

---

# 安全・快適性のための音響情報科学研究センター

---

平成 25 年度～平成 29 年度 私立大学戦略的研究基盤形成支援事業  
研究成果報告書

平成 30 年 3 月

学校法人名 学校法人 千葉工業大学  
大 学 名 千葉工業大学  
研究組織名 音響工学フォーラム  
研究代表者 矢野 博夫  
(千葉工業大学情報科学部情報工学科)

—目次—		(頁)
はしがき	.....	1
第1部	.....	2
研究成果報告書概要	.....	3
第2部	.....	26
【安全性/公共空間に関わるテーマ】		
1. 音源の設計:音声合成	.....	27
残響下において聞き取りやすいアナウンス音声合成法	.....	27
2. 音源の設計:サイン音	.....	31
2.1 雑音の持続時間およびパワースペクトルによる音像の幅の変化	.....	31
2.2 位相情報に着目した高解像度周波数スペクトル分析法	.....	36
3. 電気音響システム	.....	40
音線法を用いた数値実験による指向性スピーカを用いた非常放送の		
明瞭性改善	.....	40
4. 電気音響システム	.....	60
屋外拡声装置の高度化と聴取音計測システムの開発	.....	60
5. 音環境・空間伝搬系	.....	69
5.1 公共空間の音響諸性能とアナウンスの明瞭度指数の対応関係	.....	69
5.2 一般室における6ch.再生システムによる方向感の再現精度	.....	77
6. 音環境・空間伝搬系	.....	86
広域放送の明瞭性改善に関する研究	.....	86
7. 音環境・空間伝搬系	.....	95
7.1 気象条件が防災放送の了解度に及ぼす影響		
- 無響室での音場再生とバイノーラルシミュレーションの比較 -	.....	95
7.2 単一エコーの入射方向が単語了解度に及ぼす影響	.....	98
7.3 受聴者の頭部形状による両耳間時間差の推定	.....	100
8. 聴覚・認識	.....	103
視聴覚情報を手掛かりとした移動における「迷い」と残響の関係	.....	103
9. 聴覚・認識	.....	106
音声単語親密度, 話速, ポーズ長が文章理解に与える影響	.....	106
【快適性に関わるテーマ】		
10. 快適性向上のための音響情報伝達	.....	118
音環境デザインのための音響技術とロボティクス技術の融合	.....	118
11. 快適性向上のための音響情報伝達	.....	126
音声による効率的な情報伝達を指向した音声対話システム	.....	126
12. 快適性向上のための音響情報伝達	.....	132
スマートフォン・タブレットによる簡易音場シミュレータ	.....	132

13. 快適性向上のための音響情報伝達 .....	136
耳介の放射特性に基づく正中面における音源の仰角と頭部伝達関数の 第1ノッチの周波数の定式化の試み .....	136
14. 聴感を始めとする顧客の感性を考慮した設計手法 .....	141
聴覚を始めとする顧客の感性を考慮した設計手法についての検討 .....	141
資料-1: シンポジウム(第8回CITフォーラム)開催概要(開催案内) .....	153
資料-2: シンポジウム(第8回CITフォーラム)講演梗概集(冊子内容) .....	155

## はしがき

公共空間の建物内や広範囲に音声情報を伝達する防災放送においては、平常時の案内アナウンスなどの明瞭な音声情報伝達はもとより、非常災害時には、音声あるいはサイン音による警報・避難誘導情報の的確な伝達が必要である。しかし、実際には音響情報による伝達が困難となっているケースも少なくなく、東日本大震災の際には、一段とその重要性が認識された。このような問題を解決するためには、各種公共空間の音環境条件、拡声システムの特性・性能、音源信号となるアナウンスやサイン音の設計などに関する検討が必要である。それと同時に、情報の受け手である人の聴覚特性と視覚特性の相互作用に関する検討も必要である。本研究では、音声科学、電気音響工学、建築・環境工学、認知科学の各学問分野を総合して、種々な公共空間を対象とした音響情報伝達システムの性能向上を目的とし、これらの音響情報分野における研究拠点としての確立を目指した。

本研究の内容を音響情報の伝達に関して大別すると、以下の4項目となる。

- (1) 音源の設計：テキスト音声合成およびサイン音の検討
  - (2) 電気音響システム：
    - ・巨大空間・屋外において用いられる拡声システムの検討
    - ・屋外拡声システムの高度化による音質改善方法の検討
  - (3) 音環境・空間伝搬系：
    - ・多様な公共空間に対する実態調査、音響計測、数値シミュレーション（幾何音響法と波動解析法）、ならびに3次元音環境シミュレータによる音場の可聴化と聴感評価手法の確立などの検討
    - ・防災無線システムから放送される音の聴取状況の実態把握、および防災無線放送システムの改善を目指すための聴取音計測システムの検討
  - (4) 聴覚・認識：
    - ・公共空間における聴覚に基づく位置情報や意味情報の理解を促進するための視覚的な情報の効果についての検討。
    - ・人間の聴覚特性や単語の親密度を考慮した音源信号の生成方法についての検討。
    - ・到来方向や距離知覚など避難誘導に必要な情報の伝達方法についての検討
- さらに(4)聴覚・認識を細分化して【快適性に関わる研究テーマ】の二つの研究領域を追加した。
- (5) 快適性向上のための音響情報伝達
  - (6) 聴感を始めとする顧客の感性を考慮した設計手法

このような研究を実施するうえでは、音声科学、電気音響工学、建築・環境工学、認知科学などの音響工学の広範な分野に対する専門領域を専攻する研究者が共同研究体制をとり、交通関連施設や地下街、アトリウム、トンネルなどの公共空間における安全確保のための音による情報伝達システムの高効率化・正確化を目的とした総合的な研究を行う必要がある。千葉工業大学には、音声、聴覚生理・心理、建築音響・騒音制御、電気音響・デジタル信号処理など音響工学諸分野の研究者が多数在籍しており、平成17年より学内に“音響工学フォーラム”を組織して研究情報の交換等の日常的活動を活発に行っている。本研究もこの体制を母体として実施された。

この度、本プロジェクト研究の一つの区切りとして、当初の設定目的ごとに研究成果のとりまとめを行った。本プロジェクトにより各テーマの基礎が固まり、さらに応用研究へ、研究対象の拡大・発展へとつなげていく道筋ができたと考えている。

平成30年 3月

研究代表者 矢野 博夫



# 第 1 部

法人番号	121003
プロジェクト番号	S1311003

**平成 25 年度～平成 29 年度「私立大学戦略的研究基盤形成支援事業」  
研究成果報告書概要**

1 学校法人名 学校法人 千葉工業大学      2 大学名 千葉工業大学

3 研究組織名 音響工学フォーラム

4 プロジェクト所在地 千葉県習志野市津田沼 2-17-1

5 研究プロジェクト名 安全・快適性のための音響情報科学研究センター

6 研究観点 研究拠点を形成する研究

7 研究代表者

研究代表者名	所属部局名	職名
矢野博夫	情報科学部	教授

8 プロジェクト参加研究者数 13 名

9 該当審査区分 理工・情報      生物・医歯      人文・社会

10 研究プロジェクトに参加する主な研究者

研究者名	所属・職名	プロジェクトでの研究課題	プロジェクトでの役割
矢野 博夫	情報工学科・教授	研究総括, (2)電気音響システム, (3)音環境・空間伝搬系	避難誘導放送システム, 3 次元音場シミュレータの開発、音響計測
木幡 稔	情報ネットワーク学科・教授	(1)音源の設計(音声合成、サイン音設計)	テキストによる音声合成手法の開発
柳川 博文	情報ネットワーク学科・教授	(1)音源の設計(音声合成、サイン音設計)	サイン音(警報・非音声信号)の開発
飯田 一博	知能メディア工学科・教授	(3)音環境・空間伝搬系	バイノーラル音場再生システムの高精度化、音像の距離感の制御方法の検討
佐藤 史明	建築学科・教授	(3)音環境・空間伝搬系	音環境の実態調査、数値シミュレーション、空間の音響処理
大川 茂樹	未来ロボティクス学科・教授	(4)聴覚・認識	雑音・残響環境下での音声認識
世木 秀明	情報工学科・准教授	(4)聴覚・認識	音声知覚に関する視覚刺激の影響
山崎 治	情報ネットワーク学科・准教授	(4)聴覚・認識	聴覚と視覚の相互作用
須田 宇宙	情報ネットワーク学科・准教授	(4)聴覚・認識	聴覚と視覚の相互作用
藤江 真也	未来ロボティクス学科・准教授	(4)聴覚・認識	音声言語処理, 音声認識

法人番号	121003
プロジェクト番号	S1311003

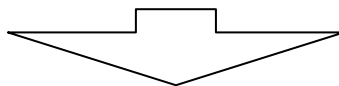
竹本 浩典	知能メディア工学科・教授	(4)聴覚・認識	音声生成, 音響シミュレーション
菅木 禎史	知能メディア工学科・教授	(2)電気音響システム, (3)音環境・空間伝搬系, (4)聴覚・認識	音声認識, マルチモーダル・インターフェース
関 研一	プロジェクトマネジメント学科・教授	(4)聴覚・認識	音響振動設計, 音環境, 感性工学
(共同研究機関等) 坂本 慎一	東京大学生産技術研究所・准教授	(3)音環境・空間伝搬系	公共空間の実態調査、聴感評価手法、音響設計手法
橋 秀樹	東京大学・名誉教授	(3)音環境・空間伝搬系	公共空間の実態調査、音響設計手法

<研究者の変更状況(研究代表者を含む)>

旧

プロジェクトでの研究課題	所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割

(変更の時期:平成 年 月 日)



新

変更前の所属・職名	変更(就任)後の所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
未来ロボティクス学科・准教授	未来ロボティクス学科・准教授	藤江 真也 *1	音響感性, 音響認識, 環境音
知能メディア工学科・教授	知能メディア工学科・教授	竹本 浩典 *2	音声生成, 音響シミュレーション
知能メディア工学科・教授	知能メディア工学科・教授	菅木 禎史 *3	音声認識, マルチモーダル・インターフェース
プロジェクトマネジメント学科・教授	プロジェクトマネジメント学科・教授	関 研一 *4	音響振動設計, 音環境, 感性工学

\*1(変更の時期:平成 27年 4月 1日)

\*2, \*3(変更の時期:平成 28年 4月 1日)

\*4(変更の時期:平成 28年 12月 1日)

11 研究の概要(※ 項目全体を10枚以内で作成)

(1)研究プロジェクトの目的・意義及び計画の概要

公共空間や広域放送においては、平常時の案内アナウンスなどの明瞭な音声情報伝達はもとより、非常災害時には、音声あるいはサイン音による警報・避難誘導情報の的確な伝達が必要である。しかし、実際には音響情報による伝達が困難となっているケースも少なくなく、東日本大震災の際には、一段とその重要性が認識された。このような問題を解決するためには、各種公共空間の音環境条件、拡声システムの特性・性能、音源信号となるアナウンスやサイン音の設計などに関する検討が必要である。それと同時に、情報の受け手である人の聴覚特性と視覚特性の相互作用に関する検討も必要である。本研究プロジェクトでは「安全・快適性のための音響情報に関する総合研究」を研究テーマとして掲げており、音声科学、電気音響工学、建築・環境工学、認知科学の各学問分野を総合して、種々な公共空間を対象とした音響情報伝達システムの性能向上を目的とし、これらの音響情報分野における研究拠点としての確立を目指すものとする。

本研究の内容を音響情報の伝達に関して大別すると、以下の4項目となる。

(1)音源の設計: 公共空間における非常時の避難誘導アナウンスは、その状況に応じて内容を適宜変更する必要があり、その制御や内容の即時的更新には、自然性の高い音声合成であるテキスト音声合

法人番号	121003
プロジェクト番号	S1311003

成 (TTS) が適している。この技術を適用して空間の特性ごとに適応的に聞き取りやすいアナウンスを合成する具体的手法について検討する。サイン音については、音声伝達が不可能な状況下での情報伝達手段として研究の対象として取り入れる。

(2)電気音響システム：残響時間が長大、あるいはロングパスエコーが著しい巨大空間・屋外において、音響情報伝達の明瞭性を確保する手法として、既に連続的時間遅延方式を用いた基本システムを提案している。この方式で用いる最適なスピーカ特性や配置について空間伝搬系を考慮した検討を行う。さらに電気音響システムの一部として、屋外拡声システムの高度化を目指し、住民が受聴点で聞く音の品質を改善するためのアプローチの一つとして、居住地区近隣の建物や地理的影響によるロングパスエコーの抑制などの検討を行うことが考えられる。

(3)音環境・空間伝搬系：多様な公共空間（駅、空港、アトリウム、トンネル、地下街、市街地など）を対象とし、音環境の実態調査、音響計測、数値シミュレーション（幾何音響法と波動解析法）ならびに3次元音環境シミュレータによる音場の可聴化と聴感評価手法の確立を目指す。また、対象とする周波数領域を低周波数まで拡張することを検討する。

さらに屋内空間だけにとどまらず、防災無線システムから放送される音の聴取状況の実態を把握すると共に防災無線放送システムの改善を目指すために、聴取音計測システムを検討する。

(4)聴覚・認識：公共空間における聴覚に基づく位置情報や意味情報の理解を促進するための視覚的な情報の効果について検討する。また、人間の聴覚特性や単語の親密度を考慮した音源信号の生成方法について検討を行うとともに、到来方向や距離知覚など避難誘導に必要な情報の伝達方法についても検討する。

さらに(4)の項目を細分化して、(5)快適性向上のための音響情報伝達、および(6)聴感を始めとする顧客の感性を考慮した設計手法、の二つの研究領域を追加した。

## (2) 研究組織

平成 25 年度より学内研究者 10 名、学外 1 名により以下のような分担で研究を開始した。研究総括を矢野博夫（代表者）が担当し、(1)音源の設計（音声合成、サイン音設計）木幡稔、柳川博文 2 名が分担、(2)電気音響システム：矢野博夫が担当、(3)音環境・空間伝搬系：矢野博夫、飯田一博、佐藤史明、菅木禎史、橘秀樹、坂本慎一（学外）6 名で担当、(4)聴覚・認識系：大川茂樹、世木秀明、山崎治、須田宇宙 4 名で担当として研究を開始した。平成 27 年度に藤江真也（(4)分野担当）、平成 28 年度に竹本浩典（(4)(5)担当）、菅木禎史（(2),(3)担当）、平成 28 年 12 月より関研一（(6)担当）の 4 名を追加した。

大学院生数は、平成 25 年度：修士 31、博士 1、平成 26 年度：修士 25、博士 1、平成 27 年度：修士 20、博士 1、平成 28 年度：修士 9、博士 1、平成 29 年度：修士 8、博士 1 が当該テーマについて研究し、平成 26 年度に特別研究員（ポスドク）1 名によるテーマ(3)の研究を行った。平成 29 年度には博士後期課程 1 名による関連テーマの研究により博士号を取得した。各研究者は学内に音響工学フォーラムを組織し、研究内容について 1~2 月ごとに報告・検討を重ねて連携を図っている。また、研究代表者および院生が学外研究機関と共同研究を実施している。

## (3) 研究施設・設備等

研究施設として、無響室（壁・床・天井の周囲に楔状の吸音）と解析室（無響室の前室：分析システムを設置）および物理実験室（壁・天井を簡易吸音・防音構造）から構成される音響実験設備（105 m<sup>2</sup>）を使用した。これらの施設は院生 60 名、卒業研究生 114 名によって、上記テーマの全般にわたり使用されているが、マイクロホンやスピーカ等の研究開発・測定、音響測定方法の研究や、音によるヒトの心理・生理的反応や方向感、残響感のような音の VR の研究などに幅広く使用している。

主要な研究設備としては「可変残響音場シミュレーション設備」および「低周波音・騒音測定分析システム」を平成 26 年度に整備した。

「可変残響音場シミュレーション設備」は、周囲からの騒音を防ぐ防音構造とし、内部は長大な残響時間を実現する反射性の内装構造とするが、残響時間を調節することができる装置として吸音パネルを付随させる。これにより、地下空間やトンネルなどの長い残響時間を有する音場を実験室に再現することができる。本設備ではおよそ 1,030 時間/年の利用となっており、使用内容としては、設計した音源信号

法人番号	121003
プロジェクト番号	S1311003

の再生・試聴を行うほか、シミュレーション計算で作成したアナウンス音などの再生を行い、簡易型 3次元音場シミュレータを併用した聴感評価実験を実施する試験室として使用している。

「低周波音・騒音測定分析システム」は、低周波数(1Hz)から可聴周波数の上限(20kHz)までの騒音を収音・録音記録し、周波数分析をするための装置である。本設備ではおよそ1,800時間/年平均の利用となっており、主として(2)電気音響システムおよび(3)音環境・空間伝搬系の研究、マイクロホンやスピーカ等の研究開発・測定、音響測定方法の研究、現場実験データの解析などに用いている。

(4)研究成果の概要 ※下記、13及び14に対応する成果には下線及び\*を付すこと。

本研究の内容として「音響情報の伝達」に関して、(1)音源の設計、(2)電気音響システム、(3)音環境・空間伝搬系、(4)聴覚・認識の4項目について研究の進捗状況等を述べる。さらに(4)の項目を細分化して、(5)快適性向上のための音響情報伝達、および(6)聴感を始めとする顧客の感性を考慮した設計手法に関しても研究領域とした。

(1)音源の設計(音声合成)

1.1 残響下において聞き取りやすいアナウンス音声合成法

公共空間において、残響の影響により聞き取りにくくなる問題を解決することを目的として以下を実施した。明瞭度評価尺度の提案として、文節間に挿入するポーズ長、話速、文節ごとの振幅を制御する目的で STIdos(Speech Transmission Index depending on speech)を提案し、上記パラメータを制御した実験の結果、条件に依存するものの明瞭度と相関のある結果が得られた\*1。提案方式のコンセプトとして、提案する方式は、残響空間におけるインパルス応答が既知であることを前提とした条件を設けた\*2。音源としてテキスト文を元にした合成音声を利用し、さらに残響特性をインパルス応答として予め測定したものを利用することにより、音声合成器に与える種々のパラメータを制御したり、発話内容に応じた適応信号処理を行うことが可能な「残響下で聞き取りやすいアナウンス音声合成法」を提案した\*3。

<優れた成果が上がった点>：合成音声に残響を付加した音声の、客観評価尺度(SR比)が閾値以上(客観評価尺度が大きいほど聞き取りやすい)となるように、計算機上で予め予測することにより、音声合成のパラメータ(文節間ポーズ、話速、振幅など)をフィードバック処理により、適応的に制御し、音声合成を行うアルゴリズムを開発した。この処理により明瞭度が向上することが確認された。また音声合成パラメータには(話速、ポーズ、ゲイン等)様々なものがあるが何れを制御することが効果的にについても実験的に検討を行った\*3。

<課題となった点>：客観評価基準としてSR比を提案したが、人間の聴覚により近い特性を反映可能な特徴量とする必要がある。克服方法として、スペクトル上での歪の評価を考えている。残響特性についても、音声の妨害となりやすい特性とそうでないものがあるため、残響時間の周波数特性の異なるものを複数用いて、提案方式の性能評価を行い、いかなる残響下でも適応可能な方式に改良する方針である。

<研究期間終了後の展望>：プロジェクトの他の研究分野との連携により、(i)言語の性質などを考慮した残響に頑健なシステムの構築、(ii)音像定位現象やサイン音の付加等により、残響に頑健なだけでなく、正確かつ即時的に情報が伝達可能なシステムの実現などの成果が期待される。

<研究成果の副次的効果>：音声合成とフィードバック制御により残響耐性を高める方式については、「音声合成装置」(特許第6032832号、2016年11月4日)として特許を取得した。実用化に向けては、小型PCを用いた方式の実装とリアルタイム動作を目標としてシステム製作を行う予定である。

1.2 サイン音：(1)雑音の持続時間およびパワースペクトルによる音像の幅の変化：

残響時間の長い空間において音響的に避難誘導を図るためのサイン音の特性について調べてきた。その結果、信号持続時間、繰り返しの間の無音区間長さ、波形包絡線形状、パワースペクトルの形状などの最適条件を見いだした。これらは音像の大きさが小さいほど音源位置を知覚しやすいことを示している。

<優れた成果が上がった点>：音像の幅に着目し、各種実験を行った結果、残響があっても音像がぼけないためのサイン音は持続時間が100ms以下の短い音を構成中に加えることが望ましい。持続時間が長くなるとサイン音の音源停止直前の両耳間相関は減少してゆく。このことは相関値が低下すると拡がり感が増すこととよく対応している\*4。

さらに残響を付加してないサイン音そのものの音像に幅があることを見いだした。この幅はサイン音の高域のスペクトルの割合が大きいほど減少し、持続時間が短いほど同じく減少することが確認された。さらに聴取実験はおもにヘッドホン受聴で行われたがスピーカ受聴でも同様な結果が得られたので、サイン音を拡声する際にも当てはまることを示した\*5。以上、サイン音の特性としてスペクトルが重要で

法人番号	121003
プロジェクト番号	S1311003

あるが持続時間も避難誘導にとってきわめて大きなファクターとなることを明らかにした。

<課題となった点>：残響による影響を調べる際、インパルス応答の直接音、間接音比を音源、受音点間距離で変化させようとしたが期待した変化量が得られなかった。これはスピーカの指向性が関係していることが判明した。そこで見かけ上指向性を広くするために、スピーカの方向を変えたインパルス応答を測定しそれを合成した結果、無指向性スピーカによるインパルス応答に近似した応答が得られ、所期の直接音間接音比の異なるインパルス応答群が得られた。

<研究期間終了後の展望>：残響のある音場における音場の幅について音場の特性、信号の性質との関係、関連する聴覚の応答などを総合的に解明する。

<研究成果の副次的効果>：本研究の結果は、避難誘導サイン音やその他の音編集加工処理などに応用できる。

## (2) 位相情報に着目した高解像度周波数スペクトル分析法：

音像に関する種々の主観評価実験を行う際の、刺激音が想定通りの性質かつ品質であるかを確認するには、提示音を計測し周波数スペクトル分析を行うことが必要である。信号の周波数スペクトル分析は様々な場面で必要となる。一般に周波数スペクトル分析では FFT が用いられるが波形の周期が不明なため周期の整数倍で分析できず、サイドローブなど偽のスペクトルが現れる。この問題を解決する試みとして信号の自己相関関数に着目し、その周期を推定することにより信号の周期を割り出し、より正確かつ精密な周波数スペクトル分析手法を開発し ALT-W と名付けた\*6,7,8。

<優れた成果が上がった点>：周期分析を行うので従来の一般調和解析より計算負荷が少なく調和性を前提とする必要もない。まず周波数変動を伴う信号に適用し有効性を示した\*6。つぎに非周期信号に適用し、周波数スペクトル分析精度が高く時間追従性にも優れていることを示した\*7。さらに自己相関関数の位相が 0 となる分析データ長を成分波形の周期の最小公倍数とし、それを効率的に探索する方法を加え PLATE と名付けた手法を提案した\*8。

<研究成果の副次的効果>：過渡的な刺激音の主観評価実験に必要な、高い周波数分解能でかつ過渡的な信号でも利用可能な時間追従性も併せ持つ周波数スペクトル分析手法が開発できた。

## (2) 電気音響システム

### 2.1 音線法を用いた数値実験による指向性スピーカを用いた非常放送の明瞭性改善

3種類のスピーカ（ホーン型、ラインアレイ型、平板型）を道路トンネル内に設置した場合について、幾何音響理論に基づく数値計算手法により、各受音点のインパルス応答を計算した。その結果から明瞭性に関する物理指標として STI に着目し、各スピーカに時間遅延システムを併用した場合の明瞭性について検討を行った\*9。

<優れた成果が上がった点>：ホーンスピーカによるトンネル内における実測結果と数値計算結果について比較したところ、距離減衰特性についてはよい対応がみられた。明瞭性に関する物理指標 STI 値を求めたところ、いずれのスピーカについても時間遅延を行うことで明瞭性が改善されること、ホーン型、ラインアレイ型、平板型の順で明瞭性が改善される結果を得た\*9。

<課題となった点>：音源スピーカの検討としてより強い指向特性を持たせたスピーカの開発および、それを用いたシミュレーション結果と実音場における結果との比較を行う必要がある。また、物理指標の検討だけでなく聴感実験による主観評価実験による検討が必要と考えている。

<研究期間終了後の展望>：複数のスピーカを組み合わせた超指向性スピーカの開発を行い、再度シミュレーションを行って物理指標による明瞭度改善の確認を行う。併せて主観評価実験による明瞭度改善効果の確認を行う。現在は比較的単純な構造の音場を対象としているが、複雑な構造を持つ地下街等での明瞭度予測にも適用できることが期待される。

<研究成果の副次的効果>：ホーンスピーカと時間遅延技術を用いたシステムはすでに用いられており、現用システムより明瞭度が改善できれば、実音場に適用することは可能である。

### 2.2 屋外拡声装置の高度化と聴取音計測システムの開発

東日本大震災で震災の影響を受けた地域においては、住民の 45%が屋外拡声器により避難情報を入手していたが、そのうち音声内容を明瞭に聴取できた人は 56%であった。そこで、屋外拡声も重要な役割を果たしているため、住民が受聴点で聞く音の品質を改善するためのアプローチの一つとして、屋外拡声システムの高度化について検討した\*10。また、[3]音環境・空間伝搬系における改善を目指すために、聴取音計測システムを提案・実装して、居住地区近隣の建物や地理的影響によるロングパスエコーの抑制などについての情報収集を行った\*11。

<優れた成果が上がった点>：電気音響システムの一部として、屋外拡声システムの高度化を目指して、

法人番号	121003
プロジェクト番号	S1311003

放射タイミング制御のプロセスを考慮した自律ノードシステムを提案・構築し、実験によって動作確認を行った。当該システムの電源供給に関して停止後、復電時の動作についても考慮しており、復旧後に正常動作することが確かめられた\*10。聴取音計測システムとして、防災無線の子局スピーカより放射される放送音の実態を調査するための計測システムを構築し、住民の聴いている状況を録音し、その分析および環境改善の提案をするための枠組みについて検討した。ロングパスエコーの原因となる反射音を生成している物体の位置推定を可視化するシステムの設計および実装を行った\*11。

<課題となった点>：屋外拡声システムの高度化において、無線 LAN のネットワーク環境では、ノード数が増えた場合の復旧に時間を要する現象が確認された。聴取音計測システムでは、誰もが参加できる形を取り、スマートフォンに不慣れな一般市民が録音しても、一定の品質で情報収集できることを設計方針とした。専門家が録音する方式に比べて多数のデータ収集が必要となった。

<研究期間終了後の展望>：屋外拡声システムの高度化において、LTE 回線など種々のネットワーク環境においての実用性を高めるための対策について検討を行う。聴取音計測システムにおいては、屋外で観測したデータを充実させ、推定精度の向上、各種プラットフォームでの利用のしやすさについて検討を行う予定である。

<研究成果の副次的効果>：災害等非常時の屋外拡声システムの設置に関するあり方および技術基準を検討するため、日本音響学会では技術調査研究委員会により、災害等非常時の屋外拡声システム性能確保のための基準案が作成された。

### (3)音環境・空間伝搬系

#### 3.1(1)公共空間の音響諸性能とアナウンスの明瞭度指数の対応関係

明瞭性を評価する指標として Speech Transmission Index(以下 STI)や D 値、EDT(初期残響時間)等があり、音声情報伝達の面から重要な要素の 1 つである。公共空間では暗騒音、エコー、残響等の音響性能がアナウンスの明瞭度指数に関係していると考えられるが研究例が少ない。そこで公共空間の暗騒音および残響時間などの音響性能と明瞭度指数の関係について実験的に検討を行った。

<優れた成果が上がった点>：2カ所の室(500Hz 残響時間:0.5s、3.4s)で暗騒音を人為的に加え、そのレベルを 7 段階に変化させて STI の変化を測定した。どちらの室においても、スピーカ直前測定点(会話距離 1m 相当)では SN 比が約 15dB より下がると STI は 0.45 (fair) より小さくなる。男声に比べて女声の方が STI はわずかに大きい。音源より 8~10m 離れた測定点ではノイズを加えない場合でも STI は 0.4 程度であり、ノイズを加えた状態では 0.1 以下と極端に悪化している。

<課題となった点>：STI 測定の際に実際の音源としてのレベル(1m 点で 60dB)を用いた場合に SN 比が悪化すると測定結果がばらつく傾向にある。

<研究期間終了後の展望>：測定値の安定性についての検討および、アナウンス音を拡声した場合の SN 比と STI の関係について検討を行う。

<研究成果の副次的効果>：得られた SN 比と明瞭度指数との関係を、実際の公共空間における SN 比に適用して実音場における明瞭度指数を推定し、実空間の明瞭性を評価することができる。

#### 3.1(2)一般室における 6ch・再生システムによる方向感の再現精度

実音場である 3 次元音場を実験室内に再現するために 6ch・収音・再生システムが用いられている。このシステムでは 3 次元直交軸上に配置された 6 本の単一指向性マイクロホンを使って録音し、無響室内に配置された 6 台のスピーカから音を再生するシステムである。このシステムでは無響室にスピーカを設置することで音場を再現している。しかし、無響室の設備は再生音場として理想状態ではあるが、本格的な無響室を備えるのは困難であることが多い。そこで、一般的な室内音場において 6ch・再生システムによる 3 次元音場の再現可能性について検討を行った。ここでは、残響が長い一般室において、吸音状態を変化させて 6ch・再生システムによる方向感の再現精度に関する聴感実験を行った。

<優れた成果が上がった点>：一般室内で 6ch・再生音場を構成した場合、ある程度の吸音を施すことにより水平方向の方向感は精度よく再現できる可能性があることが判った。

<課題となった点>：鉛直方向の再現性については、判断が偏る傾向が見られた。

<研究期間終了後の展望>：音源方向に対する方向感の判断だけでなく、残響感(音に包まれた感じ)などの再現性、実空間での環境音を用いた再現性などについて無響室音場との比較実験を行い、一般室の適用性を検討する。

<研究成果の副次的効果>：無響室は吸音楔で覆われているため視覚情報と音場再生による聴覚情報がずれてしまい、実際の音場をイメージしづらい。6ch・システムを無響室ではなく、一般的な室内で構築できれば、実際の音場がイメージしやすいのではないかと考えられる。



法人番号	121003
プロジェクト番号	S1311003

### 3.2 広域放送の明瞭性改善に関する研究

広域放送システムからのアナウンス音の明瞭性確保に関する研究として、設計支援ツールとしての完成を目指している可聴型予測システムの精度に関する検討をはじめ、広域放送システムのスピーカ配置に関する検討、アナウンスの音源信号に関する検討を行った\*12,13。予測システムの検討としては、6ch. 收音-再生システムの正中面内下方向の定位実験と仮想実音場との明瞭性評価の比較実験を行った\*12。放送システムのスピーカ配置に関する検討としては、1つのスピーカのサービスエリアを狭くする方法に関するシミュレーションと聴感実験を行った。音源信号に関する検討としては、アナウンスの話速やポーズ長をパラメータとした聴感実験を行った\*13。

<優れた成果が上がった点>：定位実験の際に被験者に手かかりを与えることで音像定位の正確性が改善された。さらに無響室内にマルチパスエコーを模擬した様々な音圧や遅れ時間を持って音の到来する音場（仮想実音場）を作成して、6ch. 收音-再生システムとの明瞭性評価の直接比較を行った結果から、6ch. 收音-再生システムの有効性を確認した\*12。

<課題となった点>：高親密度の単語をターゲットとした場合の回答の正答率が非常に高かった。これは正答が文章から容易に連想できたためと考えられる。放送システムのアナウンスの了解性を評価するのであれば、正答が容易に連想できる単語は避けるべきとも考えられる。また、話速、ポーズ長、STIRでは、特に了解性や明瞭性の聴感実験結果を説明できる結果は得られなかった。

<研究期間終了後の展望>：上述の原因は、卓越した音波が複数存在する屋外音場では、音の重畳が容易に起こり、また放送される文章ごとにその音の重なり具合が異なり、偶発的に聴き取れる、または聴き取れないことが容易に起こり得る。そのため、まずはアナウンスの内容をフィックスする必要性もある。結果、現段階で広域放送システムを設計する場合には、可聴型シミュレーションシステムを設計支援ツールとして用い、実際に聴いて確認しながら設計を進める方法が一策であると考えており、その手法の有効性をより多く示していきたい。

アナウンスが不明瞭な状況にある原音場の方向情報を伴う音響特性データの収集とそれをシミュレートできる6ch. 收音-再生システムの精度向上を目指す。

<研究成果の副次的効果>：広域防災放送システムからのアナウンス音の明瞭性評価に関して、音の方向情報が極めて重要であることが示唆された\*13。

### 3.3 気象条件が防災放送の了解度に及ぼす影響（無響室での音場再生とバイノーラルシミュレーションの比較）

防災放送の可聴型音場シミュレーションの構築を目指して、以下の目的で実験を行った。

・目的1：同一地点で長期間に亘って収録した屋外防災放送を無響室内で再現し、気象条件が音声了解度に及ぼす影響を明らかにする\*14。

・目的2：無響室などの特別な設備を必要としないバイノーラル再生に着目し、屋外防災放送の音声了解度の再現精度を検証する\*15。

これらの実験により3次元音環境シミュレータによる音場の可聴化と聴感評価手法の確立を検討した。

<優れた成果が上がった点>：目的1については、気象条件の違いによる音響状態やスピーカ配置などについて実音場をシミュレートした環境において主観評価実験を行い、4連単語の単語了解度と聴き取りにくさを求めた。同一観測点でも気象条件により単語了解度に統計的有意な差が生じ、聴き取りにくさも顕著に変化することが明らかになった\*14。

目的2については、屋外防災放送の評価との観点から、1) 受聴者は一般市民であり本人の頭部伝達関数を持たない、2) 実験用の特殊なヘッドホンを使用しない、という条件の下、各被験者の耳介形状から推定したbest-matching HRTFと市販のオープンタイプヘッドホンをを用いたバイノーラル再生を行い、4連単語の単語了解度と聴き取りにくさを求めた。その結果、無響室再生と統計的有意な差が認められない精度で単語了解度を再現できることがわかった\*15。

<研究期間終了後の展望>：対象とする周波数領域を低周波数まで拡張することを検討する。また、広域放送システムを設計する場合において、可聴型シミュレーションシステムを設計支援ツールとして用い、実際に聴いて確認しながら設計を進める方法の確立を期待する。

#### (4)聴覚・認識

##### 4.1 視聴覚情報を手掛かりとした移動における「迷い」と残響の関係

地下街やビル内などの「閉じられた公共空間」において、音響情報の観点から、「迷い」が発生しやすいポイントを特定するための実験を実施した。仮想的な地下街空間を、3DCGおよび音響シミュレーションを用い



法人番号	121003
プロジェクト番号	S1311003

で作成し、音源位置を探索する課題を行った\*16。「迷い行動と残響の関係を検討するための地下街シミュレータの構築」および、「音声による方向指示の与え方による 3D 迷路上での迷い行動の調査」の 2 点について視聴実験を実施した。

<優れた成果が上がった点>：地下街シミュレータでは、音響シミュレーション（ODEON）により再現された地下街内における誘導サイン音の聴こえ（聴覚刺激）と、3DCG ソフトで再現された地下街内の見え（視覚刺激）をあわせて呈示した。地下街内を移動して音源位置を特定することを課題とする視聴実験を行い、音源であるサイン音の発生位置によって「迷い」行動が現れる地点にずれが生じることが確認された\*16。

音声による方向指示を用いた 3D 迷路に関する研究では、方向指示音声として「意味手がかり（右 / 左などの方向を指示する言葉を手がかりとする条件）」「定位感手がかり（移動を指示する方向に定位感を持たせた音声を手がかりとする条件）」の 2 種類を利用した実験を実施した。「意味手がかり」条件では、視野内にある通路上で複数の角が見えているとき指示がでてきた場合、どちらの角でまがればよいのか迷う場面があった。「定位感手がかり」条件では、曲がるべき角での方向転換がしやすいものの、前後の違いがわかりにくく迷う場面があった。

<課題となった点>：地下街シミュレータを用いた経路探索課題では、シミュレーション精度などが問題となり、実空間との違いが大きかったことからシミュレーションの精度や課題についての再検討が必要と考えられる\*16。3D 迷路探索課題では、ナビゲーションを目的とした音声メッセージに含まれる「意味」と「定位感」による「迷い」行動における違いは明確にはならなかった。ただし、それぞれの音声条件において「迷い」行動を生むことにつながる「わかりやすさ」「わかりにくさ」の質的な違いについて、参加者の主観的なコメントから明らかにすることができた。

<研究期間終了後の展望>：地下街シミュレータでは、90 度単位の方向転換と 1 ブロックずつの移動のみが可能となっているが、今後、より細かい操作が可能なシミュレータの構築により、避難行動におけるシミュレーションベースでの行動分析が進むことが期待される。避難行動の際に、より迷いにくく、的確に非常口までの誘導が行えるような、視覚的・聴覚的なサインの提示位置に関する知見が得られることが期待される。

<研究成果の副次的効果>：実際の地下街やビル内をモデルとしたシミュレーションを構築することで、安全性の事前チェックや安全設計を観点としたコンサルテーションなどへの活用が期待される。

#### 4.2 音声単語親密度、話速、ポーズ長が文章理解に与える影響

理解しやすく聞き取りやすい公共放送文を作成し、発話するための検討として、1.単語親密度と連想語が放送文理解に与える影響に関する検討および、2.話速、ポーズ時間長が文理解に与える影響に関する検討を行った。前者の研究では、公共放送の指示内容を聴取し、その指示内容を理解し、行動するためにはどのような単語を使用すれば分かりやすいのかについて単語親密度と文脈や聴取状況における連想語が文章理解に与える影響について Web で公開されている非常放送文を収集・調査および、聴取実験を行い検討した。非常放送文を収集・調査および、聴取実験結果から、音声単語親密度が高い単語が必ずしも刺激文の理解向上に貢献するとは考えにくく、文脈や被験者が聴取する環境、心理状態などから連想されやすい単語が刺激文の理解向上に貢献するのではないかと考えられた。\*17

後者の研究では、発話者の話速やポーズ時間はどのように設定すれば聞き取りやすく理解しやすくなるのかについて 2 種類の話速変更方法で作成した音声刺激を用いて雑音がある条件下で 20 代健聴者と 65 歳以上の高齢者を対象に聴取実験を行い検討した\*18。さらに、合成音声を使用した実験により句読点に対応するポーズ時間長が聞き取りやすさや理解しやすさに与える影響についての検討を加えた。

<優れた成果が上がった点>：特に騒音や残響がある音環境下において理解しやすく分かりやすい文章は、単語親密度が高い単語を使用して作成することが一般に重要であると考えられているが、本研究結果から、高い音声単語親密度の単語が必ずしも刺激文の理解向上に貢献するとは考えにくく、文脈や被験者が聴取する環境、心理状態などから連想されやすい単語が刺激文の理解向上に貢献することが明らかとなった。\*17 さらに、特に高齢者においては発話文章中の句読点に対する適切なポーズ時間の設定が聞き取りやすさや理解の向上につながることも明らかとなった。\*18

<課題となった点>：防音室などを使用した聴取実験に比べ、実際の公共施設では聴取者の心理状態や放送設備など異なる部分が数多くあると考えられる。このため、実際のホールなどの公共施設を使用した聴取実験が必要であると考えられる。

<研究期間終了後の展望>：本研究で検討した聞き取り易くわかりやすい放送文にするための使用単語やアナウンスの話速、句読点に対応するポーズ時間長だけでなく放送文の文体や伝えたい内容を的確に表すキーワードの位置や数、視覚による補助などに関する検討を行う予定である。

法人番号	121003
プロジェクト番号	S1311003

<研究成果の副次的効果>：この結果から、理解しやすく聞き取りやすい音声合成手法に有効な指針を与えられると考えられる。従来、理解しやすく分かりやすい公共放送を行うためには、放送を行う音環境の整備やスピーカなどの放送設備の検討が主体的であったが、放送文に使用する単語や発話文章の文体、アナウンスの話速、句読点に対応するポーズ時間長などソフトウェア面に関する検討もハードウェアに関する検討と同様に重要であることが示せたと考えられる。

#### (5)快適性向上のための音響情報伝達

##### 5.1 音環境デザインのための音響技術とロボティクス技術の融合

音デザインや音環境デザインについて、音響学分野で用いられてきた要素技術にロボティクス（ロボット工学）の技術を融合することにより、自律的・能動的に音響測定や音場制御を実現するための研究を行った\*19。

<優れた成果が上がった点>：移動ロボットを用いて自動的に小規模な空間（個人の部屋、学校の教室、会議室など）での多点のインパルス応答測定を行うことができた。また、小規模な残響可変装置を設計開発し、任意の地点における音場制御を自律的に行うことができた\*19。

<課題となった点>：空間の形状やロボットの駆動系（移動部）の影響を受けやすく、ハードウェアおよびソフトウェアのいずれとも精度向上のための改善が必要である。

<研究期間終了後の展望>：より大規模なロボットを製作し、大きな空間（コンサートホールのステージなど）への適用についても検討する。また、最適制御のためのアルゴリズムとして、機械学習等の知的制御や大規模データに基づく仕組みを導入することが有効と考えられる。

<研究成果の副次的効果>：制御機構や制御のためのアルゴリズムなどについては実用化が可能であり、より具体的な応用場面の検討についても考慮する。

##### 5.2 音声による効率的な情報伝達を指向した音声対話システム

インターネットに掲載されているニュース記事を伝達することを対象に、音声で伝えるための情報の構造化、発話内容の計画、計画に基づく対話システムの構築等を行った\*20。また、システムの音声合成の韻律制御や間の調整についての検討を行った\*21。

<優れた成果が上がった点>：音声対話を用いた情報伝達では、ユーザの質問に対してシステムが応答をするかたちのものが多かったが、ユーザの負荷が高い。一方、提案システムでは原則的にシステム主導権を取って発話をしているのに対し、ユーザが疑問や質問を持ったタイミングで簡単なアクションを取ることで詳細情報を得られるような工夫を行った。これにより、負荷の低いインタラクションで所望の情報を受け取れる音声インターフェースの実現が可能となった\*20。また、まとまった情報を複数の発話にわけて伝達するため、常に一定の調子で音声を合成するとユーザが情報をうまく受け取れず、アクションをとるべきタイミングもわからない。発話ごとの韻律をその役割に従って制御することや、またアクションをとるべきタイミングが分かりやすいような間の調整が可能となった\*21。

<課題となった点>：被験者実験を通じて、必ずしも全てのユーザが積極的にアクションをとるわけではないということが分かった。ユーザのアクションを誘発するような発話内容の計画、音声合成方式などを考える必要がある。

<研究期間終了後の展望>：様々な種類の情報を伝達できるようにシステムの拡充を行おうと考えている。

<研究成果の副次的効果>：ユーザのアクションに、相槌（了解）疑問など、直接的にシステムの動作に関わるもの以外に、感心、驚き、無関心など様々なものが表れることが分かった。

##### 5.3 スマートホン・タブレットによる簡易音場シミュレータ

音響技術のシミュレーション環境や高等教育機関での音響教育のツールとして、様々な音響現象を PC やスマートフォン、タブレット上で再現する Web 版シミュレーションプログラムを開発している。現在までに 8 本のシミュレータ教材を開発し、音響教育者に配布している\*22。

<優れた成果が上がった点>：これまでに開発してきた音響シミュレータでは、計算機的能力不足からリアルタイム性を落としている部分が存在した。具体的には、学習者が指定したパラメータを理論に当てはめて演算を行い、複数のフレームバッファに数コマの画像を作成して順次切り替えることによりアニメーション描画を行う手法を取り入れていた。このため、パラメータを指定した後に一呼吸置いてからアニメーションが開始されていた。パソコン上では、操作流儀としてパラメータを設定してから反映するためのボタンをクリックすることでアニメーションを開始することが普通であったが、昨今普及しているスマートデバイスでは、タッチやスワイプに即座に反応することが利用者から期待されている

法人番号	121003
プロジェクト番号	S1311003

\*22。

そこで、リアルタイム性とインタラクティブ性の向上を目的として、シミュレータの計算に GPU を活用して高速化する技法を検証した。この技法を取り入れることにより、シミュレートする範囲を拡大することや、計算点を増やして高精細にすることが可能となる。また、シミュレータの動作プラットフォームとして Web ブラウザを利用しているため、OS やハードウェアを問わずに利用できる\*23。

< 課題となった点 > : 利用者がシミュレータのパラメータを変更しながら、その影響を確認することが求められている。特に、教育用途では学習者の操作に追従して現象を可視化することが求められている。これまでの開発手法では、計算能力が不足していたことが課題であった。また、高速な CPU を持つパソコン上で実行させ、これまでの技法のまま高速化することを試みたが、スワイプ操作時に誤操作が発生した。これはスワイプに追従するフレームレートを確保できなかったことが原因であり、本研究の課題となった。

< 研究期間終了後の展望 > : 演算結果をディスプレイに表示するこれまでのシミュレータでは、複雑な現象を可視化すると却って見づらくなってしまふ。これに対して Virtual Reality や Augmented Reality、Mixed Reality など、いわゆる xR の技術が出現している。今回取り入れた技法では、これらの技術との親和性が高いので、xR に対応した「分かりやすい可視化」を行うことが可能となるものと考えられる\*23。

< 研究成果の副次的効果 > : 取り入れた開発技法により、これまでのシミュレータでは不可能であった演算をリアルタイムに行うことが可能となる。具体的には、計算点を増やして高精細に描画することも可能となった。また、この技法を公開することで、本研究グループ以外の開発者から別のシミュレータ教材が開発・発表されることが考えられる。

5.4 耳介の放射特性に基づく正中面における音源の仰角と頭部伝達関数の第 1 ノッチの周波数の定式化の試み

バイノーラルシミュレーションで用いる頭部伝達関数の個人化の一環として、正中面における音源の仰角と第 1 ノッチの周波数を関係づける研究を行った。その結果、これら 2 つの変数は、双曲線の漸近線の方程式で関係づけることができることが明らかになった\*24。

頭部伝達関数の第 1 ノッチ (N1) は正中面における音源定位の重要な手がかりの一つである。N1 の周波数は、音源が上方に近づくほど上昇し、下方に近づくほど下降することが知られているが、なぜそのような関係が生じるか明らかにはなっていない。これを明らかにするために、音源を外耳道の入口に置いて様々な周波数で励振し、周波数ごとに距離減衰で正規化した音圧レベルの頭部周辺における分布を可視化した。

< 優れた成果が上がった点 > : ある周波数における耳介の放射特性を音圧レベルの分布で表して解析することにより、N1 周波数と音源位置の関係を検討した。その結果、耳介の上方と下方の 2 方向に位相の異なる放射が生起し、その経路差が半波長となる空間位置に音圧レベルが低い領域が生じることが明らかになった。

< 課題となった点 > : 正中面における音源の仰角と N1 周波数は、耳介上に仮定した 2 つの放射点を焦点とする双曲線の漸近線の式で定性的に関係づけられることを示した。そして、この式により、音源が上方に近づくほど、N1 周波数が上昇することを示すことができた。しかし、放射はある程度の広がりを持つ領域で生じるため、2 つの放射点を簡単には特定できない。また、周波数の上昇と位相差の増大の関係性についても詳細に検討する必要がある。

< 研究成果の副次的効果 > : 耳介形状などから正中面における音源の仰角と N1 周波数を求めることが可能になると考えられる。

(6) 聴感を始めとする顧客の感性を考慮した設計手法

音を発する民生機器の商品設計に対して、顧客の感性に積極的に訴求するための、要求分析・機能設計・構造設計からなる感性設計手法を検討した。カメラのシャッター音を題材とし、印象解析、機器の音響振動解析、生体信号解析を実施、音を基軸とする商品価値をハードウェアの詳細設計に繋げる方法を確立した\*25。

< 優れた成果が上がった点 > : 使用状況 (ユースケース) によって要求が変わり、従来、要求分析において詳細に考慮することが困難であった顧客感性に対して、印象解析に使用状況を考慮することによって、商品が発する機器音のイメージを定量化 (感性品質) 商品のシステム要求におけるその定義を可能にした\*26。

< 課題となった点 > : 商品開発プロジェクトにおいては、専門領域や組織の壁が存在する。MDM (Multiple-Domain Matrix) を用いることにより、各プロセスで残さなければならない設計情報を明確化し、関係者間で共有可能なフレームワークを構築できることを示した\*26。

法人番号	121003
プロジェクト番号	S1311003

<研究成果の副次的効果> : あるシナリオに沿った時間軸での感性の変化を計測し、静的な心理測定の結果と組み合わせ解釈することによって、複数の感性の組み合わせからなる体験に対する、新たな価値創出の可能性があることを示した\*25。

-----

<自己評価の実施結果と対応状況>

自己評価体制として、学内において本プロジェクト研究メンバー以外の研究者も含む研究グループを音響工学フォーラムとして組織し、研究内容・研究費の配分方法などについて1~2月ごとに研究報告会・検討会を重ねてきている。学外への研究内容の発信・評価のためのシンポジウムについてもこのフォーラム組織で検討してきた。

<外部(第三者)評価の実施結果と対応状況>

外部評価として、平成27年度に学外へ向けたシンポジウムを開催し、プロジェクト研究内容の発表を行った。音響学会などに所属する関連分野の研究者数十名の参加を得て、討論・意見交換を行ったところ、研究の方向性、研究成果として概ね良好である旨の意見を頂いた。

12 キーワード(当該研究内容をよく表していると思われるものを8項目以内で記載してください。)

- (1) 公共空間                      (2) 安全性                      (3) 快適空間  
 (4) 音声情報                      (5) 避難誘導                      (6) 防災無線放送  
 (7) \_\_\_\_\_                      (8) \_\_\_\_\_

13 研究発表の状況(研究論文等公表状況。印刷中も含む。)

上記、11(4)に記載した研究成果に対応するものには\*を付すこと。

<雑誌論文>

- (1) ユースケースを考慮した要求分析に基づくコンシューマーエレクトロニクスの音質設計\*26, 山岸 和子, 大富 浩一, 関 研一, 西村 秀和, 日本機械学会論文集, 84 巻 859 号, pp.17-00307(2018), 査読あり  
 (2) システムモデルを活用したキーボードのキー入力に関する感性設計, 山岸 和子, 関 研一, 西村 秀和, 設計工学, [早期公開] 公開日 2018/03/20, Online ISSN 2188-9023, (2018), 査読あり  
 (3) Requirement analysis considering uncertain customer preference for Kansei quality of product, Kazuko YAMAGISHI, Kenichi SEKI, Hidekazu NISHIMURA, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 公開日 2018/03/30, Online ISSN 1881-3054, (2018), 査読あり  
 (4) Method for Updating Microphone Configuration in Audio Super-Resolution, Ryouichi Nishimura, Shuichi Sakamoto, Yoshifumi Chisaki and Zhenglie Cui, Journal of Information Hiding and Multimedia Signal Processing, Vol. 8, No. 6, pp. 1352-1361(2017), 査読あり  
 (5) Application of a smartphone for introductory teaching of sound environment: Validation of the precision of the devices and examples of students' work, Fumiaki Satoh, Kimihiro Sakagami, Akira Omoto, Acoust. Sci. & Tech., 37(4), pp.165-172 (2016), 査読有り  
 (6) A dipole model for estimating frequency versus elevation-angle trajectory of the first spectral notch of head-related transfer functions in the median plane, Takemoto, H., Mokhtari, P., Kato, H., Nishimura, R., and Iida, K., J. Acoust. Soc. Am. 140, 2957. (2016), 査読あり  
 (7) Estimation of time difference of arrivals between direct sound and reflected sounds using time-frequency information of a single-channel signal\*11, Irwansyah, Taira Onoguchi, Yoshifumi Chisaki, Acoust. Sci. & Tech., Vol. 37 Issue 1 Pages 36-39 (2016), 査読あり  
 (8) Automatic pause insertion system for emission timing control method on public address system, T. Onoguchi, M. Sakamoto, Y. Chisaki, Acoust. Sci. & Tech, Vol. 37, Issue 2 Pages 91-94, (2016), 査読あり  
 (9) Interactive simulators for acoustic education\*22, Hiroshi Suda, J. Acoust. Soc. Am. 140, 3314 (2016), 査読有り

法人番号	121003
プロジェクト番号	S1311003

- (10) A dipole model for estimating frequency versus elevation-angle trajectory of the first spectral notch of head-related transfer functions in the median plane\*24, Takemoto, H., Mokhtari, P., Kato, H., Nishimura, R., and Iida, K., J. Acoust. Soc. Am. 140, 2957. (2016), 査読有り
- (11) Secure Speech Encryption System Using Segments for Speech Synthesis\*1,2,3, M. Kohata, Proc. IHH-MSP 2014, pp.264-267 (2014), 査読有り
- (12) Personalization of head-related transfer functions in the median plane based on the anthropometry of the listener's pinnae\*15, Kazuhiro Iida, Yohji Ishii, Shinsuke Nishioka, J. Acoust. Soc. Am., 136(1), pp.317-333 (2014), 査読あり
- (13) 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\*7,8,9 森淳一, 横山栄, 佐藤史明, 橋秀樹, 騒音制御, 38(2), pp.123-131 (2014), 査読有り
- (14) Prediction of outdoor sound propagation by geometrical computer modeling\*8,9, Junichi Mori, Fumiaki Satoh, Sakae Yokoyama, Hideki Tachibana, Acoust. Sci. & Tech., 35(1), pp.50-54 (2014), 査読有り
- (15) 音環境導入教育へのスマートフォンの利用 - 精度の検証とサウンドマップの作例 -, 佐藤史明, 阪上公博, 尾本章, 日本音響学会誌, 70(5), p.260-265 (2014), 査読あり
- (16) 風による時変音場における音響インパルス応答測定, 佐藤史明, 日本風工学会誌, 39(1), pp.26-31, (2014), 査読有り
- (17) 演技指示の工夫が与える音声表現への影響, 宮島崇浩, 菊池英明, 白井克彦, 大川茂樹, 音声研究, 17(3), pp.10-23 (2013), 査読有り

#### <図書>

- (1) 「言語聴覚士テキスト 第 3 版」, 世木秀明, 大森孝一, 永井知代子, 深浦順一, 渡邊修編, 医歯薬出版株式会社, 分担執筆, (2018)
- (2) 「電子情報通信学会 100 年史」, 荳木禎史, 電子情報通信学会編, 電気音響部分分担執筆, 2017
- (3) 「頭部伝達関数の基礎と 3 次元音響システムへの応用」, 飯田一博, 日本音響学会編音響テクノロジーシリーズ 19, コロナ社, 2017
- (4) 「音響キーワードブック」, 荳木禎史, 日本音響学会編, コロナ社, 分担執筆, 編集幹事, 2016
- (5) 「音響キーワードブック」, 佐藤史明, 日本音響学会編, コロナ社, 分担執筆, 建築音響分野幹事, 2016

#### <学会発表>

- [1] 位相情報に着目した高解像度周波数分析法 (PLATE) の提案\*8, 長瀬翔斗, 大塚柊, 大里一矢, 高橋瑞希, 舟橋宏樹, 河納隼一, 近藤善隆, 福島学, 松本光雄, 風間道子, 手島祐二, 柳川博文, 日本音響学会春季講論, 1-P-40, (2018), 査読なし
- [2] 屋外拡声放送を用いた反射位置推定システムの設計と実装\*11, 荳木禎史, 鈴木優太, 増田聖宣, 日本音響学会春季講論, 2-P-1, (2018), 査読なし
- [3] 会話によるニュース記事伝達のための間の調整\*21, 高津弘明, 横山勝矢, 本田裕, 藤江真也, 林良彦, 小林哲則, 言語処理学会第 24 回年次大会, pp. 212-215, (2018), 査読なし
- [4] 民生機器の商品開発と感性設計\*25, 関 研一, 山岸和子, 西村秀和, 日本設計工学会誌, 53(9), (2018), 査読なし
- [5] コンシューマー製品のシステムモデルに基づく感性設計プロセス, 山岸 和子, 関 研一, 西村 秀和, 日本機械学会年次大会, 公開日 2018/03/25, Online ISSN 2424-2667 (2018), 査読なし
- [6] ALT-W による周波数変動を伴う信号解析に関する一検討\*6, 鶴飼拓也, 長瀬翔斗, 近藤善隆, 福島学, 松本光雄, 柳川博文, 日本音響学会春季講論, 1-P-15, (2017), 査読なし,
- [7] ALT-W を用いた周波数スペクトル分析精度向上と時間追従性 に関する一検討\*7, 長瀬翔斗, 舟橋宏樹, 河納隼一, 近藤善隆, 福島学, 松本光雄, 風間道子, 柳川博文, 日本音響学会秋季講論, 1-P-33, (2017), 査読なし
- [8] 受聴者の頭部形状による両耳間レベル差の推定 - 前後左右の非対称性に対応した頭部モデルの導入 -, 高橋和太, 石井要次, 飯田一博, 日本音響学会春季講論, 685-688 (2017), 査読なし
- [9] 災害等非常時屋外拡声システム性能確保のための ASJ 技術規準 (第 1 版), 佐藤逸人, 栗栖清浩, 荳木禎史, 鈴木陽一, 日本音響学会秋季講論, 1-5-8, (2017), 査読なし,
- [10] 災害等非常時屋外拡声システム性能確保のための ASJ 技術規準 (第 1 版), 佐藤逸人, 荳木禎史, 鈴木陽一, 日本音響学会 騒音・振動研究会, pp.1-7 (2017), 査読なし,
- [11] 屋外拡声放送を用いた反射位置推定システムの GUI に関する検討, 鈴木優太, 荳木禎史, 電子情報

法人番号	121003
プロジェクト番号	S1311003

- 通信学会 応用音響研究会 信学技報, vol. 117, no. 430, EA2017-95, pp. 13-18 査読なし,
- [12]防災行政無線屋外拡声レベルのU50に基づく最適設計\*10, 西村竜一, 坂本修一, 菘木禎史, 崔 正烈, 電子情報通信学会 応用音響研究会 信学技報, vol.117, no.515, EA2017-146, pp.245-250 査読なし
- [13]屋外拡声システムにおける回復力のあるノード間ネットワークの設計と実装\*10, 上田祐己, 菘木禎史, 坂本修一, 西村竜一, 崔 正烈, 電子情報通信学会 応用音響研究会 信学技報, vol.117, no.515, EA2017-147, pp.251-254 査読なし
- [14]災害情報の屋外音声伝達に関するA S J規準案, 鈴木陽一, 菘木禎史, 佐藤洋, 騒音制御 41 巻 3 号, pp.126-130(2017) 査読なし
- [15]WebGL を利用した音響教育用シミュレータ教材\*23, 須田宇宙, 日本音響学会, 音響教育研究会資料, Vol.9, No.1, pp.1-7, (2017), 査読なし
- [16]JavaScript によるサウンドプログラミングハンズオン講座\*23, 須田宇宙, 日本音響学会, 音響教育研究会, 日本音響学会, 音響教育研究会, 講演, (2017), 査読なし
- [17]感性をリアルタイムで測り製品に生かす試み(“デライト”を科学する), 満倉靖恵, 関 研一, 井上全人, 森田小百合, 西村秀和, 日本設計工学会誌, 52(7), pp.434-438 (2017), 査読なし
- [18]空間位置計測による聴取位置把握に関する一検討, 鶴飼拓也, 清水真大, 梶原百香, 長瀬翔斗, 舟橋宏樹, 福島学, 松本光雄, 柳川博文, 日本音響学会秋季講論, 1-P-10, (2016), 査読なし
- [19]History and activities of the Research Committee on Education in Acoustics in ASJ, Fumiaki Satoh, Takayuki Arai, Akira Nishimura, Acoust. Sci. & Tech., 37(4), pp.143-147 (2016)
- [20]Exhibition at ‘Summer-Holiday Science Square’ hosted by the National Museum of Nature and Science, Kanae Amino, Takayuki Arai, Fumiaki Satoh, Kentaro Nakamura, Akira Nishimura, Sakae Yokoyama, Acoust. Sci. & Tech., 37(4), pp.178-180 (2016)
- [21]受聴者の頭部形状による両耳間時間差の推定 -重回帰モデルの再検討- \*15, 石井要次, 木崎尚也, 吉田恵里, 飯田一博, 日本音響学会春季講論, 877-880(2016年3月) 査読なし
- [22]装着型眼球インタフェース i-eye, 加藤真規, 大川茂樹, インタラクシオン 2016, 2C45 (2016), 査読なし
- [23]残響可変装置とロボティクスの組み合わせによる小規模音場へのアプローチ\*19, 上原正志, 河合修平, 大川茂樹, 日本音響学会春季講論, 2-Q-5, (2016) 査読なし
- [24]Dynamic threshold for a peak detection of estimation method of time difference of arrivals between direct sound and reflected sounds from a single-channel signal\*11, Irwansyah, Taira Onoguchi, Yoshifumi Chisaki, 日本音響学会春季講論, 2-P-1, (2016) 査読なし,
- [25]Outdoor obstacles localization via the intersection of multiple ellipses - Application of single-channel TDOA estimation method - \*10, Irwansyah, T. Onoguchi, Y. Chisaki, T. Usagawa, 日本音響学会春季講論, 2-7-11, (2016) 査読なし,
- [26]A Spoken Dialog System for Coordinating Information Consumption and Exploration\*20, Shinya Fujie, Ishin Fukuoka, Asumi Mugita, Hiroaki Takatsu, Yoshihiko Hayashi, Tetsunori Kobayashi, Proc. of ACM SIGIR Conference on Human Information Interaction and Retrieval, CHIIR 2016, pp. 253-256, (2016)
- [27]会話による情報伝達における発話系列の韻律分析\*21, 福岡維新, 高津弘明, 藤江真也, 林良彦, 小林哲則, 第 30 回人工知能学会全国大会, 2P1-5in1, (2016), 査読なし
- [28]意図性の異なる多様な情報行動を可能とする音声対話システム\*20, 高津弘明, 福岡維新, 藤江真也, 林良彦, 小林哲則, 第 30 回人工知能学会全国大会, 2O4-OS-23a-3in2, (2016), 査読なし
- [29]音響シミュレータ教材を用いた体験型授業について\*22, 須田宇宙, 電子情報通信学会技術研究報告, vol.116, no.54, EA2016-5, pp.31-34, (2016), 査読なし
- [30]受聴者の頭部形状による両耳間時間差の推定\*15, 石井要次, 木崎尚也, 吉田恵里, 飯田一博, 日本音響学会秋季講論, 447-448(2015年9月) 査読なし
- [31]正中面内の前後および上方向から同時に発せられた複数の単語の了解度\*15, 大石賢志, 飯田一博, 日本音響学会秋季講論, 1037-1038(2015年9月) 査読なし
- [32]単一エコーの入射方向が単語了解度に及ぼす影響\*15, 向井玄典, 石井要次, 大竹隼人, 矢野修平, 飯田一博, 日本音響学会秋季講論, 987-990(2015年9月) 査読なし
- [33]単一エコーの入射方向が単語了解度に及ぼす影響\*15, 向井玄典, 石井要次, 大竹隼人, 矢野修平, 飯田一博, 日本音響学会聴覚研究会資料, H-2015-76(2015年7月) 査読なし
- [34]反響・残響下での避難誘導サイン音により生じる「迷い」の分析\*16, 山崎 治, 小嶋直樹, 日本認知科学会第 32 回大会, (2015) 査読なし

