設計段階における評価・予測のための知見を得ることを大目的に掲げ、公共空間の音環境を再現するシステムとして雑踏音場シミュレーションシステムの構築を目指すことを述べた。

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 2 種類の数値解析手法および一般的な音場再生手法について簡単に説明を行い、これらの中から本研究で用いる音線法と 6 チャンネル収音・再生システムの概要を述べた。第 2 節では音線法における音波の扱いと具体的な計算方法を述べ、第 3 節では 6 チャンネル収音・再生システムの概要と収音系・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 章では雑踏音場シミュレーションシステムの構築手法について述べた。第 1 項では公共空間の音環境の実態についてまとめた。第 2 節では雑踏を模擬する音源として空調音・足音・話し声のそれぞれの作成・収録方法について述べた。第 3 節では幾何音響解析によって雑踏音場を模擬する具体的な方法を述べた。具体的な内容としては、音源の数・配置、音源の移動の模擬、空気吸収、音圧レベルの設定方法である。

第 4 章では以上の手法で構築した雑踏音場シミュレーションシステムの妥当性を検証するために行った、実験の概要と結果の考察を述べた。第 3 節では実在する公共空間の音場をシミュレーションを用いて作成し、実際の音場・実際の音を録音し再生した音場・シミュレーションを用いて作成した音場の 3 音場で同じ主観評価実験を行い、再現性を検討した。物理量として等価騒音レベルによる比較を行った結果、4 音場のうち 3 音場ではほぼ一致し、騒音レベルの再現性が確認出来た。心理量については用意した 11 項目のうち総合的な印象である好み・快適性・安全性などと、空間の広がり・はつきりしているかの印象については対応が確認出来なかった。音の大きさと賑やかさは実音場とよく対応し、騒音レベルとも非常により対応が確認出来た。音の種類・数はシミュレーションと実音場が対応していないが、印理量は各音

場で対応が確認され、また騒音レベルとも良い対応を示していることから音の大きさに影響を受けていると考えられる。響きは概ね良い対応が確認されたが、残響時間とは対応していない。第4節ではシミュレーションシステムを用いて室条件を変化させたときに印象へ与える影響について検討するため、数種類の仮想的公共空間の音場を作成し、対比較による主観評価実験を行った。対象音場にはある音場を基準とし、それに対して各物理条件を変化させた計6音場を用意し、広がり・うるささ・響き・音色の4項目の印象を答えさせた。吸音条件と響きの印象の変化と、音源密度とうるささの印象の変化はそれぞれ対応が確認された。室容積による残響時間の変化は響きの印象と対応せず、広がりについても対応が確認されなかった。しかし音源密度のみを変化させた場合うるさいと感じると共に響きが長く広がりが大きいという印象が得られており、雑踏音場における響きや広がりへの印象は音の大きさに影響を受けている可能性が示唆された。またこのとき音色として用意した「キンキンする-こもった」という評価項目でキンキンするという評価が得られ、音色の印象もうるささに影響を受けている可能性がある。また得られた物理量・心理量を用いて全体的な傾向の確認を行ったところ、4つの全評価項目の印象が等価騒音レベルによって決まっていることが確認された。

本研究全体を通じたまとめとしては、雑踏音場シミュレーションシステムの構築が完了し、ある程度の再現性を持っていることが確認されたと言える。また雑踏音場における響きの印象は残響時間にのみに依らない可能性が示唆された。

今後の課題

本論文の初めにも述べたが、現在公共空間における音環境の予測が行われることは多くなく、行われていても残響時間の算出や拡声放送単体に着目した聞き取りやすさ試験程度である。しかしこの方法では実際の音環境を十分に予測出来ていないとはいえず、設計後にその違いに気がつくという場合が多いだろう。そこで本雑踏音場シミュレーションシステムの構築は公共空間の音環境を設計前に出来る限り忠実に再現することを目指し、例えば音への関心が薄い施主や設計者に聞かせる事で、その重要性が広く認識されていくことを期待して行った。従って用いた解析・再生手法はいずれも複雑な方法ではなく、多くの場面で実用されている比較的簡単な手法を用いており、実際の設計の現場で用いられることも十分に想定される。

しかし本研究では対象空間の数を絞って実験を行ったため、どのような室条件でも十分な再現性である確証は得られていない。また公共空間を再現する音源として、足音・話し声・空調音の3種類に限定してシステムを作成しているため、例えば駅のような音の種類の多い公共空間の忠実な再現は不可能である。そのため本システムの再現性を確実なものとするには、本システムを用い様々な室条件の空間を対象に検討を行うことや、音源の種類を増やした検討が望まれる。更に本検討では背景雑音を再現することに着目したシステムの構築を行ったため、拡声放送等を用いた検討は行っておらず、公共空間において最も重要である安全性の確認には至っていない。従って雑踏音場の再現が十分に有効であることを確認することに加え、緊急時の拡声放送・交通機関における案内放送などを付加した場合の再現性も同時に検証していく必要があると考える。

参考文献

- [1] D.F.Hoth, Room noise spectra at subscribers' telephone locations, J.Acoust.Soc.Am.12, pp.499-504, 1982.
- [2] H.Kuttruff, Room Acoustic third edition (Elsevier applied Science, London and New York, 1991), pp.84, 1991.
- [3] ISO 9613-1:1993 Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 1:Calculation of the absorption of sound by the atmosphere.
- [4] JIS Z 8738:1999 屋外の音の伝搬における空気吸収の計算
- [5] 朝倉巧, FDTD 法による音響振動連成解析を用いた遮音のシミュレーションに関する研究, 東京大学博士論文, 2008.
- [6] 浅野裕子, 橋本修, 井上勝夫, 視覚障害者の移動支援計画における聴覚情報利用に関する研究: その 2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.965-966, 2007.
- [7] 飯田一博, 2 個のスピーカを用いたトランスオーラルシステムによる音場再生, 小特集ー音場再生技術の研究動向ー, 日本音響学会誌 Vol67 No.11, pp.550-555, 2011.
- [8] 石田康二, 幾何音響学に基づく各種シミュレーション手法について, 特集: されど幾何音響シミュレーション, 音響技術 No.129, pp.14-23, 2005.
- [9] 伊積康彦, 蓮田常雄, 藤井光治郎, 駅の音環境実態調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.107-108, 1998.
- [10] 岩宮慎一郎, 商業空間の音環境設計の考え方, 騒音制御 Vol.23 No.4, pp.216-219, 1999.
- [11] 上杉崇, 佐久間哲哉, 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, 音響学会講演論文集, pp.419-420, 2007.
- [12] 上田麻里, 高齢者・障害者等に配慮した公共空間の音環境, 小特集ー公共空間における音環境マネジメントー, 日本音響学会誌 Vol.70 No.3, pp.134-140, 2014.
- [13] 尾本章, 幾何音響学の考え方, 特集: されど幾何音響シミュレーション, 音響技術 No.129, pp.2-7, 2005.
- [14] 尾本章, 音場再生技術について, 小特集ー音場再生技術の研究動向ー, 日本音響学会誌 Vol67 No.11, pp.520-525, 2011.
- [15] 亀田暁子, 船場ひさお, 太田篤史, 上田麻里, 坂本圭司, 伊積康彦, 豊田恵美, 駅コンコースにおける音環境の実態調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.289-290, 2014.
- [16] 小林正明, 公共空間の音声伝達性能に関する研究, 戸田建設 技術研究報告 第 38 号, 2007.

- [17] 坂本慎一, 幾何音響の新しい流れ (鏡面反射と拡散反射), 特集: されど幾何音響シミュレーション, 音響技術 No.129, pp.35-39, 2005.
- [18] 橘秀樹 (研究代表者), 公共空間の音環境に関する研究, 平成7年度～平成8年度科学研究費補助金 (基盤研究B) 研究成果報告書, 1997.
- [19] 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.
- [20] 辻村壮平, 伊積康彦, 駅の音環境に関するアンケート調査ー利用者の現状認識と課題に関する考察ー, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.287-288, 2014.
- [21] 土田義郎, 木村英字, 平手小太郎, 安岡正人, 駅の音環境設計に関する基礎研究ー現状調査例 その1ー, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.459-460, 1991.
- [22] 土田義郎, 木村英字, 平手小太郎, 安岡正人, 駅の音環境設計に関する基礎研究 その2 発車合図・アナウンスの運用に関する考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.901-902, 1993.
- [23] 鶴田英二, 東京国際空港国際線旅客ターミナルビル, 音響技術 No.162, pp.58-61, 2013.
- [24] 西村裕喜子, 佐久間哲哉, 宗方淳, 音場再生システムを用いた駅プラットホームの音環境印象評価実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.79-82, 2013.
- [25] 羽入敏樹, 幾何音響プログラミング, 特集: されど幾何音響シミュレーション, 音響技術 No.129, pp.28-34, 2005.
- [26] 濱崎公男, マルチチャンネル音響, 小特集ー音場再生技術の研究動向ー, 日本音響学会誌 Vol67 No.11, pp.526-531, 2011.
- [27] 樋口祥明, 高橋紀行, 井川憲男, 寺澤義勇, 柳原隆司, 佐藤晃一, アトリウムの環境評価に関する調査研究 (その2) 内部環境に関するアンケート調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.909-910, 1996.
- [28] 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, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.349-350, 2011.
- [29] 三上雄一郎, 幾何音響シミュレーションに基づく6チャンネル音場再生システムの構築ー室内音響特性の再現性についてー, 東京大学修士論文, 2012.
- [30] 村上尚子, 塘直樹, 橘秀樹, 公共空間の音環境に関する実態調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1707-7108, 1994.
- [31] 横山栄, 上野佳奈子, 橘秀樹, 6チャンネルの收音・再生方式を用いた公共空間の音環境評価-会話のしやすさに関する評価実験-, 日本音響学会講演論文集, pp.737-738, 2000
- [32] 横山栄, 矢野博夫, 橘秀樹, 上野佳奈子, 坂本慎一, 6チャンネル收音・再生システムの原理と主観評価実験への応用例, 建築音響研究会資料 AA2006-36, 2006.
- [33] 横山栄, 太田達也, 矢野博夫, 橘秀樹, 上野佳奈子, 坂本慎一, 6チャンネル收音・再生方式を適用した実験事例とデモンストレーション, 建築音響研究会資料 AA2007-48, 2007.
- [34] 横山栄, 上野佳奈子, 橘秀樹, 6チャンネルの收音・再生方式を用いた公共空間の音環境評価-会話のしやすさに関する評価実験-, 日本音響学会研究発表会講演論文集, pp.737-738, 2010
- [35] 横山栄, シミュレーション音場を用いた環境騒音の主観評価に関する研究, 博士論文, 2003.
- [36] 吉野真史, 森淳一, 佐藤史明, 木幡稔, 横山栄, 橘秀樹, 公共空間における音声伝達の可聴化シミュレーション, pp.1135-1136, 2013.

-
- [37] 綿谷重規, 漆戸幸雄, 小谷朋央貴, 三井和廣, 岡本幹太郎, アトリウム空間の音響特性について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1775-1776, 1994.
- [38] 和田竜一, 大空間における残響・騒音が話声聴取に及ぼす影響, 法政大学大学院修士論文, 2012.
- [39] 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.
- [40] 日本建築学会 編, 音響テクノロジーシリーズ4 音の評価のための心理学的測定法, コロナ社, 1998.
- [41] 日本建築学会 編, 日本建築学会設計計画パンフレット4 建築の音環境設計 [新訂版], 彰国社, 2011.
- [42] 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.

