

千葉工業大学
博士学位論文

広域防災放送システムの音響設計のための
可聴型シミュレーションシステムに関する研究

平成 26 年 3 月

森 淳一

要旨

本論文では、広域防災放送システム（防災行政用無線同報系）の音響設計やその設計指針を検討するための聴感実験を行う手法として、コンピュータシミュレーションによって計算した音場を実験室内に3次元的に再現する可聴型シミュレーションシステムを考案し、その有効性を検討している。

日本では、屋外にいる人々に音響情報を伝えるための伝達手段として、広域防災放送システムの整備が進められており、地域内の複数個所に設置されたスピーカシステムから災害の発生やその後の避難誘導を伝えるアナウンスが一斉に放送されている。しかし、複数のスピーカシステムからの直接音や近隣の建物からの反射音は、長い遅れ時間を持ったマルチパスエコーとなり、それによって放送されたアナウンスの明瞭性が低下しがちである。この放送システムのアナウンス信号は、無線通信を利用することによって各スピーカシステムへ伝送されているために、その設計は無線通信システムの一部として取り扱われ、アナウンスがスピーカシステムから放送される部分については、音響的な設計指針の検討が不十分である。このような放送システムの音響設計を考える場合、適切な音響情報信号の作成、スピーカシステムの最適設計（配置計画、指向性制御等）、屋外音響伝搬（インパルス応答）の把握、音響情報の伝達特性の聴感評価などの多くの要素を組み合わせた設計手法を研究・開発する必要がある。また、この種のシステムの効果を検討する場合、実際に現場で行う聴感実験も有効であるが、その実施には諸々の条件によって大きな困難が伴う。そこで、実験室内に音場をシミュレートし、実験条件を自由に変化させながら不特定多数の被験者を対象に聴感実験を行う手法が有効であると考えられる。その場合、広域防災放送の明瞭性の低下を引き起こすマルチパスエコーは、いろいろな方向から到来することが大きな問題であり、これを含めて検討するためには、音の3次元的な空間情報も再現できる手法を用いる必要がある。その点で、本論文で提案する3次元の可聴型シミュレーションシステムは、広域防災放送システムの音響設計並びに検討に有効であり、これを用いて様々な音場条件について聴感実験を行うことによ

って、将来、音響的な視点から広域防災放送システムの設計指針を確立することも可能であると考えられる。

本論文は以下の 6 つの章で構成されている。

第 1 章では、広域防災放送システムの概要と可聴型シミュレーションシステムの必要性を述べている。

第 2 章では、広域防災放送システムに関する既発表の論文の中から、本論文と関連性のある研究を紹介している。

第 3 章では、屋外音響伝搬の把握手法に関する概要とその基礎的な検討の詳細を述べている。本研究では、屋外音響伝搬を把握するコンピュータシミュレーションとして、音響伝搬計算法の中でも最も単純な幾何音響シミュレーションに基づく虚像法を適用している。まずこの幾何音響シミュレーションによる計算方法をまとめている。本研究は、可聴型シミュレーションシステムの有効性を検討することが目的であるため、幾何音響シミュレーションによる計算では、均質な音場を仮定し、単純な条件をモデル化している。つぎにそのシミュレーションの精度を調査するために応用した現場測定法（Swept-Sine 法とクロススペクトル法）をまとめている。さらに幾何音響シミュレーションの利用可能性を基礎的に検討するために、比較的穏やかな気象条件下において広域防災放送システムの音響伝搬の現場測定を行い、その測定結果と幾何音響シミュレーションによる計算結果を比較している。その結果から、本手法が広域防災放送システムの音響伝搬予測に対して有効であることを述べている。今後の課題としては、幾何音響シミュレーションの手法をさらに高度化し、気象の条件、地表面効果、回折効果、拡散効果などを詳細に反映できる手法の開発の必要性を述べている。

第 4 章では、音場を実験室内に 3 次元的に再現する音場再現手法の概要と幾何音響シミュレーションと音場再現手法を組み合わせる方法、組み合わせた可聴型シミュレーションシステムを適用した検討の詳細を述べている。本研究では音場再現手法として、マルチチャンネル手法の中でも比較的簡便な 6 チャンネル収音・再生手法を適用している。まずこの手法について、既往の研究成果に基づいてその精度と原理をまとめている。この手法の再生シス

テムを利用するためには、幾何音響シミュレーションの計算結果に基づいて 6 チャンネルの音圧信号を合成する必要がある。その方法としては、幾何音響シミュレーションによって得られた各パルス（スピーカシステムからの直接音や優勢な反射音）の入射方向情報を基に 6 チャンネルマイクロホンのカーディオイド型単一指向特性の指向係数を計算し、その係数を無指向性收音の音圧に重みづけることによって 6 方向に振り分ける新たな方法を適用している。つぎにこの手法を実際に適用して、広域防災放送システムが整備されている地域における 6 チャンネル收音システムを用いた現場測定の結果と幾何音響シミュレーションによる計算結果との対応を調べ、両者がかなりよく一致することを確認している。さらに、本学の音響実験スタジオ内に設置されている 6 チャンネル再生システムを用いて単独反射音の音像定位実験、6 チャンネル收音システムを通して実際に録音したアナウンスとシミュレーションで合成したアナウンスの聞き取りにくさに関する比較実験を行い、この手法の有効性を示している。

第 5 章では、広域防災放送システム設計の上での本可聴型シミュレーションシステムの有効性を調べるために、スピーカシステムを構成するホーン型スピーカの数とその向きを考慮することによってアナウンスの聞き取りにくさが改善できる可能性に着目したケーススタディの結果を述べている。

第 6 章では、本論文の総括と今後の展望をまとめている。

Summary

In this paper, a 3-dimensional sound field simulation method (3D simulation method) combining the computer modeling and multi-channel auralization technique is proposed as the method to conduct the acoustic design and the auditory experiment of the municipal public address (M.P.A.) systems.

In Japan, M.P.A. systems are widely used to transmit verbal information to communities. In these systems, announcements such as those for disaster prevention and evacuation are broadcasted simultaneously from loudspeaker systems located at multiple points in a certain area. Speech intelligibility of M.P.A. announcements, however, tends to be deteriorated by multi-path echoes with long time delay owing to reflections from nearby buildings and the sounds from loudspeaker systems covering other subareas. To improve such problems, it is necessary to develop acoustic design method by combining speech synthesis, electro-acoustics (directional characteristic of loudspeaker systems and their positioning in the covering area), computer modeling and auditory assessment. In the auditory assessment, 3-dimensional information of sounds should be realized since the extent of deterioration of speech intelligibility by discrete multi-path echoes might depend not only on the magnitude and delay time but also on the arriving directions of respective echoes. On this point, the 3D simulation method proposed in this paper will be effective for the acoustic design of the M.P.A. systems. In addition, the guideline for the acoustic design of M.P.A. systems could be obtained by performing the auditory experiments using this method.

This paper is composed of six sections as follows.

In Section 1, summary of M.P.A. system and the necessity of the 3D simulation method are mentioned.

In Section 2, previous studies related to this paper are introduced.

In Section 3, a basic study on the prediction of outdoor sound propagation using computer modeling is described. As the computer modeling, image-source method based on the geometrical acoustics is applied in this study. In the prediction by the

computer modeling, impulse response is calculated by modeling very simple condition because the purpose of this study is to investigate the effectiveness on the 3D simulation method. To see the applicability of the computer modeling, two kinds of measurement methods, Swept-Sine method and Cross-spectrum method, are applied. In this investigation, measurements of the sound propagation from M.P.A. system were performed under relatively calm weather condition and the measurement results and the calculation results were compared. As a result, relative magnitude and arriving time of the direct sounds from the loudspeaker systems and the dominant reflections were in fairly good agreement. Through these results, it has been concluded that the computer modeling applied in this study is effective to predict sound propagation from M.P.A. system.

In Section 4, a study on the 3D simulation method combining the computer modeling mentioned above and the multi-channel auralization technique are stated. As the multi-channel auralization technique, the 6-channel recording/reproduction method was applied in this study. To use this reproduction method, it is necessary to synthesize the 6-channel signals based on the data calculated by the computer modeling. For this aim, the weighting functions for the 6-channel microphones with the cardioid directional characteristic were calculated based on the incidence directions of the each pulse (direct sounds from the loudspeaker systems and dominant reflections) obtained by the computer modeling. Thus, the 6-channel impulse responses were obtained. By convolving these impulse responses with a dry source (M.P.A. announcement), the 6-channel signals were synthesized. By applied this method, the measurement results obtained by the 6-channel recording system for actual M.P.A. system and the calculation results by the computer modeling were compared. As a result, those results were in considerably good agreement. Furthermore, by using the 6-channel reproduction system constructed in an anechoic room of Chiba Institute of Technology, auditory experiment on the direction judgment of a discrete sound following a direct sound and hearing test on the M.P.A. announcements recorded through the 6-channel recording system and

those synthesized by the computer modeling were performed. Through these experiments, the effectiveness of the method proposed in this paper has been confirmed.

In Section 5, an application of the 3D simulation method to a case study of the acoustic design in the actual M.P.A. system is described. In this case study, possibility of improving speech intelligibility by considering the number and the direction of the horn-type loudspeakers which constitute each loudspeaker system was investigated.

In Section 6, the conclusions of this paper and the matters to be investigated in the future are described.

目次

第 1 章	序論	02
1.1	本研究の背景・目的	
1.2	本論文の構成	
第 2 章	広域防災放送システムに関する既発表の研究	15
2.1	広域防災送システムの明瞭度予測手法	
2.2	時間差放送による明瞭性改善の試み	
2.3	スピーカシステムの指向性制御	
2.4	音声了解度評価手法をベースとした予測シミュレータ	
2.5	気象の影響を考慮した了解性推定法	
第 3 章	屋外音響伝搬の把握手法	24
3.1	把握手法の概要	
3.2	幾何音響シミュレーション	
3.2.1	虚像法の原理	
3.2.2	屋外音響伝搬予測のための音源のモデル化	
3.2.3	屋外音響伝搬予測のための空間のモデル化	
3.3	現場測定法	
3.3.1	クロススペクトル法	
3.3.2	Swept-Sine 法	
3.4	屋外音響伝搬の予測結果と現場測定結果の比較検討	
3.4.1	高層建物エリアにおける単独スピーカシステムからの屋外音響伝搬予測	
3.4.2	広域エリアにおける複数のスピーカシステムからの屋外音響伝搬予測	
3.5	屋外音響伝搬の日変化に関する基礎的調査	
3.6	まとめ	

第4章	可聴型シミュレーションシステム	62
4.1	音場再現手法	
4.1.1	6チャンネル収音・再生手法	
4.2	幾何音響シミュレーションの6チャンネル化	
4.2.1	6チャンネル収音・再生手法の原理	
4.2.2	幾何音響シミュレーションの6チャンネル信号の合成	
4.2.3	物理データの精度	
4.3	可聴型シミュレーションシステムの有効性に関する検討	
4.3.1	音像の定位性	
4.3.2	聞き取りにくさの主観評価	
4.4	まとめ	
第5章	広域防災放送システムの音響設計に関する試み	88
5.1	明瞭性改善のケーススタディ	
5.2	まとめ	
第6章	総括	96
参考文献		101
本論文を構成する論文		106
付録		109
	クロススペクトル法に用いる信号に関する基礎的検討	

謝辞

第 1 章 序論

1 序論

1.1 本研究の背景・目的

広域防災放送システムの概要

不特定多数の人々が行き交う屋外空間では、地震、台風、豪雨や津波などの自然災害の際に、市町村防災行政無線同報系（以下、広域防災放送システムという）を通して災害の発生規模、位置、状況やその後の避難誘導などが放送されており、それらの音響情報が的確に伝わる必要がある。近年の日本では、異常気象による都市災害の危険性が一層高まっており、それらの音響情報による安全性の確保がきわめて重要な課題となってきた。最近では、2011年3月に東北および関東地方を中心とした東日本大震災が発生し、その折にも、この種の拡声放送システムの重要性が改めて認識された。

広域防災放送システムは、昭和39年に発生した新潟地震、昭和43年に発生した十勝沖地震を契機に、震災時における非常通信手段として全国的に整備が開始され、全市町村中の76.3%（平成25年3月調査結果）の地域における整備が完工している[1]。この種のシステムの整備は、災害対策基本法や防災基本計画などに従って各市町村が個別に計画・推進しており、その計画に基づいてスピーカシステムの開設を行っている[2]。



図 1.1-1 広域防災放送システムのスピーカシステム

スピーカシステムの開設方法

スピーカシステムの開設は、一般的に以下の図 1.1-2 に示すフローチャートに従って取り組まれている。広域防災放送システムのスピーカシステムから放送される音響情報信号は、無線通信を利用することによって各スピーカシステムへ伝送されているために、その設計は無線通信システムの一部として取り扱われている。無線通信技術者による取り組みとしては（フローチャートの赤字）、まず、机上検討によってスピーカシステムを開設する位置とスピーカの向きなどを検討し、その開設予定位置へ無線電波を送信できる可能性を現地調査によって調べている。つぎに、無線通信に利用する周波数帯域を電波法に従って決定し、実際にスピーカシステムの工事を実施する。竣工後は、通信感度調査を行うことによって放送システムを評価している。このスピーカシステムの開設までの流れの中で、地域住民がどのように聞いているかなどの音響的な検討や調査としては（フローチャートの青字）、一般的に開設予定位置周辺の暗騒音レベル測定と試験放送の伝達レベル測定（暗騒音レベルに対して何 dB 増加したか）などを行っている[3, 4]。このように、広域防災放送システムにおけるスピーカシステムの設計や調査は、電波の通信が届くか否かを目的として進められ、音響情報がスピーカシステムから拡声される部分については、音響的な設計指針の検討が不十分となっているのが現状である。

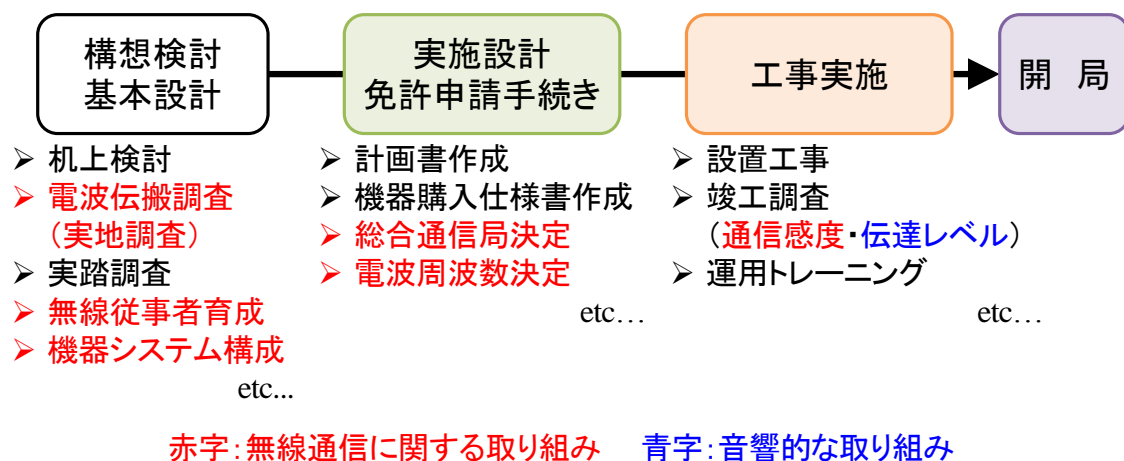


図 1.1-2 スピーカシステムの開設までの流れ

広域防災放送システムの現状

整備された広域防災放送システムの一般的な形態としては、複数台のホーン型スピーカによって構成されたスピーカシステム（最近では、ホーンアレイスピーカシステムを採用する地域もある[3]）を地域内の複数箇所に配置し（図 1.1-1 参照）、数 km のグループごとに、あるいはすべてのスピーカシステムから一斉に音響情報を放送している。各スピーカシステムの間隔としては、一般的に 300m～500m とされているが[3, 4]、実際のスピーカシステムは、行政が管理する学校や公園などの土地の一部に開設される場合が多く、各地域でまちまちとなっている。スピーカシステム間隔の例として、図 1.1-3 に習志野市に開設されたすべてのスピーカシステムの位置を示す。図中の 1 グリッドは 500m であるが、一つの市を取り上げて見ても、スピーカシステムの間隔は統一されていない。

このような放送形態をとる場合、拡声された音響情報は、受聴者のもとへ到来するまでの間に様々な音響的要因を受け、それによって明瞭性が低下しがちとなる。

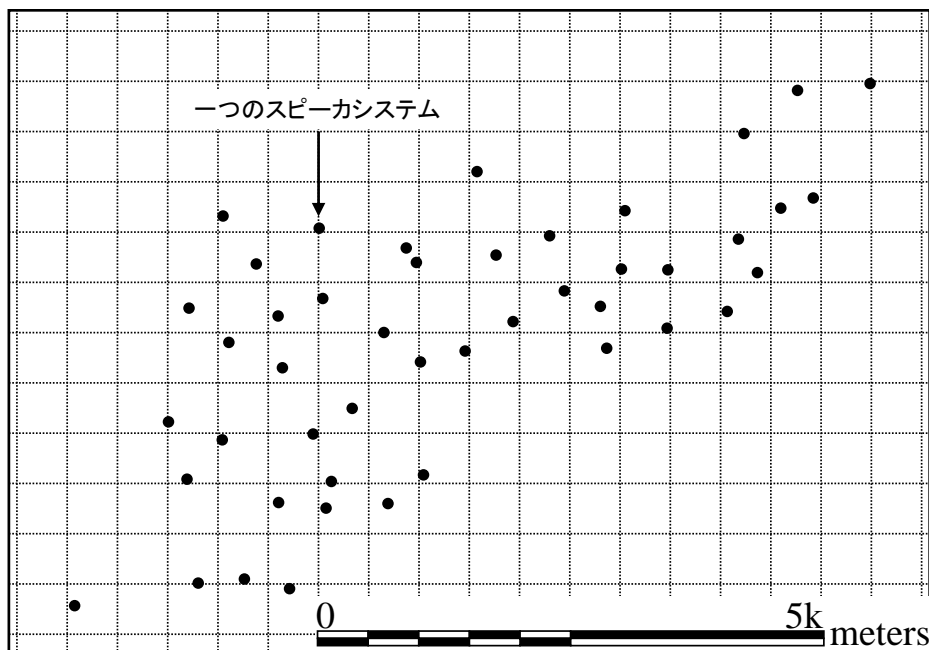


図 1.1-3 開設されたスピーカシステムの配置例（習志野市）

音響情報の明瞭性低下の要因

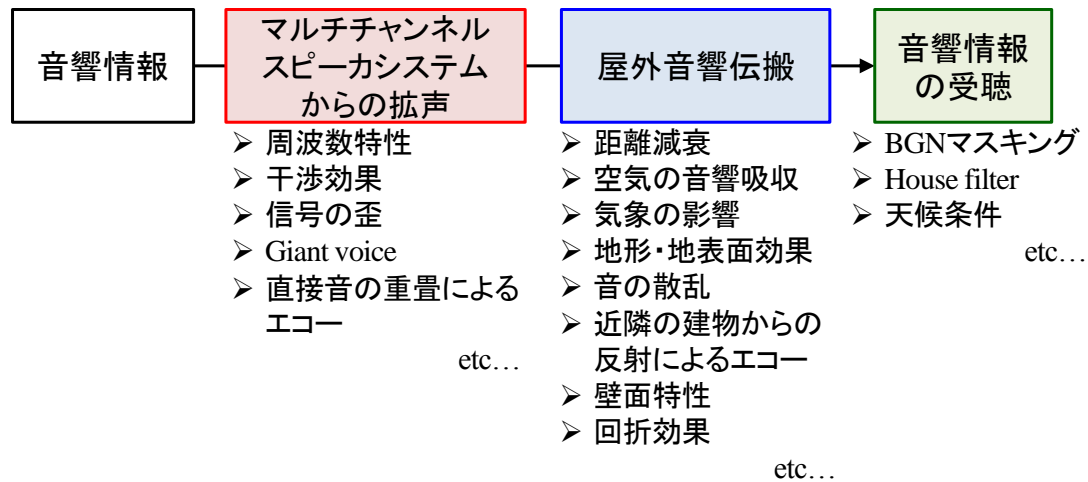


図 1.1-4 音響情報の明瞭性を低下させる要因

音響情報の明瞭性低下の要因としては、図 1.1-4 のダイアグラムに示すように① マルチチャンネルスピーカシステムからの拡声、② 屋外音響伝搬、③ 音響情報の受聴の3つのプロセスに分けて考えられる。

① マルチチャンネルスピーカシステムからの拡声

無線通信を利用して音響情報を拡声する広域防災放送システムでは、システムに対して音源信号を入力する時、信号の伝送時、あるいは信号がスピーカシステムから屋外へ拡声される時にいくつかの明瞭性低下の影響を受けていると考えられる。栗栖らは、予め用意されている音源信号ファイルの波形が歪み、加えてスピーカシステムに伝送された音源信号のサンプリング周波数がいわゆる電話帯域（300~3.4k Hz）までしか確保されていないために、拡声された音響情報の音質が低下しがちであるといった調査内容を報告している[5]。また、現在のシステムではスピーカシステムの間隔をできる限り広げ、その一つ一つから大音量の音響情報を放送しているために、スピーカシステムの近隣の住民に対しては、騒音源となる **giant voice** も問題とされている。これらの要因に加え、図 1.1-5 に示すとおり、複数箇所のスピーカシステムから一斉に音響情報を放送するために、各スピーカシステムからの直接音が受音点までの距離に応じた長い遅れ時間を持って重畳するマルチパスエコーの問題もある。

② 屋外音響伝搬

各スピーカシステムから拡声された音は、屋外音場を伝搬する過程において物理的な種々の要素の影響を受け、それによって絶対的な音のエネルギーが減少する。まず、この放送システムのスピーカシステムを点音源と仮定すると、拡声された音は音源を中心として球状に広がり、音源からの距離が遠くなるにつれ、音のエネルギーが減衰する（距離減衰）。また、拡声された音は空气中を伝搬するため、音のエネルギーは粒子運動に起因して高音域、長距離伝搬であるほど更に減衰する（空気の音響吸収減衰）。拡声された音の伝搬経路に建物がある場合、その音は建物の壁面が持つ吸音と拡散の性能に応じて反射し、図 1.1-5 に示したように、スピーカシステム、建物、受信点の位置を結ぶ距離に応じたマルチパスエコーが発生する。建物による効果は、この他にも音を遮蔽する効果とそれに伴う回折効果がある。

屋外音場は、場所や時間、季節によって風速、風向、温度、相対湿度などの分布が変動する。また野外の地表面は、田園、海、アスファルトなどと場所によってまちまちで、これらの面はそれぞれ異なった吸音性能を持つ。この気象や地形の影響を受け、拡声された音はさらに複雑に伝搬する。

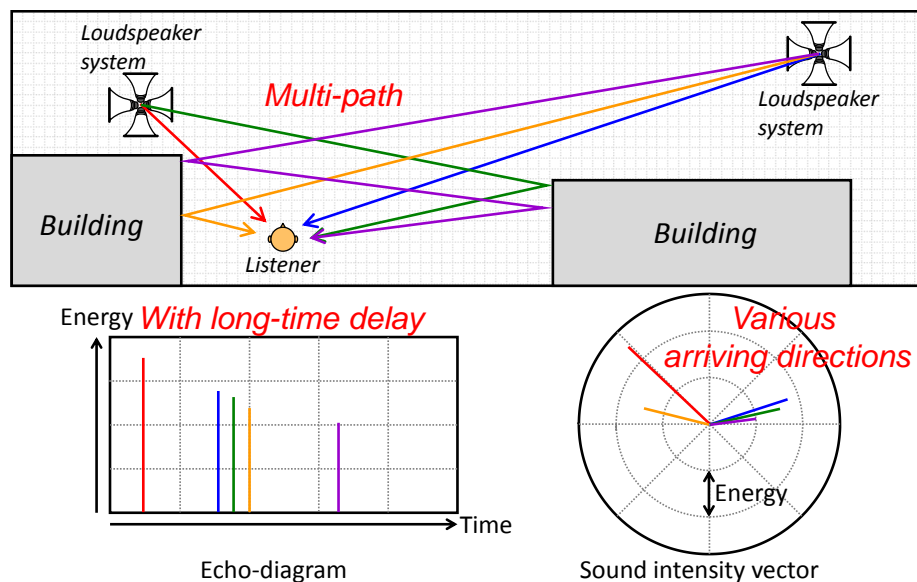


図 1.1-5 複数のスピーカシステムからの直接音や近隣の建物からの反射音に起因する長い遅れ時間を持ったマルチパスエコー

③ 音響情報の受聴

上述の二つのプロセスを経て受音点へ到来した音響情報は、受聴する際の周辺環境の条件によって更なる明瞭性低下の影響を受けると考えられる。受聴する環境には、多かれ少なかれその場の暗騒音（背景騒音）が存在する。例えば、乗用車、鉄道、航空機などの音源から発せられる交通騒音、室外機などの機械騒音、工事騒音、雨、風、雷、波などの自然発生する環境音などが挙げられる。このような暗騒音は、音響情報を受聴する際に同時に知覚されるため、対象となる音響情報を妨害するマスキング効果を持つ。また、実際に災害が発生した場合には、地鳴り、家屋などの倒壊音、津波や土砂が押し寄せる音などによっても音響情報の明瞭性が低下する可能性も高い。

広域防災放送システムの音響設計

このような問題を改善するための広域防災放送システムの音響設計を考える場合、図 1.1-6 のフローチャートに示すように、多くの要素を組み合わせた設計手法を用いることが有効である[6]。この設計手法の特徴を以下にまとめる。

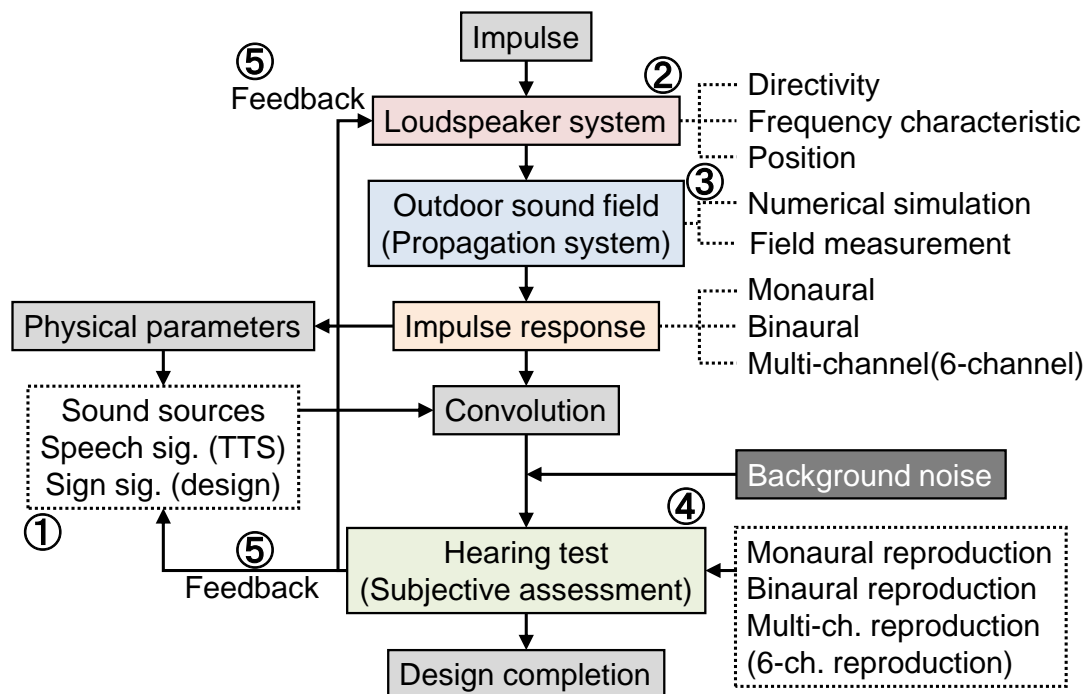


図 1.1-6 広域防災放送システムの音響設計手法

① 適切な音響情報信号の作成

放送されるアナウンスに関しては、言語の決定、了解性や新密度の高い単語の選択、音響伝搬特性に応じた適切な話速やポーズの設定が重要である。最近ではTTS (text to speech) と呼ばれる音声合成技術の進歩が著しく、今後、その技術を放送システムに応用することによって放送の自動化を図るべきである。サイン音に関しては、注意喚起、心象性などを考慮して波形や周波数特性を検討する必要がある。

② スピーカシステムの最適設計

ここでは、上述した明瞭性低下の要因におけるマルチチャンネルスピーカシステムからの拡声のプロセスについて、聴取空間における音圧レベルの均一性、明瞭性を確保するためのスピーカシステムの指向性、周波数特性の考慮、配置計画などが重要となる。特殊な条件として、受聴エリアを限定する必要がある場合もある。

③ 屋外音響伝搬の把握

ここでは、明瞭性低下の要因における屋外音響伝搬のプロセスについて、スピーカシステムから放送された音響情報信号が屋外音場を伝搬する過程で、有害なマルチパスエコーなどの影響をどの程度受けそうか、コンピュータシミュレーションや現場測定法などを用いて、インパルス応答形式の屋外音響伝搬特性を把握する必要がある。

④ 音響情報の伝達特性の聴感評価

ここでは、上述の3つの設計要素の総合的な評価を行うとともに、明瞭性低下の要因における音響情報の受聴のプロセスについて、暗騒音によるマスキング効果を検討することが重要である。また、この種の放送システムの効果を検討する場合、実際に現場で行う聴感実験も有効であるが、上述したとおり、屋外音場は時々刻々と気象条件が変化し、場所によっては長距離の移動が必要となるため、実験の実施には大きな困難が伴う。そのため、実験室内に音場をシミュレートし、実験条件を自由に变化させながら不特定多数の被験者を対象に聴感実験を行う手法が有効であると考えられる。その場合、上述したマルチパスエコーは、いろいろな方向から到来することが大きな問

題で、これを含めて検討するためには、音の3次元的な空間情報を再現する必要がある。

⑤ フィードバックプロセス

聴感実験の結果、音響的欠陥が見出された場合には、その内容を各音響設計の要素にフィードバックし、再検討することが有効である。ただし屋外音場では、室内音響設計で行われているような空間における吸音性能の向上が図れないため、①適切な音響情報信号の作成、②スピーカシステムの最適設計の設計要素へフィードバックする。

本研究の目的（可聴型シミュレーションシステムの開発）

上述の音響設計手法を考えると、広域防災放送システムのスピーカシステムを音源としたインパルス応答を把握し、そのインパルス応答を基に合成したアナウンスを音の3次元的な空間情報も含めて実験室内に再現するツールがあれば、すべての設計要素（①～④）における効果は、実際に耳で聞いて確認しながら検討することができる。このようなツールを使用し、様々な音場条件について聴感実験を行うことによって、将来、音響的な視点から広域防災放送システムの設計指針を確立することも可能であると考えられる。

本論文では、広域防災放送システムの音響設計やその設計指針を検討するための聴感実験を行う手法として、コンピュータシミュレーションによって計算した音場を実験室内に3次元的に再現する可聴型シミュレーションシステムを考案し、その有効性を検討した。具体的には、コンピュータシミュレーションとしては、音響伝搬計算法の中でも最も単純な幾何音響シミュレーションの虚像法、音場を実験室内に3次元的に再現する音場再現手法としては、マルチチャンネル手法の中で比較的簡便な6チャンネル収音・再生手法を適用し、それらを新たな方法によって組み合わせた。なお本研究では、可聴型シミュレーションシステムの有効性を検討することが目的であるため、幾何音響シミュレーションによる計算では、均質な音場を仮定し、単純な条件をモデル化した。

可聴型シミュレーションシステムの必要性

この可聴型シミュレーションシステムは、広域防災放送システムの音響設計や聴感実験を行う目的以外にも、図 1.1-7 に示すように、いくつかの用途に対して利用できると考えられる。

この可聴型シミュレーションシステムを使用し、既存の広域防災放送システムの屋外音響伝搬を検討することによって、音響情報の明瞭性が著しく低下するような受聴エリアを探索することができる。各市町村では、地震や津波被害などを想定したハザードマップを作成し、避難区域を明確化している。これと同様に、広域防災放送システムの音響情報が著しく低下する地域を避難区域、あるいは災害時にいち早く情報伝達・収集を行わなければならない区域と特定することによって、市の職員による迅速な情報伝達活動や住民の速やかな避難行動に繋がると考えられる。

放送するアナウンス信号に関しても実際に耳で聞きながら、適切な話速やポーズ長を決定することができる。上述したとおり、このようなアナウンス信号は TTS の技術を利用すべきであるが、マニュアルによって放送しなければならない場合には、アナウンサーの話し方訓練ツールとしても利用することができる。

現在、広域防災放送システムの音響的な設計指針だけでなく、スピーカシステムの配置計画に関する設計ガイドラインも確立されていない。この可聴型シミュレーションシステムを用いて各地域における音響設計を行い、そのスピーカシステムの配置方法を設計資料としてまとめることができると考えられる。

これらの種々の検討を聴感実験を通して行い、様々な音場条件における音響情報の明瞭性の評価結果を蓄積し、その結果をなんらかの音響物理量で整理することによって、将来的に音響的な設計指針を確立することが可能であると考えられる。