法人番号	121003
プロジェクト番号	S1311003

[35]白色雑音の音像の幅 -低域あるいは高域からの帯域制限による変化-\*5, 柳川博文, 上野由莉奈, 鵜飼拓也, 篠原康平, 福島学, 日本音響学会秋季講論, 1-P-11, (2015), 査読なし

[36]時間追従による過渡的伝搬特性計測の一検討, 福島学, 鵜飼拓也, 篠原康平, 河納隼一, 近藤喜隆, 窪田泰也, 柳川博文, 日本音響学会秋季講論, 1-P-12, (2015) 査読なし

[37]音響測距法を用いた宅内における人の動き検知への適用事例, 河納隼一, 近藤喜隆, 福島学, 松本光雄, 柳川博文, 日本音響学会春季講論, 1-Q-22, (2015), 査読なし

[38]気象条件が防災放送の了解度に及ぼす影響-無響室での音場再生とバイノーラルシミュレーションの比較\*14, 飯田一博, 野村宗弘, 石井要次, 大島俊也, 内藤大介, 日本音響学会春季講論, pp. 1489-1492 (2015) 査読なし

[39]バイノーラル再生による屋外防災放送の単語了解度の再現精度\*14, 飯田一博, 野村宗弘, 石井要次, 大島俊也, 内藤大介, 日本音響学会建築音響研究会資料. AA 2015-26, pp.1-8 (2015) 査読なし

[40]広域放送の明瞭性確保のための諸々の検討\*12,13, 佐藤史明, 佐藤真生, 園田矢弓, 森淳一, 音響学会・建築音響研究会資料 AA2015-20, 7 pages, (2015) 査読なし

[41]小規模空間のための残響可変装置の開発\*19, 上原正志, 大川茂樹, 日本音響学会春季講論, 1-8-15, (2015) 査読なし

[42]HTML5 を用いた音響教育教材の開発と教育実践\*22, 須田宇宙, 音響学会秋季研究発表会(2015) 査読なし

[43]聞き手の反応を考慮した発話計画を用いた音声対話システム\*20, 藤江真也, 福岡維新, 麥田愛純, 高津弘明, 林良彦, 小林哲則, 日本音響学会秋季講演論文, pp.39-42, (2015) 査読なし

[44]効率的な情報伝達を指向した音声対話システムの提案\*20, 藤江真也, 福岡維新, 麥田愛純, 高津弘明, 林良彦, 小林哲則, 人工知能学会第 74 回言語・音声と対話処理研究会 (SIG-SLUD), pp. 7-12, (2015)

[45]音声モーフィングボコーダを用いた低ビット符号化に関する検討, 荒木隆太, 木幡稔, 日本音響学会秋季講論, pp.267-268 (2014) 査読なし

[46]Lempel-Ziv SOM とグラフマッチングを用いた音韻獲得アルゴリズム, 木幡稔, 日本音響学会春季講論, pp.521-522 (2014) 査読なし

[47]送信波と受信波の干渉に着目した音響距離推定手法の動体検知条件の一検討, 河納隼一, 近藤喜隆, 福島学, 柳川博文, 日本音響学会秋季講論, 1-Q-26, (2014), 査読なし

[48]風車騒音の測定システムの開発, 矢野博夫, 福島昭則, 太田達也, 小林知尋, 橘秀樹, 日本音響学会秋季講論, pp.1057-1060 (2014) 査読なし

[49]水平面内の異なる方向から同時に発せられた複数の単語の了解度\*14, 大石賢志, 飯田一博, 日本音響学会春季講論, pp.1183-1184 (2014) 査読なし

[50]受聴者の耳介形状による頭部伝達関数の個人化:再考\*15, 飯田一博, 石井要次, 西岡伸介, 電子情報通信学会技術研究報告. EA, 応用音響 114(3), pp.1-11 (2014) 査読なし

[51]正中面の best-matching 頭部伝達関数と両耳間時間差による 3 次元音像制御\*15, 宮本雄太, 石井要次, 飯田一博, 日本音響学会秋季講論, pp.605-608 (2014) 査読なし

[52]方向決定帯域の帯域幅の伸縮が知覚方向に及ぼす影響\*15, 船岡宗哉, 飯田一博, 日本音響学会秋季講論, pp.773-776 (2014) 査読なし

[53]耳介写真を用いた頭部伝達関数の個人化機能を搭載した聴覚ディスプレイ\*15, 野村宗弘, 飯田一博, 日本音響学会秋季講論, pp.773-806 (2014) 査読なし

[54]頭部伝達関数の第 1 第 2 ノッチの深さと音像定位精度の関係\*15, 橋本大地, 飯田一博, 日本音響学会秋季講論, pp.807-808 (2014) 査読なし

[54]Acoustic design of municipal public address systems using computer modeling and 3-dimensional auralization technique\*13, Junichi Mori, Sakae Yokoyama, Fumiaki Satoh, Hideki Tachibana, Proc. Forum Acusticum 2014,

法人番号	121003
プロジェクト番号	S1311003

R06A\_1,6-pages (2014) 査読なし

[56]可聴型シミュレーションシステムによる広域防災放送の明瞭性に関する実験的試み\*12,13, 森淳一、横山栄、佐藤史明、橘秀樹, 日本騒音制御工学会秋季講論, 2-2-19, 4-pages (2014) 査読なし

[57]介護記録作成支援システムにおける音声入力インタフェースの設計, 小川晃, 大川茂樹, 情報処理学会全国大会, pp.487-488 (2014) 査読なし

[58]咬み合わせ治療による発声改善における自由発話音声の分析\*19, 岩井修平, 大川茂樹, 日本音響学会秋季講論, 1-R-35, (2014) 査読なし

[59]合成音声の話速制御による残響下での明瞭度改善法\*1, 木幡稔, 日本音響学会秋季講論, pp.1141-1142(2013), 査読なし

[60]残響下において聞き取りやすい音声合成法に関する検討\*2, 木幡稔, 日本音響学会春季講論, pp.883-884 (2013), 査読なし

[61]白色雑音の持続時間による音像の大きさの変化\*4, 井上将一, 川納隼一, 平居宏康, 松本光雄, 福島学, 柳川博文, 日本音響学会秋季講論, 1-Q-9, pp.707-708 (2013) 査読なし

[62]妨害音声と着目音声の音像の方向の違いと単語理解度および聞き取りやすさの関係, 石井敏貴, 堀越基彰, 高梨祐希, 河納隼一, 平居宏康, 松本光雄, 福島学, 柳川博文, 日本音響学会秋季講論, 1-Q-31, pp.769-770 (2013) 査読なし

[63]住居に隣接した切取区間を走行する新幹線鉄道の騒音低減対策, 高梨敏和, 西村昌也, 坂本慎一, 矢野博夫, 建築学会大会, 40119, 環境工学 1, p.245-246 (2013) 査読なし

[64]切取区間における鉄道騒音低減対策の検討, 西村昌也, 坂本慎一, 高梨敏和, 矢野博夫, 騒音制御工学会秋季講論集, p.163-166 (2013) 査読なし

[65]指向性音源による音響伝搬に関するフィールド実験, 高梨敏和, 矢野博夫, 坂本慎一, 横山 栄, 石井寛一, 日本音響学会, 騒音・振動研究会資料 N2013 p.1-8 (2013) 査読なし

[66]Estimation of spectral notch frequencies of the individual head-related transfer function from anthropometry of listener's pinna\*14, Yohji Ishii, Kazuhiro Iida, Proc. Meetings on Acoustics of ASA, 050174, 7-pages, (2013) 査読なし

[67]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\*12, 森淳一, 横山栄, 佐藤史明, 橘秀樹, 日本音響学会秋季講論, pp.1537-1540 (2013) 査読なし

[68]公共空間における音声伝達の可聴化シミュレーション\*12, 吉野真史, 森淳一, 佐藤史明, 木幡稔, 横山栄, 橘秀樹, 日本音響学会秋季講論, pp.1135-1136 (2013) 査読なし

[69]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\*12, 森淳一, 横山栄, 佐藤史明, 橘秀樹, 日本音響学会春季講論, pp.1161-1162 (2013) 査読なし

[70]咬み合わせ治療による発声改善における自由発話音声の分析\*19, 中西啓太, 岩井修平, 安藤正遵, 千崎一義, 大川茂樹, 日本音響学会秋季講論, 3-P-16 (2013) 査読なし

<研究成果の公開状況>(上記以外)



法人番号	121003
プロジェクト番号	S1311003

### シンポジウム・学会等の実施状況、インターネットでの公開状況等

#### <既に実施しているもの>

シンポジウム(第8回CITフォーラム)として、「安全・快適性向上のための音響情報伝達」をテーマに日本音響学会および日本騒音制御工学会の協賛を得て平成27年6月13日に実施した。内容は本研究プロジェクトの中間報告として9件の講演発表を行い、講演梗概集(70頁)を作成した。以下に講演題目と講演者を記す。

- (1) 残響下において聞き取りやすいアナウンス音声合成法\*1,2,3, 木幡稔
- (2) 音声単語親密度, 話速, ポーズ長が文章理解に与える影響\*17,18, 世木秀明
- (3) 音線法を用いた数値実験による指向性スピーカを用いた非常放送の明瞭性改善\*9, 矢野博夫
- (4) 広域放送の明瞭性確保のための幾つかの検討\*12, 佐藤史明
- (5) 気象条件が防災放送の了解度に及ぼす影響 - 無響室での音場再生とバイノーラルシミュレーションの比較 -\*14,15, 飯田一博
- (6) 視聴覚情報を手掛かりとした移動における「迷い」と残響の関係\*16, 山崎治
- (7) モノラル信号の物理特性と音像の幅\*4,5, 柳川博文
- (8) 快適コミュニケーションのための残響可変装置を用いた音環境デザイン\*19, 大川茂樹
- (9) スマートホン・タブレットによる簡易音場シミュレータ\*22, 須田宇宙

#### <これから実施する予定のもの>

### 14 その他の研究成果等

・木幡 稔「音声合成装置」, 特許第 6032832 号, 2016 年 11 月 4 日に特許取得

法人番号	121003
プロジェクト番号	S1311003

## 15 「選定時」及び「中間評価時」に付された留意事項及び対応

### <「選定時」に付された留意事項>

「地域との連携、若手研究者の育成、研究成果に対する学内外の評価体制に充分配慮されたい」との留意事項が付された。

### <「選定時」に付された留意事項への対応>

地域との連携については、防災無線放送の伝達品質を評価するための研究について習志野市から音源信号の提供や放送施設の使用などの協力を得た。また、習志野市から数十名の視察団を受け入れ、研究施設見学および研究内容の説明を毎年行うなど、地域との連携を図っている。

若手研究者の育成について、平成 25 年度に関連研究テーマによる博士課程学生の博士号修得が行われ、平成 26 年度にはポスドク研究者として研究プロジェクトに加わった。

さらに、本プロジェクト研究のテーマの一つである音の方向知覚・音像定位の精度向上に関して大学院生（博士後期課程）が研究を行い、平成 30 年 1 月に博士公聴会を開き、同 3 月に博士号が授与された。

学内の評価体制として、本プロジェクト研究メンバー以外の研究者も含む研究グループを音響工学フォーラムとして組織し、研究内容について 1~2 月ごとに報告・検討会を重ねてきている。学外への研究内容の発信・評価のためのシンポジウムについてもこのフォーラム組織で検討してきた。

学外の評価体制として、上記研究グループ（音響工学フォーラム）によって学外へ向けた関連情報の発信として、シンポジウム（第 8 回 CIT フォーラム）の開催が計画された。平成 27 年 6 月 13 日に、「安全・快適性向上のための音響情報伝達」をテーマに、日本音響学会および日本騒音制御工学会の協賛を得てシンポジウムを実施した。関連分野の研究者数十名の参加が得られ、討論・意見交換を行ったところ、本プロジェクト研究の成果と方向性について良好であるとの評価を得た。

### <「中間評価時」に付された留意事項>

該当なし

### <「中間評価時」に付された留意事項への対応>

法人番号	121003
プロジェクト番号	S1311003

## 17 施設・装置・設備・研究費の支出状況(実績概要)

(千円)

年度・区分	支出額	内 訳						備 考
		法 人 負 担	私 学 助 成	共同研究機関負担	受託研究等	寄付金	その他( )	
平成25年度	施設	0						
	装置	0						
	設備	0						
	研究費	29,473	16,626	12,847				
平成26年度	施設	0						
	装置	0						
	設備	15,768	6,435	9,333				
	研究費	11,203	6,347	4,856				
平成27年度	施設	0						
	装置	0						
	設備	0						
	研究費	11,380	6,470	4,910				
平成28年度	施設	0						
	装置	0						
	設備	0						
	研究費	9,700	5,704	3,996				
平成29年度	施設	0						
	装置	0						
	設備	0						
	研究費	9,700	5,605	4,095				
総 額	施設	0	0	0	0	0	0	0
	装置	0	0	0	0	0	0	0
	設備	15,768	6,435	9,333	0	0	0	0
	研究費	71,456	40,752	30,704	0	0	0	0
総 計	87,224	47,187	40,037	0	0	0	0	

## 18 施設・装置・設備の整備状況(私学助成を受けたものはすべて記載してください。)

《施設》(私学助成を受けていないものも含め、使用している施設をすべて記載してください。)(千円)

施設 の 名 称	整備年度	研究施設面積	研究室等数	使用者数	事業経費	補助金額	補助主体
津田沼校舎8号館		175 m <sup>2</sup>	5	10			
津田沼校舎1,2,7号館		350 m <sup>2</sup>	10	10			

※ 私学助成による補助事業として行った新增築により、整備前と比較して増加した面積

m<sup>2</sup>

法人番号	121003
プロジェクト番号	S1311003

《装置・設備》(私学助成を受けていないものは、主なもののみを記載してください。)

(千円)

装置・設備の名称	整備年度	型番	台数	稼働時間数	事業経費	補助金額	補助主体
(研究装置)				h			
				h			
				h			
				h			
(研究設備)				h			
可変残響音場シミュレーション設備	26	NL-62他	一式	3400	9,612	5,616	私学助成
低周波音・騒音測定分析システム	26		一式	6300	6,156	3,717	私学助成
音場シミュレーションシステム	17			5000			
デジタル音響信号処理システム	17			5000			
					h		
(情報処理関係設備)				h			
				h			
				h			
				h			
				h			

## 19 研究費の支出状況

(千円)

年度	平成 25 年度		
小科目	支出額	積算内訳	
		主な使途	金額
教育研究経費支出			
消耗品費	13,192	実験材料	13,192
光熱水費	0		
通信運搬費	0		
印刷製本費	0		
旅費交通費	234	国内旅費	234
報酬・委託料	0		
計	13,426		13,426
アルバイト関係支出			
人件費支出 (兼務職員)	343	実験補助, 研究補助, データ整理	343
			時給 1,000円, 年間時間数 343時間 実人数 5人
教育研究経費支出	0		
計	343		343
設備関係支出(1個又は1組の価格が500万円未満のもの)			
教育研究用機器備品	3,088	簡易型3次元音場シミュレーションシステム一式	3,088
教育研究用機器備品	1,494	放送音源用スピーカー一式	1,494
教育研究用機器備品	517	聴覚刺激提示用音響システム一式	517
教育研究用機器備品	4,189	可動吸音パネル	4,189
教育研究用機器備品	2,529	公共空間視覚情報シミュレーション装置一式	2,529
教育研究用機器備品	2,856	大型ディスプレイ	2,856
教育研究用機器備品	1,031	ダミーヘッドマイクロホン	1,031
図書	0		
計	15,704		15,704
研究スタッフ関係支出			
リサーチ・アシスタント	0		
ポスト・ドクター	0		
研究支援推進経費	0		
計	0		

法人番号	121003
プロジェクト番号	S1311003

(千円)

年度		平成 26 年度	
小科目	支出額	積算内訳	
		主な使途	金額
教育研究経費支出			
消耗品費	8,923	実験材料	8,923
光熱水費	0		
通信運搬費	0		
印刷製本費	0		
旅費交通費	952	国内外旅費	952
報酬・委託料	138	被験者実験等	138
その他	303	修繕費等	303
計	10,316		10,316
アルバイト関係支出			
人件費支出 (兼務職員)	130	研究補助	130
教育研究経費支出	0		
計	130		130
設備関係支出(1個又は1組の価格が500万円未満のもの)			
教育研究用機器備品	757	スピーカー	757
図書	0		
計	757		757
研究スタッフ関係支出			
リサーチ・アシスタント	0		
ポスト・ドクター	3,000		3,000
研究支援推進経費	0		
計	3,000		3,000

法人番号	121003
プロジェクト番号	S1311003

(千円)

年 度	平成 27 年度		
小 科 目	支 出 額	積 算 内 訳	
		主 な 使 途	金 額
教 育 研 究 経 費 支 出			
消 耗 品 費	8,022	実験材料	8,022
光 熱 水 費	0		
通 信 運 搬 費	0		
印 刷 製 本 費	199		199
旅 費 交 通 費	417	国内外旅費	417
報 酬 ・ 委 託 料	0		
そ の 他	262	修繕費 等	262
計	8,900		8,900
ア ル バ イ ト 関 係 支 出			
人 件 費 支 出 (兼 務 職 員)	344	研究補助	344
教 育 研 究 経 費 支 出	0		
計	344		344
設 備 関 係 支 出 (1 個 又 は 1 組 の 価 格 が 500 万 円 未 満 の も の)			
教 育 研 究 用 機 器 備 品	425	音響アナライザー	425
教 育 研 究 用 機 器 備 品	484	イヤシミュレータ	484
教 育 研 究 用 機 器 備 品	386	データレコーダ	386
教 育 研 究 用 機 器 備 品	241	エコースピーチ音源	241
教 育 研 究 用 機 器 備 品	140	マイクロホンカートリッジ	140
教 育 研 究 用 機 器 備 品	268	ノートパソコン	268
教 育 研 究 用 機 器 備 品	192	残響分離制御ユニット	192
図 書	0		
計	2,136		2,136
研 究 ス タ ッ プ 関 係 支 出			
リサーチ・アシスタント	0		
ポスト・ドクター	0		
研究支援推進経費	0		
計	0		

法人番号	121003
プロジェクト番号	S1311003

(千円)

年 度	平成 28 年度			
小 科 目	支 出 額	積 算 内 訳		
		主 な 使 途	金 額	主 な 内 容
教 育 研 究 経 費 支 出				
消 耗 品 費	6,280	実験材料	6,280	ソフトウェア, ハードディスク, 吸音材, ソフトライセンス
光 熱 水 費	0			
通 信 運 搬 費	4	駐車場代	4	道路地下トンネル内のフィールド実験機材搬入・撤収
印 刷 製 本 費	0			
旅 費 交 通 費	140	国内旅費	140	学会発表
報 酬 ・ 委 託 料	711	ソフトウェア年間保守	711	PULSEソフト
そ の 他	0			
計	7,135		7,135	
ア ル バ イ ト 関 係 支 出				
人 件 費 支 出 (兼務職員)	631	研究補助	631	時給 1,000円, 年間時間数 631時間 実人数 11人
教 育 研 究 経 費 支 出	0			
計	631		631	
設 備 関 係 支 出(1個又は1組の価格が500万円未満のもの)				
教 育 研 究 用 機 器 備 品	324	耳内挿入プローブ型マイクロフォンシステム	324	ヘッドホン装着時の受聴音圧計測
教 育 研 究 用 機 器 備 品	140	マイクロホン C414-XL II	140	指向特性切替型マイクロホン
教 育 研 究 用 機 器 備 品	724	ハンドヘルドアナライザー	724	多機能サウンドレベルメーターのハードウェアバージョンアップ
教 育 研 究 用 機 器 備 品	331	iMac Retina 5k Apple Z0SC	331	
教 育 研 究 用 機 器 備 品	275	13インチMacBookPro	275	
教 育 研 究 用 機 器 備 品	140	リファレンスクラス3ウェイカナルイヤホン	140	計測標準のイヤホン
図 書				
計	1,934		1,934	
研 究 ス タ ッ フ 関 係 支 出				
リサーチ・アシスタント	0			
ポスト・ドクター	0			
研究支援推進経費	0			
計	0			

法人番号	121003
プロジェクト番号	S1311003

(千円)

年度 平成 29 年度			
小科目	支出額	積算内訳	
		主な用途	金額
教 育 研 究 経 費 支 出			
消耗品費	4,311	実験材料	4,311
光熱水費	0		
通信運搬費	1,501	移設費	1,501
印刷製本費	0		
旅費交通費	0		
報酬・委託料	711	ソフトウェア年間保守	711
その他	0		
計	6,523		6,523
ア ル バ イ ト 関 係 支 出			
人件費支出 (兼務職員)	462	研究補助	462
教育研究経費支出	0		
計	462		462
設 備 関 係 支 出 (1個又は1組の価格が500万円未満のもの)			
教育研究用機器備品	420	ノートPC HP	420
教育研究用機器備品	238	D/DAコンバータ	238
教育研究用機器備品	425	シミュレーション用計算機	425
教育研究用機器備品	232	Mac BookCTO	232
教育研究用機器備品	126	ONO-LINK2(USB)	126
教育研究用機器備品	298	スタジオマイクロホン	298
教育研究用機器備品	264	音響ロガー	264
教育研究用機器備品	518	テトラ型A-formatマイクロフォン	518
教育研究用機器備品	194	1/8インチプリアンプ一体型マイクロホン	194
図 書	0		
計	2,715		2,715
研 究 ス タ ッ プ 関 係 支 出			
リサーチ・アシスタント	0		
ポスト・ドクター	0		
研究支援推進経費	0		
計	0		



# 第 2 部

## 1. 音源の設計:音声合成

### 残響下において聞き取りやすいアナウンス音声合成法

木幡 稔 (千葉工業大学 情報科学部 情報ネットワーク学科)

公共空間における非常時の避難誘導アナウンスは、その状況に応じて内容を適宜変更する必要がある。その制御や内容の即時的更新には、テキスト音声合成 (TTS) が適している。本研究では、テキスト音声合成を制御し、聞き取りやすくするための方式及びアルゴリズムを開発する。この技術を適用して空間の特性ごとに適応的に聞き取りやすいアナウンスを合成する具体的手法の実現を目指す。

#### 1.1 残響下での音声明瞭度に関する検討

従来まで、残響下において拡声された音声の明瞭度を評価する客観的尺度として、STI (Speech Transmission Index) が提案され、主観評価値に対して高い相関値を示すことが評価されている。しかしながら、STI は空間の伝搬特性 (インパルス応答) にのみ依存する評価量であり、TTS において制御可能なパラメータ (話速、話者、ピッチ、ポーズ、スペクトル加工等) に対しては非依存である。

しかしながら、本研究に先行する研究においては、話速や話者によって残響下での明瞭度は大きく変化することが確認されている。そこで、本研究では、TTS の制御パラメータに対しても依存して変化するような客観評価量、及びこれを利用した TTS 音声制御システムを提案する。

#### 1.2 音声に依存する残響下での客観評価量

本研究において提案する客観評価量を STIDs (Speech Transmission Index depending on speech) と呼ぶことにする。STIDs を求める方法を図 1.1 に示すとともに以下で説明する。話者や発話内容が様々な合成音声を用意し、インパルス応答をたたみこむことにより残響を付加する。残響付加音声より、その包絡線を抽出し、FFT した後に MTF (変調周波数) に対応した周波数での振幅スペクトル値を抽出する。並行して、インパルス応答より MTF 値を求め、これらを NN (ニューラルネットワーク) へ入力する。NN は複数の入力信号、単一の出力信号の形式で、この単一の出力信号を残響付加音声を被験者により評価した主観評価値を教師信号として学習する。

学習後の NN に対して、未学習の合成音声より上記と同様な方法で求めた振幅スペクトル値、及び MTF を入力すれば、当該の合成音声に依存した評価量である STIDs が NN 出力として得られる。

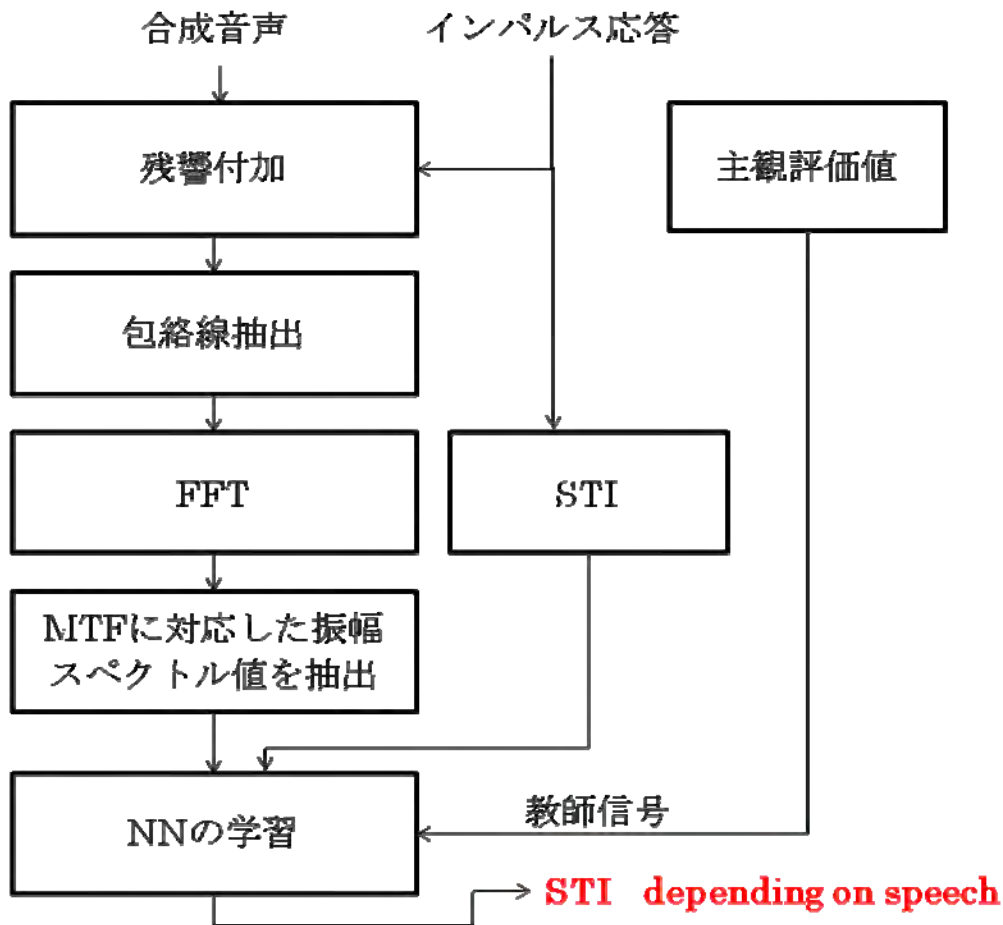


図 1.1 STIDs の学習方法

### 1.3 実験結果

まず、NN の構成について検討した結果、図 1.2 のようなユニット数が出力層に向けて単調に減少するピラミッド状のものが最も適することが分かった。

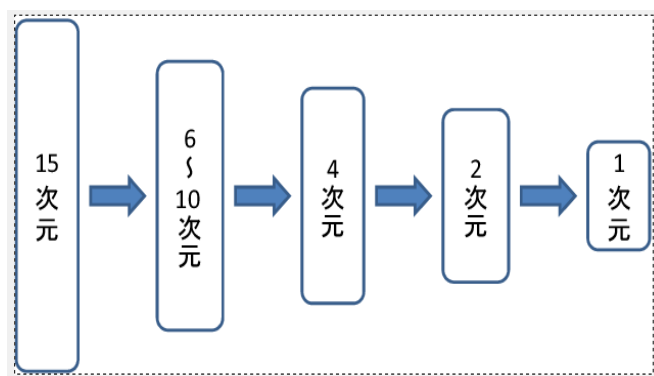


図 1.2 NN の構成

この構成の NN を用いて学習後、及び未学習の合成音声を用いて STIDs を求めた。そして、この未学習の合成音声に対する主観評価値を聴取実験により求め、両者の相関値を求めた。(図 1.3)

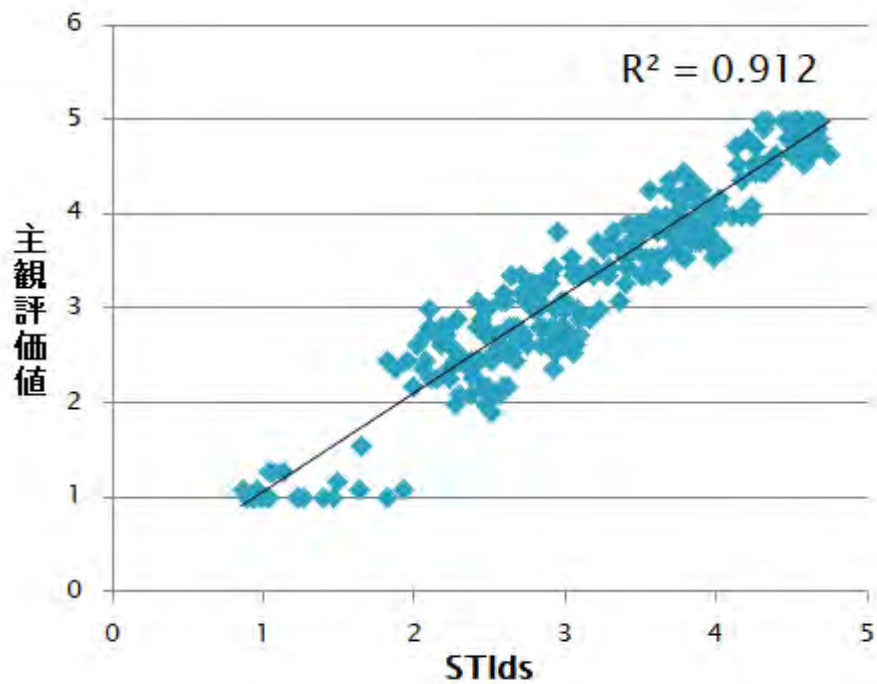


図 1.3

比較のために、音声非依存の STI と主観評価値との相関も調べた。(図 1.4)

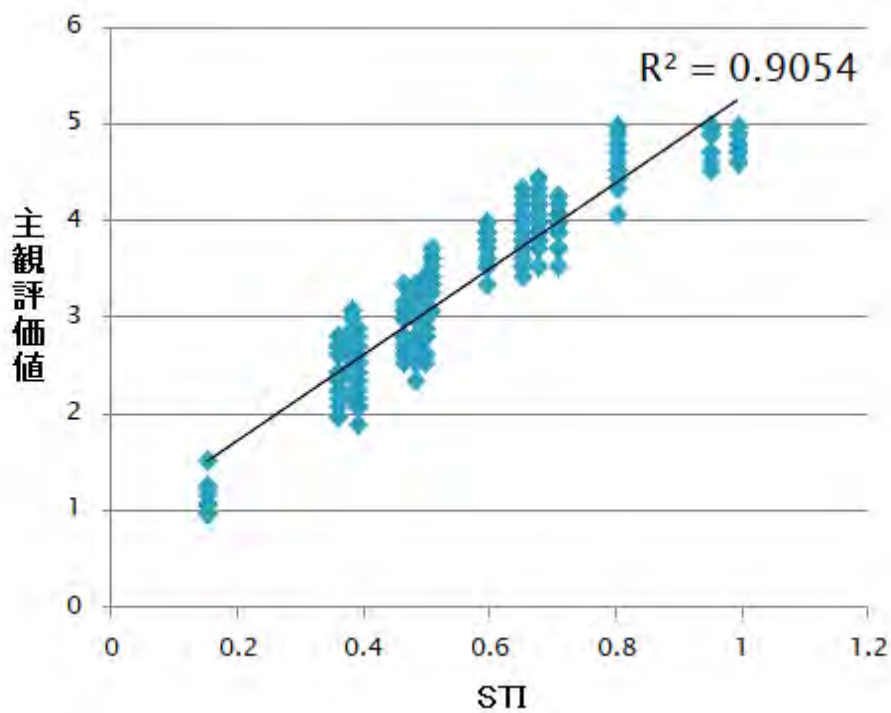


図 1.4

図に示す相関係数の 2 乗値より明らかなように、STI よりも STIds の方が主観評価値との相関係数が高いことが分かる。

#### 1.4 合成音声の制御方法の提案

音声に依存して合成音声をフィードバック制御によりコントロールする方法を提案した。(図 1.5)

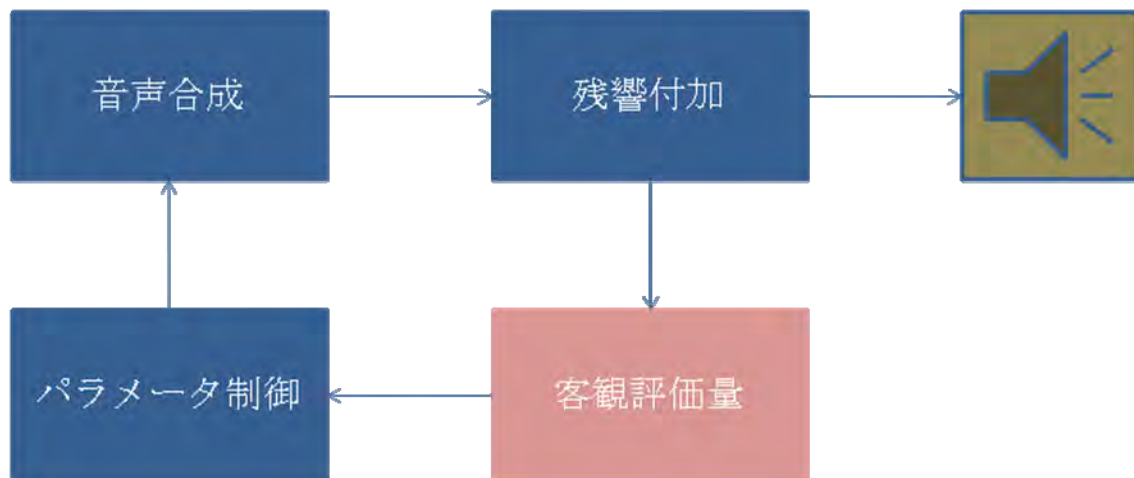


図 1.5

図 1.5 の「客観評価量」には STIDs などの音声に依存する客観評価量を用い、山下り法などのアルゴリズムを用いて合成音声のパラメータを制御する方式である。本方式は、「音声合成装置」、特許第 6032832 号として 2016 年 11 月 4 日に特許を取得している。

#### 1.5 結論

本研究における音源設計においては、合成音声を制御し、残響下で聞き取りやすくするために有効な音声依存型の客観評価量を設計することができた。

## 2. 音源の設計：サイン音

### 2.1 雑音の持続時間およびパワースペクトルによる音像の幅の変化

柳川 博文（千葉工業大学 情報科学部 情報ネットワーク学科）

これまで、残響時間の長い空間において音響的に避難誘導を図るためのサイン音の特性について調べてきた。その結果、信号持続時間、繰り返しの間の無音区間長さ、波形包絡線形状、パワースペクトルの形状などの最適条件を見いだした。これらは音像の大きさが小さいほど音源位置を知覚しやすいことを示している。そこで、音像の幅に着目し、各種実験を行った。試験音にはサイン音ではなく、対比する物理量、過渡的両耳間相関関数との対応を見るため白色雑音を用いている。過渡的両耳間相関関数の定義式と実測例を図 2.1.1 に示す。

$$\Phi(T_d, \tau) = \frac{\int_0^{T_d} h_L(t) \cdot h_R(t + \tau) dt}{\sqrt{\int_0^{T_d} h_L^2(t) dt \int_0^{T_d} h_R^2(t) dt}}$$

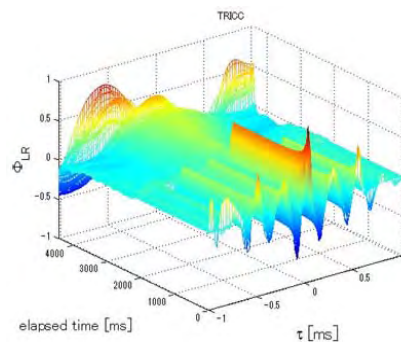


図 2.1.1 過渡的両耳間相関関数の実測例

過渡的両耳間相関関数の極大値をトレースしたものを TRICC (Transient Interaural Correlation Coefficients) と名付け両耳間相関係数の時間変化を解析している。持続時間  $T_d$  の白色雑音の残響空間での TRICC は図 2.1.2 のようになる。

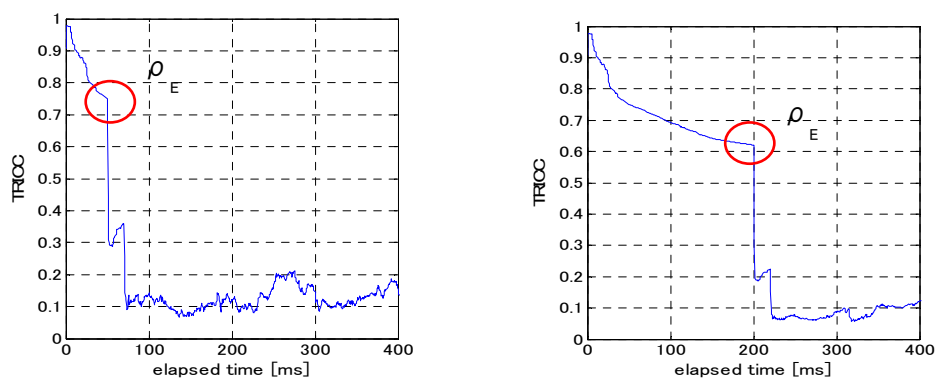


図 2.1.2 白色雑音の長さとの TRICC (左  $T_d=50$  ms, 右 200 ms)

図中の  $\rho_E$  は音源である白色雑音が定位置に残響のみになる直前の TRICC を示す。持続時間の異なる白色雑音に残響空間の両耳インパルス応答をたたみ込み、持続時間による音像の幅の違いをシェッフェの対比較法で尺度化したところ図 2.1.3 のような結果となった。

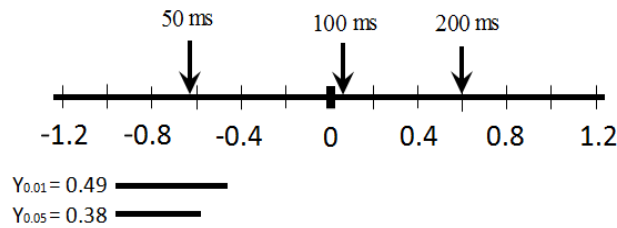


図 2.1.3 残響下の音像の幅と持続時間

これより残響下では白色雑音の持続時間が短いほど音像の幅が狭くシャープであることがわかった。白色雑音停止直前の TRICC 値  $\epsilon$  は白色雑音の持続時間が長いほど減少し、拡がり感と両耳間相関係数の関係とよく対応している [1]。しかし、音像の幅は  $\epsilon$  の値のみで決まるわけではなくラウドネスによっても変化し、ラウドネスが大きいほど音像の幅が広がる。しかも持続時間が長いとラウドネスも増大する。この実験ではあらかじめラウドネスが等しくなるよう白色雑音の振幅を調整している。

この実験過程で提示白色雑音に残響付加する前すなわち両耳インパルス応答を畳み込む前の白色雑音そのものの音像に幅があることがわかった。そこでこの幅が何によって変化するか明らかにしてそれを証明することとした。白色雑音の持続時間を変えたときのシェッフェの対比較法による結果を図 2.1.4 に、振幅（ラウドネス）を変えたときの結果を図 2.1.5 に示す。ここでも持続時間を変える場合はラウドネスが等しくなるようあらかじめ調整している。

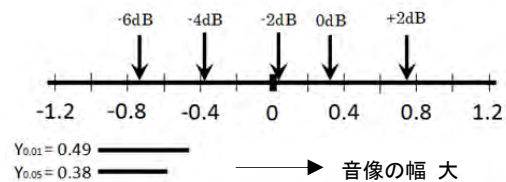
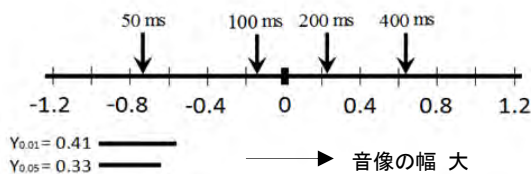


図 2.1.4 持続時間による音像の幅の変化 図 2.1.5 振幅（ラウドネス）による音像の幅の変化

図 2.1.4, 図 2.1.5 より、残響がなくても音像に幅があり、それが持続時間やラウドネスにより変化することが証明された。

サイン音の研究においてパワースペクトルの高域成分が大きいほど、音源位置が聞き取りやすいという結果を踏まえ、残響付加してないモノラルの白色雑音のパワースペクトル形状と音像の幅の関係を調べた。ここで音像の幅には信号の振幅も関係し、振幅すなわちラウドネスが大きいほど音像の幅は大きくなる。そこでこの問題に対処するために主観的等価値 PSE を導入した。極限法により基準音と比較音のラウドネスが等しくなる主観的等価値、具体的にはそのときの基準音と比較音の振幅レベル差と、同じく音像の幅が等しくなる基準音と比較音の振幅レベル差という2つの主観的等価値をそれぞれ  $PSE_L$  と  $PSE_W$  としそれを聴取実験により求めた。基準音は 150 Hz から 8,000 Hz に帯域制限した白色雑音で持続時間は 50 ms と 400 ms の 2 種とした。比較音はローパスフィルタにより基準音の高域をカットした白色雑音と、同様にハイパスフィルタにより低

域をカットした白色雑音である．表 2.1 にカットオフ周波数を示す．

表 2.1 各フィルタのカットオフ周波数

ローパスフィルタ	ハイパスフィルタ
1,000	250
1,414	353
2,000	500
2,828	707
4,000	1,000

ヘッドホンによるダイオティック受聴により実験した．白色雑音の持続時間は 5 ms と 400 ms の 2 種である． $PSE_L$  を求めるために被験者は基準音の後に提示された比較音の音量の大小を判断する．その後， $PSE_W$  を求めるために音像の幅の大小を判断する．被験者 5 名の結果を図 2.1.6 ，図 2.1.7 に示す．

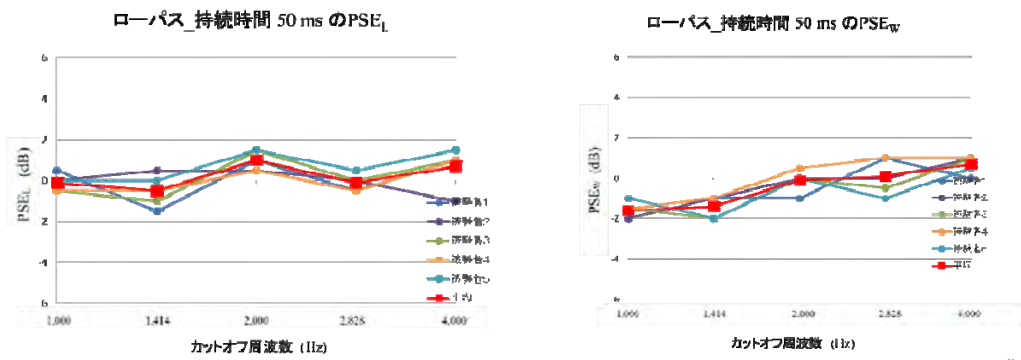


図 2.1.6 ローパスフィルタによる PSE の変化(左  $PSE_L$  , 右  $PSE_W$ )  $T_d=50$  ms

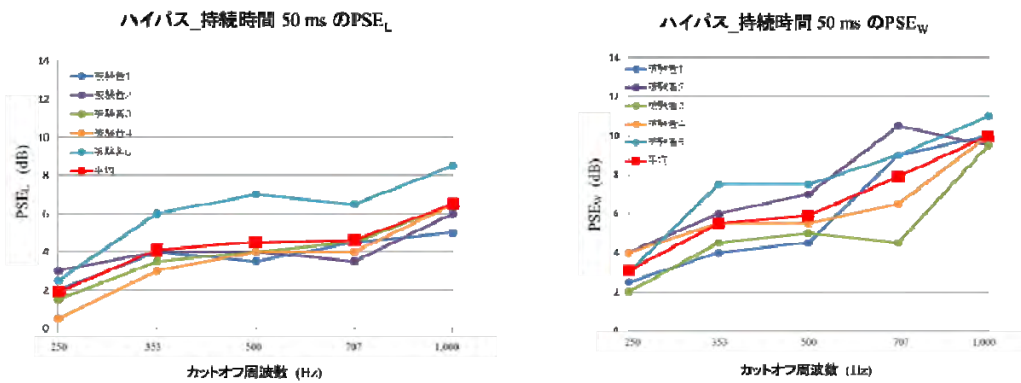


図 2.1.7 ハイパスフィルタによる PSE の変化(左  $PSE_L$  , 右  $PSE_W$ )  $T_d=50$  ms

( 1 )  $PSE_L$  はローパスではカットオフ周波数に対し -1 dB から 1 dB 程度の緩やかな変化を示し，ハイパスではカットオフ周波数の上昇とともに 2 dB から 7 dB へと大きく変化した．



( 2 )  $PSE_W$  はローパスではカットオフ周波数に対し-1 から 1dB 程度の緩やかな変化, ハイパスではカットオフ周波数の上昇とともに 4 dB から 10 dB へと大きく変化した .

( 3 ) ローパスでは  $PSE_L$  と  $PSE_W$  の変化は類似したものの, 若干  $PSE_W$  の方がカットオフ周波数の上昇に対し値が増加する傾向が見られた . ハイパスではカットオフ周波数の上昇とともに  $PSE_W$  の方は増加するが,  $PSE_L$  と比較して約 3 dB 程度大きくなった . この結果よりローパスでは明確に見られないが, ハイパスでは明らかに  $PSE_L$  と  $PSE_W$  が異なり  $PSE_L < PSE_W$  となっている . これより音像の幅にスペクトル変化の影響が振幅変化とは別に現れていることがわかる .

( 4 ) 持続時間 400 ms の場合も同様であり, 各 PSE とともに  $\pm 1$  dB 以内の差であった .

以上の結果はヘッドホン受聴によるものである . この場合モノラル音像は頭内定位してしまうことと, 普段, 人が物音を聞いている状況と比べ, 音源から鼓膜への伝達関数も異なっていることの 2 点が普段聞いている音に当てはまるか懸念材料となる . そこで, 2way ユニットからなるスピーカの各ユニットの音響中心が同一中心軸上にある同軸型スピーカ ( 図 2.1.8 , 図 2.1.9 ) を用い, 同様の聴取実験を行った .



図 2.1.8 使用スピーカ

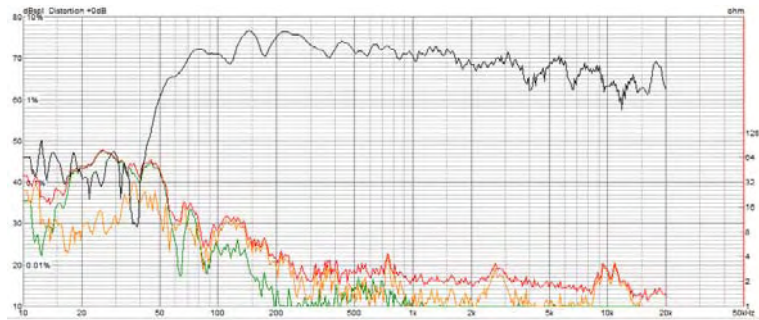


図 2.1.9 使用スピーカの特徴

ハイパスフィルタについての結果を図 2.1.10 , 図 2.1.11 に示す .

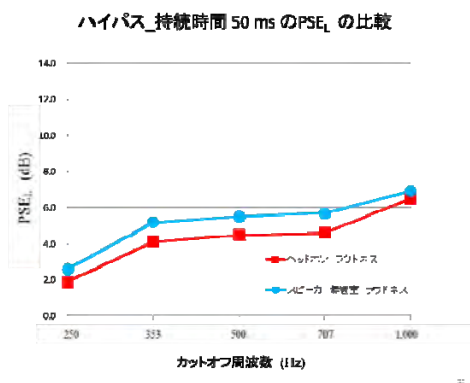


図 2.1.10 スピーカとヘッドホンの比較  $PSE_L$

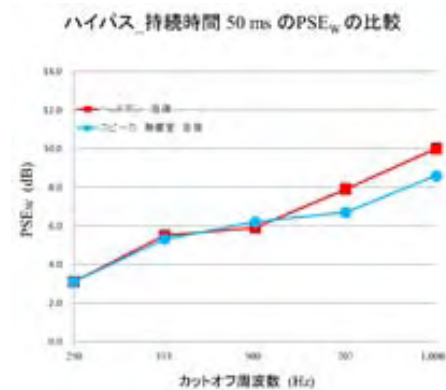


図 2.1.11 スピーカとヘッドホンの比較  $PSE_W$

図 2.1.10 , 図 2.1.11 よりスピーカ受聴でもほぼ同様な結果が得られることが示された [2] . 以上の結果は避難誘導サイン音やその他の音編集加工処理などに応用できる .

[1] 白色雑音の持続時間による音像の大きさの変化，井上 将一，河納 隼一，平居宏康，松本光雄，福島学，柳川博文，日本音響学会秋季講論，1-Q-9，(2013)査読なし

[2] 白色雑音の音像の幅 - 低域あるいは高域からの帯域制限による変化 - ，柳川博文，上野由莉奈，鵜飼拓也，篠原康平，福島学，日本音響学会秋季講論，1-P-11，(2015)査読なし

## 2. 音源の設計：サイン音

### 2.2 位相情報に着目した高解像度周波数スペクトル分析法

柳川 博文（千葉工業大学 情報科学部 情報ネットワーク学科）

#### 1. はじめに

信号の周波数スペクトル分析は様々な場面で必要となる。例えば、音像に関する種々の主観評価実験を行う際の、刺激音が想定通りの性質かつ品質であるかを確認するには、提示音を計測し周波数スペクトル分析を行うことが必要である。また、定常音を対象とする周波数スペクトル分析では、過渡的な信号を用いた主観評価実験そのものの信憑性を担保することが出来ない。

このため、高い周波数分解能でかつ過渡的な信号でも利用可能な時間追従性も併せ持つ周波数スペクトル分析手法を開発した[1], [2], [3].

#### 2. 周期分析における課題と解決策

フーリエ変換 (FT) は時間信号  $x(t)$  から

$$X(f) = \int_0^T x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (1)$$

但し、 $x(t)$  は周期  $T$  の信号、

により周波数スペクトル  $X(f)$  を求める。式(1)を離散化しベクトル表記すると

$$\mathbf{X} = \frac{\mathbf{c}^T \mathbf{x}}{\mathbf{c}^T \mathbf{c}} - j \frac{\mathbf{s}^T \mathbf{x}}{\mathbf{s}^T \mathbf{s}} \quad (2)$$

となる。式(1)は周期  $T$  が重要であることを示し、式(2)は離散計算結果が最小誤差 (LSE) 解となる事を示している。これは、周期  $T$  が正しければ最小誤差とはいえ近似解であったものが誤差無しすなわち、サイドローブなど偽のスペクトルが無くなることを示している。

実際の計算では周期  $T$  が未知であるため固定長の時間窓を使用しているのが現状である。また、偽スペクトルの影響を軽減するための周波数スペクトル平滑化としてハニング窓等の時間窓関数が用いられている。さらに、時間窓関数が振幅を小さくする即ち分析区間内のエネルギーが減少するため SNR 確保、また周波数スペクトル平滑化のため時間平均を用いることが多く、定常状態と見なせる時間波形を分析の対象としている。

このことから、周期  $T$  の推定を導入することで、1) 偽スペクトルの問題、2) 時間平均の必要性、がなくなり、高解像度の周波数スペクトル推定を短時間で取得することが可能であると考えられる。

#### 3. 周期推定による高解像度周波数スペクトル分析

周期分析精度向上として MW-STFT[[5]H. Fukuda, et al, IASTED International Conference, pp. 242-147, 1996]や GHA[[6]安部 素嗣, “一般化調和解析の周波数領域での振舞い：本当に GHA は FFT より精度がよいのか?”, 電子情報通信学会技術研究報告. EA, 応用音響 105(136), pp. 13-18, 2005-06-17]が提案されており、 $N$  点 DFT が  $N/2$  個の記述可能離散周波数であるのに

対し, MW-STFT が  $(3N^2 - 2N)/8 = \sum_{m=0}^{\frac{N-1}{2}} (N - m)$  個, GHA が理論無限個である.

まずはじめに, 周波数記述能力について検討する. 離散フーリエ変換 (DFT) と MW-STFT 法の周波数記述能力 (記述可能な離散周波数コンポーネント数 (No. of freq. comp.)) の比較を図 2.2.1 に示す. 図は横軸に分析点数 (分析区間長) を示し, 縦軸に表現可能な離散周波数コンポーネント数を示す.

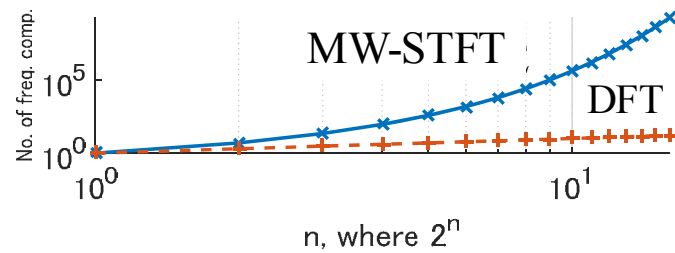


図 2.2.1 離散フーリエ変換と MW-STFT 法の周波数記述能力の比較

DFT は分析区間長  $N$  でサンプリング周波数  $f_s$  を分割した数値が離散周波数幅である. 一方, PLATE 法は分析区間長を  $N$  サンプルから  $(N/2)+1$  サンプルまで変化させることで記述可能離散周波数を変化させる. このため, 図 2.2.1 に示す通り, DFT は分析区間長と記述可能周波数コンポーネント数が直線の関係となるのに対して, PLATE 法は図 2.2.2 に示すように  $N/f_s$  から  $((N/2)+1)/f_s$  までの記述可能周波数コンポーネント数となるため,  $N$  が大きくなるほど記述可能周波数コンポーネント数が増加し, 最適周波数記述可能な離散周波数空間を使用することが可能となる.

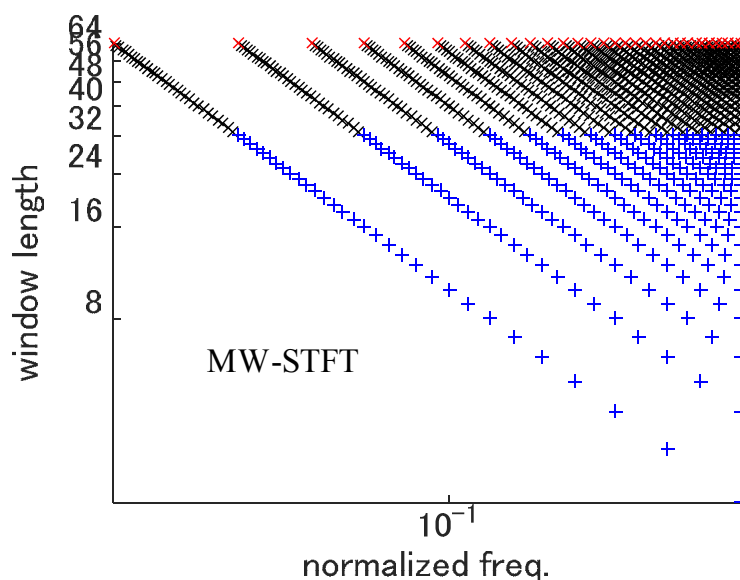


図 2.2.2 分析区間長を 64 サンプルから 2 サンプルとした時の記述可能周波数の関係

これらのことから, 周期  $T$  推定を行った後に周波数スペクトル分析することで偽スペクトルが少ない, すなわち短時間で高解像度周波数スペクトル分析が可能となることが確認できた.