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もとに行った研究をまとめたものであります。指導教員の佐久間哲哉准教授には、研究に取り組むにあたって必要な物事の考え方から研究の内容、また言葉遣いや文章の書き方など様々な面からご指導していただきました。厳しくも優しく的確なご指摘を下さり、数多くの筆者の至らない点を正してくださいました。深く感謝いたします。

副指導教員である同専攻の佐藤弘泰准教授には、普段見落としがちである視点から助言をいただくことが出来ました。ここに謝意を表します。

佐久間研究室の先輩である李孝振さん、土屋裕造さん、石川聡史さんには、研究以外の面でも様々なアドバイスをいただきました。

江田和司さん、井上尚久さんには研究の技術的な面から文章の作成に至るまで様々な面から助言をいただきました。お二人のご協力のお陰で研究を無事進められることが出来ました。心から感謝いたします。

清家剛さん、竹下圭吾さんには、卒業研究のときから無知な筆者の研究に関する相談に乗っていただき、研究以外では楽しい思い出もたくさんいただきました。ありがとうございました。

同期の上田脩太郎さん、澤幡麻佑子さんとは、2年間事あるごとに助け合って過ごしてきました。同期の存在が大きな助けとなった事は数えきれません。本当にありがとうございました。

後輩の橋本梯さん、福田雄也さんとは短い期間でしたが楽しい時間を過ごさせていただきました。

また社会文化環境学専攻の皆さんには、研究、日々の生活、様々な面で良い刺激をいただきました。感謝いたします。

最後に、筆者の学生生活を暖かく見守り支えて下さった両親に多大なる感謝の意を表します。

2015 年 1 月 26 日西村裕喜子

発表論文一覧

修士論文梗概

本研究に関する発表論文

- 西村裕喜子, 佐久間哲哉, ” 公共空間の音環境評価に向けた雑踏音場シミュレーションシステムの開発”, 日本音響学会春季研究発表会講演論文集, pp.-, 2015.3.

本研究以外の発表論文

- 西村裕喜子, 佐久間哲哉, 宗方淳, ” 音場再生システムを用いた駅プラットフォームの音環境印象評価実験”, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (環境工学 I), pp.79-82, 2013.9.

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

Subjective Evaluation of Crowd Noise in Public Spaces Using Sound Field Simulation.

学籍番号 47-136761
氏 名 西村 裕喜子(Nishimura, Yukiko)
指導教員 佐久間 哲哉 准教授

1 はじめに

1.1 研究背景

駅や空港のコンコース、アトリウム等の公共空間では、室用途や人間行動の多様性に伴い多種多数の音源が存在する。更に、設計者の音に対する認識不足から、残響の制御が難しい。従って公共空間では喧騒感・残響過多によって快適性や安全性の確保が十分でない場合が多い。そこで音環境の予測・評価による快適・安全な公共空間を目指し、拡声放送の音声伝達¹⁾や騒音下の会話²⁾に着目した研究が行われているが、未だ設計の指針や予測・評価手法の構築には至っていない。

1.2 研究目的

以上の状況を踏まえ、本研究では公共空間の音環境の予測・評価手法の構築に向けて、背景音とされる雑踏音の可聴化による雑踏音場シミュレーションシステムの構築を行う。本システムが十分に公共空間を再現可能となれば、設計の前段階における残響の制御を直感的に行うことができ、後回しにされがちである公共空間の音環境設計が容易となる。従って音環境への意識向上や基準の整備が期待でき、快適・安全な音環境設計に貢献するものと考ええる。

1.3 研究概要

本システムは、幾何音響解析を用い公共

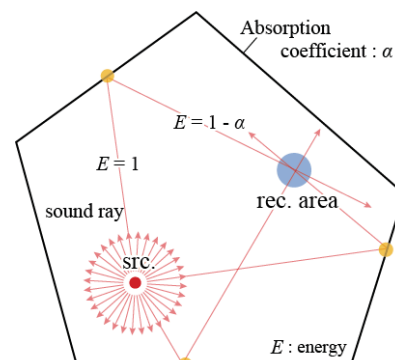


Fig. 1 Sound ray tracing method.

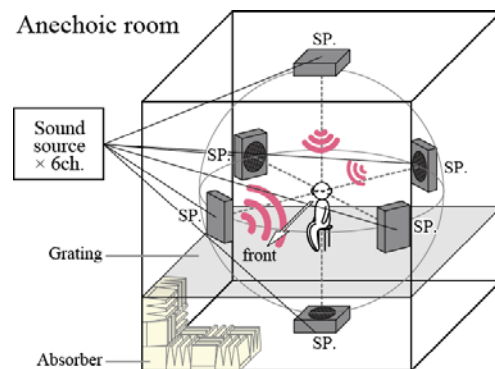


Fig. 2 6-channel reproduction system

空間の音源や残響情報を作成し、無響室内の 6ch 音場再生系³⁾によって再現する。システムの再現性の検証は主観評価実験によって行った。

2 研究手法

2.1 数値解析手法

解析には幾何音響解析(音線法)を用いる。音線法とは図 1 に示すように、音源から放出された多数の音線を追跡し、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、これが響きの情報を持つ。可聴化にはインパルス応答を音源に畳み込み、空間の残響を付加する。

2.2 音場再生手法

再生には図 2 に示す 6 チャンネル音場再生システムを用いる。無響室内に設置された 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。

3 シミュレーションシステム概要

3.1 音源モデル

図 3 にシミュレーションシステムで想定する公共空間のイメージを示す。シミュレートするにあたって音場を単純化するため、図 4 に示すように音源には歩行者の足音・話声と空調音の 3 種を点音源群として想定し、足音は床面、話声は高さ 1.5m、空調音は天井面に配置する。ドライソースとして、男女数名の足音・話声を録音・編集し、空調音には Hoth ノイズ⁴を用いた。音響パワーレベルは一人当たり平均で足音 74dB、話声 69dB、空調音は天井面 8m 間隔の音源当たり 72dB ($54\text{dB}/\text{m}^2$) とした。歩行者は 1m/s で 4m 間隔の格子点を同一双方向に直線移動するものとし、話声の音源数は与条件としてある割合で配分する。

3.2 伝搬計算

上記音源の各格子点から受音点に対して、音線法により 6 方向のカーディオイド特性を掛けたインパルス応答を算出する。その際、壁面の吸音率と空気の減衰係数をオクターブ帯域毎に反映する。次に、ドライソースに各格子点のインパルス応答を畳み込み、足音・話声は格子点間の移動を模擬するため、両側格子点の応答に正弦半波の時間窓



Fig. 3 An image of public space for simulation.

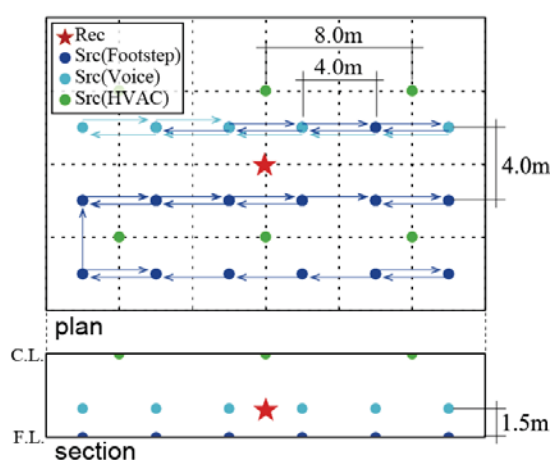


Fig. 4 Arrangement of sound sources.

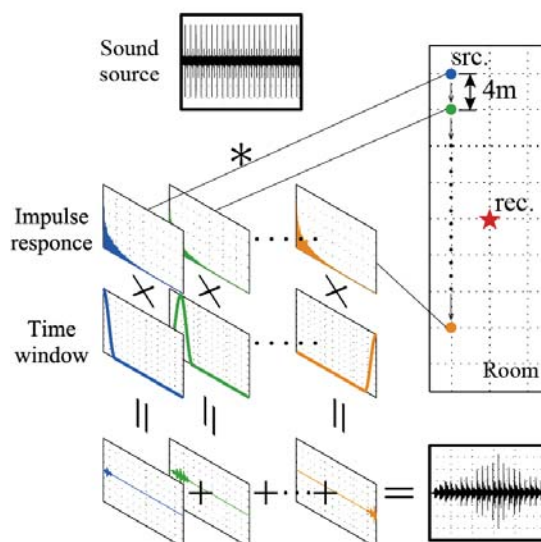


Fig. 5 Convolution of IRs for a moving sound source.

を掛けて重ね合わせることとした (図 5)。最終的に、各チャンネルで残響が付加された足音・話声・空調音を全て合成し、6ch 再生音源を生成する。

4 システムの妥当性の検証

4.1 実空間との比較

実際の公共空間における実音場、実音場の録音音源を用いて 6 チャンネル音場再生システムで再生した再生音場、前述のシミュレーションシステムを用いて模擬した仮想音場を用意し、各音場において音響測定および聴感実験を行った。

対象空間 大小 4 つのロビーとアトリウムを選定し、仮想音場では各空間を単純化し直方体形状の 4 音場を設定した (表 1)。音場 D は 1 面吸音壁, その他は反射性である。歩行者数は, 実空間の概数を想定し, 歩行者と話者の音源数を 4:1 で配分した。

音響測定結果 図 6 に実空間と仮想音場の等価騒音レベル (左) と, 仮想音場の残響時間 (右) を示す。等価騒音レベルは音場 A で実空間が約 5dB 高いが, 全体的に仮想音場と比較的近い。残響時間はいずれも非常に長い, 容積が大きい音場 D では高音域において吸音壁と空気吸収による顕著な低下が見られる。

聴感実験結果 各音場にて音を被験者に提示し, 11 項目の評価語に SD 法 (7 段階) で回答させた。なお, 各対の前の語が正値に対応する。図 7 に各評価語の平均値を示す。二元分散分析の結果, 全実験の 5 項目で音場の主効果が有意となり (図中星印), 実験間で傾向が一致した。全実験で賑やかさ・音の大きさは騒音レベルと明確に対応し, 音の種類・数も, 騒音レベルにかなり対応している。しかし残響時間の短い音場 B では残響感が最も高く, 残響感は仮想音場の残響時間と対応していない。音の高低では音場 B で明らかに高い印象で, 高音域の印象が残響感と対応していることが予想される。

Tab. 1 Conditions of four simulated sound fields.

Field	Volume (m ³)	Floor area (m ²)	W / D / H (m)	Absorb. wall	Num. of persons
A	7,531	769	14.5 / 53 / 9.8	w/o	10
B	1,839	334	12.2 / 27.4 / 5.5	w/o	10
C	12,196	623	8.9 / 70 / 19.6	w/o	30
D	252,000	4,200	28 / 150 / 60	w/	30

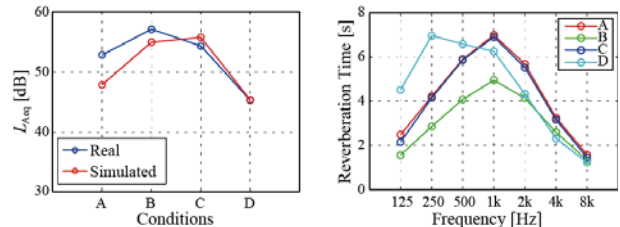


Fig. 6 L_{Aeq} (left) and Reverberation times (right) for simulated sound fields.

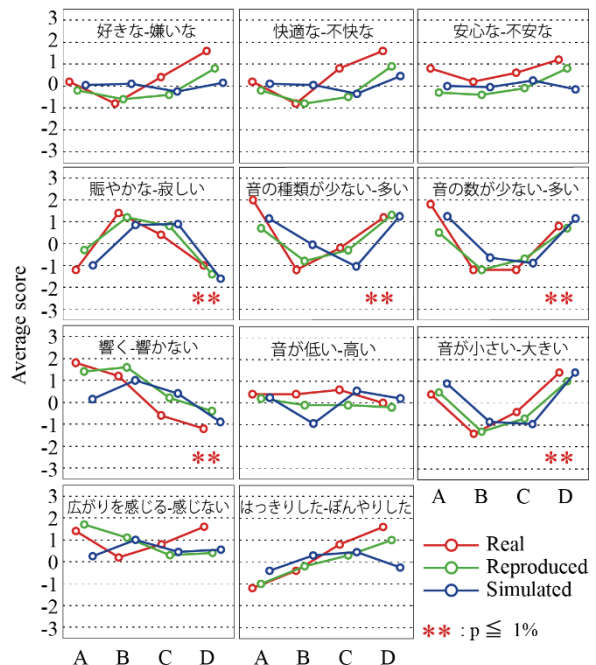


Fig. 7 Average scores and two-sided 95% confidence intervals for 11 evaluation terms.