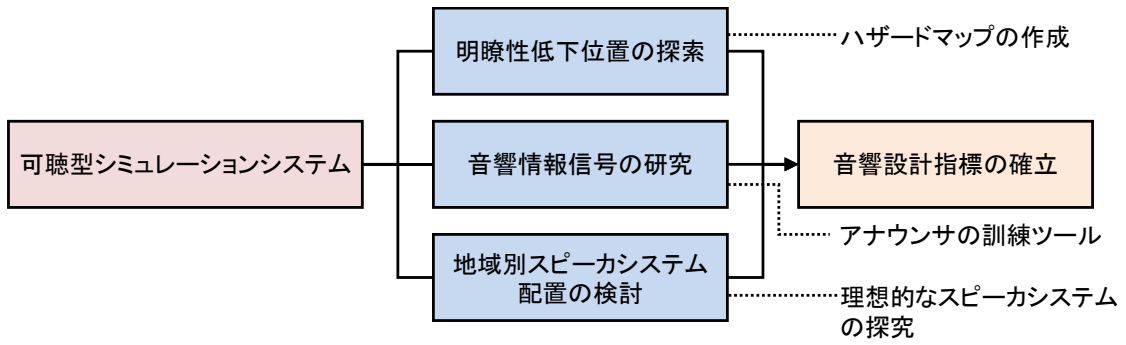


図 1.1-7 可聴化シミュレーションシステムの必要性

1.2 本論文の構成

本論文の構成フローチャートを図 1.2-1 に示す。

本論文は以下の 6 つの章で構成されている。

第 1 章では、広域防災放送システムの概要と可聴型シミュレーションシステムの必要性、本論文の構成を述べている。

第 2 章では、広域防災放送システムに関する既発表の論文の中から、本論文と関連性のある研究を紹介している。

第 3 章では、屋外音響伝搬の把握手法に関する概要とその基礎的な検討の詳細を述べている。本研究では、屋外音響伝搬を把握するコンピュータシミュレーションとして、幾何音響シミュレーションに基づく虚像法を適用しており、まずこの幾何音響シミュレーションの計算方法をまとめている。つぎにそのシミュレーションの精度を調査するために応用した現場測定法 (Swept-Sine 法とクロススペクトル法) をまとめている。さらに幾何音響シミュレーションの利用可能性を基礎的に検討するために、広域防災放送システムの音響伝搬の現場測定を行い、測定によって得られた結果と幾何音響シミュレーションによる計算結果を比較している。この検討とは別に、広域防災放送システムの音響伝搬特性の定点観測を行い、その日変化を基礎的に調査している。

第 4 章では、音場を実験室内に 3 次元的に再現する音場再現手法の概要、幾何音響シミュレーションと音場再現手法を組み合わせる方法、組み合わせた可聴型シミュレーションシステムを適用した検討の詳細を述べている。本研究では音場再現手法として、6 チャンネル収音・再生手法を適用しており、まずこの手法について、既往の研究成果に基づいて精度と原理をまとめている。この手法の再生システムを利用するためには、幾何音響シミュレーションの計算結果に基づいて 6 チャンネルの音圧信号を合成する必要がある。その方法としては、幾何音響シミュレーションによって得られた各パルスの入射方向情報を基に 6 チャンネルマイクロホンのカーディオイド型単一指向特性の指向係数を計算し、その係数を無指向性収音の音圧に重みづけることに

よって6方向に振り分ける新たな方法を適用している。つぎにこの手法を実際に適用して、広域防災放送システムが整備されている地域における6チャンネル收音システムを用いた現場測定の結果と幾何音響シミュレーションによる計算結果との対応を調べている。さらに、本学の6チャンネル再生システムを用いて単独反射音の音像定位実験、6チャンネル收音システムを通して実際に録音したアナウンスとシミュレーションで合成したアナウンスの聞き取りにくさに関する比較実験を行っている。

第5章では、広域防災放送システム設計の上での本可聴型シミュレーションシステムの有効性を調べるために、スピーカシステムを構成するホーン型スピーカの数とその向きを考慮することによって、アナウンスの聞き取りにくさが改善できる可能性に着目したケーススタディの結果を述べている。

第6章では、本論文の総括と今後の展望をまとめている。

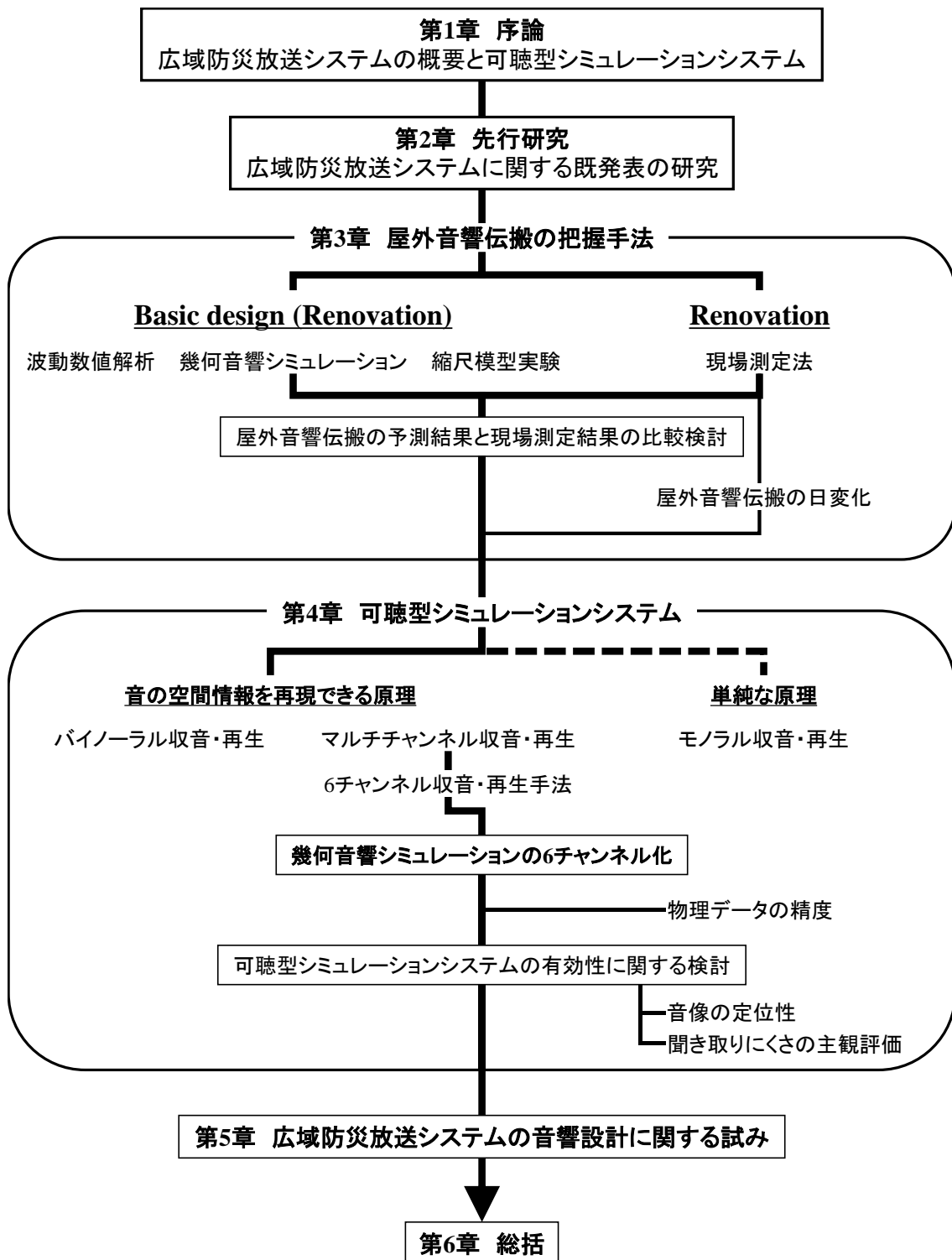


図 1.2-1 本論文の構成フローチャート

第2章 広域防災放送システムに関する既発表の研究

2 広域防災放送システムに関する既発表の研究

広域防災放送システムに関する既発表の論文としては、1960年～1990年代の間に戸井田らによって提案された野外音場の明瞭度予測手法に関する研究が広く知られている。この手法は、野外競技場に分散的に配置されたPAシステムの明瞭性を評価するために研究され、その技術が広域防災放送システムに応用されている。戸井田らはこの手法を用いて、既存の広域防災放送システムの明瞭度予測に関するケーススタディやスピーカシステムをグループごとに時間差をつけて放送する方式による明瞭度の改善効果も検討している[7-9]。また1994年には、稲垣らがスピーカシステム間の距離に応じて調整する時間差放送による効果を検討している[10]。この後一旦は、この種のテーマに関する研究が減少するが、2011年の3月に発生した東関東大震災以降、広域防災放送システムは非常に重要な情報伝達手段として再認識され、現在再び、いくつかの研究プロジェクトが開始された。栗栖らはスピーカシステムの指向性制御を目的として、自社開発したアレイスピーカの利用可能性を検討している[5]。また鈴木らは、総務省平成23年度3次補正予算を得ることによって、広域防災放送システムに関する総合的な研究を進めており、音声了解度に関するいくつかの聴感実験を通して考案された音声了解度評価手法[11]に基づく予測シミュレータの開発などを目指している[12]。さらに大久保らは、屋外音場における交通騒音の測定や予測などの技術を活かし、広域防災放送システムの音響伝搬の予測に気象や地形の効果を加えた了解性推定法の机上検討に取り組んでおり、最終的にハザードマップの作成を目指している[13]。

以下にそれらの研究の概要をまとめる。

2.1 広域防災放送システムの明瞭度予測手法

戸井田らが提案した明瞭度予測手法は、図2.1-1に示すように、 N 個のスピーカシステムから M 連音節のアナウンスを拡声し、 $N-1$ 個のエコーが到来する受音点における j 番目の音節明瞭度 S を計算するといった手法で、式(2.1-1)によって計算している。

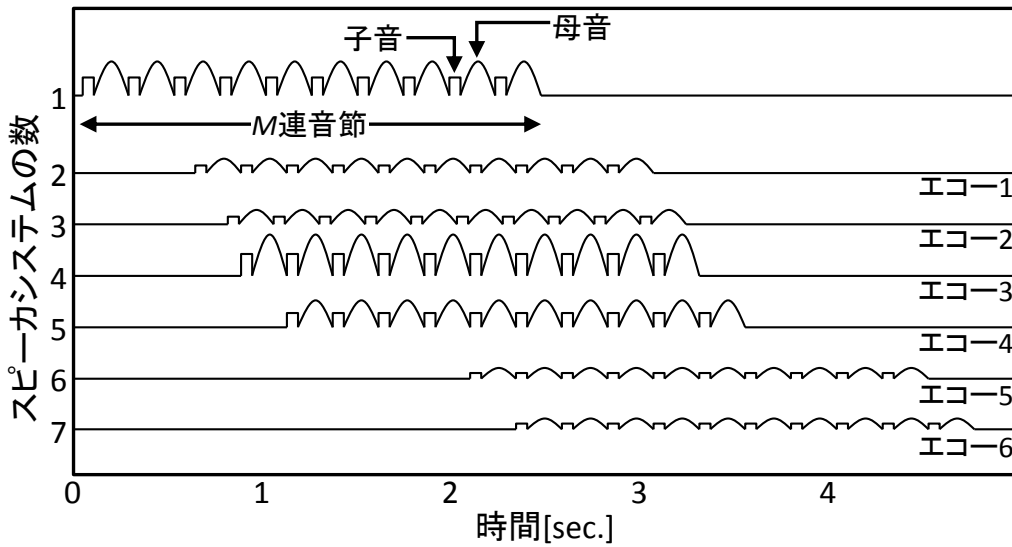


図 2.1-1 音節の重なり図

$$S_{Nj} = s_{1j} + L_{1j} \cdot s_{2j} + L_{2j} \cdot s_{3j} + \dots + L_{i-1j} \cdot s_{ij} + \dots + L_{N-1j} \cdot s_{Nj}$$

$$(ただし j=1 \sim M) \quad (2.1-1)$$

ここで、 s は一つのスピーカシステムから到来するアナウンスの j 番目の音節明瞭度成分、 L_j は j 番目の不明瞭度 ($L=1-S$)。

式 (2.1-1) の右辺第 2 項を例にすると、この項は図 2.1-1 に示した二つ目のスピーカシステムから到来したアナウンスの j 番目の音節明瞭度成分 s_{2j} と一つ目のスピーカシステムから到来したアナウンス (その明瞭度成分は右辺第 1 項の s_{1j}) による不明瞭度成分 L_{1j} の積で表されており、そのようにして計算されたすべての音節明瞭度と不明瞭度の積の総和として、 j 番目の音節明瞭度 S を求めている。また、この式における i 個目のスピーカシステムから到来したアナウンスの j 番目の音節明瞭度成分 s_{ij} は、母音 (v) と子音 (c) の単音明瞭度である s_v と s_c の積として次式によって与えられている。

$$s_{ij} = s_c \cdot s_v \quad (2.1-2)$$

さらに、 s_v 、 s_c を母音と子音の 4 つの重なり方の違い (cc : 子音が子音を妨害、 cv : 母音の子音を妨害、 vv : 母音が母音を妨害、 vc : 子音が母音を妨害) で分類することによって、 i 個目のエコーの音節明瞭度 s_{ij} を重なり方別の明瞭度成分の積として与えている。

$$S_{ij} = S_{cc} \cdot S_{cv} \cdot S_{vv} \cdot S_{vc} \quad (2.1-3)$$

なお。文章了解度 I_N を求める場合には、以下の式によって M 連音節明瞭度 S_N を計算し、その結果を変数関数 F_I によって了解度へ変換している。

$$S_N = S_{N1} S_{N2} \cdots S_{Nj} \cdots S_{NM-1j} \cdot S_{NM} \quad (2.1-4)$$

$$I_N = F_I(S_N) \quad (2.1-5)$$

実際の計算では、戸井田らは以下に示す簡略化した条件においてこの手法を利用している。

- ① 音節数は、明瞭度では3連音節、了解度では10連音節に条件を限定
- ② 最大レベルエコーだけが明瞭度に貢献
- ③ 50 msec.以内の時間幅内(束ね時間)に複数個のエコーが到来する場合は、束ね時間内のエコーを加算して一つのエコーとして取り扱う
- ④ s_{vv} 、 s_{cv} 、 s_{cc} の3種のみを計算

戸井田らはこの手法を用いて、いくつかの既存の広域防災放送システムのスピーカ配置におけるケーススタディやいくつかのグループに分けたスピーカシステムごとに時間差をつけて放送する方式(時間差放送方式)による明瞭度改善効果を検討している。これらの検討では、スピーカのパワーレベル、距離減衰、空気の音響吸収減衰、暗騒音などの明瞭性低下の要因は考慮されたが、スピーカの指向性、建物からの反射や回折、気象の影響は取り扱っていない。

2.2 時間差放送による明瞭度改善の試み

稲垣らは複数のスピーカシステムから拡声された音を受音点に同時に到来させるために、個々のスピーカシステムからの放送開始時間を調整し、さらにはスピーカの指向性を考慮することによって該当する地域の中央付近から同心円状に音を伝搬させる時間差放送について検討している。

この検討では、2次元空間を10m間隔のグリッドに分割し、それぞれの点における各スピーカシステムからの寄与(3つの直接音まで)をスピーカの

第2章 広域防災放送システムに関する既発表の研究

パワーレベル、距離減衰、ホーン型スピーカの指向特性を近似的に取り扱った幾何音響的な計算手法によって求め、その結果を STI (speech transmission index) に基づいて評価している。この STI は、音声の明瞭度と関係が深いとされており、各音声の周波数帯域 k と信号の強度変調周波数 F ごとに求められる MTF (modulation transfer function)、 $m(k, F)$ から人間の実行感覚を重みづけて計算する物理量である。この検討では、図 2.2-1 の(a)に示すように、4つのスピーカによって構成されたスピーカシステムを井の字上に配置する従来の方式と、図 2.2-1 の(b)に示すように、ある点のスピーカシステムを中心として同心円状の等間隔(スピーカの指向性は円が広がる方向に沿って設定)にスピーカシステムを並べ、各スピーカシステム間の距離に応じた時間差をつけて放送する時間差放送を取り入れた方式の2条件を比較している。

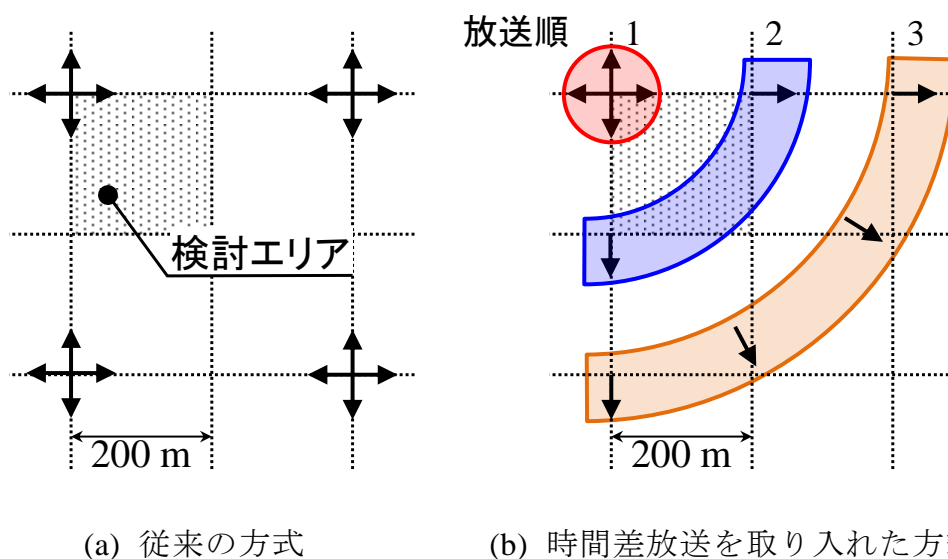


図 2.2-1 検討されたスピーカシステムの条件

結果として、稲垣らは以下の結論を述べている。

- ① 音声の重畳による STI 値の低下を避けるためには、受信点に到来する音の音圧が等しい場合、到来時間差を 50 msec.以下にする必要がある。また、音圧差が大きい場合は到来時間差を考慮する必要がある。
- ② 従来の方式と時間差放送を取り入れた方式を STI の平均値によって比較すると、前者は 0.52、後者は 0.8 と時間差放送方式は従来の放送方式の約 1.5 倍であり、4 段階の評価では 2 段階優れた評価となる。

2.3 スピーカシステムの指向性制御

栗栖らは、非常用放送設備や屋外拡声等の業務用音響システムに長く携わっており、最適な拡声装置の開発に取り組んでいる。栗栖らの考える拡声システムでは、スピーカシステムの近傍エリアにおける音のエネルギーを低減し、より遠方まで音を届かせることが目標であり、この目的に対して、垂直方向にスピーカユニットを重ねることによって、垂直方向の指向性を鋭くした高出力スピーカアレイHPSA（High Power Speaker Arrays、図 2.3-1参照）の有効性を研究している。このスピーカシステムは、図 2.3-2に示すように従来のホーン型スピーカに比べて遠達性に優れ、建物などの反射物がある市街地や地形による反射が無視できない地域では、拡声エリアを分割して放送できるホーンアレイ型が適していると述べている。

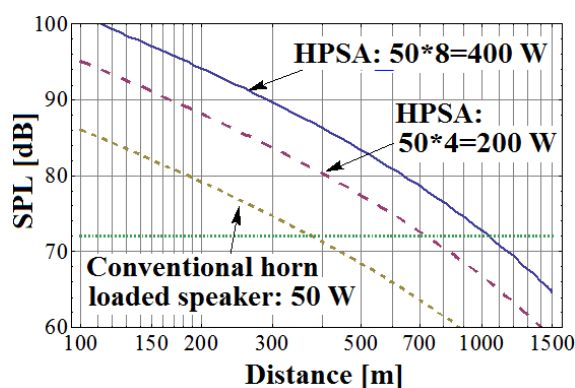


図 2.3-1 HPSA の例（Horn array type） 図 2.3-2 SPL の比較 Horn vs. HPSAs

2.4 音声了解度評価手法をベースとした予測シミュレータ

鈴木らは、平成 23 年度より広域防災放送システムから放送される音響情報の了解性を確保するために、音響情報信号の設計法、音声了解度評価手法、音響伝達特性の測定法やシミュレーションシステムなどに関する様々な研究を進めている。ここでは一例として、音声了解度評価手法とシミュレーションシステムを組み合わせた予測シミュレータの研究内容を紹介する。

鈴木らの研究グループでは、複数のスピーカシステムから到来する直接音の内、最初に届く音を先行音、それ以外を後続音と分類しており、その後続音の中でも特に強い音、いわゆるロングパスエコーが了解性低下の主たる要

第2章 広域防災放送システムに関する既発表の研究

因であると考えている。このロングパスエコーによる了解性低下の影響を調べるために、同研究グループでは、単一ロングパスエコーの実験室実験（先行音と後続音を一つのスピーカから再生し、先行音に対する後続音のレベル差、遅れ時間などを変化）、屋外における様々な要因を考慮するための現場音声了解度試験などを行っている。この屋外における実験では、上述の後続音のレベル差と遅れ時間以外にも暗騒音レベル、残響エネルギー、先行音と後続音の到来方向などが単純な条件で考慮されている。さらにこの屋外における聴取実験によって得られた了解性のスコアをインパルス応答から求めた STI と Useful to detrimental ratio (\overline{U}_{50}) [14-16]によって整理している。この Useful to detrimental ratio は、室内における明瞭性をインパルス応答から評価するために、Lochner や Burger によって考えられ、式 (2.4-1) に示すように初期音圧エネルギー対後期音圧エネルギー比を音声対雑音比で割ることによって求められる物理量である。

$$U_t = 10 \log \left\{ \frac{E/L_t}{1 + (E/L_t + 1)N/S} \right\}, \text{dB} \quad (2.4-1)$$

ここで、 t は 50 msec.あるいは 80 msec.、 E は初期音圧エネルギー、 L は後期音圧エネルギー、 S は音声のエネルギー、 N はアンビエントノイズのエネルギー。

これらの物理量によって整理された聴感実験のスコアの結果を図 2.4-1 の左図に示す。同グループでは結論として、STI では 0.6 以上、 \overline{U}_{50} では 6dB 以上を確保できれば、80%以上の了解性が確保できると述べている。

一方、同グループでは、上述の検討と同時に既存の騒音伝搬予測ソフトウェアに幾何音響ベースでインパルス応答を計算する機能を加えたシミュレーションシステムの独自開発も行っており、その数値計算の結果から上述の指標を求め、地形図データにマッピングするシミュレータの研究を進めている。STI が 0.6 以下、 \overline{U}_{50} が 6dB 以下で白抜きとなる基準値を設けたシミュレーシ

ョン結果を図 2.4-1 右図に示す。結論として、システムの了解性を厳しめに判定している \overline{U}_{50} を用いたサービスエリアの策定を提案している。

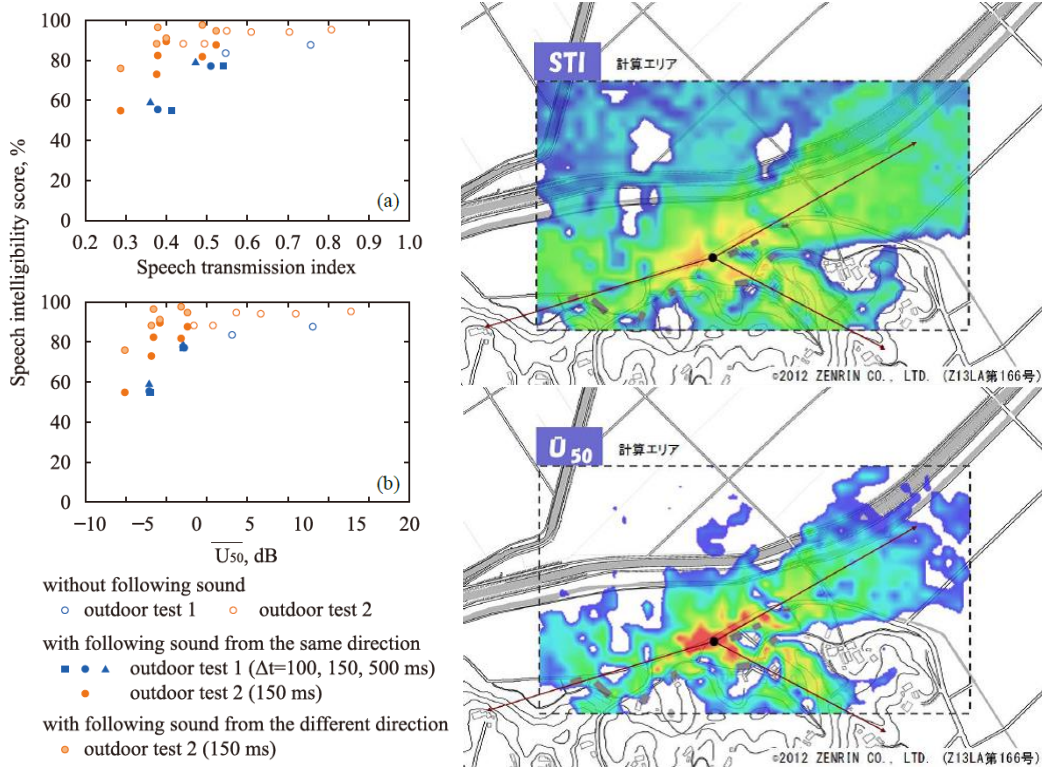


図 2.4-1 STI と \overline{U}_{50} の明瞭性スコアの相関関係およびそれらの手法を用いた予測シミュレータの計算結果

2.5 気象の影響を考慮した了解性推定法

大久保らは、広域防災放送システムの了解性および気象変動に伴う了解性変動を推計するモデルの開発に取り組んでおり、このモデルによってスピーカシステムの配置設計の支援や了解度分布を描いた防災ハザードマップの作成を目指している。

この了解性推計モデルは、インパルス応答を予測するモデルと、その応答から了解度を算出するモデルによって構成されている。前者の概念としては、図 2.5-1 に示すように、 i 番目のスピーカシステムから受聴位置までの距離を r_i 、音速を c とするとき、各スピーカシステムからの直接音の遅れ時間を r_i/c と計算し、その振幅を距離減衰、空気の音響吸収減衰、さらには気象と地形による効

果を意味する減衰係数 A_i を考慮して計算するモデルである。後者のモデルについては、音声・聴覚分野で開発された了解度算出手法を導入することによって対処すると述べている。

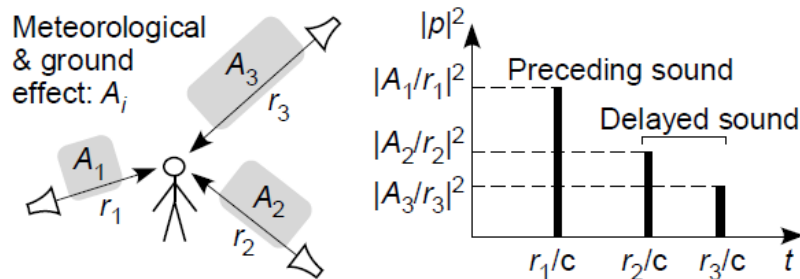


図 2.5-1 気象や地形の効果を考慮した遅延音の予測

この研究の特色としては、気象や地形の効果を考慮しているところにある。気象の効果としては、地表面効果、屈折、大気の流れに伴う散乱などについて、いくつかの予測モデルを組み合わせることによって取り扱っており、その有効性を単純な条件の音響伝搬を試算することによって確認している。さらに大久保らは、図 2.5-2 に示すように風や日照などの気象条件から算出した屈折伝搬の曲率半径に基づいて、地形を湾曲させて建物などの空間情報をモデル化する方式も提案している。このモデル化した空間に対して、これまでどおりの直線的な音響伝搬計算手法を適用することで、簡易的に建物や地形による効果と屈折伝搬を組み合わせる計算することが可能であると述べている。

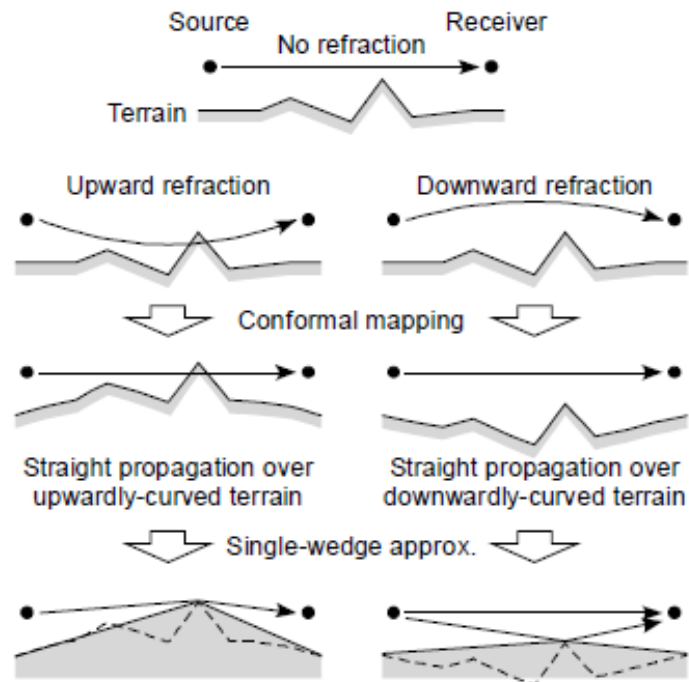


図 2.5-2 地形プロファイルの conformal mapping を用いた反射伝搬の予測

第3章 屋外音響伝搬の把握手法

3 屋外音響伝搬の把握手法

3.1 把握手法の概要

コンサートホールやオペラハウスなどでは、演奏する空間も楽器の一つとして考えられている。したがって、そのような空間の基本設計では、音の伝搬特性を把握することがきわめて重要な設計プロセスとして位置づけられ、古くから取り組まれている。現在、この音響伝搬の把握を含めた音響設計は音楽鑑賞を目的とする空間だけでなく、アトリウム、講義室、オフィス、会議室、さらには日常的にアナウンスが放送される駅や空港、商業施設などでも行われつつある。音響伝搬特性を把握する方法としては、音源からインパルス信号を放射したときに受音点で観測される音圧の応答波形（インパルス応答）を得る方法が主流で、このインパルス応答から直接音、壁面における反射音、残響（拡散）音の音圧振幅や到来時間の相対的な関係を調べることができる。現在では、そのインパルス応答から種々の音響物理量を算出する、あるいは実際に可聴化する手法が考えられている。

現場測定法

空間の音響伝搬特性を厳密に把握する手法として現場測定法がある。この方法は空間の媒質が均一、すなわち風や温度などの分布が変化しない線形時不変性の仮定に基づいており、これまでにいくつかの手法が提案されている。その中で、現在最も主流となっている手法が **Swept-Sine** 法である[17-20]。これは、すべての周波数成分を含んだインパルス信号を時間的に引き伸ばすことによって、単位周波数あたりのエネルギーを増加させたスイープ正弦波信号を音源として使用し、その応答に対して音源の時間反転信号をたたみ込むことによって、インパルス応答を求める手法である。現在では、この手法を用いて音響設計の効果の調査や実験室実験などが数多く行われている。一方、特殊な測定用の音源信号を利用することなく、現場で放送されているアナウンスや音楽などの信号を用いて空間の伝搬特性を推定する方法として、クロススペクトル法もある[21-24]。これは、アナウンスや音楽などの音源信号とその応答信号との相関の強さ、すなわち相互相関関数を周波数領域で計算することによってイ

ンパルス応答を推定する方法であり、特殊な測定用音源信号を容易に再生できない公共空間などでは有効性が高い。

縮尺模型実験

対象とする空間の縮尺模型を作成し、その空間において相似則に従いながら音響伝搬を調査する原理的な手法として、縮尺模型実験がある[25]。この技術は、対象となる空間の $1/n$ サイズの模型、音源、收音マイクロホンを用いて、模型内に設置した音源から放射された n 倍の周波数の実験用音源信号（スパーク放電パルス、高周波数の Swept-Sine 信号など）を n 倍のサンプリング周波数で録音することによって、近似的に実音場の音響伝搬特性を測定する方法で、これまでもコンサートホールの音響伝搬特性、部材の透過損失、固体音伝搬、広域の騒音伝搬性状などの実験に利用されている。この手法は、精緻な模型と実験条件を整えば、精度よく空間の伝送性能を把握することが可能であるが、対象とする空間が大きい場合は縮尺模型の規模も大きくなり、模型を作成するためのコストと時間を費やさなければならない。

波動数値解析

パーソナルコンピュータが普及し始めた 1980 年代頃より、模型実験に代わる手法としてコンピュータを用いた予測技術が急速に発達してきている。このコンピュータシミュレーションの中で、波動方程式に基づいて、空間における音響伝搬を厳密に解析する手法として、波動数値解析がある[26]。この技術としては、基礎となる微分方程式を差分方程式に近似し、空間と時間を離散化して計算する時間領域有限差分法（finite difference time domain method, FDTD）、連続体である空間を離散的な接点で構成される要素の集まりと仮定し、近似的な離散化方程式を導く有限要素法（finite element method, FEM）、境界面上で成り立つ等価な積分方程式を離散方程式に近似する境界要素法（boundary element method, BEM）などがあり、室内音響伝搬特性の予測はもちろん、コンサートホールなどで利用されている音響拡散体や座席による散乱性状の予測、予測した音響伝搬の可視化などに利用されている。この手法は、小規模空間、2 次元音場、低い周波数の音響伝搬を解析する場合、比較的短時間で計算結果を得ることが可能であるが、高い周波数までを対象とす

る場合、膨大な計算時間を費やす必要があり、3次元の大規模空間で高い周波数までの音響伝搬を解析する場合、現在のパーソナルコンピュータの性能では取り扱うことができない。