これを実際に周波数スペクトル分析で使用するには、周期  $T$  推定の際に最適値を如何に判定するかを考えなければならない。GHA は元信号と推定信号の残差エネルギーを指標とし、MW-STFT は高調波ピーク (Harmonics Ceiling) を使用としている。この手法の場合、対象信号が周期信号または調波構造を有することが必要となる。しかし、聴知覚を調べるための刺激音は必ずしもこの条件を満たすとは限らない。

このため、対象信号に対する制約がより少ない条件下における周期  $T$  推定において最適値の判定を行う方法を考えなければならない。

ここで、自己相関関数は自己相似形を表すものであり、周期  $T$  の信号、 $x$  の分散が  $\sigma_x^2$  で

$$\gamma_{xx}(\tau) = \frac{1}{\sigma_x^2} \int_0^T x(t) \cdot x(t + \tau) dt \quad (3)$$

となる。この周波数スペクトルは

$$\begin{aligned} \Gamma_{xx}(f) &= \frac{2}{T} \int_0^T \gamma_{xx}(\tau) \cdot e^{-j2\pi f \tau} d\tau \\ &= |\Gamma_{xx}(f)| e^{j0} \end{aligned} \quad (4)$$

となり位相スペクトルが 0 である。 $X^*(f)X(f)$  は複素共役により位相相殺により値を 0 としているのに対して式(4)はそもそも位相が 0 である。さらに  $x(t)$  が、周期  $T/p$ 、但し  $p$  は整数、となる信号の合成波において、各周期の最小公倍数 (LCM)  $T_{LCM}$  が存在する。この周期  $T_{LCM}$  を整数  $n$  倍した  $T_{nLCM}$  においても式(4)の通り位相スペクトルが 0 となる。また式(3)は時間区間  $T$  以内の孤立波が混在しても式(4)が成立する。

そこでここでは  $T_{nLCM}$  を MW-STFT と同様に LSE 解が成立する直交座標空間とし、そこで自己相関関数の位相スペクトルが 0 に最も近くなる分析区間長を探索する PLATE 法 (Phase based seeking LCM time window length of in-term signals by Adapting Time-window length for DFT Extension method : 位相情報規範最小公倍数周期探索型 DFT) を考案した。

#### 4. PLATE 法の検証

PLATE 法の有用性を検証するため、STFT (時間窓関数に Hanning 窓を使用) との比較結果例を図 2.2.3 に示す。図は横軸に離散周波数、縦軸に振幅を dB 表示で示す。ここでは時間平均回数は 1 回 (平均操作無し) としている。

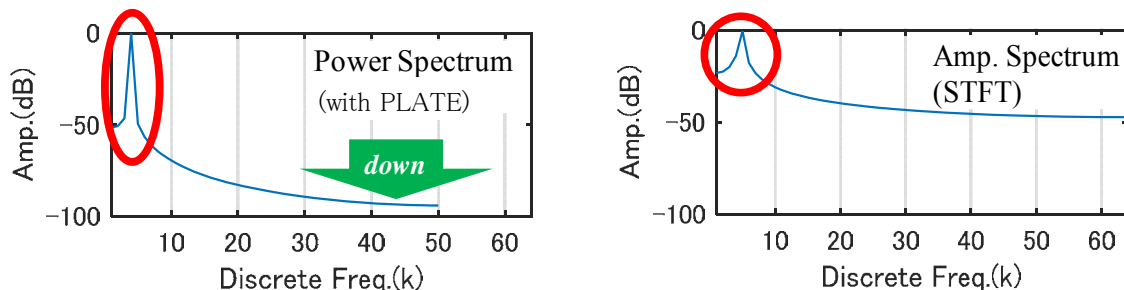


図 2.2.3 提案手法 (PLATE 法) と従来法 (STFT+Hanning) の推定振幅スペクトル比較

過渡的な信号の解析例を図 2.2.4 に示す。図は上段に時間波形，中段に提案手法による時間周波数分析結果，下段に従来法（STFT+Hanning 窓）による分析結果を示している。上段は横軸に時間を秒で示し，縦軸に振幅を示している。中段および下段は，右手方向に時間を秒で示し，左手方向に周波数を Hz で示し，高さ方向に振幅を dB で示している。いずれも周波数スペクトル推定時の時間平均回数は 1 回（平均操作無し）としている。

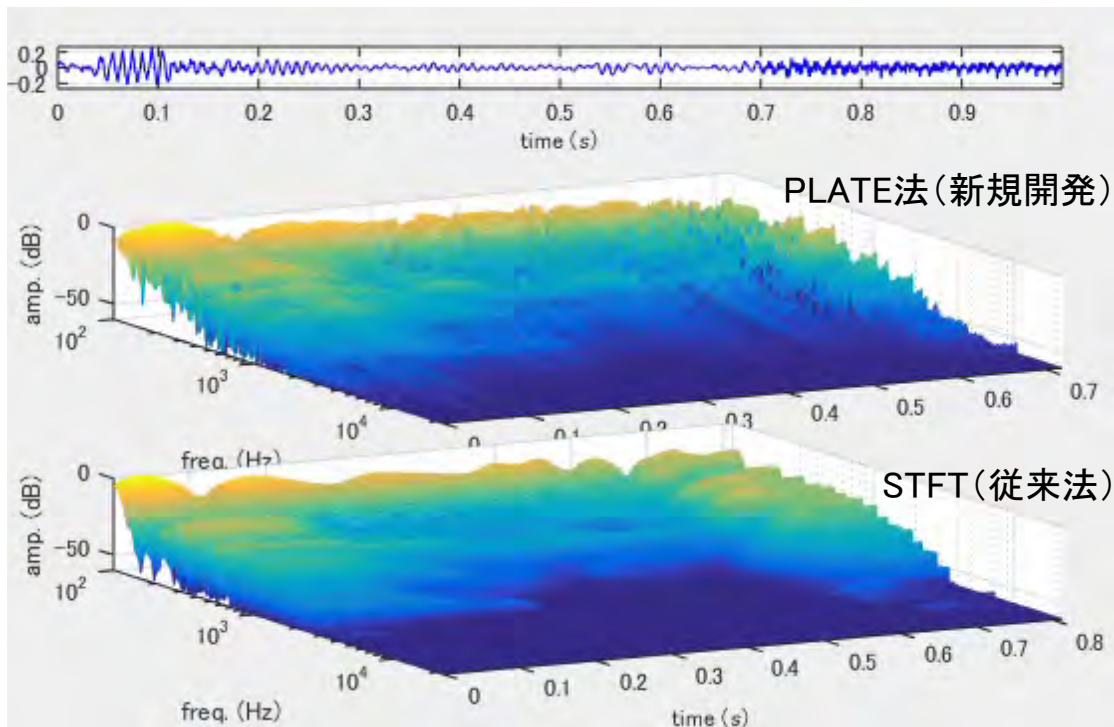


図 2.2.4 過渡的な信号の提案手法と従来法での分析結果の違い

図 2.2.4 より本研究で必要な，高い周波数分解能でかつ過渡的な信号でも利用可能な時間追従性も併せ持つ周波数スペクトル分析手法として開発した PLATE 法が利用可能であると判断する。

- [1] ALT-W による周波数変動を伴う信号解析に関する一検討，鶴飼拓也，長瀬翔斗，近藤善隆，福島学，松本光雄，柳川博文，日本音響学会春季講論，1-P-15，(2017) 査読なし
- [2] ALT-W を用いた周波数スペクトル分析精度向上と時間追従性に関する一検討，長瀬翔斗，舟橋宏樹，河納隼一，近藤善隆，福島学，松本光雄，風間道子，柳川博文，日本音響学会秋季講論，1-P-33，(2017) 査読なし
- [3] 位相情報に着目した高解像度周波数分析法（PLATE）の提案，長瀬翔斗，大塚柊，大里一矢，高橋瑞希，舟橋宏樹，河納隼一，近藤善隆，福島学，松本光雄，風間道子，手島祐二，柳川博文，日本音響学会春季講論，1-P-40 (2018) 査読なし

### 3. 電気音響システム

## 音線法を用いた数値実験による指向性スピーカを用いた 非常放送の明瞭性改善

矢野 博夫（千葉工業大学 情報科学部 情報工学科）

本プロジェクト研究の大きな流れを大別すると、音源の設計（①音声合成，サイン音設計），伝送系に関する検討（②電気音響システム，③音環境・空間伝搬系）及び情報を受容する人間の聴覚・心理に関する検討（④聴覚・認識）となる．ここではこのうち伝送系の電気音響システムについて、公共空間におけるアナウンス放送の明瞭性を改善するためのスピーカシステムについての検討を行った．スピーカシステムには設置される空間の規模や形状，放送の目的に応じて，適切な指向特性を持たせる必要があるが，設置される空間特性を含めて検討する必要がある．そこで，種々の指向特性を持つスピーカシステムを道路トンネル内に設置した場合について，幾何音響理論に基づく数値計算手法により，各受音点のインパルス応答を計算した．それらの結果から明瞭性に関する物理指標としてSTIに着目し，各スピーカシステムに時間遅延を行った場合の明瞭性について検討を行った．<sup>[1]</sup>

#### 1. 数値計算に用いるスピーカ指向性の確認

公共空間内で用いられるスピーカは設置される空間，取付場所，サービスエリアの多様性から様々な指向特性のものが用いられる．ここでは道路トンネル内で多数配置され時間遅延システムの基で使用される場合を考慮して，3種類の指向性の異なるスピーカ（ホーン型，ラインアレイ型，平板型）を選んだ．これらについて無響室内で指向特性の測定を行い，その結果を数値計算の音源特性として用いた．

#### 2. 数値計算によるトンネル内音場のシミュレーション

大空間・公共空間においては残響が過大となりやすく，拡声放送の明瞭性を確保することが困難な場合がある．このような場合に，スピーカに適当な指向性を持たせることにより明瞭性の改善を行える可能性があるが，設置位置や台数など多様な条件について現場実測によって検討を行うのは困難が伴う．そこでスピーカをトンネル内音場に設置した場合のシミュレーションを音線法による数値実験により行った．トンネル形状は箱形直線状とし，吸音特性として道路路面は排水性舗装の吸音率（ $\alpha=0.3$ ，500Hz）を，それ以外の部分はコンクリート（ $\alpha=0.02$ ，500Hz）として設定した．音源を設置した．受音点はスピーカより100mまでは25m毎に，400mまでは50m毎に配置した．

ホーンスピーカを音源とした場合のトンネル内における25mから400mまでの距離減衰特性について，実測結果と音線法による数値計算結果について比較した．その結果はほぼ一致した減衰傾向が得られたが，スピーカ後方の2kHz帯域で最大4.5dBの誤差となった．

#### 3. 道路トンネル内における明瞭性の改善

トンネル内の避難誘導システムでは，マルチパスエコーを避けるために連続時間遅延システムを用いている．ここでは各スピーカ形式について，計算結果から得たインパルス応答を合成して用い，25m点から100m点までの明瞭性に関する物理指標としてSTI値を求めた．それによれば，いずれのスピーカについても時間遅延を行うことで明瞭性が改善されること，ホーン型，ラインアレイ型，平板型の順で明瞭性が改善される結果となった．



### 3.1 数値計算に用いるスピーカの指向性確認

#### (1) 無響室内におけるインパルス応答の測定

数値実験を行うにあたり、実験に用いる指向性スピーカの指向特性を把握するため無響室内でインパルス応答の測定を行った。

測定方法は、まず無響室内に各スピーカを1つずつ設置し、正面に受音点を高さ各スピーカのユニット中心になるように設置した(図3.1)。測定信号にはSwept-sine信号( $2^{17}$ , 63 Hz~12k Hz)を用いた。測定信号を音源となるスピーカから2回ずつ放射し、10度刻みで0~180度まで回転させ水平方向、および鉛直方向のSwept-sine応答の測定を行なった。測定した音源スピーカを図3.2に示す。ラインアレイスピーカについては、図3.3に示すように異なる2方向について測定した。

測定した各Swept-sine応答に対し、元信号の逆信号を畳み込み積分処理を施し時間圧縮することでインパルス応答を算出した。また、算出したインパルス応答に対し500Hz, 1 kHz, 2kHz帯域のオクターブバンドフィルタをかけ各スピーカの音圧指向性を求めた。

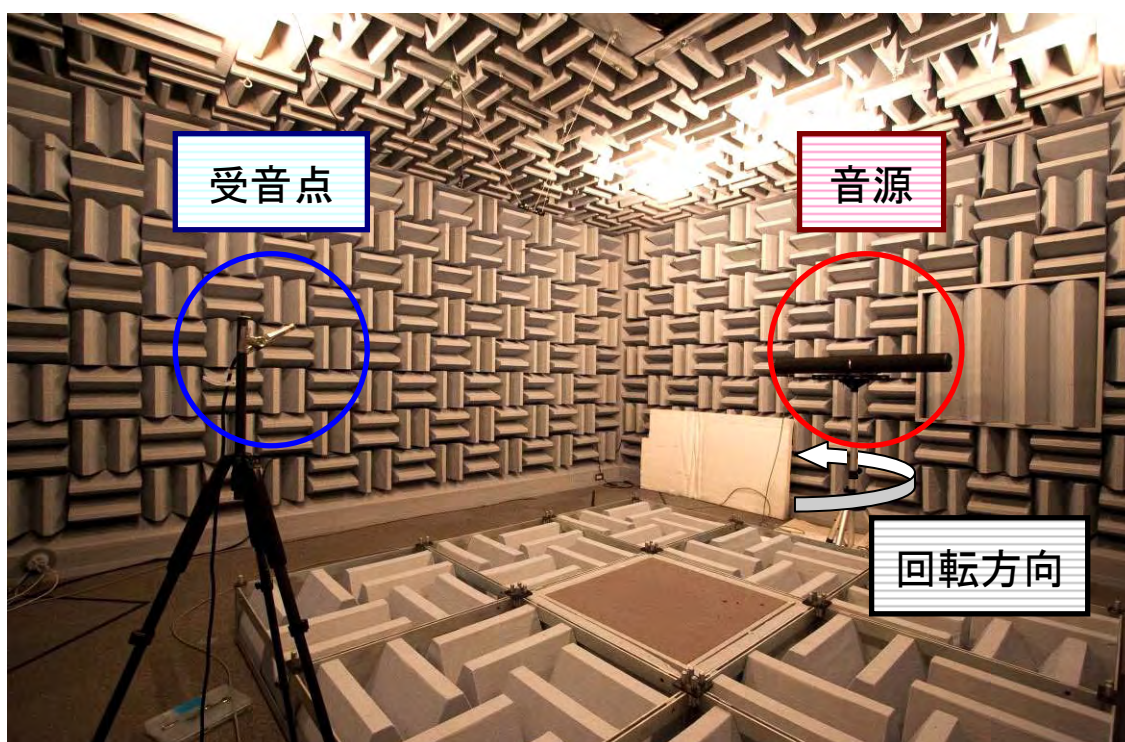
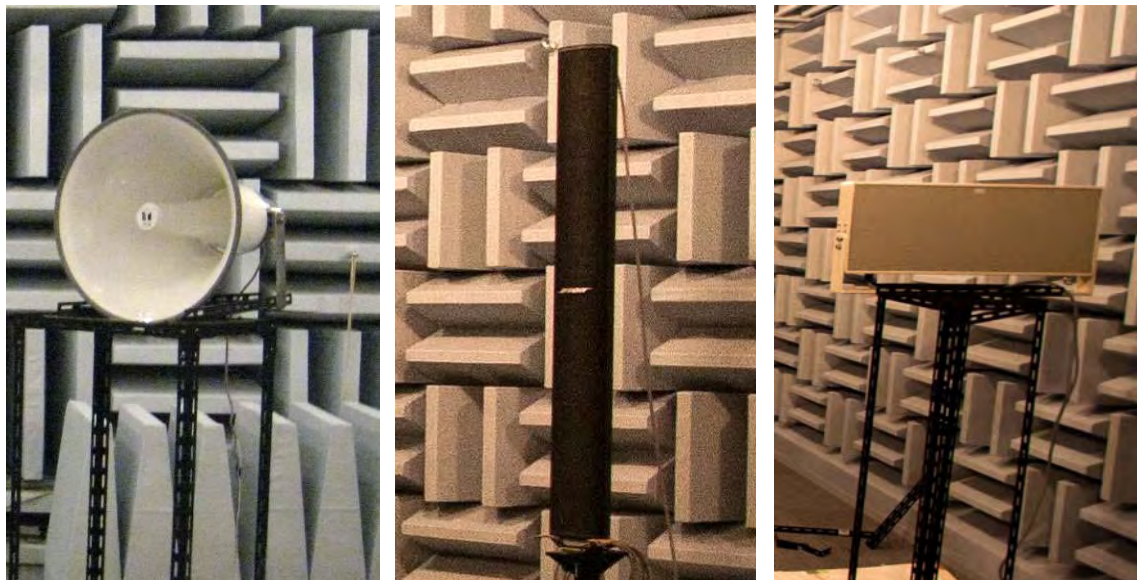


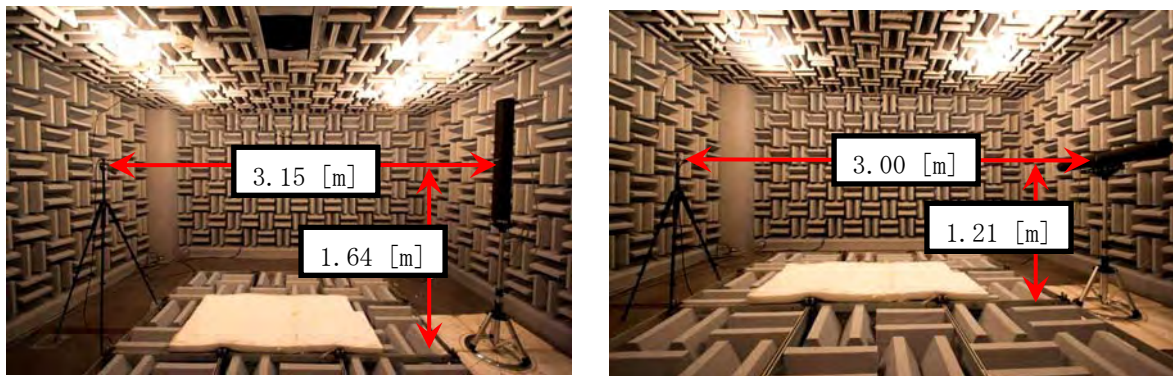
図3.1 無響室における指向特性の測定





(a) ホーンスピーカ (b) ラインアレイスピーカ (c) 平板スピーカ

図3.2 実験に用いたスピーカ



(a) 水平方向

(b) 鉛直方向

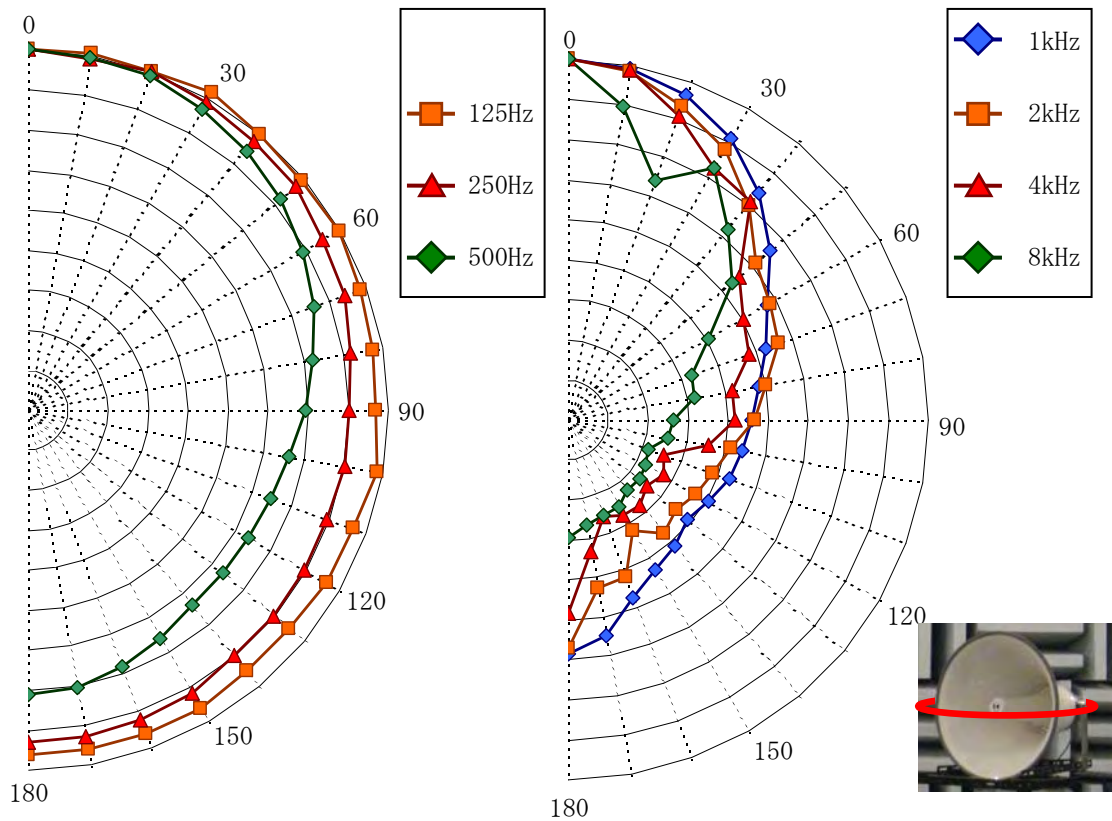
図3.3 ラインアレイスピーカのインパルス応答測定

## (2) 測定結果

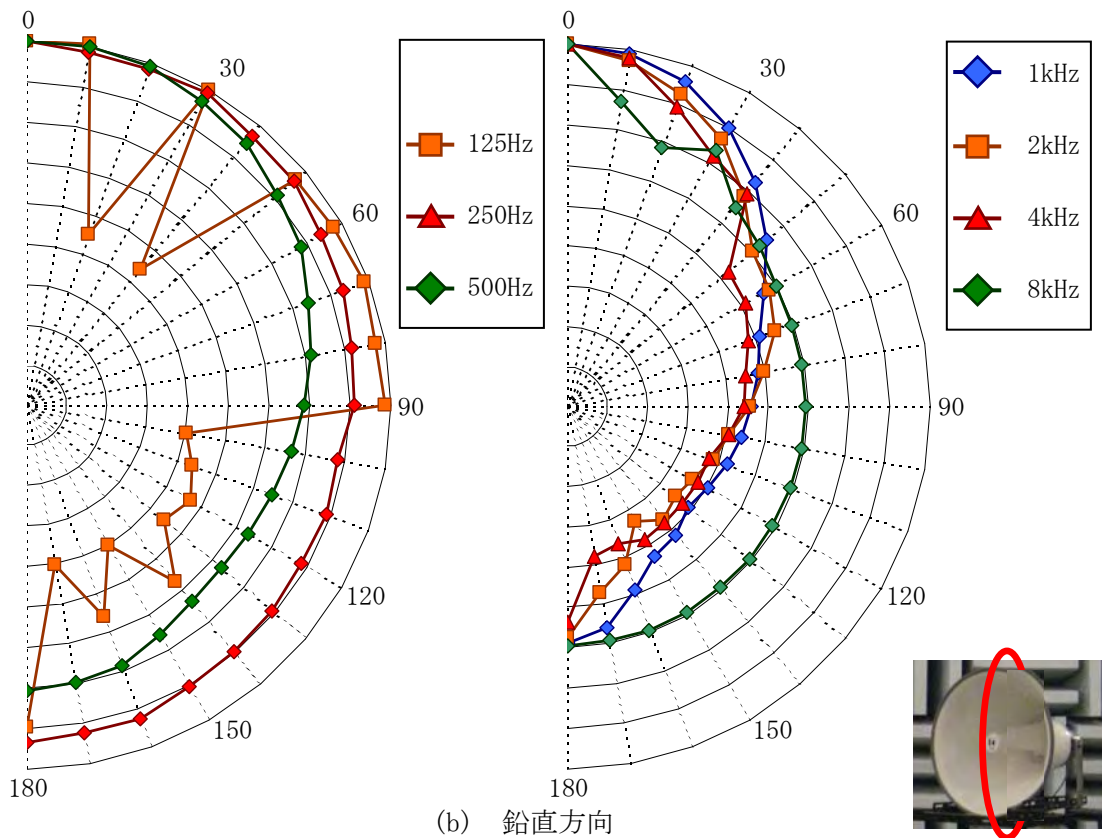
### 1) ホーンスピーカ

測定したホーンスピーカはトランペット型スピーカとも呼ばれており、ドライバーユニットとフレックスホーンを組み合わせたスピーカである。ユニットのサイズを基準として先端の直径が50 cmになるようエクスポネンシャルカーブを描いた形状をしている。公共空間においてアナウンスを放射する際によく利用されており、現状のトンネル内においては、このホーンスピーカを用いて非常放送による避難誘導アナウンスが行われている。

測定したインパルス応答より算出したホーンスピーカの音圧指向性を図3.4に示す。ホーンスピーカの測定では125~8kHz帯域までのオクターブバンドにおいて音圧指向性を測定したため、63Hzは除外している。図より、水平方向・鉛直方向のいずれも高周波数帯域ほど指向性が鋭くなっていることがわかる。また、1k Hz帯域以上の指向性は水平方向・鉛直方向ともに似たような指向性になっていることが確認できる。



(a) 水平方向



(b) 鉛直方向

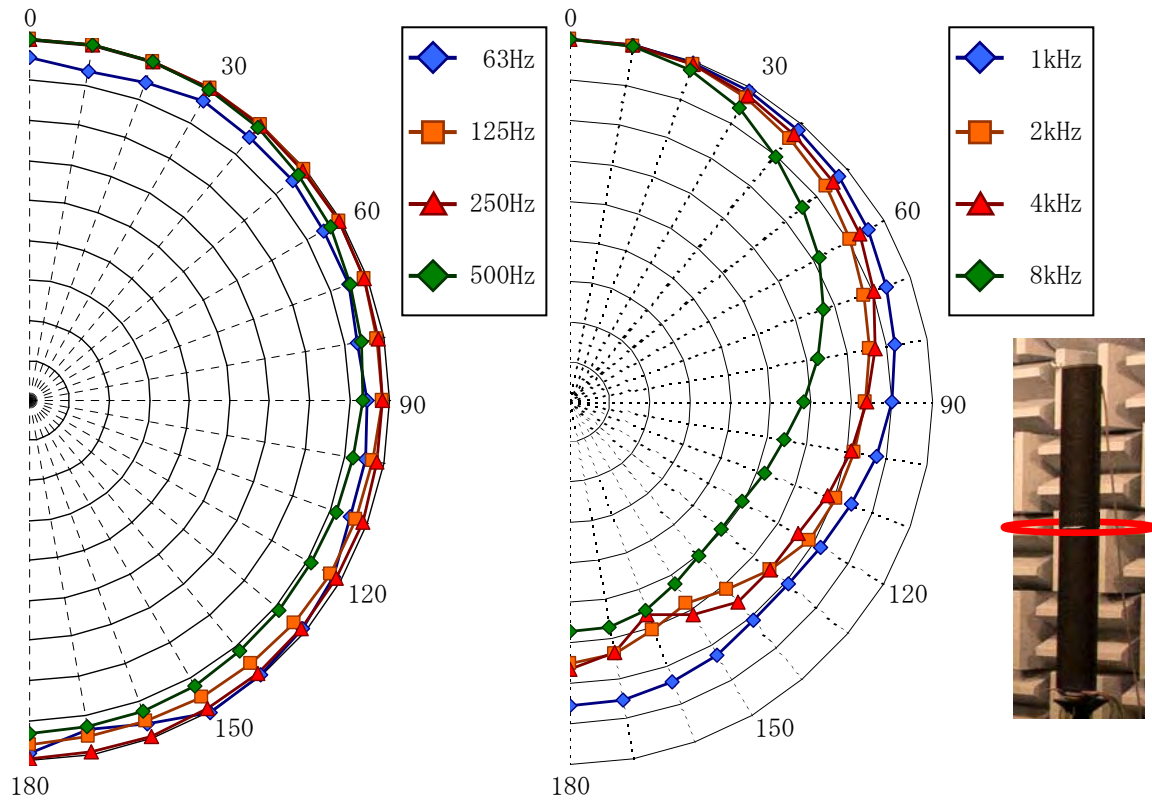
図3.4 ホーンスピーカの音圧指向性 (5 dB/grid)

## 2) ラインアレイスピーカ

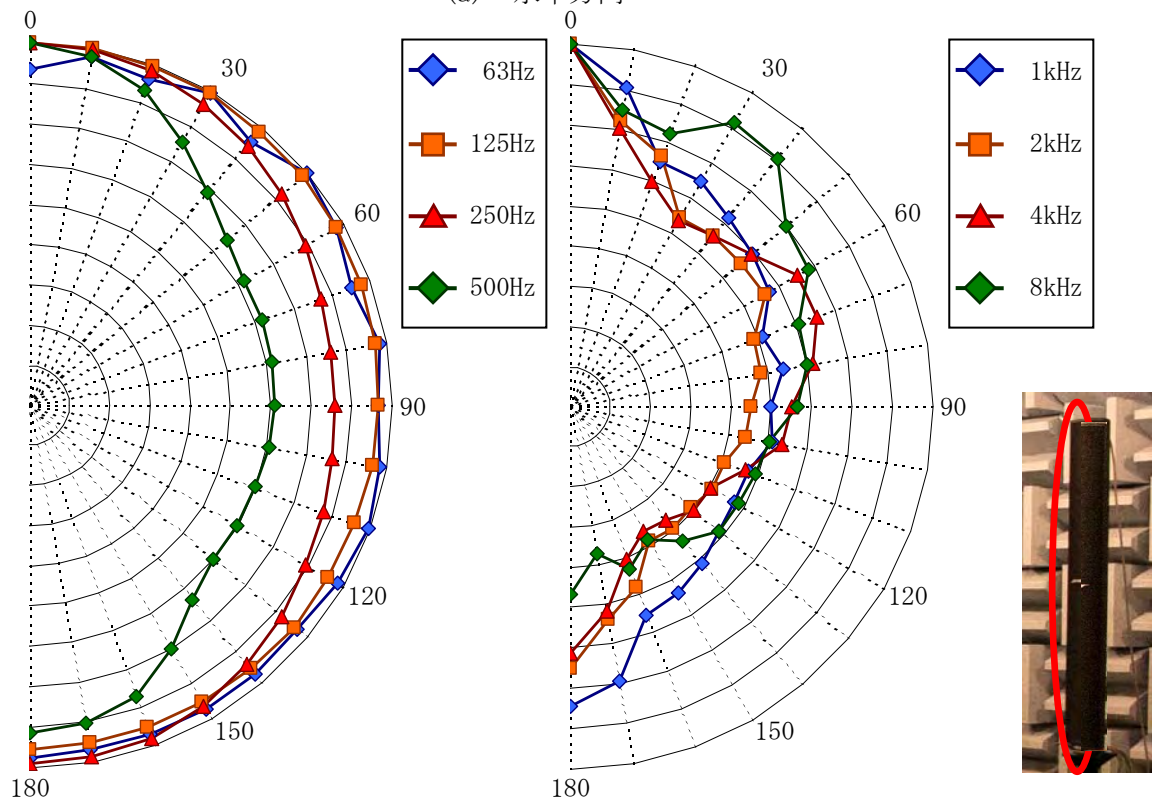
ラインアレイスピーカは、図3.2(b)のような形状をしており、スピーカユニットを縦方向に複数台埋め込むことによって線音源として扱うことができる。また、放射した際の音の拡がり方が水平方向に対しては広く、鉛直方向には狭いという特徴を持っている。すなわち、天井や床からの反射

音の影響を低減することができると考えられる。また、点音原の場合の距離減衰では $-6 \text{ dB/D. D}$ であるが、ラインアレイスピーカでは線音源として扱うことができるため、 $-3 \text{ dB/D. D}$ の減衰となり、より遠くへ音を放射することができると考えられる。しかし、距離が長くなるにつれて大きさが線として見ることができず、一定距離以上離れた受聴位置では点音源として扱われる。よって、実際の空間では体育館・講堂・ホール・教会などで明瞭性を確保したいエリアを限定し用いられている。今回用いたラインアレイスピーカ（MA12, BOSE）は、縦方向約1mにわたり5.7cmのドライバーユニットが計12個埋め込まれている。

図3.5に測定したラインアレイスピーカの63~8k Hz帯までの音圧指向性を示す。図3.5(a)を見ると、高周波数帯域においても側面に対する音圧が高いことがわかる。次に、図3.5(b)を見ると、500 Hz帯から指向性が鋭くなっていることが確認できる。また、それぞれの方向についてホーンスピーカと比較すると水平方向は広く、鉛直方向は狭い指向性であるため、ホーンスピーカに比べ天井・床面からの反射音の影響を低減することができると思われる。



(a) 水平方向



(b) 鉛直方向

図3.6 ラインアレイスピーカ (MA12) の音圧指向性(5 dB/grid)

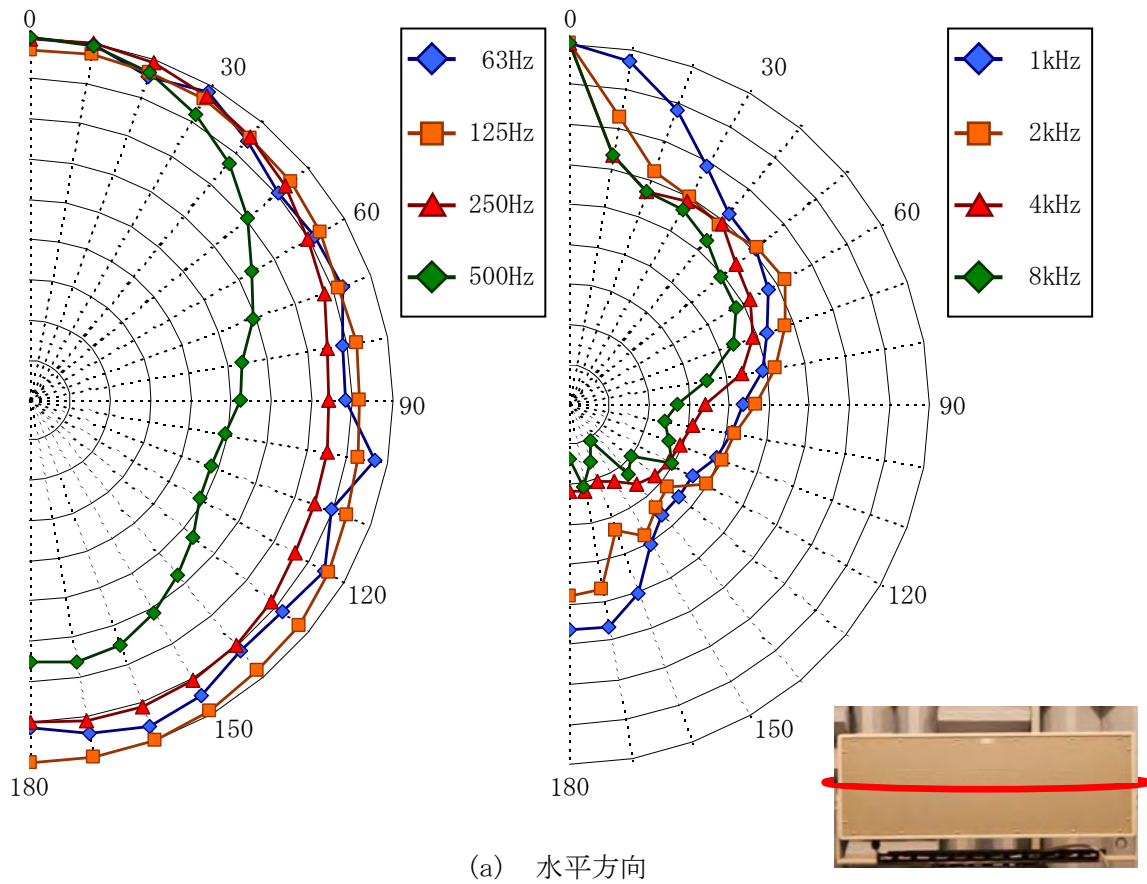
### 3) 平板スピーカ

平板（フラットパネル）スピーカはラインアレイスピーカとは異なり、横方向に対し平板ユニットを複数台搭載することにより平面波を放射することができるスピーカであり、主に駅のホーム・エスカレータなどの誘導放送や博物館・美術館といった残響の長い音場によく用いられている。今

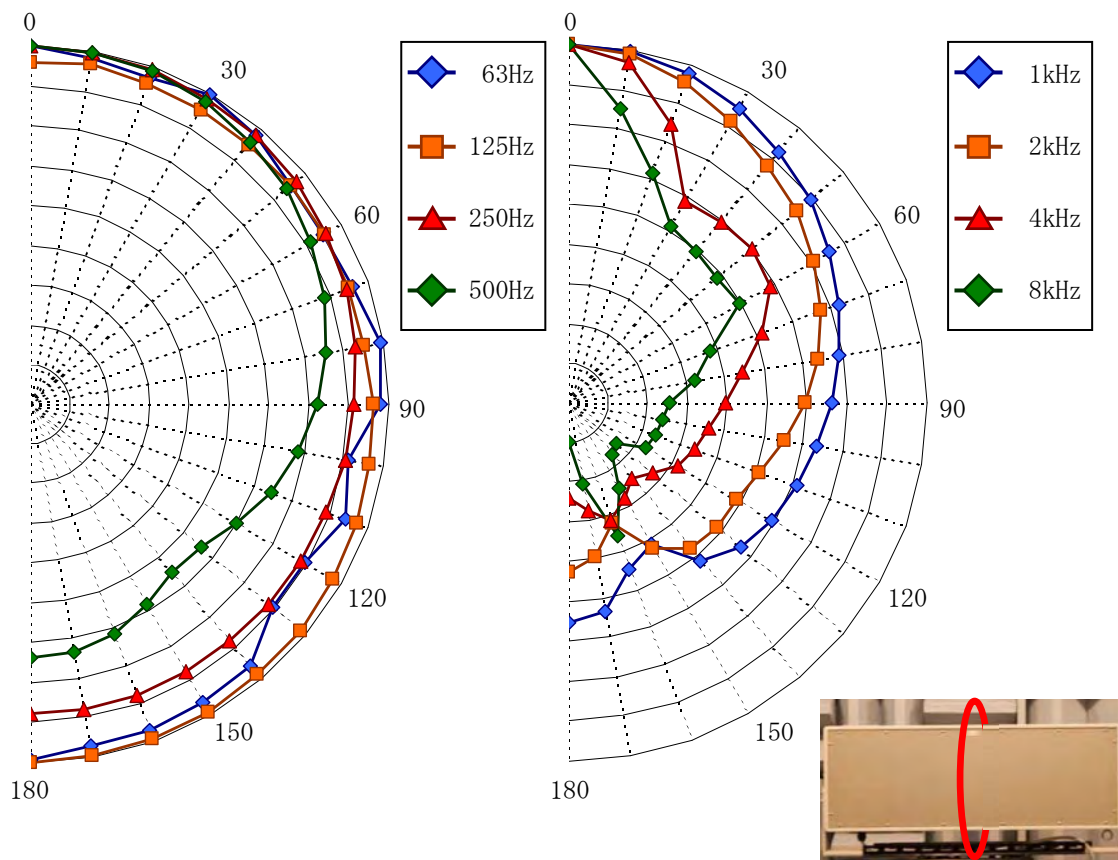
回用いた平板スピーカはTOA社のPW-1430SWであり、これは横方向に4つの平板ユニット(15.2×21.4 cm)を搭載することで指向性が狭く、前面にのみ平面波を放射する特徴がある。

図3.7に測定した平板スピーカの63～8k Hz帯までの音圧指向性を示す。ホーンスピーカと比べると、水平方向・鉛直方向ともにより鋭い指向性であることが確認できる。特に、高周波数帯域ほどより鋭くなっており、また各方向から比較すると水平方向の方が鉛直方向に比べ鋭いことがわかる。したがって、平板スピーカでは放射した方向に対しより強く音を放射することが可能であると考えられる。特に、水平方向の指向性が測定したスピーカの中で最も鋭い特徴をもっているため、トンネル内に適用した際は壁面からの反射音の影響を低減することができると期待できる。





(a) 水平方向



(b) 鉛直方向

図3.7 平板スピーカ (PW-1430SW) の音圧指向性 (5 dB/grid)

### 3.2 数値計算によるトンネル内音場のシミュレーション

#### (1) 計算対象の概要

本節においては、実在するトンネル内の音場について音線法によるシミュレーション計算を行った。対象としたトンネルは過去に時間遅延システムの測定などが行なわれた首都高・新都心トンネルの大宮線とした(図3.8)。ここでは音線法を用いるにあたり、幾何音響シミュレーションソフト・ODEON(ver11.0)を用いた。ODEONは、音線法や虚像法といった幾何解析手法を実行することができる市販のソフトウェアで、CADデータを作成すれば空間の形状入力が行える特徴を持っている。また、音源の指向特性や放射パワー、気温・湿度、各素材の吸音率や拡散反射率など設定も可能である。制約としては空間の形状入力に上限があること(約2kmまで)、計算できない物体形状があること、また音線法を行う際に必要な音線が通過する受音球の設定が行えないなどの点が挙げられる。以上のことから、ODEONによる幾何解析を行う際には、実測との比較を行い実際の音場特性との差異を十分に把握しておく必要がある。



図3.8 首都高・新都心トンネル 大宮線

図3.9にCAD上で再現したトンネル内の形状を示す。概ね路面上の段差などは再現したが、形状を単純化するため壁面や天井の排気口やパイプなどは考慮していない(図3.9(a))。また、図3.9(b)に示すように天井左右の傾斜部については、ODEON上で再現することができなかった。そのため、直方体ブロックとして扱うことで形状を近似することにした。以上のことを踏まえ、音線法を適用した。

ODEON実行時の各パラメータの設定は次の通りである。

#### ●素材の吸音率

天井・壁面・路面段差部： コンクリート

路面： 排水舗装アスファルト

各素材の吸音率(63~8k Hz帯域)を図3.10に示す。いずれの値も、残響室法によって算出され

た吸音率表を参考に入力した[4].

また、各素材の反射方法は計算の単純化のため鏡面反射と一様に設定した.

●気温・湿度の設定

気温： 20°C

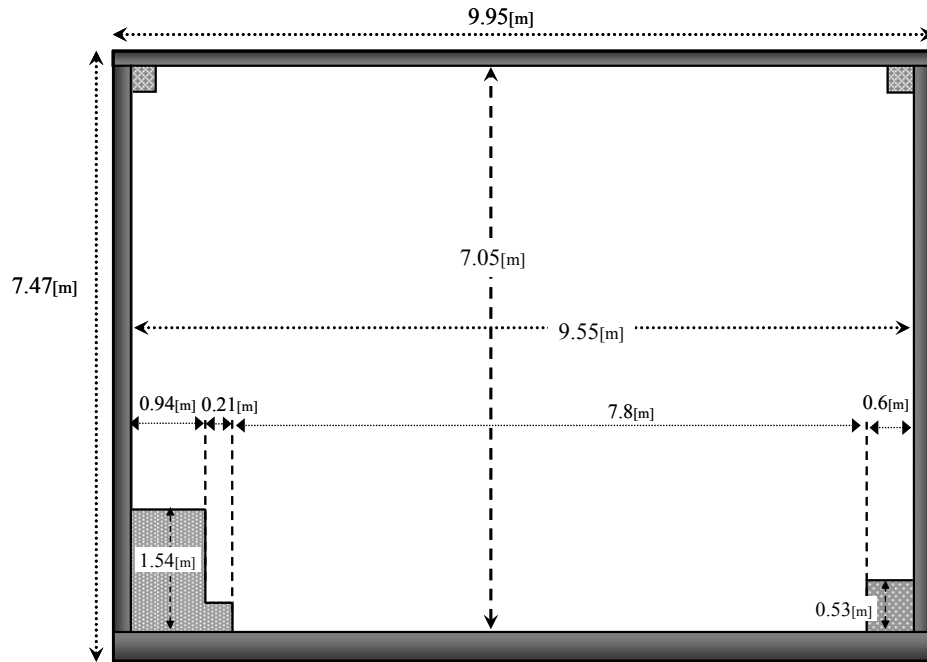
湿度： 50%

●音源の設定

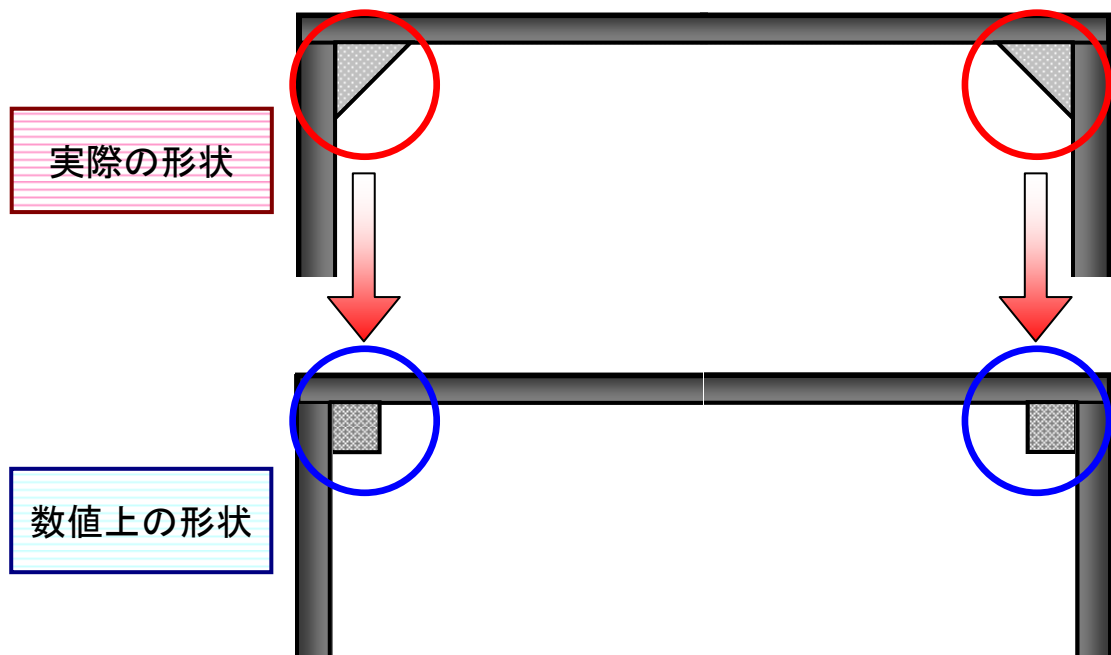
放射する音線数 : 100万本

音源のパワーレベル : 100dB (0. A.)

各スピーカの帯域毎のパワーレベル (63~8k Hz帯域) を, 図3.11に示す.



(a) 断面寸法



(b) 近似した形状部分

図3.9 作成したトンネル図面



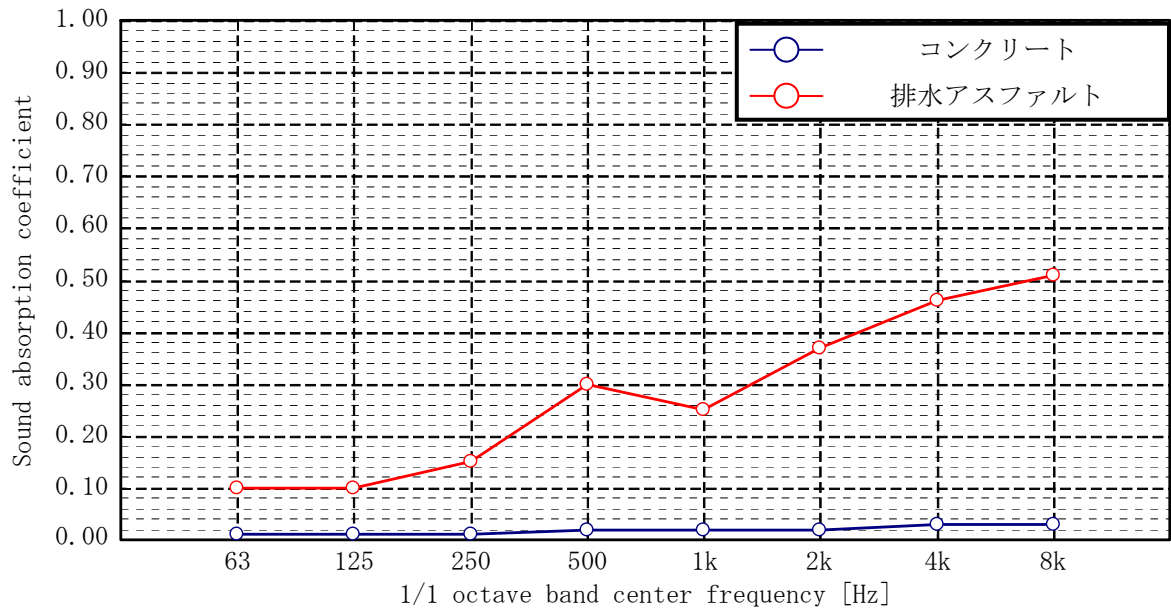


図3.10 各素材の吸音率

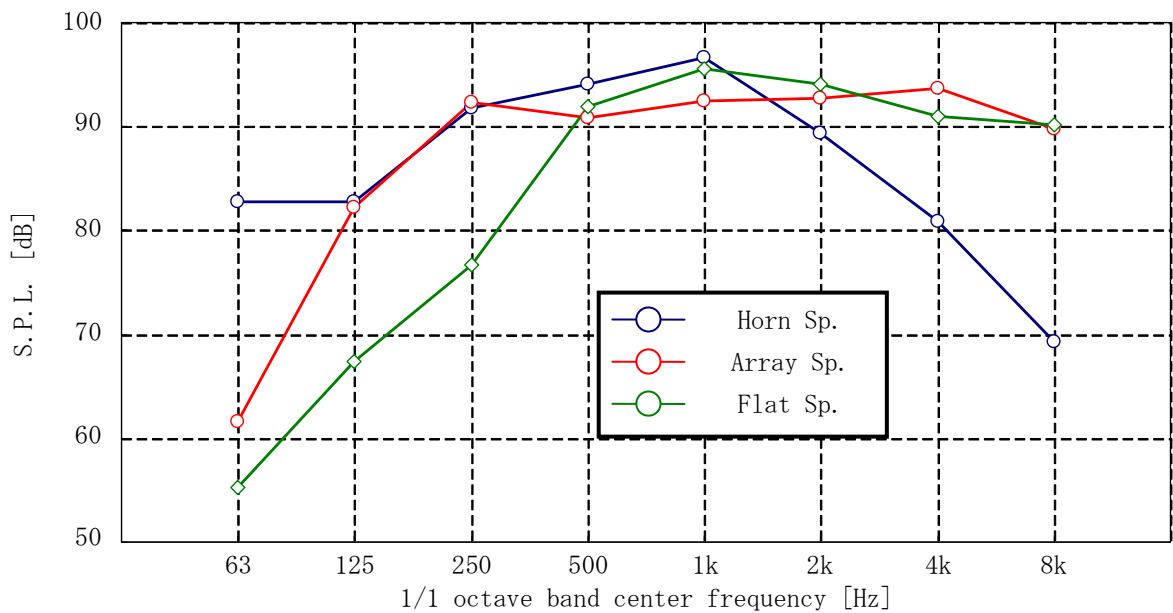


図3.11 各スピーカのパワーレベル

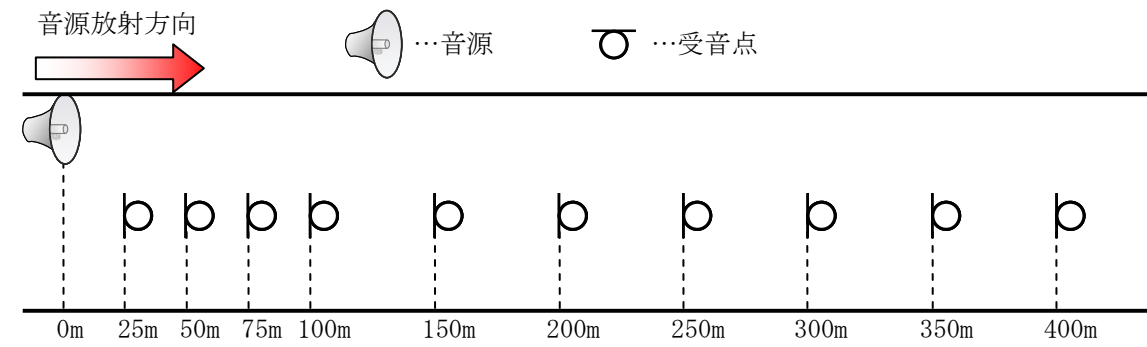
## (2) シミュレーション結果と物理量の対応

それぞれの指向性スピーカを用いてトンネル内のシミュレーションを行うにあたり、過去に実測されたホーンスピーカのインパルス応答より数値解析結果の対応性を確認した。スピーカ及び受音点の位置関係を、実測した条件とそろえて図3.12のように配置した。音源と受音点の相対的な位置関係は図3.12(a)および(b)の通り、受音点を路面中央より地上高さ1.2 mに設定した。

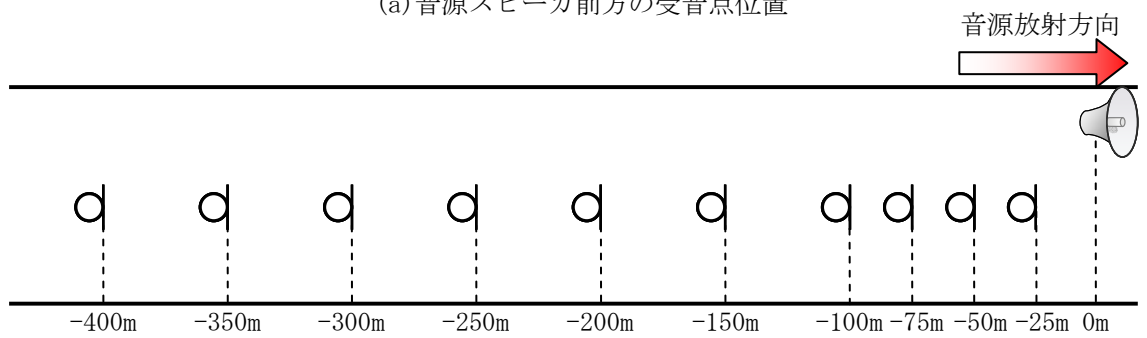
実測と数値、それぞれの250~4k Hz帯域までにおける距離減衰特性を図3.13に示す。結果を比較すると、いずれの結果においても距離減衰特性はほぼ一致していることが確認された。最大誤差から見ても、マイナス方向の2k Hz帯域において4.5 dB程度の差が確認されたが、減衰傾向も大きな違いは見られなかった。本検討では残響室法により実測された吸音率を参考に素材の吸音率を設定しているが、さらに実測との高い計算精度を得るためには、実際のトンネル内において各素材の吸音率の測定を行い、さらにインパルス応答の測定時における気温や湿度の状態も把握し検討することで改善されることが期待でき

る。

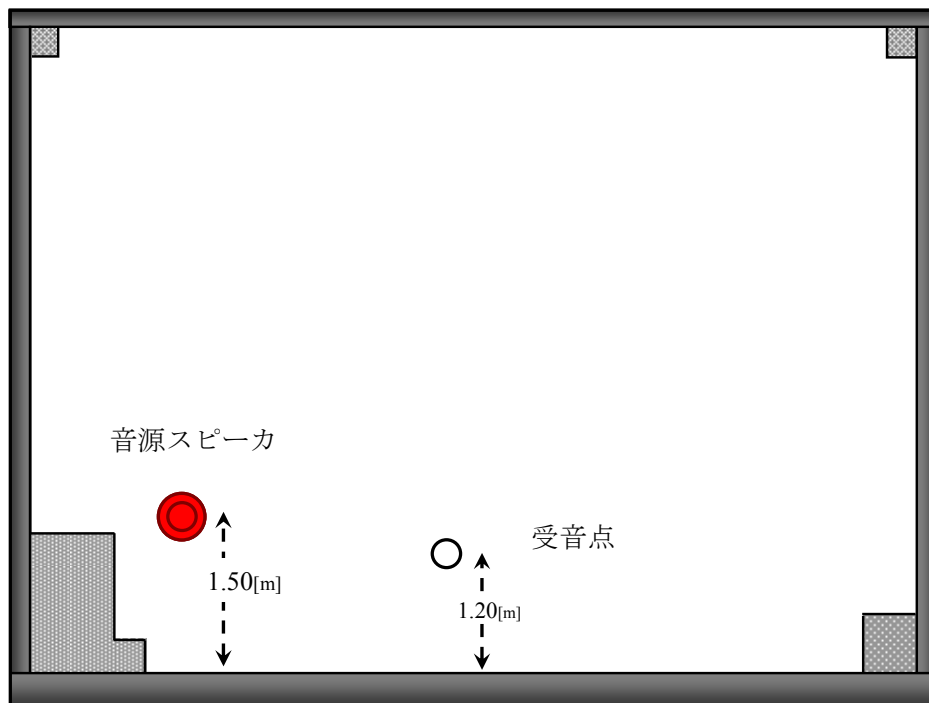
以上により、本項における検討結果から音線法によるトンネル内のシミュレーションが本研究の検討に適用できる可能性が示唆された。



(a) 音源スピーカ前方の受音点位置



(b) 音源スピーカ後方の受音点位置



(c) 音源スピーカの設置位置 (断面)

図3.12 トンネル形状と音源・受音配置図 (直線部)

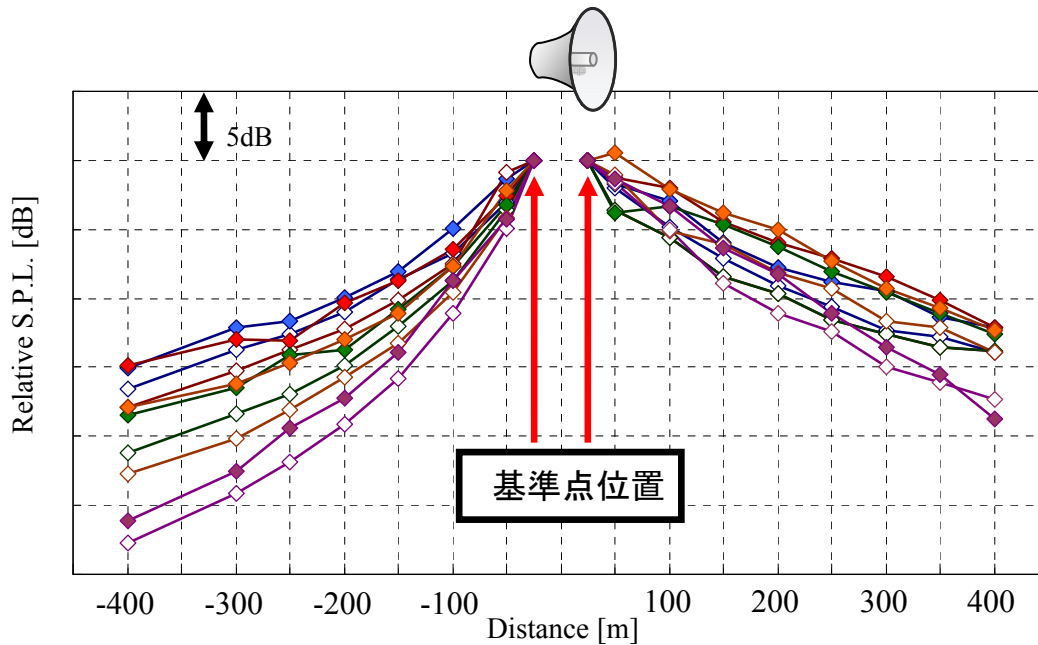
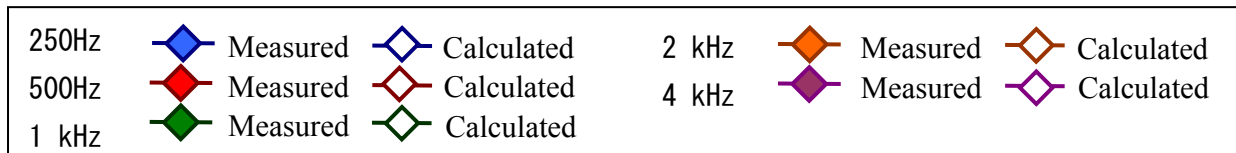


図3.13 ホーンスピーカの距離減衰特性比較

### 3.3 道路トンネル内における明瞭性の改善

#### (1) 各スピーカのトンネル内における音源特性

3種類の指向性スピーカをトンネル内に適用した数値実験を行い、その音源特性を距離減衰、残響時間、さらにSTIによる明瞭性の物理評価を行なうことによって検討した。本検討では、実際のトンネル内にスピーカを常設した場合を想定して図3.14のように天井付近へスピーカを設置した。なお、図中の各スピーカの段差部からの高さ距離は実物のスピーカの設置時の高さを考慮して設定している。なお、音源と受音点の位置関係に関しては、前項図3.12(a)および(b)と同様である。

ここで、アナウンス音の明瞭度を物理的に評価する指数 (STI) の評価方法について述べる<sup>[2]</sup>。STIは0.00から1.00までの値で表され、図3.15に示すような5段階で評価する。評価の基準としてfair (0.45) 以上であればアナウンスの聴取は問題なく行えるとされている。

#### (2) 数値実験による明瞭度指数の計算結果

数値実験によって得られた各スピーカのインパルス応答より63~4k Hz帯域、および全帯域(0. A.)における距離減衰特性を図3.16, 図3.17, 図3.18に、25 m点における125~4k Hz帯域の残響時間を図3.19に、および25~100 m点までにおけるSTI値を図3.20にそれぞれ示す。