4.2 条件変化による影響

室条件・歩行者密度を変化させた仮想的な公共空間を複数作成し, 一対比較による聴感実験を行い, 物理量との比較を行った。

対象空間 室寸法 16m×24m×8m(H), 全壁面反射性, 歩行者 1 人あたり床面積 16 m² の空間を音場 A と, それに対して各室条件・歩行者密度を変化させた 5 音場の計 6 音場を設定した (表 2)。吸音率は 4.1 と同様とし, 歩行と話声の割合も同様に 4:1 とした。

組み合わせ 音場 A を基準とし比較対を音場 B～F とした 5 対と、音場 C を基準、音場 D を比較対とした計 6 対の組み合わせを設定した (図 9)。なお音場 X が基準、音場 Y が比較対のとき Y/X と表記している。

音響測定結果 図 8 に等価騒音レベルの差分値 (左) と残響時間の変化率 (右) を示す。歩行者密度が高い音場 F でレベルが明らかに大きくなっている。残響時間は室容積の大きい音場 B では非常に長く、吸音条件の音場 E では非常に短い。

聴感実験結果 被験者に基準、比較の順で音場を提示し、基準に対する比較空間の印象を 4 項目の評価語に対して一対比較法 (7 段階) で回答させた。各対の前の語が正値に対応する。図 9 に各評価語の被験者平均値を示し、t 検定で有意差を得られた項目に星印を示した。B/A, C/A, D/A, D/C では、室容積変化による残響時間の変化が残響感と対応していない。D/A, D/C では高さの上昇に伴い騒音レベルが下がり、うるささ感が低下するが、C/A では騒音レベルに有意な差はないにも関わらずうるささ感が高まる。E/A では残響感が非常に小さく、吸音の影響が確認された。F/A では歩行者密度増加に伴う騒音レベルの上昇が、うるささ感に対応した。このとき残響時間は変化していないが残響感が非常に大きく、騒音レベルに影響を受けていると考えられる。

5 おわりに

背景雑音に着目したシミュレーションシステムを構築し、主観評価による再現性の検証を行った結果、実音場とは概ね良い対応が確認された。また雑踏音場においてうるささ感は騒音レベルと対応する一方で、残響感に残響時間と対応しない場合が多く、

Tab. 2 Conditions of simulated sound fields.

Field	Volume (m ³)	Floor area (m ²)	W / D / H (m)	Absorb. wall	Num. of persons	Area /1person (m ²)
A	3,072	384	16 / 24 / 8	w/o	24	16
B	24,576	1,536	32 / 48 / 16	w/o	96	16
C	6,144	768	16 / 48 / 8	w/o	48	16
D	6,144	384	16 / 24 / 16	w/o	24	16
E	3,072	384	16 / 24 / 8	w/	24	16
F	3,072	384	16 / 24 / 8	w/o	48	8

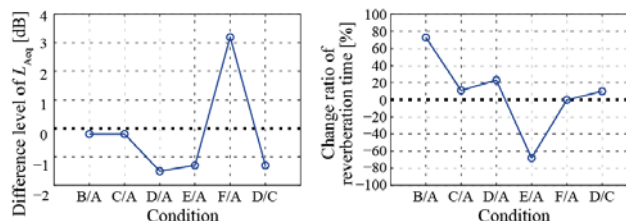


Fig. 8 Difference level of L_{Aeq} (left) and change ratio of reverberation times (right) for simulated sound fields.

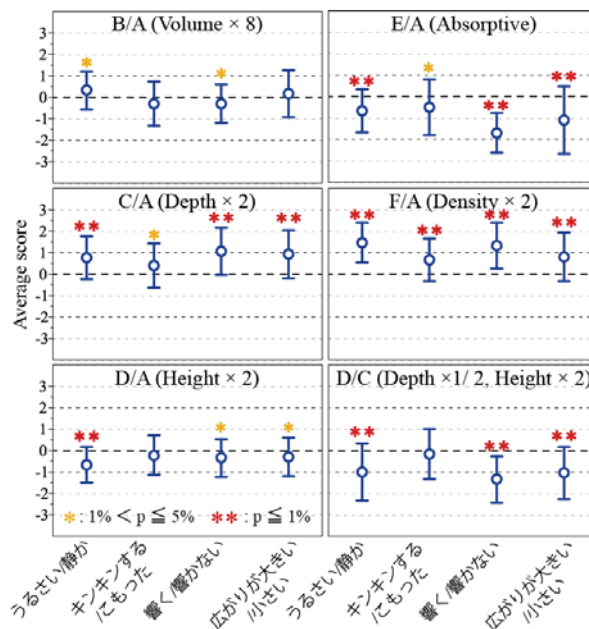


Fig. 9 Average scores and two-sided 95% confidence intervals for 4 evaluation terms by pairs.

騒音レベルに影響を受ける可能性が示された。従って公共空間の残響の設計には、雑踏の大きさも考慮する必要があると考えられる。今後は拡声放送やサイン音の再現などによって、より忠実な公共空間の音場再現システムの開発・運用が望まれる。

参考文献

- [1] 吉野ら, 音講論, 1135-1136, 2013.9. [2] 横山ら, 音講論, 737-738, 2000.9. [3] 上杉ら, 音講論, 419-420, 2007.3. [4] D.F.Hoth, JASA 12, 499-504, 1982.

☆西村裕喜子, 佐久間哲哉 (東大・新領域)

1 はじめに

駅や空港のコンコース、大型施設のアトリウム等の公共空間では、残響過多のため快適性や安全性が十分に確保されない場合が多い。そうした空間では、室用途や人間行動の多様性に加え、拡声放送、サイン音、人から発生する音など多種多数の音源が存在するため、音環境の予測・評価が難しい。また、拡声放送の音声伝達^[1]や騒音下の会話^[2]に着目した研究は行われているが、背景となる音場の予測・再現には踏み込んでいない。本報では、公共空間の音環境評価に向けて、背景としての雑踏音に着目したシミュレーションシステムの開発を行う。

2 シミュレーションシステムの概要

雑踏音場再現システムは、空間内に分布する各種音源モデルに基づく幾何音響解析と無響室内の6ch音場再生系^[3]から構成される。

音源モデル 背景音源には歩行者の足音・話声と空調音の3種を点音源群として想定し、足音は床面、話声は高さ1.5m、空調音は天井面に配置する。ドライソースとして、男女数名の足音・話声を録音・編集し、空調音には Hoth ノイズ^[4]を用いた。音響パワーレベルは一人当たり平均で足音 74dB, 話声 69dB, 空調音は天井面 8m 間隔の音源当たり 72dB (54dB/m²) とした。歩行者は 1 m/s で 4m 間隔の格子点を同一双方向に直線移動するものとし、歩行者と話声の音源数は与条件として配分する (図 1)。

伝搬計算 上記音源の各格子点から受音点に対して、音線法により6方向のカーディオイド特性を掛けたインパルス応答を算出する。その際、壁面の吸音率と空気の減衰係数をオクターブ帯域毎に反映する。次に、ドライソースに各格子点のインパルス応答を畳み込み、足音・話声は格子点間の移動を模擬するため、両側格子点の応答に正弦半波の時間窓を掛けて重ね合わせることとした (図 2)。最終的に、各チャンネルで残響が付加された足音・話声・空調音を全て合成し、6ch 再生音源を生成する。

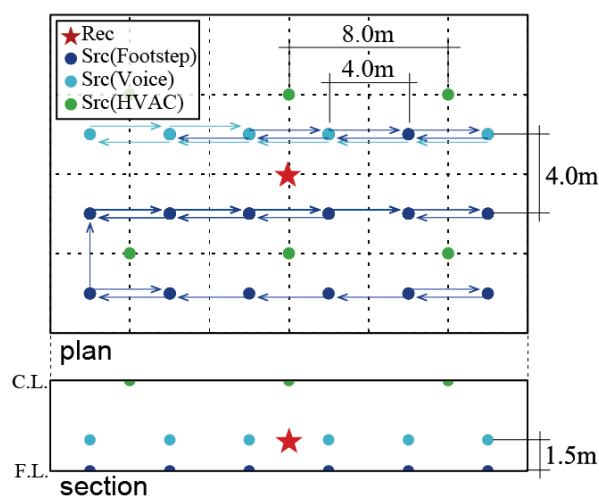


Fig. 1 Arrangement of sound sources.

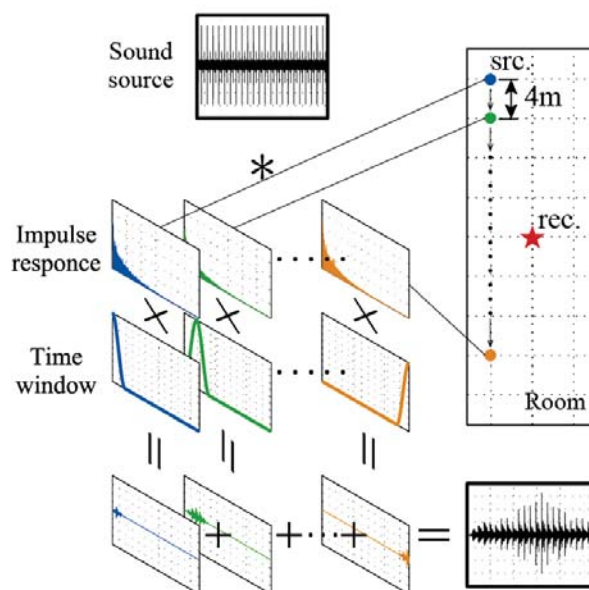


Fig. 2 Convolution of IRs for a moving sound source.

3 シミュレーションの試行

前述のシミュレーションシステムを用いて、試行的に実在する公共空間を模擬し、再現音場で音響測定および聴感実験を行った。

対象空間 大小4つのロビーとアトリウムを参考に単純化し、直方体形状の4音場を設定した (表 1)。音場 D の吸音壁 (長辺方向1面) を除き、全音場で壁・天井は反射性のボード材、床は反射性の石張りを想定し、吸音率を与えた

*Development of a sound field simulation system for crowd noise in public spaces. by NISHIMURA Yukiko, SAKUMA Tetsuya (Univ. of Tokyo).

Table 1 Conditions of four simulated sound fields.