幾何音響シミュレーション

コンピュータシミュレーションとしては、音の回折効果や干渉効果などの波動性を無視することによって音波を音線として考え、音源から受音点までの伝搬経路を追跡した結果から受音点における伝搬エネルギーを計算する幾何音響シミュレーションもある[26]。この技術は、波動数値解析と比較して、3次元の大規模空間における音響伝搬特性を短時間で把握することができる利点を持ち、コンサートホールなどの室容積が大きい空間を解析する手法として有効とされている。

本研究で適用した手法

広域防災放送システムが整備されていない地域の基礎からの設計を行う場合、聴取空間における音圧レベルの均一性や明瞭性を確保するために、スピーカシステムを構成するスピーカの種類や数、その指向性やスピーカシステムの配置を検討することが重要である。またその検討では、地域内にできる限り多くの受音点を設定し、地域全体における音響設計の効果を調べることが望ましい。この目的に対しては、縮尺模型実験、波動数値解析、幾何音響シミュレーションが有効である。ただし、対象地域の規模、計算時間の点から縮尺模型実験と波動数値解析を本研究に適用することは現段階では大きな困難を伴う。幾何音響シミュレーションでは、音の波動性を考慮していないために、回折効果や干渉効果などが計算されないが、シミュレーションによって検出する対象を複数のスピーカシステムからの直接音と主要な建物からの反射音などの伝搬経路が単純なものに限定すれば、本研究に対しても利用できる可能性はある。

広域防災放送システムが既に整備され、その改修設計を行う場合には、上述した手法に加え、現場測定法も有効である。この技術は、風や温度などの分布が変化しない線形時不変性の仮定に基づいているため、屋外音場における気象の影響が問題となるが、風などの条件が穏やかで、温度と相対湿度が

比較的均一な条件下で測定できれば、本研究に対しても適用できると考えられる。

本研究では、可聴型シミュレーションシステムの屋外音響伝搬を把握する手法として、幾何音響シミュレーションを適用した。ただし本研究は、可聴型シミュレーションシステムの有効性を検討することが目的であるため、幾何音響シミュレーションによる計算では、ひとまず均質な音場を仮定し、単純な条件をモデル化した。このシミュレーション手法の利用可能性を基礎的に検討するために、比較的穏やかな気象条件下においてクロススペクトル法と Swept-Sine 法の現場測定法を応用し、測定によって得られた音圧振幅の時間変動波形（エコーダイアグラム）と幾何音響シミュレーションによる計算結果を比較した。また、広域防災放送システムに対する気象の影響を基礎的に検討するために、クロススペクトル法を用いた定点観測を行い、屋外音響伝搬の日変化に関する調査も行った。

3.2 幾何音響シミュレーション

幾何音響シミュレーションの概要

室内音響設計では、かつては図面に音の伝搬経路を作図することによって室の形状やスピーカの設置位置などが検討されていたが、今日では、幾何音響シミュレーションを用いた反射音の3次元的な予測が行われ、音線が可視化でき、またその音を可聴化できるようになっている。幾何音響シミュレーションは、音響伝搬計算法の中でも最も早くから実用化され、国内外で各研究機関による開発が行われており、特に海外では、様々なアプリケーションが市販化されている[27, 28]。幾何音響シミュレーションには、大別して音線法と虚像法がある。

音線法の概要

音線法は、ある点音源からすべての方向へ等立体角に多数の音線（音粒子）を放射し、その反射履歴を時間、エネルギー、入射方向のデータとして順次追跡する計算方法である。この技術は、伝搬距離が短い小規模空間を解析する場合には、計算時間が短く有効であるが、伝搬距離が長い大規模空間、あるいは高次の反射音を解析する場合には、図 3.2-1 に示すように各音線の間隔が広がる問題がある。

虚像法の概要

虚像法は閉空間内の音場に対し、音源と離散的に分布する虚像音源群のそれぞれの寄与が各反射音の強さとなり、それらの総和を算出することによって、ある受音点の音の強さを求める計算方法である。この技術は、上述した音線法に比べて音の到来方向、相対的なインテンシティ（音の強度）、到来時間が正確に求まるため、初期反射音構造の検討やエコー障害のチェック、反射音の指向性分布の検討に有効であるとされている。ただし、反射次数の増加とともに虚像音源の総数が指数関数的に増加するため、高次の反射音まで求めるには困難が伴う問題がある。

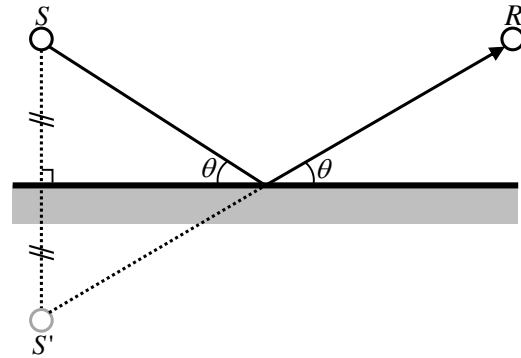
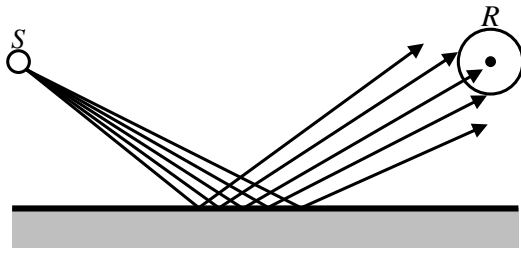


図 3.2-1 音線法の計算モデル

図 3.2-2 虚像法の計算モデル

広域防災放送システムの明瞭性を低下させるマルチパスエコーは、比較的低次の反射音で、伝搬経路も単純であると考えられる。したがって本研究では、スピーカシステムからの直接音と主要な建物からの反射音を解析するシミュレーション手法として、虚像法を適用することとした。以降にその手法の一般的な原理、本研究で使用した幾何音響ソフトウェアの概要、インパルス応答を計算する手順を示す。

3.2.1 虚像法の原理

図 3.2.1-1 に示すように、境界面の法単位ベクトルを \mathbf{n} 、音源とその 1 次の虚像音源の位置ベクトルをそれぞれ S 、 S' とすると、 S から S' のベクトル $S'-S$ は音源から壁面への距離 γ を用いて

$$S'-S = -2\gamma \times \mathbf{n} \quad (3.2.1-1)$$

と表せる。したがって、虚像音源の位置 S' は、

$$S' = S - 2\gamma \times \mathbf{n} \quad (3.2.1-2)$$

となる。また、音源 S から壁面上の任意の点へのベクトルを \mathbf{u} とすると、

$$S'-S = (2\gamma \cdot \mathbf{u}) \mathbf{n} \quad (3.2.1-3)$$

となり、虚像音源の位置 S' は、

$$S' = S + 2(\mathbf{n} \cdot \mathbf{u}) \mathbf{n} \quad (3.2.1-4)$$

と表すこともできる。ただし、 \cdot は内積を表す。

m 面の境界面によって構成された空間の 1 次反射を考えると、一つの音源に対して m 個の虚像音源が生じる。2 次反射の虚像音源も同様な手順で計算で

きるが、一つの虚像音源に対して $(m-1)$ 個の虚像音源が生じ、反射回数が増すごとに $(m-1)$ が乗じられるため、すべての壁面に対して虚像音源が存在するわけではないが、虚像音源の数は反射回数に応じて急激に増加する。

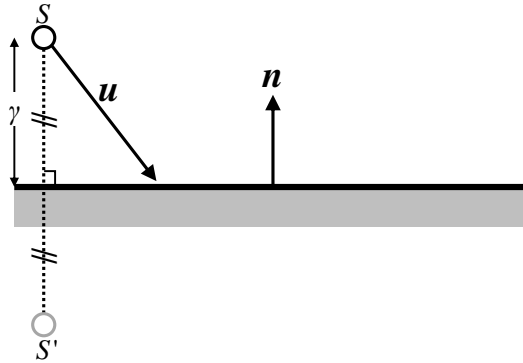


図 3.2.1-1 虚像法の求め方のモデル

図 3.2.1-2 において、まず 1 次の虚像音源に関しては、壁面 A に対する音源 S の虚像音源 S_A' 、壁面 B に対する音源 S の虚像音源 S_B' が求められる。2 次の虚像音源に関しては、虚像音源 S_A' の壁面 B に対する虚像音源 S_{AB}'' は存在するが、虚像音源 S_B' の壁面 A に対する虚像音源は壁面内には存在しない。2 次の虚像音源が存在する条件は、1 次の虚像音源が次の虚像音源を作り出す壁面の内側にある場合に限られる。つぎに受音点までの反射経路を求める。反射経路を求めることは反射点を求めることで、図 3.2.1-2 に示したように、受音点 R からそれぞれの虚像音源までを結ぶ線分と虚像音源を作り出した壁面との交点が反射点となる。例えば、1 次の虚像音源 S_A' は壁面 A による虚像音源であるため、受音点 R から S_{AB}'' までを結ぶ線分と壁面 B との交点 P_{AB}'' を求める。このように多次数反射の場合、高次の虚像音源から遡って反射経路を追跡する[29]。

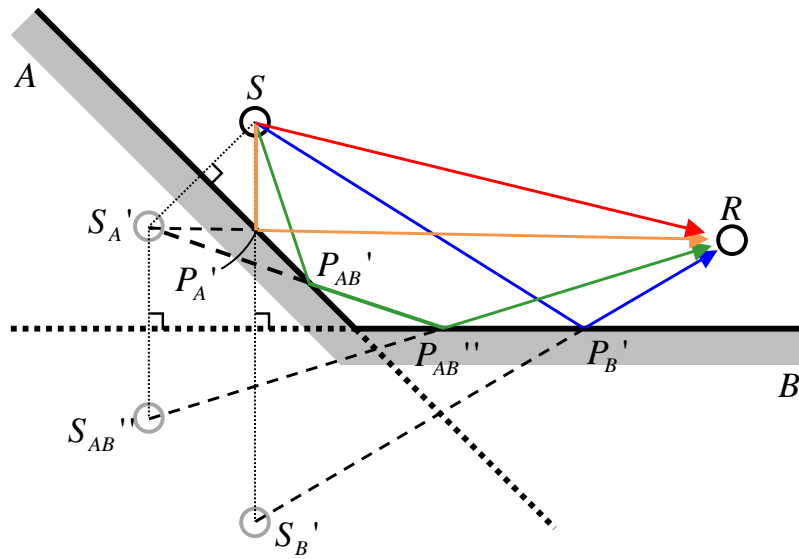


図 3.2.1-2 虚像音源の存在条件と伝搬経路の求め方

利用したソフトウェア

本研究では、この虚像法の計算手法として市販の幾何音響ソフトウェアである ODEON の Version 11.0[27, 30]を利用した。このソフトウェアでは、図 3.2.1-3 に示すように、インパルス応答の初期部分は虚像法によって、後期部分は音線法によって計算されており、計算結果の切り替えは **Transition order** と呼ばれる変化回数によって任意で決定できる。その虚像法による計算では、設定した **Transition order** の回数までの反射経路が、上述した一般的な方法によって検出されている。音線法による計算では、**Backtracing method**[30]と呼ばれる新たに考えられた手法が導入されている。この手法では、まず通常どおりに点音源から等立体角に音線を放射し、任意で設定できる音線の最大反射回数 (**Reflection order**) まで検出された壁面の虚像位置をコンピュータのメモリに蓄える。この時、受信点については、一つのポイントとして設定するのではなく、そのポイントを中心とした球状の受信エリアとして設定することによって虚像位置の検出性能を高めている。つぎに、虚像位置をメモリから抽出し、受信点（ここでは一つのポイント）の位置から改めてその虚像位置までの経路を追跡している。この時、追跡した経路が実音源の位置に戻らない場合は計算結果から除外される。

ODEON の計算手法では、上述の方法によって求められた各伝搬音の経路に基づいて、63 Hz～8 kHz までの 1 octave band ごとに以下の減衰要素が考慮されている。

- ・ 各伝搬音の経路の長さに応じた距離減衰
- ・ 各伝搬音の経路と音源として設定した指向特性の主軸が成す角に応じた指向係数
- ・ 伝搬経路の長さ起因する空気の音響吸収減衰 (ISO 9613-1)
- ・ 虚像が生成された壁面における吸音率
- ・ 虚像が生成された壁面における拡散係数 (本研究では設定していない)

Summary of the ODEON method

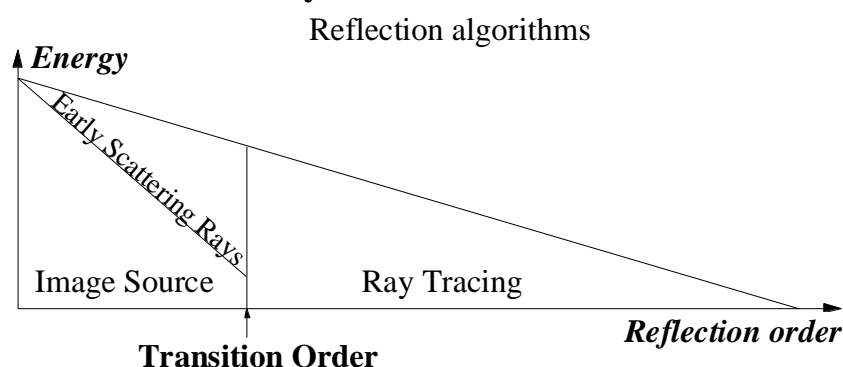


図 3.2.1-3 ODEON のインパルス応答計算アルゴリズム

虚像法による計算結果の抽出方法

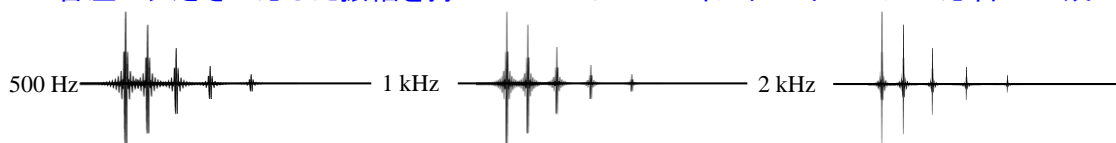
上述の虚像法によって計算された部分のインパルス応答は、図 3.2.1-4 に示すように、各パルス（スピーカシステムからの直接音と主要な建物からの反射音）の到来時間、周波数帯域ごとの相対的な音圧、水平面と正中面の到来方向の情報で構成されたテキストファイルの形式で出力することができる。この情報に基づいて、周波数帯域ごとに各パルスの大きさに応じた振幅を持つ FIR バンドパスフィルタのインパルス応答を生成し、すべての周波数帯域のインパルス応答を加算することによって広帯域のインパルス応答を算出した。なお、序論で述べたとおり、広域防災放送システムのスピーカシステムから拡声される音源信号の多くは、周波数成分が 300～3.4 kHz 程度に制限さ

れている。したがって以降の検討では、その周波数の主成分を含む中心周波数 500 Hz、1 kHz、2 kHz の 3 octave band を計算の対象とした。

虚像法によって計算された各パルスの情報ファイル

Early reflections levels (dB SPL) for job 1											
Ref.	到来時間	周波数帯域ごとの相対音圧								到来方向	
	Ms	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz	Azimuth	Elevation
1	183.1	-35.98	-50.7	-41.14	-47.91	-57.55	-63.11	-61.1	-43.04	65.76	24.57
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
N	1113.1	-57.29	-69.62	-58.33	-66.89	-77.78	-83.39	-83.51	-94.84	-104.19	172.94

1. 音圧の大きさに応じた振幅を持つFIRバンドパスフィルタのインパルス応答の生成



2. 1オクターブバンドごとに生成したインパルス応答を加算

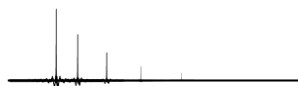


図 3.2.1-4 虚像法による計算結果の抽出方法

ODEON のソフトウェアを用いてこの計算結果を出力するためには、計算の条件として音源となるスピーカシステムやそれを構成するホーン型スピーカの指向特性の情報、建物の位置や形状などの空間情報、計算するための諸条件を設定する必要がある。本研究におけるそれらの設定方法を以降に示す。

3.2.2 屋外音響伝搬予測のための音源のモデル化

スピーカの指向特性のモデル化

本研究で対象とした広域防災放送システムのスピーカシステムは、図 3.2.2-1 に示すように複数台（一般的には 4 台）のホーン型スピーカによって構成されている。このスピーカの指向特性のモデル化では、類似のホーン型スピーカ（TOA:TC-730M）を対象として中心周波数 500 Hz、1 kHz、2 kHz の 3 つの 1 octave band について実測した図 3.2.2-2 に示す音圧指向特性を使用し、そのデータを基に幾何音響ソフトウェアの指向特性エディタによって 3 次元的に形成した。図

3.2.2-3 に指向特性エディタによって形成した 1 kHz 帯域における 3 次元モデルを示す。なお、このモデル化はスピーカの指向特性が水平面と正中面で対称である仮定に基づいて行った。



図 3.2.2-1 スピーカシステム

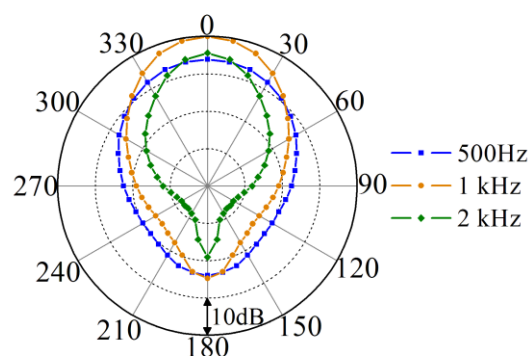


図 3.2.2-2 ホーン型スピーカ (TOA:TC-730M) の音圧指向特性データ

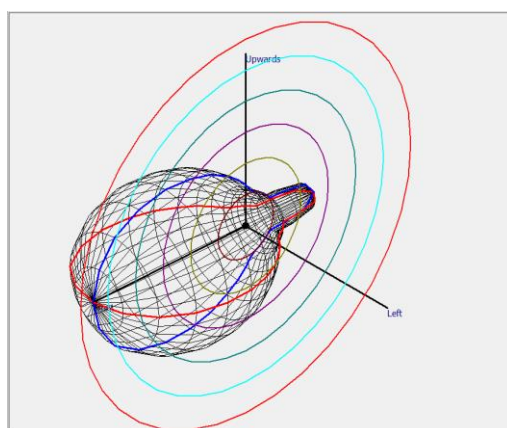


図 3.2.2-3 スピーカの指向性の 1 kHz 帯域における 3 次元モデル
スピーカシステムのモデル化

一つのスピーカシステムからある受音点までのインパルス応答を計算する方法は、以下のとおりである。まず、スピーカシステムの中心に一つの点音源を仮定して、それから受音点までの伝搬エネルギーを幾何音響ソフトウェアによって計算する。その伝搬エネルギーの計算では、各伝搬音の経路とスピーカシステムの中の一つのホーン型スピーカの指向特性の主軸が成す角から、上述の指向特性のデータを用いて周波数帯域ごとにスピーカの指向特性を考慮する。つぎに、前述した虚像法の抽出方法に従って 3 つの 1 octave band (500 Hz、1 kHz、2 kHz) を合わせた広帯域のインパルス応答を出力する。さらに、音源の主軸を一

つのスピーカシステムを構成するすべてのスピーカの主軸方向に回転させながら、上述の計算をそれぞれ行い、得られたすべてのインパルス応答を加算する。

対象地域に複数のスピーカシステムがある場合は、上述の計算をすべてのシステムについて行う。

3.2.3 屋外音響伝搬予測のための空間のモデル化

建物などの空間情報のモデル化

建物の形状や位置、地表面の吸音性能をモデル化する方法としては、大嶋や平栗らが数値表面モデル (DSM) データを活用することによって建物の立体モデルを生成する研究やハイパースペクトルデータを利用することによって地表面吸音性能を自動的に割り当てる研究が進められているが[31, 32]、本研究では、以下に述べる原始的な方法によって簡略化したモデルを形成した。

本研究では、対象地域の2階建て以上の建物が受音点に影響を与える反射物として仮定した。各建物の配置は国土地理院が掲載している1/2500縮尺の地図[33]を基に調べ、それらの概略の寸法はレーザー距離計 (Leica: DISTO™ D8) を用いて一つの建物の縦、横、高さを可能な限り詳細に実測した。実際のモデル化では、幾何音響ソフトウェアにモデリングデータを取り込むことができる形状生成ソフト Google SketchUp Pro の Version 8.0.11752[34]を使用し、上述の値を基に表面が平らな六面体を組み合わせることによって、図 3.2.3-1 に示すようにモデル化した。なお本研究の対象地域は、起伏がほとんどないため、地面は平面として仮定した。

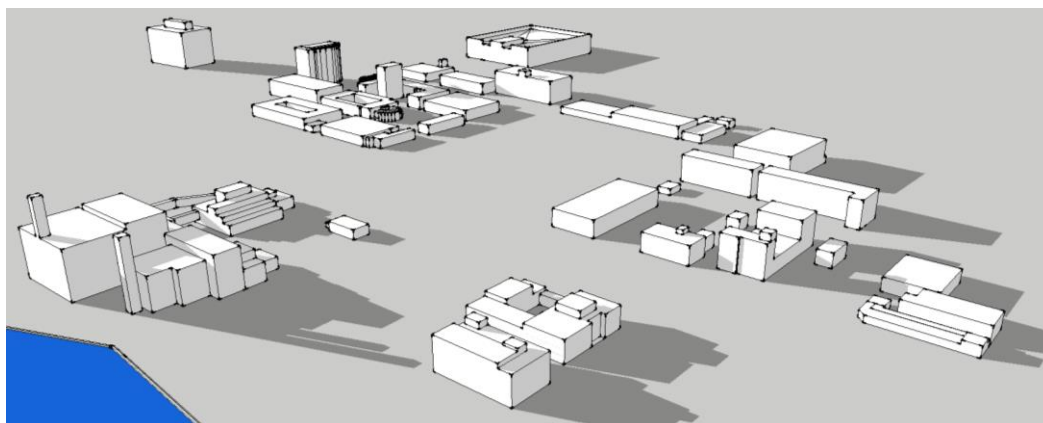


図 3.2.3-1 対象空間の3次元モデル

吸音率の設定

建物壁面、地表面、計算領域の境界面に与える吸音率としては、表 3.2.3-1 に示す値を設定した。建物の壁面反射における周波数特性や地表面の吸音効果は、今後多くの知見を得ることによって正確な値を定める必要があるが、ここでは周波数特性を与えずにすべての壁面に対して一律で仮定した。

表 3.2.3-1 壁面の吸音率

Surface	Absorption coefficient [%]
Building surface	2.5
Ground surface	10
Surrounding boundary	100

計算条件の設定

計算条件として設定したパラメータを表 3.2.3-2 に示す。前述した幾何音響ソフトウェアの虚像法と音線法の変化次数 Transition order は最大値である 10 と設定した（虚像法によって検出できる伝搬経路がない場合、自動的に計算が打ち切られる）。また空気の音響吸収減衰を計算するための温度と相対湿度としては、本研究では標準的な条件として温度を 20 °C に、相対湿度を 50 % に設定した。

表 3.2.3-2 計算条件

Component	Value
Transition order	10 (maximum)
Temperature	20.0 °C
Relative humidity	50.0 %

計算結果の例

幾何音響シミュレーションによって計算したある地域の屋外音響伝搬（インパルス応答）の例を図 3.2.3-2 に示す。横軸は時間、縦軸は相対的な音圧の振幅である。シミュレーションの計算結果では、暗騒音の影響、壁面や空気中で複雑に拡散した成分などが考慮されていないため、スピーカシステムからの直接音や建物からの優勢な反射音のみが卓越して現れている。

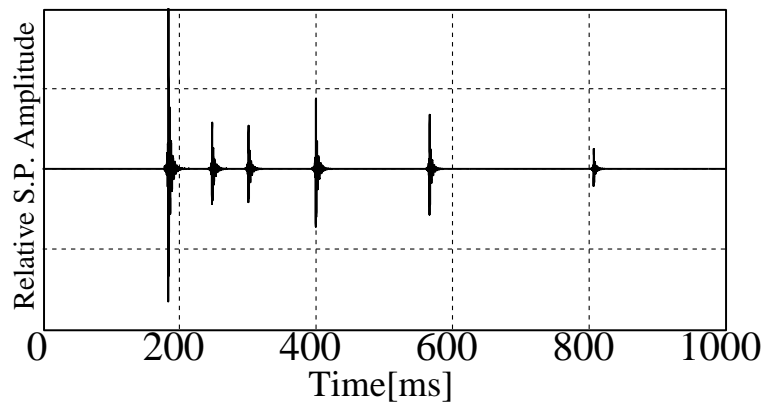


図 3.2.3-2 幾何音響シミュレーションによって計算したインパルス応答の例
 （中心周波数 500Hz、1 kHz、2 kHz の 3 つの 1 octave band を合わせた帯域）

3.3 現場測定法

本研究では、従来どおりのクロススペクトル法と Swept-Sine 法の手法を適用した。ただし広域防災放送システムの伝搬特性を得るために、いくつか工夫した点もあるため、それぞれの原理や具体的な手順と合わせて以下にまとめる。

3.3.1 クロススペクトル法

屋外音響伝搬の測定と分析方法

ある伝達系とその系に入出力された信号のモデルを図 3.3.1-1 に示す。図中の $X(k)$ 、 $H(k)$ 、 $V(k)$ 、 $N(k)$ 、 $Y(k)$ の関数は周波数領域の信号、 $x(t)$ 、 $h(t)$ 、 $v(t)$ 、 $n(t)$ 、 $y(t)$ の関数は時間領域の信号を意味する。

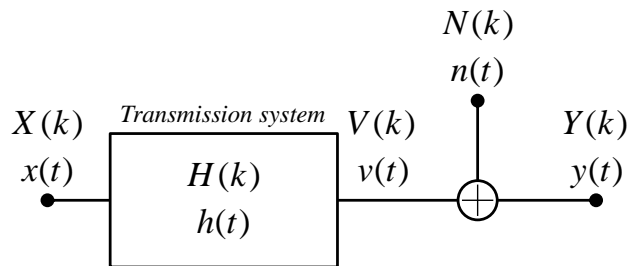


図 3.3.1-1 伝達系とその入出力のモデル

この図では、入力信号 $x(t)$ が伝達系 $h(t)$ を経て出力され、その出力信号 $v(t)$ に暗騒音などの外来雑音 $n(t)$ が混入して観測されたものを観測信号 $y(t)$ としている。伝達系の時間変動特性 $h(t)$ と周波数特性の伝達関数 $H(k)$ はフーリエ変換対であり、

$$H(k) = FT\{h(t)\} \quad (3.3.1-1)$$

$$h(t) = IFT\{H(k)\} \quad (3.3.1-2)$$

が成り立つ。

伝達系の時間変動特性と周波数特性の伝達関数を用いれば、入力信号 $x(t)$ 、 $X(k)$ とそれに対する出力信号 $v(t)$ 、 $V(k)$ の関係は、以下の式に示すように、時間領域ではたたみ込みとして、周波数領域では単純な積として表すことができる。

時間領域： $v(t) = x(t) * h(t) \quad (3.3.1-3)$

周波数領域： $V(k) = X(k)Y(k) \quad (3.3.1-4)$

ただし、出力信号 $v(t)$ 、 $V(k)$ は、観測時に雑音 $n(t)$ 、 $N(k)$ が混入する可能性があるため、屋外音響伝搬特性の分析では以下が基礎式となる。

$$\text{時間領域：} \quad y(t) = x(t) * h(t) + n(t) \quad (3.3.1-5)$$

$$\text{周波数領域：} \quad Y(k) = X(k)H(k) + N(k) \quad (3.3.1-6)$$

ここで、周波数領域の両辺に $X(k)$ の共役複素数 $X^*(k)$ を掛けると、

$$X^*(k)Y(k) = X^*(k)X(k)H(k) + X^*(k)N(k) \quad (3.3.1-7)$$

となり、左辺はサンプル数 M 点の入力信号 $x(t)$ と観測信号 $y(t)$ のクロスパワースペクトル密度関数（以下クロススペクトル）、右辺第1項は同じサンプル数の入力信号 $x(t)$ のオートパワースペクトル密度関数（以下オートスペクトル）と伝達関数の積、右辺第2項は入力信号 $x(t)$ と外来雑音 $n(t)$ のクロススペクトルを意味する。この入力信号 $x(t)$ と外来雑音 $n(t)$ が無相関である場合、右辺第2項の相互相関関数が0となって伝達関数 $H(k)$ を求める式が導けるが、有限のサンプル数 M 点から計算した $X^*(k)N(k)$ は0ではない。そこで、データのサンプリング開始時点を一定間隔ごとに移動しながら、サンプル数 M 点の入力信号と観測信号のクロススペクトルを複数回計算し、得られたすべてのスペクトルを平均したとすると、

$$\overline{X^*(k)Y(k)} = \overline{X^*(k)X(k)H(k)} + \overline{X^*(k)N(k)} \quad (3.3.1-8)$$

となる。入力信号 $x(t)$ と外来雑音 $n(t)$ のクロススペクトル $X^*(k)N(k)$ は複素数であるが、 $x(t)$ 、 $n(t)$ ともに移動しながらサンプルするたびに变化するため、それらが無相関である限り、 $X^*(k)N(k)$ の実部も虚部も正負のランダムな値を変化させ、多数回平均すると0に収束する。この仮定の上で伝達関数は以下のように求めることができ、

$$H(k) = \frac{\overline{X^*(k)Y(k)}}{\overline{X^*(k)X(k)}} \quad (3.3.1-9)$$

伝達系の時間変動特性はその逆離散フーリエ変換（Inverse discrete Fourier transform, IDFT）として求めることができる。

$$h(k) = IDFT\{H(k)\} \quad (3.3.1-10)$$

巡回たたみ込み方法

上述したサンプル数 M 点の巡回たたみ込みを行う方法としては、城戸らによっていくつかの方法が研究されている[24]。その中で本研究では、図 3.3.1-2 に示す最も簡便な方法を適用した。

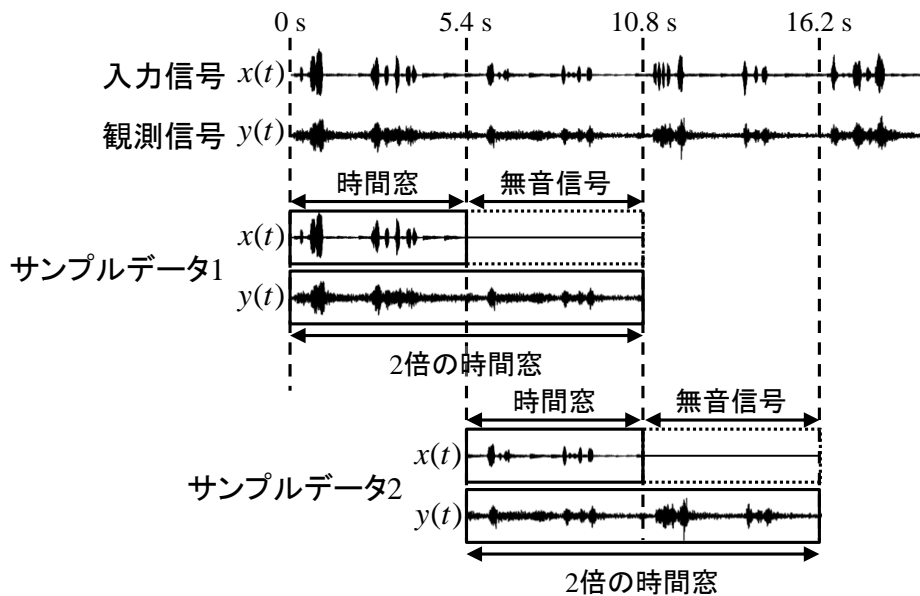


図 3.3.1-2 本研究で適用した巡回たたみ込み方法
(十分に長い矩形窓を利用する方法)

まず、図中のサンプルデータ 1 に示すように、ある長さの矩形窓によって入力信号をサンプルし、その信号の後ろに同じ長さの無音信号を接続する。つぎに、矩形窓と無音信号を合わせた長さの観測信号をサンプルし、それらの信号間のクロススペクトルと音源信号のオートスペクトルを計算する。さらに、図中のサンプルデータ 2 に示すように、サンプルを開始する時点を移動しながら上述と同様の計算を繰り返し、得られたすべてのクロススペクトルとオートスペクトルを別々に重畳する。最終的に、クロススペクトルの平均をオートスペクトルの平均で除すことによって伝達関数を求める。

求める応答成分よりも矩形窓が十分に長い場合、サンプルした入力信号に対する観測信号に含まれた出力は、その窓長さの 2 倍の範囲に収まるため、データの欠損がない。また、入力信号の後半のデータを無音信号とすることで、先

頭部分に巡回するデータも無音信号となるため、巡回たたみ込みによる誤差も生じない。

本研究における応用方法

本研究では、広域防災放送システムのすべてのマルチパスエコーが少なくとも5秒以内に受音点に到来すると仮定して、矩形窓の長さを5.4秒に設定し、5.4秒ごとにサンプルする位置を移動しながら伝達関数を計算した。また現場測定では、録音機器ごとのクロック誤差によるエラーを回避するために、マルチチャンネル録音が可能なデジタルデータレコーダを使用し、あるチャンネルに伝搬音の観測信号、別のチャンネルに広帯域無線受信機を用いて無線電波を傍受した信号（伝達系への入力信号）を同時に録音した。

測定結果の一例

上述の測定と分析方法によって得られたある地域の波形の例を図3.3.1-3に示す。屋外音場は気象条件が変動し、暗騒音もあるため、このような測定法は適用が難しいと考えられたが、この結果ではスピーカシステムからの直接音や卓越した反射音を検出されている。ただしこのような検出性能は、様々な周波数成分を持つ音声や音楽などの信号を対象とした場合に限定されるもので、人工的なチャイムやメロディなどの信号では、音源信号が持つ周期性によって自己相関が検出される問題がある。また、この波形はすべての周波数成分を含んだインパルスに対する応答ではないため、すべての周波数に対する応答ではない。クロススペクトル法に用いる信号に関する基礎的な検討の内容を付録に示す。