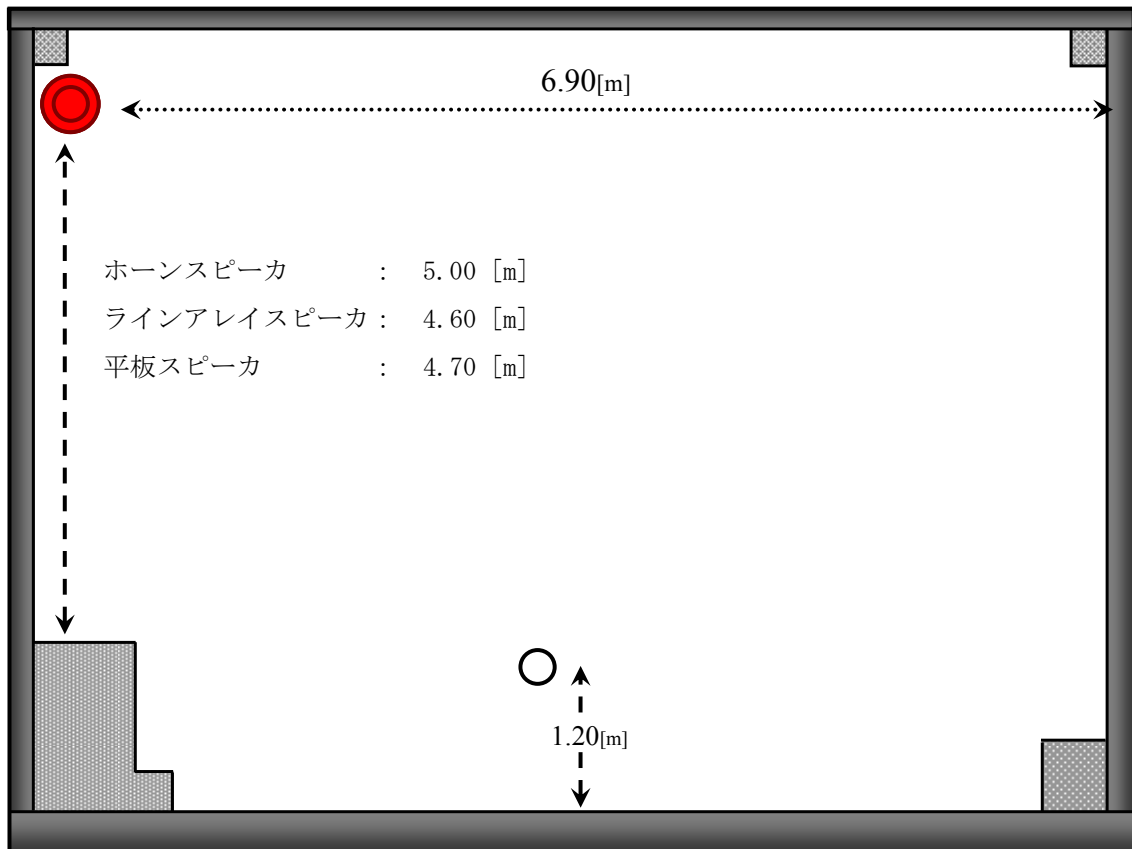


図3.14 設定した音源・受音点配置

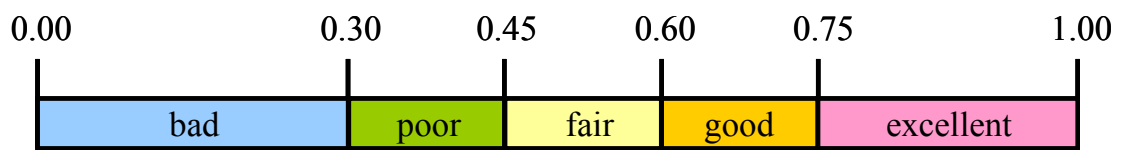


図3.15 STIの評価指標

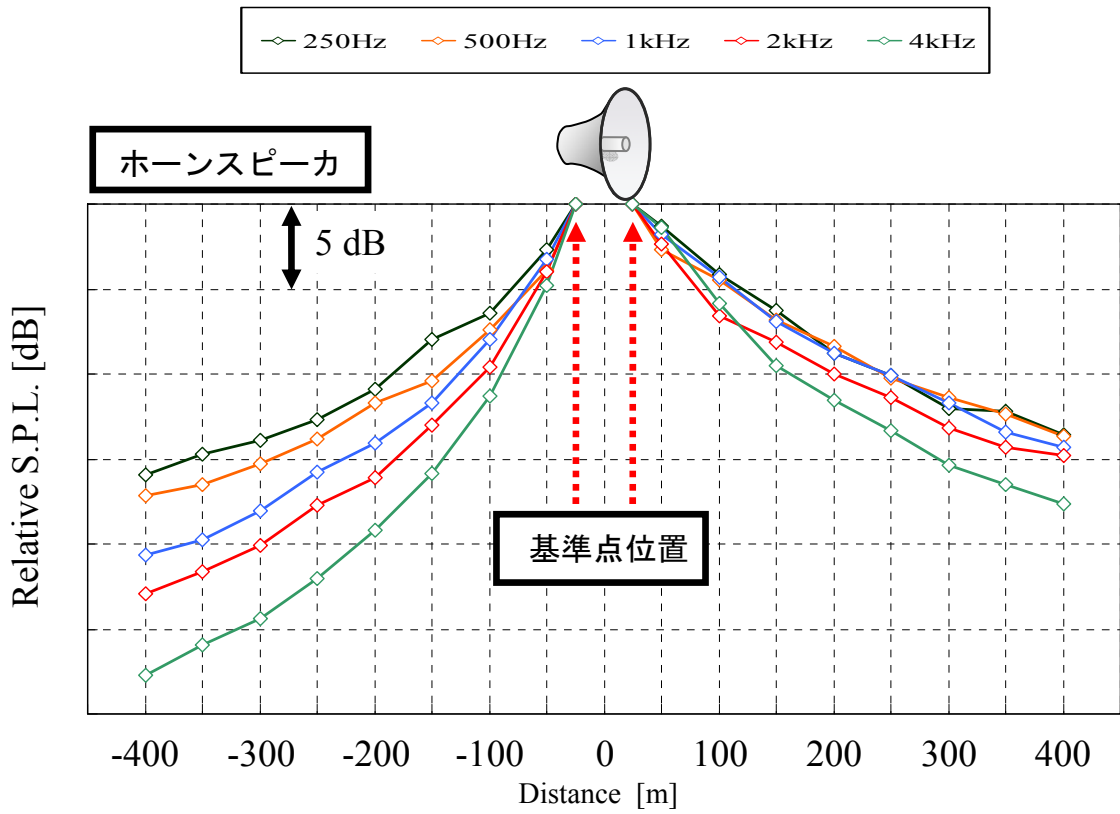


図3.16 ホーンスピーカの距離減衰特性

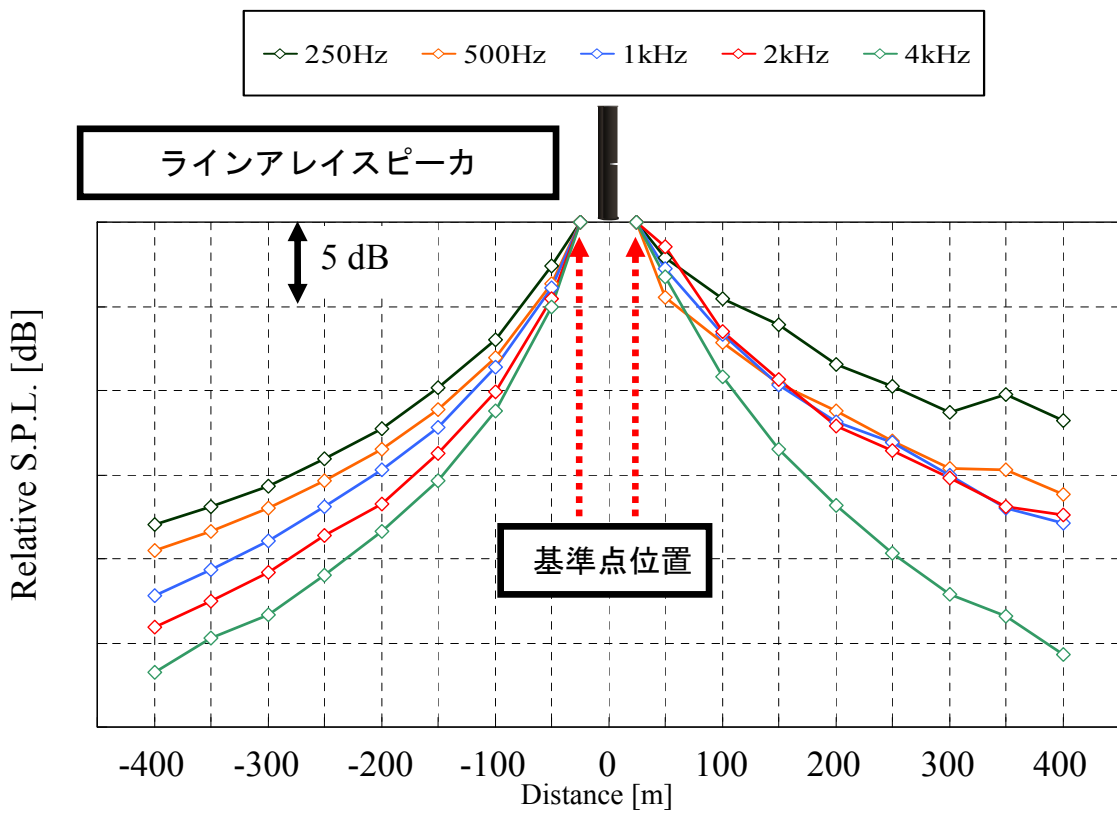


図3.17 ラインアレイスピーカの距離減衰特性

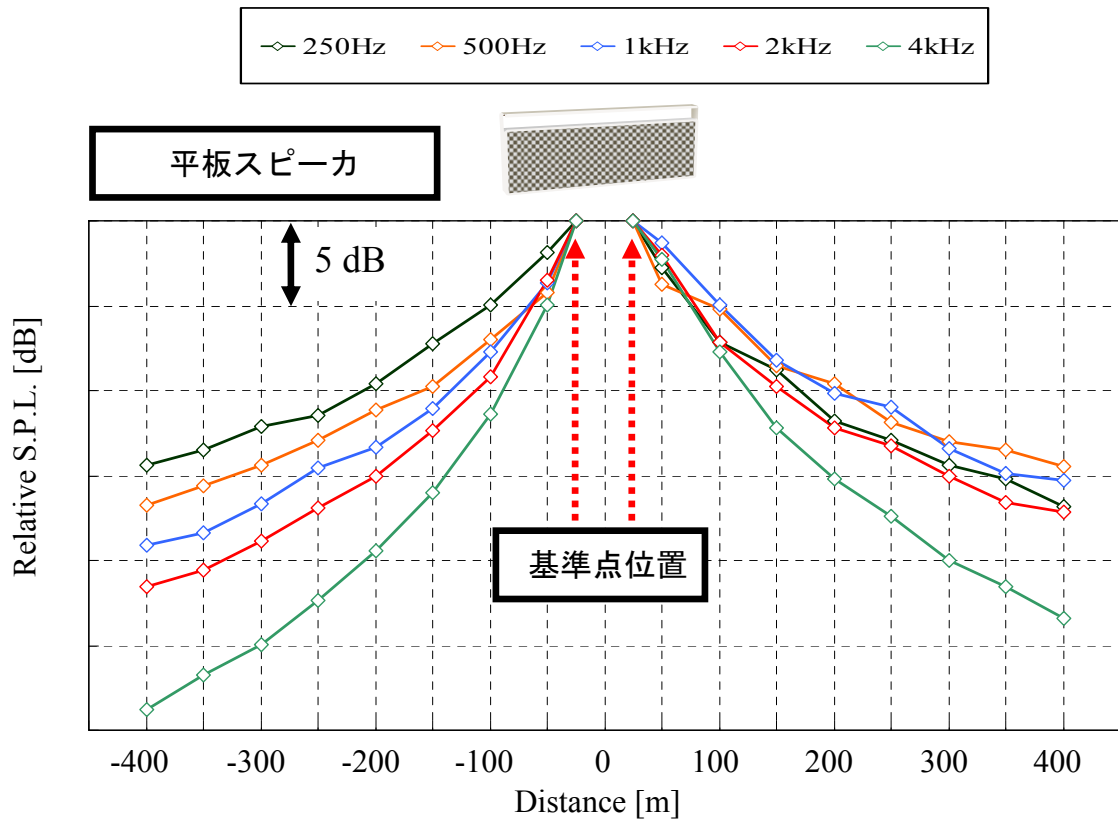


図 3.18 平板スピーカの距離減衰特性

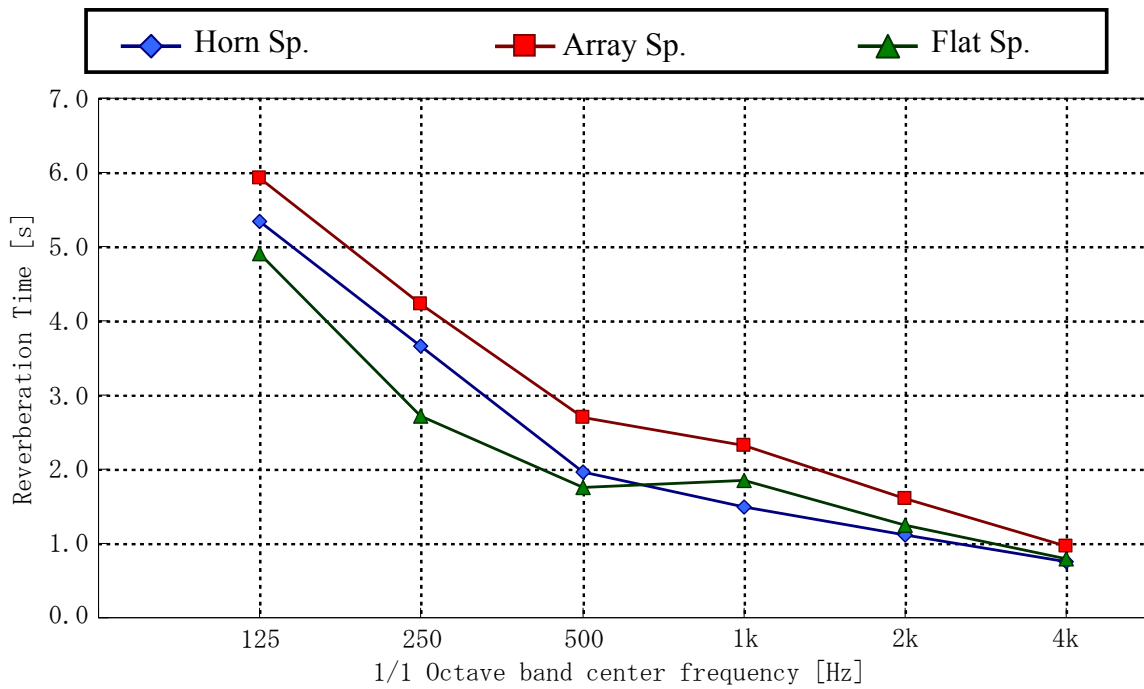


図3.19 各スピーカの25m点における残響時間

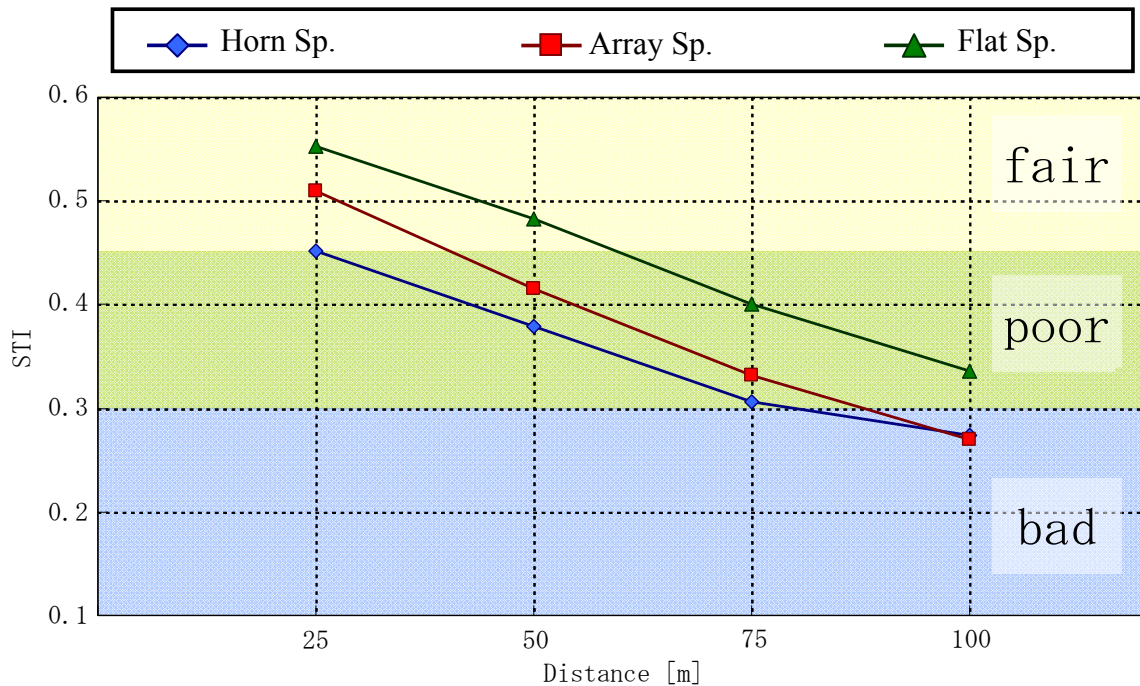


図3.20 各スピーカの距離毎におけるSTI値

まず、ホーンスピーカとラインアレイスピーカについて比較する。図3.16, 図3.17を比較すると、前面方向への減衰はラインアレイスピーカの方が早い。これは、距離が広がるにつれてラインアレイスピーカが線音源として扱えず点音源となってしまったことと、鉛直方向の指向性が鋭いため天井・路面からの反射音がホーンスピーカに比べ減少したことにより、受音点を通過する音線数の減少、すなわち、各受音点のエネルギーが少なくなってしまうためであると考えられる。また、後方について見ると、全体的な傾向の差はさほど差が見られない。前述した通り、ラインアレイスピーカは音声の明瞭性を確保したいエリアに対してのみ放射させる特徴がある。このため、後ろ方向に対しては本来の特徴を活かしきれずホーンスピーカと似た傾向の減衰になってしまったと考えられる。

また、図3.19によれば、全体的な傾向は似ているがラインアレイスピーカの方がホーンスピーカに比べ残響が長く、1k Hz帯においては約1秒の差となっていることがわかる。これは、ラインアレイスピーカが水平方向に広く音を放射しているため、壁面からの反射した音線が多く受音点到達しているためだと考えられる。

最後に、図3.20の結果によれば、受音点が音源に対して近い場合にはラインアレイスピーカの方がSTI値上で明瞭性が高く、25m点ではホーンスピーカに比べ約0.05改善されており、fairの域に十分入っていることが確認された。この理由は、まず、今回のSTI値による明瞭性の評価では、実際のトンネル内で放送されている女声スピーチによる評価を行った。そのため、低域よりも高域に対するエネルギーが高ければSTI値は高く算出される。ここで、図3.11によればホーンスピーカは1k Hzをピークに高域のパワーが少なくなる傾向にある。一方で、ラインアレイスピーカは低域のパワーは少ないものの、高域ではホーンスピーカに比べパワーが大きい。このことから推察すると、ラインアレイスピーカでは高域に対する直接音のエネルギーが高く低域では低くなってしまいうため、鉛直方向の反射成分が少なくても直接音に対する反射音のエネルギーの差が少なく、残響が長くなる結果になってしまったと考えられる。さらに、ホーンスピーカに比べ距離減衰が大きいいため受音点到達するエネルギーも帯域毎に差が出てしまったと思われる。一方で、ホーンスピーカはラインア

レイスピーカに比べ低域のパワーが大きく、高域は小さい。このため、各受音点に到達する直接音のエネルギーも低域では大きく、高域では小さくなったと考えられる。この影響により音源に近い受音点において、ホーンスピーカはラインアレイスピーカに比べSTI値が低い結果になったと考えられる。

以上の考察より、ラインアレイスピーカでは受聴するエリア限定して用いればホーンスピーカに比べ明瞭性は改善される可能性が示唆された。

次に、ホーンスピーカと平板スピーカの比較を行う。図3.16、図3.18をみると、ラインアレイスピーカと同様に前面方向の減衰が大きい。平板スピーカは平面波を前面方向に音を放射していると考えられ、水平方向・鉛直方向ともに反射音の影響が少なくなっており、特に、水平方向はその特徴が強く表れていると考えられる。よって受音点に到達する音線は直接音の成分が反射音の成分に比べ大きいと考えられる。

また、図3.19から残響時間を比較してみると、低域において残響が短くなっており、特に250 Hz帯においては約1秒短くなっていることが確認できる。これは、水平方向に対する反射音、すなわち、壁面からの反射音の影響が少なくなったため直接音に対する反射音の差が大きく出たためであると考えられる。

さらに、STI値を見ると、ラインアレイスピーカと比較しても大きく明瞭性が改善されていることがわかる。特に、25 m点ではホーンスピーカに比べ約1.5とSTI値が上昇しており、fair以上の評価は50m点までであり、100m点においても他の2スピーカではbadの評価に対し平板スピーカではpoorの評価となっている。図3.11のパワーレベルから見ても、平板スピーカは特に高域が強く放射される特徴があることが伺える。そのため、比較的離れた受音点においても高域のエネルギーが高く、STI値の評価も高く算出されたと考えられる。

以上の考察より、前面に平面波を放射する平板スピーカを用いた場合では、3つの指向性スピーカの中で最も明瞭性が高い結果が得られた。

### (3) 時間遅延システムの有無による明瞭度指数の検討

前項までは、スピーカ1台に対する明瞭性の評価を行った。しかし、実際のトンネル内は数km以上におよぶ長距離空間であるため1台のスピーカで十分な明瞭性を確保することは難しい。そこで、本項では実際のトンネル内にスピーカを複数台設置した場合の明瞭性をSTIによって評価した<sup>[3]</sup>。

トンネル内に複数台スピーカを設置した際の音源と受音点の位置関係を図3.21に示す。また、スピーカの設置位置は図3.14と同様に設置した。スピーカを複数台同時に再生した場合、前述した通り各スピーカから放射された音が受音位置に遅れて到達するためマルチエコーが生じる。このため、時間遅延システムの原理に基づき、各スピーカの再生時間を遅らせた場合と遅延させない場合について明瞭性の比較を行った。

時間遅延システムの原理では、最初に放射するスピーカと*i*番目に放射するスピーカとの距離間隔 $D_i$ によってスピーカを再生させる遅れ時間 $\tau$ を決定する。よって、次式から $\tau$ を求めることができる。

$$\tau = D_i / c \quad (3.1)$$

(3.1) 式に従い、各スピーカの遅れ時間を設定し、3種類の指向性スピーカによって時間遅延の有無による明瞭性を評価した。

各条件によって算出した25～100 m点におけるSTI値を図3.22に示す。



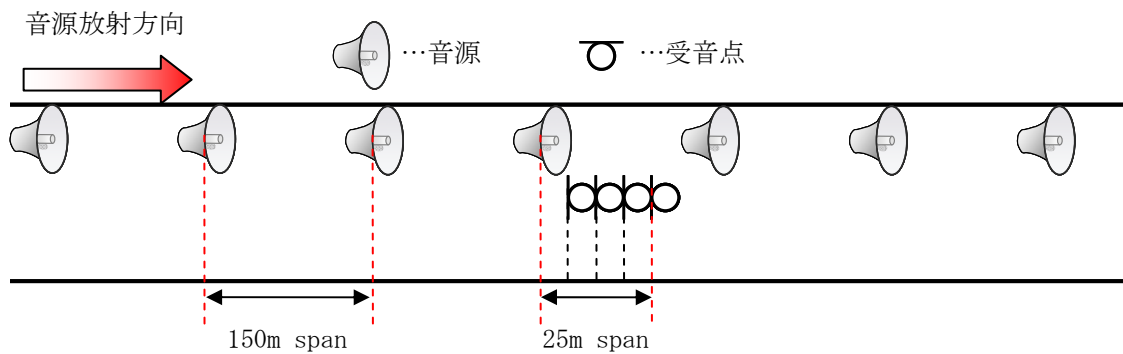
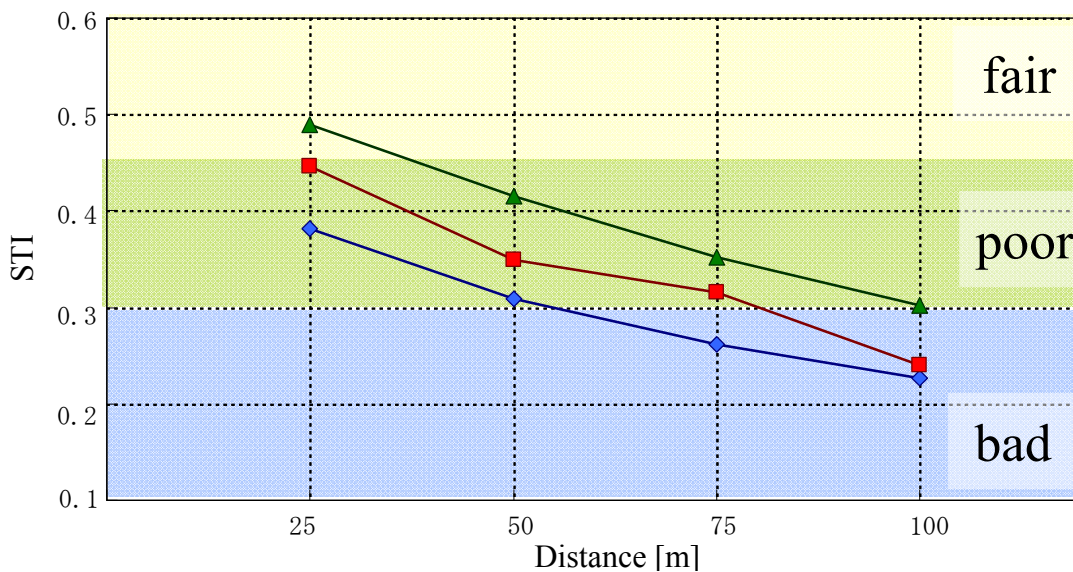
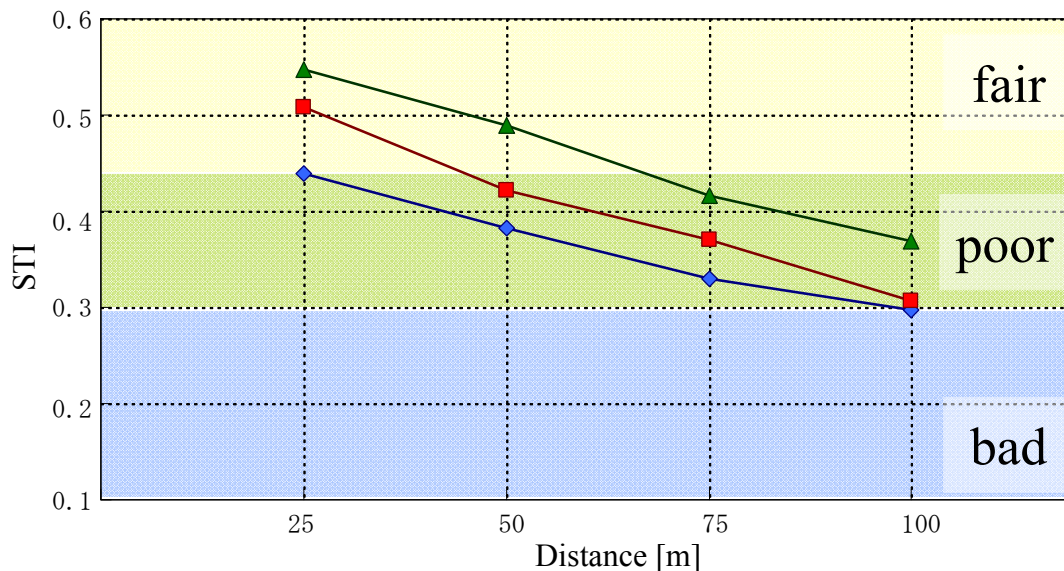


図3.21 複数台スピーカ設置時における音源・受音点配置



(a) スピーカを同時に再生した場合



(b) 時間遅延処理を施した場合

図3.22 時間遅延の有無によるSTI値比較

まず、図3.22(a)および(b)より時間遅延の有無による明瞭性の改善効果を比較する。いずれの指向性スピーカにおいても、時間遅延を与えた場合の明瞭性が改善されていることが確認できる。各条件において差はあるが0.05~0.07程度の改善効果が見られた。時間遅延を与えなかった場合には

直接音が到達する時間に差が出てしまいマルチエコーが生じたが、遅らせた場合には各スピーカからの直接音が同時に到達したため、マルチエコーの影響を低減することができたと思われる。

また、指向性スピーカ毎に比較すると、時間遅延の有無によって明瞭性の傾向は見られなかったが、前項と同様に平板スピーカが最も明瞭性が高く、続いてラインアレイスピーカ、ホーンスピーカと明瞭性の評価に差が確認された。平板スピーカでは前述した通り、前面に強く音を放射するため、後方への音が放射される影響が少なかったことも影響し、このような結果になったと考えられる。

ここでは、公共空間に拡声用スピーカを設置した場合に、スピーカの持つ指向特性によってアナウンス音の明瞭性の差異について幾何音響理論に基づく数値計算によって検討した。スピーカの単一使用および、複数使用の場合について検討を行った結果、いずれの場合についてもホーン型、ラインアレイ型、平板型の順で明瞭性が改善される結果となった。さらに複数のスピーカを用いた場合には、マルチパスエコー防止のための時間遅延システムを用いることで、明瞭性が改善される結果となった。

参考文献：

- [1]松浦 圭, “数値実験による指向性スピーカを用いた非常放送の明瞭性改善”, 平成25年度千葉工業大学情報科学研究科情報科学専攻修士論文
- [2]IEC 60268-16, (2003)
- [3]横山 栄, 橘 秀樹, 坂本慎一, 岡野孝司, “道路トンネル内避難誘導拡声放送システムの設計”, 日本音響学会講演論文集, pp. 1015-1016, 2007. 9
- [4]前川純一, 森本政之, 阪上公博, “建築・環境音響学”, 2010. 2. 15 第2版9刷

## 4. 電気音響システム

### 屋外拡声装置の高度化と聴取音計測システムの開発

菅木 禎史（千葉工業大学 先進工学部 知能メディア工学科）

#### 4.1 はじめに

東日本大震災で震災の影響を受けた地域において、内閣府の実施したアンケート結果により避難情報を入手することができた住民 45%が屋外拡声器により避難情報を入手していた。しかし、屋外拡声器から避難情報を入手した住民のうち、音声内容を明瞭に聴取できた人は56%であった。<sup>[1]</sup>

確実に情報を届けるという視点で、インフラの整備、戸別受信機などの充実が図られているが、屋外拡声器も重要な役割を果たしている。(2)電気音響システムの一部として、屋外拡声システムの高度化を目指し、住民が受聴点で聞く音の品質を改善するためのアプローチの一つとして、居住地区近隣の建物や地理的影響によるロングエコーの抑制などを検討が考えられる。また、(3)音環境・空間伝搬系における改善を目指すために、聴取音計測システムを検討した。

#### 4.2 屋外拡声子局の高度化

##### 4.2.1 従来法の問題点

総務省 SCOPE の下での開発したインテリジェント拡声システムはクライアントサーバーシステムとして構築されている。<sup>[2, 3]</sup> それは、ノードは、GPS、マイクロフォン、スピーカー、ネットワークデバイスで構成され、ネットワーク回線を介して接続されており、GPSにより自局の緯度・経度および時刻を把握する。サーバーは、ネットワークに属しているノードの位置を得て、ノード間の相互距離を計算し、その距離に基づいて遅延時間を算出し、各ノードの放射タイミングを制御する。各クライアントは、サーバーの死活をモニタリングしており、サーバー機能が検出できない場合にクライアントがサーバーの役割を担う。タイミングによっては、複数のクライアントが同時にサーバーになり得るが、その場合はサーバーが1ノードとなるように、いずれかのサーバーがクライアントに戻る。

この時点での放射タイミング制御システムには以下のような課題が存在する。

1. サーバー機能のハンドオーバーによる時間損失
2. 子局喪失によるサービスエリアの減少
3. タイミング制御時の放射ノードのプライオリティ制御
4. 風や雨などによる音伝搬特性への対応

本報告では、これらの課題のうち、1) サーバー機能のハンドオーバーによる時間損失、2) 子局喪失によるサービスエリアの減少を改善する基礎技術となるネットワーク構成を自動的に再構成する機能を検討する。この機能が実現できると、喪失した子局に隣接するノードがサービスエリアの拡大を行い、障害発生時のサービスエリアの改善が期待できる。

#### 4.2.2 自律ノードシステム

これまでの、クライアントサーバーシステムで構築しており、サーバーの喪失によりシステムの停止、またクライアントの喪失により配信が停止する状況であった。これを解決するために、他のノードの影響を受けないように自律型に再設計した。そのブロック図を図 4.1 に示す。ノードは起動後に、2 つのプロセスが並列に動作する。一つはノード検出および隣接ノード群情報の更新に関するプロセスであり、もう一つは放射タイミングを制御するプロセスである。

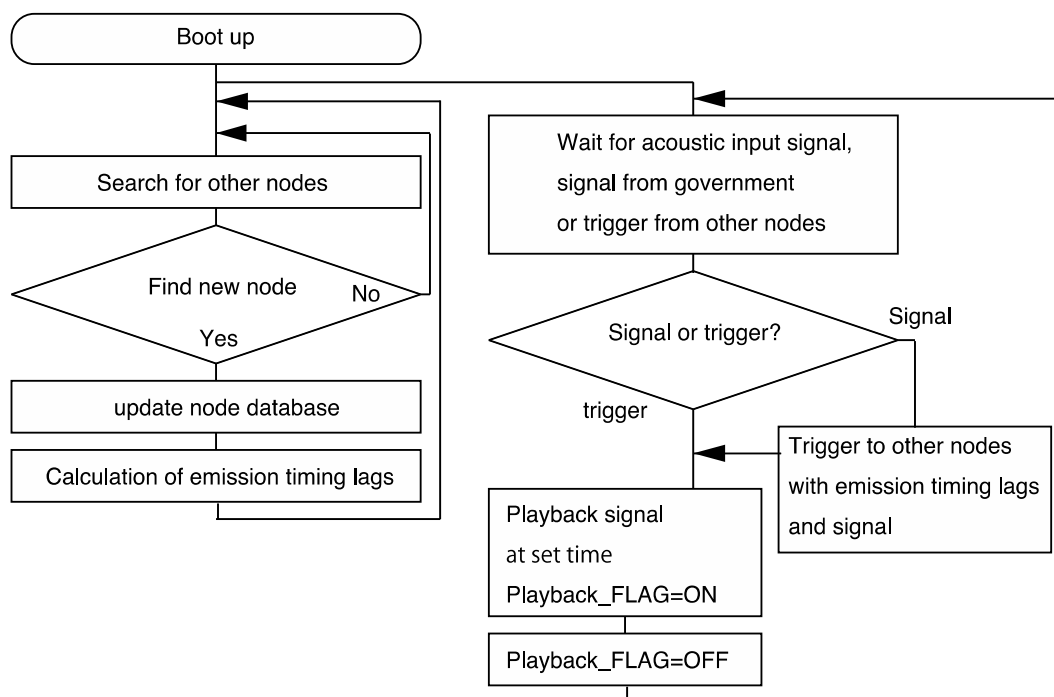


図 4.1 : Block diagram of a node.

##### 1) ノード群情報

ノードは、ネットワーク内の他のノードの位置などの情報を保持する。このノード群情報と呼ぶこととし、ノードの番号、ノードの GPS から得られた緯度・経度、自局との距離に基づく放射タイミング時間差を記録している。

##### 2) ノード検出

図 4.1 の左側がノード検出およびノード群情報の更新に関するブロックである。起動時のノードの検出は、本原稿では汎用のネットワークソフトウェア arp-scan を用いた。起動時に実行する arp-scan で得られたノード群に対し、自局の IP などのノード情報を送付し、各ノードはそれに基づいてノード群情報のデータベースを更新する。

### 3) 放射タイミング制御プロセス

図 4.1 の右側が、放射タイミング制御のプロセスのブロック図であり、これは既に提案済であり、それを用いた。[3, 4] ノードに設置されているタワー下のハンドマイクや J-ALERT の入力を待機しており、自局が配信元となる場合は、ノード群情報に基づき配信を行う。自局もしくは他局からの、音響信号、時間遅延量の配信に基づいて適時に再生を行う。本来は、全てのノードが J-ALERT からの配信を受け取り、指定された時刻に音情報を放射すれば良いが、今回は、ネットワークの再構成の検証を行うために、音信号の配信は従来法の親局から子局への伝達する方式のままとした。本報告では、各ノードが音信号を受信し、指定された時刻への音放射を行う改良は今後の課題とする。

#### 4.2.3 自律ノードシステムの動作シーケンス

ノードの起動から信号配信までのシーケンスを図 4.2 に示す。2つのノードが存在し、横軸は時間である。最初に node #1 が起動し、ネットワーク内のノードを探す。この時点では、他のノードが存在しないために、Audio input もしくは J-ALERT の待ち受け状態となる。次に、node #2 を起動させる。node #1 と同様にネットワーク内のノードを検索し、この場合は node #1 を検出する。node #2 は、node #1 に自局のノード情報を送り、受け取った node #1 は、折り返し node #1 自身のノード情報を送る。このように、他のノードを検出した場合は、自局のデータベースを更新し、検出したノードと自局の位置に基づき距離を計算し、算出した遅延時間をデータベースに格納する。以後は、各ノードのデータベースの情報をもとに死活監視を ping を用いて行う。ここで、起動時に arp-scan を用い、死活管理に ping を用いる理由は、予備実験にて、ARP での検出は ARP テーブルのキャッシュ時間が ping での検出時間より長く、検出遅延を最小にするために ping を用いた。なお、タイミング制御プロセスは並行して動作しており、Audio input もしくは J-ALERT 経由の入力があり次第、データベースの情報をもとに配信を行う。

次に、定常運用状態から1つのノードの電源供給がとまり、その後電源が復旧した場合のシーケンスを図 4.3 に示す。ある時刻に node #2 の電源が失われ、node #1 と node #3 からの死活監視で node #2 が機能していないことを把握し、それぞれのデータベースから node #2 を削除する。node #2 の電源が復旧後は、先に述べた起動時のシーケンスが実行され、再度配信先としてそれぞれのデータベースに反映される。

このようにして、死活監視を行い、適切な信号配信が可能になるよう設計し、実装した。

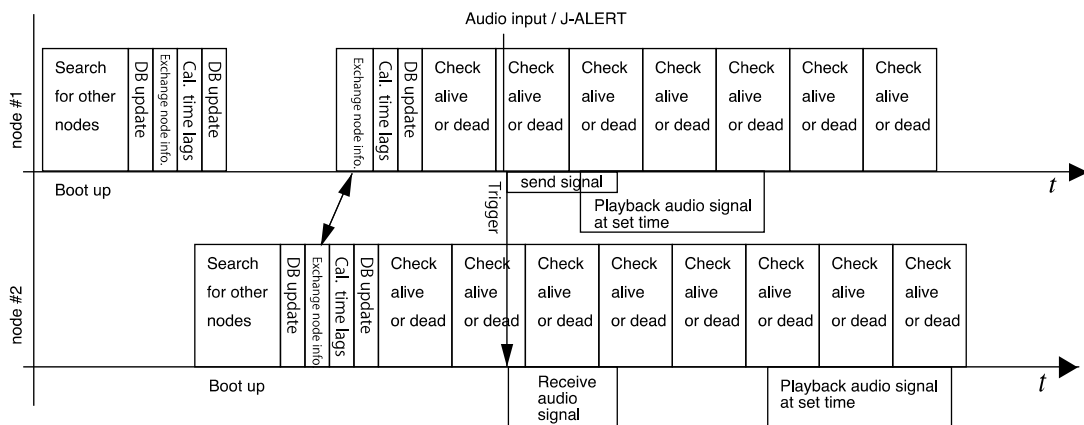


図 4.2 : Timing chart from boot.

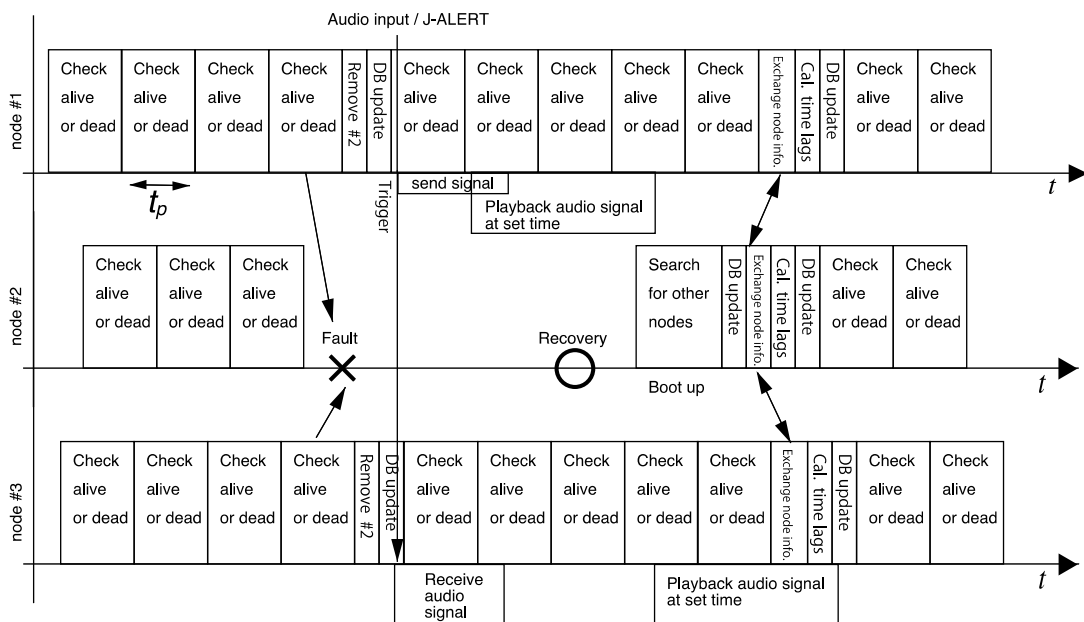


図 4.3 : Timing chart when node #2 is down.

#### 4.2.4 実験

先に述べた死活管理を、Python を用いて既存のタイミング制御プロセスと並列で動作するように実装した。ハードウェアは、Raspberry Pi 3 (CPU:Quad Core 1.2GHz Broadcom BCM2837 64bit, RAM:1GB, WiFi:Broadcom BCM43143) , 無線 LAN のアクセスポイントは、バッファロー社 WAPM-2133TR を用いた。以上の構成で、ネットワーク内のノードを停止および復旧させた際の動作を確認したところ、設計通り動作をした。

また、図 4.3 のノードの状態確認にかかる時間  $t_p$  を計測した。定常運用状態から、電源を喪失する状況想定したシミュレーションを行った。時間計測は、Raspberry Pi の hardware clock を利用したものであり、計測回数は 10 回である。死活管理は ping で行っており、その timeout は、無線 LAN 環境での予備実験の結果より、安定して検出できた 10 s と設定している。複数台のノードがネットワーク内に存在し、そのうちの 1 台の処理をモニタリングした。表 4.1 には、

定常運用中の状態で、ネットワーク内の2台のノードのうち1台が、さらには3台のうち2台が activeであることをモニタリング対象ノードで検出する処理時間を示している。この結果は、ノード数が増えるにつれ、pingの応答時間分が増えていくことを示している。単純にノード数とpingの応答時間の積になっていない理由は、pingの応答時間がネットワーク回線の状況に影響されているためであった。しかし、pingの応答時間は高々数十msであるので、ノードのサービスエリアが300m～500mとした場合に時間差をつけて放射するという処理全般からみると問題がないことがいえる。次に、表4.2にはネットワーク内の4台のノードのうち2台が同時にinactiveになった場合の検出に要する時間である。1台目がinactiveであることの検出は、timeoutと判定する10sと他の処理のために10s以上を要している。また、1台目の処理が終了後に2台目の死活管理処理を行うため、2台目がinactiveであることを検知するには、さらに10sを必要としていることがわかる。最後に1台のactiveノードの検出は、単純に表4.1に示した結果と同様にpingの応答時間が加算されていることが確認できた。有線で同様の確認をした際には、timeoutが1sでも十分に安定してinactiveの検出ができたため、無線LAN環境でtimeoutを10sに設定しないと安定して検出できなかったことはネットワーク環境依存と考えられる。今後は、この原因究明するとともに、LTE回線においても同様の計測を計画している。

表 4.1 : Processing time for finding other one or two active nodes when the number of nodes is two.

Processing time (s)	min	max
Other one (s)	0.009	0.032
Other two (s)	0.021	0.037

表 4.2 : Processing time for finding other two inactive nodes and one active node when the number of nodes is four.

Processing time (s)	min	max
The first inactive node from inactivated	10.015	10.019
The second inactive node from inactivated	20.031	20.046
Active node from inactivated	20.047	20.068

### 4.3 聴取音計測システムの開発

防災無線システムの子局の設置場所は、経済的コストを踏まえ、少数で広範囲にサービスすることが望まれる。この条件の下では、確実に聴きとれる環境を構築することは難しく、住民は聞こえづらい状況に不安を感じ、行政に改善を期待する。この改善を施すにあたり、住民および行政担当者は音響の専門家ではないために、原因究明は困難に近い。加えて、行政にはその問題を

改善するために音響コンサルを依頼することも予算的に難しい。そこで、住民の聴いている状況を録音し、その分析および環境改善の提案を自動化できることは日本全国を網羅する防災無線システムでは大きな貢献が期待できる。クラウド上にシステムを構築し、小型端末にて音情報を収集し、ロングパスエコーの生成原因となる反射物位置を可視化するための枠組みを設計し、一部を実装した。

#### 4.3.1 設計および実装

音環境計測管理システムでの計測は、図 4.4 に示すような流れである。受聴位置での音収録を行い、それを LTE, 3G, WiFi などのネットワーク回線を介してデータベースに保存する。反射物の候補位置は、既に提案済のモノラル信号から時間遅延量を推定し、その時間遅延量に基づいて得られる。[5] よって、音源位置、受音点での音および受音位置が必要であり、それらもデータベースに同時に保存される。また、より精度の高い推定には気温や風向の記録も望まれる。収録においては、携帯端末等を用いて市民が簡便に、音を一定の録音品質をもって収録できることが望まれる。

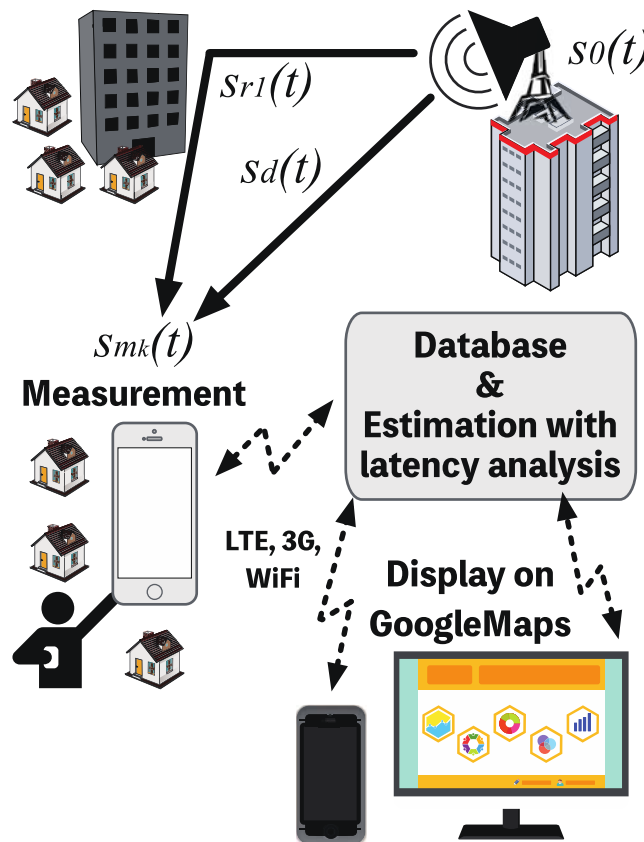


図 4.4 : Diagram of measurement.



### 4.3.2 計測装置

防災無線システム等の屋外拡声装置から放射する音を  $s_0(t)$ , 直接音を  $s_d(t)$ ,  $n$  次反射音を  $s_n(t)$ , 環境雑音を  $s_{noise}(t)$  とすると受音点  $k$  での信号  $s_{mk}(t)$  とすると, この  $s_{mk}(t)$  を用いて, 反射物の位置推定を行う。この録音品質が直接的に反射物の位置推定に影響を与えるため, 音に詳しくない, そして, スマートフォンに不慣れな市民が録音しても, 一定の品質で情報収集できることを設計方針とした。聴取点での録音のために, iPhone および Android の両者の開発環境 Monaca を用いてアプリケーションを開発した。一例として, クライアントアプリケーションの画面遷移を順に図 4.5 に示す。市民がこのアプリケーションを自身の端末にインストールし, 録音することにより, データベースサーバーにアップロードされる。また, 長期間での音環境変化にも対応できるように IoT 機器, 例えば Raspberry Pi での定点観測の情報も利用することを想定している。音の到来方向を考慮する, すなわち指向性を考慮した収録は時間遅延量推定精度の向上が期待できる。そのためのマルチチャンネル収録にも対応可能な設計になっている。

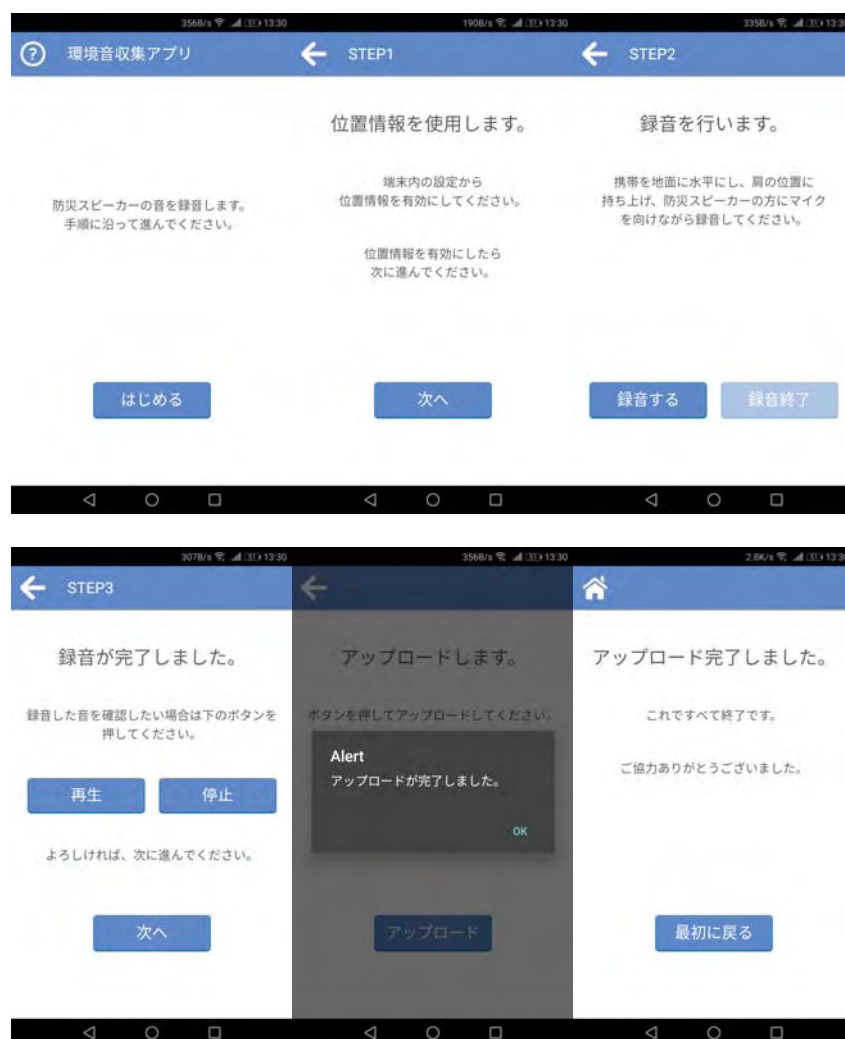


図 4.5 : Measurement application for a client.

### 4.3.3 データベース

反射を生成している物体の候補地点は、収録した音と収録位置などの付帯情報をデータベースに蓄積し、自己相関をベースとした時間遅延量算出に基づいて推定する。そのため、データベースには、収録した音、緯度・経度、日時、録音した端末の機種を保存する。本報告では、データベースサーバーには、MySQL (Ver. 5.7.20) を用い、上記の項目を保存するようにした。情報端末とサーバー間は、php で記述したプログラムを用いて情報を post する。その後、時間遅延量を算出し、データベースに追記録する。

### 4.3.4 推定された候補地点の表示

推定された候補地点は、一つの観測点につき一つの楕円となる。複数点の観測点のデータを用いることにより、複数の楕円が得られ、その交点が推定された反射物の位置となる。端末専用のアプリ開発には作業負担が大きくなるために、web browser および JavaScript を用いて実装した。web browser 上にて、位置、日時を入力することにより、それに対応したデータに基づいて推定結果を示す。図 4.6 に表示例を示す。



図 4.6 : Example of estimated results on web browser.

## 4.4 まとめ

本報告では、(2) 電気音響システムの一部として、屋外拡声システムの高度化を目指し、住民が受聴点で聞く音の品質を改善するためのアプローチの一つとして、居住地区近隣の建物や地理的影響によるロングエコーの抑制などを検討が考えられる。また、(3) 音環境・空間伝搬系における

改善を目指すために、聴取音計測システムを検討した。

屋外拡声システムの高度化においては、これまでに提案していたインテリジェント拡声システムがノード喪失時の制御不能となる問題点を自律型で再設計を行い、廉価なシングルボードコンピュータに実装し、動作検証を行った。結果、自動的にノードの停止および復旧を検出し、持続的に動作した。今後は、音信号の受信を各ノードで行えるようにし、完全に自律ノードとして動作するように改良を行う。また、ネットワーク回線への依存性、放射優先順位などの検討・実装を行い、フィールドでの実験を行う予定である。

聴取音計測システムにおいては、反射音を生成している物体の位置推定を可視化するシステムの設計および実装を行った。今後、屋外で観測したデータを充実させ、推定精度の向上、各種プラットドームでの利用のしやすさについて検討を行う予定である。

## 参考文献

- [1] 内閣府, 「災害時の避難に関する専門調査会津波防災に関するワーキンググループ 第2回会合資料」, 2016年1月23日.
- [2] 菅木 禎史, 北須賀 輝明, 坂本 修一, 山田 文彦, "防災・減災情報を効果的に伝送するメッシュネットワーク型 インテリジェント拡声システムの研究開発", [http://www.soumu.go.jp/main\\_content/000393982.pdf](http://www.soumu.go.jp/main_content/000393982.pdf). (as of 2018.1.15)
- [3] 小野口 平, "Sound emission timing control methods for improving signal to interference ratio on public address system," 熊本大学自然科学研究科 博士論文 2016.
- [4] Taira Onoguchi, Dan Murakami, Yoshifumi Chisaki, "Emission timing control method for improving signal to interference ratio on public address system," *Applied Acoustics*, Vol. 98, pp.70-78, 2015.
- [5] Irwansyah, Taira Onoguchi, Yoshifumi Chisaki, "Outdoor Obstacles Localization via the Intersection of Multiple Ellipses," *The 2016 Autumn Meeting of the ASJ*, 2016, pp. 1299-1302, 2016.

## 5. 音環境・空間伝搬系

### 5.1 公共空間の音響諸性能とアナウンスの明瞭度指数の対応関係

矢野 博夫（千葉工業大学 情報科学部 情報工学科）

#### 5.1.1 研究背景と目的

駅や空港ロビーの発着時刻や遅延情報のアナウンス，火災等の非常時での避難誘導等が拡声放送される．公共空間の音響情報伝達の面でこれらの重要な情報は正確に伝える必要がある．公共空間における音の情報伝達は，話声あるいは録音された音源から発せられた音がスピーカ等の電気音響設備及び拡声放送が行われている空間を伝わり，その空間や人間の耳に伝わると表せる．

音声情報の聞き取りやすさは，明瞭性と了解性の2つのパラメータからなるが，主観量としての明瞭度は，図 5.1.1 に示すように大別すると，①発声～②拡声システム～③室内伝送～④聴取者の能力及び聴取方法の4要因の影響を受けると考えられる．被験者を用いた聞き取り方式による明瞭度試験では①，④によるばらつきと試験に要する時間が膨大であり，多点にわたる比較は難しく，暗騒音や残響時間などの空間の音響性能の条件を変化させて条件毎の明瞭性を評価することは困難といえる．そこで，明瞭度を客観的に評価するには，①と④の要因を計測器で置き換え，②，③の要因である音声の伝送路が明瞭度に及ぼす影響を計測によって求めることが出来れば，明瞭度を客観的に評価することが出来ると考えられる[1]．

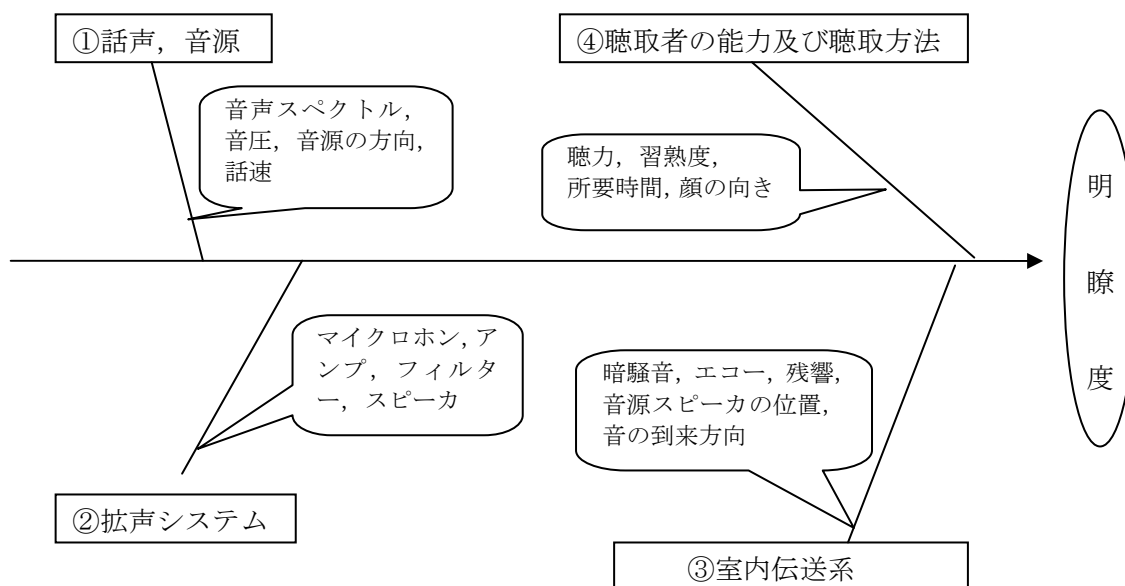


図 5.1.1 明瞭度に影響を及ぼす要因<sup>[1]</sup>

音の明瞭性を評価する指標としては Speech Transmission Index(以下 STI)や D 値，初期残響時間等が提案されており，ISO9921 や IEC60268-16 (2003) で規格化されている．そのうち STI は 0.00 から 1.00 までの値で表され，図 5.1.2 に示すような5段階で評価する．評価の基準として fair(0.45)以上であればアナウンスを聞き取るのに問題がない空間とされている[2]．



図 5.1.2 STI 値と明瞭度の評価 (IEC60268-16)

公共空間では暗騒音，エコー，残響時間の音響性能がアナウンスの明瞭性に関係していると考えられるが STI を用いた研究例は少ない．そこで本研究では，公共空間の暗騒音および残響時間などの音響性能とアナウンス音の明瞭度指数 (STI) の対応関係について比較検討した．

## 5.1.2 アナウンス音，Swept-sine 音の測定と明瞭度指数の算出

### (1) 概要

公共空間の明瞭度指数を算出することを目的とし，アナウンス音及び Swept-sine 音を音源とした測定を行った．公共空間の一例として津田沼 7 号館教室と 7 号館ロビーを対象とした．測定したアナウンス音及び Swept-sine 音は DIRAC(B&K)を用いてインパルス応答に変換し STI, D 値を求めた．

まず，津田沼 7 号館教室で DIRAC を用いてアナウンス音及び Swept-sine 音をインパルス応答に変換し，STI の値に対する再現性について確認した．DIRAC (DIRAC ROOM ACOUSTICS Software : TYPE 7841: B&K)とは内・外部から入力された音源をインパルス応答に変換するソフトのことである．次に，暗騒音と残響時間の条件を変化させて，アナウンス音及び Swept-sine 音によりインパルス応答を測定して，STI, D 値を算出し，音響性能との対応関係を検討した．

### (2) STI 測定における再現性

DIRAC を用いて内外部からの音源をインパルス応答にし，STI を算出したときに値が保持されるのか確認した．

#### 1) 測定条件

アナウンス音源は Audio Acoustics Technical CD より以下の 2 音源を用いた．基準点において A 特性平均音圧レベルで男声 62.8dB，女声 62.5dB とした．インパルス応答は Swept-sine 音を用いて求めた．

- ・日本語 男声アナウンス (48kHz /1:29)
- ・日本語 女声アナウンス (48kHz /1:33)

アナウンスの再生時間は 87.4 秒，Swept-sine 音は 43.7 秒とし，各 4 回測定した．

使用した男声アナウンスおよび女声アナウンスの周波数特性の平均(87 秒)を図 5.1.3，図 5.1.4 に示す．

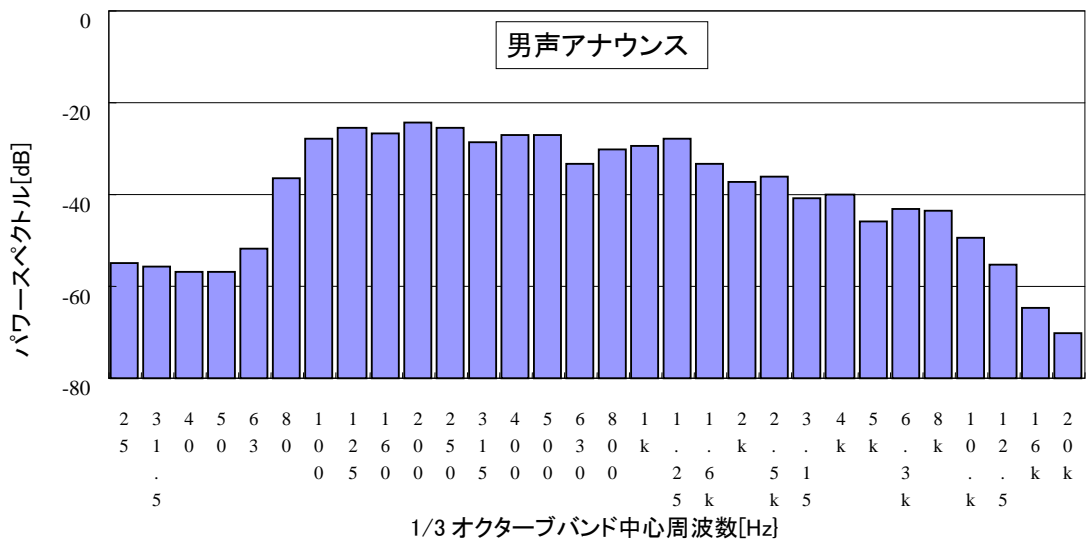


図 5.1.3 男声アナウンスの周波数特性（平均）

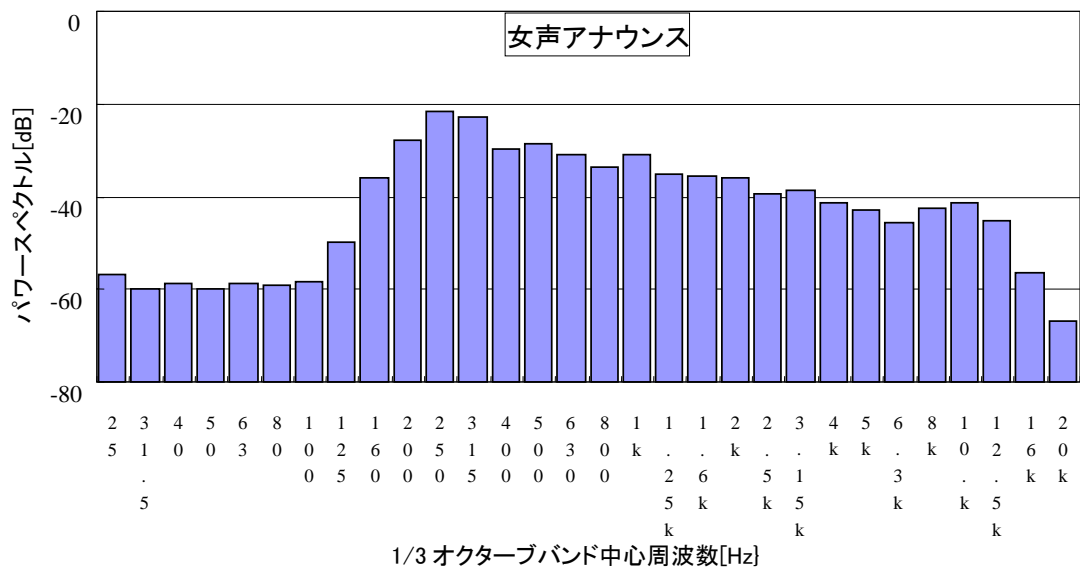


図 5.1.4 女声アナウンスの周波数特性（平均）

アナウンスの再生には音声再生用スピーカ(B&K Echo Speech System)を, Swept-sine 音は無指向性スピーカ(12 面体スピーカ)を用いた. 音源の高さはいずれの場合も 1.5m とした. 受信には, サウンドレベルメータ (RION NL-32) を高さ 1.2m として設置した. 音源スピーカ前 1m 点を基準の測定点とした. 測定点①を教室の中央でスピーカから 8m 地点とした.

測定場所はキャンパス内講義室 (7302) 室とした. これらの位置関係を図 5.1.5 に示す.

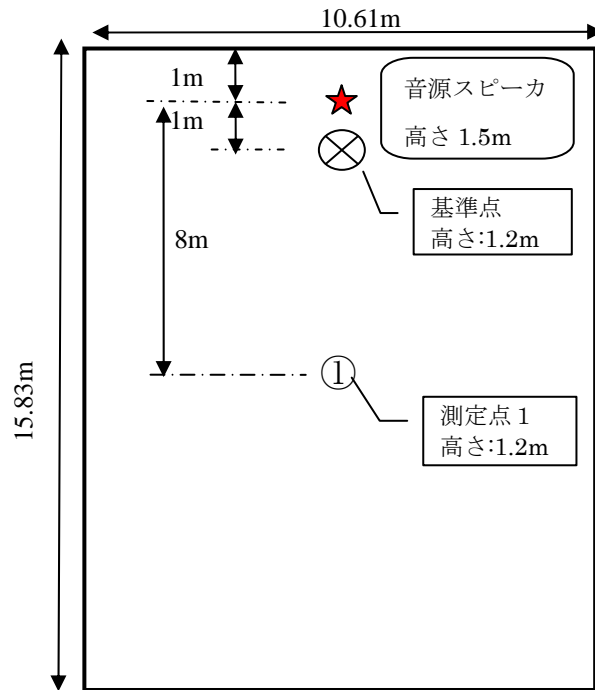


図 5.1.5 7302 講義室における測定点と機材配置図

測定風景を次に示す.



写真 1 音源スピーカと基準点



写真 2 測定点 1

## 2) 結果および考察

基準点において 4 回の測定を行い、アナウンスと Swept-sine 音から求めた STI を表 5.1.1 に示す.



