

# 雑踏音場シミュレーションによる公共空間の音環境印象評価

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

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

## 1 はじめに

### 1.1 研究背景

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

### 1.2 研究目的

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

### 1.3 研究概要

本システムは、幾何音響解析を用い公共

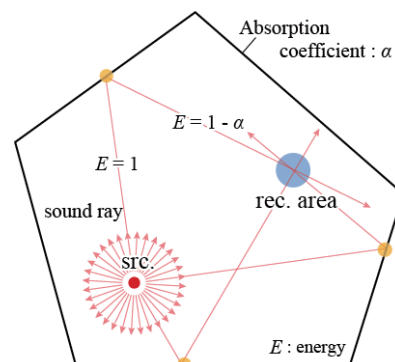


Fig. 1 Sound ray tracing method.

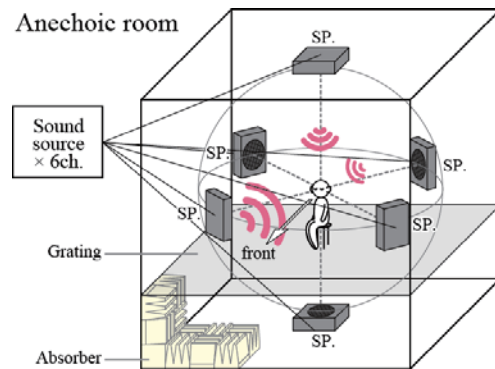


Fig. 2 6-channel reproduction system

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

## 2 研究手法

### 2.1 数値解析手法

解析には幾何音響解析(音線法)を用いる。音線法とは図1に示すように、音源から放出された多数の音線を追跡し、受音点に到

来するエネルギーの分布をインパルス応答として求める手法で、これが響きの情報を持つ。可聴化にはインパルス応答を音源に畳み込み、空間の残響を付加する。

## 2.2 音場再生手法

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

## 3 シミュレーションシステム概要

### 3.1 音源モデル

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

### 3.2 伝搬計算

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



Fig. 3 An image of public space for simulation.

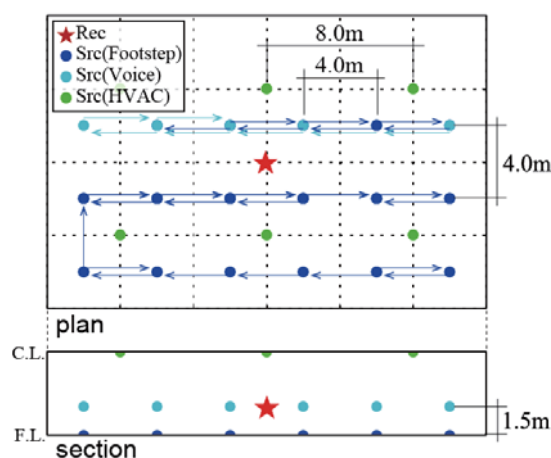


Fig. 4 Arrangement of sound sources.

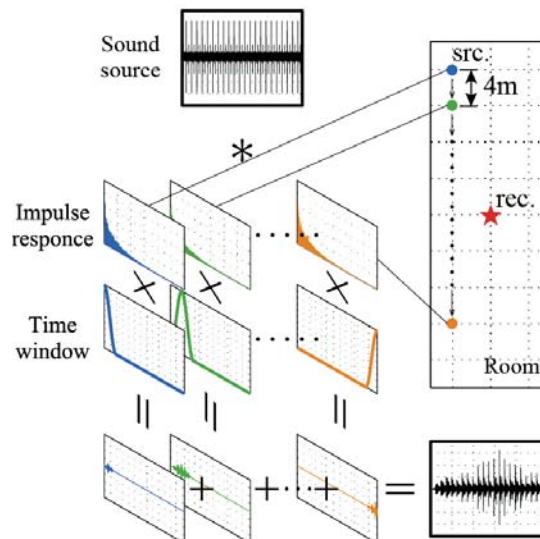


Fig. 5 Convolution of IRs for a moving sound source.

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

## 4 システムの妥当性の検証

### 4.1 実空間との比較

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

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

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

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

Tab. 1 Conditions of four simulated sound fields.