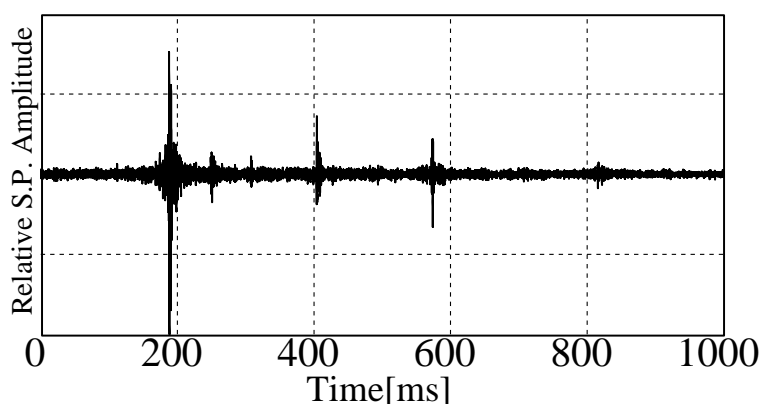


図 3.3.1-3 クロススペクトル法によって得られた波形の例

(中心周波数 500Hz、1 kHz、2 kHz の3つの 1 octave band を合わせた帯域)

3.3.2 Swept-Sine 法

Swept-Sine 信号の作成方法とインパルス応答の算出方法

Swept-Sine 法は、単位パルスに対して単位周波数あたりのエネルギーがより大きく、高い SN 比が得られるようにスイープ正弦波を音源信号として放射し、その応答に対して音源信号の逆フィルタをたたみ込むことによってインパルス応答を求める手法である。Swept-Sine 信号は、周波数領域において以下の式に示すように、インパルスの位相を周波数の 2 乗に比例して変化させることで作成できる。

$$S(k) = \begin{cases} \exp(-j4m\pi k^2/N^2), & 0 \leq k \leq N/2 \\ S^*(N-k), & N/2 < k < N \end{cases} \quad (3.3.2-1)$$

$m = N/4, \quad N = 2^n, \quad n = \text{FFT 次数}$

$$S^{-1}(k) = \begin{cases} \exp(j4m\pi k^2/N^2), & 0 \leq k \leq N/2 \\ S^{-1*}(N-k), & N/2 < k < N \end{cases} \quad (3.3.2-2)$$

$$H(k) = Y(k) \cdot S^{-1}(k) = \frac{Y(k)}{S(k)} = \frac{S^*(k) \cdot Y(k)}{S^*(k) \cdot S(k)} \quad (3.3.2-3)$$

ただし、 $H(k)$: インパルス応答のフーリエ変換 (伝達関数)、 $Y(k)$: Swept-sine 応答のフーリエ変換、 $S^{-1}(k)$: 逆 Swept-sine 信号のフーリエ変換、 k : 離散周波数番号、 $*$: 共役複素数

図 3.3.2-1 に Swept-Sine 法によるインパルス応答の測定ダイアグラムを示す。上述した式に示す $S(k)$ を逆フーリエ変換して得られる Swept-Sine 信号 $s(t)$ を音源信号として入力し、系の応答 $s(t)*h(t)$ と $s(t)$ の時間軸を反転させた逆 Swept-Sine 信号 $s(-t)$ をたたみ込み演算することによって系のインパルス応答 $h(t)$ が求まる。

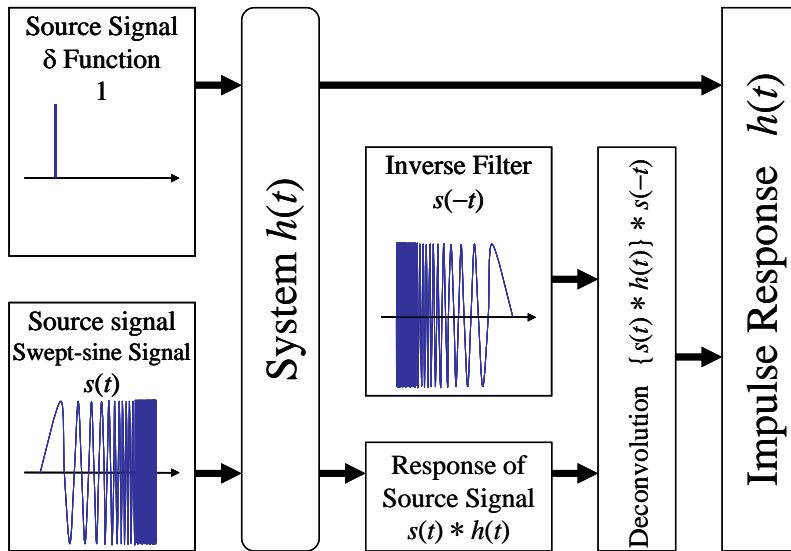


図 3.3.2-1 Swept-sine 法によるインパルス応答の測定ダイアグラム

本研究における応用方法

実際に利用した Swept-Sine 信号としては、上述の計算処理を時間領域で行うことによって、信号の掃引時間と含める周波数成分を任意に制限した。その信号の情報を表 3.3.2-1 に示す。この作成した信号を広域防災放送システムの放送操作卓にアナログ入力することによってスピーカシステムから放射した。なお計算のための時間反転信号としては、クロススペクトル法の測定法と同様に広帯域無線受信機を用いて無線電波を傍受することによって得られた信号を使用し、その信号を時間反転させた。

表 3.3.2-1 作成した Swept-sine 信号の情報

Component	Value
Frequency characteristic	Linear (5 octave band :250 Hz to 4 kHz)
Duration time	6 s

測定結果の例

上述の測定と分析方法によって得られたある地域のインパルス応答の例を図 3.3.2-2 に示す。この測定方法によってもインパルス応答が得られており、波形には卓越したパルスが現れている。

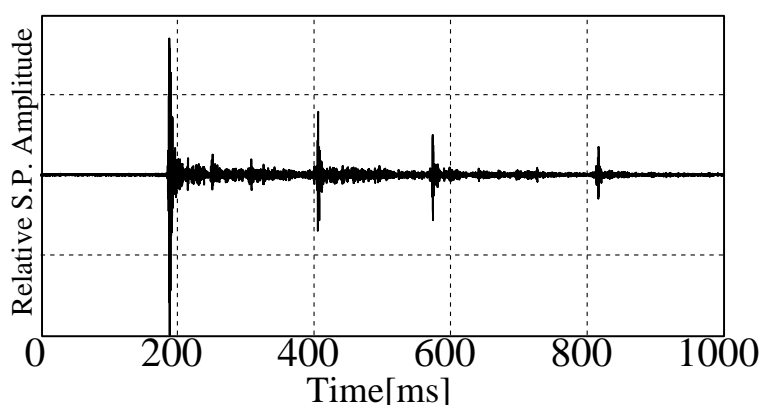


図 3.3.2-2 Swept-Sine 法によって得られたインパルス応答の例

(中心周波数 500Hz、1 kHz、2 kHz の 3 つの 1 octave band を合わせた帯域)

シミュレーション結果と現場測定結果の比較方法について

上述した幾何音響シミュレーション、クロススペクトル法、Swept-Sine 法によって得られた波形を改めて図 3.3.2-3 に並べて示す。それぞれの波形は各手法による特徴を持ち、また現場測定では暗騒音などの影響もあるため、このままでは比較し難い。そこで本研究では、Hilbert 変換[24]を適用することによって波形のエンベロープを検波し、その結果を比較することとした。各手法の波形から抽出したエンベロープ(以下、エコーダイアグラムという)を図 3.3.2-4 に示す。波形の包絡線のみが抽出され、直接音や卓越した反射音の相対的な大きさと遅れ時間が比較しやすい結果となっている。これらの結果の縦軸は、相対的な音圧の振幅であるが、以降の検討では、エコーダイアグラムの縦軸を対数の相対音圧レベルで表示する。

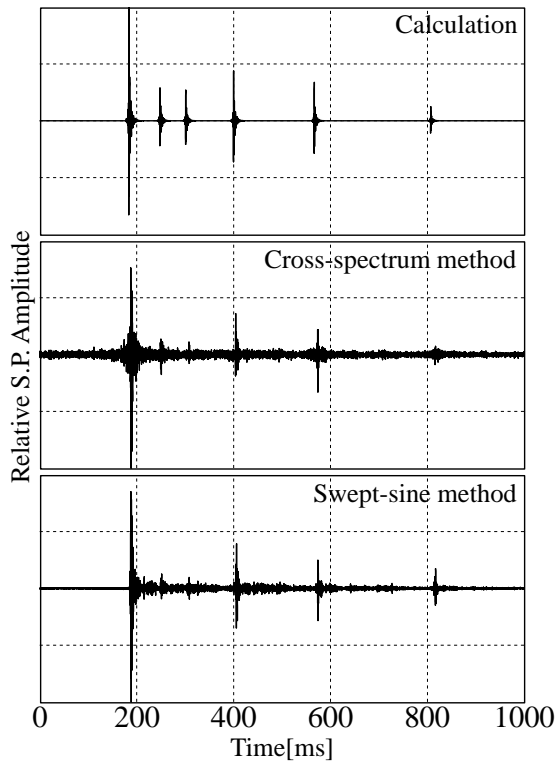


図 3.3.2-3 それぞれの手法によって得られた時間変動波形

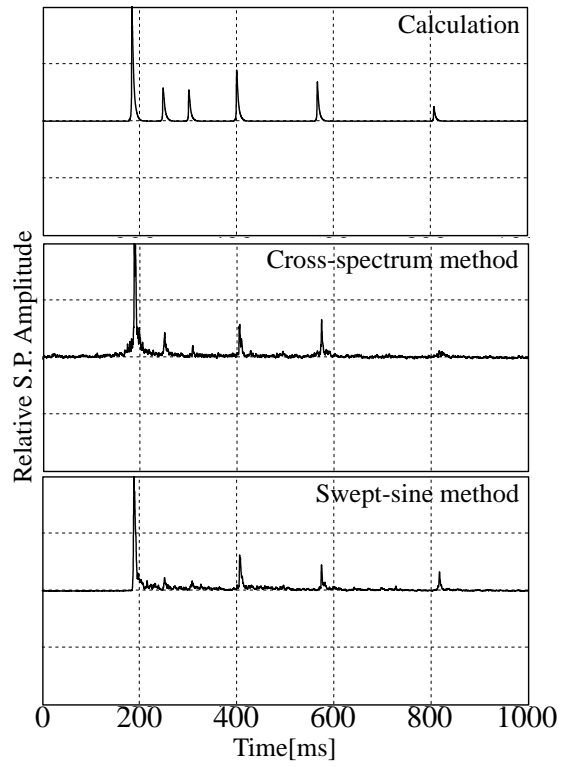


図 3.3.2-4 時間変動波形から抽出したエコーダイアグラム

3.4 屋外音響伝搬の予測結果と現場測定結果の比較検討

本節では、屋外音響伝搬を把握するための手法として適用した幾何音響シミュレーションの利用可能性を基礎的に検討するために、実際に広域防災放送システムが整備されている千葉県習志野市の二つの地域において、比較的風などの気象条件が穏やかな日に現場測定を行い、その測定結果とシミュレーション結果を比較するケーススタディを行った。

3.4.1 高層建物エリアにおける単独スピーカシステムからの

屋外音響伝搬予測

最初のケーススタディとしては、幾何音響シミュレーションによる反射音の検出性能を調べるために、高層の建物が建ち並ぶ狭いエリア（習志野市津田沼駅周辺地区）における単独のスピーカシステムからの音響伝搬を検討した。このケーススタディでは、クロススペクトル法によって得られた測定結果とシミュレーションによって計算した結果を比較した。

対象地域および検討の概要

対象地域の地図に音源のスピーカシステムと受音点の位置を記して図 3.4.1-1 に示す。この地域では、商業施設の屋上に設置されたスピーカシステム（スピーカ設置高さ：53 m）から毎夕 16:45 に子どもの帰宅を促す女声アナウンス（継続時間：約 27.7 s、モーラ数：約 2.45 モーラ/s）が放送されている。現場測定では、その放送されたアナウンスを M1 と M2 の位置において騒音計のマイクロホンを通してデジタルデータレコーダに録音し、その測定と同時に広帯域無線受信機によって傍受した音源信号を同じデジタルデータレコーダに録音した。M1 はスピーカシステムが目視できる位置、M2 は建物によってスピーカシステムが目視できない位置とした。なお、図で濃く塗られた部分がこの検討で実際にモデル化した建物である。

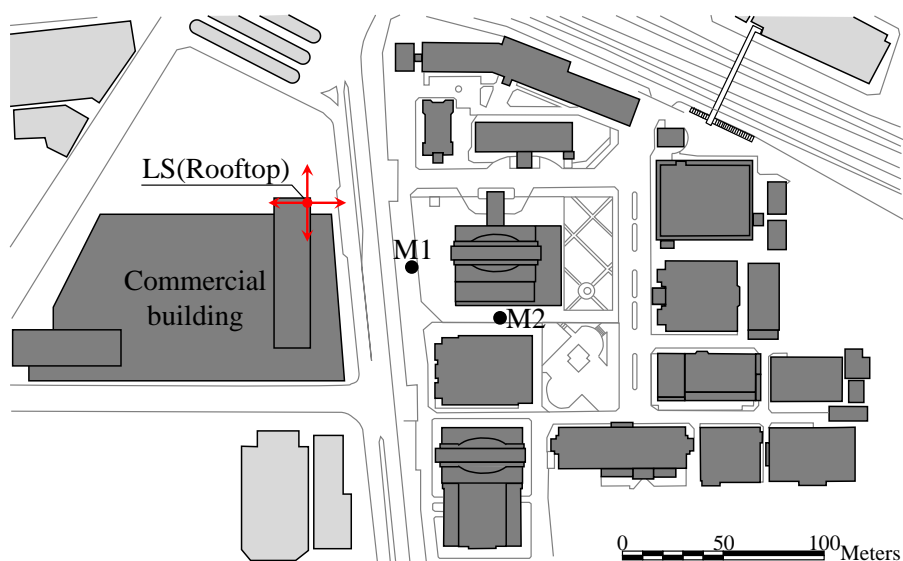


図 3.4.1-1 音源のスピーカシステムと受音点の位置

受音点 M1 における結果

受音点 M1 においてシミュレーションによって得られた音の伝搬経路図を図 3.4.1-2 に、シミュレーションとクロススペクトル法の現場測定によって得られたエコーダイアグラムを図 3.4.1-3 に示す。エコーダイアグラムの横軸は時間、縦軸はスピーカシステムとの距離が近い受音点 M1 の音圧を最大として設定した相対音圧レベルを意味する。

伝搬経路図を見ると、この受音点では建物間を往復するように音が反射している。シミュレーションとクロススペクトル法の波形を比較すると、卓越した反射音の遅れ時間と相対的な音の大きさがかなりよく一致している。

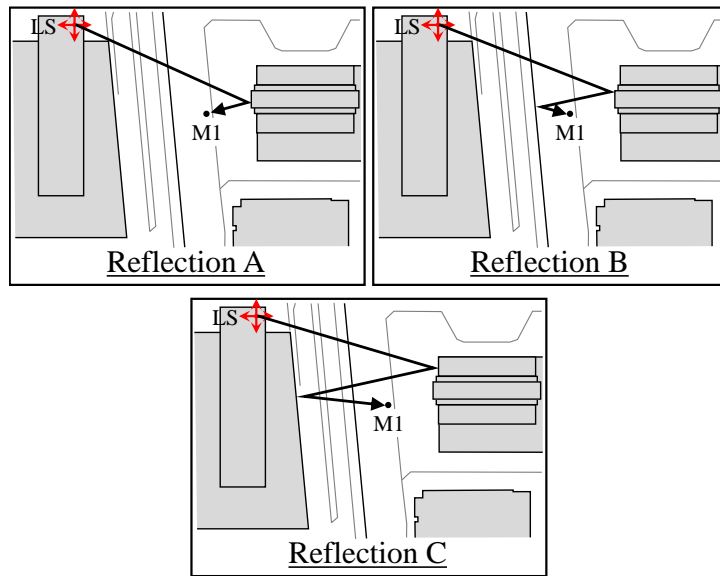


図 3.4.1-2 受信点 M1 における音の伝搬経路図

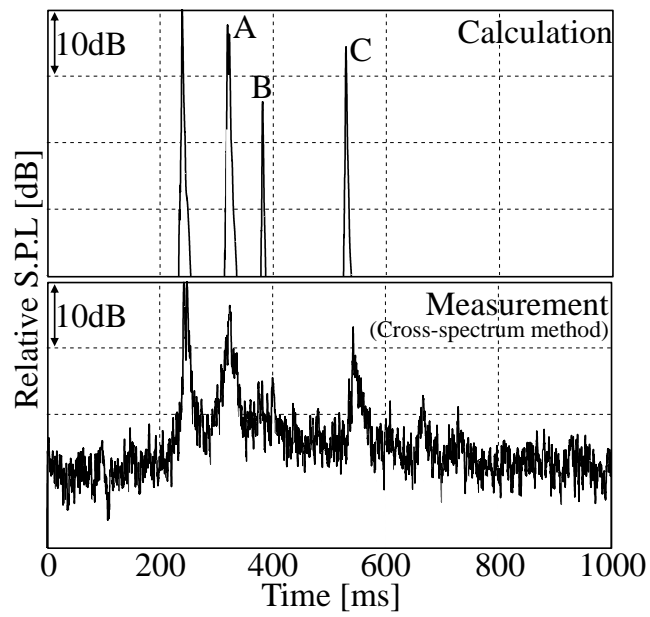


図 3.4.1-3 受信点 M1 におけるエコーダイアグラム

受信点 M2 における結果

受信点 M2 においてシミュレーションによって得られた音の伝搬経路図を図 3.4.1-4 に、二つの手法によって得られたエコーダイアグラムを図 3.4.1-5 に示す。本研究の幾何音響シミュレーションでは、回折効果を考慮していないために、この受信点ではスピーカシステムからの直接音が計算されていないが、建物の間を往復するいくつかの優勢な反射音の遅れ時間と相対的な音の大きさはクロススペクトル法によって得られた測定結果とよく対応している。

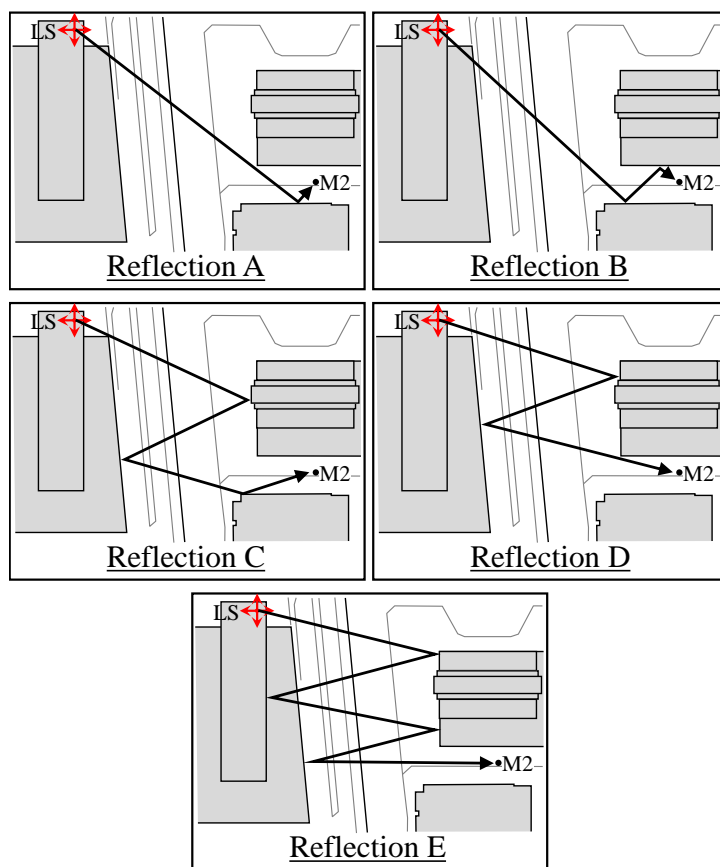


図 3.4.1-4 受信点 M2 における音の伝搬経路図

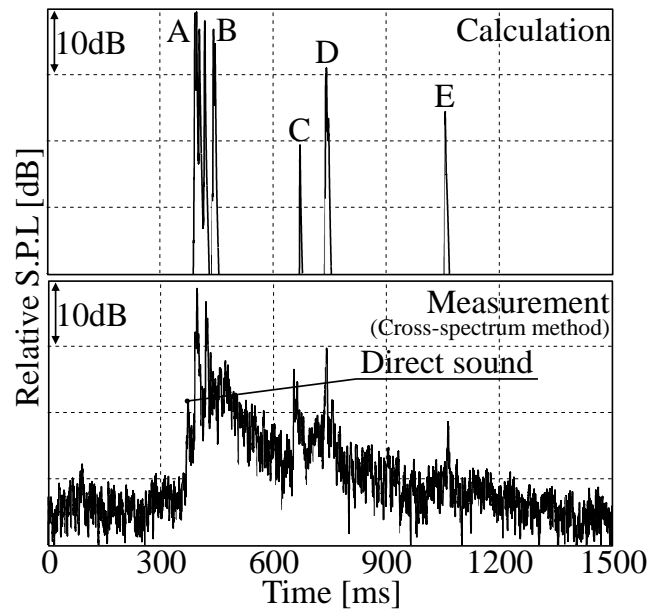


図 3.4.1-5 受音点 M2 におけるエコーダイアグラム

3.4.2 広域エリアにおける複数のスピーカシステムからの

屋外音響伝搬予測

もう一つのケーススタディとしては、複数のスピーカシステムからの音響伝搬を検討した。この検討では、クロススペクトル法による現場測定に加えて、習志野市の特別な許可を得ることによって実際のスピーカシステムから Swept-Sine 信号を放送し、幾何音響シミュレーション、クロススペクトル法、Swept-Sine 法によって得られた結果を比較した。

対象地域および検討の概要

対象地域の地図に音源のスピーカシステムと受音点の位置を記して図 3.4.2-1 に示す。検討では、4 つのスピーカシステムが設置されている住宅がほとんどない習志野市の湾岸地区を対象とした。この現場測定では、図に示す LS1 と LS2 のスピーカシステムから Swept-Sine 信号ならびに音響測定の開始を告げる男声アナウンス（継続時間：約 50 s、モーラ数：1.7 モーラ/s）を放送した。その放送された信号を M1 と M2 の位置において前節と同様な方法で録音した。M1 からは LS1 のスピーカシステムが、M2 からは LS1 と LS2 が目視できる。

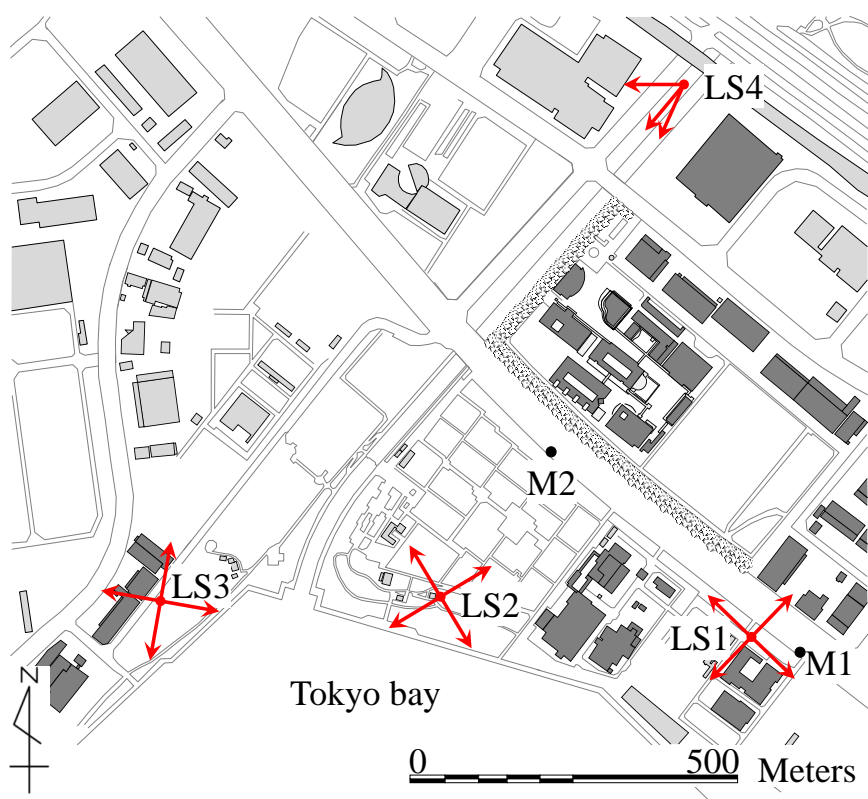


図 3.4.2-1 音源のスピーカシステムと受信点の位置

受信点 M1 における結果

受信点 M1 においてシミュレーションによって得られた音の伝搬経路図を図 3.4.2-2 に、シミュレーション、クロススペクトル法、Swept-Sine 法によって得られたエコーダイアグラムを図 3.4.2-3 に示す。伝搬経路図を見ると、この受信点では建物間を往復するように音が反射している。3 つの波形を比較すると、離散的な反射音の遅れ時間と相対的な音の大きさが対応している。

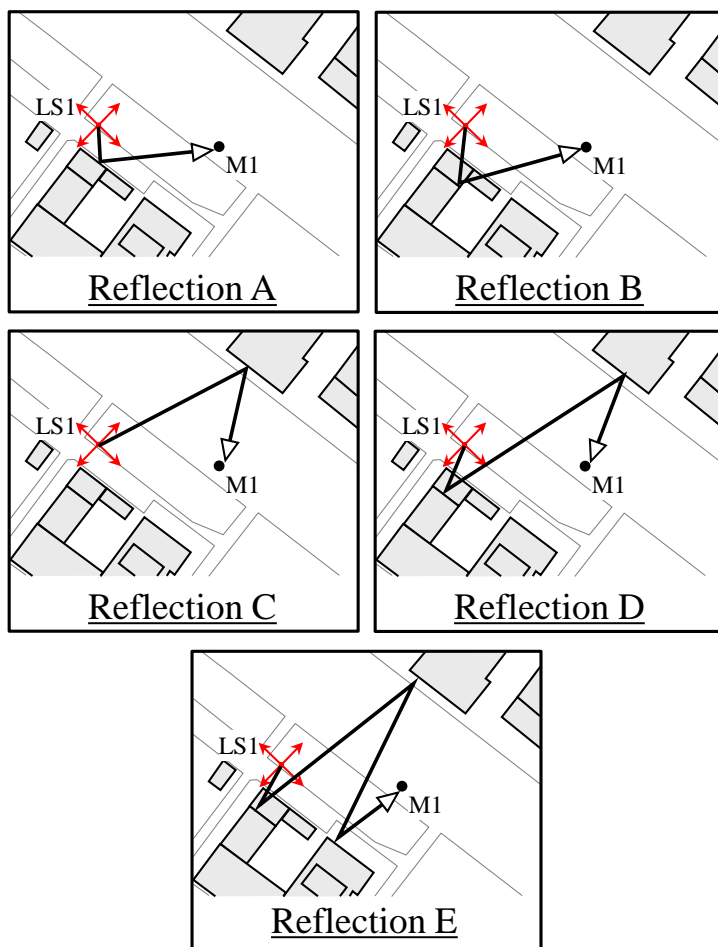


図 3.4.2-2 受信点 M1 における音の伝搬経路図

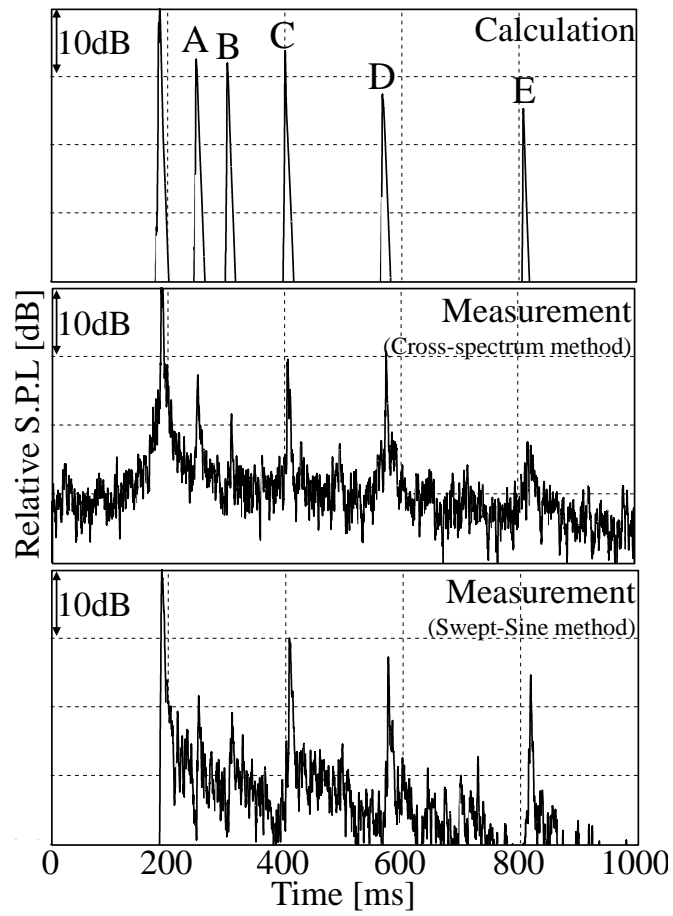


図 3.4.2-3 受音点 M1 におけるエコーダイアグラム

受信点 M2 における結果

受信点 M2 においてシミュレーションによって得られた音の伝搬経路図を図 3.4.2-4 に、3つの手法によって得られたエコーダイアグラムを図 3.4.2-5 に示す。この受信点では、LS1、LS2 のスピーカシステムからの直接音といくつかの反射音がシミュレーションによって計算されている。その結果と二種類の測定結果を比較すると、二つのスピーカシステムからの直接音と反射音 A については、遅れ時間と相対的な音の大きさがかなりよく一致しているが、測定結果では反射音 B が目立っていない。

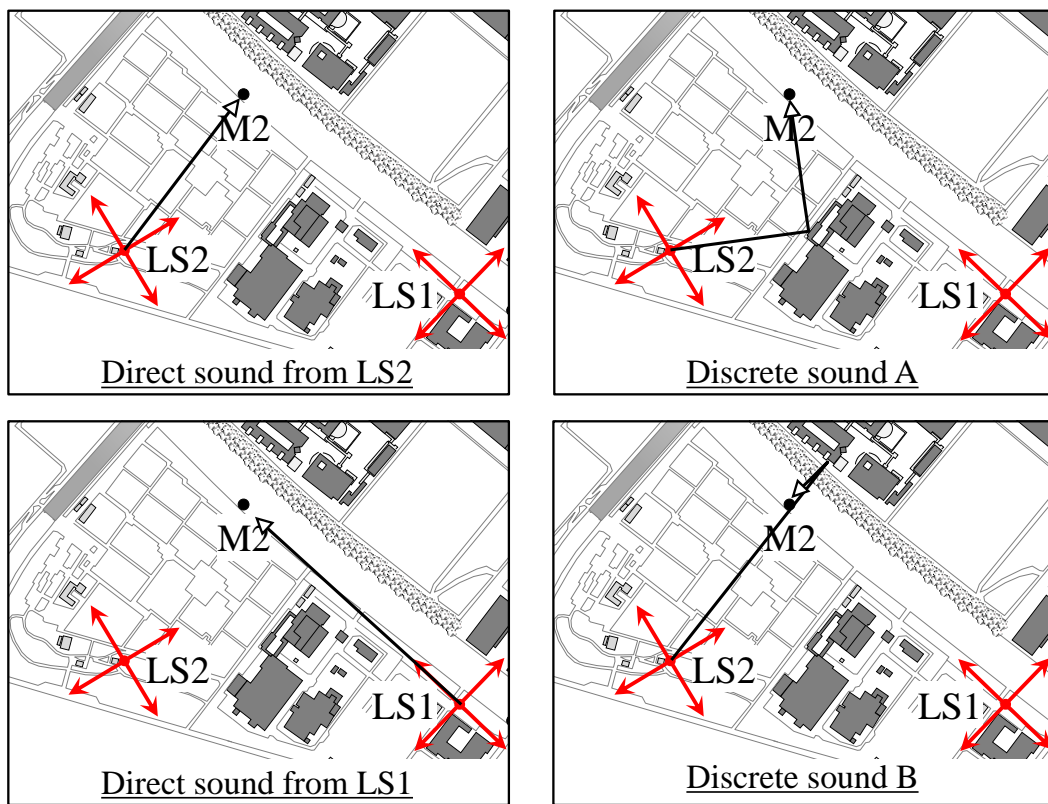


図 3.4.2-4 受信点 M2 における音の伝搬経路図

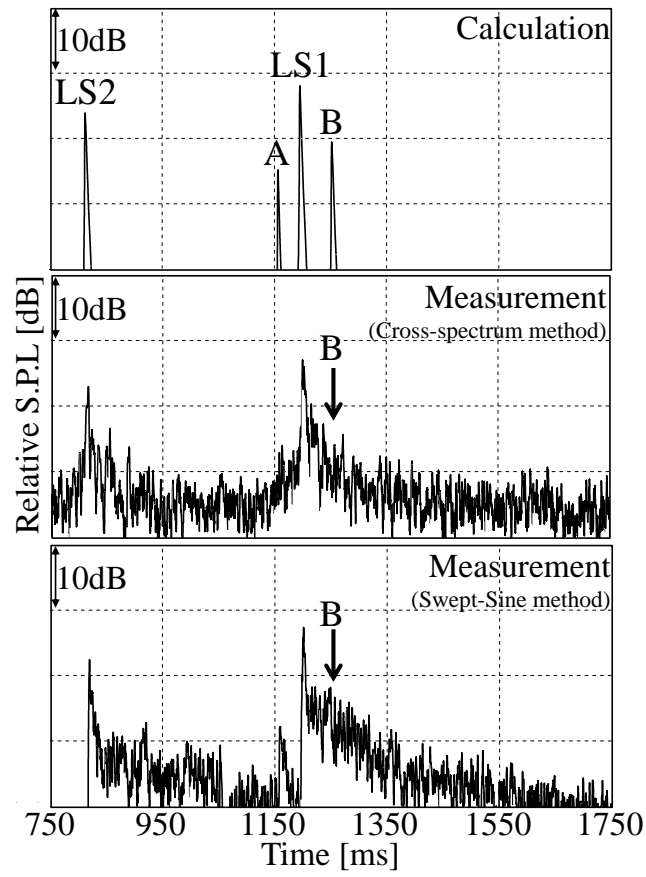


図 3.4.2-5 受音点 M2 におけるエコーダイアグラム

受信点 M2 における不一致に関する考察

この測定点周辺の写真を図 3.4.2-6 に示す。写真を見ると、受信点 M2 と反射音 B を引き起こす境界面の間には、高さ 3~5 m 程の茂った樹木が生えており、現場測定では、この樹木によって音が拡散していると考えられる。幾何音響シミュレーションでは、そのような散乱効果を計算に考慮していないために、反射音 B が目立って現れたものと推測される。