Field	Volume (m ³)	Floor area (m ²)	W / D / H (m)	Absorb. wall	Num. of persons
A	7,531	769	14.5 / 53 / 9.8	w/o	10
B	1,839	334	12.2 / 27.4 / 5.5	w/o	10
C	12,196	623	8.9 / 70 / 19.6	w/o	30
D	252,000	4,200	28 / 150 / 60	w/	30

(表 2)。歩行者数については、現場で騒音レベル測定を行った状況での概数を想定し、歩行者と話声の音源数を 4:1 で配分した。

音響測定結果 図 3 に再現音場の残響時間を示す。いずれも中音域で 4~6 秒と長大であるが、比較的小さい音場 B では高音域が長いのに対して、非常に大きい音場 D では吸音壁と空気吸収による顕著な低下が見られる。図 4 に現場と再現音場で測定した等価騒音レベルを示す。音場 A では現場で約 5dB 高いが、解析条件を便宜的に与えたものの、比較的近い値となっている。

聴感実験結果 無響室にて 10~20 代男女 20 人に再生音場各々を約 30 秒間提示し、11 項目の評価語に対して評定尺度法 (7 段階) で回答させた。なお、各対の前の語が正値に対応する。図 5 に各評価語の被験者平均値を示す。なお、音場と被験者を要因とした二元分散分析の結果、被験者の主効果が 3 項目、音場の主効果が 6 項目で有意となった (図中星印)。総合的印象としての好み・快適性・安心感に有意差は見られないが、音の大きさ・高低・響きと音源の種類・数に加えて、賑やかさについては有意差が生じている。一方、広がり感・明瞭性では有意差は見られない。賑やかさ・音の大きさは騒音レベルに明確に対応し、音の種類・数の印象も、実際の音源数とは異なり、騒音レベルにかなり対応している。残響感については残響時間との明確な対応は見られず、最小容積で低中音域の残響時間は短い音場 B で残響感が最も高くなっている。音の高低では音場 B で明らかに高い印象であり、高音域で残響感を判断していることが予想される。

4 おわりに

雑踏音場シミュレーションシステムを構築し、試行的に実空間を模擬再現し、音響物理量と聴感印象との対応を確認した。次報では、室条件や歩行者密度の影響を報告予定である。

参考文献 [1]吉野ら, 音講論, 1135-1136, 2013.9. [2]横山ら, 音講論, 737-738, 2000.9. [3]上杉ら, 音講論, 419-420, 2007.3. [4]D. F. Hoth, JASA 12, 499-504, 1982.

Table 2 Absorption coefficients of surfaces.

Surface	Absorption coefficient (in oct. band)						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Refl. wall/ceiling	0.26	0.13	0.08	0.06	0.06	0.06	0.06
Absorb. wall	0.40	0.35	0.45	0.55	0.65	0.75	0.85
Floor	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03

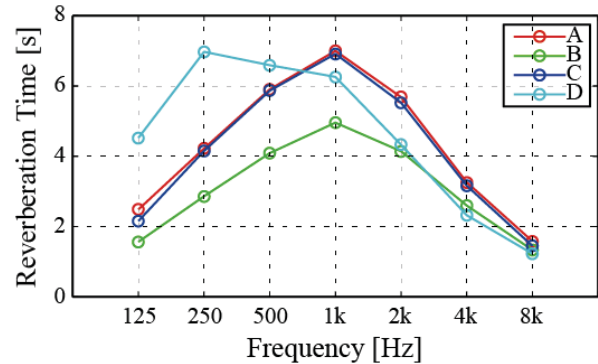


Fig. 3 Reverberation times for simulated sound fields.

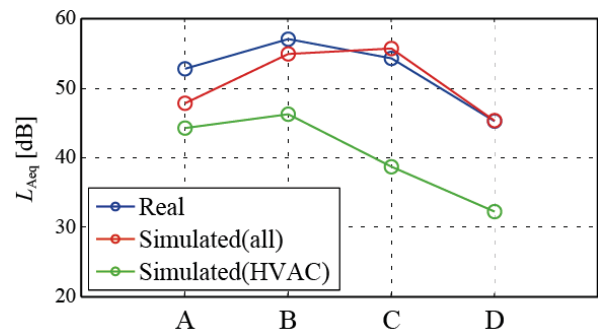


Fig. 4 LAeq for real and simulated sound fields.

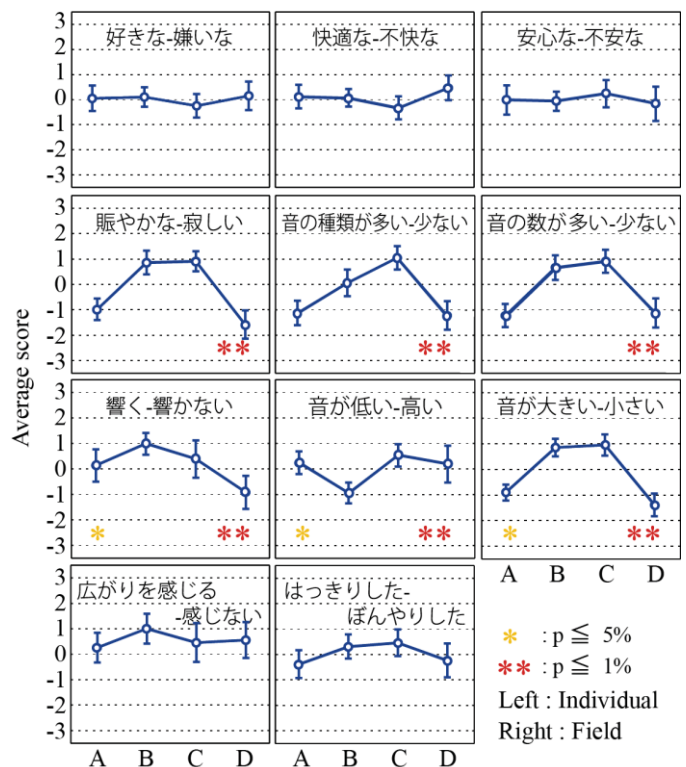


Fig. 5 Average scores and two-sided 95% confidence intervals for 11 evaluation terms.

音場再生システムを用いた駅プラットフォームの音環境印象評価実験

正会員 ○西村 裕喜子*
正会員 佐久間 哲哉**
正会員 宗方 淳***

音環境 音場再生 プラットフォーム
印象評価実験 サウンドスケープ

1. 研究の背景と目的

1-1 研究の背景

都市には多くの音があふれている。都市の公共機関で騒音問題を抱えるものの一つとして、鉄道駅の音環境が挙げられる。駅ホームにおける騒音レベルは、電車の走行音や案内放送・発車ベルなどにより 90dB 程度まで到達するが、これはきわめてうるさいと感じられるレベルであり、毎日利用する駅でのこの音環境は現代社会のストレスの一因を担っているとも言える。近年、乗客による駅員への暴力事件が多く発生しているのも、ストレスが溜まりやすい環境が影響しているように思われる。

駅の音環境に対する既往研究としては、土田ら^{*1)}が現状調査を行っており、アナウンスと発車ベルの音量測定を中心に駅の音環境を明らかにし、それらがどこの、誰に、どんな情報を、どのように提示しているのかを整理し、駅という公共空間における環境デザインとしての課題を挙げている。また、真鍋ら^{*2)}は公共空間の音環境デザインとして地下鉄駅の音響調査を行っており、残響時間や音圧分布などの物理音響特性を明らかにしている。

1-2 仮説・研究の目的

音環境の問題が研究課題となるときは、騒音レベルなどの物理音響特性が検討の中心となり、測定することの出来ない個々の音事象の音量や響き・うるささ等と、意味性も含めたそれらの音に対する人間の印象については触れないことが多い。

一方、1960～70 年代に R.M.シェーファーが提案した「サウンドスケープ」という概念がある。これは、周囲に存在する様々な音を騒音として一括して捉えるのではなく、風景の個々の要素のように個々の音源や音事象に着目して捉えようという考え方である。

一般に全体の騒音レベルを要因とした時の空間全体の音環境への評価は、音量が大きければうるさく不快、小さければ静かで快適という結果になる。しかし実際に人間が音環境に対して抱く快・不快は音量だけでなくその他の様々な要因が総合的に組み合わせられた結果であり、音量だけを要因とした時、要因と結果の関係は必ずしも全てを説明できない。そこで周囲の音を個々の音源や音事象に着目して捉えるサウンドスケープの概念を援用すれば、個々の音環境に対する印象評価により、空間全体の音環境への印象を説明することが出来ると考えられる。

そこで本研究では、空間全体の音環境の印象にはどのような音響的現象が影響しているかの確認をしたうえで、個々の音事象の種類やそれらの印象評価によって、空間全体の音環境に対して抱く印象が説明できるかの検討を行い、この評価方法を一般的な空間の音環境の評価方法として用いることの妥当性について論じることを目的とする。

2. 予備調査

2-1 調査目的と概要

予備調査として、一般的な駅の音環境を把握するため、騒音レベルに着目して調査を行った。

調査は、東京都・千葉県内の駅から様々な特徴を持ち、乗客数が大きく異なるいくつかの地上駅・地下鉄駅を選定し、プラットフォームで騒音計(KANOMAX/積分形普通騒音計 MODEL4430)を用いて、等価騒音レベル(5 分)と最大・最小騒音レベルを夕方の通勤ラッシュ時(17～20 時)に測定した。

2-2 調査結果と考察

等価騒音レベルと乗客数・路線数の間に関係性は特に見られず、同程度の乗客数・等価騒音レベルでも騒音レベルの幅が駅によって異なるという結果が得られた(図 1)。つまり常に発生している音と突発的に発生している音の騒音レベルが駅によって異なる事が、音環境全体への印象に影響を与えていると考えられる。

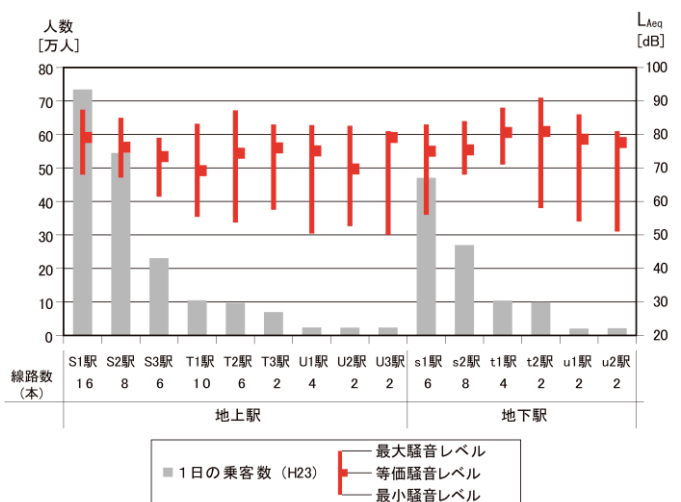


図1 乗客数と騒音レベルの対応

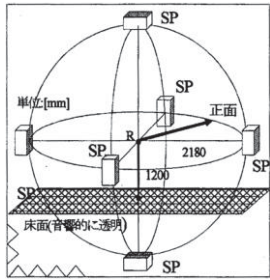


図2 6チャンネル
音場再生システム^{*)}

表1 6チャンネル音場
再生システム構成

收音系	①6CH-Mic (sanken:CU-6CH II)
	②Mic-amp (RME:QuadMic)
	③Recoder (RION:DA-40)
	④Monitor-Mic (ONOSOKKI:LA-1350)
編集・再生系 【16bit/44.1kHz】	⑤測定用PC
	⑥software (audition)
	⑦Audio-interface (EDIROL:UA-101)
出力系	⑧Processors (YAMAHA:DME-24N)
	⑨Power-amp (YAMAHA:IPA-8200)
	⑩Loud speakers (YAMAHA:NS-2HX)

3. 予備実験

3-1 実験目的

本研究は無響室内で6チャンネル音場再生システム(図2・表1)を使用して実験を行う。このシステムは視覚情報がない場合の再現性が明らかでないため「認識される音事象の種類」と「写真の有無による音事象の認知の差」をまず予備実験により確認する。

3-2 実験概要・検討方法

駅で録音した音を東京大学柏キャンパス内の無響室で6チャンネル音場再生システムで再生し、4人の被験者で音の聞き取り実験を行い、以下の2点を検討した。

(1) 認識される音事象の種類

記述の生データを音事象ごとに分類し、指摘された音事象の種類を把握する。

(2) 写真の有無による音事象の認知の差

記述の生データを音事象ごとに分類し、指摘数を駅ごと・音事象ごとにカウントする。指摘数の駅ごとの平均値を出し、「写真あり」と「写真なし」の場合の値を比較し、写真の有無による差を把握する。