表 5.1.1 STI の測定結果

回数	STI の測定値		
	男性アナウンス	女性アナウンス	Swept-sine 音
1	0.65	0.66	0.90
2	0.63	0.66	0.89
3	0.65	0.65	0.91
4	0.65	0.66	0.90
平均	0.645	0.658	0.90
標準偏差	0.009	0.004	0.007

表 5.1.1 より，DIRAC を用いて各アナウンス，Swept-sine 音をインパルス応答に変換し，STI を求めた結果は各回ともに同程度の値が得られた．いずれの音源信号についても，標準偏差が小さいことから STI の再現性は高いことが判る．

### 5.1.3 暗騒音，残響時間を考慮した場合の明瞭度指数の挙動

公共空間としての音響性能が異なる室として 2 室を選び，暗騒音を人為的に付加して SN 比を変化させて明瞭度指数の挙動について実験的に調べた．対象の公共空間は本学津田沼キャンパス内 7302 講義室および 7 号館ロビーの 2 種類とした．暗騒音としては，ピンクノイズを音源とは別のスピーカから出力し，大きさを変えてアナウンス音及びスイープ音の測定を行い，STI 値を算出した．残響時間は，対象とする公共空間でインパルス応答の測定を行い算出した．

#### (1) 測定条件

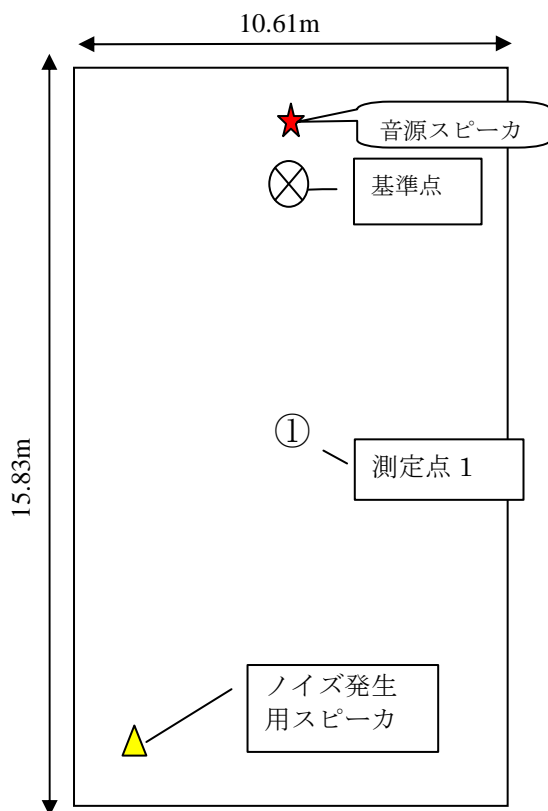
アナウンス音源は前項で用いた男声，女声の 2 種類を用いた．基準点において A 特性平均音圧レベルで男声 62.8dB，女声 62.5dB とした．インパルス応答は Swept-sine 音を用いて求めた．

暗騒音を変化させる条件にはアナウンスを流している間，人為的に暗騒音を発生させ測定を行った．本研究では公共空間全体の暗騒音を変化させるためにピンクノイズを別のスピーカから出力した．暗騒音の大きさは既存の測定からアナウンス音と暗騒音の SN 比を参考にし，それぞれの測定音の+4dB, 0dB, -6dB, -10dB, -14dB, -19dB に設定した．また，ノイズを加えない場合の測定も行った．

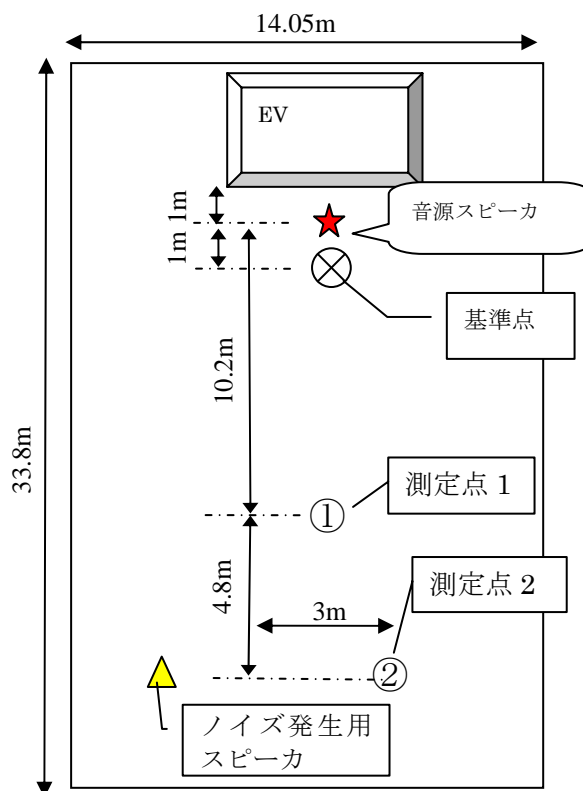
残響時間を変化させる条件には，対象の公共空間を変えて明瞭度指数の測定を行った．対象の公共空間は 7302 講義室と 7 号館ロビーとし，残響時間は 1/1Oct band 分析,500Hz で求めた．7302 教室では 0.52 秒，7 号館ロビーでは 3.36 秒であった．

スピーカの位置は壁から 1m で，高さは 1.5m に設定した．受音点の高さは 1.2m とした．測定対象の 2 室における測定位置関係を図 5.1.6 に示す．





(a)7302 講義室



(b)7号館ロビー

図 5.1.6 測定点と機材配置

7号館ロビーでの測定風景を写真3~5に示す.



写真 3 7号館ロビーにおける測定  
(12面体スピーカと基準点)



写真 4 7号館ロビーにおける測定  
(アナウンス用スピーカと測定点)



写真 5 7号館ロビーにおける測定  
(暗騒音用スピーカと測定点)

(2) 測定結果および考察

測定した明瞭度指数を測定場所別の測定点ごとに整理して図 5.1.7, 5.1.8 に示す. また, 明瞭度指数と残響時間の関係について整理した結果を図 5.1.9 に示す.

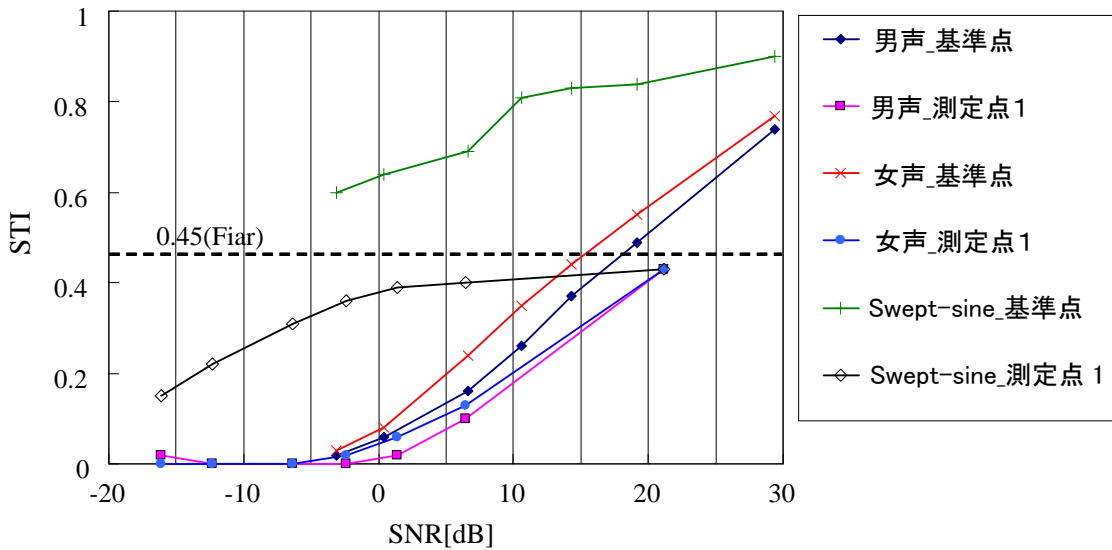


図 5.1.7 7302 講義室における STI 測定結果

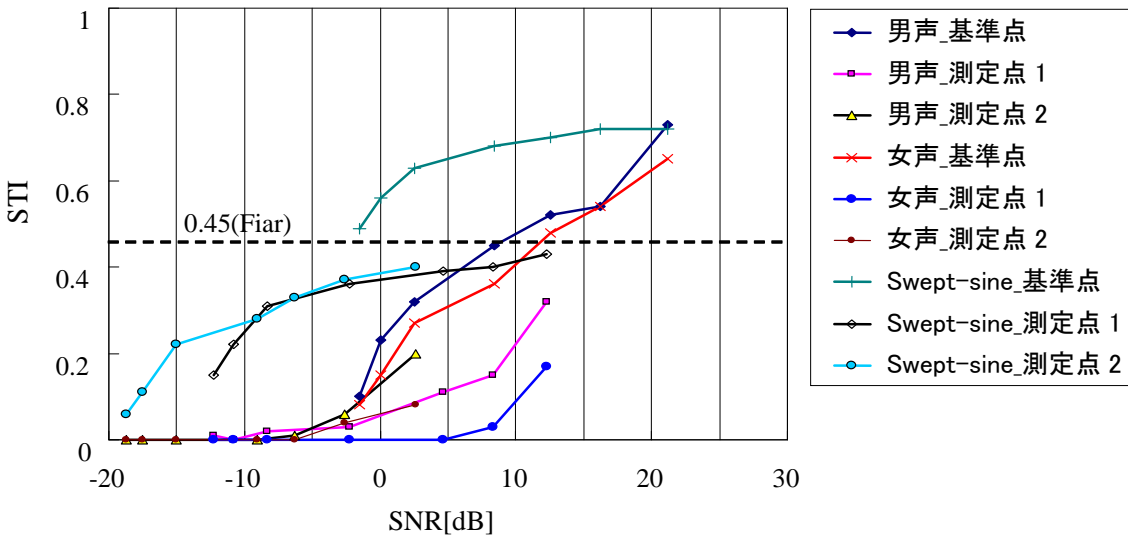


図 5.1.8 7号館ロビーにおける STI 測定結果

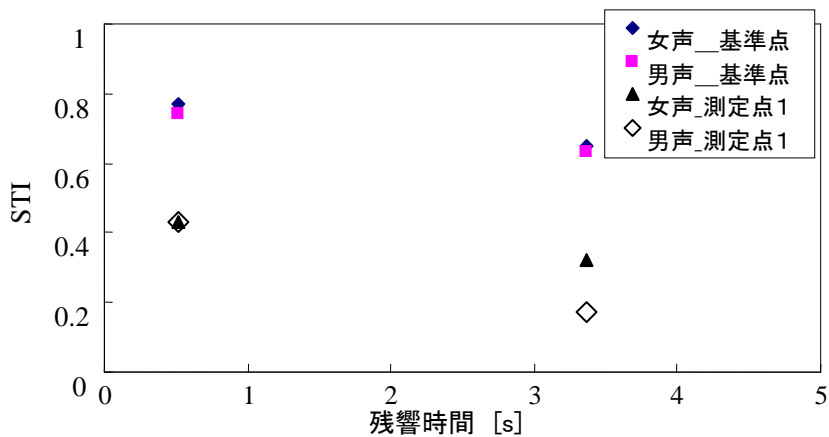


図 5.1.9 残響時間と STI

7302 講義室の基準点における結果(図 5.1.7)は, SN 比が下がるにつれて STI 値は小さくなり, SNR が約 15dB より下がると STI は 0.45 (fair) より小さくなっている. 男声に比べて女声の方が STI はわずかに大きくなっている. 7302 講義室の測定点 1 における結果は, ノイズを加えない場合でも STI は 0.4 程度であり, ノイズを加えた状態では 0.1 以下と極端に悪化している. 一方, swept-sine によるインパルス応答から算出した STI は, SN 比が 10dB 以上ではほとんど変化が見られず, 基準点では 0.8 以上, 測定点 1 では 0.4 程度となっている.

7 号館ロビーにおける結果(図 5.1.8)は, 基準点では SN 比が下がるにつれて STI 値は小さくなり, SNR が約 10dB より下がると STI は 0.45 (fair) より小さくなっている. 男声に比べて女声の方が STI はわずかに大きくなっている. 測定点 1 における結果は, ノイズを加えない場合 (SNR=12dB) でも STI は 0.4 以下であり, ノイズを加えた状態では 0.1 以下と極端に悪化している. 測定点 2 については, 最大でも 0.2 程度となっている. 一方, swept-sine によるインパルス応答から算出した STI は, SN 比が下がるにつれて緩やかに下がっていく傾向にあり, 基準点ではおよそ 0.5 以上となっているが, 測定点 1, 2 では最大でも 0.4 程度となっている.

残響時間による STI の変化は, 図 5.1.9 によれば残響時間が長い音場では STI 値が低くなる傾向となっている.

#### 5.1.4 まとめ

ここでは, 残響時間および暗騒音と STI の測定値との関係について, 実測を行った結果について述べた. それによれば, STI として 0.45(fair)以上を得るためには, SN 比として約 15dB 以上必要であることが判った. 今回は, 話者の原音に近い音圧レベルで検討を行ったが, 拡声した音声アナウンスによる場合の SN 比と STI の関係についても検討する必要がある.

本実験では STI 測定の音源信号には録音したアナウンス音を用いているが, 駅やロビーのアナウンス音として合成音声による放送も多くみられるため, 今後は合成音声での明瞭度を検討する必要がある. また, 避難誘導の場合に「にげろ」「はしれ」等の短い音節に対する STI は, 音声スペクトルの特長と残響による影響が受けにくくなるため, 算出される値は大きくなると考えられるが, この点について音節の長短と STI の関係を明らかにすることが必要である.

#### 参考文献

- [1]中島立視,“音声明瞭度指標(STI)の測定”,日本音響学会誌,49 卷 2 号(1993)
- [2]IEC 60268-16, (2003)

## 5. 音環境・空間伝搬系

### 5.2 一般室における 6ch. 再生システムによる方向感の再現精度

矢野 博夫（千葉工業大学 情報科学部 情報工学科）

#### 5.2.1 はじめに

実音場である 3 次元音場を実験室内に再現するために 6ch. 收音・再生システムが用いられている。このシステムは、3 次元直交軸上に配置された 6 本のマイクロホンを使って録音し、無響室内に配置された 6 台のスピーカから音を再生するシステムである。6ch. システムは無響室に設置することで音場を再現できる。しかし、無響室の設備は再生音場として理想状態ではあるが、本格的な無響室を備えるのは困難であることが多い。また無響室は吸音楔で覆われているため視覚情報と音場再生による聴覚情報がずれてしまい、実際の音場をイメージしづらい。6ch. システムを無響室ではなく、一般的な室内で構築できれば実際の音場がイメージしやすい。そこで、一般的な室内音場において 6ch. 再生システムによる 3 次元音場の再現可能性について検討を行った。ここでは、残響が長い一般室において、吸音状態を変化させて 6ch. 再生システムによる方向感の再現精度に関する聴感実験を行った。

#### 5.2.2 6ch. 收音・再生システムの原理

##### (1) システムの概要

6ch. 收音・再生システムとは、環境音が存在する実際の状況（原音場）を実験室内に再現するための 3 次元音場シミュレータであり、收音部分と再生部分から構成されている。1]

このシステムは 3 次元方向に向けた 6 本の単一指向性マイクロホンを通して原音場の音を録音し、その音データを無響室に直交配置した 6 台のスピーカから再生するといった、きわめて単純なシステムである。そのため、複雑な信号処理の必要がなく、音を聴く際の姿勢についての制約も緩いという特徴がある。このシステムの概略を図 5.2.1 に示す。

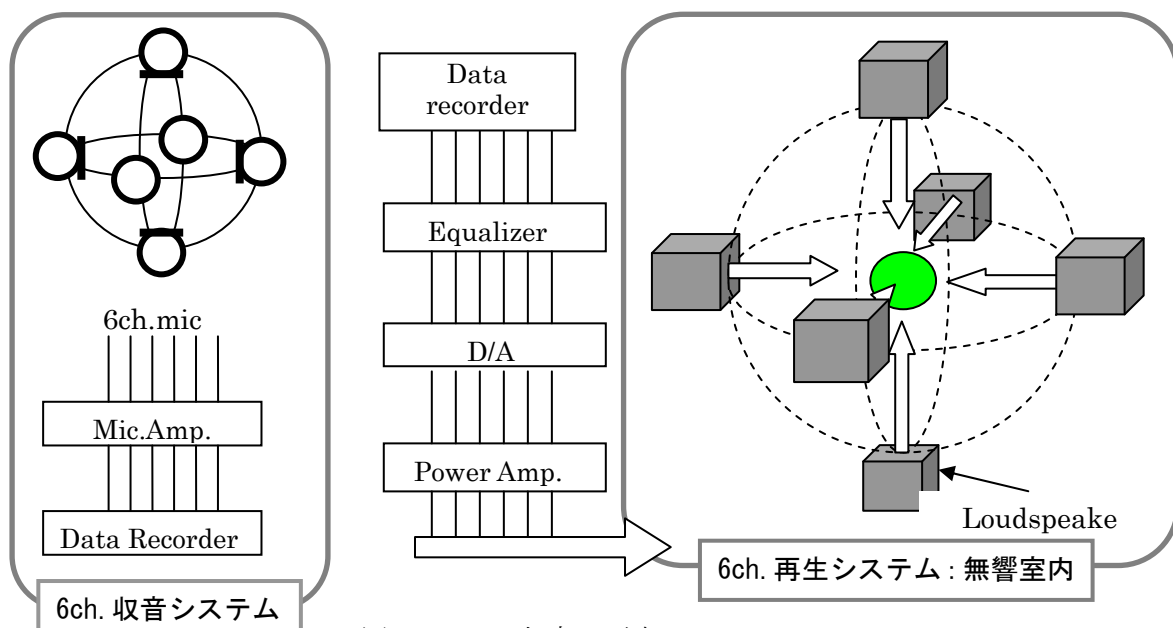


図 5.2.1 6ch. 收音・再生システム

## (2) 收音システム

6本の単一指向性マイクロホンを原点が中心に指向性が内側に向くように3次元軸上に設置する。これにより各マイクロホンが方向別の音を指向性ごとに録音する。

現在使用されている6ch.マイクロホン(図5.2.2)は各マイクロホンを内側に向けている。各マイクロホン間隔を15mmまで狭めることにより、既存の6ch.マイクロホンより高周波数の音を收音することができる。

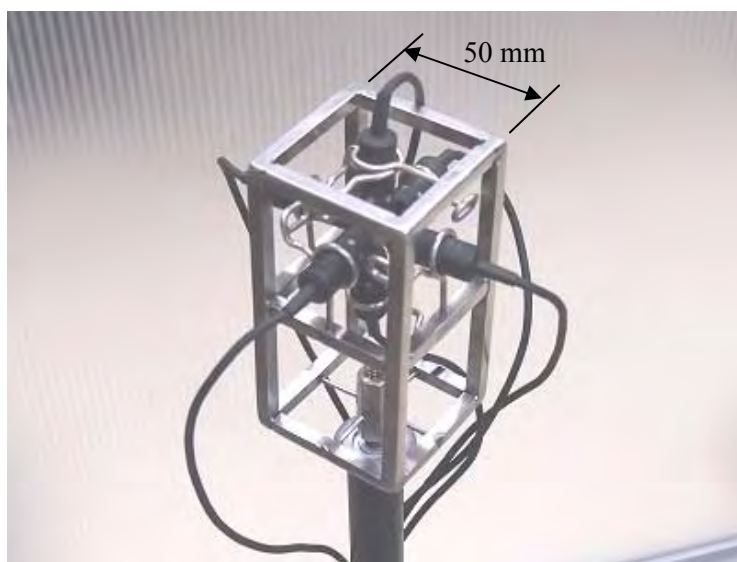


図 5.2.2 広帯域6ch.マイクロホン

## (3) 再生システム

6ch.再生システムとは、無響室に直交配置した6台のスピーカから音声データを再生するシステムである。水平方向におけるスピーカの配置は受音点の正面を $0^\circ$ とし直交軸を $45^\circ$ 回転させた配置とする。再生システムに用いる機材は、ハードディスクレコーダ、デジタルミキシングエンジン、D/Aコンバータ、アンプ、スピーカである。無響室は一般の教室を改築したもので天井が低くなっており、水平方向のスピーカは中心から各2.54m、上下のスピーカは中心から各1.2mとなっており距離が異なるため、DME32を使い上下スピーカに4msの遅延をかけている。無響室の寸法を表5.2.1に、図5.2.3に無響室を示す。

表 5.2.1 無響室の寸法・諸元

	寸法(縦×横×高さ)[m]
無響室	5.13×4.75×2.60
グレーチング	5.13×4.75×0.30
吸音材	グラスウール, 厚さ300mm, 楔状

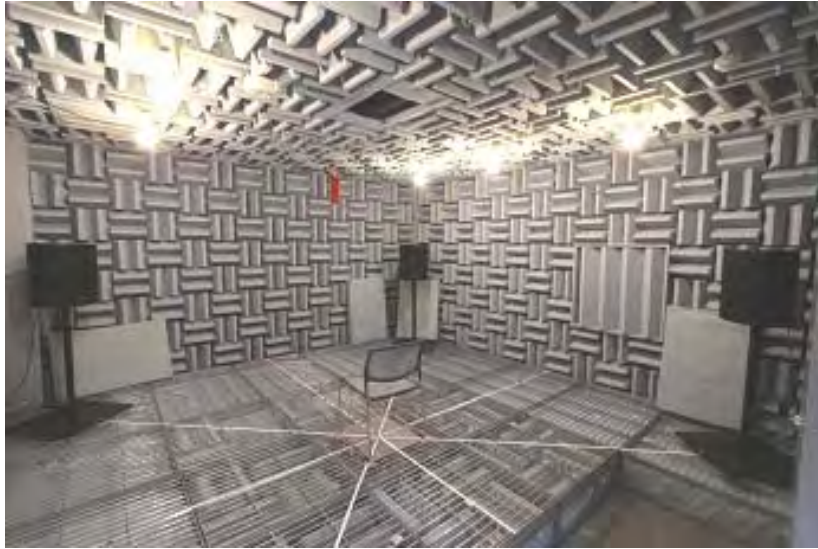


図 5.2.3 無響室

(4) 無響室での再現精度

これまでに 6ch. 収音・再生システムの再現精度に関する研究が行われてきた<sup>[1]</sup>. そのなかで無響室内において方向定位実験が行われた. その実験結果を図 5.2.4 に示す. 実験は, 音源方向を 30° ごとにかえて 6ch. マイクロホンにより測定した方向別インパルス応答とピンクノイズの断続音を畳み込み, シミュレートする音源方向をランダムな順序で変えてそれぞれ提示された. 図 5.2.4 に水平方向と鉛直方向(水平より上)の結果を示す. 結果をみると, 水平方向は隣接する角度に認識の誤りがみられるが, 提示した音源方向と人が判断した音源方向はおおむねよい対応となっている. 鉛直方向は水平方向と比べると誤りが大きく, あまり良い対応とはなっていない. これらの結果より, 人間の感覚は縦方向にはあまり正確ではないといえる. また, 水平より下の角度については, 下方向からの音は聴取者自身で遮られてしまうため, さらに音源の方向を誤認識すると考えられる.

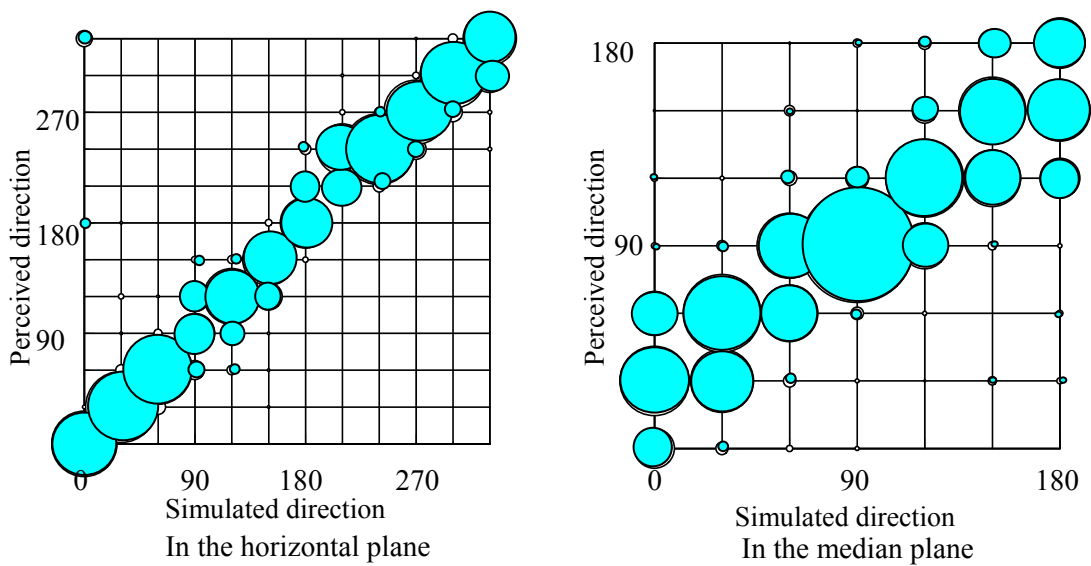


図 5.2.4 無響室における方向定位実験の結果



### 5.2.3 一般室の音響特性

6ch. 再生システムを設置するにあたって一般室の音響特性が音の再生に影響を及ぼす。そこで一般室の音響特性として残響時間の測定を行った。一般室の寸法は縦 4m×横 3m×高さ 2.4m の直方体室である。図 5.2.5 に一般室を示す。

#### (1) 残響時間

一般室内において 3 種類の条件を設定し、残響時間を測定した

- ・ 条件 1 : 吸音処理無し
- ・ 条件 2 : 吸音パネル 2 枚配置
- ・ 条件 3 : 吸音パネル 4 枚配置

この 3 条件で測定を行った結果を比較する。図 5.2.6 に測定場所を示す。



図 5.2.5 一般室

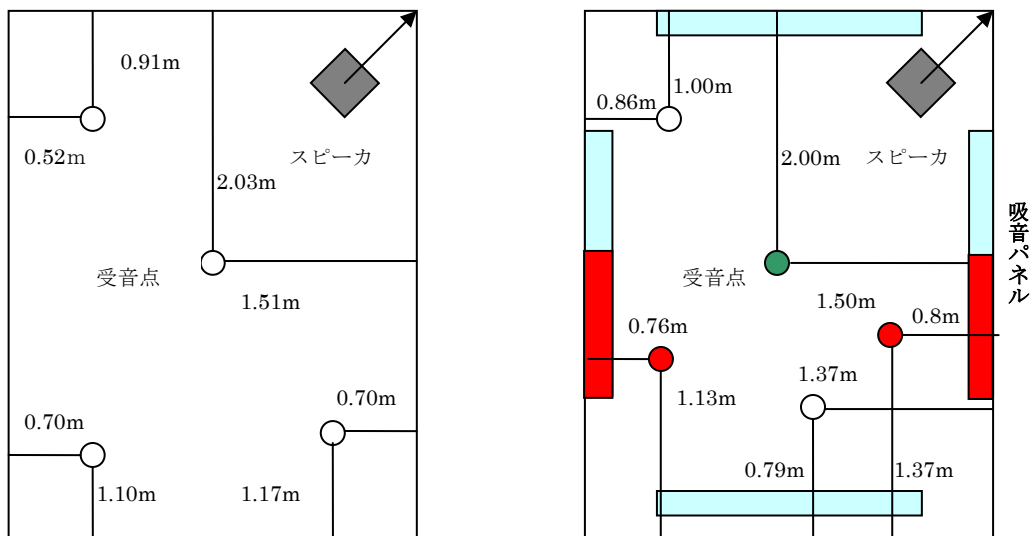


図 5.2.6 一般室における吸音パネルの設置状況と測定点配置

## (2) 測定結果

一般室内における残響時間の周波数特性を図 5.2.7 に、残響時間より求めた室の平均吸音率を図 5.2.8 に示す。図より吸音パネル持ち込むことにより大幅に残響時間が低減されたことが判る。

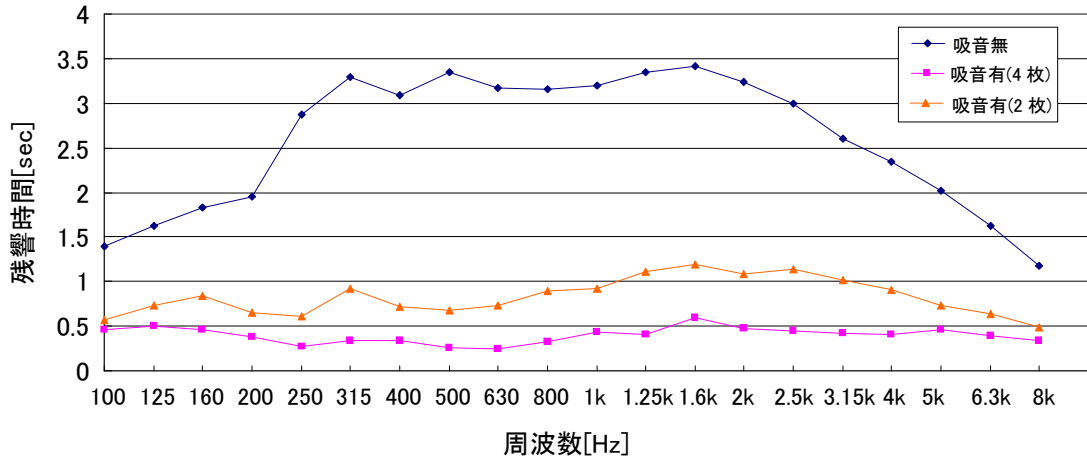


図 5.2.7 一般室の残響時間周波数特性

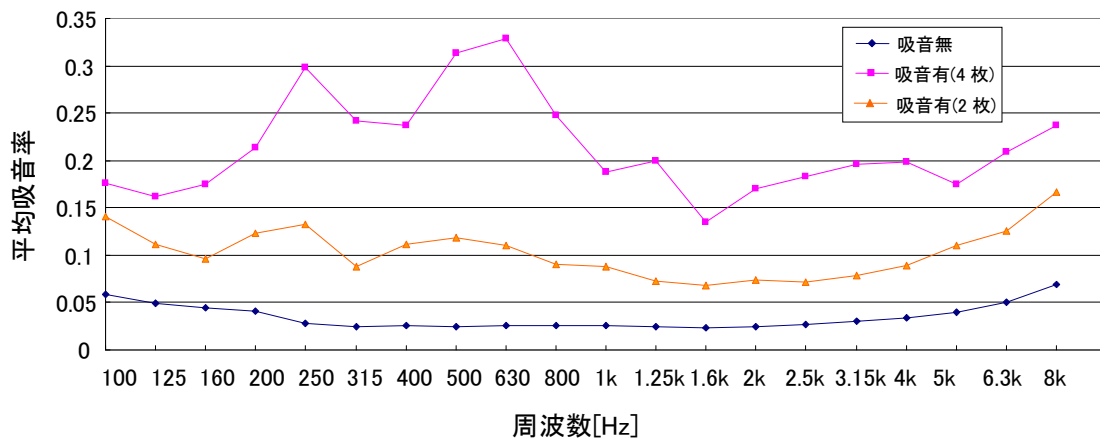


図 5.2.8 一般室の平均吸音率一周波数特性

## 5.2.4 聴感実験

### (1) 実験準備

聴感実験に用いる音源は、無響室内で 6ch.マイクロホンを用いて 30° ごとにインパルス応答を測定した。求めたインパルス応答に音源信号のピンクノイズ断続音(ON:1sec,OFF:0.5sec を 3 回)を畳み込んだ信号を聴感実験に用いた。

### (2) 6ch. 再生システムの構築

聴感実験を行うために一般室内に 6ch.再生システムを構築する。水平方向のスピーカは 2.27m 四方に高さ 1.2m で設置し、上部スピーカを 2.00m、下部スピーカを 0.30m の位置に設置した。スピーカから受音点までの距離は水平 1.60m、上部 0.80m、下部 0.9m である。

図 5.2.9 に構築した部屋の様子を示す。システムの概略を図 5.2.10 に示す。



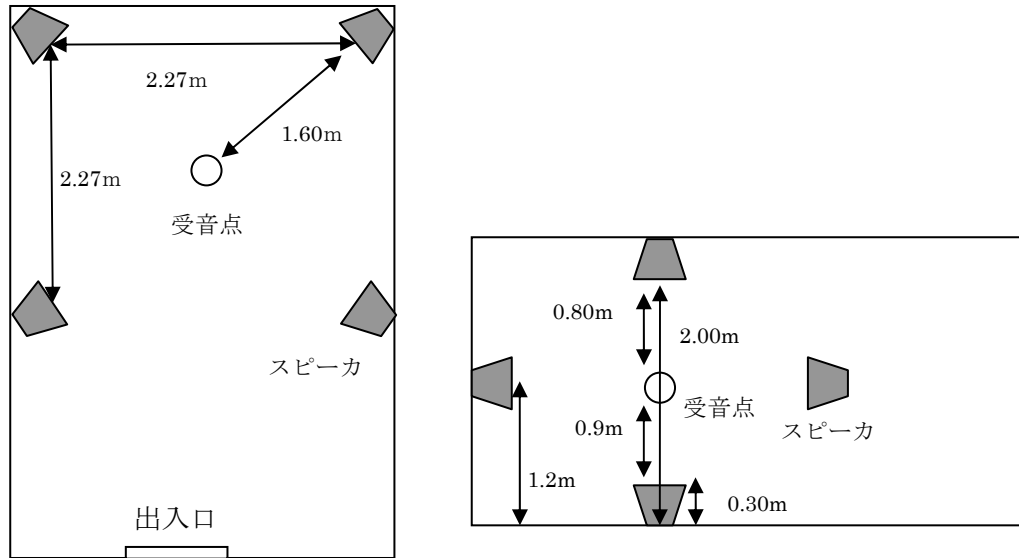


図 5.2.9 6ch.システム構築図(左：水平，右：鉛直)

### (3) 実験方法

方向感の聴感実験を行った。実験では  $30^\circ$  ごとに  $360^\circ$  全 12 方向の音源方向を再生した。一回の実験では 1 つの音源方向につき 4 回ずつ計 48 回ランダムな順序で再生した。また、回答は  $0 \sim 330^\circ$  について 1~12 の数字を対応させたカードを壁に配置し、被験者に設定した音源方向に対し、判断した音の到来方向に対応した番号を回答させた。被験者は水平方向が 8 人、鉛直方向 7 人で正常な聴力を有する 20 代の男女とした。被験者に水平方向と鉛直方向に対して、吸音パネルを配置した場合と、配置しなかった場合で実験を行った。また、条件として 6ch.スピーカの中心に設置した椅子に座ってもらい、頭は動かしても良いとした。番号の対応を図 5.2.11 に水平方向、図 5.2.12 に鉛直方向を示す。図 5.2.13 に実験配置を、図 5.2.14 に実験風景を示す。

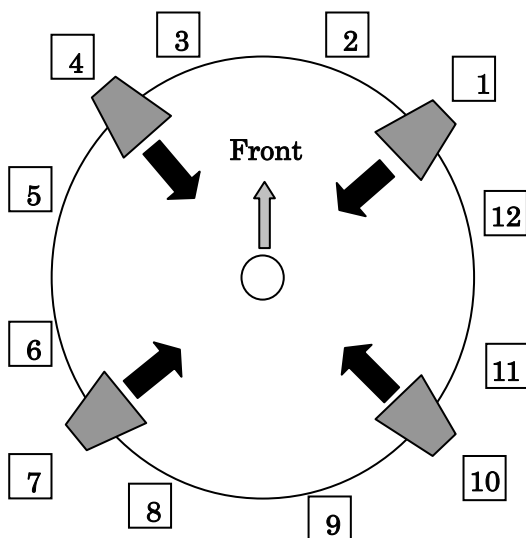


図 5.2.11 方向定位実験(水平)

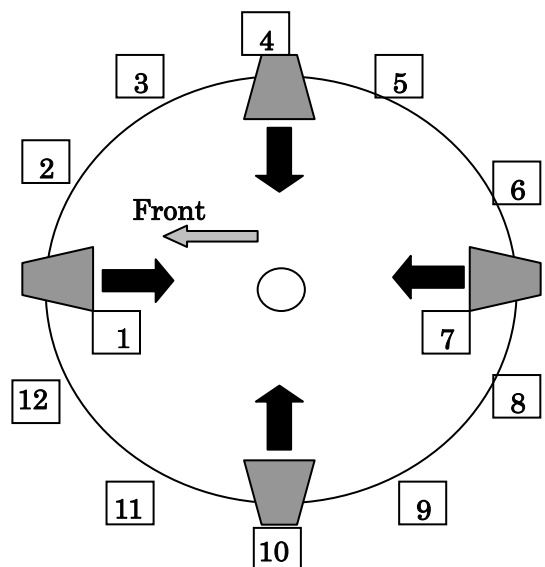


図 5.2.12 方向定位実験(鉛直)

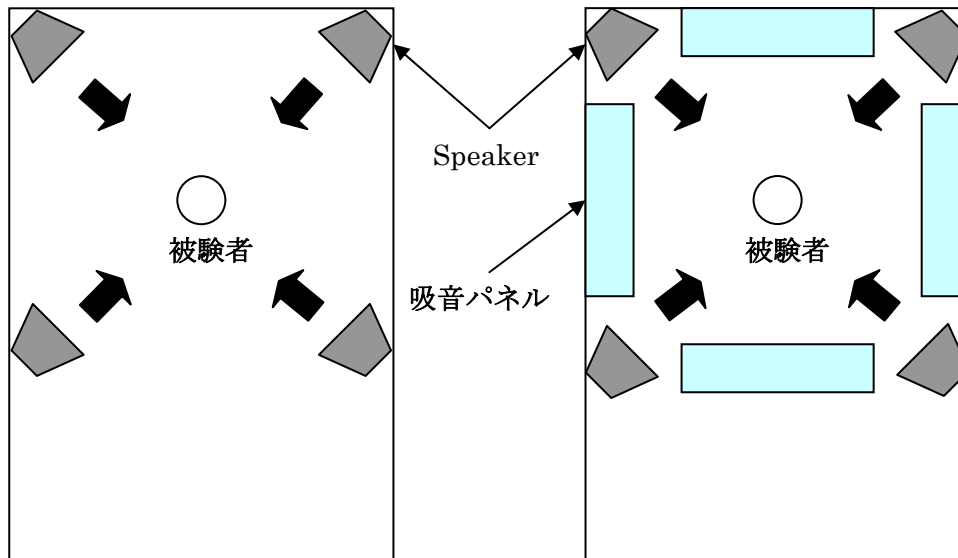


図 5.2.13 実験配置

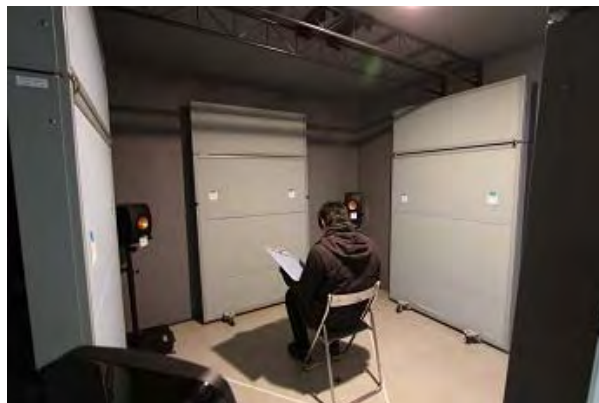


図 5.2.14 実験風景(吸音パネル4枚設置)

#### (4) 実験結果

実験結果は、再生角度に対する回答角度の回答数をバブルグラフにまとめた。水平方向の被験者全員の回答をまとめて室内の吸音の無し・有りの別に図 5.2.15 および図 5.2.16 に示す。鉛直方向の被験者全員の回答をまとめて室内の吸音の無し・有りの別に図 5.2.17 および図 5.2.18 に示す。グラフ円の半径は回答数の比を表し、再生角度と回答角度が一致した場合、結果は  $45^\circ$  線上に布置される。図 5.2.15 をみると再生角度に対する回答角度に広範囲にわたって誤りが見られる。図 5.2.16 をみると回答が  $45^\circ$  線上付近にまとまっており、再生角度  $30^\circ$  から  $300^\circ$  に対するご回答は減少している。図 5.2.15 より認識誤差の範囲は狭まっているが、依然として  $0\sim 60^\circ$  程度の誤差が認められる。また、どちらも再生角度が  $210^\circ$  以上になると回答角度が  $270^\circ$  に寄ってしまっている。

鉛直方向の結果は、吸音無しに比べて吸音した場合には、 $180^\circ$  以降については  $45^\circ$  線上によっていることが判る。鉛直方向の実験では回答が  $180^\circ$  ,  $90^\circ$  ,  $0^\circ$  に集中しているようにみえることから、人の鉛直方向の判断の精度は水平方向に比べて悪くなっていると考えられる。

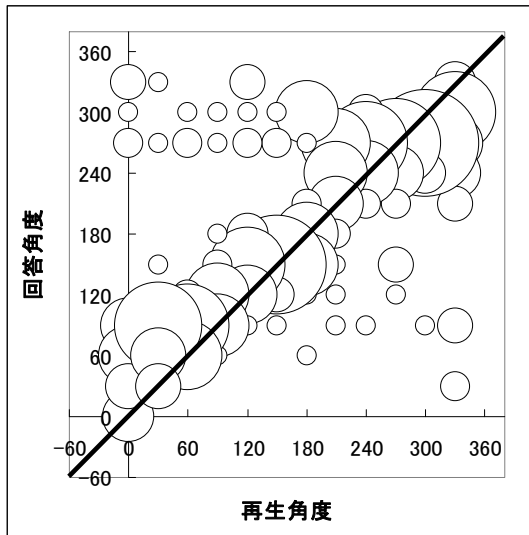


図 5.2.15 水平方向実験結果(吸音無)

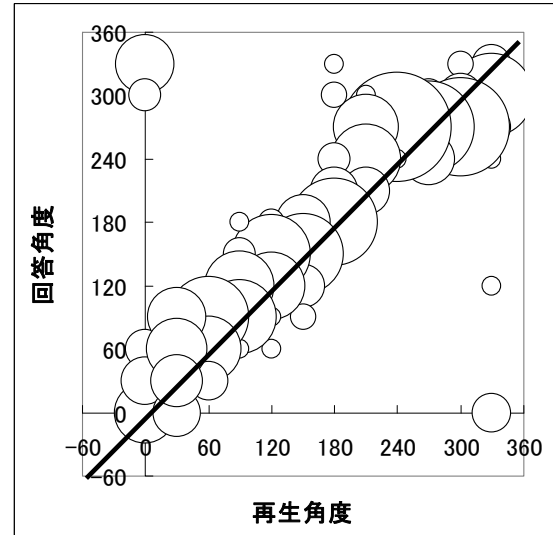


図 5.2.16 水平方向実験結果(吸音有)

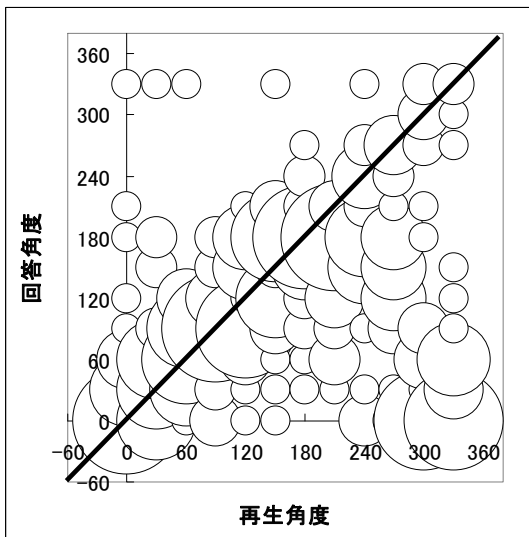


図 5.2.17 鉛直方向実験結果(吸音無)

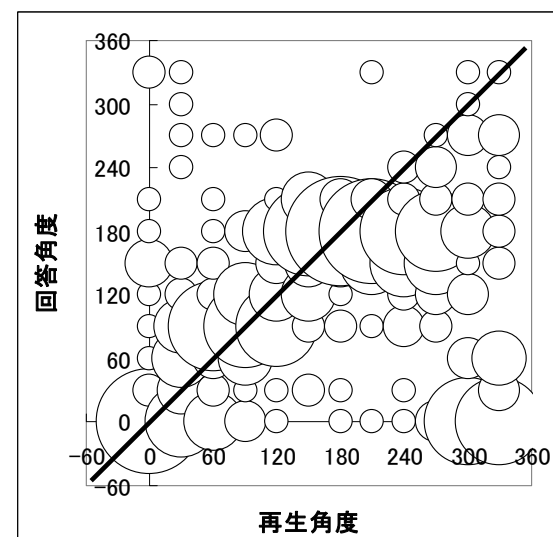


図 5.2.18 鉛直方向実験結果(吸音有)

### 5.2.5 まとめ

本研究では 6ch.再生システムを一般室で使用するために一般室での方向感に関する聴感実験を行った。6ch.收音・再生システムは無響室や多くの機材を必要とするのでより簡易的に 6ch.システムの利用が求められている。そこで教室内に直方体の部屋を建て、そのなかで簡易的な 6ch.再生システムを構築し一般室で 6ch.再生の方向感が再現できるのかについて聴感実験を行った。無響室では音の反射・残響がないので收音した音をそのままスピーカから流せば実現できた。しかし一般室では残響・反射があるので 6ch.システムを持ち込んで再現できるか問題であった。そこで実験条件を、残響を低減しない場合と吸音パネルを持ち込んで残響を低減した場合の 2 通りに分け、残響時間によって方向感にどのような影響があるのかについて実験を行った。

聴感実験の結果から、水平方向の方向感は無響室に比べれば精度が良いとはいえないが、ある程度の方向感は再現できているといえる。残響を低減することによって方向感の精度向上も確認できた。しかし吸音を行っても全体的に 30~60° のずれがあり、また 210° 以上の角度が

270° に寄っている。認識がずれる要因として考えられるのは、一般室のモードの影響、スピーカ特性、壁からの反射音、部屋の寸法、受音点とスピーカとの距離、視覚情報によってスピーカの位置に認識が引っ張られる等が考えられる。鉛直方向の方向感は誤判断が多いが、吸音をした場合のほうが吸音をしていない方より認識の誤りが広範囲に及んでいるように見える。回答角度が 0° , 90° , 180° に集中しているのは下部スピーカが被験者の直下にあるため、スピーカからの音が被験者自身に遮られることによって他のスピーカからの音より小さく聴こえ、音像の判断に影響がでていいると考えられる。鉛直方向は無響室においても精度が良くないが、残響環境下では精度が著しく低下している。また被験者の位置に対してスピーカの位置が近いため頭を動かした際に音像が一つのスピーカに寄ってしまうことも考えられる。

以上の結果より、一般室においてもある程度の吸音を施せば水平方向に対する方向感は再現可能であると考えられる。また、再生音場の残響時間より長い残響時間を持つ公共空間内で吸音された場合の音場再現であれば一般室においても実験が行えるものと考えられるが、この点についてはさらに追加実験による確認が必要である。

#### 参考文献

[1] 横山 栄, 矢野 博夫, 橘 秀樹, 上野 佳奈子, 坂本 慎一, “6 チャンネル収音・再生システムの原理と主観評価実験への応用例”, 平成 18 年日本音響学会アコースティックイメージング調査研究委員会, 日本音響学会建築音響研究委員会, 日本音響学会騒音・振動研究委員会

## 6. 音環境・空間伝搬系

### 広域放送の明瞭性改善に関する研究

佐藤 史明（千葉工業大学 創造工学部 建築学科）

#### 6.1 はじめに

災害の発生の通報、避難命令、防犯の呼びかけ等に使用されている広域放送システムは、そのアナウンス音が、正確に明瞭性よく伝えられなくてはならない。この課題についての研究は非常に広範囲であり、筆者を含む大学の音響研究グループでは、音響情報伝達の流れを図 6.1 のように整理して多方面からの研究を進めてきている[1, 2]。その中で筆者らは、これまでは特に空間伝搬系について、屋外音場のエコーダイアグラムの測定手法や予測手法（可聴型を含む）に関する研究を進めてきた。それらは文献[3-19]で報告してきたとおりである。ここでは、空間伝搬系の研究のみならず、電気音響システムや音源信号に関する検討を行ったので結果を報告する。空間伝搬系については、これまで可聴型予測システムに使用してきている 6 ch. 收音-再生システムについて、その精度に関する検討を行った。電気音響システムについては、拡声スピーカの配置に関する検討を行った。音源信号については、話速やポーズ長をパラメータとした聴感実験を行った。

なお、この広域放送の明瞭性確保のテーマについては、やはり総合的見地から、あるいは個別の要素課題に対して、幾つかの研究グループが鋭利研究を進めているが、それらを参考文献として挙げきれない点をご容赦頂きたい[20-24]。

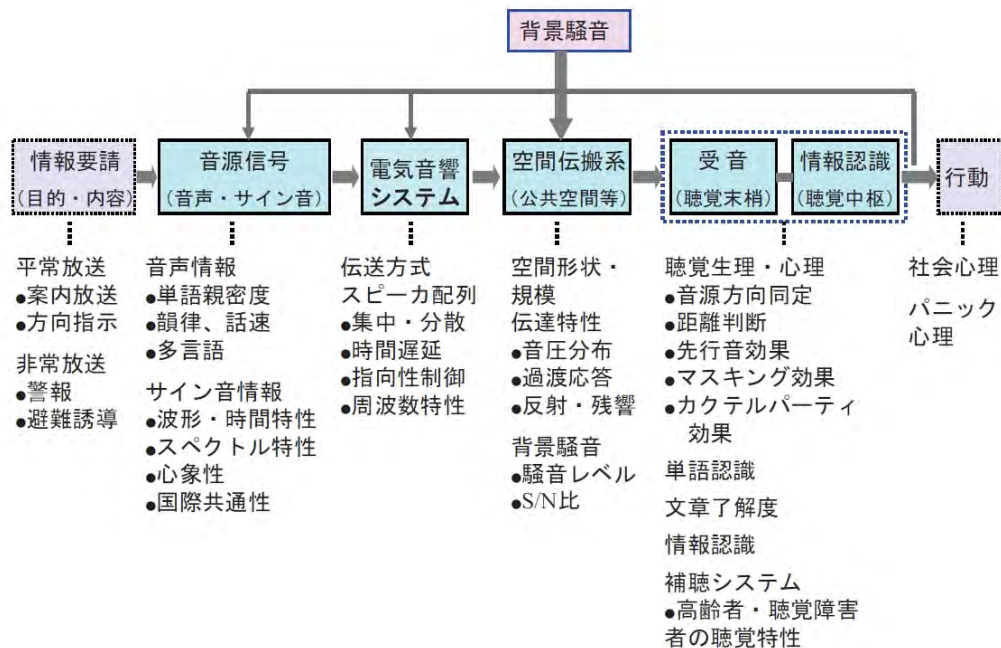


図 6.1 音響情報伝達の流れ

## 6.2 6ch. 収音-再生システムの精度に関する検討

### 6.2.1 音像定位実験

6ch. 収音-再生システムの音像の定位実験については、これまで水平面内全周と正中面内では180° までの上方方向の音像定位実験が行われていたが、改めて水平面内と正中面内における0° から330° の全周の定位実験を行った。またその際、手がかりを与えた場合の検討として、ここでは離散的な移動音源を提示した実験も行った。

6ch. 収音システムで測定した方向別インパルス応答にWhite Noiseの断続音を畳み込み、試験音とした。ランダムな順序で2回提示し、被験者には音像の方向を回答させた。被験者は本学学生9名とし、頭部を自由に動かしてよいと教示した。手がかりを与えた場合の検討では、30° 刻みに離散的に移動する音源を試験音とし、最後に音像があった方向を回答させた。音源の移動パターンは図6.2に示すよう2パターンとした。

結果を図6.3と図6.4に示す。手がかりを与えない場合(図6.3)、まず水平面内においてはほぼ正確に音像を定位できており、既往の研究[25]の通りの結果となった。正中面内においては、0° から180° までの上方方向ではある程度の正確な定位が得られているのに対して、210° から330° までの下方方向では上下誤判定する傾向がみられた。手がかりを与えた場合(図6.4)、正中面内の下方方向に対して上下誤判定が依然みられるものの、水平面内、正中面内ともに音像定位の正確性が改善された。

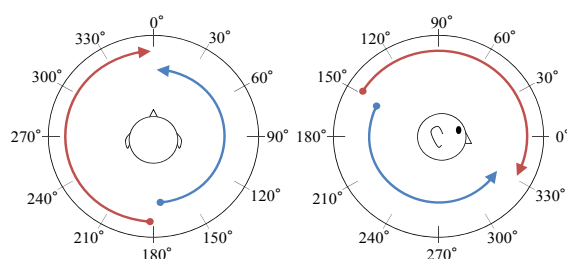


図6.2 移動音源の提示イメージ

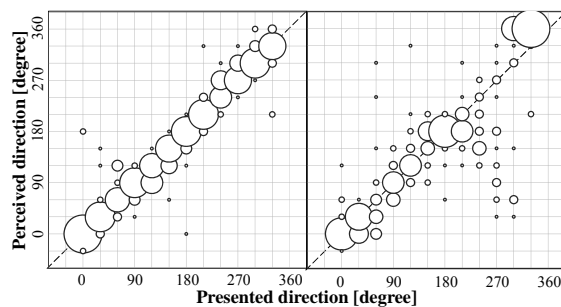


図6.3 定位実験結果(左:水平面、右:正中面)

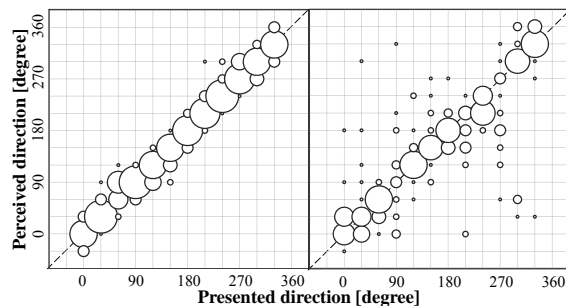


図6.4 定位実験結果(左:水平面、右:正中面)  
手がかりあり(移動音源を提示)

### 6.2.2 実音場との聴感的対応

マルチパスエコーのような複数の方向から卓越した音が到来する屋外音場を想定した聴感的対応の検討を行った。ここでは、無響室内にマルチパスエコーを模擬した様々な音圧や遅れ時間を持って音の到来する音場（仮想実音場）を作成し、6ch. 收音-再生システムとの明瞭性評価の直接比較を行った。

仮想実音場は実際にあり得る音場を条件に、まずは文献[17]から実際に測定された3音場を参考にした。さらに、幾何音響シミュレーションソフトを用いて本学津田沼校舎周辺を近似的にモデル化し、各スピーカシステムからの直接音と卓越した反射音の情報を虚像法で計算し、計13の仮想実音場を対象とした。

明瞭性評価に対する直接比較実験として、アナウンスの聞き取りにくさに関する主観評価実験を行った。仮想実音場とシミュレーション音場の直接比較に加え、モノラル再生（スピーカは正面）についても検討した。試験音としては、習志野市津田沼駅周辺で毎夕16:45に実際に放送されている子供の帰宅を促す女性アナウンス（約2.45mora/s）を無線によって傍受し、その録音信号から22秒間を切り出した。呈示レベルとしては、各音場における到来音（直接音や反射音）のうち最も大きく到来する音のみを再生した場合に、そのアナウンス信号の冒頭の3秒間の時間平均が65dBA (LAeq, 3s) となるように設定した。実験では、比較する3つの音場（仮想実音場、6ch. 再生音場、モノラル再生音場）をそれぞれランダムな順序で2回呈示し、被験者（本学学生12名）には、音場ごとのアナウンスの聞き取りにくさを6段階のカテゴリの中から判断させた。

6ch. 收音-再生システムと仮想実音場の評価結果を図6.5に示す（評定尺度の等間隔性を仮定）。横軸は呈示した音場、縦軸は全ての被験者によって判断された聞き取りにくさの回答の算術平均値、バーは標準偏差を示す。音場ごとの違いによる評価結果はよく似た傾向を示している。有意差検定を行った結果、音場Fにおいて回答結果に $p < 0.01$ の有意な差が認められた。明瞭性評価に関して6チャンネル收音・再生システムの高い対応性を確認した。なお、音場Fについての結果の原因は現段階では分かっていない。次に、モノラル再生方式と仮想実音場の評価結果を図6.6に示す。12音場のうち8音場において $p < 0.01$ の有意な差が認められた。広域防災放送システムのようなアナウンスをシミュレートして明瞭性評価を行う場合には、その明瞭性評価に関して音の方向情報が極めて重要であることが示唆された。

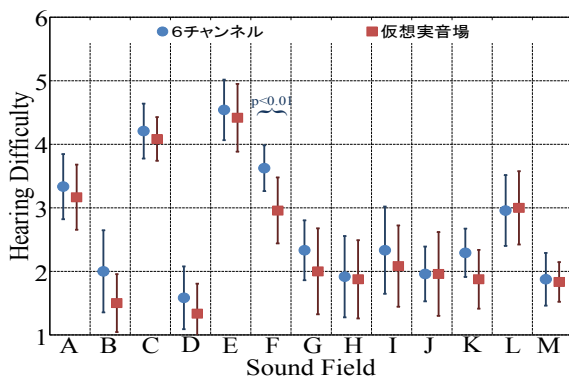


図6.5 聞き取りにくさの評価実験結果 1

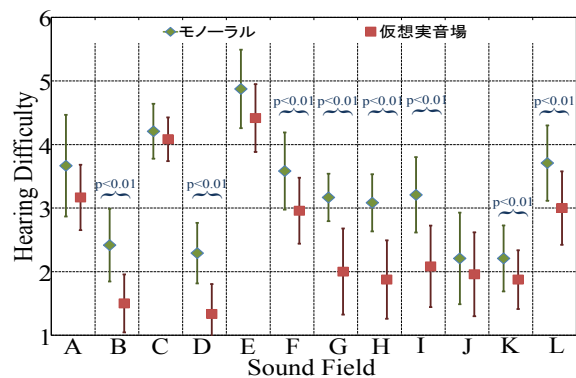


図6.6 聞き取りにくさの評価実験結果 2

### 6.3 子局のスピーカ配置に関する検討

これまでの一般的な拡声方式は、複数のホーンスピーカで構成されたスピーカシステム（子局）を離散的に配置し、アナウンス音は高位置から大音量で放送されており、日常の試験放送においては騒音問題も発生している。ここでは、子局の数を増やす方式について検討を行った（図6.7）。図6.8に検討対象としたモデル音場を示す。従来方式のスピーカシステムの配置については、その距離が実際にあり得るよう300m間隔、高さ15mで配置した



(図中青印)。本検討方式のスピーカシステムの配置は、電柱に設置することを想定し、配置間隔約30m、高さ5mとした(図中赤印)。受信点はモデル音場全体に、地上から1.5mの高さでメッシュ状に130点を配置した。

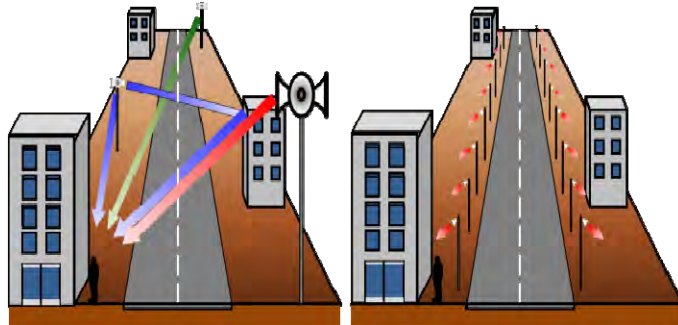


図 6.7 スピーカシステムの配置イメージ  
(左：従来方式、右：本検討方式)

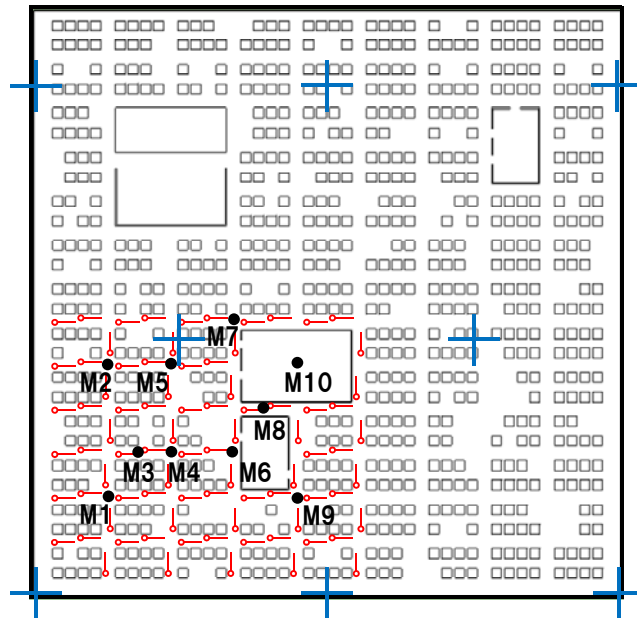


図 6.8 モデル音場

### 6.3.1. 幾何音響シミュレーション

前述のモデル音場について、虚像法によるシミュレーションを行った(計算時間の関係上モデル音場の4分の1について)。得られたインパルス応答波形の比較例を図6.9に示す。従来方式の波形は、離散的な反射音構造をしており、エコー障害の発生が明らかであるのに対し、本検討方式の波形では、エコー障害の発生は見てとれない。また、音圧分布の比較を図6.10に示す。従来方式は、スピーカ近傍の音圧が著しく大きくなっているのに対して、本検討方式では音圧が一定であることが確認できる。



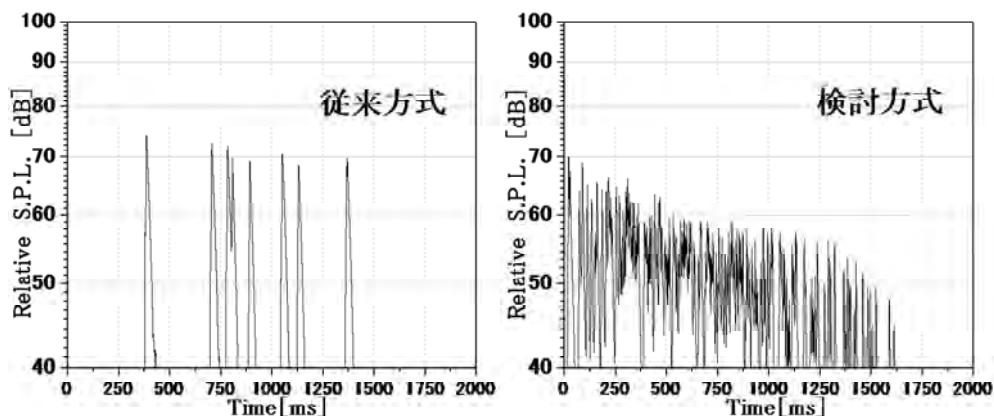


図 6.9 インパルス応答波形の比較 (M8)

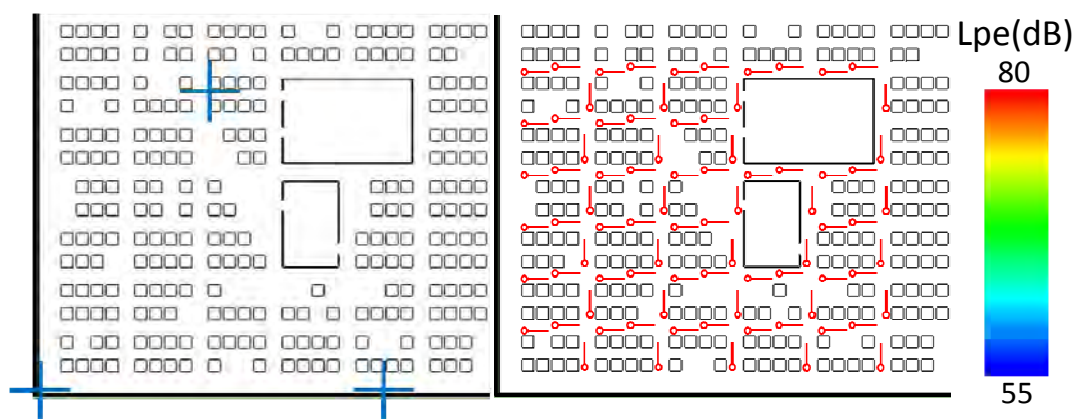


図 6.10 音圧分布の比較

### 6.3.2. 聴感実験

図 6.8 に示した 10 ヶ所の受音位置について、アナウンスの聞き取りにくさの聴感実験を行った。ドライソース (TTS ソフトで作成した約 20 s の男性のアナウンス信号) に、暗騒音 (本学周辺で録音) を付加し、試験音とした。被験者 (本学生 10 名) に従来方式と本検討方式の試験音をランダムな順序で 2 回呈示し、各試験音の印象を 6 段階のカテゴリ (表 6.1) で判断させた。なお実験室の制約上、幾何音響シミュレーションより算出した 6 方向の指向性重みつきインパルス応答のうち、水平方向の 4 成分だけを用い 4-ch. 再生で聴感実験を行った (4-ch. 再生システムを用いた聴感実験は文献[26, 27]で行われている)。全被験者の回答結果を図 6.11 に示す。縦軸は聞き取りにくさのカテゴリであり、プロットは全被験者の回答の平均値である。M1、M3、M4、M6、M8、M9、M10 の 7 点において、有意に明瞭性が改善された結果となった。他 3 点においては有意差が見られなかった。これは従来方式の状態において、既にさほど聞き取りにくい評価点であったためと考えられる。