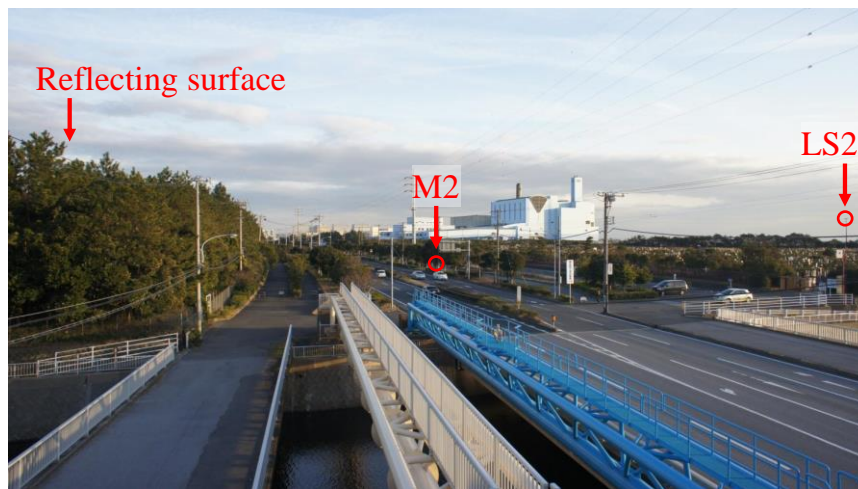


図 3.4.2-6 受信点 M2 周辺の写真

3.5 屋外音響伝搬の日変化に関する基礎的調査

前節の検討における広域防災放送システムの現場測定によって得られたエコーダイアグラムは、いずれのケーススタディも一日のある特定時間に測定された結果であるが、時間や日ごとに気象の条件が変化する屋外音場では、それに応じて測定結果も変化することが予想される。そこで、一つの受音点において数日間定点観測を行うこととした。ただし、サイレンのような音質の Swept-Sine 信号を連日にわたって放送することはできないため、この測定ではクロススペクトル法を適用した。

対象地域の概要

検討は、二つのスピーカシステムが設置された松戸市内の住宅街で行った。音源のスピーカシステムと受音点の位置を記した対象地域の地図を図 3.5-1 に示す。LS1 のスピーカシステムはこの地域の市役所の屋上に、LS2 は公園内に設置されており、それらから放送された毎日 14:00 に告げられる女声アナウンス（継続時間：約 18 s、モーラ数：4.55 モーラ/s）を Mic. の位置で録音した。地図に示した色の濃い部分は、この地域の中でも特に高い建物で、その建物 B1 からは LS2 のスピーカシステムと受音点の位置を目視することができることから、反射の影響があると考えられた。地図から幾何学的に伝搬経路を求め、その距離を基に計算した各スピーカシステムからの直接音と反射音の到来時間を図に合わせて示す。

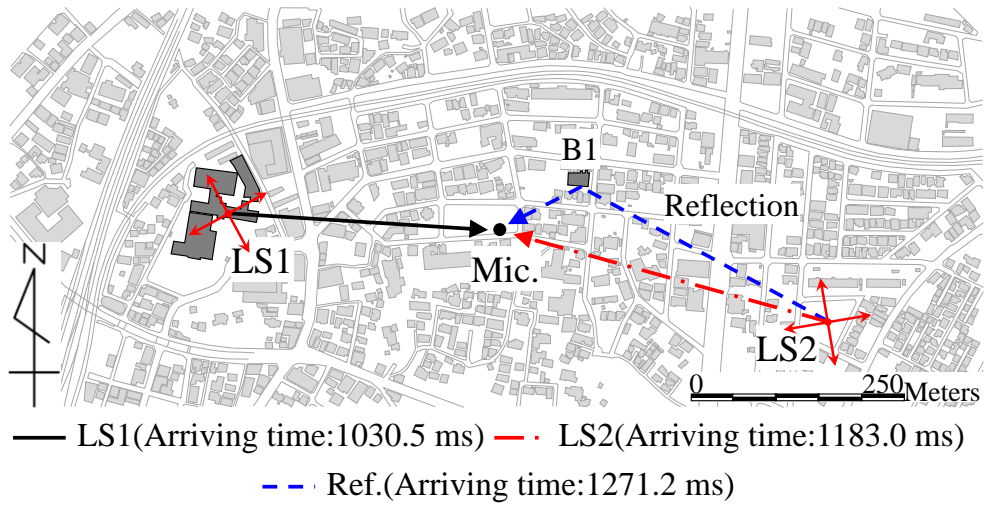


図 3.5-1 音源のスピーカシステムと受音点の位置

屋外音響伝搬の日変化に関する結果と考察

6 日間にわたって測定したエコーダイアグラムを図 3.5-2 に示す。また、LS1 のスピーカシステムがある屋上には、市役所の風向風速計が設置されている。その風向風速計によって観測された測定時の 10 分間における平均値を図に合わせて示す。この受音点は最初に音が到来すると考えられる LS1 から 300m 以上離れ、かつ音源信号も 18 s と短いために、音源信号に対する暗騒音の比、S/N 比が確保できていない結果ではあるが、いずれの結果からも LS1 からの直接音（黒線）が目視でき、日ごとのその相対的な大きさと遅れ時間はほぼ一致している。平均風速が 2 m/10min. 以内の 12/21、12/22、1/10 に測定された波形では、LS1 からの直接音に続いて LS2 からの直接音（赤線）、建物からの卓越した反射音（青線）が現れており、その相対的な大きさと遅れ時間は対応している。一方、平均風速が 5 m/10min. を超える日に測定された 12/23、12/26、12/27 の波形では、それらの伝搬音がほとんど観測されていない。このように風が強い日では、スピーカシステムからの直接音や反射音が観測されない場合があるが、比較的風が穏やかであれば現場測定を行うことも可能であることが確認できた。

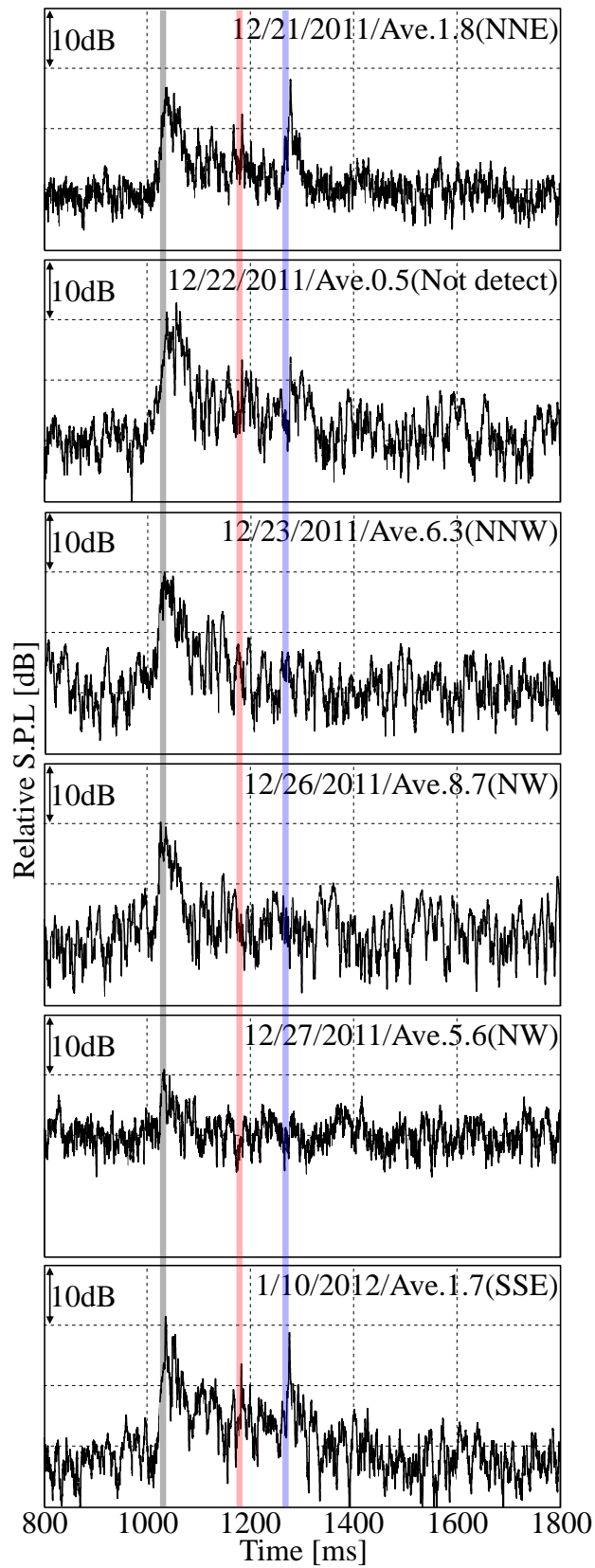


図 3.5-2 6日間のエコーダイアグラム

3.6 まとめ

本論文では、広域防災放送システムの明瞭性の改善を目的とした種々の検討を行う手法として、コンピュータシミュレーションによって解析した音場を実験室内に3次元的に再現する可聴型シミュレーションシステムを提案し、その中で本章では、広域防災放送システムの屋外音響伝搬をコンピュータシミュレーションによって把握する手法の概要、その精度を調査するための測定法の概要、それらを用いたシミュレーションの利用可能性に関する基礎的な検討の詳細を述べた。

広域防災放送システムの明瞭性を低下させるマルチパスエコーは、スピーカシステムからの直接音と伝搬経路が単純な反射音であると想定して、コンピュータシミュレーションの手法としては、音響伝搬計算法の中でも最も単純で、かつ大規模な空間における音響伝搬を解析できる幾何音響シミュレーションの虚像法を適用した。その虚像法としては、市販のソフトウェアに含まれた手法を応用し、音場の媒質、スピーカシステムの指向性、建物などの空間情報、境界面における吸音率などを概括的にモデル化することでインパルス応答を計算した。

シミュレーションの精度を調査するための測定法としては、室内音響などの分野で広く利用されている Swept-Sine 法と現場で放送されるアナウンス信号を活用できるクロススペクトル法を応用した。これらの方法は、既往の文献に従って従来どおりの技術を用いた。

幾何音響シミュレーションの利用可能性を基礎的に調査するための検討としては、実際の広域防災放送システムを対象として上述の二つの手法による現場測定を行い、測定によって得られたエコーダイアグラムとシミュレーションによって計算した結果を目視によって比較した。その結果、複数のスピーカシステムからの直接音や卓越した反射音については、音圧振幅、遅れ時間がかなり高い精度で予測できることが確かめられた。

上述の検討における現場測定によって得られたエコーダイアグラムは、一日のある特定時間に測定された結果で、時間や日ごとに気象の条件が変化する

る屋外音場では、それに応じて測定結果も変化することが予想された。この点について、一つの受音点において数日間の定点観測調査を行った結果、風が強い日ではスピーカシステムからの直接音や反射音が観測されない場合があるが、比較的風が穏やかであれば、日ごとに得られた波形がよく一致することが確かめられた。

今後の課題としては、幾何音響シミュレーションの手法をさらに高度化し、気象の条件、地表面条件、回折効果、拡散効果などを詳細に反映できる手法を開発する必要がある。

第4章 可聴型シミュレーションシステム

4 可聴型シミュレーションシステム

4.1 音場再現手法

コンピュータの発達に伴い、コンピュータグラフィックスや音響効果などを組み合わせて、五感の内のいくつかの感覚に働きかけるヴァーチャルリアリティの技術が開発されてきており、現在では、3次元的に知覚できる一般家庭向けの製品もいくつか市販化されている。聴覚の分野においても、このような3次元音場再現を追求する研究や開発が進められてきており、空間と時間を越えて音場をリアルに可聴化できるシステムが発表されている。室内音響の分野におけるこのような可聴化に関する研究としては、1934年に行われた Spandock によるコンサートホールの模型実験を通して室内の響きを実際に耳で確かめる試みが先駆けで[35]、これ以降に多くの研究が積み重ねられている。室内音響設計の分野では、そのような可聴化手法が反射音や残響音の効果を聴感的に調べる検討ツールとして、あるいは設計指針を得るための基礎的な研究ツールとして利用されている。

モノラル收音・再生方式

可聴化手法の中で最も単純な方法は、無指向性のマイクロホンによって対象となる音場を録音し、それを一つのスピーカを通して再生するモノラル收音・再生方式である。この方式では、音の方向情報が再現できないため、上述のヴァーチャルリアリティからはかけ離れているが、単純に“音を聞く”という点では最も簡単な手法である。また室内音響設計の分野において、これまで考えられてきた種々の音響設計の物理量は、この無指向性の原理に基づいていることが多い。

バイノーラル收音・再生方式

人間の両耳効果に重点を置いた收音・再生方式としては、ダミーヘッドや実際に当人の両耳位置に設置した小型マイクロホンを通して、個人ごとに異なる頭部伝達関数を含めた收音を行い、その2チャンネルの両耳信号を二つのスピーカやヘッドホンから再生するバイノーラル收音・再生方式がある。この中で2つのスピーカから再生する方式は、トランスオーラル再生と呼ばれ、1960年代

に Schroeder らが提案し、現在でも多くの技術者によって様々な研究が進められている。このバイノーラル收音・再生方式は、いわゆる TRADIS 法 (True Reproduction of All Directional Information by Stereophony) や OSS 法 (Ortho Stereophonic System) に分類され、両耳間時間差、両耳間レベル差、スペクトラルキューなどを手がかりに音の到来方向を判断する手法である[36]。この方式は、音響伝送系の扱いが物理的に明確で、理論的には両耳に所望の音響信号を再現することが可能である。しかし、音場の再現では、厳密には受聴者ごとの頭部伝達関数を設定しなければならず、受聴時の姿勢が拘束されること、無響室に近い音場が必要であることなど音像を定位させるためには制約が多い。またその録音時においても、正確な音像定位のためには、当人の両耳位置における收音が必要不可欠で、不特定多数の人を被験者にしなければならない聴感実験では、現段階ではまだ利用し難い。

マルチチャンネル收音・再生方式

バイノーラル收音・再生方式は、基本的に両耳への入力信号を制御する考え方に基づいているのに対して、多くのスピーカを用いて受聴位置の近傍エリアに所望の音場を再現する手法として、マルチチャンネル收音・再生方式がある。この方式では、複数のマイクロホンユニットを立体的に配置した收音システムを通して対象となる音場を録音し、そのマルチチャンネル信号を受聴者の周囲を囲むように配置した同数のスピーカシステムから再生することによって、3次元的に音場を再現する比較的簡便な方法がとられる[37]。この方式によれば、システムの性質上、受聴者の耳の位置をそれほど厳密に固定する必要はなく、自然な聴感印象を得られるなどの利点がある。このような收音・再生方式としては、5.1 チャンネルサラウンド再生システム、NHK 技研が開発した 22.2 マルチチャンネル音響方式[38]、YAMAHA 音響研の 12 チャンネルの SFR/SFS (Sound Field Reproduction/ Synthesis)[39]などと様々な手法が考案されているが、再生スピーカの必要チャンネル数については検討の余地がある。

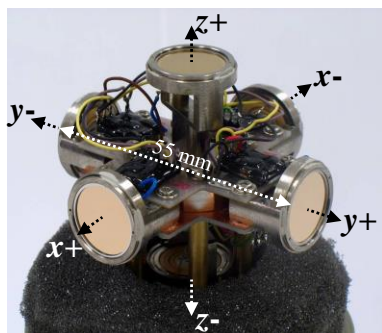
本研究で適用した音場再現手法

序論において、“広域防災放送システムの明瞭性低下を引き起こすマルチパスエコー(複数のスピーカシステムからの直接音や近隣の建物からの反射音)

はいろいろな方向から到来することが大きな問題である”と述べたとおり、このような放送システムの明瞭性に関する聴感実験では、音の3次元的な空間情報も再現できる手法を利用する必要がある。また、そのような聴感実験や音響設計を行った効果は、原則として不特定対数の人を被験者とすべきである。したがって本研究では、可聴型シミュレーションシステムの音場再現手法としてマルチチャンネル收音・再生方式を適用することとした。その中で、筆者らの研究グループでは、6チャンネル收音・再生手法について研究を行ってきており[40]、これまでも多くの聴感実験に用いられている。本研究ではこの技術を応用し、幾何音響シミュレーションによって計算した音場を実験室内に3次元的に再現した。この幾何音響シミュレーションの6チャンネル化の部分について精度を確かめるために、広域防災放送システムが整備されている地域における6チャンネル收音システム（以下、6-ch. Mic.）を用いたクロススペクトル法による現場測定を行い、その測定データから種々の物理データを計算し、それらの結果と6チャンネル化したシミュレーションの計算結果を比較した。さらに、実際にいくつかの聴感実験を通して可聴化シミュレーションシステムとしての有効性も検討した。

4.1.1 6チャンネル收音・再生手法

6チャンネル收音・再生手法は、1997年に行われた公共空間の音環境に関する研究[41, 42]で初めて利用され、それ以降、コンサートホールの音響設計に関する研究（ステージ音響・客席の印象評価）[43]、拡声システムの評価に関する研究（トンネルなど）[44]、車室内の音環境に関する研究[45]などの聴感実験に利用されている。それらの実験に加えて、これまでにいくつかの物理的な検討も行われており[40, 46, 47]、現在では6-ch. Mic.も軽量化され、音場再現までの手順も単純化されてきている。現在我々が使用している6-ch. Mic.では、相対するマイクロホン間隔を55 mmとしている（図4.1.1-1(a)参照）。再生システムの一例として、本学の音響実験スタジオ内に設置された6チャンネル再生システムを図4.1.1-1(b)に示す。この再生システムの中で再現された音を聞くと、かなり正確に音の到来方向を知覚することができる。本研究では、これらのシステムを用いた。以下に6チャンネル收音・再生手法による音の方向定位性を調べた過去の研究結果を示す。



(a) 6-ch. Mic.



(b) 無響室に構築した再生システム

図 4.1.1-1 本研究で使用した6チャンネル收音・再生システム

6チャンネル收音・再生手法による方向定位実験の過去の研究結果

本手法の研究開始当初に行われた音源方向の定位性を主観的に検討した実験では、音源スピーカ方向を水平面内の30°ごとに変えて測定した6チャンネル方向別インパルス応答とピンクノイズの断続音をたたみ込むことによって生成した試験音が被験者に呈示された。なおこの実験では、音源方向を判断する際の姿勢条件として、頭部を回してもよい条件と正面を向いたままの条件の2通りが試された。

13名の男女学生によるすべての回答をまとめた実験結果を図4.1.1-2に示す。横軸は音源の呈示角度、縦軸は被験者が判断した角度であり、円の径は回答数に比例している。いずれの受聴条件の結果においても、ほとんどの円が45°線上にプロットされており、被験者は6チャンネル再生された音源の到来方向をかなり正確に判断できていることがわかる。またこれらの結果から、6チャンネルの手法では姿勢の制約がほとんどないことが確認できる。

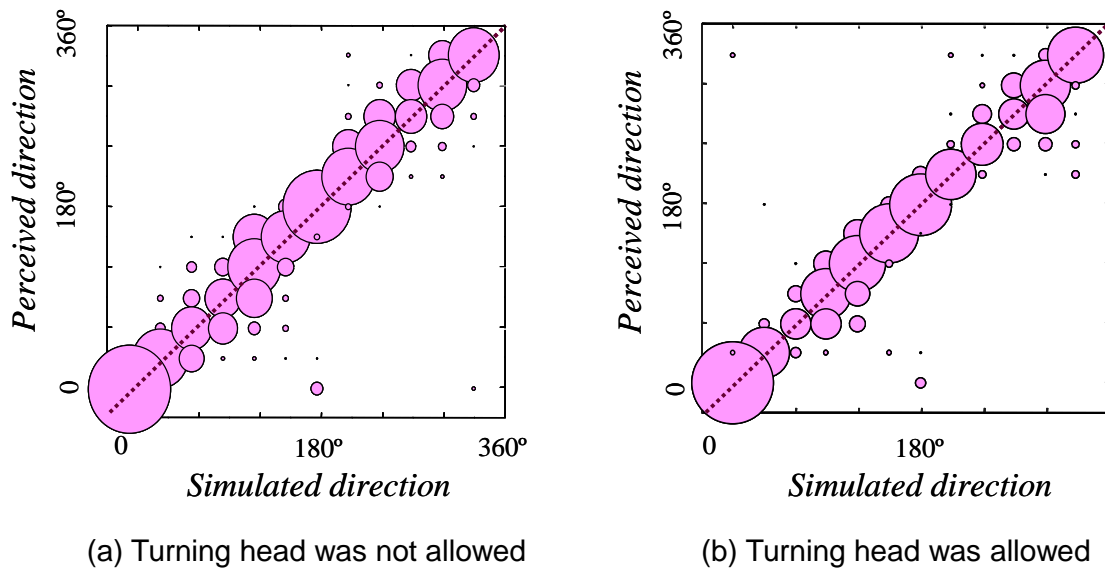


図 4.1.1-2 方向定位実験の既往の結果

4.2 幾何音響シミュレーションの6チャンネル化

前章で述べた幾何音響シミュレーションの手法によって計算した音場を6チャンネル再生システムを通して実験室内に再現するためには、6チャンネル方式の收音原理に基づいてシミュレーションの無指向性の計算データから上下左右前後の方向別に振り分けられた6チャンネル信号を合成する必要がある。その合成方法を6チャンネル收音・再生手法の原理と合わせて以下に示す。

4.2.1 6チャンネル收音・再生手法の原理

図4.2.1-1において、原点に対する入射平面波をベクトル \mathbf{P} と、 x 軸と x - y 平面におけるベクトル \mathbf{P} の投影が成す角を θ と、ベクトル \mathbf{P} と z 軸が成す角を φ とする。

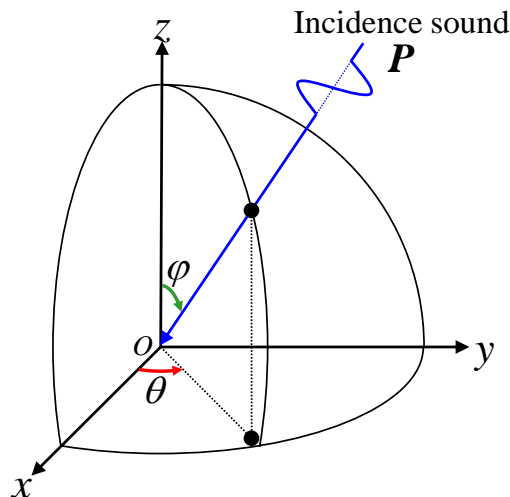


図 4.2.1-1 音の入射条件

式(4.2.1-1)によって表されるカーディオイド型単一指向特性を持った6つのマイクロホンを原点に置き、各マイクロホンの主軸が x 、 y 、 z 軸の \pm 方向に向いていると仮定すると、各マイクロホンによって観測される音圧 p_{x+} 、 p_{x-} 、 p_{y+} 、 p_{y-} 、 p_{z+} 、 p_{z-} は、3次元極座標における余弦定理から式(4.2.1-2)～(4.2.1-7)によって表される。

$$D(\theta) = \frac{1 + \cos \theta}{2} \quad (4.2.1-1)$$

ここで、 θ はカーディオイド型指向特性の主軸に対する音波の入射角度。

$$p_{x+} = \frac{1 + \sin \varphi \cos \theta}{2} p_0 = A_{x+} \cdot p_0 \quad (4.2.1-2)$$

$$p_{x-} = \frac{1 - \sin \varphi \cos \theta}{2} p_0 = A_{x-} \cdot p_0 \quad (4.2.1-3)$$

$$p_{y+} = \frac{1 + \sin \varphi \sin \theta}{2} p_0 = A_{y+} \cdot p_0 \quad (4.2.1-4)$$

$$p_{y-} = \frac{1 - \sin \varphi \sin \theta}{2} p_0 = A_{y-} \cdot p_0 \quad (4.2.1-5)$$

$$p_{z+} = \frac{1 + \cos \varphi}{2} p_0 = A_{z+} \cdot p_0 \quad (4.2.1-6)$$

$$p_{z-} = \frac{1 - \cos \varphi}{2} p_0 = A_{z-} \cdot p_0 \quad (4.2.1-7)$$

ここで、 p_0 は入射平面波の音圧振幅、 A_{x+} 、 A_{x-} 、 A_{y+} 、 A_{y-} 、 A_{z+} 、 A_{z-} は x 、 y 、 z 軸の +/- 方向における指向特性の重みづけ係数。

これらの 6 つの音圧信号を図 4.2.1-2 に示すように、無響室で直交に組み合わせた 6 台のスピーカから再生した場合、再生システムの中心における音圧 p は、全システムのゲインを簡略化のために 1 と仮定することによって式 (4.2.1-8) で表される。

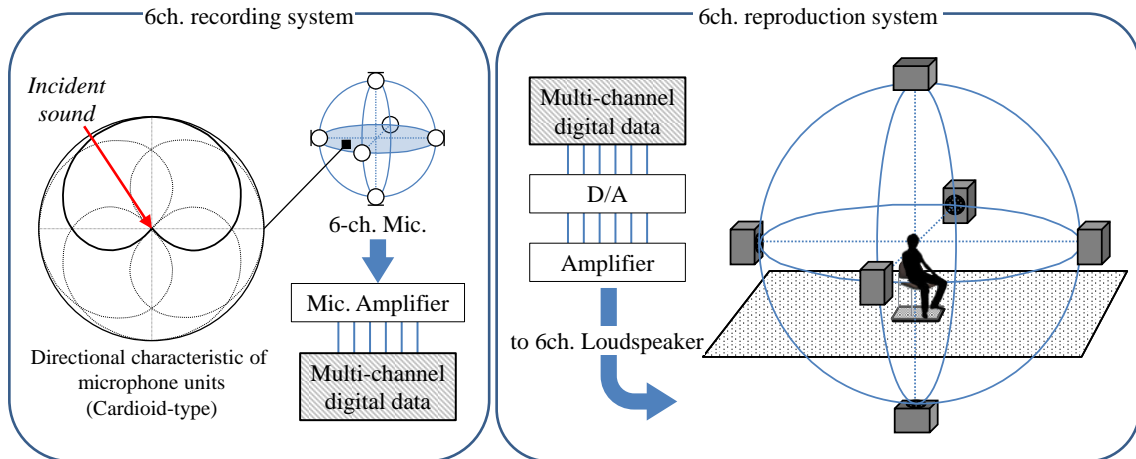


図 4.2.1-2 本研究において応用した 6 チャンネル收音・再生手法

$$p = p_{x+} + p_{x-} + p_{y+} + p_{y-} + p_{z+} + p_{z-} = 3p_0 \quad (4.2.1-8)$$

すなわち、システムの中心点における音圧は入射角度 θ 、 φ に関係なく、入射音の音圧に比例する。

つぎに、再生システムの中心における x 、 y 、 z 方向の粒子速度成分は、各スピーカから受聴位置へ伝わる音波を平面波と仮定すれば、それぞれ式 (4.2.1-9) ~ (4.2.1-11) のように表すことができる。

$$u_x = \frac{p_{x+} - p_{x-}}{\rho c} = \frac{\sin \varphi \cos \theta}{\rho c} \cdot p_0 \quad (4.2.1-9)$$

$$u_y = \frac{p_{y+} - p_{y-}}{\rho c} = \frac{\sin \varphi \sin \theta}{\rho c} \cdot p_0 \quad (4.2.1-10)$$

$$u_z = \frac{p_{z+} - p_{z-}}{\rho c} = \frac{\cos \varphi}{\rho c} \cdot p_0 \quad (4.2.1-11)$$

ここで、 ρ は空気の密度、 c は音速。

これらの式は、再生システムの中心において原音場の粒子速度ベクトルが再現されることを示している。また、現場測定において得られた 6-ch. Mic. の出力から x 、 y 、 z 方向の粒子速度ベクトルが求められ、音圧 p と各軸方向の粒子速度成分 u_x 、 u_y 、 u_z の積として、音の到来方向とその強さを調べられる音響インテンシティベクトルを計算することもできる[40, 46, 47]。

上述の原理は、6 のカーディオイド型マイクロホンがすべて原点にあると仮定しているが、実際のシステムでは各マイクロホンを有限の距離だけ離す必要があり、高音域ではその有限差分近似による誤差が避けられない。またこの問題とは別に、低音域では理想的なカーディオイド特性からのずれによる誤差も生じる。これらの点について図 4.1.1-1 (a) に示した 6-ch. Mic. を用いた実験的検討の結果、中心周波数 125 Hz ~ 2 kHz の 1 octave band において、音響インテンシティベクトルはほぼ正確に測定できることが確認されている[47]。

4.2.2 幾何音響シミュレーションの6チャンネル信号の合成

前章で述べた幾何音響シミュレーションの手法によって計算したデータから方向別の6チャンネル信号を合成する方法は以下のとおりである。

6-ch. Mic. を用いて実音場で録音した音を実験室に再現する場合は、図 4.2.2-1 における System 1 に示すように、単純に収録した音圧信号をチャンネル別に6台のスピーカから再生すればよい。一方、シミュレーションの音場再現では、図 4.2.2-1 における System 2 に示すとおり、6チャンネル信号を合成する必要が

ある。前章の図 3.2.1-4 に示したとおり、本研究で使用した幾何音響ソフトウェアでは、各パルス（スピーカシステムからの直接音と主要な建物からの反射音）の到来時間、周波数帯域ごとの相対的な音圧（無指向性收音）、水平面と正中面のそれぞれの到来方向の情報を得ることができる。この到来方向の情報に基づいて、式 (4.2.1-2) ~ (4.2.1-7) で示した x 、 y 、 z 軸の +/- 方向における指向特性の重みづけ係数 A_{x+} 、 A_{x-} 、 A_{y+} 、 A_{y-} 、 A_{z+} 、 A_{z-} を計算し、それらを相対的な音圧に重みづけることによって、6 チャンネルの各方向に振り分けた。それらのインパルス応答に任意のドライソース（広域防災放送アナウンス）をたたみ込むことによって、6 チャンネル信号を合成した。

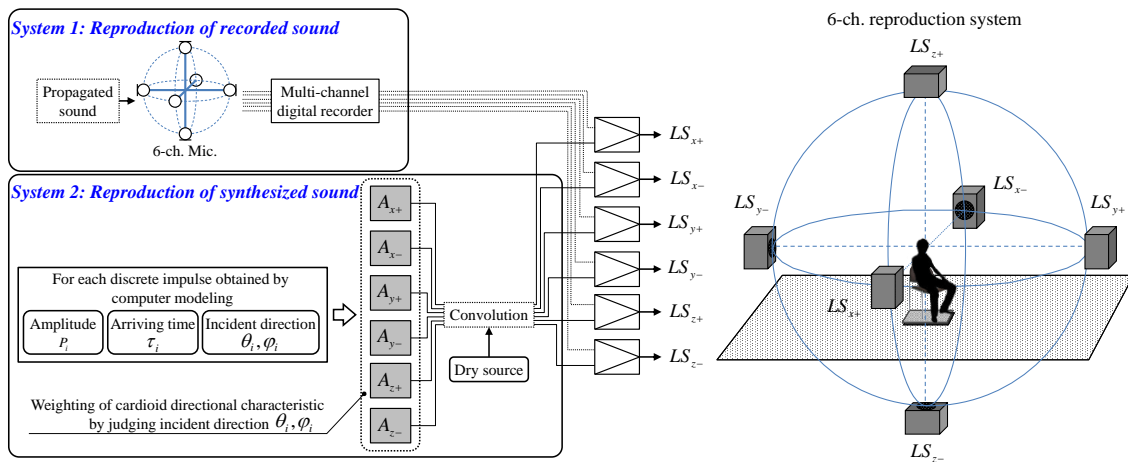


図 4.2.2-1 シミュレーションの 6 チャンネル信号の合成ダイアグラム

4.2.3 物理データの精度

6 チャンネル化した幾何音響シミュレーションの精度を確かめるために、広域防災放送システムが整備されている地域における 6-ch. Mic.を用いたクロススペクトル法による現場測定を行った。その測定データから水平面内の 4 チャンネルのエコーダイアグラム、式 (4.2.1-8) に従ってシステムの中心における音圧（6 方向の音圧信号の加算）から求めたエコーダイアグラム、音響インテンシティベクトル（式 (4.2.1-9) ~ (4.2.1-11) に従って計算した粒子速度成分と音圧の積）を求め、それらの結果と 6 チャンネル化したシミュレーションの計算結果を比較した。