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

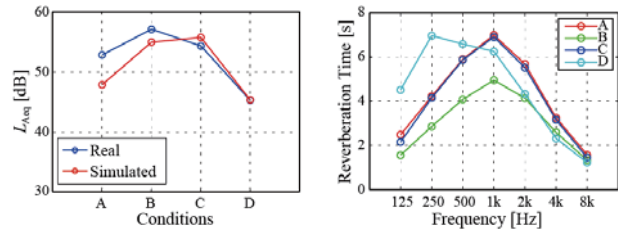


Fig. 6  $L_{Aeq}$  (left) and Reverberation times (right) for simulated sound fields.

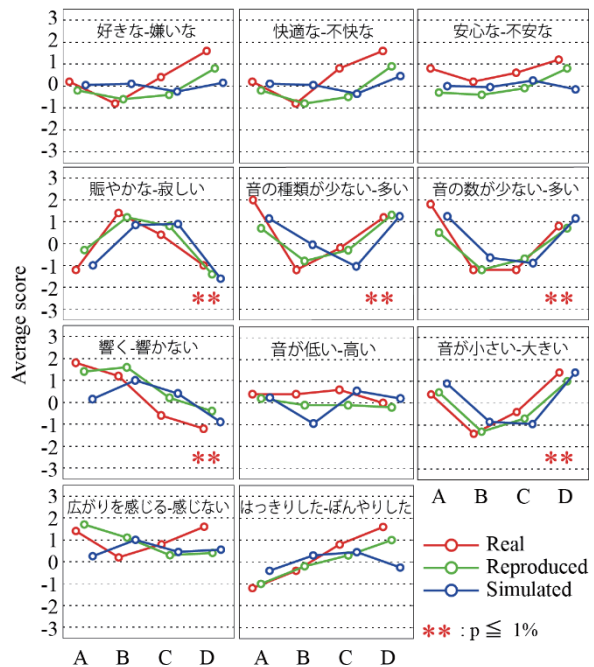


Fig. 7 Average scores and two-sided 95% confidence intervals for 11 evaluation terms.

### 4.2 条件変化による影響

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

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

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

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

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

## 5 おわりに

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

Tab. 2 Conditions of simulated sound fields.

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

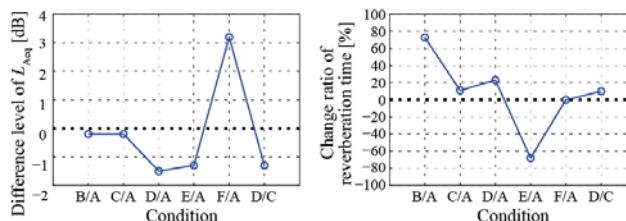


Fig. 8 Difference level of  $L_{Aeq}$  (left) and change ratio of reverberation times (right) for simulated sound fields.

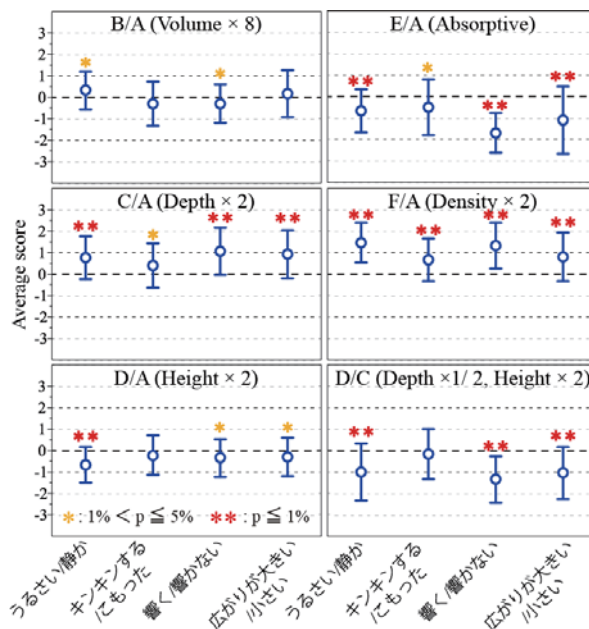


Fig. 9 Average scores and two-sided 95% confidence intervals for 4 evaluation terms by pairs.

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

## 参考文献

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