表 6.1 聞き取りにくさの 6 段階カテゴリ

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い
1	まったく聞き取りにくい

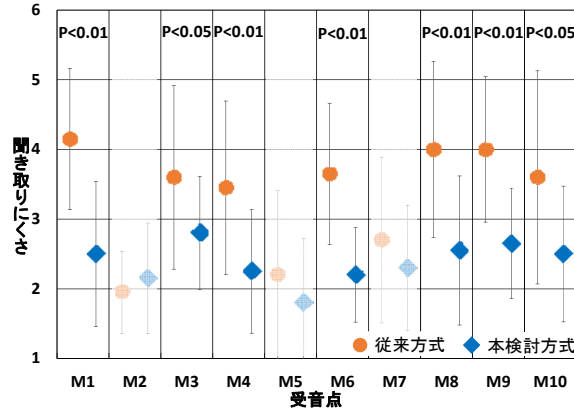


図 6.11 評価実験結果（従来方式と本検討方式の比較）

#### 6.4 話速とポーズ長等をパラメータとした検討

話速、ポーズ長、STIr、親密度をパラメータとして、アナウンスに含まれるターゲット語を記述形式で回答する単語理解度試験と、アナウンスの聞き取りにくさについての明瞭性評価実験を行った。話速とポーズ長については、まず幾つかの地域において実際に放送されているアナウンスの話速とポーズ長の簡易的な調査を行い（10例のアナウンスを調査した平均値は、話速 5 mora/s、ポーズ長 1500 ms）、パラメータの設定の参考とした。STIrについては3段階を設定した。親密度については2段階を設定した。まず文献[28]を参考に、普段聞き馴染みのある単語（親密度：高）と聞き馴染みのない単語（親密度：低）の中からそれらをターゲット語とする文章を考え、話速とポーズ長を加味したアナウンスを TTS（Text To Speech）ソフトで作成した。この際、男性のアナウンス音声を用いた。これらにインパルス応答（STIr 値の異なる3種）を畳み込み、計90条件の試験音を作成した。被験者は本学学生8名とし、アナウンスの再生音圧は約70dBAで、被験者の正面からモノラル再生方式で呈示した。実験条件を表 6.2 に示す。

表 6.2 パラメータの条件等

評価方法	5段階のカテゴリ					
評定尺度	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. 聞き取りにくくない					
パラメータ	親密度	高 低				
	話速	4mora/s	5mora/s	6mora/s		
	ポーズ長	0ms	375ms	750ms	1500ms	3000ms
	条件名	A	B	C	D	E
	STIr	0.74	0.64	0.54		

結果を図 6.12 と図 6.13 に示す。高親密度の単語をターゲットとした場合の回答の正答率が非常に高いが、これは正答が文章から容易に連想できたためと考えられる。放送システムのアナウンスの了解性を評価するのであれば、正答が容易に連想できる単語は避けるべきとも考えられる。また、話速、ポーズ長、STIr では、特に了解性や明瞭性の聴感実験結果を説明できる結果は得られなかった。卓越した音波が複数存在する屋外音場では、音

の重畳が容易に起こり、また放送される文章ごとにその音の重なり具合が異なり、偶発的に聴き取れる、または聴き取れないことが容易に起こり得る。そのため、まずはアナウンスの内容をフィックスする必要性もある。結果、現段階で広域放送システムを設計する場合には、可聴型シミュレーションシステムを設計支援ツールとして用い、実際に聴いて確認しながら設計を進める方法が一策であると考えている。

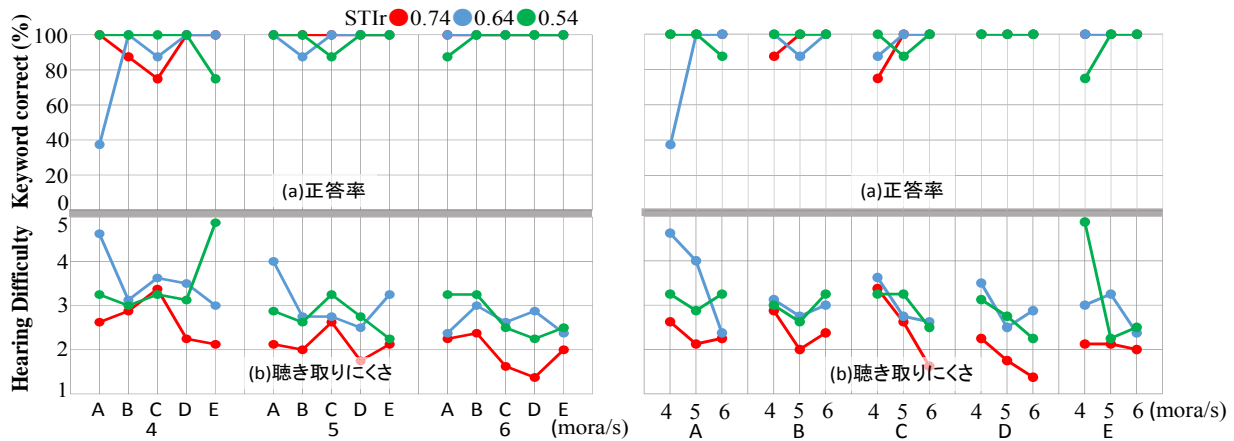


図 6.12 高親密度単語における結果 {上(a) : 正答率、下(b) : 聴き取りにくさ}  
左 : 話速ごと 右 : ポーズ長ごと

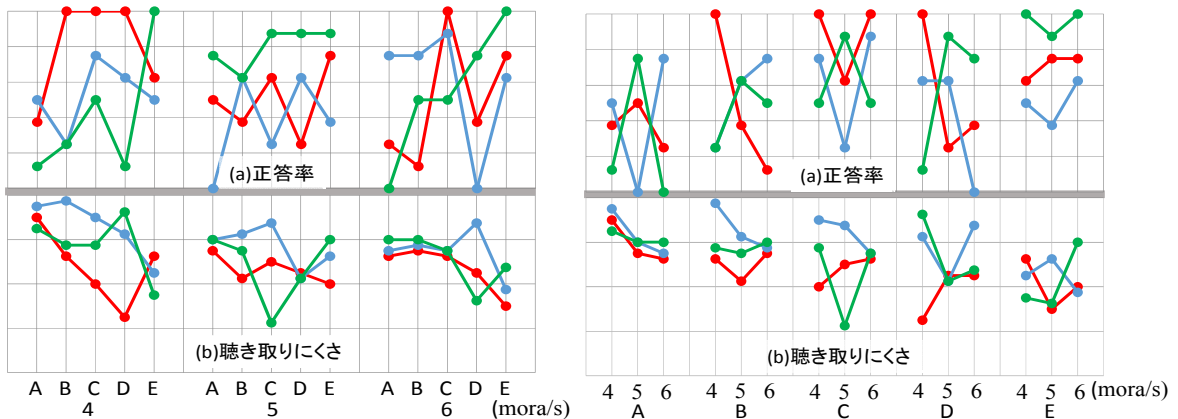


図 6.13 低親密度単語における結果 {上(a) : 正答率、下(b) : 聴き取りにくさ}  
左 : 話速ごと 右 : ポーズ長ごと

### 6.5 おわりに

広域放送システムからのアナウンス音の明瞭性確保に関する研究として、設計支援ツールとしての完成を目指している可聴型予測システムの精度に関する検討をはじめ、広域放送システムのスピーカ配置に関する検討、アナウンスの音源信号に関する検討を行った。予測システムの検討としては、6ch. 收音-再生システムの正中面内下方向の定位実験と仮想実音場との明瞭性評価の比較実験を行った。放送システムのスピーカ配置に関する検討としては、1つのスピーカのサービスエリアを狭くする方法に関するシミュレーションと聴感実験を行った。音源信号に関する検討としては、アナウンスの話速やポーズ長をパラメータとした聴感実験を行った。

以上の検討結果は、いずれにおいても非常に基本的である。今後、各内容について詳細な検討を進めていく所存である。

## 謝辞

本研究では、芝剛史君（平成 26 年度の修士 2 年生）や、同年度の全卒研究生・研究生の協力を得た。ここに謝意を表す。

## 参考文献

- [1] 千葉工業大学 第 6 回 CIT 音響フォーラム “公共空間における安全確保のための音響情報伝達に関する研究” (2013. 3)
- [2] Hideki Tachibana, “Public Space Acoustics for Information and Safety”, Proc. of ICA 2013, 5aID1 (Plenary Lecture), (2013. 6)
- [3] 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—”, 音講論集, pp. 1263-1264, (2011. 3)
- [4] 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)
- [5] 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”, 音講論集, pp. 1201-1202, (2011. 9)
- [6] Junichi Mori, Daisuke Yoshino, Fumiaki Satoh and Hideki Tachibana, “Prediction of outdoor sound propagation by applying geometrical sound simulation technique”, Proc. of Inter-noise 2011, 438556.pdf, (2011. 9)
- [7] 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)
- [8] 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—”, 音講論集, pp. 1215-1216, (2012. 3)
- [9] 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”, 音講論集, pp. 1217-1218, (2012. 3)
- [10] Junichi Mori, Daisuke Yoshino, Fumiaki Satoh and Hideki Tachibana, “Measurement of outdoor sound propagation characteristics of municipal public address system using Cross-Spectrum method”, Proc. of Inter-noise 2012, in12\_402, (2012. 8)
- [11] 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. 11)
- [12] 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”, 音講論集, pp. 1161-1162, (2013. 3)
- [13] 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”, Proc. of ICA 2013, 5aAAa6, (2013. 6)
- [14] Fumiaki Satoh, Junichi Mori, Tomoya Nishii and Hideki Tachibana, “Impulse response measurement in public space using musical signal including swept-sine signals”, Proc. of ICA 2013, 3pNSc14, (2013. 6)
- [15] 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”, 音講論集, pp. 1537-1540, (2013. 9)
- [16] 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)

- [17] 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, 38(2), pp. 123-131, (2014. 4)
- [18] Junichi Mori, Sakae Yokoyama, Fumiaki Satoh and Hideki Tachibana, “Acoustic design of municipal public address systems using computer modeling and 3-dimensional auralization technique”, Forum Acusticum 2014, R06A-1, (2014. 9)
- [19] 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”, 騒音制御工学会講演論文集, pp. 209-210, (2014. 9)
- [20] 齋藤文孝, 崔正烈, 佐藤逸人, 森本政之, 苜木禎史, 宇佐川毅, 岩谷幸雄, 坂本修一, 鈴木陽一, 青木雅彦, 高島和博, “屋外における災害情報伝達拡声系の高度化プロジェクト”, 音講論集, pp. 725-726, (2012. 9)
- [21] 崔正烈, 森本政之, 佐藤逸人, 坂本修一, 岩谷幸雄, 齋藤文孝, 鈴木陽一, “屋外拡声系による音声了解度の評価とサイン音の開発—災害情報の屋外音声伝達性能の向上に関する技術開発—”, 電子情報通信学会技術報告, SP2013-45, pp. 83-88, (2013. 6)
- [22] 災害等非常時屋外拡声システム性能確保のための規準案 (第1版)  
[http://asj-disaster-prevention.acoustics.jp/wordpress/wp-content/uploads/2015/04/ASJ\\_屋外拡声規準案\\_本文解説20150331.pdf](http://asj-disaster-prevention.acoustics.jp/wordpress/wp-content/uploads/2015/04/ASJ_屋外拡声規準案_本文解説20150331.pdf) (参照 2015-5-29)
- [23] 牧野康一, 横田考俊, 大島俊也, 岡田恭明, 平栗靖浩, 川瀬康彰, 今泉博之, “防災拡声放送の聴こえの日常の変化と気象条件との関係—一定時放送の長期観測データに基づく検討—”, 騒音制御工学会講演論文集, pp. 205-208, (2014. 9)
- [24] 飯田一博, 野村宗弘, 石井要次, 大島俊也, 内藤大介, “気象条件が防災放送の了解度に及ぼす影響—無響室での音場再生とバイノーラルシミュレーションの比較—”, 音講論集, pp. 1489-1492, (2015. 3)
- [25] Sakae Yokoyama, Kanako Ueno, Shinichi Sakamoto and Hideki Tachibana, “6-channel recording/reproduction system for 3-dimensional auralization of sound fields”, Acoustical Science and Technology, 23(2), pp. 97-103, (2002. 4)
- [26] 坂本慎一, 清宮拓磨, 横田考俊, 橘秀樹, “数値計算による多次元音場シミュレーション—平面4chシステムの試み—”, 音講論集, pp. 799-800, (2000. 9)
- [27] 横田考俊, 清宮拓磨, 坂本慎一, 橘秀樹, “4チャンネル数値音場シミュレーションシステムを用いた音響拡散体の効果に関する聴感実験”, 建築学会大会梗概集, pp. 43-44, (2001. 9)
- [28] 坂本修一, 鈴木陽一, 天野成昭, 小澤賢司, 近藤公久, 曾根敏夫, “親密度と音韻バランスを考慮した単語了解度試験用リストの構築”, 日本音響学会誌, 54(12), pp. 842-849, (1998. 12)

## 7. 音環境・空間伝搬系

### 7.1 気象条件が防災放送の了解度に及ぼす影響

#### - 無響室での音場再生とバイノーラルシミュレーションの比較 -

飯田一博（千葉工業大学 先進工学部 知能メディア工学科）

##### 7.1.1 はじめに

屋外拡声システムによる防災放送の了解度の向上が防災や減災のための重要な研究課題であることは論を俟たない。一般に、防災放送は複数の地点に設置されたスピーカ(以降、子局と呼ぶ)から放射されるので、受聴点には複数の音波が入射する。入射音の時間差はしばしば数百ミリ秒あるいは秒のオーダーとなり、後続入射音がロングパスエコーとなって音声の了解度を低下させる。本研究では、防災放送の可聴型音場シミュレーションの構築を目指して、以下の目的で実験を行った。

目的1：同一地点で長期間に亘って収録した屋外防災放送を無響室内で再現し、気象条件が音声了解度に及ぼす影響を明らかにする。

目的2：無響室などの特別な設備を必要としないバイノーラル再生に着目し、屋外防災放送の音声了解度の再現精度を検証する。

##### 7.1.2 気象条件が音声了解度に及ぼす影響

7ヶ月間に亘り小金井市で定点収録した定時放送音(ピアノ曲「小さな世界」)から気象条件の異なる3日分を選び、入射音の時間的構造をクロススペクトル法で、空間的構造(入射方向)を到達時間に対応する子局を地図から読み取ることにより求めた。

無響室において、各入射音方向にスピーカを設置し、親密度5.5-7.0に属する4モーラの単語を1.5モーラ(281.25 ms)間隔で4つ繋げた4連単語を提示した。各入射音の到来方向、遅れ時間および音圧レベルに加えて、周波数特性も再現した。すなわち、各入射音に子局と同タイプのスピーカの方向別インパルス応答を畳み込み、さらに100 Hz以上の1/3オクターブバンドにおいて、観測時の気温、相対湿度および伝搬距離より求めた空気吸収による減衰量を反映した。また、観測時に収録した暗騒音を $\pm 45^\circ$ 、 $\pm 135^\circ$ に設置した4つのスピーカから無相関で提示した。

このような音場(表1)において、20代学生8名(男性7名、女性1名)を被験者として4連単語の単語了解度と聴き取りにくさを求めた。結果を図7.1に示す。同一観測点でも気象条件により単語了解度に統計的に有意な差が生じ、聴き取りにくさも顕著に変化することが明らかになった。

##### 7.1.3 バイノーラル再生による音声了解度の再現精度

上記無響室再生の音場を原音場としてバイノーラル再生実験を行った。ただし、屋外防災放送の評価に利用するという目的に照らし、以下の2つの制限を加えた：1) 受聴者は一般市民であり本人の頭部伝達関数を持たない、2) 実験用の特殊なヘッドホンを使用しない。このような制限の下、各被験者(上記20代学生8名)の耳介形状から推定したbest-matching HRTFと市販のオープンタイプヘッドホンを用いたバイノーラル再生を行い(表7.2)、4連単語の単語了解度と聴き取りにくさ

表7.1 4つの音場の構成

	音場番号/受聴者の向き/測定日/気象			
	1	2	3	4
	22°	22°	22°	71°
	2013.9.7	2013.12.19	2013.9.10	
入射音	曇り	雨	曇り	
	北東	北西	南東	
	1.6 m/s	1.1 m/s	1.9 m/s	
相対遅れ時間 (ms)	0	0	0	
1 相対振幅	1.00	1.00	0.60	
方位角(°)	11	11	11	322
相対遅れ時間	-	941	443	
2 相対振幅	-	0.81	1.00	
方位角	-	345	178	129
相対遅れ時間	-	-	564	
3 相対振幅	-	-	0.98	
方位角	-	-	101	52
相対遅れ時間	-	-	745	
4 相対振幅	-	-	0.81	
方位角	-	-	322	273

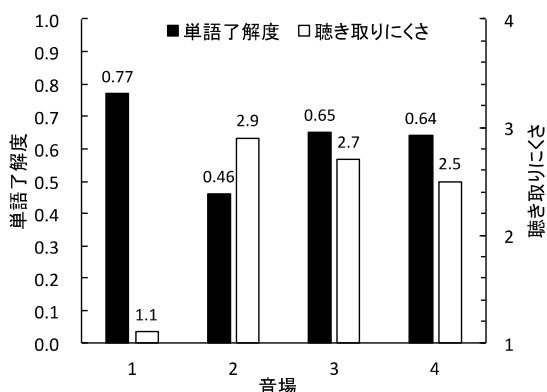


図7.1 各音場の単語了解度と聞き取りにくさ

(1:聞き取りにくくはない, 2:やや聞き取りにくい, 3:かなり聞き取りにくい, 4:聞き取りにくい)を求めた。

単語了解度を表7.3に示す。いずれのバイノーラル再生においても単語了解度は原音場より高く、危険側の結果となった。音場間の差異については、音場2<音場3≒音場4<音場1となり、原音場と同様の傾向であった。カイ二乗検定の結果、FEC\_ownとOPEN\_bmにおいては原音場と有意な差は認められなかった。

聞き取りにくさを表7.4に示す。いずれのバイノーラル再生においても、原音場との差は最大で0.3であった。音場間の差異については、音場1<音場3≒音場4<音場2となり、原音場と同様の傾向であった。

表7.2 バイノーラル再生方法

再生方法	HRTF	ヘッドホン
1	本人(own)	FEC
2	本人(own)	OPEN
3	best-matching(bm)	OPEN
4	HATS	OPEN

表7.3 バイノーラル再生および原音場の単語了解度

音場	原音場	バイノーラル再生			
		own_FEC	own_OPEN	bm_OPEN	HATS_OPEN
1	0.77	0.80	0.83	0.81	0.84*
2	0.46	0.51	0.54**	0.47	0.50
3	0.65	0.66	0.70	0.70	0.71
4	0.64	0.65	0.71	0.70	0.74**

表7.4 バイノーラル再生および原音場の聞き取りにくさ

音場	原音場	バイノーラル再生			
		own_FEC	own_OPEN	bm_OPEN	HATS_OPEN
1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.3
2	2.9	3.2	3.1	3.2	3.2
3	2.7	2.5	2.6	2.5	2.4
4	2.5	2.6	2.7	2.4	2.3

\*および\*\*は原音場での単語了解度の間に  $p<0.05$ ,  $p<0.01$ で有意な差があることを示す。

#### 7.1.4 結論

本人のHRTFを持たない一般の受聴者に対し、屋外防災放送の単語了解度を精度良く再現することを目的としたバイノーラル再生方法を提案した。提案法の精度を検証するため、まず原音場として同一地点で観測した気象条件の異なる4音場を無響室に設定し、単語了解度と聞き取りにく

さを求めた。さらに、この原音場を提案法でバイノーラル再生して、単語了解度と聴き取りにくさを求め、以下の結論を得た。

単語了解度について：

- 1) いずれのバイノーラル再生においても原音場よりやや高く、危険側の結果となった。
- 2) しかし、バイノーラル再生における音場間の差異については、音場2 < 音場3=音場4 < 音場1となり、原音場と同様の傾向であった。
- 3) カイ二乗検定の結果、本人HRTFおよびFECヘッドホン（原理通りの理想システム）によるバイノーラル再生とbest-matching HRTFとオープンタイプヘッドホンを用いたバイノーラル再生（本研究で提案した実用システム）においては、原音場と有意な差は認められなかった。

聴き取りにくさについて：

- 4) バイノーラル再生と原音場の差は最大で0.3であった。
- 5) バイノーラル再生における音場間の差異については、音場1 < 音場=音場4 < 音場2となり、原音場と同様の傾向であった。



## 7. 音環境・空間伝搬系

### 7.2 単一エコーの入射方向が単語理解度に及ぼす影響

飯田一博（千葉工業大学 先進工学部 知能メディア工学科）

#### 7.2.1 はじめに

屋外防災放送は、離れて設置された複数のスピーカから同時に音声が発せられるため、複数の音声が重なり合って理解度が低下する。音声理解度の向上は防災や減災のための重要な研究課題である。本研究では、正面方向から呈示する先行音と水平面もしくは正中面から呈示する後続音（単一エコー）で構成される音場で実験を行い、単一エコーの入射方向が単語理解度に及ぼす影響について検証した。

#### 7.2.2 実験方法

先行音を正面に固定し、単一エコー（以降、後続音）を右水平面0-180°(30°間隔)もしくは上半球面0-180°(30°間隔)のいずれかから呈示する音場を設定した。暗騒音は付加していない。刺激は4連単語により構成した。単語は、親密度別単語理解度試験用音声データセット(FW03)に収録されている女性話者ftoの親密度 5.5-7.0 に属する4モーラの単語を4つ繋げて作成した。単語の間隔は1sとした。ただし、単語間の無音時間が短くなりすぎないように850ms以上の単語は除外した。先行音、後続音とも頭部中心位置において60dBで呈示した。被験者は刺激の呈示が終了してから、聴き取れたすべての単語を回答用紙に記入した。

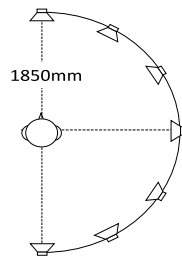


図7.2 水平面におけるスピーカ配置

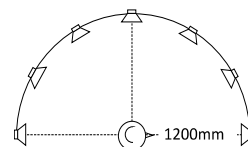


図7.3 正中面におけるスピーカ配置

#### 7.2.3 実験結果

後続音が右水平面0-180°(30°間隔)から到来する場合の結果を図7.4に示す。ここでは、先行音と後続音が時間的に重なる第2単語と第3単語を併せた正答率を示す。90°で最大(0.76)となり、0°で最小(0.53)となった。カイ二乗検定を行った結果、0°に対して90°、120°( $p < 0.01$ )および150°、180°( $p < 0.05$ )で有意な差が認められた。また、30°に対して90°( $p < 0.05$ )で有意な差が認められた。

同様に、後続音が上半球面0-180°(30°間隔)から到来する場合の結果を図7.5に示す。0°と比較して60, 90, 150°の正答率が低くなる傾向があり、120, 180°の正答率が高くなる傾向があった。カイ二乗検定を行った結果、180°に対して90, 150°( $p < 0.01$ )、120°に対して90, 150°( $p < 0.05$ )で統計的に有意な差が認められた。

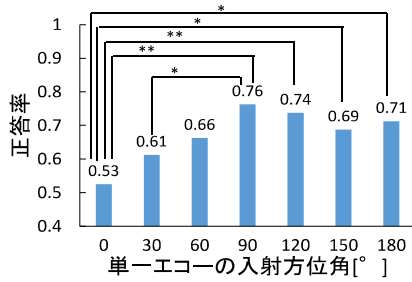


図7.4 水平面における単語正答率

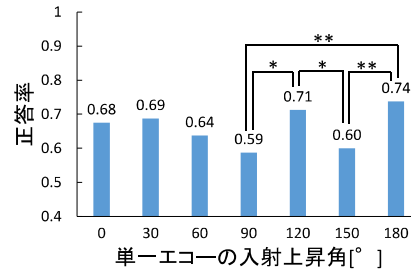


図7.5 正中面における単語正答率

## 7.2.4 結論

正面方向から呈示される直接音と水平面もしくは正中面から呈示される単一エコーで構成される音場で単語理解度実験を行い、以下の結果を得た。

1) 単一エコーが水平面内から到来する場合は、正面方向と比較して側方では統計的有意に単語理解度が高くなる。

2) 単一エコーが正中面内から到来する場合は、正面方向と比較して後方では単語理解度が高くなる傾向があったが、統計的な有意差は観察される場合と観察されない場合があった。

以上より、防災放送の単語理解度の音場シミュレーションにおける3次元再生の必要性について、以下のことがいえる。

- 3) 左右方向の再現は必要である。
- 4) 前後・上下方向については、一部に再現の必要性を示す結果があり、再現することが望ましい。

## 7. 音環境・空間伝搬系

### 7.3 受聴者の頭部形状による両耳間時間差の推定

飯田一博（千葉工業大学 先進工学部 知能メディア工学科）

#### 7.3.1 はじめに

ヒトの方向知覚の手掛かりは頭部伝達関数 (HRTF: Head-Related Transfer Function)に含まれている。したがって、受聴者本人のHRTFを鼓膜上で再現することで任意の方向に音像を制御できる。しかし、HRTFを測定するためには無響室や特殊な機材や膨大な時間を必要とするため、全ての受聴者のHRTFを測定することは現実的には不可能である。そこで、受聴者本人のHRTFの代わりに、いくつかの研究機関により公開されているHRTFデータベースに含まれる他人のHRTFを用いる方法が考えられる。しかし、HRTFには個人差があるため、他人のHRTFを用いると誤った方向に定位する現象がしばしば発生する。HRTFの個人差は、頭部や耳介形状の個人差に起因する。本研究では、左右方向知覚の手掛かりである両耳間時間差(ITD: Interaural Time Difference)の個人化方法を検討した。

#### 7.3.2 両耳間時間差の推定

無響室において33人の被験者の頭部インパルス応答を測定し、ITDを算出した。測定方向は水平面内12方向(30°間隔)、スピーカから頭部中心位置までの距離は1.2 mである。算出結果を図7.6に示す。頭部表面を通る音波の伝播経路の個人差がITDの個人差に対応すると考え、ITDを求めた33名について図7.7に示す頭部形状を計測した。

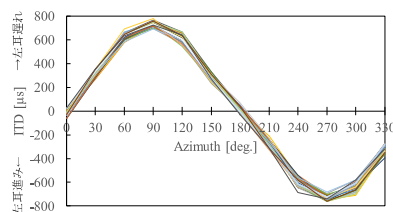


図7.6 水平面12方向における33名の被験者のITD測定値

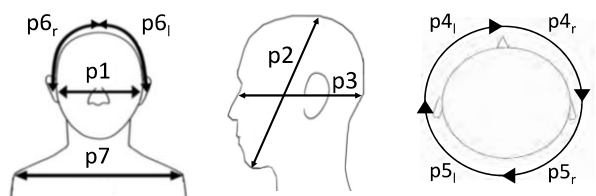


図7.7 ITD の推定に用いた頭部寸法の計測箇所

頭部形状を説明変数、各方向のITDを目的変数とした重回帰分析を行った(式7.1).

$$ITD(s, \phi) = a_1 p_1 + a_2 p_2 + \dots + a_7 p_7 + \beta \quad (7.1)$$

ここで、 $s$  は被験者、 $\phi$  は方位角である。

表7.5に重相関係数 $r$ 、回帰モデル全体の危険率 $p$ 、残差の絶対値の平均 $E$ と回帰係数( $\beta$ は定数項)を示す。各方向における重相関係数 $r$ は0.34-0.79であり、側方で高くなる傾向がある。全ての方向において有意水準5%で相関関係が認められた( $0.34 \leq r$ )。全方向の平均重相関係数は0.59であった。

危険率 $p$ については、90, 150, 270, 300°で10%未満となった。ただし、単回帰分析で相関関係が認められる部位は存在しなかった。30, 210°では高い危険率(97.5, 94.9%)となった。

各方向における残差の絶対値の平均 $E$ は9.6-24.8 $\mu$ sの範囲をとった。残差は真横(90, 270°)では小

さく(9.8, 9.6  $\mu\text{s}$ ), 120, 240°では大きい傾向(20.8, 24.8  $\mu\text{s}$ )にあるが, 全ての方向において従来の方法 [22]による誤差(25 $\mu\text{s}$ )よりも小さい。

表 7.5 重回帰分析の結果. r: 重相関係数, p: 危険率, E: 残差の絶対値の平均,  $\beta$ : 定数項

Azim.[deg.]	r	p	E[ $\mu\text{s}$ ]	Regression coefficient( $\times 10^{-6}$ )											$\beta$
				p1	p2	p3	p4 <sub>l</sub>	p4 <sub>r</sub>	p5 <sub>l</sub>	p5 <sub>r</sub>	p6 <sub>l</sub>	p6 <sub>r</sub>	p7		
0	0.59	0.363	14.2	2.34	0.06	-0.72	1.11	-0.56	-0.48	-0.13	-0.21	-0.15	0.01	-127.24	
30	0.34	0.975	17.9	-1.37	-0.34	-0.19	0.98	-0.33	0.24	0.18	0.43	-0.51	0.16	-197.13	
60	0.63	0.210	15.0	-2.60	-0.27	-1.05	1.16	-0.02	0.20	0.55	-0.02	-0.62	0.02	-160.29	
90	0.78	0.009	9.8	-0.92	0.08	-1.13	0.40	-0.30	0.21	-0.04	-0.18	-1.13	0.22	-278.76	
120	0.65	0.165	20.8	1.50	1.23	-3.11	0.32	0.11	-0.15	-0.67	-0.83	-1.01	0.40	-295.37	
150	0.71	0.057	12.2	-0.09	-0.27	-1.32	0.48	0.07	-1.09	-0.03	1.10	-0.41	0.39	-163.68	
180	0.50	0.672	16.0	-1.81	-0.61	-0.82	0.63	0.15	0.79	0.11	0.06	-0.03	0.28	185.10	
210	0.38	0.949	21.1	1.59	-1.18	0.53	0.15	-0.90	-0.04	-0.41	-0.71	-0.15	0.33	458.68	
240	0.43	0.874	24.8	0.79	0.15	0.63	-1.18	0.41	0.98	-0.17	0.53	0.71	-0.10	127.05	
270	0.79	0.005	9.6	1.18	-0.14	-0.33	0.39	0.66	0.35	0.10	-0.59	1.07	0.04	320.99	
300	0.75	0.022	18.4	2.00	-0.26	0.67	-0.72	1.08	-1.24	-0.37	-0.55	0.91	0.42	217.87	
330	0.54	0.529	17.6	1.00	1.70	-1.24	-0.09	1.84	1.06	0.22	-1.46	-0.38	-0.67	142.87	
Ave.	0.59	0.402	16.5												

重回帰分析に含めていない被験者を用いてITDの推定精度を検証した。被験者は20代の女性 2名(A, B)と男性2名(C, D)の4名である。重回帰式を用いて頭部形状から12方向のITDを推定した。表7.6にナイーブな被験者の推定誤差の絶対値を示す。さらに, 表7.7に提案法による方位角誤差を示す。各方向の全被験者の平均方位角誤差(右端のAve.)は, 方位角30-150°(右半面)では, それぞれ2.7, 3.1, 2.4, 3.3, 2.7°であり, 方向知覚の弁別閾と同等であった。方位角210-330°(左半面)では, それぞれ2.9, 1.7, 1.4, 1.8, 1.1°であり, いずれの方向においても方向知覚の弁別閾と同等であった。ただし, 各被験者の各方向の方位角誤差をみると, 一部において方向知覚の弁別閾を超える場合があり, 最大推定誤差は7.1°(被験者Bの60, 210°)であった。各被験者の全方向の平均方位角誤差(下段のAve.)は1.8-2.8°であり, 全被験者の平均方位角誤差は2.3°であった。

表 7.6 重回帰モデルによる ITD の推定誤差の絶対値[ $\mu\text{s}$ ] 表 7.7 重回帰モデルによる方位角推定誤差の絶対値[ $\mu\text{s}$ ]

Azim.	Subjects				Ave.
	A	B	C	D	
0	21.4	24.4	35.2	15.0	24.0
30	21.4	40.9	15.1	17.0	23.6
60	20.1	53.1	11.1	12.8	24.3
90	20.0	4.1	23.2	12.2	14.9
120	49.4	2.2	15.6	38.9	26.5
150	33.5	25.4	7.6	32.5	24.8
180	0.2	44.2	20.2	18.9	20.9
210	4.2	50.0	19.8	17.0	22.7
240	26.5	9.4	0.1	20.0	14.0
270	2.5	7.6	9.0	13.3	8.1
300	5.4	17.7	29.1	7.8	15.0
330	11.8	8.0	4.9	22.0	11.7
Ave.	18.0	23.9	15.9	18.9	19.2

Azim.	Subjects				Ave.
	A	B	C	D	
0	-	-	-	-	-
30	2.4	4.9	1.6	1.8	2.7
60	2.6	7.1	1.4	1.4	3.1
90	-	0.7	4.3	2.2	2.4
120	6.7	0.3	2.0	4.3	3.3
150	4.0	2.7	0.9	3.2	2.7
180	-	-	-	-	-
210	0.5	7.1	2.2	1.9	2.9
240	3.1	1.3	0.0	2.3	1.7
270	0.0	1.4	1.7	2.4	1.4
300	0.7	2.2	3.4	0.8	1.8
330	1.3	0.7	0.5	1.9	1.1
Ave.	2.4	2.8	1.8	2.2	2.3

### 7.3.3 結論

頭部の前後・左右非対称性を考慮した10箇所(10箇所)の頭部形状から水平面内12方向(30°間隔)のITD を推定する方法を提案し, その推定精度を検証した。その結果, 以下のことが明らかになった。

1) 各方向のITDを目的変数, 10箇所 of 頭部形状を説明変数とした重回帰分析を行った. その結果, 重相関係数は0.34-0.79であり, 全ての方向において有意水準5%で相関関係が認められた.

2) 4名のナイーブな被験者を用いて提案法の推定精度を検証した. その結果, 各方向の平均方位角誤差は1.1-3.3°であり方向知覚の弁別閾と同等であった. ただし, 各被験者の各方向の方位角誤差をみると, 一部において方向知覚の弁別閾を超える場合があり, 最大推定誤差は7.1°であった. また, 提案法の平均方位角誤差は 2.3°であり, 従来法を用いた場合の平均方位角誤差よりも7.3°小さかった.

以上より, 本研究で提案した方法により, 一部の方向を除いて方位角知覚の弁別閾以内でITDを推定することが可能となった. これにより, 方位角に関しては, 方向の違いが知覚されない精度で3次元音場シミュレーションが可能になったと言える.

## 参考文献

- [1] 飯田一博, 野村宗弘, 石井要次, 大島俊也, 内藤大介, 気象条件が防災放送の了解度に及ぼす影響-無響室での音場再生とバイノーラルシミュレーションの比較, 日本音響学会春季講演, pp. 1489-1492 (2015年3月) 査読なし
- [2] 飯田一博, 野村宗弘, 石井要次, 大島俊也, 内藤大介, バイノーラル再生による屋外防災放送の単語了解度の再現精度, 日本音響学会建築音響研究会資料, AA 2015-26, pp. 1-8 (2015) 査読なし
- [3] 向井玄典, 石井要次, 大竹隼人, 矢野修平, 飯田一博, "単一エコーの入射方向が単語了解度に及ぼす影響," 日本音響学会聴覚研究会資料, H-2015-76 (2015年7月) 査読なし
- [4] 向井玄典, 石井要次, 大竹隼人, 矢野修平, 飯田一博, "単一エコーの入射方向が単語了解度に及ぼす影響," 日本音響学会講演論文集, 987-990 (2015年9月) 査読なし
- [5] 石井要次, 木崎尚也, 吉田恵里, 飯田一博, "受聴者の頭部形状による両耳間時間差の推定," 日本音響学会講演論文集, 447-448 (2015年9月) 査読なし
- [6] 石井要次, 木崎尚也, 吉田恵里, 飯田一博, "受聴者の頭部形状による両耳間時間差の推定 - 重回帰モデルの再検討-, " 日本音響学会講演論文集, 877-880 (2016年3月) 査読なし

## 8. 聴覚・認識

### 視聴覚情報を手掛かりとした移動における「迷い」と残響の関係

山崎 治（千葉工業大学 情報科学部 情報ネットワーク学科）

本研究の目的は、公共空間における聴覚に基づく位置情報の理解を促進するための視覚的な情報の効果について検討することにある。特に、公共空間における快適性や安全性を確保することを目指し、目的地までの移動において「迷い」を少なくするため、聴覚的な情報提示にどのような工夫を行うべきかを提案する。

公共空間における「迷い」に着目した研究の多くでは、看板、掲示板などのサインや、設置物などの視覚的要素、見渡しや見通しなどといった空間的な情報との関係について検討が行われてきた（e.g. 山内 2012）。研究方法としては、主に、実際の公共空間を利用した経路探索の実験や観察調査といった手法がとられてきた。しかし、「聴覚的な要素（音響情動的な要素）」に着目した経路探索実験や観察調査は、実空間で実施することが困難である場面も考えられる。そこで、本研究では、仮想的な公共空間（地下街）の上で経路探索の実験や観察調査を行うシミュレーションベースのアプローチをとり、2つの研究が行われた。

#### 8.1 「迷い」行動と残響の関係を検討するための地下街シミュレータの構築

本研究で構築した地下街シミュレータ（Sound Maze）は、公共空間である地下街を仮想的に再現した疑似3D迷路である。地下街内の特定の地点で発せられた誘導用のサイン音に対して、地下街内の各地点での聴こえを音響シミュレーション（ODEON）により再現した（聴覚刺激）。また、3DCGソフトでレンダリングされた地下街内の各地点からの見えのイメージを作成した（視覚刺激）。これらの聴覚刺激と視覚刺激をあわせて、OSSのADVゲーム制作キットであるTYRANO SCRIPTを用い、地下街内を移動して音源位置を特定することを課題とするシミュレータ環境を構築した。

大学生20名（男性17名／女性3名）を参加者とし、予備的な実験を行った。Sound Mazeはノートパソコン上で実行され、聴覚刺激の提示はヘッドホンで行われた。音源位置として地下街空間の3カ所の地点を設定し、各試行において3カ所の地点の中からランダムに音源位置が決定されるようにした。また、探索の開始位置となる地点および向きも、各試行でランダムに決定されるようにした。参加者には、仮想的な地下街内で、移動するたびに提示される誘導サイン音を手掛かりに音源位置を特定するように教示した。音量調整および練習試行を1試行行ったあと、前半5試行と後半5試行の計10試行の経路探索課題を実施した。

予備的な実験の結果、正しい音源位置を特定した「到達率」は54.5%であった。この結果は、本課題の難易度が高いことを示している。今後、シミュレーションの精度や提示方法などの再検討も必要だと考えられる。また、経路探索の過程で、同一の地点において連続して2回以上方向を転換した行動を「迷い」行動と定義し、地下街内の各地点における「迷い」の生じやすさを算出した。図8.1に、3カ所の音源位置に対して、21カ所の聴取地点それぞれで「迷い」行動が現れた割合をヒートマップとして示す。この結果より、音源であるサイン音の発生位置によって「迷い」行動が現れる地点にずれが生じることが確認された。

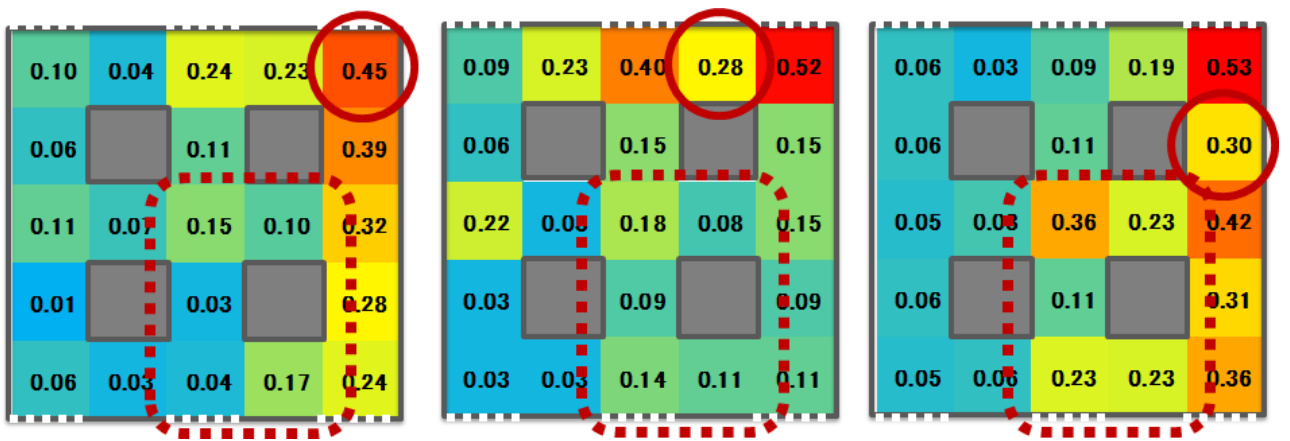


図8.1 音源位置ごとの迷い行動の発生する割合

今回構築した地下街シミュレータを用いた経路探索課題では、シミュレーション精度などが問題となり、実空間との違いが大きかった。ここで構築された地下街シミュレータでは、90度単位の方向転換と1ブロックずつの移動のみが可能となっているが、今後、より細かい操作が可能なシミュレータの構築により、避難行動におけるシミュレーションベースでの行動分析が進むことが期待される。

## 8.2 音声による方向指示の与え方による3D迷路上での迷い行動の違い

本研究では、仮想的な3D迷路探索課題をユニティ・テクノロジーズにより開発されたゲームエンジンUnityを利用して制作した。迷路は先の見通しがしにくい狭い通路により構成されており、プレイヤーが十字路やT字路、角に差し掛かった際に音声によりナビゲーションを行ない、目的地までの誘導を行う。提示する音声には「意味手がかり」「定位感手がかり」の2種類を用意した。「意味手がかり」は「まっすぐ進んでください」「右に曲がってください」「左にまがってください」「引き返してください」のように、メッセージ上の意味により移動方向を指示する音声とした。これに対して、「定位感手がかり」は「引き返してください」以外は「こちらに来てください」というメッセージを用意し、進むべき方向から音声聞こえるよう定位感を付与した音声とした。音声はVoice Text（モデルSayaka）による合成音声で作成し、定位感の付与には、MIT Media Labで作成されたKEMARのHRTFを畳み込むことにより、水平面上の8方向から音声聞こえるようにした。図8.2に制作された3D迷路の実行画面を示す。

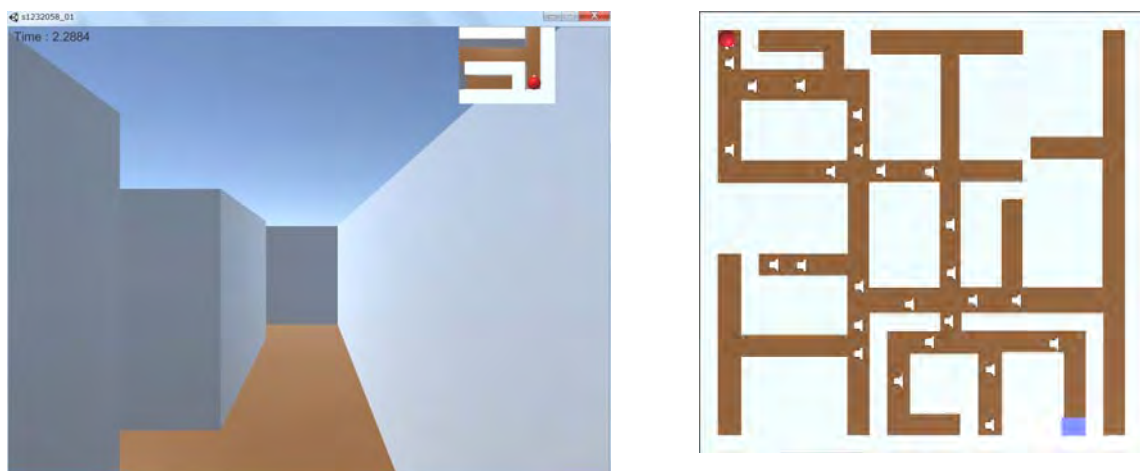


図8.2 3D迷路の実行画面（左）と迷路構造および音声オブジェクト配置位置（右）

大学生12名（男性9名／女性3名）を参加者とし，1要因3水準参加者内計画（意味手がかり条件／定位感条件／統制条件）にて実験を実施した．実験は個別に実施し，デスクトップPC上で実行されたUnityの3D迷路に対して，マウスおよびキーボードで操作を行い，できる限り早く目標地点へ着くよう教示した．音声はヘッドホンにより提示をおこなった．3種類の初期地点／目的地点の組み合わせを用意し，各音声手がかりの条件を組み合わせた課題の中で，3つの条件に対応させた3試行をランダムな順番で行ってもらった．

目標地点に到達するまでの「所要時間」および引き返し行動が現れる「迷い行動の回数」について分析をおこなった結果，統制条件と残り2つの条件間で有意差が確認されたが，「意味手がかり」条件と「定位感手がかり」条件との間では有意な差はみられなかった．また，実験実施後に行ったアンケート調査の結果，「意味手がかり」条件が「定位感手がかり」条件よりも指示が分かりやすかったと回答した参加者が7名，逆に，「定位感手がかり」条件が「意味手がかり」条件よりも指示がわかりやすかったと回答した参加者が5名となった．「意味手がかり」条件では，視野内にある通路上で複数の角が見えているとき指示がでてきた場合，どちらの角でまがればよいのか迷う場面があった，というコメントが得られた．逆に「定位感手がかり」条件では，曲がるべき角での方向転換がしやすいものの，前後の違いがわかりにくく迷う場面があった，というコメントが得られた．

今回構築した3D迷路探索課題では，ナビゲーションを目的とした音声メッセージに含まれる「意味」と「定位感」による「迷い」行動における違いは明確にはならなかった．ただし，それぞれの音声条件において「迷い」行動を生むことにつながる「わかりやすさ」「わかりにくさ」の質的な違いについて，参加者の主観的なコメントから明らかにすることができた．

## 参考文献

[1]山崎 治，小嶋直樹，反響・残響下での避難誘導サイン音により生じる「迷い」の分析，日本認知科学会第32回大会，（2015）査読なし



## 9. 聴覚・認識

### 音声単語親密度, 話速, ポーズ長が文章理解に与える影響

世木 秀明 (千葉工業大学 情報科学部情報工学科)

私立大学戦略的研究基盤形成支援事業「安全・快適性のための音響情報科学研究センター」における研究内容で設定されている4領域の研究テーマのうち、(4)聴覚・認識領域における研究テーマの一つである理解しやすく聞き取りやすい公共放送文に関する検討を行った。

具体的には、1. 単語親密度と連想語が放送文理解に与える影響に関する検討と2. 話速、ポーズ時間長が文理解に与える影響に関する検討である。

前者の研究では、公共放送の指示内容を聴取し、その指示内容を理解し、行動するためにはどのような単語を使用すれば分かりやすいのかについて、単語親密度と文脈や聴取状況における連想語が文章理解に与える影響についてWebで公開されている非常放送文を収集・調査および、聴取実験を行い検討した。非常放送文を収集・調査および、聴取実験結果から、音声単語親密度が高い単語が必ずしも刺激文の理解向上に貢献するとは考えにくく、文脈や被験者が聴取する環境、心理状態などから連想されやすい単語が刺激文の理解向上に貢献するのではないかと考えられた。

後者の研究では、発話者の話速やポーズ時間はどのように設定すれば聞き取りやすく理解しやすくなるのかについて2種類の話速変更方法で作成した音声刺激を用いて雑音がある条件下で20代健聴者と65歳以上の高齢者を対象に聴取実験を行い検討した。さらに、合成音声を使用した実験により句読点に対応するポーズ時間長が聞き取りやすさや理解しやすさに与える影響についての検討を加えた。

聴取実験結果から、20代男女では話速変更方法の違いによる文章理解度に差は認められなかったが、高齢者では話速よりも句読点に対応するポーズ時間の長さを適切に設定することが聞き取りやすさや理解の向上につながることを示唆された。さらに、合成音声を利用したアナウンスに関しても句読点に対応するポーズ時間長が聞き取りやすさや理解のしやすさに影響を与えることが示唆された。

以下にそれぞれの研究結果について詳細に述べる。

#### 9.1. 単語親密度と連想語が放送文理解に与える影響に関する検討

##### 9.1.1 はじめに

我々が普段利用する駅やデパートなどの公共施設で使用される公共放送文や災害時に使用される非常放送文は、あらかじめ企業や地方自治体で定められているが、放送文に使用されている単語や文構造はさまざまである。これらの文章は聴いた時に理解が容易であるものでなければならない。特に、災害時に使用されている非常放送文では聴いている人に伝わらなければ非常放送の意義がなくなってしまう。さらに、これらの非常放送文は騒音や反響がある音環境下で聴取されることが多く、騒音や反響が原因となり文章の了解度が低下するおそれがある。

一般に、雑音や騒音、残響の大きい音環境下では親密度が高い単語は親密度が低い単語を使用した文章に比べ理解しやすいことが知られている。しかし、公共放送を聴取する環境や聴取者の心理状態、放送文の文脈効果などにより必ずしも単語親密度の高い単語を使用した文章が理解しやす

い文章になるとは限らないと考えられる。このため、公共放送や非常放送がどの程度聞き取れているか、理解されているかについての調査やどのような文体や単語を使用した非常放送文が聞き取りやすく理解しやすいのかについて検討することは非常に重要であると考えられる。しかし、これらの調査や検討はほとんど行われていないのが現状である。

このような背景をもとに、本研究では、非常放送時にどのような単語が理解しやすく、キーワードになりやすいのかを調査すると共に、調査結果から得られた単語、および親密度の高い単語を使用した文章の了解度を比較検討し、どのような単語を用いたら非常時に聞き取りやすく理解しやすい文章になるのかについて検討することを目的とした。

### 9.1.2 非常放送文の調査

地方自治体や企業ではどのような非常放送文が使用されているのかについて約130文章をWebなどを利用して収集し、使用されている単語の頻度、音声単語親密度から文章理解に重要と考えられる単語や語句を抽出した。この結果、収集した非常放送文で使用されている、文章理解に重要だと考えられる単語の多くは音声単語親密度が6以上か6に近いものであり、音声単語親密度の高い単語が使用されていると考えられた。本調査で収集した非常放送文の中で、文章理解に重要だと考えられる単語の一例をその出現頻度、音声単語親密度とともに表9.1に示す。

表9.1 収集した文章使用されていた単語の出現頻度と声単語親密度の例

単語	頻度	音声単語親密度	単語	頻度	音声単語親密度	単語	頻度	音声単語親密度
地震	63	6.312	自動車	10	6.406	急ぐ	8	6.375
避難	50	5.688	消防	10	5.219	使う	8	6.094
発生	41	5.594	逃げる	10	6.125	出る	8	5.719
火災	33	5.688	ケガ	9	6.375	注意	8	6.171
指示	22	5.438	恐れ	9	5.875	非常口	8	6.000
火	15	5.531	行く	9	5.750	注意	7	6.171
始末	15	5.562	発表	9	6.188	まわり	7	5.500
情報	14	6.406	落ち着く	8	6.031	自宅	7	5.906
階段	13	6.031	マッチ	8	6.250	津波	7	5.688
行動	11	6.062	ライター	8	6.250	二階	7	5.719
警察	10	6.125	ろうそく	8	6.125	外	6	6.344

### 9.1.3 語想起調査

非常放送文の調査で収集した非常放送文を理解するために重要であると考えられる単語を空欄にしてどのような単語詞が想起されるのかについての語想起調査を行った。

調査方法は、非常放送文を理解するために重要であると考えられる単語を空欄にした刺激文章をA4用紙に印刷し、被験者に提示して空欄を自由筆記で埋めるものである。被験者は、20代男女23名であった。

表9.2に語想起調査に使用した刺激文章例とオリジナル文章の単語(ターゲット単語)を示す。

表9.2 語想起調査に使用した刺激分とターゲット単語の例

刺激文 番号	刺激文章例	ターゲット単語
1	地震がありました。 慌てず外に( )ください。	避難して
2	地震がありました。 テレビやラジオの( )を聞いてください。	情報
3	地震がありました。 垂れ下がった電線には絶対に( )ください。	近付かないで
4	火災が発生しました。 煙を吸わないようにハンカチなどで口と鼻を( ) ください。	押さえて

語想起調査結果の一例を表9.3に示す。ここで、表9.3中の語想起率は、被験者全体のうち想起した単語の割合を示している。

表9.3 語想起調査結果の一例

刺激文 番号	ターゲット単語	想起された単語	音声単語 親密度	語想起率
1	避難して	避難	5.688	87.0%
		逃げる	6.125	13.0%
2	情報	情報	6.406	65.2%
		放送	5.812	26.1%
3	近付かないで	近づく	6.031	21.7%
		触れる	5.625	78.3%
4	押さえて	押さえる	5.781	26.1%
		覆う	5.594	52.2%
		塞ぐ	5.500	21.7%

語想起調査結果から、表9.3に一例を示すように必ずしも音声単語親密度が高い単語が想起されやすいとは限らないことやオリジナル文章のターゲット単語が想起されるとは限らないことが示唆された。

#### 9.1.4 雑音環境下での聴取実験による検討

語想起調査で使用した実際の非常放送文で使用されている親密度が高いターゲット単語と、語想起調査結果から得られた想起されやすいが親密度が低い単語をキーワードとする2文からなる地震

に関する非常放送文25文章と、火災に関する非常放送文12文章、合計37文章を聴取実験用文章として作成した。作成した聴取実験用文章の一例を表9.4に示す。

表9.4 聴取実験用文章の一例

文章番号	聴取実験用文章例	音声単語親密度	語想起率
1	地震がありました。 皆さん落ち着いて <u>行動</u> して下さい。	高	低
2	地震がありました。 皆さん落ち着いて <u>避難</u> して下さい。	低	高
3	地震がありました。 揺れが収まっても外へは <u>逃げ</u> ないでください。	高	低
4	地震がありました。 揺れが収まっても外へは <u>避難</u> しないでください。	低	高
5	火災が発生しました。 近くの非常階段へ <u>逃げ</u> てください。	高	低
6	火災が発生しました。 近くの非常階段へ <u>避難</u> してください。	低	高

\*アンダーラインの単語がターゲット単語

聴取実験で使用する音声刺激は、聴取実験用文章を音声合成プログラムVoice Textを用いて約330モーラ/分の話速で合成した音声にマルチトーカー・ノイズを重畳させたものとした。ここで、ノイズ重畳レベルは合成音声とノイズレベルがラウドネスバランス(0dB)よりノイズレベルを3dB減衰させたものとした。

聴取実験方法は、静かな部屋で被検者前方約150cmに設置したスピーカより至適レベル(約70(dBA))で音声刺激を提示し、被験者に「放送を聴いてどうすればいいですか」という質問に自由筆記により解答させた。ここで、解答時間は25秒間とし、25秒経過すると次の音声刺激を提示した。また、実験用刺激を聞き直すことは禁止とした。被験者は、健康な聴力をもつ20代男女41名である。提示音声の指示通りに筆記解答したものを正答として集計した聴取実験結果を図9.1に示す。

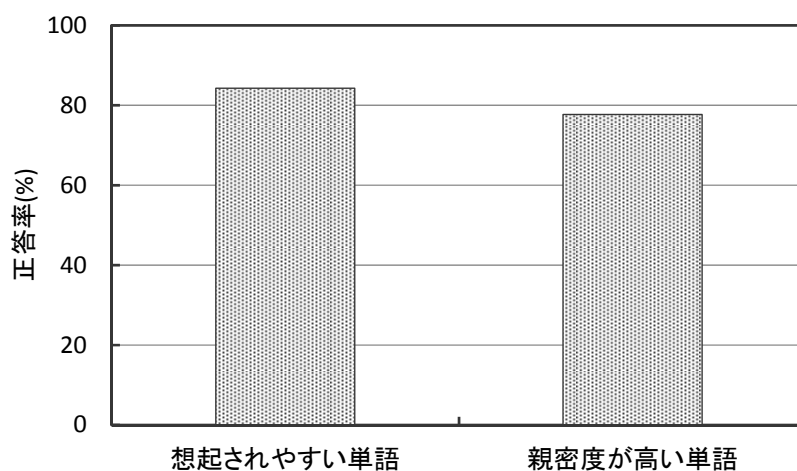


図9.1 想起されやすく親密度が低い非常放送文に使用されており、音声単語親密度が高い単語を用いた聴取実験の正答率

聴取実験結果から、親密度が高い単語より想起されやすく親密度の低い単語の方が高い正答率を示した。両者間で有意差検定を行ったところ有意水準5%で有意な差があることが確認された。

さらに、同じキーワード単語を使用した聴取実験文章でも図9.2に示すように肯定文と否定文では正答率に差があることが観測された。

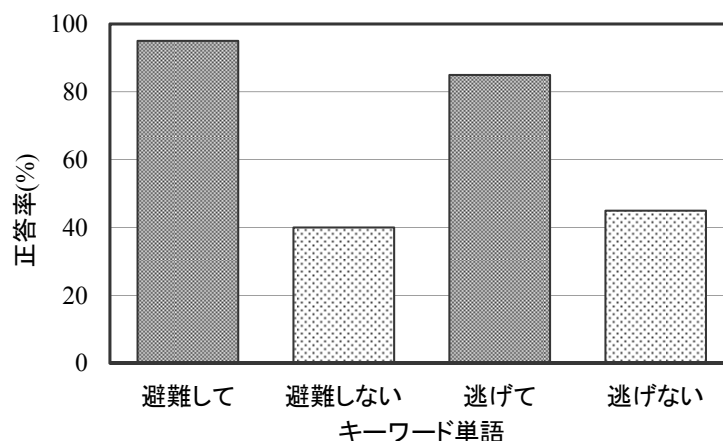


図9.2 肯定文と否定文の違いによる正答率の差

さらに詳しく検討するために、聴取実験で使用したすべての文章を肯定文と否定文に分け、それぞれの正答率を求めた結果を標準誤差とともに図9.3に示す。

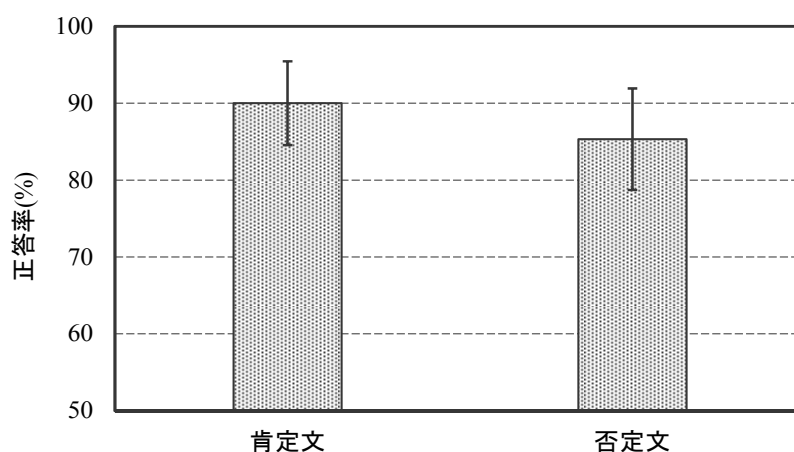


図9.3 肯定文と否定文の平均正答率と標準誤差

図9.3に示す集計結果から、有意な差は見られないものの( $p=0.053$ )肯定文の方が正答率が高くなることと否定文の方が肯定文に比べ正答率のばらつきが大きくなることが観測された。この結果から、否定文よりも肯定文の方が理解しやすい文章ではないかと考えられた。

#### 9.1.5.まとめ

非常放送文の調査、分析および、聴取実験結果から、非常放送や公共放送において音声単語親密度が高い単語が必ずしも放送文の理解向上に貢献するとは考えにくく、文脈や聴取時の状況から連想

されやすい(想起されやすい)単語が放送文の理解向上に貢献すると考えられた。さらに、有意な差は見られないものの肯定文の方が聞き取りやすく理解しやすい文章ではないかと考えられた。

## 9.2 話速、ポーズ時間長が文理解に与える影響に関する検討

### 9.2.1 はじめに

高齢者や日本語を習い始めた外国人に対して、分かりやすい話し方はゆっくり話すということが有効な方法の一つであることが知られている。この理由として、ゆっくり話すと構音動作がしっかり行えるため、明瞭な発話が期待出来るだけでなく、母音の持続時間が長くなるので、聞き取りやすくなるという利点がある。しかし、ひとまとまりになっている単語をゆっくり話すとは逆に分かりにくくなったり、ゆっくり話すよりもポーズ時間を長くするほうが分かりやすいという意見もある。また、高齢者や日本語を習い始めた外国人は文章理解処理にかかる時間も一般に長くなっていると考えられる。このため、成人健聴者において聞き取りに問題のない話速でも、高齢者や日本語を習い始めた外国人にとっては速くて聞き取りにくいことも予想される。

このような背景を踏まえ、話速やポーズ時間長が文章理解にどのような影響を与えるかについて20代健聴者と65歳以上の高齢者に対して聴取実験を行い、基礎的な検討を行うことを目的とした。さらに、合成音声を使用した聴取実験により句読点に対応するポーズ時間が聞き取りやすさや理解しやすさに与える影響についての検討を加えた。

### 9.2.2 話速とポーズ時間長を変更した音声刺激による文理解度に関する検討

20代被験者と高齢者では、話速やポーズ時間長が文章理解に与える影響がどのように異なるのかについて検討するために、2種類の方法で話速を変更した音声刺激を用いて20代健聴者と65歳以上の高齢者に対して聴取実験を行った。以下に、2種類の話速変更方法について述べる。

一般に、話速は発話のモーラ数をその発話の持続時間で割った値が用いられる。例えば、NHKのニュースアナウンスの話速は、約330モーラ/分であることが知られている。しかし、これらの話速の定義には、文章中の句読点に対するポーズ時間は考慮されていない。