対象地域および検討の概要

対象地域は 3.4.2 節の比較検討において対象とした習志野市湾岸地区で、この検討では図 4.2.3-1 に示すように、新たに M1~3 の 3 つの受音点を設定した。M1 からは LS1 のスピーカシステムが、M2 からは LS2~ LS4 が、M3 からは LS1~3 が目視できる。シミュレーションによる計算は前章と同様の方法によって行った。クロススペクトル法の現場測定では、習志野市が 16:45 に放送している子どもの帰宅を促す女声アナウンス (3.4.1 節参照) を各受音点で 6-ch. Mic.を通してマルチチャンネルデジタルデータレコーダに録音した。また、各受音点における絶対音圧を監視するために、騒音計の無指向性マイクロホンを通した録音も同時に行った。

本研究におけるシミュレーションの計算では、温度 20 °C、相対湿度 50 %の標準的な条件で空気の音響吸収減衰を計算しており、気象の影響は考慮していない。そこで現場測定は各受音点ごとに約 10 日間ずつ、計 3 回に分けて実施した。その結果のうち、本研究では気象庁が掲載する局所気象統計情報[48]を参考に風が穏やかで温度 20°C、相対湿度 50%に近い気象条件下で測定されたある 1 日のデータを分析に用いた。なお本検討では、受音点から最も近いスピーカシステムの方向に図 4.1.1-1 (a) に示した 6-ch. Mic.の $x+$ 方向を向けた。

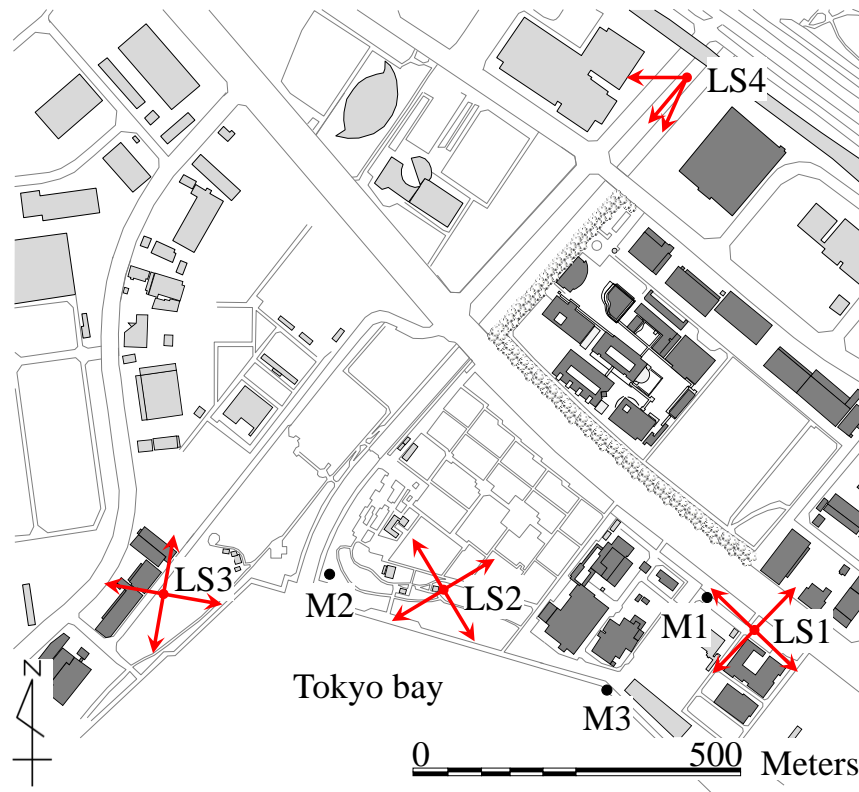
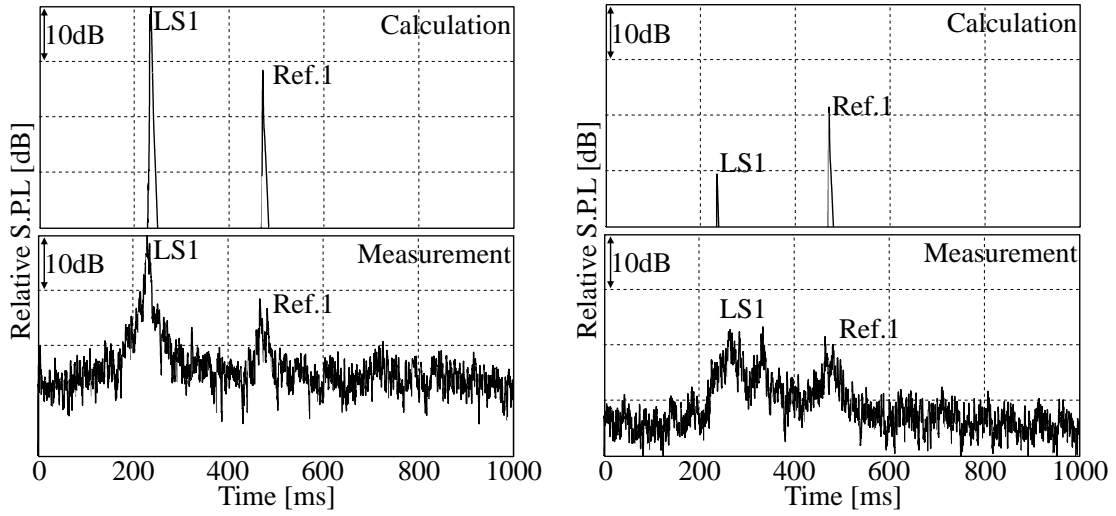


図 4.2.3-1 音源のスピーカシステムと受音点の位置

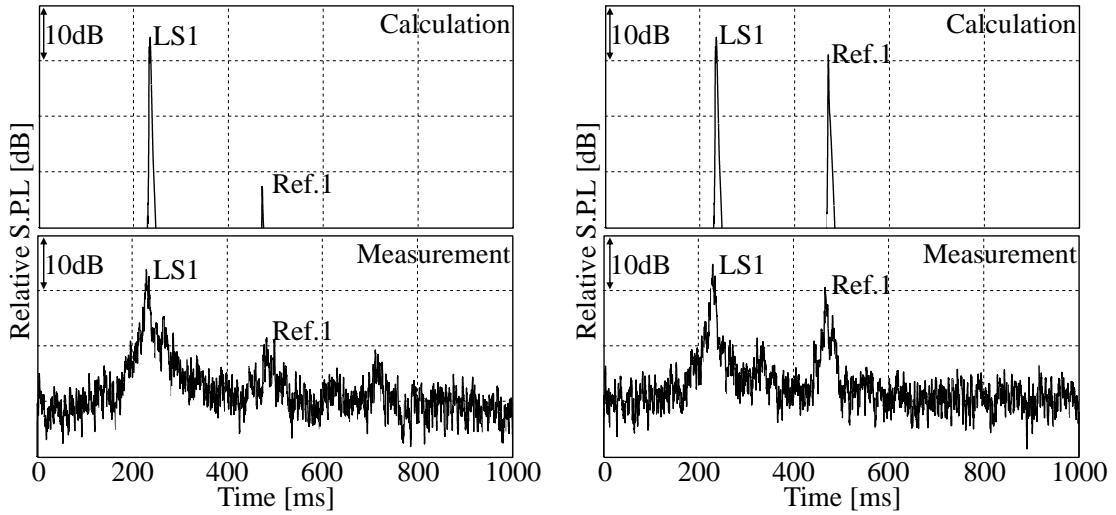
方向別インパルス応答のエコーダイアグラムの結果と考察

受音点 M1～M3 において、6 チャンネル化したシミュレーションと 6-ch. Mic. を用いた現場測定によって得られた方向別インパルス応答の中から、水平面内の 4 チャンネルのエコーダイアグラムを図 4.2.3-2 (M1)、4.2.3-3 (M2)、4.2.3-4 (M3) に示す。縦軸は、スピーカシステムとの距離が最も近い受音点 M1 における $x+$ 方向のマイクロホンの音圧を最大として設定した相対音圧レベルを意味する。各受音点においてシミュレーションと現場測定によって得られたそれぞれのマイクロホンの波形を比較すると、3 つの受音点のすべてにわたってマイクロホンの方向ごとに変化する波形の特徴が非常によく対応している。



(a) $x+$ 方向のマイクロホンの波形

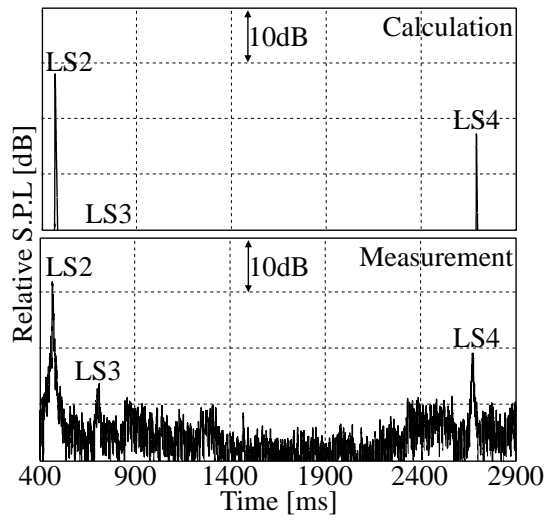
(b) $x-$ 方向のマイクロホンの波形



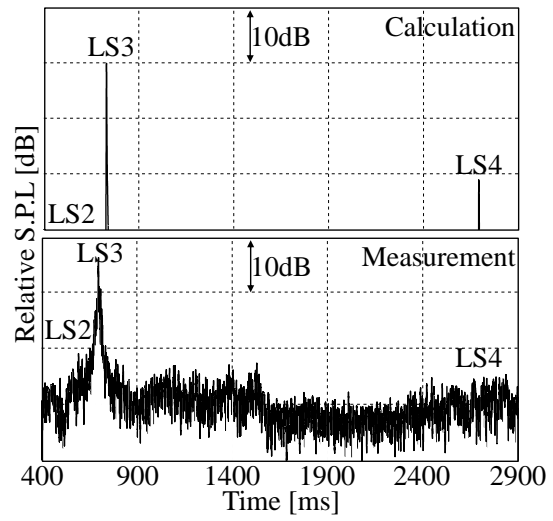
(c) $y+$ 方向のマイクロホンの波形

(b) $y-$ 方向のマイクロホンの波形

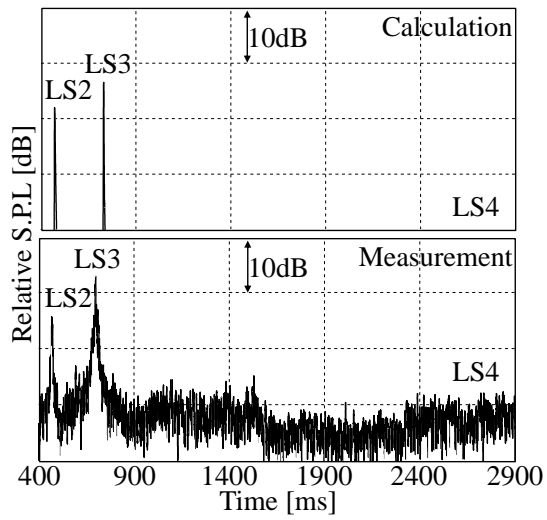
図 4.2.3-2 受音点 M1 における水平面内のエコーダイアグラム



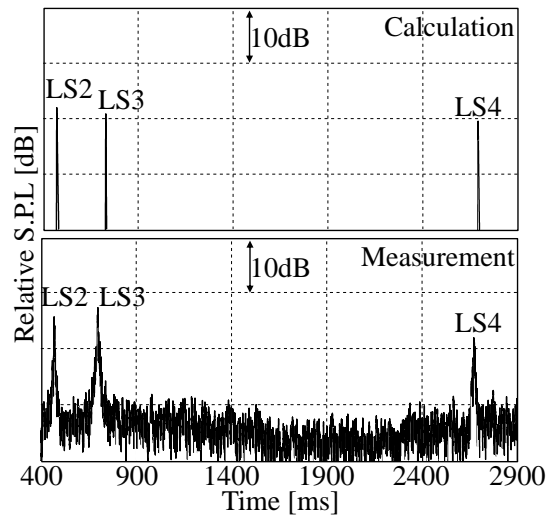
(a) $x+$ 方向のマイクロホンの波形



(b) $x-$ 方向のマイクロホンの波形

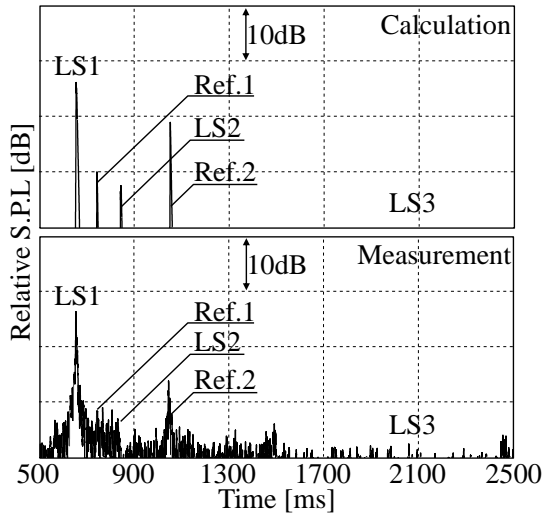


(c) $y+$ 方向のマイクロホンの波形

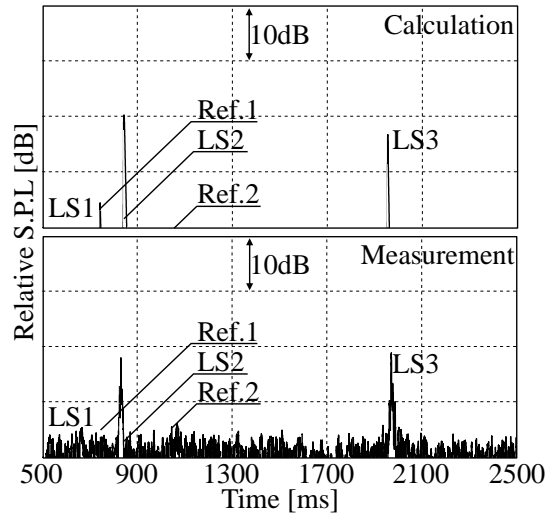


(d) $y-$ 方向のマイクロホンの波形

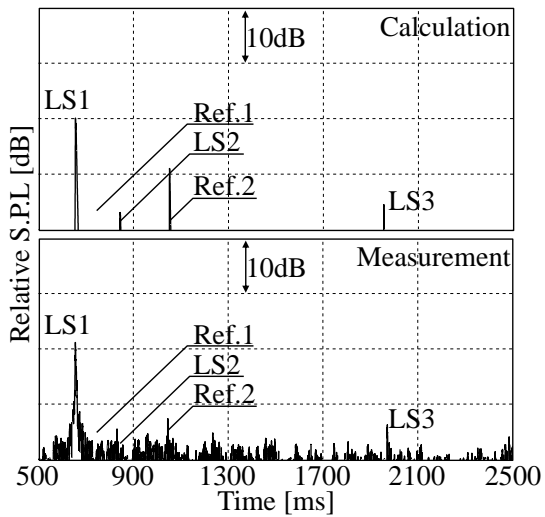
図 4.2.3-3 受音点 M2 における水平面内のエコーダイアグラム



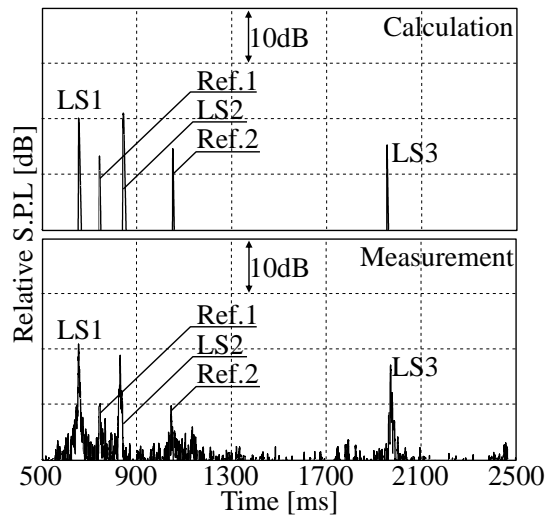
(a) $x+$ 方向のマイクロホンの波形



(b) $x-$ 方向のマイクロホンの波形



(c) $y+$ 方向のマイクロホンの波形



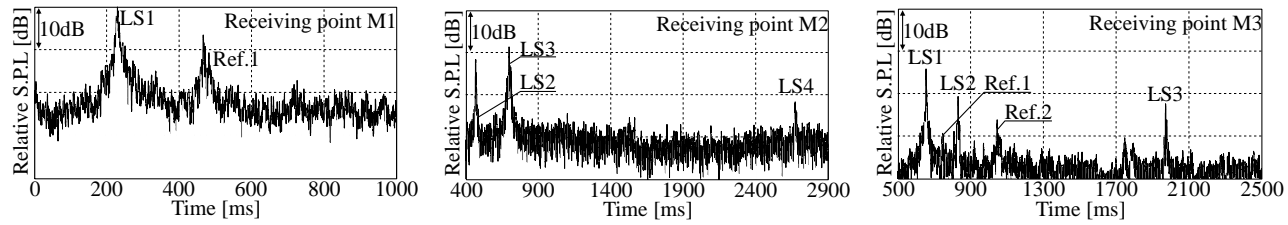
(d) $y-$ 方向のマイクロホンの波形

図 4.2.3-4 受音点 M3 における水平面内のエコーダイアグラム

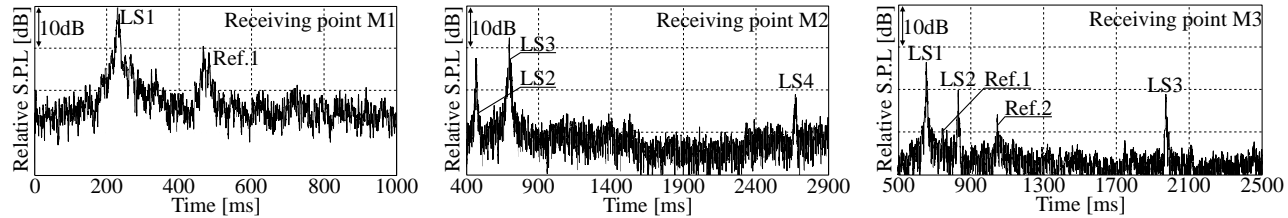
方向別インパルス応答を加算した結果と考察

騒音計のマイクロホンを通して得られた無指向性收音のエコーダイアグラムを図 4.2.3-5 (a) に、6-ch. Mic.を通して測定された音圧信号を式 (4.2.1-8) に従って加算し、その加算した信号を基にエコーダイアグラムを求めた結果を図 4.2.3-5 (b) に示す。二つの方法によって得られた波形は、3つの受信点すべてにわたってきわめてよく一致しており、6チャンネル方式の收音原理では、システムの中心における音圧は音の入射方向に関係なく、入射音の音圧に比例していることがわかる。

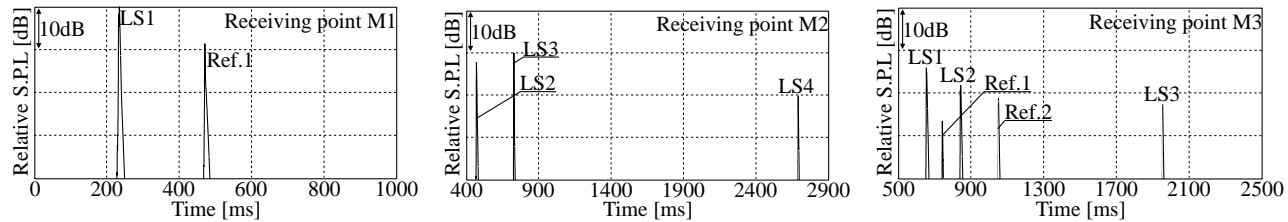
幾何音響シミュレーションによって計算された無指向性收音のインパルス応答のエコーダイアグラムを図 4.2.3-5 (c) に示す。この結果を上述の測定結果と比較すると、すべての受信点で、卓越したパルスの相対的な音圧と遅れ時間がかなりよく一致している。



(a) 騒音計の無指向性マイクロオンを通して測定した結果



(b) 式(4.2.1-8)に従って6-ch. Mic.を通して測定した方向別の音圧信号を加算した結果



(c) 幾何音響シミュレーションによって計算した無指向性收音の結果

図 4.2.3-5 クロススペクトル法の現場測定と幾何音響シミュレーションによって得られたエコーダイアグラム

水平面内における音響インテンシティベクトルのレーダーチャートの計算方法

6-ch. Mic.を通して得られた結果から音響インテンシティベクトルを計算する方法は、太田らが詳細に研究しており [46, 47]、本研究ではその方法を応用した。分析では、図 4.2.3-2～4.2.3-4 で示した 6 チャンネル化したシミュレーションと現場測定の水平面内における 4 チャンネルのデータを用いて音響インテンシティベクトルを計算し、それらの結果からレーダーチャートを求めた。以下に水平面内 (x - y 平面) のレーダーチャートの計算方法を述べる。

単位面積 1m^2 の仮想断面を考え、その面内に音圧 $p(t)$ が作用した結果、その面が粒子速度 $u(t)$ 、で運動したとすれば、微小時間 dt の間に力 $p \times 1$ がなすエネルギー (瞬時音響インテンシティ) は、

$$dE = p(t) \cdot u(t) dt \quad (4.2.3-1)$$

であるから、その時間平均をとって音の強さ (I) とすると次式となる。

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) \cdot u(t) dt = \overline{p(t) \cdot u(t)} \quad (4.2.3-2)$$

6-ch. Mic. の水平面内のシステムを考える場合、式 (4.2.3-1) の $p(t)$ は、前述した式 (4.2.1-8) の x 、 y 軸上の 4 つのマイクロホンで観測された音圧の総和として求めることができ、以下となる。

$$p = p_{x+} + p_{x-} + p_{y+} + p_{y-} = 2p_0 \quad (4.2.3-3)$$

また、式 (4.2.3-1) の $u(t)$ は、前述した式 (4.2.1-9) と式 (4.2.1-10) から $u_x(t)$ 、 $u_y(t)$ として求めることができる。したがって、求めるべき音響インテンシティは最終的に以下となる。

$$I_x = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) \cdot u_x(t) dt = \overline{p(t) \cdot u_x(t)} \quad (4.2.3-4)$$

$$I_y = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) \cdot u_y(t) dt = \overline{p(t) \cdot u_y(t)} \quad (4.2.3-5)$$

太田らの文献によれば、レーダーチャートを見やすくするためには、上述した式の平均化時間 T の設定が重要で、この目安としては、対象とする周波数の $1/10 \sim 1/20$ 程度の波長と対応する時間幅に設定すべきであると述べられている。本研究における結果の分析は、中心周波数 500 Hz、1 kHz、2 kHz の 3 つの 1 octave

band を合わせた帯域に限定しているため、この平均化時間としては $T=5$ msec. (3.4 kHz 程度) とした。

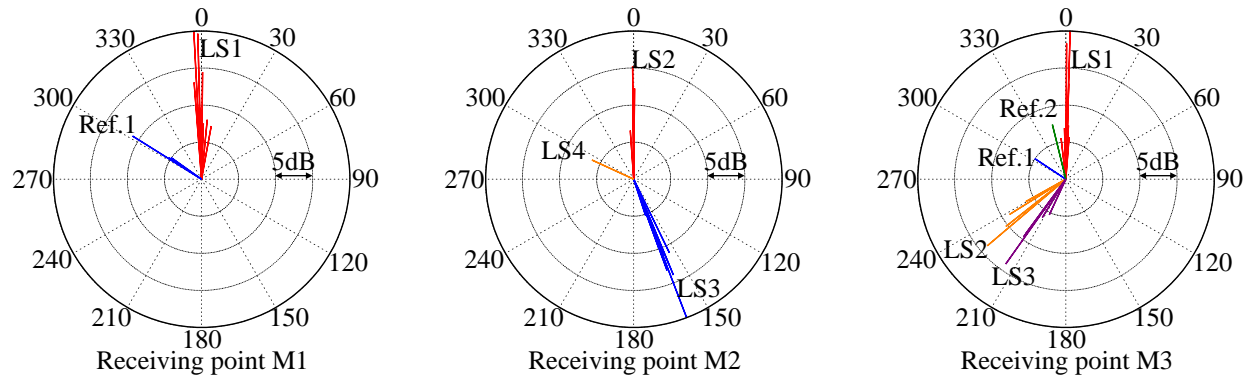
水平面内の音の到来方向 θ とその大きさ I_{xy} は、上述した x 、 y 軸上の平均化音響インテンシティ I_x 、 I_y から以下で求めることができる。

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{I_y}{I_x}\right) \quad (4.2.3-6)$$

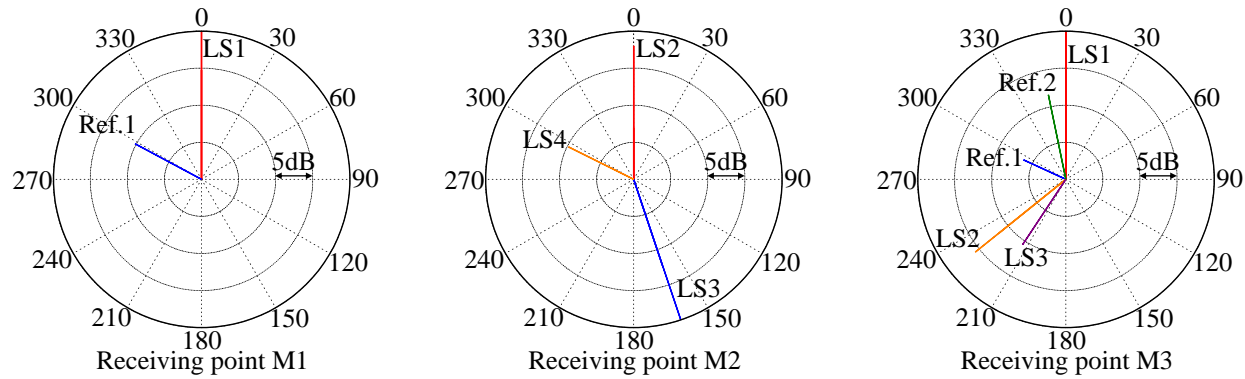
$$|I_{xy}| = \sqrt{I_x^2 + I_y^2} \quad (4.2.3-7)$$

音響インテンシティベクトルのレーダーチャートの結果と考察

6-ch. Mic.を通して測定したデータから計算した音響インテンシティベクトルの水平面内のレーダーチャートを図 4.2.3-6 (a)、6 チャンネル化したシミュレーションの計算結果を図 4.2.3-6 (b) に示す。これらの結果を比較すると、3つの受音点のすべてにわたって、受音点から最も近いスピーカシステムからの直接音（各図の 0° 方向）とそれに続く離散的な音（他のスピーカからの直接音と卓越した反射音）の到来方向と相互の相対的な音の強さの関係がきわめてよく一致している。



(a) 6-ch. Mic.を通して測定したデータから計算した結果



(b) 6チャンネル化したシミュレーションの方向別インパルス応答から計算した結果

図 4.2.3-6 水平面における音響インテンシティベクトルのレーダーチャート

4.3 可聴型シミュレーションシステムの有効性に関する検討

本章では、6チャンネル化したシミュレーションによって計算した音場を6チャンネル再生システムを通して実験室内に再現する可聴型シミュレーションシステムの有効性を調べるために、以下に述べる2段階の聴感実験を行った。

一つ目は基礎的実験として、直接音に続いて時間遅れを持った単独の反射音が到来する最も単純な条件における反射音の方向定位性について、本シミュレーションシステムによる実験を行った。

二つ目は、6-ch. Mic.を通して実際に録音したアナウンスと本シミュレーションシステムで合成したアナウンスの聞き取りにくさに関する比較実験を行った。

4.3.1 音像の定位性

検討の概要

幾何音響シミュレーションによって計算した条件を図4.3.1-1に示す。この計算では、反射面から100m離れた点を中心とする直径80mの水平の円周上に仮想的な音源と受音点を配置し、それらの相対的位置関係を保ったまま回転させ、受音点に入射する直接音の経路と反射音の経路が成す角を 0° ～ 330° の範囲で 30° ごとに変化させた。これら12条件について式(4.2.1-2)～(4.2.1-7)に従って6チャンネルのインパルス応答を計算した。これらのインパルス応答にたたみ込むためのドライソースとしては、実際に広域防災放送システムからのアナウンスを聞いている状況を想定するために、避難誘導を伝える女声アナウンス(継続時間:約20s、モーラ数:約3.55モーラ/s)を音声合成ソフト“Voice Text Japanese Editor”を用いて作成した。

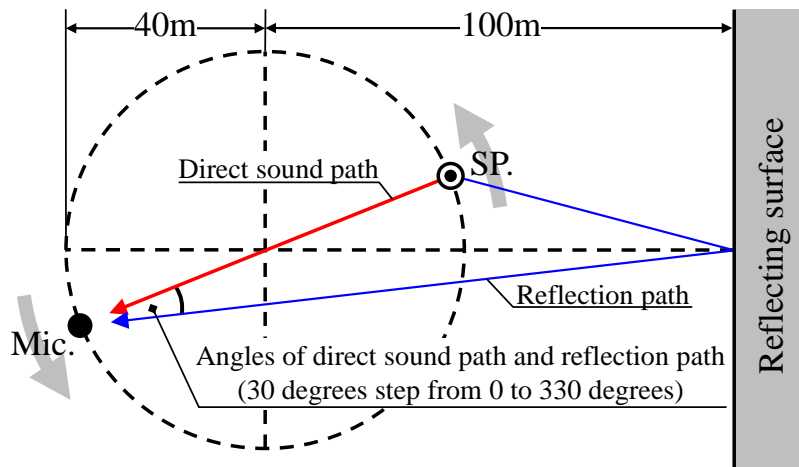


図 4.3.1-1 音源、受音点、反射面の位置

図 4.3.1-2 に実験風景のイメージ図を示す。聴感実験では、直接音が到来する方向を固定し、その方向に正対するように被験者を座らせ、室内に 30°刻みに貼られた A~L のパネルを目印に、直接音に続いて到来する反射音の方向をパネルの中から判断させた。被験者は本学の学生 11 名で、それぞれの試験音は各被験者に対してランダムな順序で 2 回呈示した。判断の間、反射音の方向を検出させるために、被験者には頭部を回してもよいと指示した。

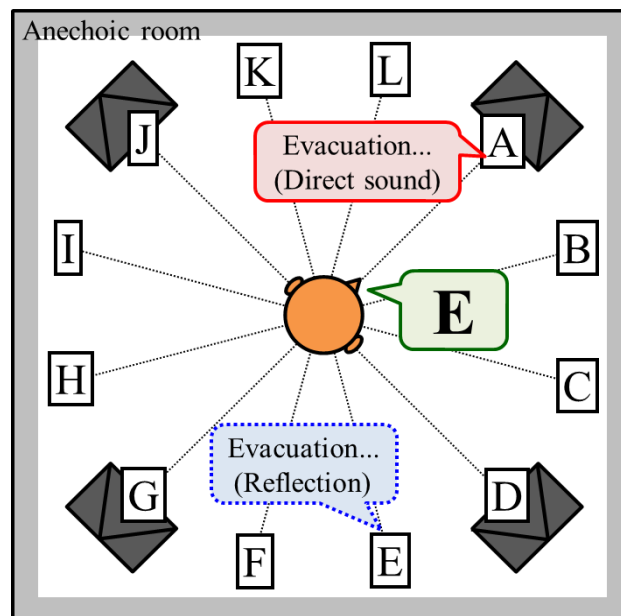


図 4.3.1-2 実験風景のイメージ図

実験結果と考察

すべての被験者の回答を集計した実験結果を図 4.3.1-3 に示す。横軸はシミュレートした反射音の角度、縦軸は被験者が判断した角度で、円の径が回答数に比例している。

この結果では、誤判定がほとんどなく、ほぼすべての円が 45°線上にプロットされており、被験者は本可聴型シミュレーションシステムによって再現した音場における反射音の到来方向をきわめて正確に判断していることが分かる。

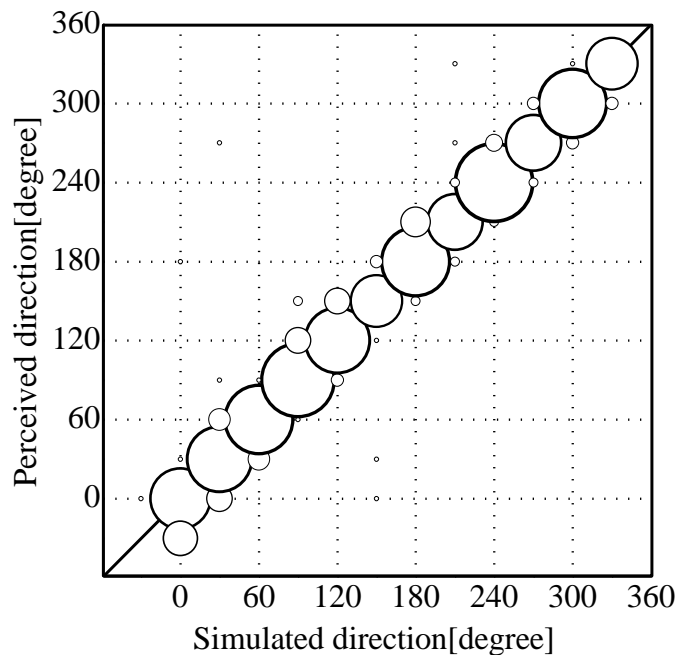


図 4.3.1-3 方向定位実験結果

4.3.2 聞き取りにくさの主観評価

主観評価実験の概要

この主観評価実験では、4.2.3 節で述べた物理データの精度に関する検討で設定した 3 つの受信点における広域防災放送アナウンスを対象とした。試験音としては、実際に 6-ch. Mic.を通して 3 つの受信点で録音したアナウンスと、本シミュレーションシステムによって合成したアナウンスを用いた。後者としては、前述の方法で方向別インパルス応答を計算し、それらの信号に広帯域無線受信機によってモニターしたアナウンスのドライソースをたたみ込むことによって 6 チャンネル信号を合成した。物理データの精度に関する 4.2.3 節の図 4.2.3-5