3-3 実験手順

被験者は無響室の指定した位置・向きで座り、通勤・通学者の電車待ちの状態を想定して音の聞き取り実験を行う。目を閉じた状態で5分間の音を聞き、その間に聞き取ることが出来た音事象の名前を記入する。これを4駅分繰り返す。但し3,4駅目は始めにその駅の写真を提示してから同様の手順を行う。

3-4 実験結果と考察

(1) 認識される音事象の種類

音事象の記述の結果、[音声案内][電車の音][人の声や物音]などが多かった。また個人によって記述の仕方が異なるため、記述された音事象の分類を行った(表2)。

(2) 写真の有無による音の認知の差

音事象の指摘数の割合を駅ごと・音事象ごとに集計した結果、写真の有無によって音事象の指摘数に差は見られなかった。

以上の結果を踏まえ、本実験では認知される音事象を表2の分類ごとに提示し、写真の提示をせずに音を聞かせることとした。

表2 聞き取られた音事象の分類

記述された音事象名	分類	記述された音事象名	分類
電車通過の音声案内 男	音声案内	人の声	人の声や物音
電車発車の音声案内		人の声 女	
電車発車の音声案内 女		人の声 男	
電車発車の音声案内 男		人の声 子供	
電車到着の音声案内		人の声 大人	
電車到着の音声案内 女		会話 男女	
電車到着の音声案内 男		咳、くしゃみ、鼻をすする音	
ドア開閉の音声案内		足音	
ドア開閉の音声案内 女		人の動作音	
ドア開閉の音声案内 男		袋の音	
音声案内		かばん開閉の音	
音声案内 女		チャックの音	
音声案内 男		小銭の音	
工事の音声案内		缶を開ける音	
指定席の音声案内	突発的サイン音	ゴミを捨てる音	交通音
電車発車チャイム		鈴の音	
電車到着チャイム	常時サイン音	幕の音	自然音
笛の音		自動販売機の音	
エスカレータの音声案内	通過電車音	車の音	自然音
サイン音		救急車の音	
エスカレータのサイン音		消防車の音	
機械のサイン音	発着電車音	飛行機の音	自然音
電車走行音		鳥の鳴声	
電車発車音		風の音	
電車到着音			
電車ブレーキ音			
電車クラクション			
電車機械音			
金属性の音			
空気抜く音			
ドア開閉音			

表3 駅名と各駅の特徴の対応

駅名	地上・地下	1日の乗客数(人)	駅名	地上・地下	1日の乗客数(人)
A1駅	地上	734,154	a1駅	地下	580,367
A2駅	地上	271,057	a2駅	地下	269,848
B1駅	地上	125,276	b1駅	地下	104,200
B2駅	地上	230,689	b2駅	地下	99,394
C1駅	地上	69,750	c1駅	地下	20,426
C2駅	地上	6,482	c2駅	地下	6,201

※駅名のA/B/C、a/b/cは、駅の規模の大/中/小をあらわす。

4. 本実験

4-1 実験目的

個々の音事象の種類やそれらの印象評価により、空間全体の音環境の印象が説明できるかを検討するため、駅の音環境に対する印象評価実験を行った。

4-2 実験概要

予備調査・実験結果をもとに、本実験では18人の被験者に予備実験と同様に6チャンネル音場再生システムで駅の音環境を聞きかせ、評価用紙に回答させる。

4-3 対象駅の選定と提示音の收音・提示方法

様々な特徴の音を用意するため、1日の乗客数・規模・建設時期の異なる様々な駅を地上駅・地下鉄駅各6駅ずつ選定し(表3)、各駅で10分程度收音し、2分30秒に編集したものを実験に使用した。

4-4 評価項目

音環境全体に対する印象は、表4のSD法評価項目(7段階)で評価させた。この項目は、音環境印象の既往研究などを参考にして選定した。この項目のうち、【良さ】【好み】【快適性】の3項目を音環境全体の総合的な印象

を示す上位項目とし、残りを音環境全体の要素的な印象を示す下位項目とした。下位項目は【音量】【音程】【響き】などの音響特性に直接的に影響を受ける印象項目であるのに対して、上位項目はそれらの音響特性の総合的な印象を示す用語である。以後、本研究では上位項目 3 つを「音環境全体の総合印象」とし、下位項目 8 つを「音環境全体の要素印象」とする。ただし実験結果(4-6)では、音環境全体の総合印象の 3 項目はほぼ同じ評価の傾向を示すため、分析に用いる総合印象は 3 項目のうち最も標準偏差の値が大きい【好み】のものとする。また分析には生データを駅ごとに被験者数で平均した値を用いる。

個々の音事象名に関しては、予備実験での分類結果(表 2)を参考に決定した音事象名を評定用紙にあらかじめ一般的な音事象として提示し(表 5)、認識された音事象にはチェックをさせ、提示された以外の音事象を認識した場合は記述させた。認識した各音事象の印象は、表 4 の SD 法評価項目(7 段階)で回答させた。この項目についても既往研究などを参考に絞った。

4-5 実験手順

被験者は指定した位置・向きで座り、通勤・通学者の電車待ち状態を想定し音の聞き取り実験を行う。目を閉じた状態で 2 分 30 秒間の音を聞き、終了後にまず音環境全体に対する印象を答える。次にあらかじめ列挙された個々の音事象のうち聞こえたものをチェックし、それぞれの印象を答える。すべての記入が終了したら次の音に移る。この手順を 12 駅分ランダムに繰り返す。

4-6 実験結果と分析・考察

まず図 3 より音環境全体の総合印象と等価騒音レベルの関係を見る。レベルが顕著に低いときは、総合印象は高くなる関係が確認されたが、レベルが中～高のときは

表 4 SD 法評価項目

印象評価対象	音環境全体		個々の音事象	
SD 法評価項目	総合印象 [上位項目]	良い — 悪い (良さ)	必要 — 不要 (必要度)	
		好きな — 嫌いな (好み)		
		快い — 不快な (快適性)	存在感の — 存在感のない (存在感)	
	要素印象 [下位項目]	静かな — うるさい (静けさ)	ある — ない (音量)	
		にぎやかな — 寂しい (にぎやかさ)	音が — 音が小さい (音程)	
		落ち着きのある — 慌しい (落ち着き)	音が高い — 音が低い (音程)	
		派手な — 地味な (派手さ)	耳当りの — 耳障りな (音色)	
		平凡な — 新鮮な (平凡さ)		
		深みがある — 金属的な (深み)		
		響きのある — 響きのない (響き)		
		開放された — 抑圧された (開放感)		

表 5 個々の音事象名

予備実験で分類した音事象名	本実験で提示した音事象名
音声案内	音声案内(電車運行・ドア開閉・その他)
突発的サイン音	サイン音(到着チャイム・発車メロディ・発車ベル・駅員の笛など)
常時サイン音	サイン音(エスカレータなどに関するもの)
通過電車音	通過する電車から生じる音
発着電車音	発着する電車から生じる音(到着音・クラクション・ブレーキ・ドア開閉音・発車音など)
人の声や物音	周囲の人の声や物音
交通音	鉄道以外の交通音(自動車・飛行機など)
	機械音(空調などのゴーという低い音)
自然音	自然の音(鳥・虫・風など)

表 6 音環境全体印象と等価騒音レベルの相関

	良さ	好み	快適性	等価騒音レベル
良さ	1.00			
好み	0.94	1.00		
快適性	0.92	0.96	1.00	
等価騒音レベル	-0.72	-0.63	-0.56	1.00

表 8 要素印象による総合印象の重回帰分析-1

説明変数	
静けさ	0.31
平凡さ	0.27
響き	-0.36
開放感	0.13
自由度調整済み R ² 値	0.64

※表の値は偏回帰係数を表す。

表 9 要素印象による総合印象の重回帰分析-2

説明変数候補	
静けさ	-
にぎやかさ	-
派手さ	-
落ち着き	-
平凡さ	-
深み	0.96
響き	-0.37
開放感	-
自由度調整済み R ² 値	0.93

※表の値は偏回帰係数を表す。

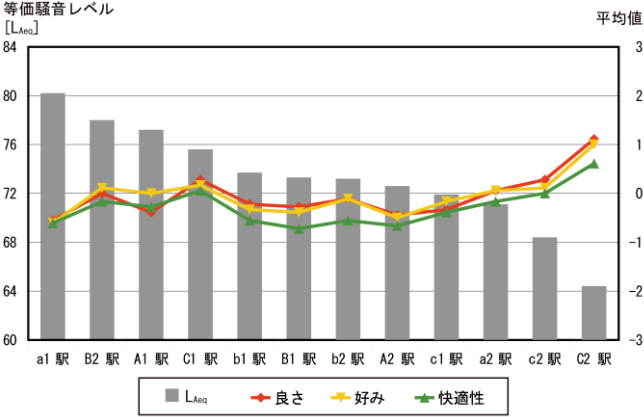


図 3 音環境全体の総合印象と等価騒音レベル

表 7 音環境全体印象の因子分析結果

	第1因子	第2因子	第3因子	第4因子
静けさ	0.98	0.07	0.05	0.08
落ち着き	0.92	0.24	0.02	0.19
にぎやかさ	-0.91	-0.36	-0.11	0.03
派手さ	-0.79	-0.54	-0.12	0.15
深み	0.78	0.35	-0.07	0.19
平凡さ	0.35	0.92	-0.06	0.14
響き	0.11	-0.02	0.94	-0.33
開放感	0.11	0.10	-0.39	0.91
寄与率(%)	50.37	18.22	13.30	13.15
累積寄与率(%)	50.37	68.58	81.88	95.03

明らかな関係は確認されなかった。また相関関係は表 6 のようになった。さらに目的変数を音環境全体の総合印象の【好み】、説明変数を等価騒音レベルとして回帰分析を行ったところ、偏回帰係数 -1.11、自由度調整済み R² 値 0.33 となり、高い説明力は得られなかった。よって音環境の快・不快は音量だけでは説明できないことが確認された。

音環境全体の要素印象で因子分析を行ったところ、表 7 のようになった。第 1 因子としては【静けさ】【落ち着き】【深み】【派手さ】【にぎやかさ】が高い数値を示し、第 2・3・4 因子に【平凡さ】【響き】【開放感】がそれぞれ 1 項目ずつ採用され、累積寄与率は 95% となった。したがって、音環境全体の要素印象はこれらの 4 軸の印象によって構成されることがわかった。

これを踏まえ、音環境全体の総合印象と要素印象の相互関係を検証するため、音環境全体の総合印象を目的変数、音環境全体の要素印象と等価騒音レベルを説明変数候補とし、重回帰分析を行った。表 8

に示すように、表 7 で得られた 4 軸のうち最も高い値を示した要素印象を説明変数として行ったとき、高い説明力のあるモデルは得られなかった。そこで音環境全体の要素印象を全て説明変数候補としてステップワイズ法で行ったとき、表 9 のように【響き】【深み】によって非常に高い説明力のあるモデルが得られた。これにより音環境全体の快適性には表 7 で確認された第 1 因子と第 3 因子が大きく影響しており、深みが大きく響きが少ない音環境が好まれることが示された。

ここで表 10 より、個々の音事象の指摘率を確認する。指摘率は、指摘され得る全音事象数を実際に指摘された音事象数で割った値を示す。[音声案内][発着電車音][突発的サイン音][人の声や物音]は、ほぼ全ての駅で指摘されたのに対して、[通過電車音][機械音][常時サイン音][自然音][交通音]は被験者による認知の有無や、駅による存在の有無が生じた。

次に音環境全体の総合印象を目的変数、個々の音事象の印象を説明変数候補としてステップワイズ法による重回帰分析を行い、音環境全体の総合印象と個々の音事象の印象の相互関係を検証する。説明変数候補には全ての音事象の全ての印象項目を用いず、個々の音事象の印象項目ごとに分析を行った。