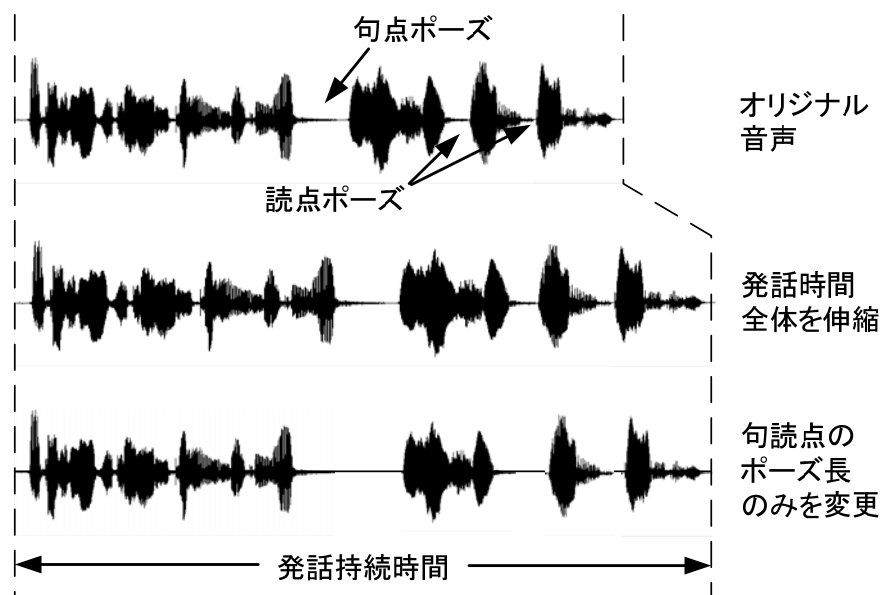


図 9.4.2 種類の話速変更方法

従って、図9.4に示すように同一文章で同一の発話時間であっても、発話全体を伸縮したアナウンスと句読点に対応するポーズ時間のみを伸縮させたアナウンスでは、計算上は同一の話速となるが、アナウンス中の母音持続時間やポーズ時間長が異なるため、聞き手にとっては異なった話速の印象を与えることが予想される。

また、ポーズ時間は文章中の句点や読点に対応する時間に相当するが、このポーズ時間は、ポーズ以前の音声内容を理解し、次の音声を取り入れる準備として使用されていると考えられている。このため、ポーズ時間が極端に短くなると文章理解の低下につながると考えられる。

本研究では、発話時間全体を伸縮させて話速を変更する方法と句読点に対応するポーズ時間のみを伸縮させて話速を変更する方法の2種類の方法により実験用刺激を作成し、これを用いて聴取実験を行った。

本研究で使用した実験用刺激は、女性アナウンサーが約330モーラ/分の話速で読み上げた2文からなる刺激文章13文を音声分析再合成プログラムで発話時間全体を伸縮することにより話速を0.7倍～1.2倍に変更した刺激音声と、刺激文章中に含まれる句読点に対応するポーズ時間長のみを変更することにより話速を0.7倍～1.2倍に変更した刺激音声にマルチトーカーノイズを重畳させたものを実験用刺激として聴取実験を行った。被験者は、健康な聴力を持つ20代男女15名と図9.5の純音聴力測定結果に示すように加齢による聴力低下以外に聴力に異常が認められない65歳以上の高齢者9名である。

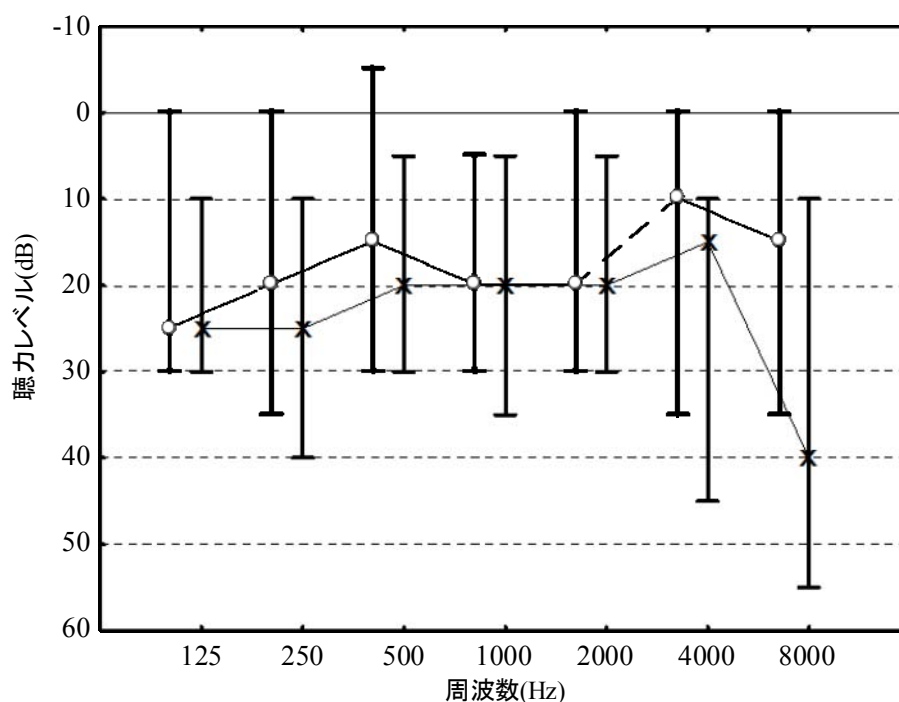


図9.5 高齢者(65歳～77歳9名)の純音聴力測定結果

ここで、ノイズ重畳レベルは20代被験者に対しては、音声刺激にマルチトーカーノイズをラウドネスバランスから6dB減じて重畳した刺激を実験用刺激とした。また、高齢者の聴力特性に関する先行研究において、20代健聴者と高齢者の単音節受聴明瞭度がほぼ等しくなる雑音重畳レベルは、20代健聴者に比べ6dB低下させたものであったと報告されていることを参考に、高齢者に対してはマルチトーカーノイズ

ズをラウドネスバランスから12dB減じて重畳させた刺激を実験用刺激とした。

聴取実験方法は、被験者に静かな部屋で被検者前方約150cmに設置したスピーカより至適レベル(約70(dBA))で実験用刺激を提示し、その内容に関する簡単な質問に筆記で答えさせた。

以下に実験用刺激に用いた文章例と質問例を示す。

[文章1]

私の父が好きなお酒は、日本酒、ワイン、ビールです。  
焼酎は、独特の風味が強いため、苦手です。

[文章1に対する質問]

私の父が好きなお酒は何ですか？  
私の父が苦手なお酒は何ですか？

[文章2]

カレーには、人参、玉葱、じゃがいもが必要です。  
甘口が私の好きなカレーの味です。

[文章2に対する質問]

カレーに入れる野菜は人参、玉葱と何ですか？  
私の好きなカレーはどのような味ですか？

図9.6に20代男女15名を対象としたの聴取実験結果を、図9.7に65歳以上の高齢者9名を対象とした聴取実験結果を示す。

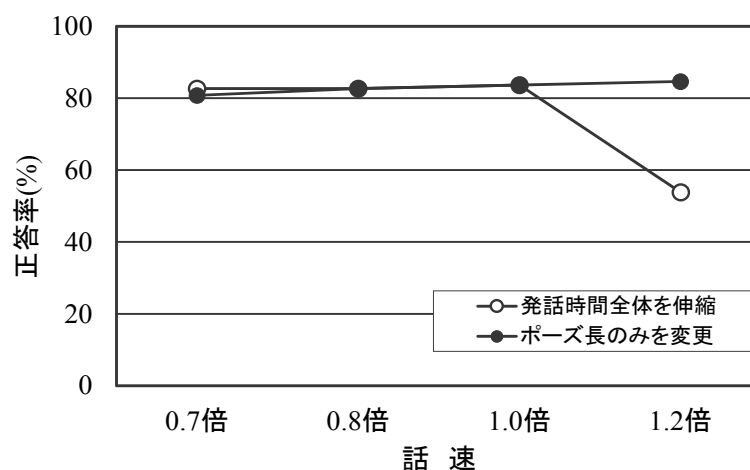


図9.6 20代男女の聴取実験結果

図9.6に示す20代男女の聴取実験結果から、20代男女では話速変更方法の違いによらず正答率はほぼ一定であると考えられる。しかし、話速が1.2倍になると発話時間全体を伸縮した実験用刺激の正答率が有意に低下している。これは、発話速度が1.0倍以下の条件では、話速やポーズ時間長は文章理解に大きな影響を与えないが、発話速度が1.2倍になるとポーズ時間が短くなるだけでなく、母



音の持続時間が短くなるのが主な原因で正答率が低下したのではないかと考えられた。

一方、ポーズ長のみを変化させた実験用刺激では音声部分に手を加えていないため母音持続時間に変化が無いために正答率には変化が見られなかったと考えられる。

これらの結果から、20代被験者では句読点に対応するポーズ時間の変化は発話内容の理解に大きな影響を与えないのではないかと考えられた。

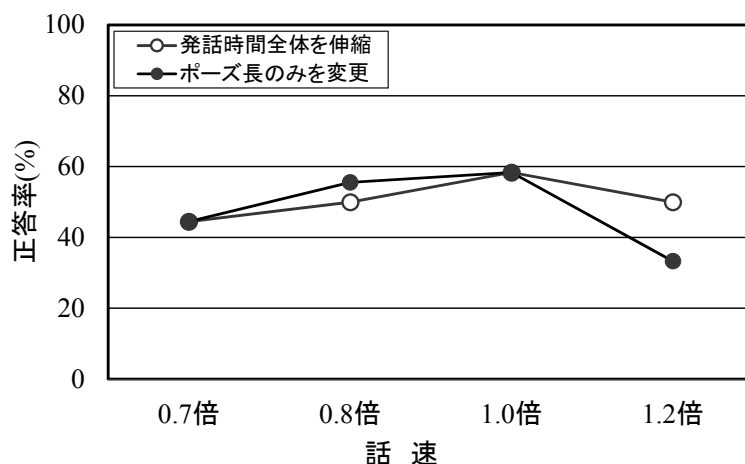


図9.7 65歳以上の高齢者の聴取実験結果

一方、図9.7に示す高齢者の聴取実験結果では、話速1.0倍から0.8倍、0.7倍に遅くした場合、有意な差は見られないものの、句読点に対応するポーズ時間長のみを変化させて話速を変化させた実験用刺激のほうが正答率が若干高くなる傾向が見られた。

この結果から、高齢者では発話内容の理解には20代健聴者に比べて長いポーズ時間が必要なかもしれないと考えられた。さらに、発話速度を1.2倍に早くした場合、発話時間全体を短くして話速を早くした実験用刺激の正答率は、20代男女とほぼ同じであるが、句読点に対応するポーズ時間長を短くして話速を早くした実験用刺激のほうが正答率が低下する結果となった。

この結果は、20代男女の結果と逆の結果である。この原因として、表9.5に示すように句読点に対応するポーズ時間長のみを短くした実験用刺激は、発話時間全体を短くした実験用刺激よりもポーズ時間が短くなっていったために高齢者ではポーズ時間内に行う理解処理時間が十分でなかったのではないかと考えられた。

表9.5 話速変更の違いによる句読点ポーズ長の違い

話速(倍)	話速変更方法	平均句点 ポーズ長(sec.)	平均読点 ポーズ長(sec.)
0.7	句読点ポーズ長のみを伸縮	2.162	0.831
	発話時間全体を伸縮	1.742	0.533
0.8	句読点ポーズ長のみを伸縮	2.425	0.642
	発話時間全体を伸縮	1.222	0.535
1.2	句読点ポーズ長のみを伸縮	0.534	0.153
	発話時間全体を伸縮	0.923	0.381

以上の結果から、20代男女では句読点に対応するポーズ時間の違いによる文章理解度にほとんど

ど差が認められなかったが、高齢者では話速を遅くするよりも句読点に対応するポーズ時間の長さを適切に設定することが聞き取りやすさや理解の向上につながることを示唆された。

### 9.2.3 ポーズ長を変更した合成音声刺激による文理解度に関する検討

ポーズ時間長や話速を精密に設定して音声合成を行うことができる音声合成プログラムを用いて句読点のポーズ時間が聞き取りやすさや理解しやすさに与える影響について20代被験者を対象に聴取実験を行い検討を行った。

聴取実験に使用した実験用刺激は、9.2.2で述べた聴取実験と同一文章を音声合成プログラム(VoiceText)で約330モーラ/分の話速で句読点に対応するポーズ時間をプログラム標準値(句点ポーズ時間800msec.、読点ポーズ時間300msec.)で読み上げた合成音声にマルチトーカーノイズを重畳させたものである。さらに、合成音声の実験結果と比較するために20代の素人女性、女性アナウンサーが同一文章を読み上げた音声も用意した。ここで、ノイズ重畳レベルは、9.2.2で述べた聴取実験と同様に音声刺激レベルに対してマルチトーカーノイズをラウドネスバランスから6dB減じたものとした。

聴取実験方法は、被験者に静かな部屋で被検者前方約150cmに設置したスピーカより至適レベル(約70(dBA))で実験用刺激を提示し、その内容に関する簡単な質問に筆記で答えさせるとともに、聞き取りにくさについて1.聞き取りにくい、2.やや聞き取りにくい、3.かなり聞き取りにくい、4.非常に聞き取りにくいの4段階で評価をさせた。被験者は健康な聴力を持つ20代の男女合計60名であった。

聴取実験結果を図9.8と図9.9に示す。図9.8に示すように実験用刺激の正答率は、合成音声の正答率が20代素人女性や女性アナウンサーが発話した音声刺激に対して有意水準5%の低下が認められた。さらに、図9.9に示すように聞き取りにくさの評価においても20代素人女性や女性アナウンサーが発話した音声刺激よりも合成音声のほうが有意に聞き取りにくいという結果となった。

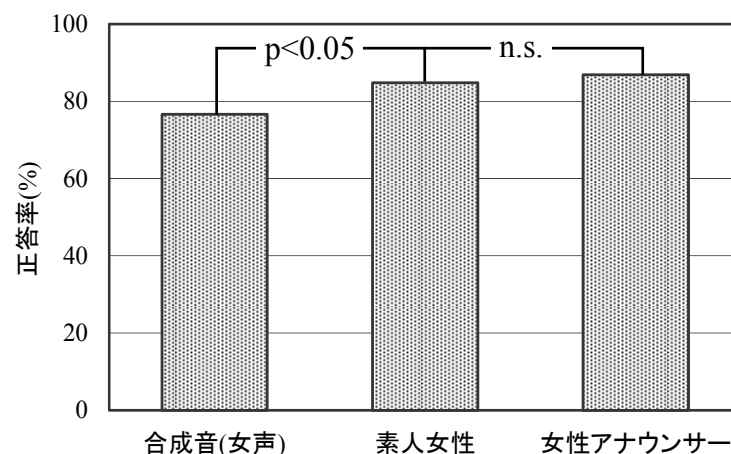


図9.8 実験用刺激の正答率

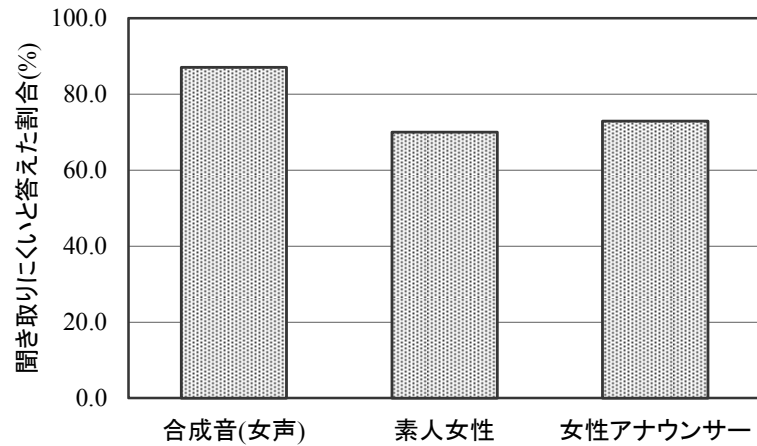


図9.9 実験用刺激の聞き取りにくさの評価

ここで、合成音声の句読点ポーズ時間長と20代素人女性、女性アナウンサーのポーズ時間長を比較したところ、全ての実験用刺激において合成音声の方が20代素人女性、女性アナウンサーのポーズ時間長より短かったことから、合成音声の句読点ポーズ時間長を20代素人女性と同一になるように調整した合成音声を作成し、これを上述の実験用音声に加えて再度聴取実験を行った。

実験用刺激のマルチトークノイズ重畳レベルや実験方法は、上述の聴取実験と同一である。被験者は、20代男女9名であった。

聴取実験結果を図9.10、図9.11に示す。

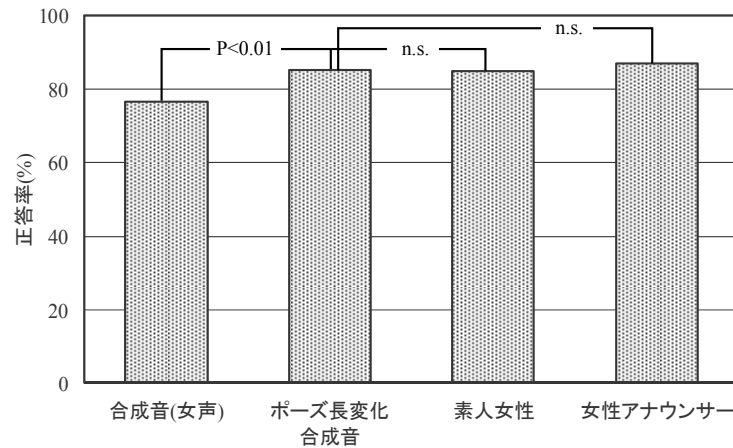


図9.10 句読点ポーズ長を20代素人女性と同一にした音声刺激を加えた実験用刺激の正答率

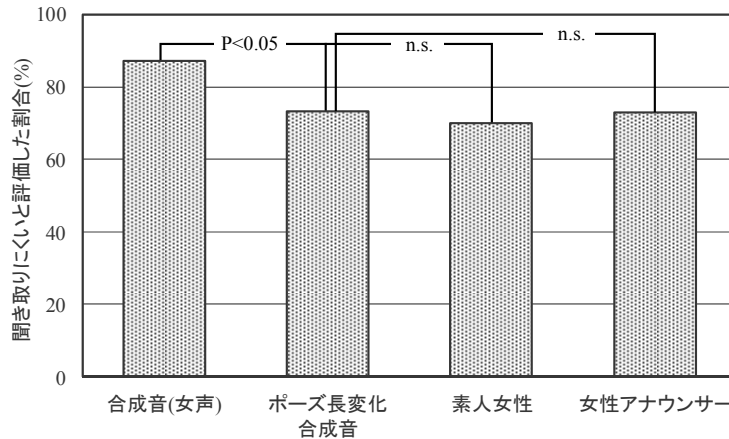


図9.11 句読点ポーズ長を20代素人女性と同一にした音声刺激を加えた実験用刺激に対する聞き取りにくさの評価

図9.10に示す正答率より、句読点ポーズ時間長を20代素人女性と同一になるように調整した合成音声は、句読点ポーズ時間を合成音声プログラムの標準値を使用して合成した音声に対して有意水準1%で有意に高い正答率となった。さらに、句読点ポーズ時間長を20代素人女性と同一になるように調整した合成音声は、20代素人女性および、女性アナウンサー音声の正答率と有意な差は認められなかった。また、図9.11に示す聞き取りにくさの調査結果でも句読点ポーズ時間長を20代素人女性と同一になるように調整した合成音声は、有意水準5%で有意に聞き取りにくくはないという結果となった。

以上の結果から、文章の句読点に対応する適切なポーズ時間長の設定は、合成音声の聞き取りにくさの改善や了解度の向上に非常に重要であることが示唆された。

この結果は、9.2.2.で述べた話速とポーズ長を変更した音声刺激による文理解度に関する検討結果ともよく一致する結果であると考えられた。

#### 9.2.4 まとめ

2種類の話速変更方法で作成した実験用刺激を用いた聴取実験から、20代被験者では話速変更方法によらず実験用刺激音声に対する正答率に差が見られなかった。一方、高齢者では有意な差は見られないものの、ポーズ時間長のみを変化させて話速を変更した刺激のほうが正答率が若干高くなる傾向が見られた。この結果から、高齢者では発話内容の理解には20代健聴者に比べ長いポーズ時間が必要なかもしれないと考えられた。さらに、発話速度を1.2倍に早くした場合、高齢者ではポーズ長を短くして話速を早くした実験用刺激よりも発話時間全体を短くして話速を早くした実験用刺激のほうが高い正答率となった。これは、ポーズ長のみを変化させた実験用刺激では、ポーズ時間が非常に短くなるために理解処理時間が十分でなかったのではないかと考えられた。

これらの結果から、20代健聴者では話速やポーズ長が文章理解にほとんど影響を与えないが、高齢者では、特に句読点に対応するポーズ時間が文章理解に影響を与えるのではないかと考えられた。さらに、合成音声を実験用刺激に使用して行った聴取実験結果から、句読点に対応するポーズ時間の適切な設定は、聞き取りにくさの改善や音声の了解度の向上に非常に重要であることが示唆された。

## 10. 快適性向上のための音響情報伝達

### 音環境デザインのための音響技術とロボティクス技術の融合

大川 茂樹（千葉工業大学先進工学部 未来ロボティクス学科）

#### 10.1 ロボティクスを用いた調音材の最適配置

##### 10.1.1 はじめに

室内の音環境の改善を目的とし、吸音材や音響反射板、調音材などが開発、また販売されている。また音響装置にアクチュエータを取り付け、駆動させるための研究がなされている[1]。これらの音響装置を効果的に利用するためには専門的な知識を踏まえた上で配置や駆動を行う必要がある。本研究では、それらの音響装置の効果をより多く得られる配置を最適配置とし、ロボティクスを用いて求める手法を提案する。ここでは調音材の一つである“Aural Sonic”を平面移動ロボットに搭載し調査をおこなった。

##### 10.1.2 ロボティクスの利用

ロボットは、センサ、知能・制御、駆動系から構成されるシステム[2]であり、入出力をもつ系として扱うことができる。入力ロボットの可動範囲と室の用途であり、本研究では既知として、最適配置決定システムを提案する。開発するロボット、および最適配置決定システムのフローチャートを Fig. 10.1 に示す。

##### 10.1.3 最適配置決定システム概要

本システムはロボット側と評価側で構成される。調音材を搭載したロボットが少しずつ位置と角度を変え、その度にインパルス応答を測定する。得られたインパルス応答から抽出した特徴量をもとに各姿勢での評価値を計算する。最も評価値の高い位置と角度の組み合わせが最適配置になると仮定し、ロボットの目標値として用いる。システムを評価するための実験の環境を Fig. 10.2 に示す。3×7 の枠がロボットの移動する位置に対応している。また、ロボットの角度は調音材が露出している面が y 軸の正の方向を向いている状態を 0 [deg] とし、左回りに正としている。ロボットがとる姿勢(angle)は 0 [deg], 90[deg], 180[deg], 270[deg] の 4 種類である。

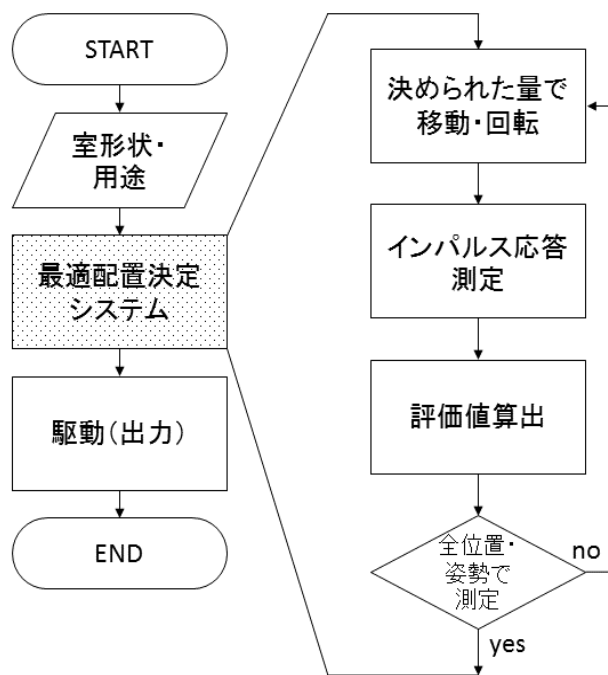


Fig. 10.1 Flowchart of robot system

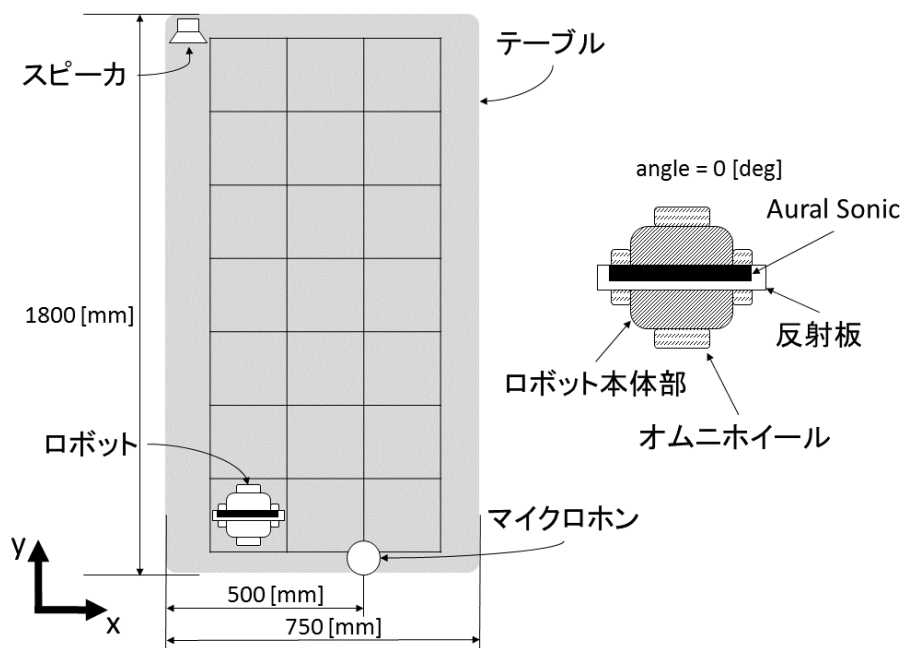


Fig. 10.2 Experimental environment of robot system

#### 10.1.4 インパルス応答の測定

ロボットが決められた量で移動・回転し、静止したタイミングでインパルス応答の測定をおこなう。本研究では Swept-Sine 法を用いた。また測定時の各パラメータや測定環境に関する情報を Table 10.1 に、測定されたインパルス応答の例を Fig. 10.3 に示す。

Table 10.1 Impulse response measurement environment and parameters

サンプリング周波数 [Hz]	48000
信号長 (1 周期) [s]	5.5
定常時騒音レベル $L_A$ [dB]	39.5
下限・上限周波数 [Hz]	0~2500

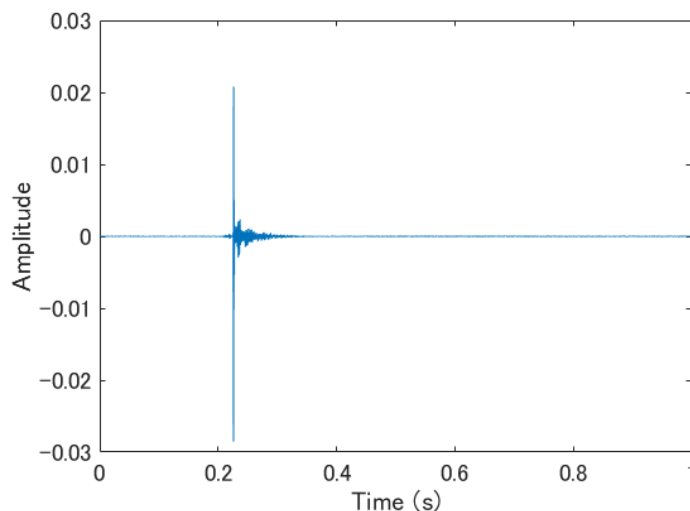


Fig. 10.3 Example of impulse response

#### 10.1.5 評価方法について

(4)にて測定されたインパルス応答をもとに特徴量を抽出する。本研究では室の用途を「会話」とし、音声の明瞭度に関係する  $C_{50}$  を用いる。なお、抽出する特徴量は目的に応じた変更が可能である。たとえば音楽鑑賞など残響感を調整する場合には初期残響時間を特徴量とする。

#### 10.1.6 実験結果

Fig. 10.4 は angle ごとの  $x$ - $y$  平面上における評価値 ( $C_{50}$ ) の分布を表している。  $xy$  座標はロボットがある位置であり、同じ angle では評価値に勾配がみられる。最も評価値の高い位置・姿勢は  $(x, y, \text{angle}) = (3, 1, 270)$  のときである。これはロボットがマイクロホンとスピーカに間になく、調音材がマイクロホンの近くにあり、マイクロホン側に向いている状態である。また同じ位置の  $(x, y, \text{angle}) = (3, 1, 90)$  のときも評価値が高いことから、一次反射音の影響が大きいと考えられる。

#### 10.1.7 おわりに

調音材の最適配置を目標に、ロボティクスを利用したシステムの提案をおこなった。調音材を搭載したロボットの姿勢・位置によるインパルス応答から求めた評価値に影響が見られた。現段階では全探索的に評価値を求めているが、今後はメタヒューリスティクスなどを導入し、より少な

い動作で評価値の分布を推定できれば、リアルタイムでの制御が可能になると考えられる。

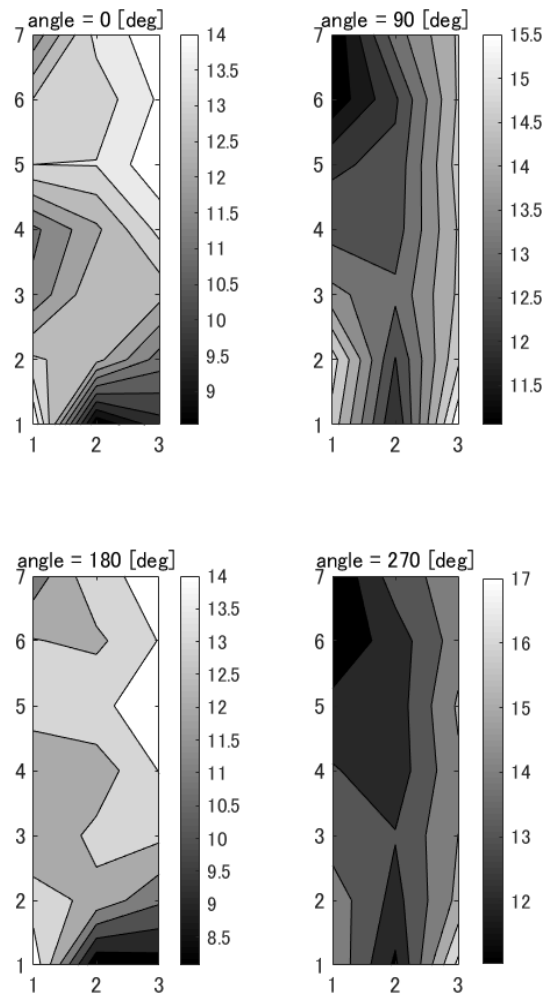


Fig. 10.4 Contour of evaluation value ( $C_{50}$ )

## 10.2 残響可変装置とロボティクスの組み合わせによる小規模音場へのアプローチ

### 10.2.1 はじめに

小規模音場における残響を調整する目的で吸音・反射・調音などの機能を持つ装置が開発・市販されている（たとえば文献[3][4]など）。我々の研究室においても、個人宅などの小規模空間での使用を前提とした残響可変装置の開発を行っている。

これらの装置を効果的に利用するためには適切な位置に設置する必要がある。そのため、製品ごとに推奨される使用方法の提示、もしくは専門家による判断など装置を適切に利用するための手段がとられている。

これら音響装置は材質の物理的特性によって残響に働きかけているため、身体を持つロボットへの適用はその物理的特性を活かすという点で有効であると考えられる。本研究ではロボット技



術の応用によって、自律的に音響装置をもっとも効果的な位置へ移動させることが目的である。ロボット技術の「センサ」「知能」「駆動」の3つの要素を音響装置に組み込む。センサで音場を含む周囲の環境を把握し、最適解を求めるアルゴリズムなどの知能によって導かれた最適な位置へ駆動系を用いて移動するシステムを構築する。本稿では残響調整ロボットのシステム概要とロボティクスの具体的な適用例について述べる。

### 10.2.2 システム概要

残響調整ロボットと外界の入出力の関係を Fig. 10.5 に示す。ロボットは、外界の情報と室の用途（会話、講演、楽器演奏など）を入力とし、残響可変体による吸音率の変化や、移動機構による位置の変化によって引き起こされる外界への影響を出力とする。

#### ・残響可変部

開発した残響可変装置を Fig. 10.6 に示す。共鳴管によって常に低音吸音をしつつ、転式可変吸音体を操作することで装置全体の吸音率を変化させる機構を持つ。装置全体を移動機構に載せ、各可変吸音体アクチュエータを取り付け、制御・知能システムを組み込むことでロボット化される。

#### ・知能部

室の用途に合わせた評価値にもとづき最適解を求めるアルゴリズムを利用する。例えば、受音点と音源がある室内において、音源から発せられた音が設定された受音点で最も明瞭に聞こえるようにする状況を考える。

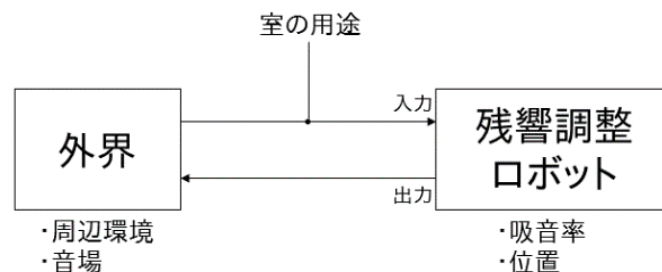


Fig. 10.5 Relationship between the reverberation adjust robot and the outside world.

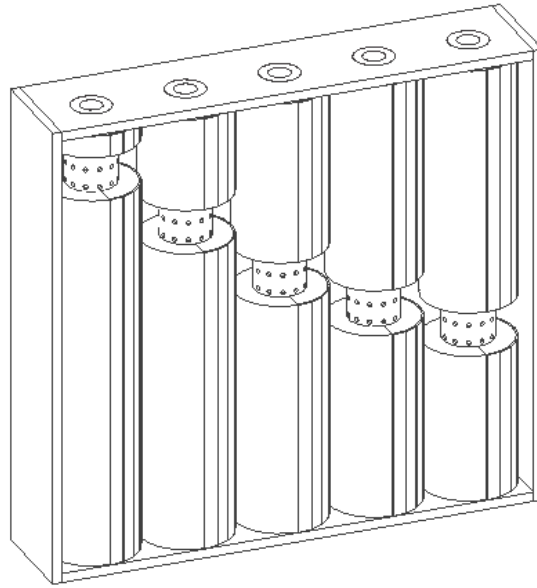


Fig. 10.6 Variable Reverberation System.

室環境が取得されている前提で、各種近似アルゴリズムを用いて評価値を最大にする解を求める。ここでの解とは残響可変装置の位置と吸音率であり、評価値は明瞭度を表すC値となる。装置の位置と室環境の情報をもとに音響シミュレーション上で評価値を求める。矩形の室の1辺に沿って装置を動かした時のC値の変化をFDTD法シミュレーションによって導出した。シミュレーションの詳細な条件をTable 10.2に、結果をFig. 10.7に示す。グラフ形状に多峰性が見られるため、単純なアルゴリズムでは局所解に陥る危険性があり、メタヒューリスティクスなど用いる必要がある。

Table 10.2 Condition of FDTD simulation.

サイズ(x×y)	50×40
受音点位置(x, y)	10, 10
音源位置(x, y)	40, 30
時間分解能[s]	0.0001
ステップ数	20000
吸音境界	Mur 1次

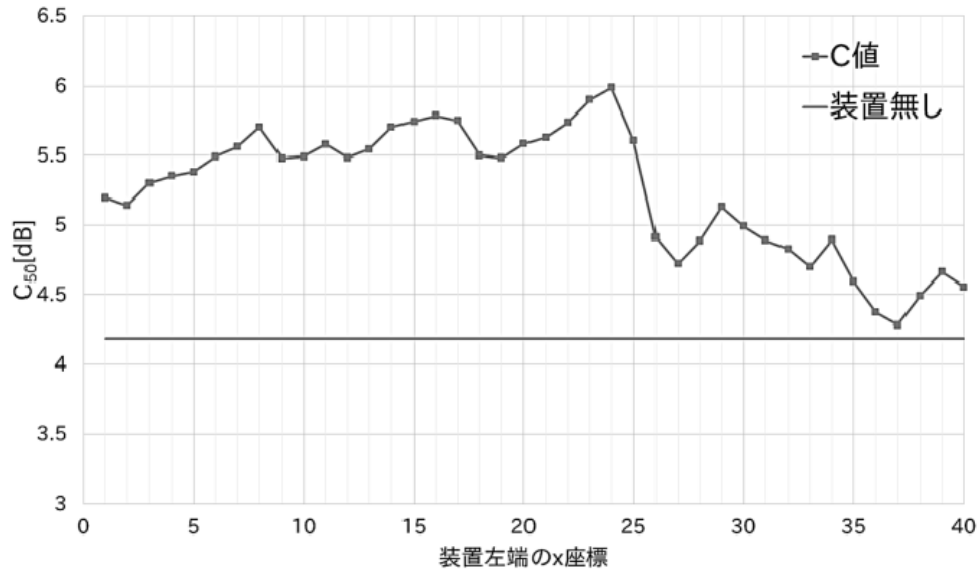


Fig. 10.7  $C_{50}$  calculated by FDTD simulation.

・センサ部

周囲の環境を理解するために、カメラやレーザーレンジファインダを用いる。フィードバックシステムの導入や、音場や音源の位置などの推定をする場合、マイクロフォンアレイ等が必要となる。

・駆動部

平面移動しか扱わない場合、オムニホイールを用いることで全方向移動が容易になる。制御にはモータに取り付けたエンコーダからの情報をもとにおこなう。

回転式可変吸音体の操作には角度制御が可能なステッピングモータを用いる。

10.2.3 汎用的な適用例

前節では残響可変装置へのロボティクスの応用を示した。しかし、位置というパラメータのみ扱うとすることで、ロボティクス応用の幅を拡張することが可能となる。これは移動ロボットに様々な機能を持つ音響装置を組み合わせることができるためである。全方向移動機構とパネル状音響装置を組み合わせ例を Fig. 10.8 に示す。

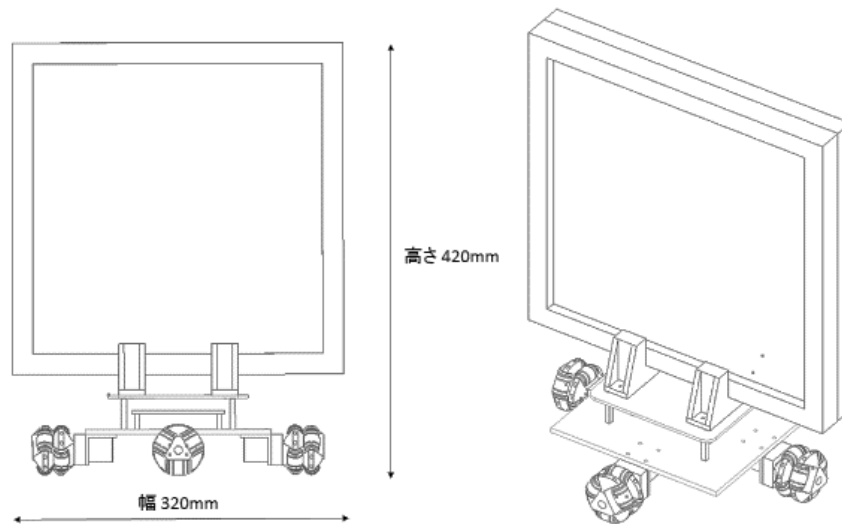


Fig. 10.8 Combination of an acoustic panel and a mobile part of robot.

#### 10.2.4 おわりに

自律で残響を調整する目的で、残響可変装置へロボティクス応用する手法の提案をおこなった。ロボットにおける音源位置推定手法[5]、ロボティクス分野で得られた知見と音響装置の組み合わせにより、今後さらなる音環境改善が期待できる。

#### 参考文献

- [1] 平原達也他, “ATR 可変残響室の構造と音響特性”, 日本音響学会誌, 37(3), pp. 123-127, (1992).
- [2] 経済産業省, “ロボット政策研究会中間報告書～ロボットで拓くビジネスフロンティア～”, 第4回ロボット政策研究会, (2005).
- [3] 永田穂, 残響可変装置を有するエコールームの音響設計, 日本音響学会誌, 23(6), 433-441, (1967).
- [4] 富士田隆志, 安藤繁雄, 山口公典, ピアノ練習室における音場の能動制御, 日本音響学会誌, 50(12), 986-996, (1994).
- [5] 浅野 太, ロボットにおける音源位置推定(小特集)ロボットにおける音響技術, 日本音響学会誌, 63(1), 41-46, (2006).

## 11. 快適性向上のための音響情報伝達

### 音声による効率的な情報伝達を指向した音声対話システム

藤江 真也（千葉工業大学 先進工学部 未来ロボティクス学科）

#### 11.1 はじめに

システム発話の間に挟まれる、相槌などのユーザの短い反応に応じて発話内容を切り替えることで、効率的にまとまった量の情報を伝達する音声対話システムを提案する。

ニュース記事のようなまとまった量の情報を音声で伝達することを考えると、記事の全内容を読み上げるか、要約した内容を読み上げるようなことが考えられる。しかし、聞き手の興味や知識によって、必要とされる情報は異なるため、無駄な情報が伝達されたり、必要な情報が伝達されなかったりといった問題が起こることがある。本研究では、このような音声による情報伝達の問題に対し、システムは基本的に要約された内容を伝えながら、その途中に挟まれるユーザの短い反応（相槌や聞き返しなど）に応じて自らの発話を補うことで、ユーザの必要とする量の情報を効率よく提供する仕組みを検討する。具体的には、システムの発話内容をニュース記事から事前に生成し、それらをユーザの反応に応じて切り替えられるように、ユーザの反応を織り込んだ発話計画を予め生成しておく。

筆者はこれまでに音声対話システムにおける対話のプロトコルについて論じてきた[1]。本研究は、このなかでも効率的な情報伝達と対話のリズムに着目した対話システムの提案である。従来、音声対話によってまとまった量の情報提供を行う音声対話システムの研究[2,3]や、ユーザに主体的に情報を提示する音声対話システムの研究[4,5]も見られるが、いずれも質問応答型を基本としている。本研究は、ユーザの行う非明示的な要求にも応えながら効率的に情報提供を行い、リズムのある対話を実現するという点でこれらと異なる。

#### 11.2. システム構成

提案システムの構成を Fig. 11.1 に示す。システムは大きく分けて、ニュース記事をもとに対話に利用する発話計画を生成する事前処理部と、ユーザを相手に対話を行う対話システム部の二つから構成される。

事前処理部は、インターネットから取得したニュース記事を解析して構造化する構造解析部と、その結果をもとにユーザの反応を織り込んだ発話計画を生成する計画生成部からなる。生成された発話計画は、発話計画データベースに保存される。

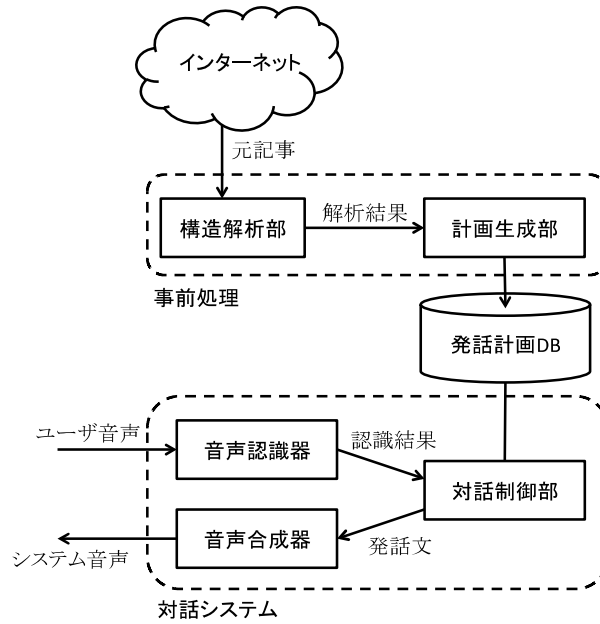


Fig. 11.1 システム構成

対話システム部では、発話計画を読み込み、それに従って対話を進める。音声認識器は、ユーザの短い反応（相槌、聞き返し、復唱）を認識する。言語情報を認識する通常の音声認識機能に加え、韻律情報から相槌や聞き返しなどの意図を認識する機能を備える[6]。対話制御部は、発話計画に従ってシステムの発話内容を含む発話文を音声合成器に出力する。

さらに、システムの発話に対するユーザの反応が音声認識器によって認識されたときは、システム発話をその反応に応じた計画に従ったものに変更するといった処理も行う。

音声合成器は、対話制御部から生成された発話文を音声に変換してユーザに提示する。

### 11.3. 構造解析部

構造解析部では、情報源であるニュース記事をもとに、発話計画を生成するために必要な情報を構造化する。ここでの目的は、ニュース記事が持つ情報をもとに発話計画を立てるための情報を抽出することである。ユーザとのインタラクションに基づきどの情報を、どのように発話すべきか、といったことは後の計画生成部で決定される。

発話計画は、ニュースの要点を伝える主計画と、それを補う副計画からなる。そのため、構造解析部では主計画に含めるべき情報（以降、主情報）と、周辺情報と主情報の関係性の二つを抽出する必要がある。

記事における文の単位と対話中に発話によって伝達する単位が一致するとは限らない。従って、本来は記事全体の内容を再構成した上で発話計画を立てるべきだが、ここでは簡単のため、記事内の文毎に独立して発話計画を立てる。

構造解析は、文節単位の係り受け関係をもとに行われる。そのため、まず文を文節単位に分割

し、係り受け解析を行う。本研究では、形態素解析と係り受け解析に、Juman<sup>1</sup>、KNP<sup>2</sup>をそれぞれ利用した。

例として、ウェブニュース記事<sup>3</sup>の一文を文節に分割した例を Fig. 11.2 に示す。

ソチオリンピック、／フィギュアスケート男子の／金メダリスト、／羽生結弦選手が／腰の／痛みの／ため、／今シーズンの／初戦と／して、／来月フィンランドで／出場を／予定していた／国際大会を／欠場することになりました。

Fig. 11.2 文節単位に分割された文

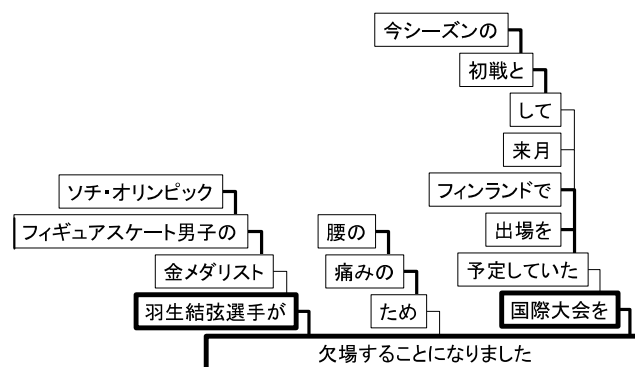


Fig. 11.3 Fig. 11.2 の文から生成された構造木

さらに、係り受け解析に基づいて、文の構造木を作成する。ここでは、文節一つ一つが構造木のノードとなる。Fig. 11.3 に、Fig. 11.2 をもとに生成した構造木を示す。各文節は係り先の文節と、自身の文法的情報を持つ。例えば、「羽生結弦選手が」は「欠場することになりました」に係り、「人物、主題」という情報を持つ。

Fig. 11.3 中、太枠で囲まれた文節がこの文における主情報である。主情報として、文における最後の述語と、次節で述べる方法で重要であるとされた文節が選択される。

係り受け関係における太い線は、係り先の文節に対して係り元の文節が省略不可避性を持つことを表す。省略不可避性とは、「当該文節の係り先の文節が発話される場合は、当該文節が省略されてはならないこと」を表す。例えば「ため」という文節は、それだけでは意味を持たないため、「腰の」「痛みの」を省略できない。このことから、「腰の」は「痛みの」に対して、「痛みの」は「ため」に対して省略不可避性を持つとする。

重要語の抽出や省略不可避性の判定は、現状では人手で行っている。

<sup>1</sup> <http://nlp.ist.i.kyoto-u.ac.jp/index.php?JUMAN>

<sup>2</sup> <http://nlp.ist.i.kyoto-u.ac.jp/index.php?KNP>

<sup>3</sup> NHK NEWSWEB, <http://www3.nhk.or.jp/news/>

#### 11.4. 計画生成部

計画生成部では、構造解析部で得られた結果を用いて発話計画を作成する。ここでは、11.3.での例をもとに生成した、Fig. 11.4 に示した発話計画の例をもとに、主計画、副計画の生成についてそれぞれ説明する。

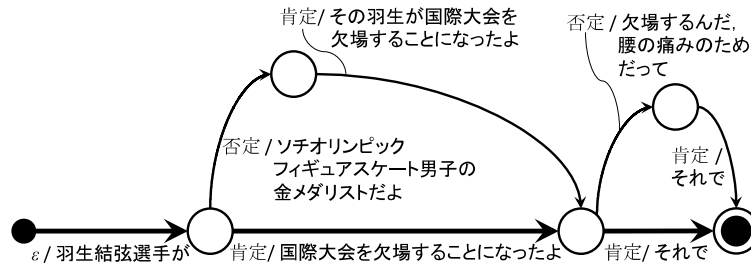


Fig. 11.4 発話計画の例

主計画にはニュースの要点を含める。ここに含まれるのは 3.で述べた主情報に他ならない。例に挙げた文では「羽生結弦選手が」「国際大会を」「欠場することになりました」という 3 つの文節を選択する。

次に、選ばれた文節をもとに作成した文を、適切な長さに分割する。文節を連結した文をそのまま読み上げてしまうと、ユーザが短い反応を挟む間を奪い、インタラクションの機会を損失することになる。一方で、短い単位毎に発話を区切って反応をうかがうのは、ユーザに煩わしさを感じさせかねない。このため、文法的な規則を適用し、文節を連結することで計画に適した長さの発話を構成する。

ここでは、海木らのポーズ挿入規則[7]を参考に次の条件を満たす箇所では分割し、それ以外では連結する。

- 当該文節の句が右枝分かれかつ先行文節が左枝分かれ
- 当該文節が読点 (、) を含む

この規則を先の例に適用すると、「羽生結弦が」と「国際大会を欠場することになりました」という 2 つの発話となる。

構造化された情報の中で、主計画に含まれる文節に係っている文節が副計画となる。主計画と同様に、各文節から省略不可避性を有する文節を再帰的に取得した文節を計画に含める。

Fig. 11.4 の例で、「国際大会を」に対する副計画を生成するとき、まず「国際大会を」に係る文節である「予定していた」が選択され、それに対する省略不可避性をもとに「出場を」「フィンランドで」が選択される。全体として「フィンランドで」「出場を」「予定していた」という文節が「国際大会を」の副計画を構成することになる。ここで選択されなかった「来月」などの文節は、「予定していた」に対する副計画となる。このように発話計画は階層性を持つ。副計画も、主計画と同様の規則で文の分割を行う。



## 11.5. 対話例と課題

提案システムとユーザの対話例を Fig. 11.5 に示す。システムが主計画に沿って発話をするので、ユーザは相槌を挟む、あるいは黙っているだけでニュースの要点が得られる。また、ユーザの知らない言葉や理解できない表現が出て来たときには相槌や聞き返しを挟むことができる。そのとき、システムは対応した副計画に沿った発話を生成することで情報を補足する。このように、ユーザの理解状態に合わせてながらニュース記事の内容を音声によって効率よく伝達することが実現できた。

一方で、課題も残されている。例えば、「国際大会を」と「欠場することになった」は、計画上では一つの発話としてまとめられている。二つの情報を一つにまとめた発話に対してユーザの聞き返しがあった場合、どちらに関する補足を行うかは自明ではない。また、一つの情報に複数の補足情報が存在することもある。従って、補足対象が定まったとしても、どの補足情報を伝えるべきかは別途決めなければならない。現状ではこれらの問題に対して、「発話中で最も後ろの情報に対して優先的に補足を行う」「時間や場所以外の補足情報を優先する」といった規則で処理を行っている。より適切な情報提示のためには、どの補足情報が重要かといったことを考慮すべきである。また、用語や人物の説明といった補足情報は、それらの一般的な知名度や、個人の知識や嗜好などによって変化する。

S: 羽生結弦選手が	[主計画]
U: うん	[肯定応答]
S: 国際大会を欠場することになったよ	[主計画]
U: え?	[否定応答]
S: 欠場するんだ、腰の痛みのためだって	[副計画]
U: へー	[肯定応答]
S: それで、日本スケート連盟によると	[主計画]
U: うん	[肯定応答]
S: 羽生選手は全治4週間と診断されたんだって	[主計画]
U: そうなんだ	[肯定応答]
S: スケート連盟は	[主計画]
S: 『症状は重くない。練習が全くできない状況ではない。中国大会に向けて	[主計画]
U: 中国大会?	[反復応答]
S: うん、グランプリシリーズのだよ	[副計画]
U: ふーん	[肯定応答]
S: それで、万全の状態で望むためだ』と	[主計画]
しているよ	
U: そうなんだ	[肯定応答]

Fig. 11.5 対話例。“S:”はシステム発話，“U:”はユーザ発話を表す。システム発話には主計画と副計画のどちらから生成されたか、ユーザ発話には反応がどの応答に分類されたか、をそれぞれ付与している。

これらを踏まえ、ユーザの反応に対する適切な補足情報の提示となるような発話計画を立てる手法を確立することが今後の大きな課題である。

## 6. 結論

ニュース記事から、ユーザの反応を想定した発話計画を作成し、それによって対話を行うことで効率的な情報伝達を行う音声対話システムを提案した。

提案システムの枠組みを発展させることで、更に効率的で豊かなインタラクションを実現することができる。そのための課題として、パラ言語を利用したユーザの反応の認識、情報構造化における重要語抽出など、個々の技術における精度の向上が挙げられる。

## 参考文献

- [1] T. Kobayashi and S. Fujie: Conversational Robots: An Approach to conversation protocol issues that utilizes the paralinguistic information available in a robot-human setting, *Acoust.Sci. & Tech.*, Vol. 34, No. 2, pp. 64-72 (2013)
- [2] Y. C. Pan, H. Y. Lee, L. S. Lee: Interactive spoken document retrieval with suggested key terms ranked by a Markov decision process, *IEEE Trans. Audio, Speech, and Language Processing*, Vol. 20, No. 2, pp. 632-645 (2012)
- [3] 吉野幸一郎, 河原達也: ユーザの焦点に適応的な雑談型音声情報案内システム, 人工知能学研資, 言語・音声理解と対話処理研究会, Vol. 70, pp. 53-58 (2014)
- [4] 翠 輝久, 河原達也, 正司哲朗, 美濃導彦: 質問応答・情報推薦機能を備えた音声による情報案内システム, 情処理学論, Vol. 48, No. 12, pp. 3602-3611 (2007)
- [5] 杉山弘晃, 南 泰浩: 情報提示対話を主導するシステムのためのユーザの潜在的情報要求の推定, 信学論 (A), Vol. J95-A, No. 1, pp. 74-84 (2012)
- [6] S. Fujie, R. Miyake, and T. Kobayashi: Spoken dialogue system using recognition of user's feedback for rhythmic dialogue, *Proc. Int. Conf. Speech Prosody*, OS2-4 (2006)
- [7] 海木延佳, 匂坂芳典: 局所的な句構造によるポーズ挿入規則化の検討, 信学論 (D-II), Vol. J79-D-II, No. 9, pp.~1455-1463 (1996)

## 12. 快適性向上のための音響情報伝達

### スマートホン・タブレットによる簡易音場シミュレータ

須田 宇宙 (千葉工業大学 情報科学部 情報ネットワーク学科)

【概要】 Web ブラウザの発達により、音響現象を可視化・可聴化する音響シミュレータ教材のプラットフォームとして期待が高まる一方、スマートフォンに搭載されている CPU の演算能力に不安を感じる場面も出てきている。高速な演算が可能になれば、リアルタイム性とインタラクティブ性の向上が見込めるが、アルゴリズムの工夫には限界がある。これに対して、GPU を利用した演算技法について検証を行い、開発技法を公開することを目的としている。

#### 12.1 目的

理工系の教育分野では、不可視現象を多数取り扱うため、現象・効果を可視化、可聴化することが、学習内容に対する理解度の向上に有効である。音響科学などの文章だけの困難な科目において、実際に目で見て、聞くことのできる実験や実習などの教育方法が学習効果に有効である。しかし、時間や場所、教材コストがかかるという問題があるため大学などの教育機関では学習者が現象を把握するまでに至らず、数式の説明に終始することも多かった。そこで本研究室で開発しているシミュレータ教材では、教材にかかるコストを低コストで実験や実習を、Web ブラウザ上で仮想的に行うことが可能である。

これまで本研究室で開発されてきたシミュレータ教材は、PC 上で利用されることを想定されていた。しかし、近年、スマートフォンやタブレットなどの性能が向上し、既存の PC にはなかった「タッチ」や「スワイプ」を中心とした操作体系が誕生した。これを活かすことにより「直感的な操作」が可能となり、老若男女問わず誰でも簡単に扱えるシミュレータ教材を動作させるデバイスとして期待されている。これまでのシミュレータ教材では、計算範囲を変更するためにスライダーやボタンを使用してパラメータを設定していた。これをタッチやスワイプで直感的に変更可能とすれば、利用者の負担が減少する。他にも、端末を傾けることで操作することも考えられる。

そこで本研究では、携帯端末上でも複雑な処理に対してスムーズでインタラクティブ性の高いシミュレータ教材を実現するため、計算や描画に GPU(Graphics Processing Unit)を利用するようプログラムを変更し、動作速度・負荷を検証すると共に、開発技法を公開することを目的としている。

#### 12.2 高速化技法の比較

プログラムを高速化するためには、高速なハードウェアを導入する方法から小手先のプログラムテクニックまで様々なレベルの手法が存在している。スマートフォンを用いて、シミュレータ教材を Web ブラウザ上で動作させると考えると、主な手段として以下に示すものが考えられる。

##### (1) 複数の CPU コアの利用

昨今のコンピュータは、物理的な CPU コアを有している。これらの有効に利用して時間のかかる処理を分散させることにより、効率良く処理を実行することができる。

##### (2) SIMD 命令の利用

SIMD(Single Instruction Multiple Data)は一つの命令でデータ列に対してまとめて同じ演算を行う仕組みである。しかし、まだAPIの仕様が固まっていない。

### (3) GPUを用いた演算

GPUは元々グラフィック描画に特化したプロセッサであったが、昨今では大規模なSIMD描画器となり一般的な演算に利用できる方向に進化している。これを受けて、GPGPU(General Purpose GPU)という言葉も出てきており、ディープラーニングなどの科学技術計算やブロックチェーンのマイニングなどにも利用されている。WebブラウザからGPUを利用するためには、現在はWebGL APIを利用しているが、将来的には低レイヤーからGPUを操作するWebGPU APIが利用できる見通しである。

### (4) コンパイルされたバイナリプログラムの利用

現在のWebブラウザに搭載されているJavaScriptエンジンには、JavaScriptのプログラムコードを実行時にコンパイルするJIT(Just In Time)コンパイラが搭載されている。しかし、JavaScriptの柔軟により、最適なコードを出力できていない。そこでC/C++などの既存の言語をコンパイルしたコードをWebブラウザ上で実行する。WebAssemblyという仕組みが導入されている。

### (5) 型付き配列(TypedArray)の利用

JavaScriptには基本的に型が無い言語であるが、バイナリーデータを扱うために型付き配列が導入されている。これにより、演算精度をプログラムが設定できることと、メモリの使用効率の向上から高速化を図ることが可能となった。

## 12.3 実験

### (1) 測定に利用した理論とシミュレータ教材

本研究ではCPUとGPUによる演算・描画速度や負荷比較する。そのため、メインメモリの容量によって速度が変化する題材ではないことが望まれる。また、演算量によって負荷を変化させて比較したいと考えた。これら要求を満たすため、今回使用する題材は、複数の点音源によって生成される音場の可視化シミュレータとした。

本研究では、「点音源の音場」の理論に実際に基づいて、CPUを利用するプログラムとGPUを利用するプログラムを開発した。演算の条件は、点音源の数を2個、音場を計算する領域を $512 \times 512$ とした。開発したシミュレータ教材の動作例を図1に示す。図の縞模様が音圧を表している。円の中心付近の近接した位置に2つの点音源を配置しており、これらの音源から発せられた音波が干渉して、横方向の縞模様が潰れていることが見て取れる。音源間の距離をマウスやスワイプのY座標で指定することができ、リアルタイムに干渉縞が変化する。

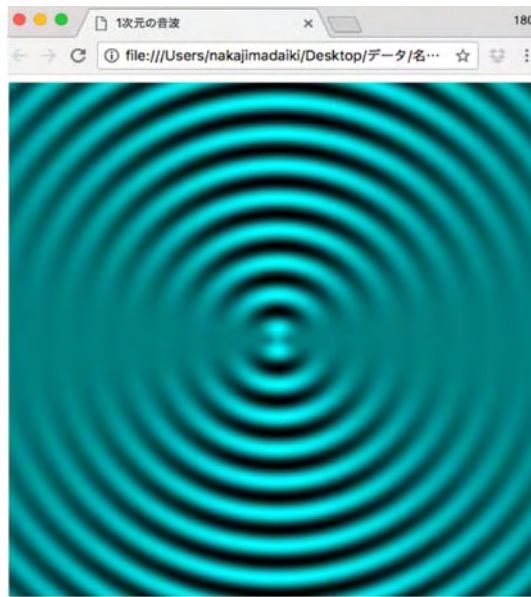


図 12.1 開発したシミュレータ教材の動作例

## (2) 測定結果

測定は、大きく分け、CPU を利用して演算と描画を行なった場合と GPU を利用して演算と描画を行なった場合について実施した。表 12.1 に測定結果を示す。1,000 フレーム演算する毎に開始からの経過時間をコンソールに表示させ、10,000 回演算したところで 1 フレーム辺りの演算時間を計算した。

表 12.1 より、GPU を利用した場合は殆どの端末で約 16.6msec/frame であり、フレームレートに換算すると滑らかな動画の指標である 60FPS [Frame Per Second]に近い値となった。

表 12.1 測定結果

端末	CPU による描画速度	GPU による描画速度
iMac	22.171	16.869
iPhone	47.550	16.660
iPad	77.678	16.692
Windows	130.678	19.673
	単位はいずれも msec / frame	

## 12.4 結論

本研究では、GPU を利用することで演算性能を大幅に向上させることが可能であることを確認することができた。また、リアルタイム性の高さを示す指標としてタッチやスワイプ操作により二重音源間の距離が変化するインタラクティブ性の高いシミュレータ教材の開発を行った。また、本研究の開発技法を公開した。