に示したように、今回設定した3つの受音点で実際に録音したアナウンス信号からは、スピーカシステムからの直接音や主要な建物からの反射音が現場の暗騒音に埋もれることなく検出されていた。そこでこの検討では、シミュレーションによる合成音には暗騒音を付加しなかった。

実際に録音したアナウンス、合成したアナウンスともに、実音場における音圧レベルと等しくなるように再生システムの受聴位置における音量を調節した。このような再生の条件で、被験者には表4.3.2-1に示す6段階のカテゴリの中からそれぞれのアナウンスの聞き取りにくさを判断された。実験では、各試験音はランダムな順序で2回呈示し、この実験でも被験者には試験音を聞いている間、頭部を回してもよいと指示した。被験者は9名の学生である。なお、実際に録音したアナウンスを試験音とした実験と合成したアナウンスを試験音とした実験は、十分な時間をあけて別々に行った。

表 4.3.2-1 聞き取りにくさに関する6段階のカテゴリ

6段階のカテゴリ	
6	まったく聞き取れない
5	非常に聞き取りにくい
4	だいぶ聞き取りにくい
3	多少聞き取りにくい
2	それほど聞き取りにくくない
1	まったく聞き取りにくくない

実験結果と考察

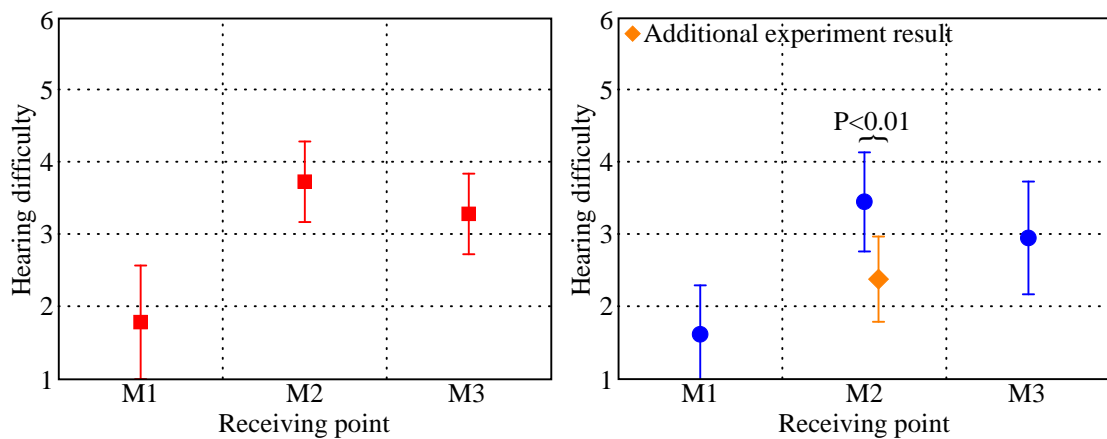
実際に録音したアナウンスを試験音とした実験結果を図4.3.2-1(a)に、合成したアナウンスを試験音とした実験結果を図4.3.2-1(b)に示す。これらの聴感実験は評定尺度によって行ったが、実験結果はFieldsらによる文献[49]に従って等間隔性を仮定して整理した。これらの結果で、横軸は受音点、縦軸のプロットはすべての被験者によって判断された聞き取りにくさに関するスコアの算術平均値、バーは標準偏差を示す。

二つの結果を比較すると、M1の試験音よりもM2の試験音は聞き取りにくく、M2よりもM3は若干聞き取りやすいという受音点の違いによる聞き取りにくさ

に関するスコアの平均値の違いがよく似た結果となっている。

マルチパスエコーに関する一検討

以上の実験の中で、“最も聞き取りにくいと感じた試験音（受音点 M2）では、遅れて到来する音（図 4.2.3-5 の直接音から 2.2 s の遅れ時間を持つ LS4 のスピーカシステムからの音）によってアナウンスが聞き取りにくくなっている”との内観報告が数名の被験者からあった。そこで、合成した試験音から対象となる音を除去し、追加実験を行った。その実験結果を図 4.3.2-1 (b) に◆印で示すが、元の条件に比べて聞き取りにくさのスコアが 1 段階下がっており、Tukey 検定を行った結果、これらの平均値の間には $p < 0.01$ の優位な差が認められた。



(a) 実際に録音したアナウンスを
試験音とした結果

(b) 合成したアナウンスを
試験音とした結果

図 4.3.2-1 広域防災放送アナウンスの聞き取りにくさに関する実験結果

4.4 まとめ

考案した可聴型シミュレーションシステムについて、前章では広域防災放送システムの屋外音響伝搬を把握する幾何音響シミュレーションの手法を述べた。本章では、そのシミュレーションによって計算した音場を実験室内に再現する手法の概要、その音場再現手法と幾何音響シミュレーションを組み合わせる方法、その組み合わせた手法の精度を確かめるための物理的な検討の詳細、さらには組み合わせた手法の可聴型シミュレーションシステムとしての有効性を検討するために行ったいくつかの聴感実験の詳細を述べた。

広域防災放送システムの明瞭性低下を引き起こすマルチパスエコーは、受音点に到来する方向も様々で、このようなシステムの明瞭性に関する聴感実験では、音の3次元的な空間情報も再現できる手法を利用する必要がある。また、そのような実験や音響設計を行った効果は、原則として不特定多数の人を被験者とすべきである。この目的に対して本研究では、可聴型シミュレーションシステムの音場再現手法として、マルチチャンネル方式の一つである比較的簡便な6チャンネル收音・再生手法を応用した。

6-ch. Mic.を用いて実音場で録音した音を実験室に再現する場合は、単に收音した音圧信号をチャンネル別に6台のスピーカから再生すればよいが、シミュレーションの音場再現では、6チャンネル信号を合成する必要があった。その方法としては、幾何音響シミュレーションによって得られた各インパルスの入射方向情報を基に6-ch. Mic.を構成するマイクロホンのカーディオイド型単一指向特性の指向係数を計算し、その係数を相対的な音圧に重みづけることによって6方向に振り分ける新たな方法を適用した。

6チャンネル化したシミュレーションの精度を確かめるための物理的な検討では、広域防災放送システムが整備されている地域における6-ch. Mic.を用いた現場測定とシミュレーションによる計算を行い、それらのデータから求めた水平面内の4チャンネルのエコーダイアグラム、システムを中心における音圧(6方向すべての音圧信号の加算)、音響インテンシティベクトルの対応を調べた。その結果、複数のスピーカシステムからの直接音や卓越した反

第4章 可聴型シミュレーションシステム

射音については、音圧振幅と遅れ時間に加えて、音の到来方向もきわめて高い精度で予測できることが確かめられた。

6 チャンネル化したシミュレーションの可聴型シミュレーションシステムとしての有効性を検討するために、2段階の聴感実験を行った。

一つ目は基礎的実験として、直接音に続いて時間遅れを持った単独の反射音が到来する最も単純な条件における反射音の方向定位性について、本シミュレーションシステムによる実験を行った。その結果、誤判定はほとんどなく、被験者は本可聴型シミュレーションシステムによって再現した音場における反射音の到来方向をきわめて正確に判断していることが分かった。

二つ目の聴感実験は、6-ch. Mic.を通して実際に録音したアナウンスと本可聴型シミュレーションシステムで合成したアナウンスの聞き取りにくさに関する比較実験を行った。その結果、受音点の違いによる聞き取りにくさに関するスコアの平均値の違いがよく似た結果が得られていた。

上述した物理的な検討と二つの聴感実験の結果から、広域防災放送システムの音響伝搬の予測と実験室における音場再現に対する本可聴型シミュレーションシステムの精度とその有効性が確かめられた。

第 5 章 広域防災放送システムの音響設計に関する試み

5 広域防災放送システムの音響設計に関する試み

前章までは、広域防災放送システムの音響設計やその設計指針を検討するための聴感実験を行う手法として、考案した可聴型シミュレーションシステム（幾何音響シミュレーションによって計算した音場を6チャンネル再生システムを通して実験室内に3次元的に再現するシステム）に関する種々の検討を行い、その精度と有効性を確かめた。そこで、実際に広域防災放送システムの音響設計に対する本シミュレーションシステムの有効性を調べるために、本章では既存の広域防災放送システムを対象とした音響設計に関するケーススタディを行った。

5.1 明瞭性改善のケーススタディ

ケーススタディの概要

対象地域の地図に音源のスピーカシステムと受信点の位置を記して図5.1-1に示す。このケーススタディは、これまで二度対象とした4つのスピーカシステムが設置されている習志野市湾岸地区において行った。その音響設計では、可能な限り既存のシステムを活かすこととし、スピーカシステムの位置は変更せずに、スピーカシステムを構成するホーン型スピーカの数とその方向を考慮することによってアナウンスの聞き取りにくさが改善できる可能性に着目した。

この地域に設置されている既存のスピーカシステムは、複数台のホーン型スピーカで構成されており、LS1～LS3は4台のスピーカを直交に組み合わせた無指向性とまでは言えないまでも全方向性、LS4はそのスピーカシステムの近隣に在来線の高架橋があるため、3台のスピーカを主に海岸方向に向けた方向性としている。

図5.1-2に改善案のスピーカシステムの向きや構成を記した地図を示す。上述の既存の条件に対して改善案では、一つのスピーカシステムを構成するホーン型スピーカの数を二台とし、それらの成す角を90°にすることである程度の方向性を持たせた。この場合、既存の条件に対して一つのスピーカシステムでカバーできるエリアは狭まるが、複数のスピーカシステムからの直

第5章 広域防災放送システムの音響設計に関する試み

接音が重畳するエリアでは、その影響をある程度回避することができ、さらに、建物の方向にスピーカシステムの指向性の主軸を向けないことで反射音の影響を低減できる可能性がある。図 5.1-3 に既存の全方向性を持たせたスピーカシステムに対する方向性のスピーカシステムのイメージ図を示す。検討では、二つのスピーカの間を中心軸を LS1～LS3 は海岸線に沿った西北西方向に、LS4 はスピーカシステムの近隣の駅がある北西方向に向け、その改善効果を地域内に分散的に配置した9つの受音点（M1～M9）で調べた。

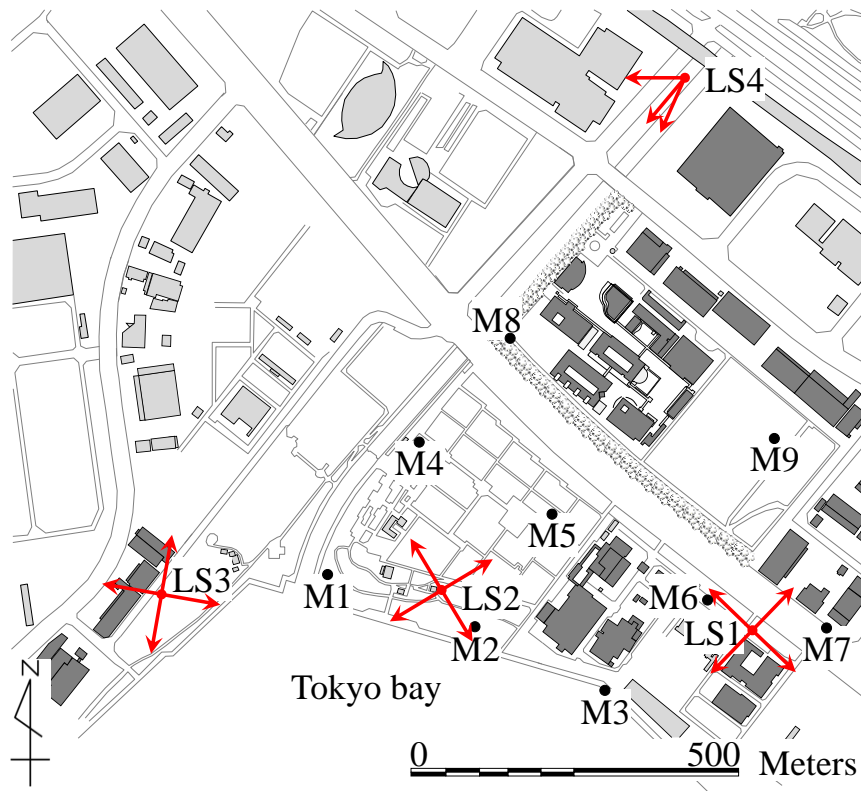


図 5.1-1 既存のスピーカシステムの位置とシステムを構成するホーン型スピーカの数とその向き

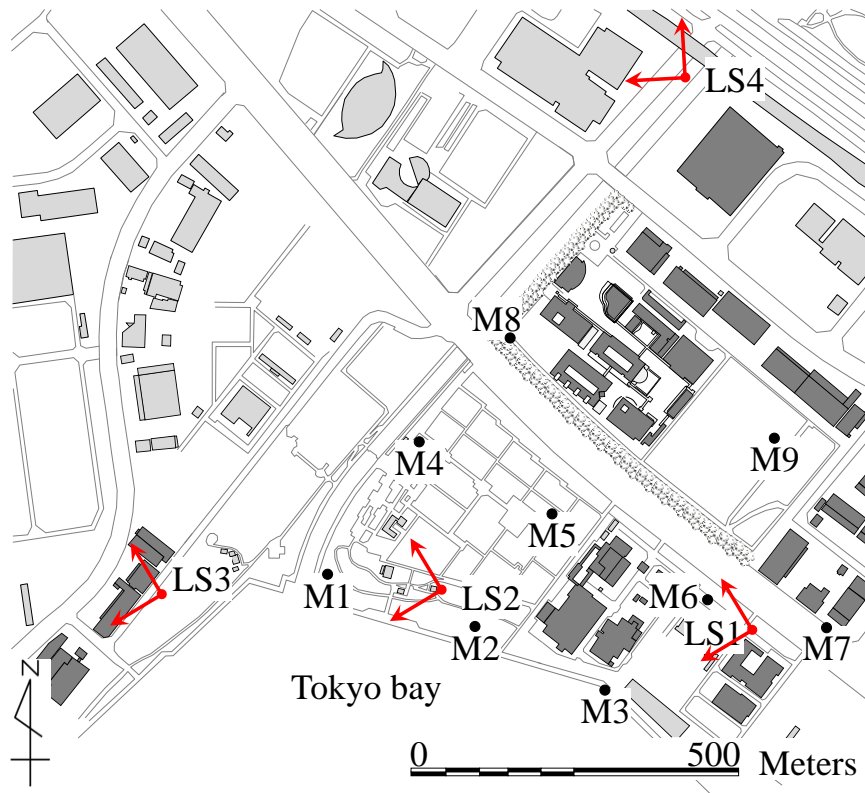


図 5.1-2 改善案のスピーカシステムの位置とシステムを構成するホーン型スピーカの数とその向き



(a) 全方向性

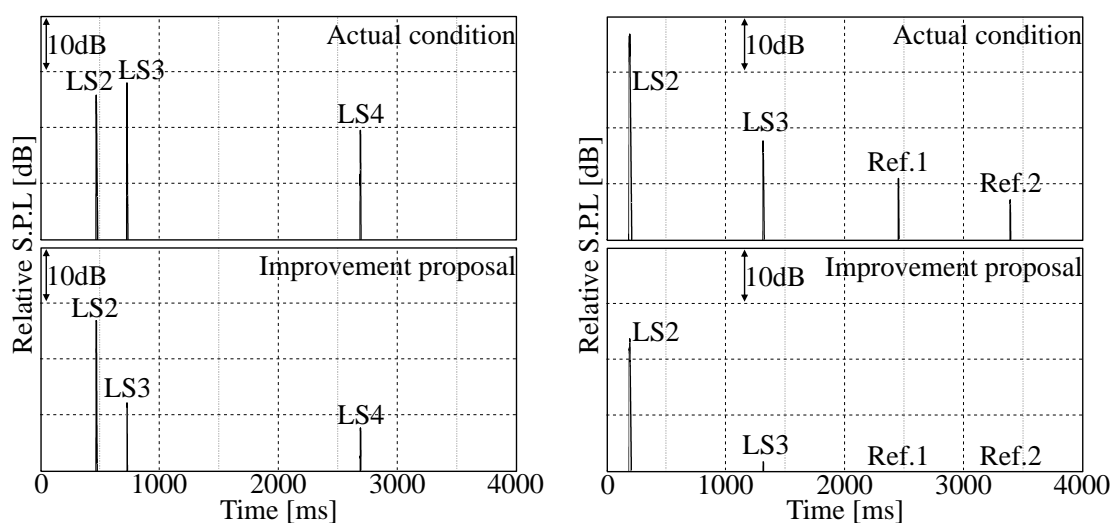


(b) 方向性

図 5.1-3 全方向性のスピーカシステムに対する改善案の方向性スピーカシステムのイメージ

無指向性のインパルス応答の計算結果と考察

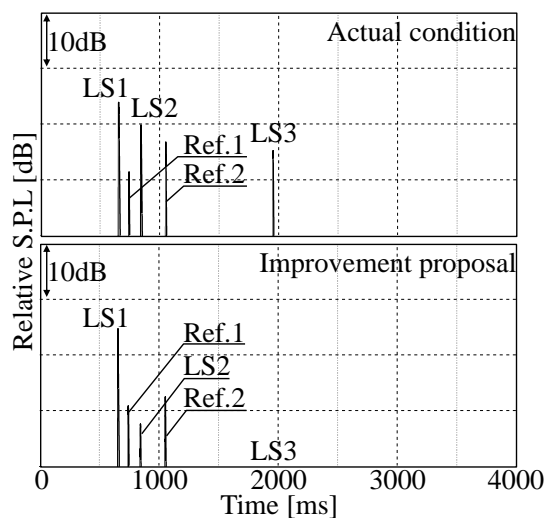
9 つの受信点において得られた二つの条件のエコーダイアグラムを図 5.1-4 に示す。上段が既存の条件の結果、下段が改善案の結果で、縦軸はスピーカシステムから最も近い受信点 M6 の既存の条件における音圧を最大として設定した相対音圧レベルである。各受信点における対策前後の波形を比較すると、受信点から最も近いスピーカシステムより西側に位置する受信点 M1、M3、M4、M6、M9 などの点では、最初に到来する音のエネルギーがあまり変化していないのに対して、それ以外の音（他のエリアをカバーするスピーカシステムからの直接音や主要な建物からの反射音）のエネルギーがかなり低減している。一方、受信点から最も近いスピーカシステムより東側に位置する受信点 M2、M5、M7、M8 などの点では、最初に到来する音のエネルギー、それ以外の音のエネルギーともに低減している。



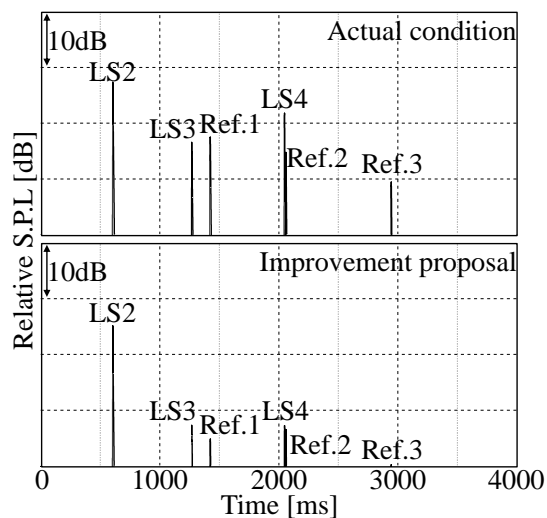
(a) 受信点 M1

(b) 受信点 M2

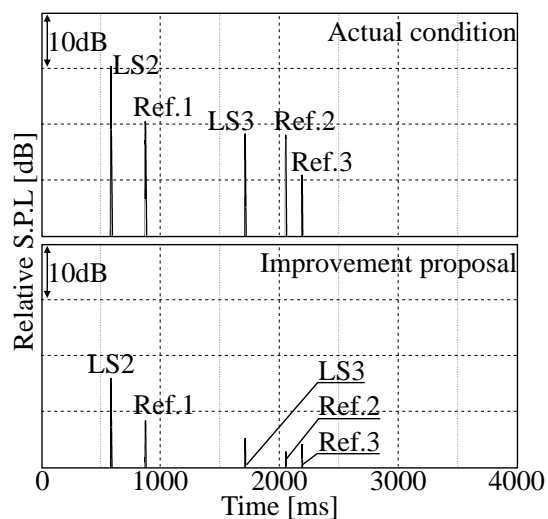
図 5.1-4 既存の条件と改善案のエコーダイアグラム



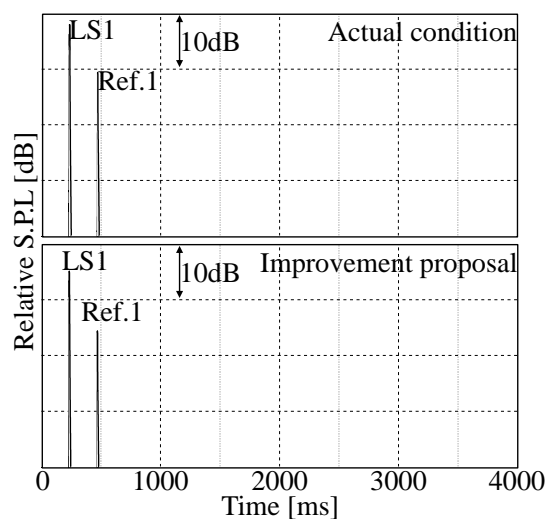
(c) 受信点 M3



(d) 受信点 M4

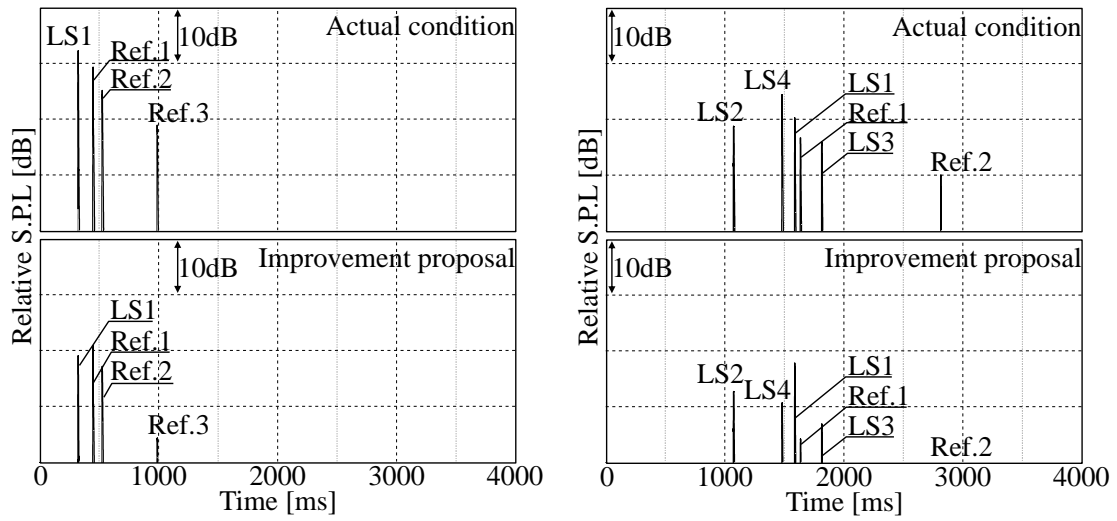


(e) 受信点 M5



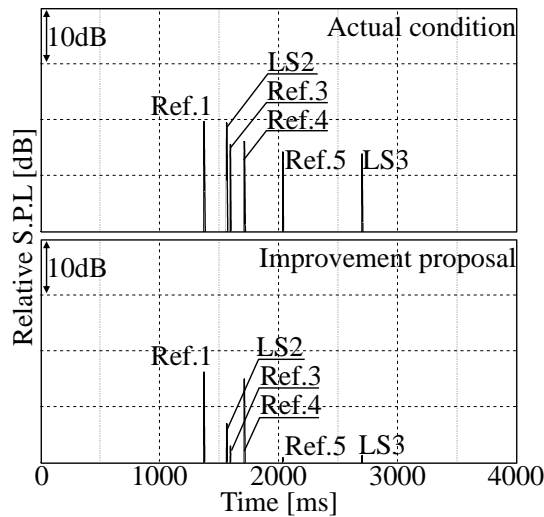
(f) 受信点 M6

図 5.1-4 既存の条件と改善案のエコーダイアグラム



(g) 受信点 M7

(h) 受信点 M8



(i) 受信点 M9

図 5.1-4 既存の条件と改善案のエコーダイアグラム

主観評価実験

改善案による効果を聴感判断によっても確かめるために、9つの受信点において得られた無指向性のインパルス応答から前章の方法によって6チャンネルの方向別インパルス応答を計算し、それらの信号を基に合成したアナウンスの試験音を用いて聞き取りにくさに関する主観評価実験を行った。方向別インパルス応答にたたま込むためのドライソースとしては、音声合成ソフ

ト “Voice text Japanese editor” を使用して震災の発生を伝える男声アナウンス信号（継続時間：約 19.3 s、モーラ数：3.06 モーラ/s）を作成した。

被験者には、既存の条件と改善案の試験音をランダムな順序で 2 回呈示し、そのアナウンスの聞き取りにくさを前章で行った聴感実験と同様に 6 段階のカテゴリ（表 4.3.2-1）の中から判断させた。被験者は 11 名の学生である。

聴感実験の結果

実験結果を図 5.1-5 に示す。青が既存の条件の試験音を用いた結果、赤が改善案の試験音を用いた結果である。二つの結果を比較すると、受音点 M1、M3、M4、M9 などの点では、聞き取りにくさのスコアの平均値が約 1 段階改善しており、Tukey 検定を行った結果、これらの平均値の間には $p < 0.01$ の優位な差が認められた。他の受音点の結果としては、既存の条件と同程度で、聞き取りにくさのスコアが顕著に低下する点は見られない。

各受音点におけるエコーダイアグラムと聴感実験の結果から、スピーカシステムを構成するスピーカの数とその方向を考慮することによってアナウンスの明瞭性をある程度改善できる可能性が示唆された。このように本可聴型シミュレーションシステムは、広域防災放送システムの音響設計やその設計指針を検討するための聴感実験に対して有効的に利用できることが確かめられた。

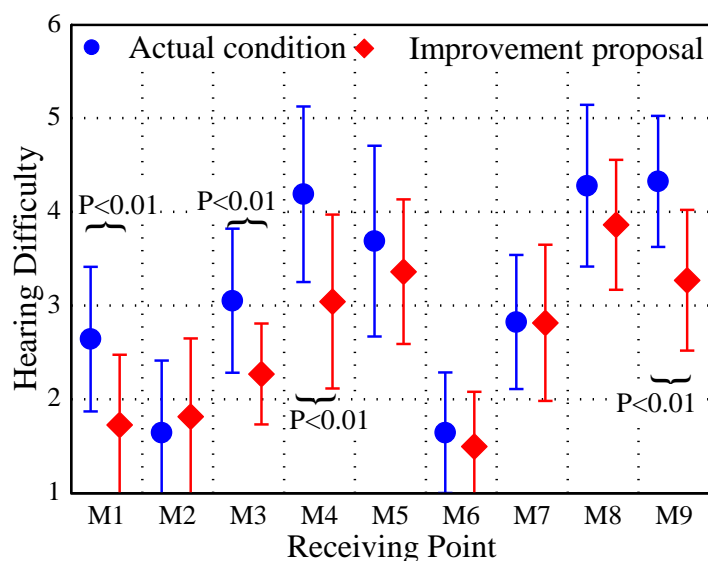


図 5.1-5 主観評価実験結果

5.2 まとめ

本論文では、広域防災放送システムの音響設計や設計指針を検討するための聴感実験を行う手法として、幾何音響シミュレーションによって計算した音場を実験室内に3次元的に再現する可聴型シミュレーションシステムを提案し、これまでの章では、そのシステムの精度と有効性を確かめた。そこで、実際に広域防災放送システムの音響設計に対する本可聴型シミュレーションシステムの有効性を調べるために、本章では既存の広域防災放送システムを対象とした音響設計に関するケーススタディを行った。その音響設計では、スピーカシステムを構成するホーン型スピーカの数とその方向を考慮することによってアナウンスの聞き取りにくさが改善できる可能性に着目した。

検討では、地域内の複数箇所に分散的に配置した複数の受音点におけるインパルス応答を前章までのシミュレーションの手法によって計算し、対策前後の無指向性のインパルス応答の比較、さらには方向別インパルス応答を基に合成したアナウンスの試験音を用いた聞き取りにくさに関する聴感実験による比較を行った。結果として、約半数の受音点のインパルス応答では、最初に到来する音のエネルギーに対してそれ以外の音のエネルギーが低減しており、それらの点における聴感印象は、既存の条件における聞き取りにくさのスコアの平均値に比べ、改善案の条件が約1段階改善していた。その他の受音点では、インパルス応答からは一見して改善効果を確認できなかったが、そのような点における聴感印象は、既存の条件と同程度で、聞き取りにくさのスコアが顕著に低下する点は見られなかった。これらの結果から、スピーカシステムを構成するホーン型スピーカの数とその方向を考慮することによってアナウンスの明瞭性をある程度改善できる可能性が示唆された。またこの結論とは別に、本可聴型シミュレーションシステムが広域防災放送システムの音響設計やその設計指針を検討するための聴感実験に対して有効的に利用できることも確かめられた。

第 6 章 総括

6 総括

本論文の総括

本論文では、広域防災放送システムの音響設計やその設計指針を検討するための聴感実験を行う手法として、コンピュータシミュレーションによって計算した音場を実験室内に 3 次元的に再現する可聴型シミュレーションシステムを考案し、その有効性を検討した。

地域における重要な音声情報伝達手段である広域防災放送システムでは、災害の状況や避難誘導などを伝えるアナウンスが地域内に配置された複数のスピーカシステムから一斉に放送されているが、この時に種々の音響的な要因の影響を受けている。その中で、複数のスピーカシステムからの直接音や建物からの卓越した反射音は長い遅れ時間を持ったマルチパスエコーとなり、アナウンスの明瞭性を低下させている。このシステムによる効果をいっそう高めるためには、スピーカシステムの指向性や配置計画に関する工夫、電気音響システムの性能向上、さらには音声合成技術（TTS）の利用などによって、アナウンスの明瞭性を確保する必要があるが、現在、この放送システムの設計は無線通信システムの一部として取り扱われているために、音響的な設計指針の検討が不十分となっている。

このような広域防災放送システムの音響設計や明瞭性に関する聴感評価を行う際には、音の方向情報も含めて可聴化できるシミュレーション手法が有効と考えられる。その一つの試みとして、本論文では幾何音響シミュレーションとマルチチャンネル音場再現手法を併用する方法を提案し、その基礎的な検討を行った。また、この方法の応用として、実際の広域防災放送システムを対象とした現場測定の結果とシミュレーションの結果の対応を調べた。その結果、複数のスピーカシステムからの直接音や主要な建物からの卓越した反射音については、音圧振幅、遅れ時間、音の到来方向などについてかなり高い精度で予測できることが確かめられた。これらの結果について、アナウンスの聞き取りにくさを 6 チャンネル再生による聴感実験によって調べた結果、実際に録音した音とシミュレーションによって合成した音の間によい

対応が見られた。さらに、この可聴型シミュレーションシステムを実際の広域防災放送システムを対象としたアナウンスの明瞭性改善に関するケーススタディに応用し、放送システムの音響設計やその効果を検討する聴感実験に対する有効性を確かめた。

本論文の概要

以下に本論文の概要を示す。

第1章では、広域防災放送システムの概要と可聴型シミュレーションシステムの必要性を述べた。

第2章では、広域防災放送システムに関する既発表の論文から、本論文と関連性のある研究を紹介した。

第3章では、広域防災放送システムの屋外音響伝搬をコンピュータシミュレーションによって把握する手法の概要、その精度を調査するための測定法の概要、およびそれらを用いたシミュレーションの利用可能性に関する基礎的な検討の詳細を述べた。まずコンピュータシミュレーションの手法としては、音響伝搬計算法の中でも最も単純な幾何音響シミュレーションに基づく虚像法を適用した。その具体的な方法としては、ひとまず市販のソフトウェアに含まれた手法を応用し、音場の媒質、スピーカシステムの指向性、建物などの空間情報、境界面における吸音率などを概括的にモデル化することでインパルス応答を計算した。このシミュレーションの精度を調査するための測定の方法としては、室内音響などの分野で広く利用されている **Swept-Sine** 法と、放送アナウンスの音源信号と観測信号から相互相関関数を周波数領域で計算するクロススペクトル法を応用した。つぎに、幾何音響シミュレーションの利用可能性を基礎的に調査するための検討としては、実際の広域防災放送システムを対象として上述の二つの手法による現場測定を行い、測定によって得られたエコーダイアグラムとコンピュータシミュレーションによって計算した結果を比較した。その結果、複数のスピーカシステムからの直接音や卓越した反射音については、音圧振幅、遅れ時間がかなり高い精度で予測できることが確かめられた。さらに、時間や日ごとに気象の条件が変化する屋外音場では、それに応じて測定結果も変化することが予想されたため、