指摘率の低い音事象を含む全ての音事象を説明変数候補とした場合、表 11 に示すようにいずれの印象項目においても自由度調整済み R^2 値 0.76 以上の高い説明力のあるモデルが得られた。しかし、例えば説明力の最も高い【音程】のモデルでは、[通過電車音][自然音][交通音]がモデルの説明力に大きく寄与しているが、これらの音事象は指摘率が低いため、説明変数に用いた全ての音事象が存在する場合のみ説明力を持ち、最適なモデルとはいえない。そこで駅・被験者によって認識される音事象に差がある[通過電車音][機械音][常時サイン音][自然音][交通音]を説明変数候補から外して分析を行った。指摘率の

高い[音声案内][発着電車音][突発的サイン音][人の声や物音]の 4 事象のみを説明変数候補とした場合、【存在感】と【音量】の印象評価によって高い説明力のあるモデルが得られ、【必要度】【耳当り】【音程】の印象評価によるモデルは採用されなかった。特に説明力の高い【音量】の印象評価モデルでは、[音声案内][発着電車音][突発的サイン音]の音量が小さく、[人の声や物音]の音量は大きい時の音環境が好まれることが明らかになった。以上の分析により、多くの駅プラットフォームの音環境は、個々の音事象の印象によって音環境全体の総合印象の説明が出来る可能性が示された。

5. まとめ

駅プラットフォームにおける音環境全体の印象は物理的要因のみで説明されるのではなく、個々の音事象の種類とそれらの印象評価に大きく関係し、またそれらが空間全体の音環境に対して抱く印象を説明できることが示された。本研究の分析結果から、駅プラットフォームの音環境の評価方法として最も適した印象評価モデルは、[音声案内][発着電車音][突発的サイン音][人の声や物音]の【音量】の印象を評価する方法であるといえる。

本研究で示されたこの個々の音事象印象によって音環境全体の総合印象を説明するモデルは、音環境全体の要素印象によるモデルの説明力には劣るが十分な説明力を持っており、具体的に個々の音事象の印象評価項目が示されたことによって、音環境設計を行う際の具体的な対策案の提案につながると考えられる。

ただし本研究では個々の音事象印象と音環境全体の要素印象の関係はまだ示されていない。今後この相互関係を明らかにすることによって、個々の音事象印象・音環境全体の要素印象・音環境全体の総合印象、の 3 つの印象評価によるモデルの構造を示す必要がある。

表 10 個々の音事象指摘率 表 11 個々の音事象印象による音環境全体の総合印象の重回帰分析

音事象	指摘率
音声案内	1.00
発着電車音	0.99
突発的サイン音	0.97
人の声や物音	0.94
通過電車音	0.35
機械音	0.35
常時サイン音	0.28
自然音	0.11
交通音	0.10

印象項目 音事象	必要度	存在感	耳当り	音量	音程	存在感	音量
音声案内	1.15	—	—	-0.35	0.46	-0.18	-0.39
発着電車音	—	-0.73	-0.38	-0.70	-0.22	-0.88	-0.62
突発的サイン音	0.75	-0.32	—	-0.26	—	-0.50	-0.27
人の声や物音	—	—	—	0.14	—	—	0.16
通過電車音	—	—	—	—	-1.61		
機械音	-0.51	—	-0.43	0.25	—		
常時サイン音	—	—	—	—	—		
自然音	2.21	0.40	1.43	—	2.14		
交通音	-2.33	—	-4.45	—	-1.67		
自由度調整済み R^2 値	0.80	0.78	0.76	0.80	0.84	0.72	0.80

*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
**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准教授・博士（工学）
***千葉大学大学院工学研究科・都市科学専攻 准教授・博士（工学）

*Graduate Student, of Socio-cultural Environ. Studies, Grad. Sch. of Frontier Sci., Univ. of Tokyo
**Assoc. Prof., Dept. of Socio-cultural Environ. Studies, Grad. Sch. of Frontier Sci., Univ. of Tokyo, Dr. Eng
***Assoc. Prof., Div. of Arch. and Urban Sci., Grad. Sch. of Eng., Chiba Univ., Dr. Eng.

【参考文献】

*1) 土田・木村・平手・安岡：駅の音環境設計に関する基礎研究 - 現状調査例 その 1 -、1991 年度日本建築学会大会学術講演梗概集.D,環境工学、1991.8
*2) 真鍋・前田・森本・佐藤：公共空間の音環境デザインに関する基礎的研究 地下鉄駅の音響調査事例、日本建築学会近畿支部研究報告集.環境系、2003.5
*3) (図引用)西沢・上杉・佐久間：多チャンネル音場再生システムにおける環境音の想定音量、音環境の評価、環境工学 I、2007.7

付録 A

評価用紙

- 実空間の音場の再現性に関する検討 - 実音場
- 実空間の音場の再現性に関する検討 - 再生音場
- 実空間の音場の再現性に関する検討 - 仮想音場
- 室条件変化が印象へ与える影響に関する検討

[illegible]

Fig. A.1 Evaluation sheet of experiment in real sound field.

■実空間の音場の再現性に関する検討 - 再生音場

公共空間における音の印象評価実験

本日はお忙しい中、実験にご協力いただきありがとうございます。はじめに、本実験の内容と手順について説明させていただきます。

◆**実験内容**

本実験は、東京駅近辺のいくつかの建物内で録音した音を実験室で再生紙、聞こえる音に対してどのように感じるのかを、設定した項目について印象評価していただくという実験です。所要時間は10分程度の予定です。

◆**実験手順**

1. 無観客室内に置かれた椅子に、指定された方向を向いて座ってください。
2. 番号をお伝えしますので、評価シートの右上の欄の番号を確認して下さい。
3. 準備ができたら音を流しますので、目を閉じて30秒前後聞いてください。音は1分間流れます。
4. 聞き終えたら目を開けて、次のページからの評価シートの全ての項目に、それまで聞いていた音に対する印象を7段階で答えてください。(記入例を参照)
5. 終わったら次の音に移ります。
6. 1～5を繰り返し、計4回行います。

※前回の実験で録音した音を使用していますが、実際の空間で聞いた印象との対応を考える必要はありません。

◆**記入例**

少し嫌いだと感じた場合

非常に好きな	どちらでもない	+	非常に嫌いな
--------	---------	---	--------

とても賑やかだと感じた場合

非常に賑やかな	どちらでもない	+	非常に寂しい
---------	---------	---	--------

どちらともいえない場合

非常に音が低い	どちらでもない	+	非常に音が高い
---------	---------	---	---------

◆指示後、黒枠の中をご記入ください。

日付: ____月 ____日 実験開始時刻: ____時 ____分

名前: _____ (男・女) ____歳

◆今聞いた音に対する印象をお答え下さい。

非常に好きな	-----	どちらでもない	非常に嫌いな
非常に快活な	-----	どちらでもない	非常に不快な
非常に安心な	-----	どちらでもない	非常に不安な
非常に賑やかな	-----	どちらでもない	非常に寂しい
非常に音の種類が少ない	-----	どちらでもない	非常に音の種類が多い
非常に音の数が少ない	-----	どちらでもない	非常に音の数が多い
非常に響く	-----	どちらでもない	全く響かない
非常に音が低い	-----	どちらでもない	非常に音が高い
非常に音が小さい	-----	どちらでもない	非常に音が大きい
非常に広がりを感ずる	-----	どちらでもない	全く広がりを感ずらない
非常にはっきりした	-----	どちらでもない	非常にぼんやりした

Fig. A.2 Evaluation sheet of experiment in reproduced sound field.

■実空間の音場の再現性に関する検討 - 仮想音場

【実験 1】

◆実験手順

1. 無響室内に置かれた椅子に、指定された方向を向いて座ってください。
2. 番号をお伝えしますので、評価シートの右上の欄に番号を記入してください。
3. 準備ができたなら音を流します。目を閉じて聞いてください。30秒間程度の音を2回流します。
4. 聞き終えたら目を開け、次ページからの評価シートの全ての項目に、それまで聞いていた音に対する印象を7段階で答えてください。
5. 終わったら次の音に移ります。
6. 2～5を繰り返し、計5回行います。

◆記入例

・少し嫌いだと感じた場合

非常に好きな

どちらでもない

非常に嫌いな

・とても賑やかだと感じた場合

非常に賑やかな

どちらでもない

非常に寂しい

・どちらともいえない場合

非常に音が低い

どちらでもない

非常に音が高い

◆今聞いた音に対する印象をお答え下さい。

非常に好きな

どちらでもない

非常に嫌いな

非常に快適な

どちらでもない

非常に不快な

非常に安心な

どちらでもない

非常に不安な

非常に賑やかな

どちらでもない

非常に寂しい

非常に音の種類が少ない

どちらでもない

非常に音の種類が多い

非常に音の数が少ない

どちらでもない

非常に音の数が多

非常に響く

どちらでもない

全く響かない

非常に音が低い

どちらでもない

非常に音が高い

非常に音が小さい

どちらでもない

非常に音が大きい

非常に広がりを感

どちらでもない

全く広がりを感しない

非常にはっきりした

どちらでもない

非常にぼんやりした

Fig. A.3 Evaluation sheet of experiment of virtual sound field.

Fig. A.4 Evaluation sheet of experiment of virtual sound field by changing room conditions.

付録 B

使用音源

実験で使用した 6 チャンネルの音源のうち，2 チャンネルマイクロフォンから再生した音源の波形を示し，代表的な発生音の部分について説明を添えた。

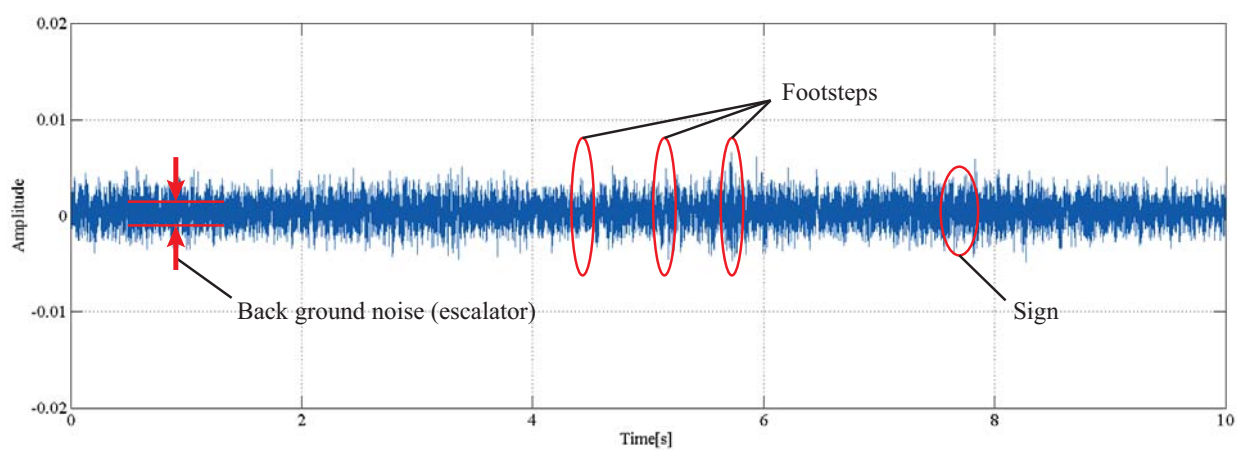


Fig. B.1 Sound source wave of virtual sound field A.