今後は、この開発技法を発展させ、Virtual Reality などの技法を取り入れ、分かりやすい可視化を行っていく予定である。

参考文献

- [1] 須田宇宙, 音響シミュレータ教材を用いた体験型授業について, 信学技報, vol. 116, no. 54, EA2016-5, pp. 31-34, 2016年5月
- [2] Hiroshi Suda, Interactive simulators for acoustic education, The Journal of the Acoustical Society of America 140, 3314 (2016)
- [3] 須田宇宙, WebGL を利用した音響教育用シミュレータ教材, 音響教育研究会資料, Vol.9, No.1, pp.1-7, 2017
- [4] 須田宇宙, JavaScript によるサウンドプログラミングハンズオン講座, 2017年11月11日開催

### 13. 快適性向上のための音響情報伝達

## 耳介の放射特性に基づく正中面における音源の仰角と 頭部伝達関数の第1ノッチの周波数の定式化の試み

竹本浩典（千葉工業大学 先進工学部 知能メディア工学科）

【要約】頭部伝達関数の第1ノッチ（N1）は正中面における音源定位の重要な手がかりの一つである。N1の周波数は、音源が上方に近づくほど上昇し、下方に近づくほど下降することが知られているが、なぜそのような関係が生じるか明らかにはなっていない。これを明らかにするために、音源を外耳道の入口に置いて様々な周波数で励振し、周波数ごとに距離減衰で正規化した音圧レベルの頭部周辺における分布を可視化した。ここで、音響の相反定理から、音圧レベルが低い領域はN1が生じる音源位置を示す。つまり、ある周波数における耳介の放射特性を音圧レベルの分布で表して解析することにより、N1周波数と音源位置の関係を検討できる。その結果、耳介の上方と下方の2方向に位相の異なる放射が生起し、その経路差が半波長となる空間位置に音圧レベルが低い領域が生じることが明らかになった。また、この領域は周波数が上昇し、相違が増大するとともに上方へと移動した。これらの結果より、耳介上に周波数が高くなるほど位相差が大きくなる2つの放射点を仮定すれば、正中面においてはその2つの点を焦点とする双曲線として、音源の仰角とN1周波数を定式化できることが示唆された。

#### 13.1 はじめに

頭部伝達関数（Head-Related Transfer Function: HRTF）は音源から外耳道入り口までの音響特性を表しており、音源の位置によって変化し、また同じ音源位置であっても個人差が存在する。HRTFは複数のピークとノッチからなっており、それぞれ周波数が低い方からP1, P2, ..., N1, N2, ...と呼ばれる。これらのうち、P1, P2とN1, N2は上下・前後方向の音源定位の手がかりになることが知られている[1]。図13.1は、先行研究[2]を基に作成した正中面におけるピークやノッチの模式図で、ピーク周波数は音源の仰角が変化しても一定であるが、ノッチ周波数は音源が上方に近づくほど上昇し、下方に近づくほど下降する。しかし、このような関係が生じる要因は明らかになっていない。

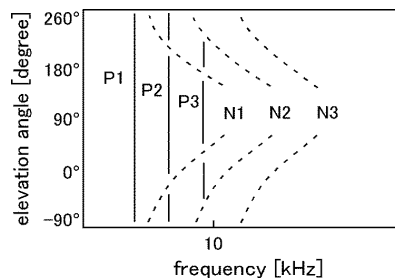


図 13.1 正中面におけるピークやノッチの模式図

この要因を明らかにするために、耳介の放射特性に着目した。音響の相反定理[3]により、音源に入力する信号が同じであれば、音源点と観測点の位置を入れ替えても、同じ信号が観測される。そのため、外耳道入り口に音源点を置いてある周波数で励振し、距離減衰で正規化して音圧レベルが極小となる領域を可視化すれば、その音圧レベルが極小となる領域に音源があるとき、HRTFのその周波数にノッチが現れる。つまり、ある周波数における耳介の放射特性を正規化した音圧レベルの空間分布として表し、その極小となる領域の位置を分析することによって、ノッチの周波数と音源の位置との関係を検討し、定式化を試みる事が可能である。この報告書では、その検討や定式化について発表した国際学会の内容[4]を抜粋・要約する。

### 13.2 材料と方法

男性 6 名 (M1~M6)、女性 6 名 (F1~F6) の頭部形状を磁気共鳴画像法 (Magnetic Resonance Imaging: MRI) で計測し、ボクセルサイズ (空間解像度) を 2 mm とした。全ての被験者の左耳の HRTF を時間領域差分法 (Finite-Difference Time-Domain method: FDTD 法) [5] で計算した。この計算では、まず外耳道入り口にガウシアンパルスを印加し、図 13.2 で示すように、頭部中心からの距離が 0.5 m の球面上で、側方角  $\alpha$ 、上昇角  $\beta$  で決定される観測点での応答を計算した。なお、観測点の数は、側方角  $\alpha$  を  $0^\circ$ 、 $\pm 18^\circ$ 、 $\pm 36^\circ$ 、 $\pm 54^\circ$ 、 $\pm 72^\circ$ 、上昇角  $\beta$  を  $-90^\circ$  から  $10^\circ$  ごとに  $260^\circ$  までとしたので、合計  $9 \times 36 = 324$  点であった。次に、各観測点で得られた応答を、頭部を除去して頭部中心にガウシアンパルスを印加したときの応答で除して HRTF を求めた。なお、空間解像度が 2 mm なので、14 kHz までの HRTF を計算した[6]。

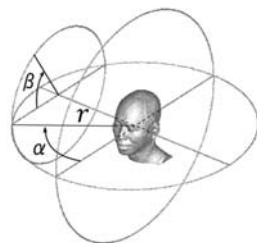


図 13.2 側方角  $\alpha$ 、上昇角  $\beta$ 、頭部中心からの距離

次に、ある周波数における HRTF の音圧レベルの空間分布を頭部中心から 0.5 m 以内の空間で可視化した。これは、左の外耳道入り口に音源を置き、ある周波数で励振したときの空間内の全ての格子点における音圧を FDTD 法で計算し、距離減衰で正規化することによって求められる。そして、この計算結果を 12 dB、6 dB、0 dB の等値面がそれぞれ橙、黄、緑に、0 dB 未満の部分が青になるようにして可視化した。

### 13.3 結果と考察

12 名の被験者のうち、側方角と上昇角に対する N1 のパタンが最も典型的であった F1 の結果について述べる。図 13.3 の左のパネルは F1 の 5 つの側方角における HRTF を横軸が主は数、縦軸が上昇角、色がレベルとして表示したものである。図 13.3 の中央のパネルは、7 kHz で励振したときの正規化した HRTF の音圧レベルの分布を示す。これは、右パネルの赤で示すように、左下方と左上方の 2 方向に強い放射が起きており、その間に挟まれるように音圧レベルが低い領域が存在



することを示している。この図の側方角 0 度（正中面）の赤丸で囲んだ音圧レベルが低い領域は、左のパネルの側方角 0 度の赤丸で囲んだ HRTF の N1 に対応する。この音圧レベルが低い領域は、他の側方角においても N1 に対応する。なお、この音圧レベルが低い領域は、励振周波数が下降すると下方に、上昇すると上方に移動した。

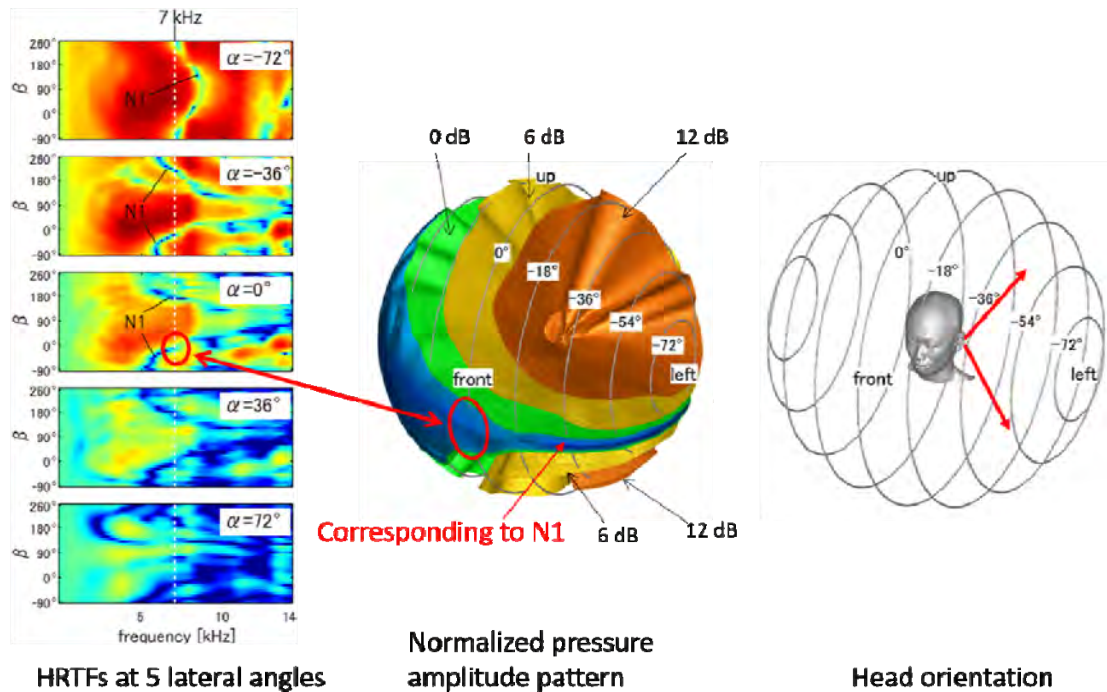


図 13.3 左：F1 の 5 つの側方角に対する HRTF，中：正規化した音圧振幅の分布，右：頭部の位置と放射方向

次に、この N1 に対応する音圧レベルが低い領域の成因について考察する。図 13.4 は 6.0, 7.0, 8.0 kHz で励振したときの F1 の左の外耳道入り口を通る矢状面における瞬時音圧の分布を可視化したものである。6.0 kHz で励振した時はそれほど明確ではないが、7.0 kHz と 8.0 kHz で励振すると上下 2 つの方向に位相が異なる放射が生じ、その境界では打ち消し合って音圧の節が生じている。これらの事実から、図 13.3 で示した N1 に対応する音圧レベルが低い領域は、耳介の上下方向に生じた 2 つの放射点からの位相差を考慮した経路差がちょうど半波長になって音圧変動が極小になることによって生じたと考えられる。

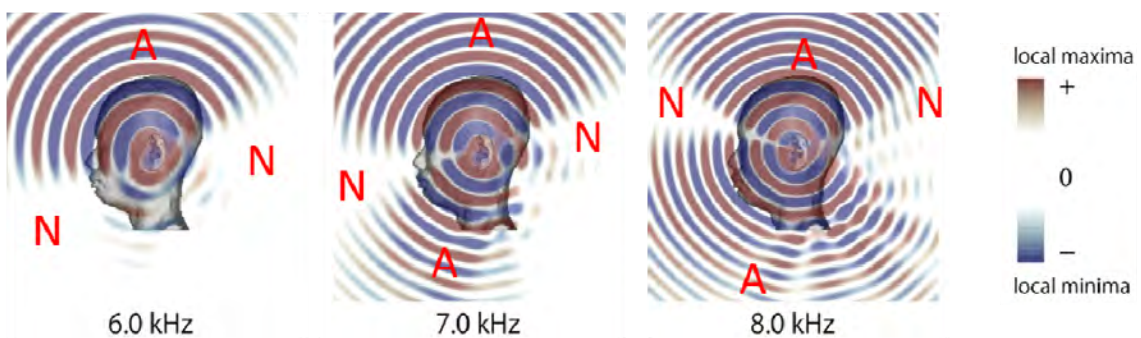


図 13.4 外耳道入り口を通る矢状面における瞬時音圧分布。A：音圧の腹，N：音圧の節

さらに、励振周波数が高くなると、図 13.3 で示した N1 に対応する音圧レベルが低い領域が上

方へ移動するメカニズムについて考察する。図 13.4 で示す瞬時音圧の分布を詳細に検討したところ、2つの放射は図 13.5 の S1（耳甲介腔の下端）と S2（三角窩の下端）の付近で生じていた。2つの放射点 S1, S2 からの位相差 $\varphi$  を考慮した経路差が半波長となる点 P の軌跡、つまり N1 に対応する音圧レベルが低い領域は以下の式で表される。

$$\overline{S_1 P} - \overline{S_2 P} = \frac{\varphi - \pi}{k} \quad (13.1)$$

ここで、 $k = 2\pi f/c$  で  $c$  は音速である。この式は S1, S2 を焦点とする双曲面を表している。また、S1, S2 の位相差は、6.0 kHz で  $0.67\pi$ 、7.0 kHz で  $0.78\pi$ 、8.0 kHz で  $1.12\pi$  であった。つまり、励振する周波数が高くなると位相差は増大する。図 13.5 右は、これら 3つの周波数と位相差を式(1)に代入してプロットした双曲面である。これは、周波数が高くなって位相差が増大すると双曲面が上方に移動することを示している。つまり、N1 に対応する音圧レベルが低い領域が励振周波数の上昇とともに上方に移動したのは、2つの放射点の位相差が増大したためである。

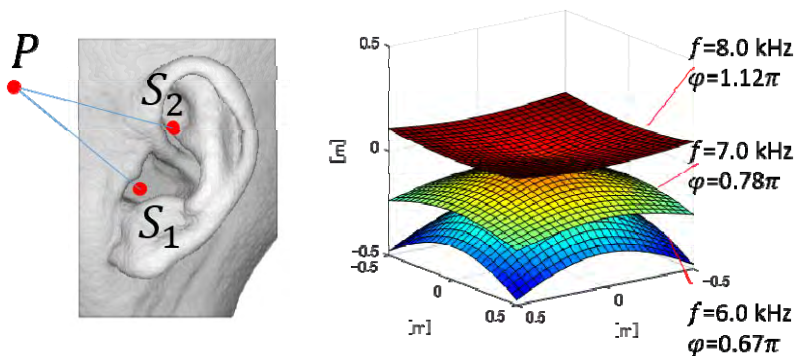


図 13.5 左：仮想的な 2つの放射点，右：幾何学的に音圧変動が極小になる領域

なお、双曲面は矢状面においては双曲線となる。ここでは、正中面における音源の仰角と N1 周波数の関係を定性的に議論するために、S1, S2 が正中面にあり、頭部中心が S1 と S2 の中点にあるとみなす。すると、N1 に対応する音圧レベルが低い領域を表す双曲線の漸近線の仰角 $\beta$  は、周波数 $f$ 、位相差 $\varphi$ 、S1 と S2 の距離 $\overline{S_1 S_2}$ を用いて、以下の式で表すことができる。

$$\beta = \begin{cases} \tan^{-1} \frac{\varphi - \pi}{\sqrt{(2\pi f/c \cdot \overline{S_1 S_2})^2 - (\varphi - \pi)^2}} \\ \pi - \tan^{-1} \frac{\varphi - \pi}{\sqrt{(2\pi f/c \cdot \overline{S_1 S_2})^2 - (\varphi - \pi)^2}} \end{cases} \quad (13.2)$$

ここで、上の式は頭部前方の漸近線の仰角、下の式は頭部後方の漸近線の仰角である。つまり、この式は、音源の仰角 $\beta$ と N1 周波数 $f$ の関係を表している。前述したように、位相差 $\varphi$ は周波数 $f$ に伴って増加することを考慮し、S1 と S2 の距離 $\overline{S_1 S_2}$ を適当に与えて式(13.2)をプロットすると、図 13.6 となる。これは、図 13.1 で示す正中面における音源の仰角 $\beta$ と N1 周波数 $f$ の関係とよく一致し、音源が上方に近づくほど N1 周波数は上昇するパターンが現れた。すなわち、耳介上に周波数が高くなるほど位相差が大きくなる 2つの放射点を仮定すれば、正中面における音源

の仰角と N1 周波数は、2つの放射点を焦点とする双曲線の漸近線として定式化できることが示唆された。

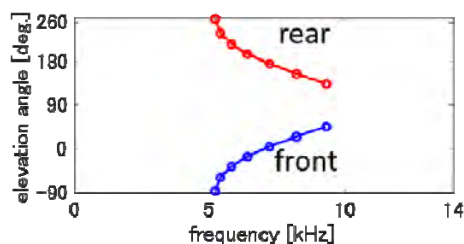


図 13.6 正中面における音源の仰角 $\beta$  と N1 周波数 $f$  の関係

#### 13.4 まとめ

この報告書では、正中面における音源の仰角と N1 周波数は、耳介上に仮定した 2つの放射点を焦点とする双曲線の漸近線の式で定性的に関係づけられることを示した。そして、この式により、音源が上方に近づくほど、N1 周波数が上昇することを示すことができた。しかし、放射はある程度の広がりを持つ領域で生じるため、2つの放射点を簡単には特定できない。また、周波数の上昇と位相差の増大の関係性についても詳細に検討する必要がある。もし、これらの問題を解決できれば、耳介形状などから正中面における音源の仰角と N1 周波数を求めることが可能になると考えられる。

#### 参考文献

- [1] Iida, K., Itoh, M., Itagaki, A., and Morimoto, M. (2007). “Median plane localization using a parametric model of the head-related transfer function based on spectral cues,” *Appl. Acoust.* 68, 835–850.
- [2] Raykar, V. C., Duraiswami, R., and Yegnanarayana, B. (2005). “Extracting the frequencies of the pinna spectral notches in measured head related impulse responses,” *J. Acoust. Soc. Am.* 118, 364–374.
- [3] Pierce, A. D. (1989). *Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications* (Acoustical Society of America, Melville, NY), pp. 180–183.
- [4] Takemoto, H., Mokhtari, P., Kato, H., Nishimura, R., and Iida, K. (2016). “A dipole model for estimating frequency versus elevation-angle trajectory of the first spectral notch of head-related transfer functions in the median plane,” *J. Acoust. Soc. Am.* 140, 2957.
- [5] Takemoto, H., Mokhtari, P., and Kitamura, T. (2010). “Acoustic analysis of the vocal tract during vowel production by finite-difference time-domain method,” *J. Acoust. Soc. Am.* 128, 3724–3738.
- [6] Mokhtari, P., Takemoto, H., Nishimura, R., and Kato, H. (2007). “Comparison of simulated and measured HRTFs: FDTD simulation using MRI head data,” 123rd Audio Engineering Society (AES) Convention, New York, Preprint No. 7240, pp. 1–12.

## 14. 聴感を始めとする顧客の感性を考慮した設計手法

### 聴覚を始めとする顧客の感性を考慮した設計手法についての検討

関 研一(社会システム科学部, プロジェクトマネジメント学科)

#### 14.1 はじめに

民生機器の開発は、機能の継続的な追加によって、サイクルの早い進化を続けている。市場で、ユニークさ、競合商品との差別化を実現するために、物理量で測ることができる機能に加えて、使い心地や、イメージのよさ等、顧客の感性に訴える商品フィーチャーを商品開発の目標の一つとすることが多い。後者の多くは顧客の感性で評価される感性品質である。感性と工学の関係は曖昧な点が多く、工学設計における感性品質の作りこみには工夫が必要となる。自動車の開発においては、騒音性能に対して、物理的な設計制約のみでなく、顧客の聴感を加味した工学指標を用い、感性を考慮した商品開発が長く行われている<sup>(1)</sup>。

長町<sup>(2)</sup>は、人の感性やイメージを設計要素に翻訳して感性に合った商品を開発する手法を提案し、大沢ら<sup>(3)</sup>は、人が様々な対象に対して抱く印象を工学的に扱おうとする取り組みを印象の工学とした。機械工学の領域でも、大富<sup>(4)</sup>、柳澤<sup>(5)</sup>、戸井<sup>(6)</sup>他、多くの取り組みがある。著者も、商品開発プロセス改善の視点から、要求分析、機能設計、構造設計を繋ぐ感性設計手法を提案、産業界の課題について検討を重ねてきた<sup>(7)(8)</sup>。民生機器の商品開発においては、作り手の想いを起点に、顧客の心理や情動に対する深い理解と、新たな価値の予測から商品の企画や設計を進める必要がある。本報では、顧客が商品をどのようなシナリオで使用するかを想定し、その使用プロセス自体が楽しいと感じてもらえるための、感性を考慮した商品設計の取組について概説する。

#### 14.2 感性設計手法の概要

##### 14.2.1 顧客の使用状況を考慮した要求分析

「心の琴線に触れる商品」という表現がある<sup>(9)</sup>。図 14.1 に示すように、人がモノを使う際には、

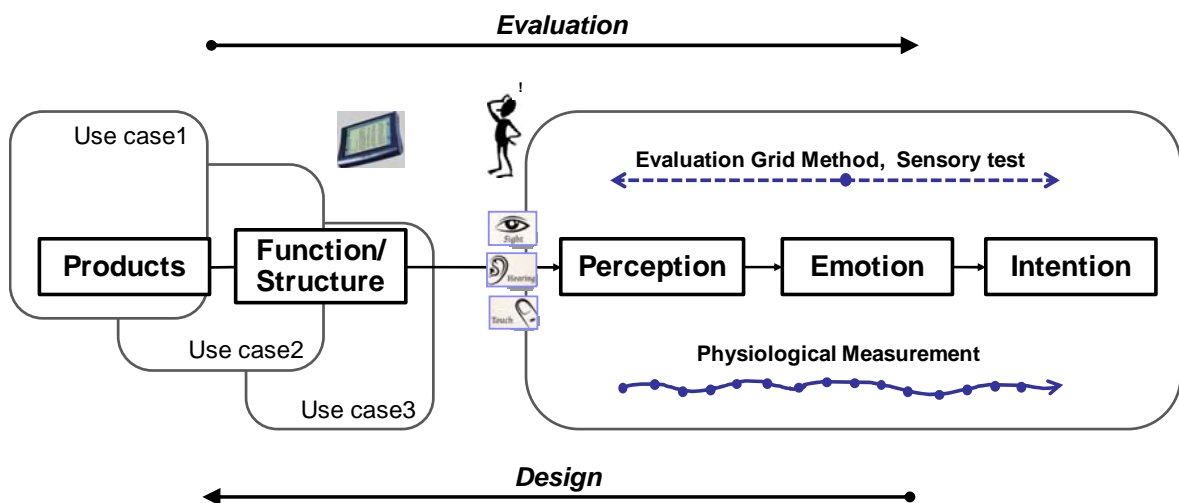


Fig. 14.1 Product/customer relations

複数の使用状況(Use case)のなかで、五感を通してモノの各部を知覚し(Perception)、それに対してある印象や情動が想起され(Emotion)、体験が深く記憶に残る。このイメージの想起、価値の認識等の一連の体験が、商品を購入する際の購買の意思決定に繋がる(Intention)と考えている。民生機器の商品開発において、著者らが提案する感性設計手法では、最初に、想定顧客に対して使用状況を考慮した要求分析が行われる。使用状況と商品に対する要求との関係を明らかにするために、複数の使用状況を想定した評価グリッド法<sup>(10)</sup>を実施し、顧客の要求構造を可視化する。各要求の依存関係から顧客要求を類似度でクラスタリングし、使用状況と紐づけて整理することによって、商品企画、後の機能設計にて効率的な活用が可能となる。具体的には、感性品質を定量的に評価するために、SD法<sup>(11)</sup>など形容詞を用いて点数評価する評価試験が行われるが、その際に使用する形容詞を、使用状況と関係づけられた要求クラスごとに準備することにより、使用状況に応じた評価が可能となる。

#### 14.2.2 感性品質の定量化、商品仕様、設計への受け渡し

次に、先行して市場に出ている商品や、試作品を用いて、想定顧客の感性に基づき、商品の印象を感性品質として数値化する。ここでは、14.2.1で検討した評価語を用いて評価試験が行われる。並行して、心拍変動、脳波等の時間軸で感性情報を抽出できる生理測定も実施することにより、心理、生理の両面から、数値指標を用いた感性品質の定義が可能となる。統計解析などによりこれらの値と商品の物理的な特性(工学指標)との相関関係を分析し、蓄積することによって、感性品質を商品の物理構造に効率的に転写することが可能となる。

#### 14.3 設計対象と感性設計手法を適用する目的

ここでは、設計対象としてカメラを題材として取り上げ、図14.2に示す商品開発プロセスと、商品の設計情報の関係図を用いて、感性設計手法を用いて具体的にを行う設計における意思決定項目を説明する。

図14.3に一例を示したように、複数の使用状況を考慮した要求分析により、顧客要求が深く広く抽出される。さらに、14.2.2節で示した感性品質の数値指標を用いて、ターゲットとする顧客の感性に訴求する商品仕様(システム要求)を定義することができる。個々の製品開発プロジェクトごとに個別に感性品質を定義せず、因子分析により求めた上位レベルでの感性のものさしを用いることによって、機種シリーズ間での訴求ポイントの変化や、上位概念としての商品の企画コンセプトとの整合性も図り易くなる。作り手の想いと、顧客の感動との間の擦り合わせが、商品企画構想の段階から行われる。カメラの場合、商品本来の機能である撮像機能に加え、さらに、画質、音質など五感に関わる感性品質にも着目し、設計目標(システム要求)として設定する。民生機器の商品開発においては、コスト、時間等の制約のなかで設計検討が行われるため、構造設計段階では、感性設計手法を適用しながら、機能と感性品質のトレードオフを随時判断し、量産設計としての現実解を求めることとなる。



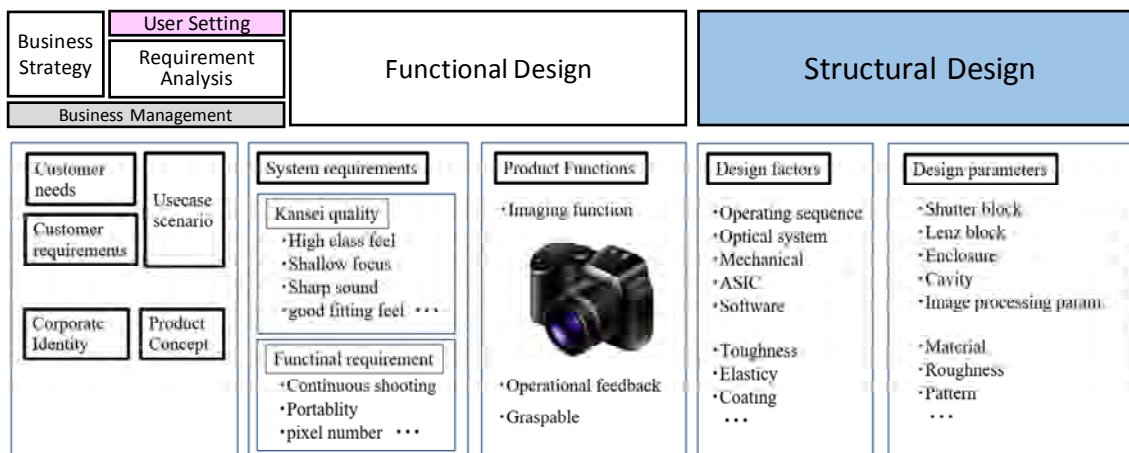


Fig. 14.2 Product development process and design information

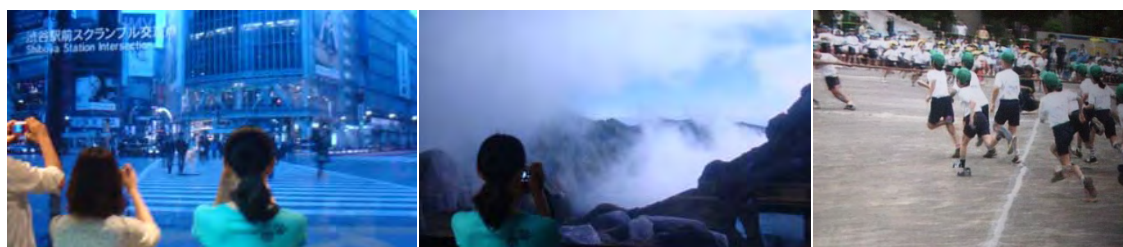


Fig. 14.3 Use Case of photography

## 14.4 感性設計手法の適用と効果

### 14.4.1 カメラのシャッター音の音質設計

この節では、使用状況ごとに異なる顧客要求を抽出するために、カメラを用いた撮影に関する複数のシナリオに対して、評価グリッド法による要求分析を行う。使用状況としては、子供が活躍する決定的瞬間を逃さず記録する必要がある、且つ、周囲は人で混雑しており、ダンスの曲や騒音のなかで撮影しなければならない「運動会」を始め、「壮大な山の景色」、「都市の街中」、「自然の中で活動する動物」の4つの映像を用意した。評価テストでは、臨場感を出すため、これら4つの映像を4Kプロジェクターを用いて大型ディスプレイに10分間ずつ投影した。被験者には、映像の前でカメラを構えたり撮影したりするなど、自由に全ての機種を操作してもらった。すべてのカメラを使用した後に、好ましさについて順位をつけてもらい、要求を階層構造的に質問するインタビューを1人ずつ行った。次に、評価グリッド法の結果得られたネットワーク図における顧客の全ての回答語句を縦横軸とする Design Structure Matrix (DSM)を作成した。このDSMに対してクラスタリング分析を適用し、要求項目が複数の要求クラスターに分割された結果を図14.4に示す。●マークは回答語句間にネットワーク図における相関があるもの、Sは、音に関する要求を表している。

分析の結果、類似度の高い要求がクラスタリングされ、要求の内容について解釈を行うことが容易になる。音に対する要求を引き出すために想定した今回の使用状況からは、カメラに対する7つの要求クラスターが導出された。7つのクラスターの要求項目を解釈しまとめた内容と( )内に

音に関する要求を以下に示す。

1. 写真が撮れたとわかる（昔ながらのカメラの音，撮れたとわかる音，明瞭感のある音，金属的な音，メカニカルな音）
2. 気軽にファッションブルに使用したい（なし）
3. モダンなデザインがよい（なし）
4. カメラを格好よく使用したい，他人に格好よい自分を見せたい（シャープな音，メカニカルな音，フィードバック感のある音）
5. きれいに撮りたい，思い通りに撮りたい（心地よい音，高級感のある音，キレイのいい音）
6. シーンに合う，静かな音を求める（静かな音，周囲に馴染む音，やわらかい音，短い音）
7. 撮る機能（昔ながらのカメラの音，重たい音，撮れたとわかる音）

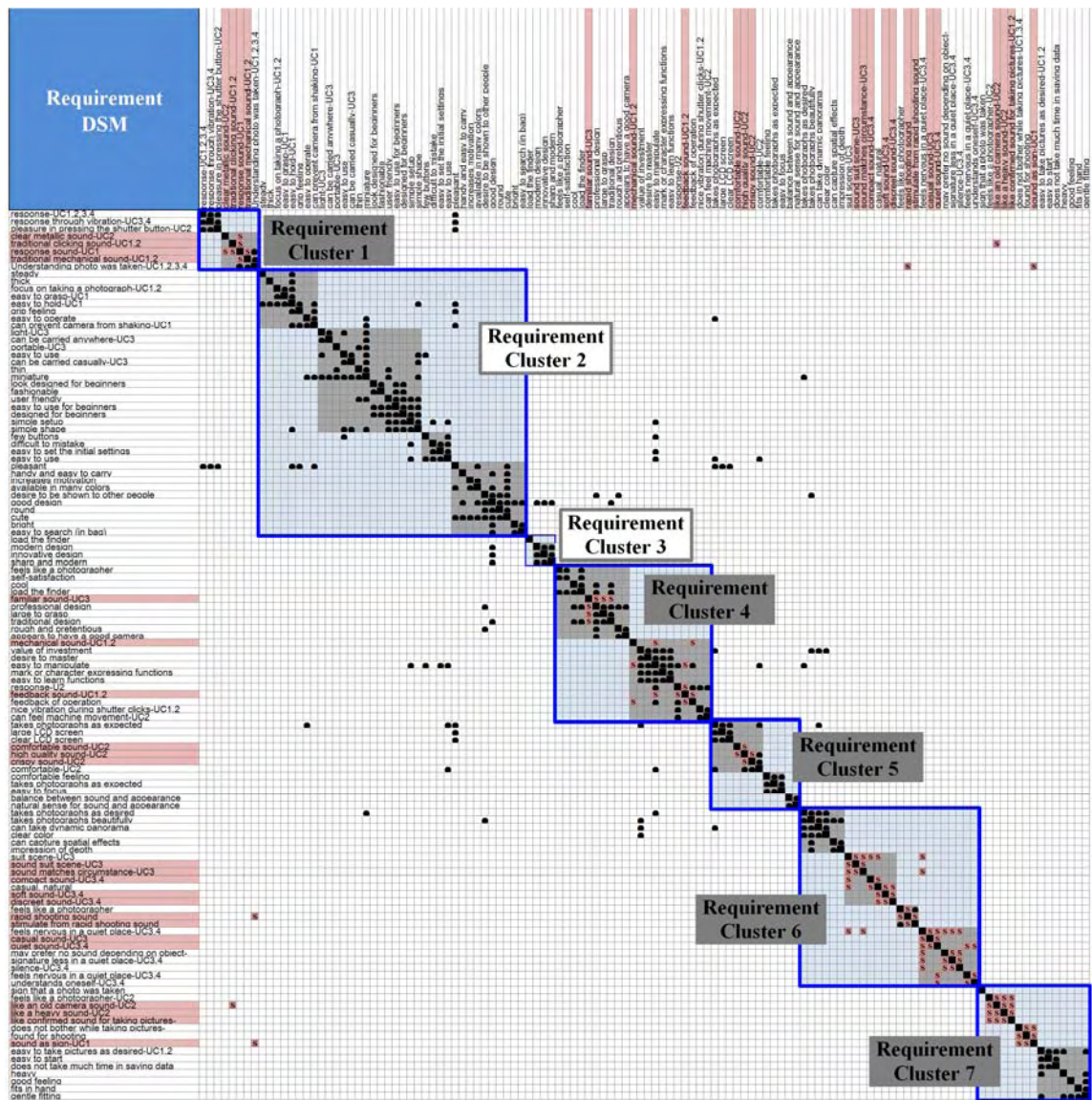


Fig. 14.4 Requirement DSM

図 14.5 は、Domain Mapping Matrix (DMM)を用いて、使用状況と要求クラスタ、要求クラスタと要求を表す形容詞との関係を表記した結果を示している。使用状況と要求クラスタの関係は、図 14.4 に示す各要求クラスタの要求項目に記載された UCi の表記から、どの使用状況と多く関係しているかを分析し、依存関係を導くことができる。形容詞は、上に示した要求クラスタの内容と、音に関する要求が含まれている場合はその音を評価できる語を選定し、各要求クラスタと紐づける。

以上の結果を用いて、運動会でカメラを使用する使用状況を考慮し、シャッター音の音質目標の方向性を定める例について説明する。図 14.5 に示した Use case-Requirement cluster DMM から、運動会の使用状況では、要求クラスタ 1, 2, 4, 5, 7 が要求されていることがわかる。また、Requirement cluster - Evaluation word DMM を用いて、これら 5 つの要求クラスタの要求内容を表現する評価語が選定できる。このようにして選定した評価語を、従来シャッター音を評価していた評価語に加え、既存のシャッター音 5 機種に対して 20 名を対象に、SD 法による官能評価を行った。評価結果に対し因子分析を行って複数の音色因子を導出し、従来の結果と比較した。使用状況を想定しない従来の評価語で得られていたのは、重厚因子、金属因子、美的因子という、一般に音の性質を表す因子であった。提案する手法で選定した評価語を加えた評価結果に対し因子分析を行うと、撮れた感じやフィードバック感を表現する応答感に関する因子や、カメラらしい心地よさに関する因子というような、使用状況に基づく要求を評価できる新しい因子が得られた。これらの音色因子を主観指標として縦軸に用い、評価音源 A から E の因子得点をプロットした評価結果を図 14.6 に示す。図 14.6 (a) は、横軸に従来得られていた金属因子を用い、縦軸に新しく得られた快適感を表す因子を用いている。

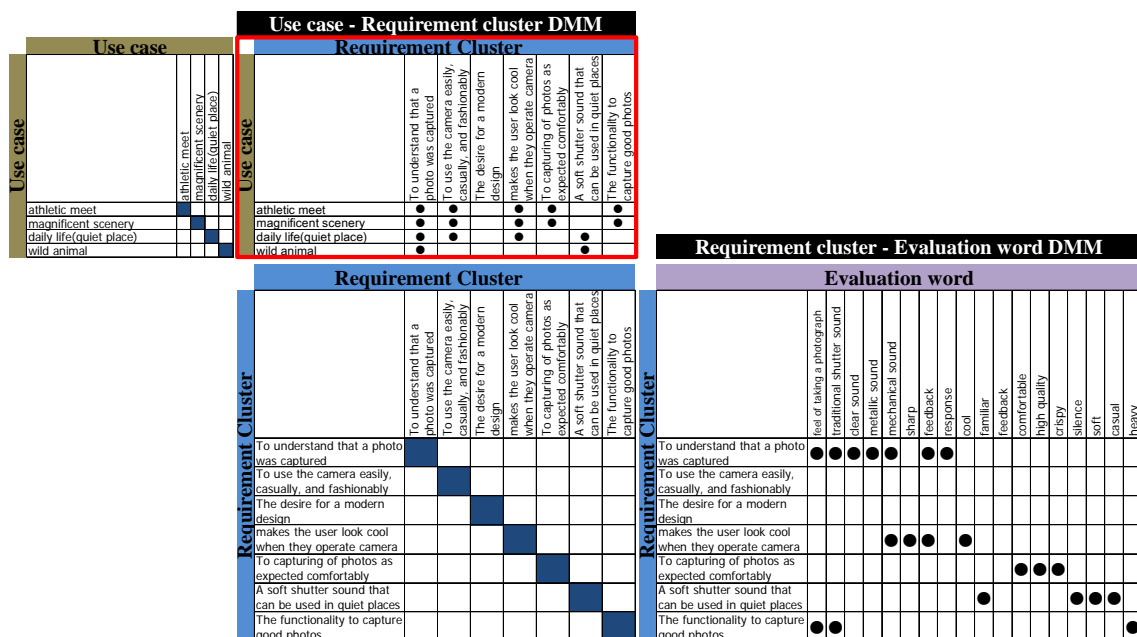


Fig. 14.5 Use case, Customer requirements, and Evaluation words for sensory test



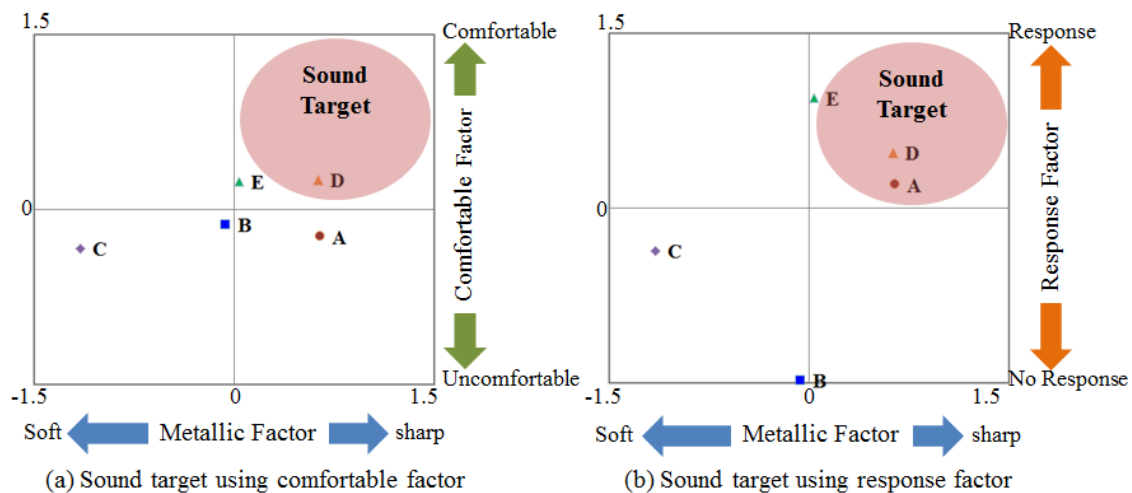


Fig. 14.6 Use case, Customer requirements, and Evaluation words for sensory test

図 14.6 (b) は、横軸に従来得られていた金属因子を用い、縦軸に新しく得られた応答感を表す因子を用いている。(a) (b) とともに、従来得られていた金属因子で評価した場合、音源 B と音源 E では明確な差が得られなかったが、縦軸に示す (a) 快適感や (b) 応答感など、本手法で得られた新しい因子を評価軸として用いることで、より明確に 2 つのシャッター音の差が表現できるようになった。この手法により、従来得られなかった使用状況ごとの要求を表現できる評価軸が得られ、その軸を用いて因子得点で定義することにより、音質目標の方向性を定めることができるようになった。

最後に、図 14.2 に示すように、設定した感性品質を、構造設計で実現させた例を示す。

図 14.7 に示すようなカメラのシャッター音において、キレイのいい音、明瞭感のある音を阻害する物理要因として「不快な響き」が存在する。この音色は、シャッターを切った際にシャッターブロック内でシャッター幕が開閉する音が、内部空間形状の固有振動モードと一致した際に発生する気柱共鳴音が主な原因である。図 14.8 は、カメラシステムにおいて、機器音を放射する音響・振動のメカニズムをアクティビティ図で示したものである。ここでは、「不快な響き」を低減させるため、図 14.9 に示すように聴感上敏感な周波数帯域の音圧を一定の値以下にすることを音質目標とする。共鳴を避けるためには、システム構成部品の材質や形状、接続状態による伝搬経路等の振動特性と、レイアウトや空間形状等の音響特性という、相互に絡み合うパラメータを管理・統制する必要がある。図 14.10 に、音響-振動連成シミュレーションを用いてシャッター音の予測を行った結果を示す。剛性を保持しつつ振動を抑制するように、シャッターブロックの材質を一

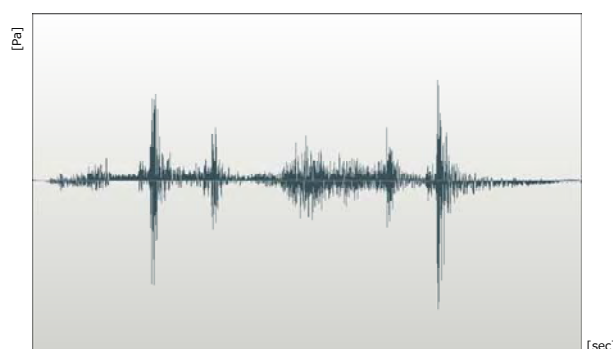


Fig. 14.7 Camera Shutter Sound

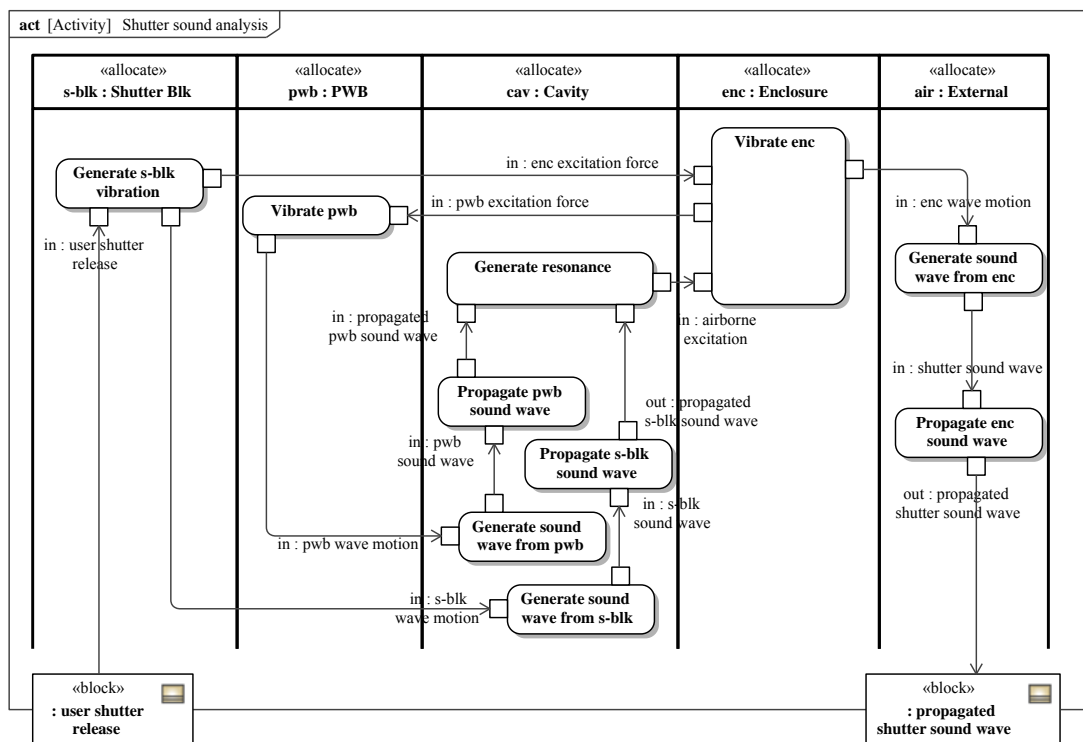


Fig. 14.8 Shutter sound analysis in activity diagram

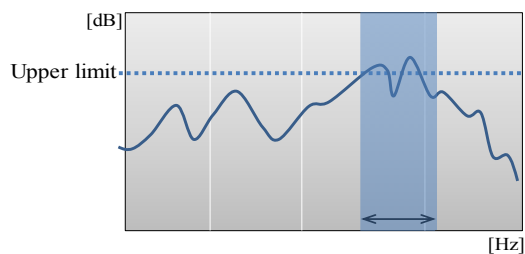


Fig. 14.9 Sound quality target

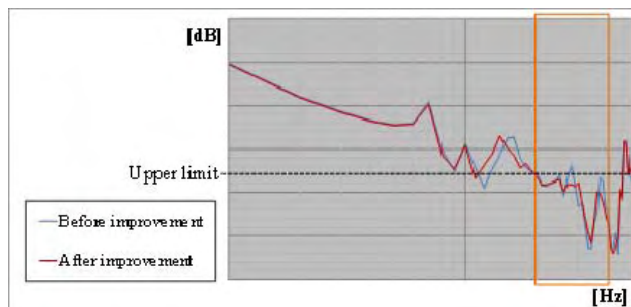


Fig. 14.10 Vibro-acoustic simulation of camera shutter system

部変更したモデルでは、聴感上敏感な周波数帯域で、ユーザーの耳位置での音圧が低減し、目標音質が達成できていることを示している。

図 14.11 に、カメラのシャッター音の音質設計の各プロセス間の連携 MDM を示す。要求定義のプロセスでは、ユースケースと要求クラスタとの関係（図 14.11 ①）を Use case-Requirement cluster DMM, 要求クラスタとクラスタの要求内容を表す評価語との関係（図 14.11 ②）を Requirement cluster - Evaluation word DMM を用いて表記する。また、これら評価語と、評価語を使用した官能評価に対する因子分析から得られた音色因子との関係（図 14.11 ③）は、Evaluation word - Tonal factor DMM により表記できる。図 14.11 に赤枠で示したこれら 3 つの DMM を用いることで、ユースケースに応じた要求がわかり、各要求を表現する適切な評価語を選定することができる。また、その評価語を用いた官能評価結果に対する因子分析結果から、ユー

ザーの要求を反映した音色因子が主観指標として得られることを示している。機能設計プロセスでは、要求定義のプロセスで得られた音色因子と、音質メトリクスとの関係 (図 14.11 ④) に対し、回帰分析を用いて関係解析を行う。解析から得られた回帰係数は、Tonal factor - Sound metrics DMM の要素として蓄積される。この回帰係数と音質メトリクスを用いて、音質目標を定量的に設定することが可能になる。音質メトリクスと、周波数特性や SPL などの工学指標 (Engineering Metrics) の関係 (図 14.11 ⑤) についても同様に、過去機種での測定データの蓄積から、Sound metrics - Engineering metrics DMM で関係を表記できる。

構造設計プロセスでは、工学指標と、カメラの構造を構成するモジュールレベルの要素との関係を示し、それぞれのドメイン内依存関係は DSM で表記ができる。

このように、諸言で述べた、ユースケースごとの要求と機能・構造設計間の設計情報の依存関係が音質設計を進める間に失われて、要求が機能および構造設計に反映されているかどうか不明確になってしまうという課題に対しては、プロセス間の設計情報の依存関係を DMM で残し、音質に関わる設計情報を MDM に基づいて管理することで解決できることを示した。またプロセスをま

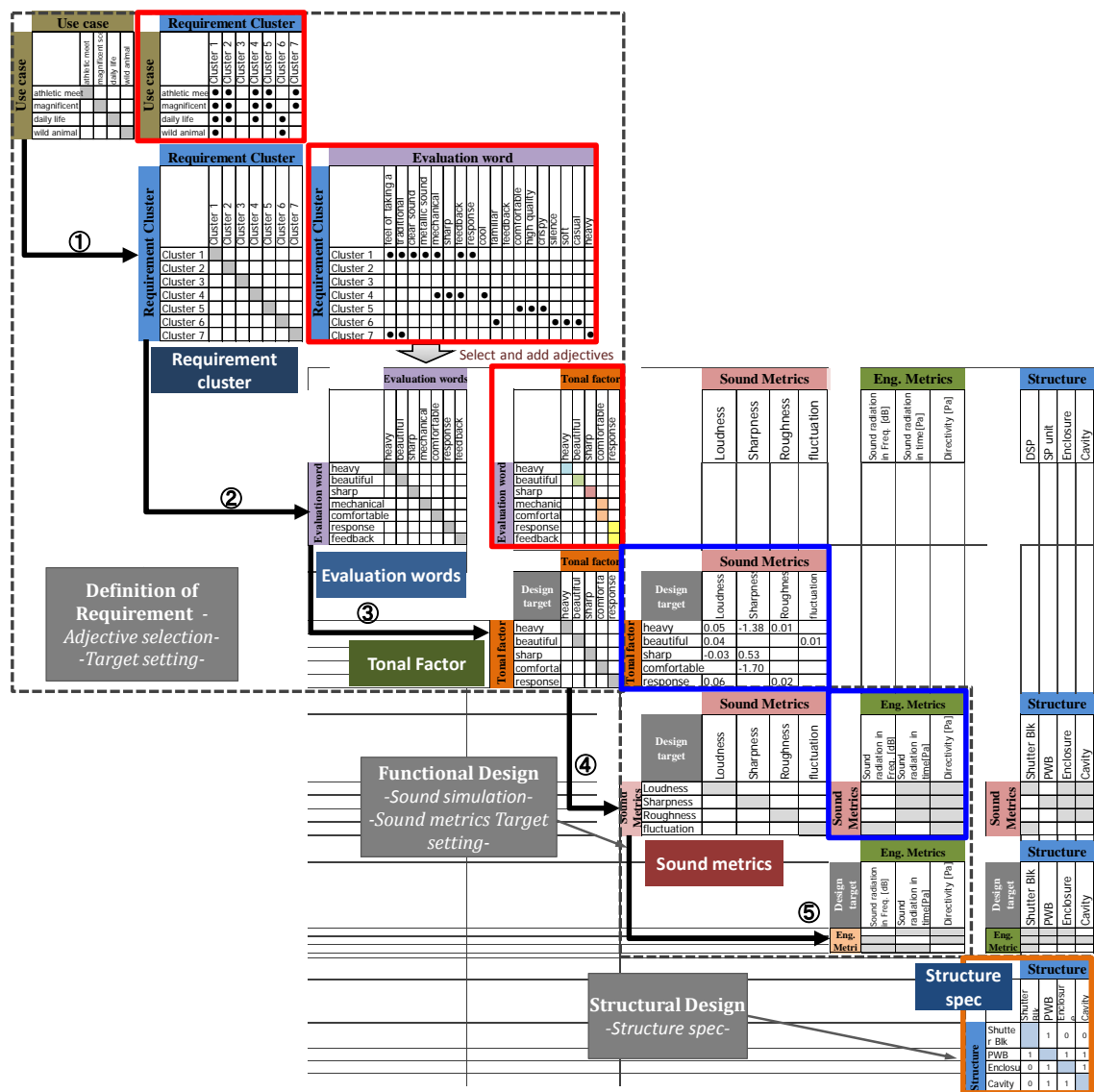


Fig. 14.11 MDM-based sound quality design for shutter sound

たいで設計情報の管理を行うことで、容易にトレーサビリティをとることができ、要求変更管理や構成管理に活かすことができる。また提案した MDM を用いることにより、各プロセスで残さなければならない設計情報が明確になり、各プロセスを担当する関係者間で共有できるフレームワークが造れることを示唆した。

#### 14.4.2 カメラを使用する顧客の時間軸での行動分析の事例

著者らは、製品を手にとった時に”ハッとする”，あるいは持っているだけ，また，使うことによって”ワクワクする”など，顧客の感性に訴求する商品の設計に関して検討を行っている。まず，上記において製品を取捨選択する際の瞬時的な気持ちの変化を検出するために，非侵襲的脳波測定器を用いた実験を行った。今回使用した測定器は，興味・集中・ストレス・好き・鎮静の度合いがリアルタイムにわかる装置である。これらの指標の算出法については参考文献<sup>(14)</sup>にあげているので詳しくは割愛するが，1秒ごとにリアルタイムで感情を捉えることができる。図 14.12 は実験方法の概要である。

実験は，20代から60代の男女各3名ずつ，合計30名に対してカメラを選ぶ設定とした。実験には既製品の様々な形態，形状，特性を持ったカメラを6種類用意し，以下の手順で実験を行いながら脳波を計測した。

STEP1：それぞれのカメラの特性について説明を受ける。

STEP2：自由に触れてもらう

STEP3：すべてのカメラで自由なシーンを撮影する

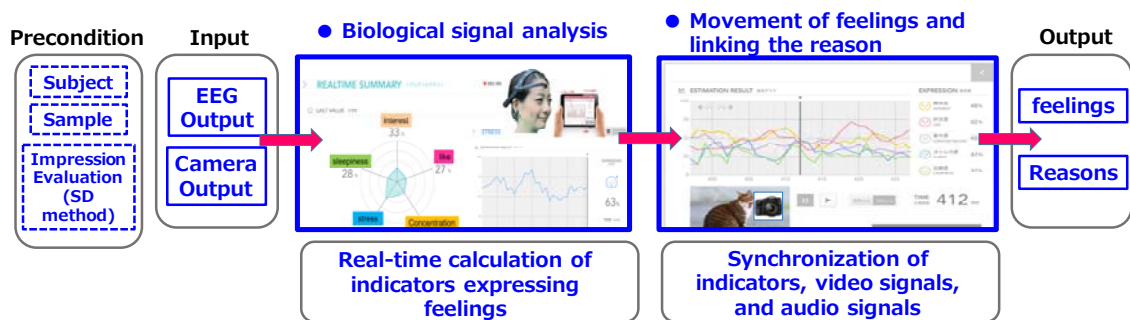


Fig. 14.12 Proposed test flow



Fig. 14.13 Experimental situation

上記 Step1-3 を 30 名の被験者全員に対して行った。また実験中はビデオ撮影を行い、自由に発せられる言葉と行動を記録した。実験中は常に脳波計測を行い、リアルタイムに興味・ストレス・集中を計測した(図 14.13)。結果の一例を図 14.14 に示す。X 軸は時間[sec]を Y 軸は興味、ストレス、集中の度合いを示している。これらの結果をもとに、それぞれの感性が急激に高くなったところ、ならびに急激に落ちたところを検出した。その時点での言葉や動作を抽出し、解析を行った。図 14.14 の図中三か所の矢印で、興味の高まりが観察され、始めの二回は、シャッター音のタイミングに一致している。最後の矢印のタイミングでは、カメラを両手でしっかり握り、遠目で眺めながら「しっかりとカメラですね」と発言している。また、シャッター音に同期した前二回の峰には、フォーカス調整完了のサイン音と、シャッター機構の機械音の其々のタイミングに同期した小さな二つのピークが観察できる。ここで示した例はあくまでもまだ研究の初期段階であり、今後より詳細な解析が必要ではあるが、一連の評価を行った後に実施する SD 法による静的な印象評価の結果とともに、時間軸での生理測定によって、より細かな顧客の感性変化が抽出できる可能性を確認することができている。

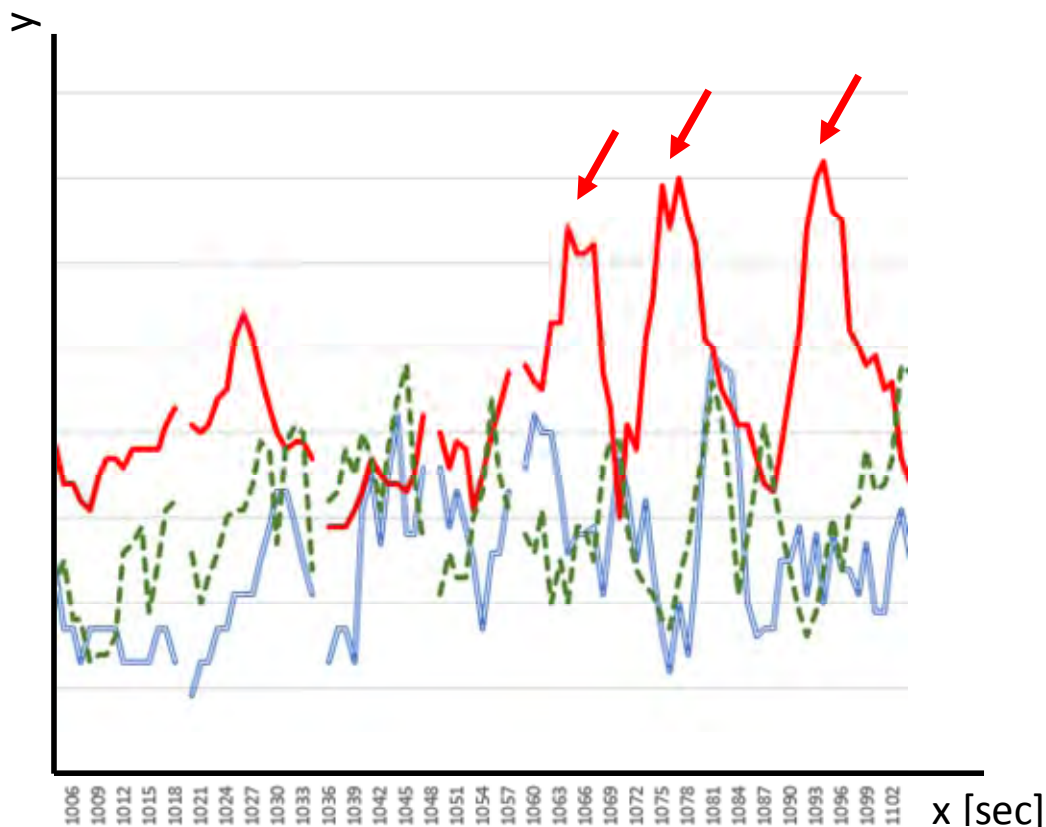


Fig. 14.14 EEG measurement results

(緑：ストレス，赤：興味，青：好き度，X 軸：時間[sec]，Y 軸：度合い)

時間軸での行動分析については、西藤<sup>(15)</sup>らは、場面の雰囲気づくりでは設計者の意図した雰囲気をユーザーに正確に伝えるための効果的な状況設計が必要とし、時系列感性評価を提案している。石田ら<sup>(16)</sup>は、感動要素を時間軸上に配置することを考慮した設計が製品やサービスの創出には重要とし、映画作品のシナリオに対する感動事象の分析をしている。民生機器の商品開発への感性設計の適用においても、参考になる取り組みである。

生理測定と心理測定を組み合わせることによって、上述の例のように、感覚間の相互作用の有り無しの予測や、各種感覚の組み合わせからなる一連の体験に対する人の反応等を把握でき、商品開発における感性設計適用の着目点を見出す意味でも有効であり、今後更なる検討が必要だと考えている。

## 14.5 おわりに

本報では、使用状況によって要求が変わり、想起される印象のモノサシを用意する上でも、使用状況の考慮が必用であることを、カメラのサウンドデザインを事例に示した。

また、あるシナリオに沿った時間軸上での感性の変化を計測し、静的な心理測定の結果と組み合わせ、解釈することによって、複数の感性の組み合わせからなる体験に対する、新たな価値創出の可能性があることを示した。

製品やサービスの設計が、モノの開発から、コトも含めた価値の創出に変化している中で、感性設計も、使用状況の考慮や、その中での感性の時間軸変化も含めて、作り手の想いと顧客の感動との間の擦り合わせを密にする方法として、設計手法の発展は続くと思われる。

## 参考文献

- 1) 中野光雄：ディーゼルエンジンの騒音低減技術（エンジン小特集），いすゞ技報，85，（1991），51-61.
- 2) 長町三生：感性工学—感性をデザインに活かすテクノロジー，海文堂出版（1989）.
- 3) 大沢光：「印象の工学」とはなにか，丸善プラネット（2000）.
- 4) 大富浩一：よくわかる デライト設計入門，日刊工業新聞社（2017）.
- 5) 柳澤秀吉，村上存，大富浩一，穂坂倫佳，感性の多様性を考慮した感性品質の定量化手法（製品音の設計における感性品質の定量化への適用），日本機械学会論文集C編，Vol. 74，No. 746（2008），2607-2616.
- 6) 戸井武司，風早聡志，機構設計によるカメラシャッター作動音の音質改善，日本音響学会誌 58(2002)，406-413.
- 7) 関研一，機械設計の視点から見た音のデザイン，日本音響学会研究発表会講演論文集（CD-ROM），春季，（2011），ROMBUNNO. 2-2-4
- 8) 山岸和子，ユンソンギル，西村秀和，関研一，音質目標に応じた音響-振動連成パラメータ設計のためのシステムモデル，日本機械学会年次大会講演論文集（CD-ROM）
- 9) 越智成之：CCD 誕生 40 周年，映像情報メディア学会誌，65，5 号（2011），691-697.
- 10) 讚井純一郎，乾正雄：認知心理学に基づく住環境評価に関する研究-1-レポートリー・グリッド発展手法による住環境評価構造の抽出，日本建築学会計画系論文報告集，367（1986），15-22.
- 11) Osgood, C. E., Suci, G. J. and Tannenbaum, P. H.: The measurement of meaning, University of Illinois Press (1957)
- 12) 山岸和子，大富浩一，関研一，西村秀和：ユースケースを考慮した要求分析に基

- づくコンシューマーエレクトロニクスの音質設計 (Multidomain matrix を用いた設計情報管理), 日本機械学会論文集, 84 巻, 859 号 (2018) .
- 13) 満倉靖恵, 関研一, 井上全人, 森田小百合, 西村秀和: 感性をリアルタイムで測り製品に生かす試み “デライト”を科学する, 日本設計工学会誌 , 52(7), (2017), 434-438.
  - 14) Yasue Mitsukura, “EEG Signal Pro-cessing for Real Applications”, Journal of Signal Processing, Vol. 20, No. 1 (2015), 1-7.
  - 15) 西藤栄子, 神宮秀夫: 効果的な状況設計のための時系列感性評価の可能性, 日本感性工学会論文誌 16(1), (2017) , 1-7.
  - 16) 石田泰博, 前野隆司: STAR フレームワークを用いた感動要素の時間軸配置の分析手法, 日本創造学会論文誌 21 巻, (2018), 22-41.