数日間にわたって定点観測調査を行った。その結果、風が強い日にはスピーカシステムからの直接音や反射音が観測されない場合があるが、比較的風が穏やかであれば、安定した測定結果が得られることが確認できた。

第4章では、音場を実験室内に再現する手法の概要、シミュレーションと音場再現手法を組み合わせる方法、組み合わせた可聴型シミュレーションシステムを適用したいくつかの検討の詳細を述べた。まず本研究における音場再現手法としては、音の3次元的な空間情報も再現できるマルチチャンネル方式の一つである6チャンネル収音・再生手法を応用した。この手法の再生システムを利用するためには、シミュレーションによって計算した結果に基づいて6チャンネル信号を得る必要がある。その方法としては、幾何音響シミュレーションによって得られた各パルスの入射方向情報を基に6チャンネル収音システムを構成するマイクロホンのカーディオイド型単一指向特性の指向係数を計算し、その係数を方向別に無指向性収音の音圧に重みづけることによって6方向に振り分ける新たな方法を考案した。この手法を実際に適用して、広域防災放送システムが整備されている地域における6チャンネル収音システムを用いた現場測定とシミュレーションによる計算を行い、それらのデータから求めた水平面内の4チャンネルのエコーダイアグラム、システムにおける音圧(6方向すべての音圧信号の加算)、音響インテンシティベクトルの対応を調べた。その結果、複数のスピーカシステムからの直接音や卓越した反射音については、音圧振幅と遅れ時間に加えて音の到来方向もきわめて高い精度で予測できることが確かめられた。さらに、本学に設置されている6チャンネル再生システムを用いて二段階の聴感実験を行い、この手法の有効性を検討した。まず基礎的実験として、直接音に続いて時間遅れを持った単独の反射音が到来する最も単純な条件における反射音の方向定位性について実験を行った。その結果、被験者は本可聴型シミュレーションシステムによって再現された音場において、反射音の到来方向をきわめて正確に判断していることが分かった。二つ目の聴感実験としては、6チャンネル収音システムを通して実際に録音したアナウンスとシミュレーションで合成したアナウンスの聞き取りにくさに関する比較実験を行った。その結果、受音

点の違いによる聞き取りにくさに関するスコアの平均値の違いがよく似た結果が得られた。これらの検討結果から、広域防災放送システムの音響伝搬を実験室内に3次元的に再現する上で、本可聴型シミュレーションシステムが有効であることが確かめられた。

この可聴型シミュレーションシステムの広域防災放送システムの音響設計における有効性を調べるために、第5章では、実際の広域防災放送システムを対象とした音響設計に関するケーススタディの結果について述べた。その内容としては、スピーカシステムを構成するホーン型スピーカの数とその方向を考慮することによってアナウンスの聞き取りにくさが改善できる可能性を調べた。この検討では、音響設計による対策前後の無指向性のインパルス応答の比較、さらには方向別インパルス応答を基に合成したアナウンスの試験音を用いた聞き取りにくさに関する聴感実験を行った。その結果、設定した受音点における約半数の点で最初に到来する音のエネルギーに対してそれ以外のエネルギーが低減しており、それらの点における聴感実験の結果は、既存の条件における聞き取りにくさのスコアの平均値に比べ、改善案の条件が約1段階改善していた。この結果から、スピーカシステムを構成するホーン型スピーカの数とその方向を考慮することによってアナウンスの明瞭性をある程度改善できる可能性が示唆された。このことから、本論文で提案する可聴型シミュレーションシステムが広域防災放送システムの音響設計やその設計指針を検討するための聴感実験に対して有効的に利用できることが確かめられた。

今後の展望

本論文では、可聴型シミュレーションシステムの有効性を検討したが、適用した幾何音響シミュレーションや本手法による聴感実験についてはいくつかの課題が残された。

本研究で適用した幾何音響シミュレーションによる計算では、空間を均質な音場と仮定したが、実際の屋外空間は時間や日ごとに気象の条件が変化する時変性を持ち、数日間にわたって行った定点観測調査の結果からもその影響は無視できない重要な問題であることが確認された。したがって、今後さらにシミュレーションの精度を高めるために、気象の条件、地表面条件、回

折効果、拡散効果などを計算に考慮する必要がある。また本研究では、建物などの空間のモデル化を入手した地図とレーザー距離計を用いた簡易計測による実測値を基に近似的に行ったが、数十 km 単位の広域な市町村全体を計算の対象地域とするためには、より効率的なモデル化手法を検討する必要がある。

本論文におけるシミュレーションで合成したアナウンスを用いた聴感実験では、選定した受音点に到来したアナウンス音と現場の暗騒音の SN 比が確保されていたため、合成したアナウンスに対する暗騒音の付加は行わなかったが、実際には暗騒音による妨害効果が無視できない状況も多々あると思われる。また、実際に災害が発生した場合には、地鳴り、家屋などの倒壊音、津波や土砂が押し寄せる音などによってもアナウンスの明瞭性が低下することが懸念される。この問題については、今後、屋外における背景騒音を構成する主要な暗騒音成分の調査（暗騒音の種類、周波数特性、絶対音圧レベルなど）を行い、その調査結果に基づいて作成した背景騒音モデルを本可聴型シミュレーションシステムの合成したアナウンスに付加し、その暗騒音レベルに対する適切なアナウンスの再生音量を検討する必要がある。また本論文における聴感実験では、正常な聴力を有する学生を被験者として選定したが、実際に広域防災放送システムのアナウンスを聞く地域住民は、年齢、聴力特性などが様々である。したがって、広域防災放送システムの設計指針を検討するための聴感実験では、さらに幅広い年齢層の被験者を対象とする必要がある。

参考文献

参考文献

- [1] 総務省電波利用ホームページ“防災無線システム,”
<http://www.tele.soumu.go.jp/j/adm/system/trunk/disaster/index.htm>.
- [2] “非常通信確保のためのガイド・マニュアル,”
<http://www.tele.soumu.go.jp/resource/j/hijyo/4.pdf>.
- [3] “鹿児島市同報系デジタル防災行政無線 整備基本計画”
<http://www.city.kagoshima.lg.jp/var/rev0/0062/3115/musenkeikaku.pdf>.
- [4] “小浜市防災行政無線整備事業 基本設計 施設計画”
<http://www1.city.obama.fukui.jp/file/page/1522/doc/4.pdf>.
- [5] 栗栖 清浩, 松本 泰, 山内 昭弘, 有賀 成嘉, “(招待講演)屋外防災拡声システムの現状と課題,” 日本音響学会講演論文集, pp 1529-1532, (2013).
- [6] 橘 秀樹, “(招待講演)Public-space acoustics : 公共空間における音響情報の重要性,” 日本音響学会講演論文集, pp. 1131-1134, (2013).
- [7] 戸井田 義徳, “野外音場における明瞭度,” 日本音響学会誌, 43(7), pp. 519-525, (1987).
- [8] 戸井田 義徳, “ディレイタイムの長いエコー妨害のある拡声音場の音声伝達特性とその予測計算法,” 日本建築学会計画系論文集, 492, pp. 1-8, (1997).
- [9] 戸井田 義徳, “防災用野外スピーカシステムの時間差放送方式による明瞭度改善,” 日本建築学会関東支部研究報告集.計画系, 60, pp. 45-48, (1990).
- [10] 稲垣 實, 松原 美之, “屋外防災スピーカ・システムにおける時間差放送の音声明瞭度,” 消防研究所報告, 78, pp. 34-41, (1994).
- [11] 佐藤 逸人, 崔 正烈, 坂本 修一, 鈴木 陽一, 森本 政之, 青木 雅彦, 小池 宏寿, 高島 和博, 鶴 秀生, 光枝 太一, “(招待講演)音声了解度による屋外拡声システムの評価—総務省平成 23 年度 3 次補正予算による技術開発—,” 日本音響学会講演論文集, pp. 1533-1536, (2013).

- [12]鈴木 陽一, 崔 正烈, 齋藤 文孝, 坂本 修一, 森本 政之, 宇佐川 毅, 菅木 禎史, 佐藤 逸人, 岩谷 幸雄, 青木 雅彦, 小池 宏寿, 高島 和博, 鶴秀生, 光枝 太一, “(招待講演)屋外における災害情報の伝達性能の向上を目指して—総務省平成23年度3次補正予算による技術開発—,” 日本音響学会講演論文集, pp. 1523-1526, (2013).
- [13]大久保 朝直, 横田 考俊, 牧野 康一, 大島 俊也, 岡田 恭明, 平栗 靖浩, 川瀬 康彰, 今泉 博之, “防災拡声放送の屋外伝搬における気象の影響,” 日本音響学会講演論文集, pp. 1541-1544, (2013).
- [14]J. P. A. Lochner and J. F. Burger, “The influence of reflections on auditorium acoustics,” *J. Sound Vib.* 1(4), pp. 426-448 (1964).
- [15]J. S. Bradley, “Relationships among measures of speech intelligibility in rooms,” *J. Audio Eng. Soc.* 46(5), pp. 396-405 (1998).
- [16]P. Jianxin and B. Chenqxun, “Prediction of Chinese speech intelligibility using useful to detrimental sound ratios based on auralization,” *Proc. ISRA* (2010).
- [17]A. J. Berkhout, D de Vries and M. M. Boone, “A new method to acquire impulse responses in concert halls,” *J. Acoust. Soc. of Am.*, 68(1), pp. 179-183 (1980).
- [18]N. Aoshima, “Computer-generated pulse signal applied for sound measurement,” *J. Acoust. Soc. of Am.*, 69(5), pp. 1484-1488 (1981).
- [19]Y. Suzuki, F. Asano, H. Kim and T. Sone, “An optimum computer-generated pulse signal suitable for the measurement of very long impulse responses,” *J. Acoust. Soc. of Am.*, 97(2), pp. 1119-1123 (1995).
- [20]F. Satoh, Y. Hayashi, J. Hirano and S. Sakamoto, “Sound insulation measurement using 10 minute swept-sine signal,” *Proc. Inter-Noise 2011*, 428950.pdf (CD-ROM), (2011).
- [21]C. D. Kim, M. Abe and K. Kido, “Comparative study of methods for the estimation of impulse response,” *Proc. 11th ICA Paris*, pp. 297-300 (1983).

- [22]M. Abe, C. D. Kim and K. Kido, “Effect of time window on accuracy of estimation of impulse response using white noise,” *Proc. 11th ICA Paris*, pp. 305-308 (1983).
- [23]K. Kido, H. Suzuki, T. Ono and M. Fukushima, “Deformation of impulse response estimates by time windows in cross spectral technique,” *J. Acoust. Soc. of Jpn. (E)*, 19(5), pp. 349-361 (1998).
- [24]日本音響学会編, “音響入門シリーズ B2 デジタルフーリエ解析(II),” コロナ社, (2007).
- [25]橘 秀樹, “音響模型実験における相似則と実験手法,” 日本音響学会誌, 32, (10), pp 621-630, (1976).
- [26]“室内音場予測手法—理論と応用—”, 日本建築学会, (2001).
- [27]“ODEON Room Acoustics Software,” Version 11 User manual, <http://www.odeon.dk/pdf/ODEONManual11.pdf>.
- [28]“CATT-Acoustic™,”<http://www.catt.se/>.
- [29]羽入 敏樹, “5.幾何音響プログラミング,” 音響技術, No.129, Vol.34(1), pp. 28-34, (2005).
- [30]G. M. Naylor, “ODEON – Another hybrid room acoustical model,” *Applied Acoustics*, 38(2-4), pp. 131-143 (1993).
- [31]大嶋 拓也, 石塚 崇, 上條 高秀, “実在地域における時間領域音響伝搬解析の縮尺模型実験による検証,” 日本音響学会講演論文集, pp. 937-940, (2013).
- [32]平栗 靖浩, 大嶋 拓也, 星 和磨, “実在地域における地表面の吸音特性を考慮した音響数値解析技術の開発ハイパースペクトルデータを用いた地表面データ生成手法の検討,” 日本音響学会講演論文集, pp. 955-958, (2012).
- [33]地理院地図 (GSI Maps) <http://portal.cyberjapan.jp/>.
- [34]Sketchup pro <http://www.sketchup.com/ja>.
- [35]F. Spandok, “Akustische Modellversuche,” *Annalen der Physik* Vol. 412(4), pp. 345-360, (1934).

- [36]森本 政之, “音場シミュレーションの最近の動向,” 日本音響学会誌, 43(2), pp. 83-86, (1987).
- [37]橘 秀樹, “ホール音響のオーラリゼーション,” 日本音響学会誌, 56(5), pp. 354-360, (2000).
- [38]浜崎 公男, “22.2 マルチチャンネル音響方式の標準化動向,” NHK 技研 R&D, No.126, pp. 4-13, (2011)
<http://www.nhk.or.jp/str/publica/rd/rd126/PDF/P04-13.pdf>.
- [39]川上 福司, “多チャンネル室内音場シミュレータ,” 騒音制御, 12(5), pp. 3-8, (1988).
- [40]S. Yokoyama, K. Ueno, H. Yano and H. Tachibana, “6-channel recording/reproduction system for 3-dimensional auralization of sound fields,” *Acoustical Science and Technology*, 23(2), pp. 97-103, (2002).
- [41]横山栄, 向井ひかり, 矢野博夫, 佐藤史明, 坂本慎一, 橘秀樹, “公共空間の音環境に関する研究 その1: 実測調査,” 日本音響学会講演論文集, pp. 861-862, (1997).
- [42]向井ひかり, 横山栄, 矢野博夫, 佐藤史明, 坂本慎一, 橘秀樹, “公共空間の音環境に関する研究 その2: 音場シミュレーションによる聴感評価の試み,” 日本音響学会講演論文集, pp. 863-864, (1997).
- [43]上野佳奈子, 橘秀樹, 安田勝彦, 小野隆彦, “6チャンネルシステムによるステージ音場シミュレーション,” 日本音響学会講演論文集, pp. 713-714, (2000).
- [44]S. Yokoyama, H. Tachibana, S. Sakamoto and T. Okano, “Study on the speech intelligibility of public address system in a tunnel,” *Proc. Inter-Noise 2007*, in07_234, (2007).
- [45]近藤亜由美, 上野佳奈子, 横山栄, 矢野博夫, 橘秀樹, “自動車・車室内の音環境に関する研究 -3次元シミュレーションによる主観評価実験-, ” 日本音響学会講演論文集, pp. 805-806, (2006).

- [46]T. Ohta, H. Yano, S. Yokoyama and H. Tachibana, “Sound source localization by 3-D sound intensity measurement using a 6-channel microphone system part 2: Application in room acoustics,” *Proc. Inter-Noise 2008*, in08_0519, (2008).
- [47]H. Yano, T. Ohta, S. Yokoyama and H. Tachibana, “Sound source localization by 3-D sound intensity measurement using a 6-channel microphone system part 1: Principle and basic applications,” *Proc. Inter-Noise 2008*, in08_0518, (2008).
- [48]気象庁局所気象統計情報
<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>.
- [49]J. M. Fields, R. G. De Jong, T. Gjestland , I. H. Flindell, R. F. S. Job, S. Kurra, P. Lercher, M. Vallet and T. Yano, “Standardized general-purpose noise reaction questions for community noise surveys: research and a recommendation,” *J. Sound and Vib.*, 242 (4), pp. 641-679, (2001).

表彰

- [1] 日本音響学会 学生優秀発表賞 受賞 (2014年3月)
(対象論文：屋外拡声システムの音響設計のための可聴型シミュレーションシステムの試み)
- [2] 日本音響学会 粟屋潔学術奨励賞 受賞 (2014年3月)
(対象論文：屋外拡声システムの音響設計のための可聴型シミュレーションシステムの試み)

本論文を構成する論文

—国内学会・査読論文—

- [1] Junichi Mori, Fumiaki Satoh, Sakae Yokoyama and Hideki Tachibana, “Prediction of outdoor sound propagation by geometrical computer modeling,” *Acoustical Science and Technology*, 35(1), pp. 50-54, (2014.1).
- [2] 森 淳一, 横山 栄, 佐藤 史明, 橘 秀樹, “幾何音響シミュレーションと6チャンネル再生手法を用いた広域防災放送システムの可聴化の試み,” 騒音制御, 採録決定:2014/1/24.

—国際学会・口頭発表 (Abstract 査読) —

- [3] Junichi Mori, Daisuke Yoshino, Fumiaki Satoh and Hideki Tachibana, “Prediction of outdoor sound propagation by applying geometrical sound simulation technique,” *Proceedings of Inter-noise 2011*, 438556.pdf (CD-ROM), (2011.9).
- [4] Junichi Mori, Daisuke Yoshino, Fumiaki Satoh and Hideki Tachibana, “Measurement of outdoor sound propagation characteristics of municipal public address system using Cross-Spectrum method,” *Proceedings of Inter-noise 2012*, in12_402, (2012.8).
- [5] Junichi Mori, Sakae Yokoyama, Fumiaki Satoh and Hideki Tachibana, “Auralization of municipal public address announcements by applying geometrical sound simulation and multi-channel reproduction techniques,” *Proceedings of 21th ICA*, 5aAAa6, (2013.6).

—国内学会・口頭発表—

- [6] 森 淳一, 吉野 大輔, 佐藤 史明, 橘 秀樹, “屋外音場におけるインパルス応答の測定—幾何音響シミュレーションとの比較検討—,” 日本音響学会 2011 年 春季研究発表会 講演論文集, pp. 1263-1264, (2011.3).
- [7] 森 淳一, 吉野 大輔, 佐藤 史明, 橘 秀樹, “幾何音響シミュレーション手法を用いた屋外音響伝搬の予測,” 日本音響学会 建築音響研究会資料, AA2011-19, (2011.6).
- [8] 森 淳一, 佐藤 史明, 橘 秀樹, “実アナウンス信号を用いた広域放送におけるロングパスエコーの検出,” 日本音響学会 2011 年 秋季研究発表会 講演論文集, pp. 1201-1202, (2011.9).
- [9] 佐藤 史明, 吉村 晶子, 森 淳一, “非常時に備えた音響支援,” 日本音響学会 建築音響研究会資料, AA2011-45, (2011.11).
- [10] 吉野 大輔, 森 淳一, 佐藤 史明, 橘 秀樹, “広域放送システムの屋外音響伝搬特性の測定—Swept-Sine 法と Cross-spectrum 法の対応—,” 日本音響学会 2012 年 春季研究発表会 講演論文集, pp. 1215-1216, (2012.3).
- [11] 森 淳一, 吉野 大輔, 佐藤 史明, 橘 秀樹, “広域放送システムのロングパスエコーの問題について,” 日本音響学会 2012 年 春季研究発表会 講演論文集, pp. 1217-1218, (2012.3).
- [12] 吉野 大輔, 森 淳一, 佐藤 史明, “広域放送システムの屋外音響伝搬特性の測定—Swept-Sine 法と Cross-Spectrum 法の対応と幾つかの測定事例—,” 日本音響学会 建築音響研究会資料, AA2012-36, (2012.10).
- [13] 森 淳一, 横山 栄, 佐藤 史明, 橘 秀樹, “幾何音響シミュレーションと 6 チャンネル再生システムを用いた防災行政アナウンスの可聴化,” 日本音響学会 2013 年 春季研究発表会 講演論文集, pp. 1161-1162, (2013.3).
- [14] 森 淳一, 横山 栄, 佐藤 史明, 橘 秀樹, “(招待講演) 屋外拡声システムの音響設計のための可聴型シミュレーションシステムの試み,” 日本音響学会 2013 年 秋季研究発表会 講演論文集, pp. 1537-1540, (2013.9).

—その他の研究業績—

- [15] 森 淳一, 横山 栄, 佐藤 史明, 矢野 博夫, 橘 秀樹, “千葉工業大学・多目的大教室の室内音響設計,” 日本音響学会 2009 年 秋季研究発表会 講演論文集, pp. 1161-1162, (2009.9).
- [16] 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,” 日本音響学会 2013 年 秋季研究発表会 講演論文集, pp. 1535-1536, (2013.9).

付録

付録

クロススペクトル法に用いる信号に関する基礎的検討

本論文のクロススペクトル法による現場測定法では、音声アナウンスの音源信号とその観測信号の相互相関関数に基づいてインパルス応答を推定し、その結果と幾何音響シミュレーションによって計算した結果はかなりよく一致していた。しかし、地域によっては広域防災放送システムからアナウンスが放送されず、人工的に作成されたチャイム、メロディ信号、あるいは音楽信号のみが放送される場合もある。本章では、音声アナウンス以外の信号によるインパルス応答を推定できる可能性を基礎的に検討した。

検討の概要

この検討は、3.4.1 節で示した高層の建物が建ち並ぶ習志野市の津田沼駅周辺地区において行い、無指向性のマイクロホンを図 3.4.1-1 に示した受音点 M1 に設置した。この地域では、16:45 に放送される子供の帰宅を促すアナウンスに加えて 17:00 に時報として音楽信号が放送されている。また、16:45 のアナウンスが放送される前には、人工的に作成されたメロディ信号も放送されている。検討では、この 3 種類の信号を対象とした。測定の方法やクロススペクトル法の分析方法は本論のとおりである。

分析に使用した音源信号の概要

インパルス応答の推定に使用した 3 種類の音源信号の時間波形を図 A-1 に示す。時間波形の縦軸は相対的な音圧の振幅であるが、信号ごとの音圧振幅、継続時間長さはまちまちである。それらの信号全体の周波数特性を図 A-2 に示す。人工的に作成されたメロディ信号の結果に現れているピークの部分は音源に含まれる周波数成分であるが、この音源では純音成分が非常に強く、またその周波数特性もかなり限定されている。アナウンス信号では、アナウンサーの音声特性を持ち、フラットではないが様々な周波数成分を含んでいる。音楽信号においても純音成分が強いが、人工的に作成されたメロディ信号に比べれば、含まれている周波数成分はやや多い。

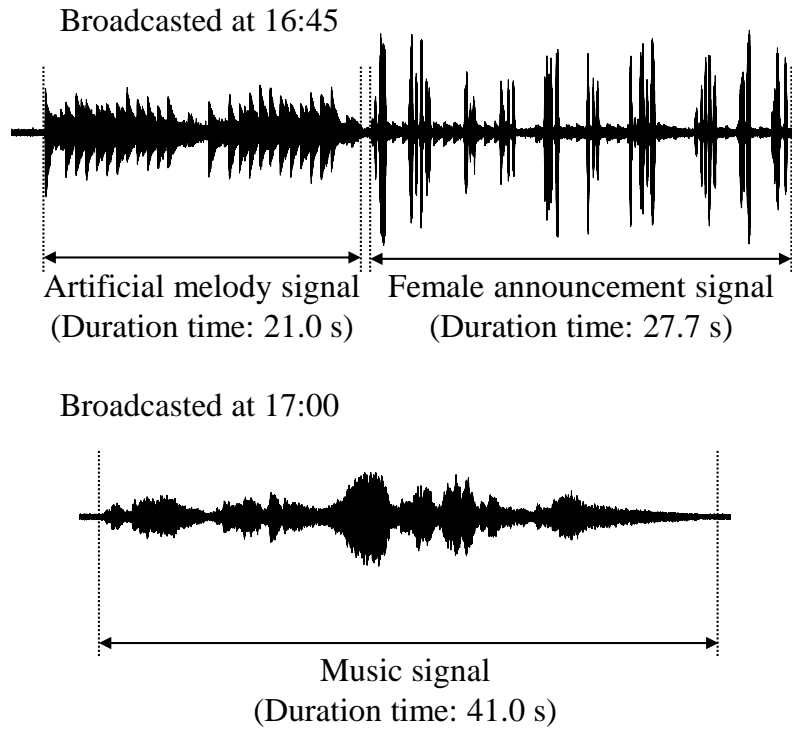


図 A-1 各信号の継続時間と音圧波形

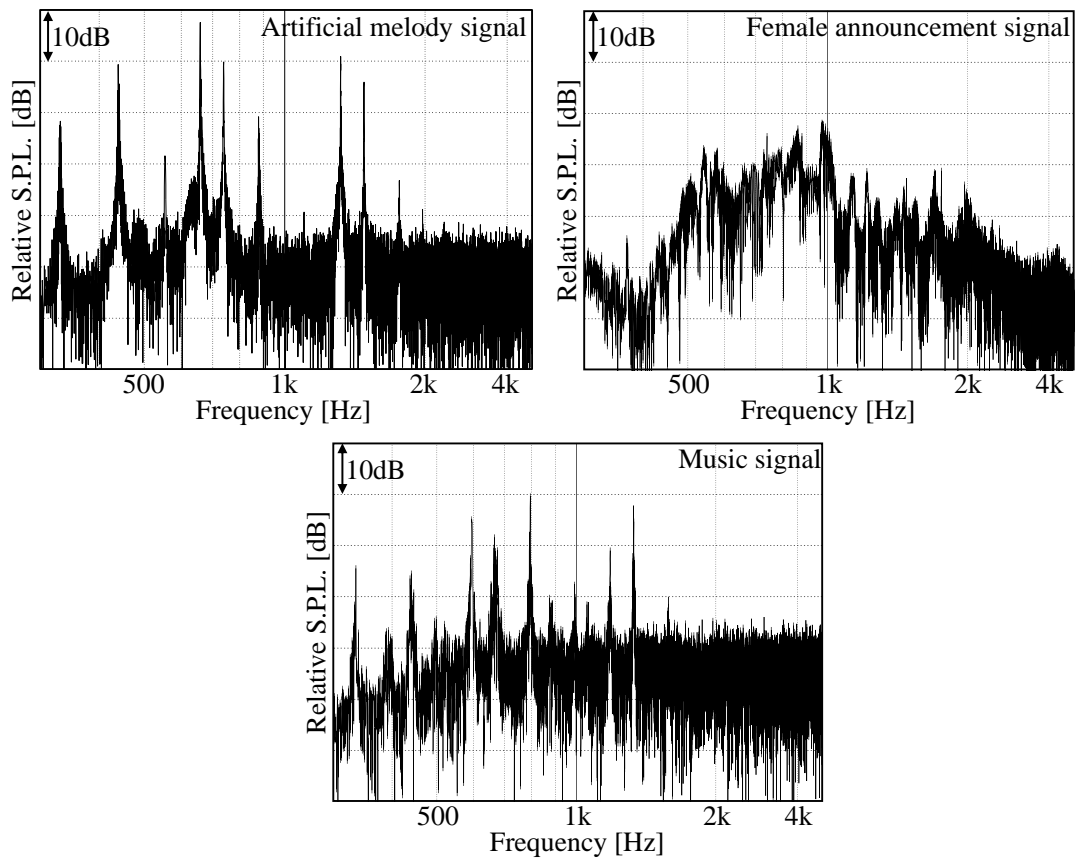


図 A-2 各信号の周波数特性

エコーダイアグラムの結果と考察

図 A-3 に 3 種類の信号から求めたエコーダイアグラムを示す。上段が人工的に作成されたメロディ信号の結果、中段がアナウンス信号の結果、下段が音楽信号の結果で、縦軸は相対的な音圧レベルである。三つの波形を比較すると、いずれの波形からも 600 msec.までに卓越したパルスが現れており、それらの相対的な音圧と遅れ時間はかなりよく一致している。しかし、人工的に作成されたメロディ信号の結果に着目すると、900 msec.以降に他の波形では見られない卓越したパルスが現れている。この信号では、約 900 msec.ごとに伴奏が繰り返されており、波形に現れたパルスはその信号の自己相関成分が検出されたものと推測される。このように信号自体に周期性がある場合は、スピーカシステムからの直接音や優勢な反射音以外にも卓越したパルスが検出されることがあるが、周期性がない信号であればインパルス応答が推定できることが確かめられた。

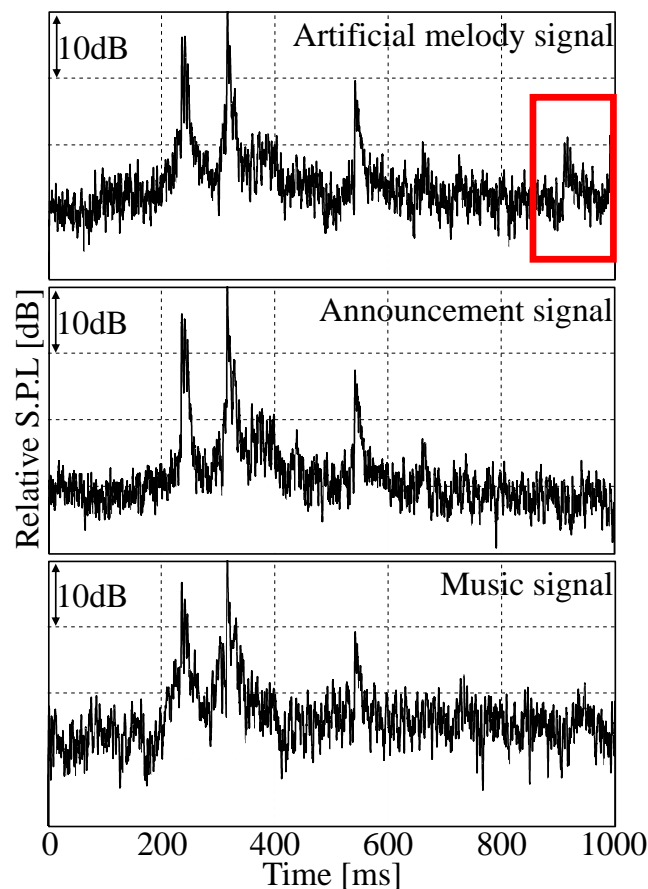


図 A-3 各信号から得られたエコーダイアグラム

謝辞

本論文は筆者が博士後期課程において行ってきた研究をとりまとめたもので、研究遂行にあたって大変多くの方にご指導していただきました。

本学 工学部建築都市環境学科 佐藤史明 教授には、指導教員として学部生から7年間もの歳月をかけてご指導していただきました。佐藤先生は、私が研究しやすい環境を常に優先して作って下さり、時に厳しく、時に親身になって私の研究生生活をサポートし続けて下さいました。深く感謝いたします。

本学 附属総合研究所 橘秀樹 教授に深く感謝いたします。橘先生は、私のことを学部生の頃から常に気にかけて下さり、研究の組み立て方や取り組み方、結果のまとめ方に至る一連の流れ、さらには英語論文の執筆方法まで、大変多くのことを丁寧にご指導して下さいました。これらの知識や考え方、経験は私の今後の人生における貴重な財産であると認識しております。本当にありがとうございました。

東京大学 生産技術研究所 横山栄 助教からは、本論文の4章以降における聴感実験の方法、その結果のまとめ方や説明の仕方に関する多くのご助言をいただきました。研究以外においても、横山先生は、私の日頃の悩みを親身になって聞いて下さいました。心より感謝申し上げます。

本学 情報科学部情報工学科 矢野博夫 教授からは、本論文における現場測定のための機器の使用法や測定前の大がかりな準備などで多くのご助言を賜りました。深く感謝いたします。

一般財団法人 小林理学研究所 小林知尋 氏には、本論文全体に渡って結果の分析方法やプログラミング方法などの高度な技術をご指導していただきました。先輩は、私のことを学部生の頃から気にかけて下さり、研究以外においても常に親身になってサポートして下さいました。本当にありがとうございました。

東京大学 生産技術研究所 坂本慎一 准教授からは、常に客観的な立場から私の研究に対するご助言をいただきました。また坂本先生は、私のことを研究実習生として受け入れて下さり、多くの現場測定に立ち会う機会を与え

ても下さいました。その測定に向けた坂本先生の緻密な計画性は、これからも私の見本です。心より感謝申し上げます。

習志野市役所の方々には、本論文の3章において行った実際の広域防災放送システムを対象とした現場測定の際に、住民への事前連絡、測定用音源信号の放送など、ご多忙にもかかわらずご協力していただきました。この場をお借りして、深く感謝申し上げます。本当にありがとうございました。

本論文の4章以降における聴感実験の遂行に当たり、大変有益な情報を賜りました熊本大学 工学部建築学科 矢野隆 教授ならびに大阪大学 大学院人間科学研究科 桑野園子 教授に心より感謝申し上げます。

本研究の成果を学会で発表した際、独立行政法人 産業技術総合研究所 佐藤洋 氏、一般財団法人 小林理学研究所 大久保朝直 氏、同 横田考俊 氏、神戸大学 工学部建設学科 森本政之 教授、同 佐藤逸人 准教授、TOA 株式会社 栗栖清浩 氏や財団法人 成田国際空港振興協会 川瀬康彰 氏には、屋外音響伝搬や音響学の専門家として、貴重なコメントを沢山いただきました。この場をお借りして各氏のご指導に対し、深く感謝申し上げます。また、幾何音響シミュレーションソフト ODEON の開発者である Professor J. H. Rindel ならびに Mr. C. L. Christensen には、ソフトウェア制作会社のニュース記事に本研究を取り上げていただきました。心より感謝申し上げます。

研究室の先輩である、株式会社 ニューズ環境設計 太田達也 氏、吉野石膏株式会社 林幸輝 氏、日本軽金属株式会社 崎本祐 氏や地方独立行政法人 東京都立産業技術研究センター 渡辺茂幸 氏には、卒業後も公私にわたり、大変お世話になりました。また、研究室の後輩で大学院に進学し、本論文執筆において大いに協力してくれた吉野大輔 氏、西井朋也 氏、吉野真史 氏、芝剛史 氏、園田矢弓 氏や佐藤真生 氏にも深く感謝いたします。

最後に、これまで就学の機会を与えて下さるとともに、終始温かく見守ってくれた両親、私の下で楽しく研究に取り組んでくれた多くの後輩達に感謝いたします。また妻、淑恵は常に私の心の支えとなって励ましてくれました。ここに心より感謝いたします。

平成 26 年 3 月 森 淳一