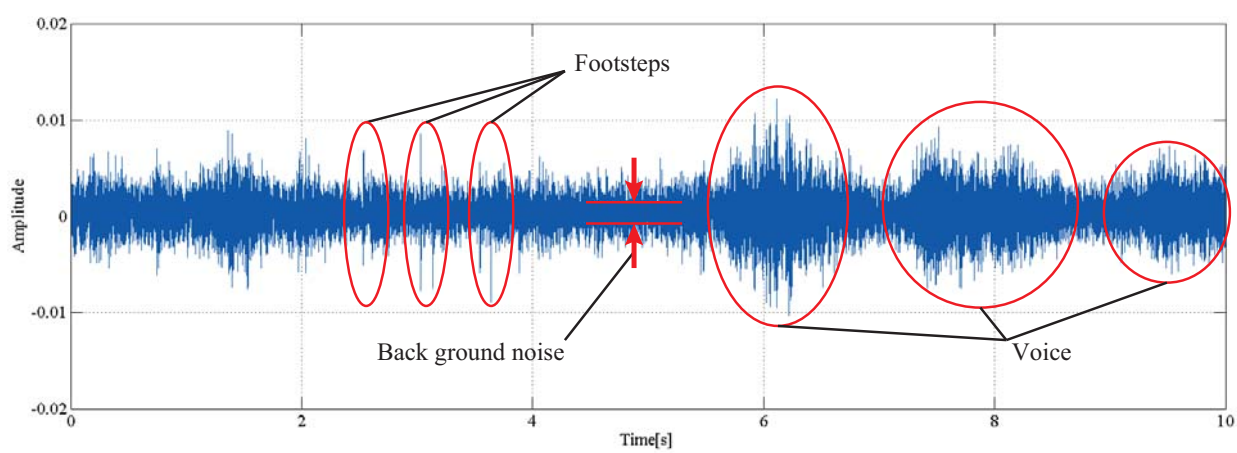


Fig. B.2 Sound source wave of virtual sound field B.

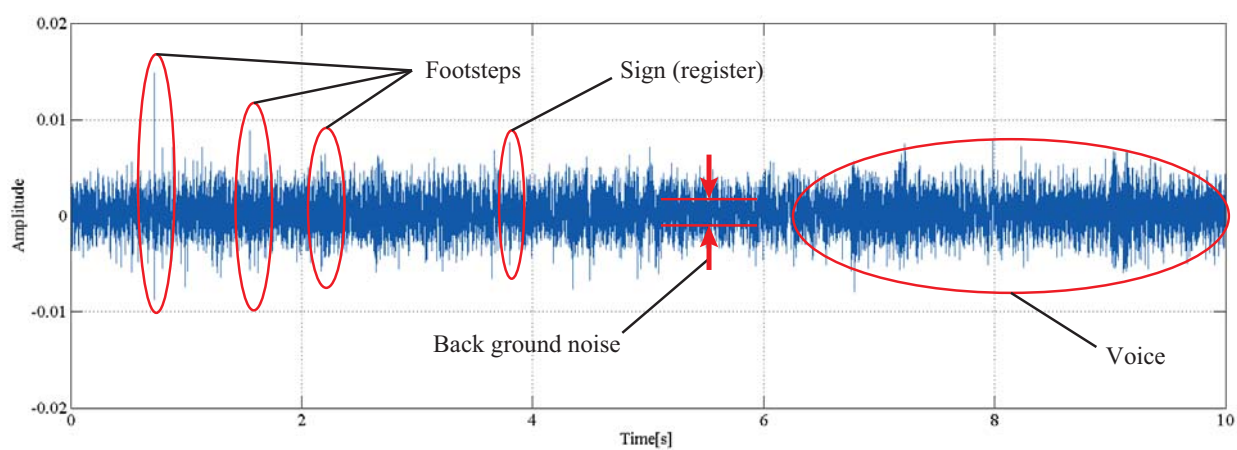


Fig. B.3 Sound source wave of virtual sound field C.

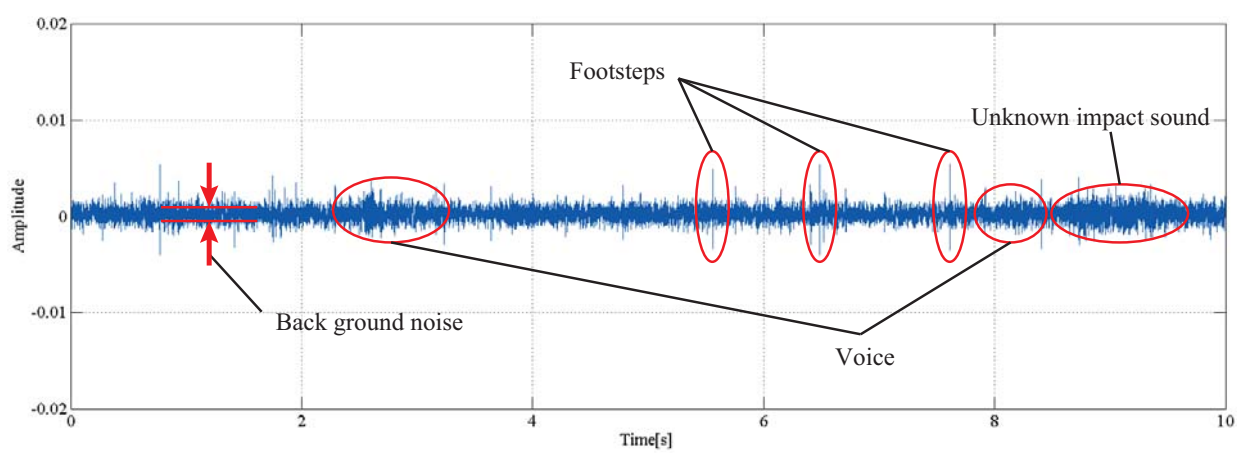


Fig. B.4 Sound source wave of virtual sound field D.

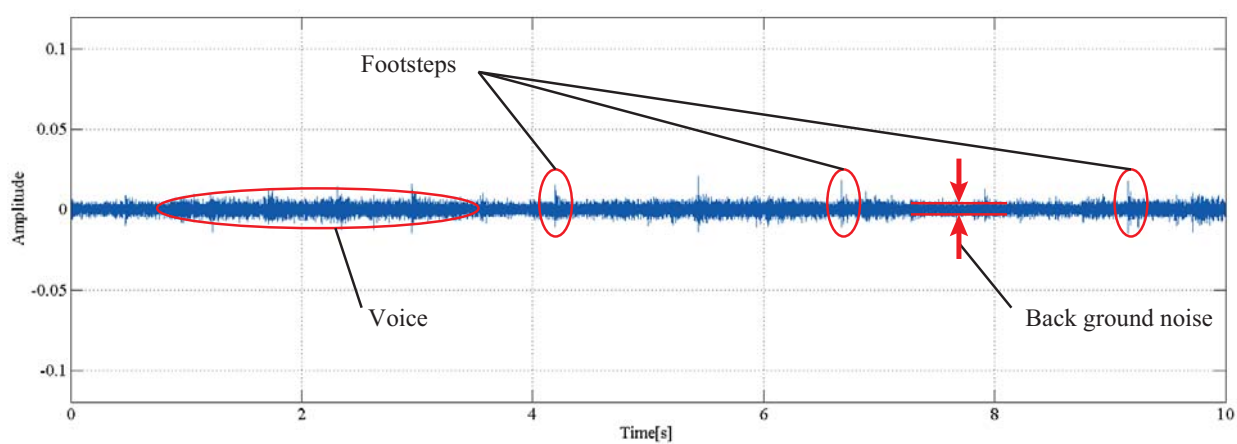


Fig. B.5 Sound source wave of reproduced sound field A.

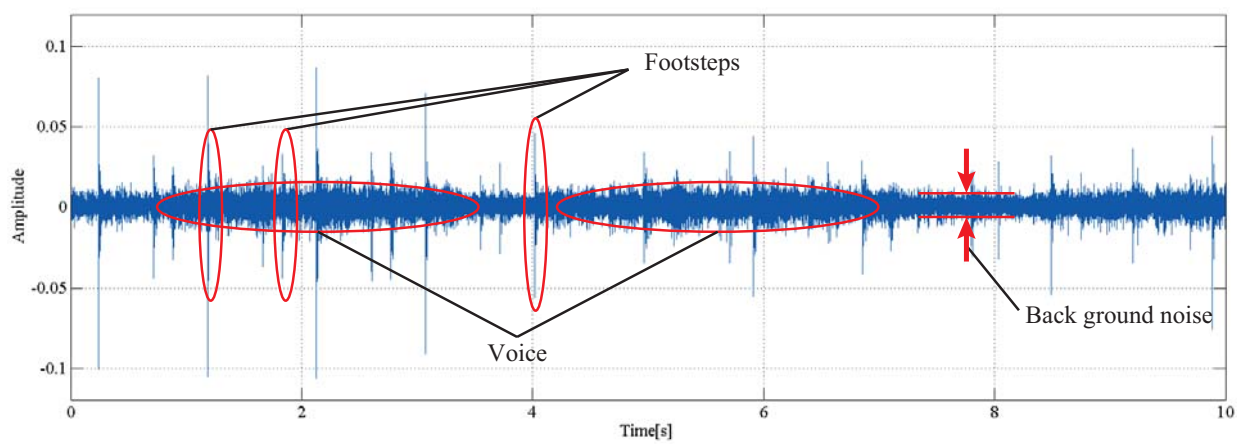


Fig. B.6 Sound source wave of reproduced sound field B.

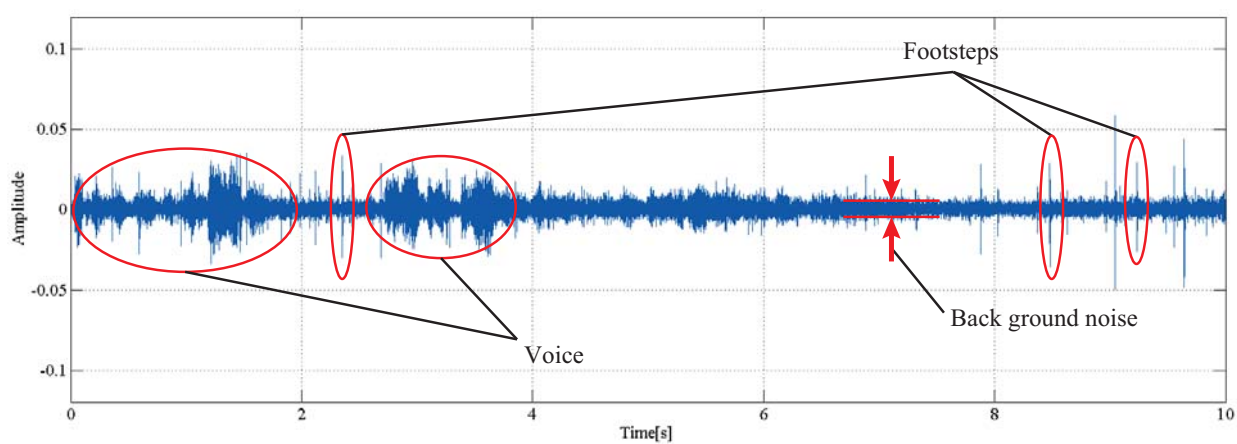


Fig. B.7 Sound source wave of reproduced sound field C.

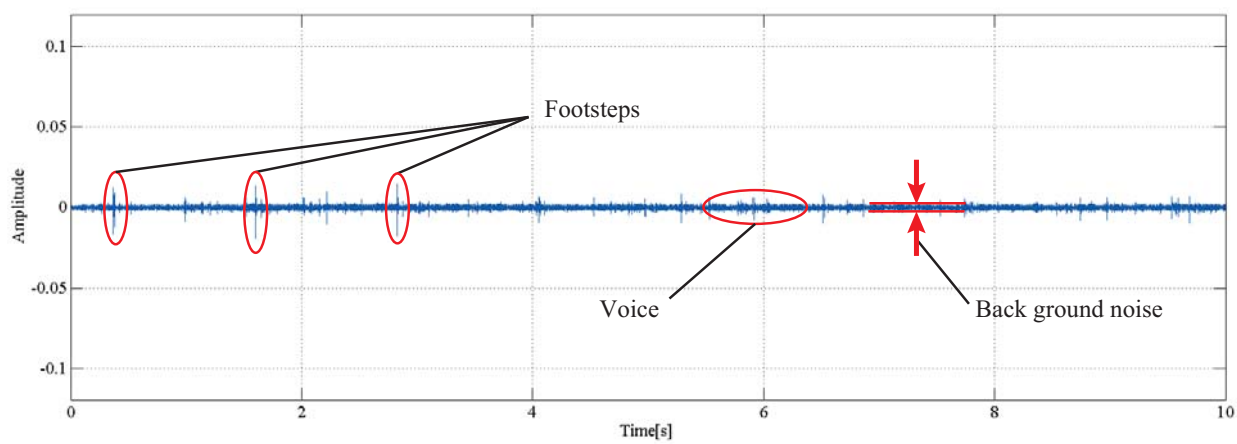


Fig. B.8 Sound source wave of reproduced sound field D.

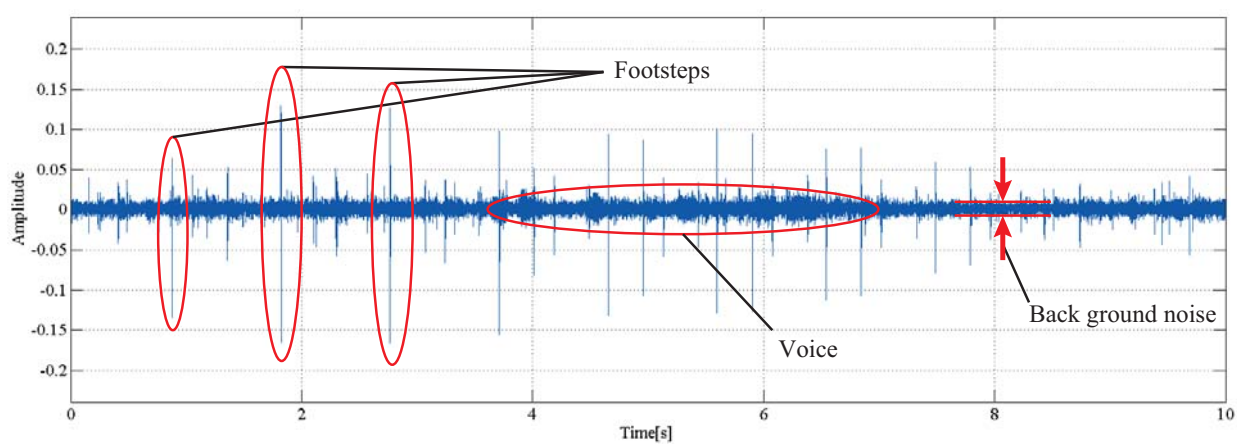


Fig. B.9 Sound source wave of virtual sound field A.

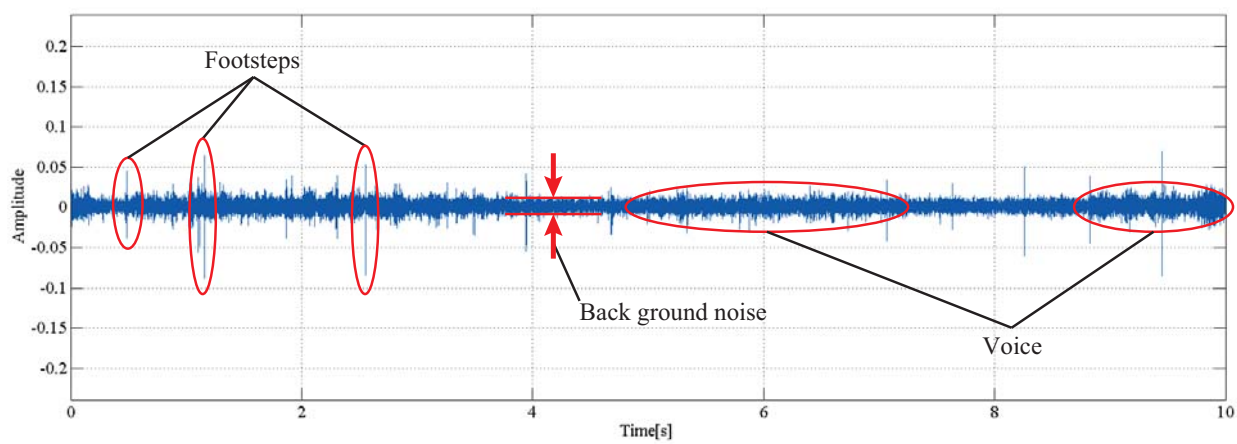


Fig. B.10 Sound source wave of virtual sound field B.

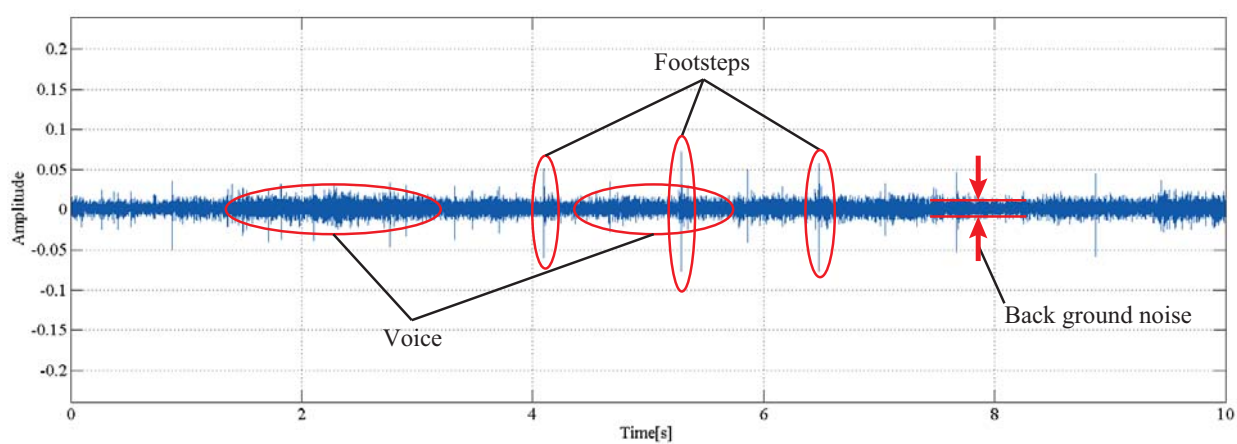


Fig. B.11 Sound source wave of virtual sound field C.

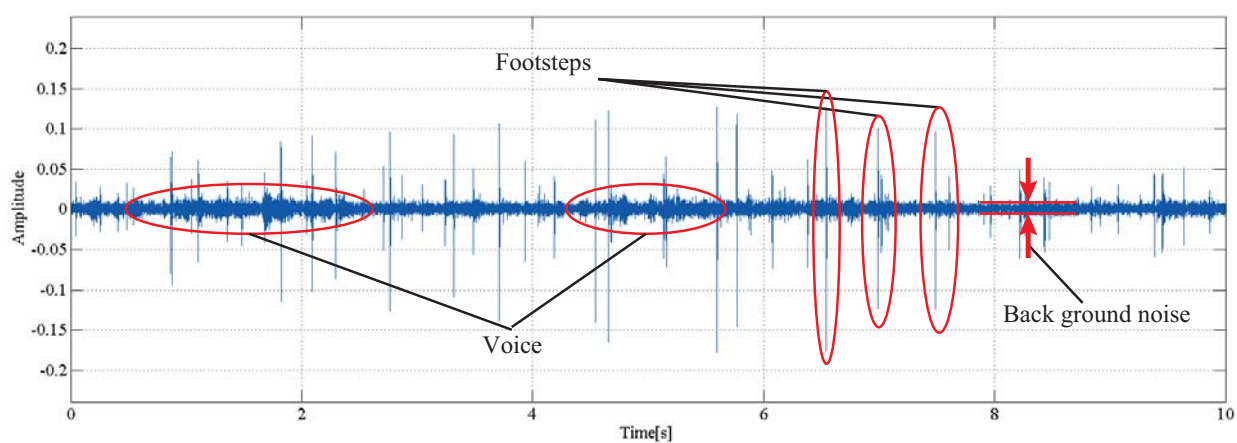


Fig. B.12 Sound source wave of virtual sound field D.

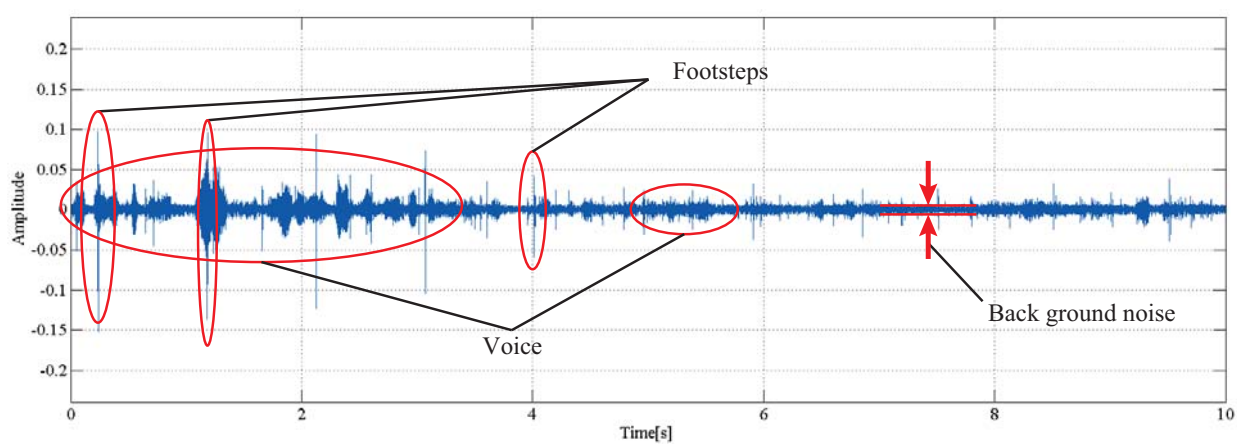


Fig. B.13 Sound source wave of virtual sound field E.

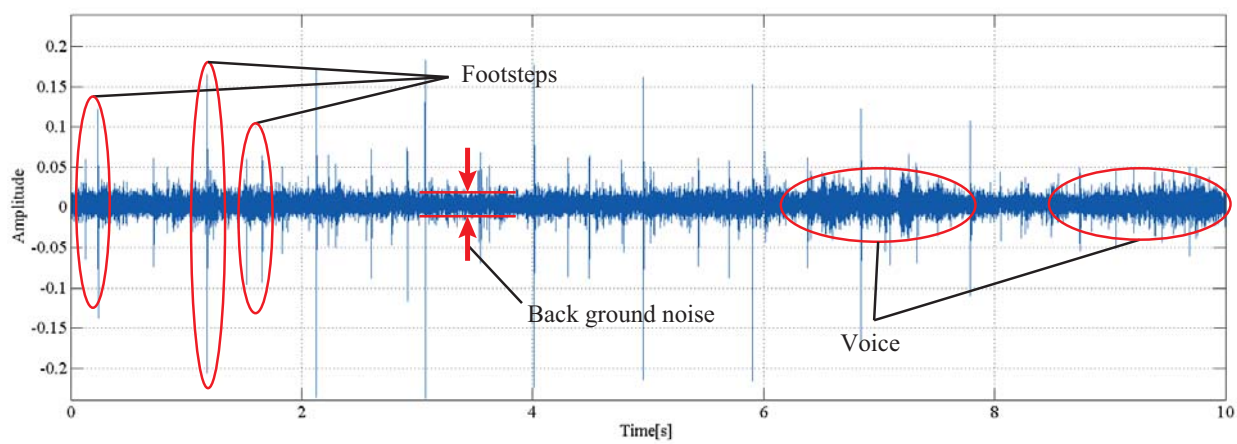


Fig. B.14 Sound source wave of virtual sound field F.